

RICHARD
DAWKINS



PEMBUAT ARLOJI
YANG BUTA

Richard Dawkins
Pembuat Arloji yang Buta

Daftar Isi

TENTANG PENULIS	4
Pengantar Edisi 2006	6
Prakata.....	9
Bab 1 Menjelaskan yang Muskil.....	13
BAB 2 Rancangan yang Baik	26
BAB 3 Mengakumulasi Perubahan Kecil	41
BAB 4 Meletak Jejak di Ruang Satwa.....	70
BAB 5 Kuasa dan Arsip.....	96
BAB 6 Asal-mula dan Mukjizat	116
BAB 7 Evolusi Konstruktif.....	137
BAB 8 Ledakan dan Puntiran	156
BAB 9 Menyela Kesetimbangan Bersela	177
BAB 10 Satu Pohon Kehidupan yang Sejati.....	200
BAB 11 Rival Bernasib Nahas	223
Lampiran (1991) Program Komputer dan ‘Evolusi Evolvabilitas’	247
Daftar Pustaka	255

TENTANG PENULIS

Richard Dawkins lahir di Nairobi pada 1941. Ia kuliah di Universitas Oxford dan, setelah lulus, melanjutkan pendidikan doktor di sana bersama etolog peraih Hadiah Nobel Niko Tinbergen. Dari 1967 hingga 1969, ia menjadi Lektor Zoologi di Universitas California di Berkeley. Pada 1970, ia menjadi Lektor Zoologi di Universitas Oxford dan seorang Dosen Peneliti di New College. Pada 1995 ia menjadi *Simonyi Professor of the Public Understanding of Science* pertama di Universitas Oxford.

Buku pertama Richard Dawkins, *The Selfish Gene* (1976; edisi kedua, 1989), langsung menjadi buku laris internasional dan diterjemahkan ke berbagai bahasa dunia. Sekuelnya, *The Extended Phenotype*, terbit pada 1982. Karya-karya terlarisnya meliputi *The Blind Watchmaker* (1986; Penguin, 1988), *River Out of Eden* (1995), *Climbing Mount Improbable* (1996; Penguin, 1997), *Unweaving the Rainbow* (Penguin, 1999) dan *The Ancestor's Tale* (2004).

Richard Dawkins memenangkan Kusala Royal Society of Literature dan Hadiah Sastra *Los Angeles Times* di 1987 untuk buku *The Blind Watchmaker*. Film televisi buku ini, yang tayang di seri *Horizon*, memenangkan Hadiah *Sci-Tech* untuk kategori Program Sains Terbaik pada 1987. Ia juga memenangkan Medali Perak Zoological Society of London 1989 dan Kusala Royal Society Michael Faraday 1990 untuk perannya dalam memajukan pemahaman khalayak umum atas sains. Pada 1994 ia memenangkan Hadiah Nakayama untuk Ilmu Pengetahuan Manusia dan pada 1995 ia dianugerahi gelar D.Litt *honoris causa* oleh Universitas St Andrews dan Universitas Nasional, Canberra. Pada 1997 ia dipilih menjadi *Fellow of the Royal Society of Literature* dan memenangkan Hadiah Internasional Cosmos.

Untuk orang tuaku

Pengantar Edisi 2006

Saya diminta memberikan pengantar baru untuk penerbitan ulang *The Blind Watchmaker*. Saya kira tugas ini bakal mudah. Saya tinggal menentukan seperti apa buku ini mesti dibentuk-ulang kalau saya menulisnya kembali sekarang—dan caranya pasti jamak. Dengan tekun saya mencari yang salah, yang menyesatkan, yang usang, dan yang tak lengkap, bab demi bab. Saya sungguh ingin menemukannya, karena sains—apa pun kelemahan para praktisinya—menolak untuk lekas berpuas diri dan memang memanfaatkan falsifikasi dalam proses pemajuannya. Tapi, selidik punya selidik, tidak satu pun tesis utama dari semua bab di buku ini ingin saya tarik kembali; tak ada yang cukup kuat untuk menjadi alasan koreksi pemuas hati.

Tentu, tidak berarti semua sudah habis dikupas. Dengan enteng saya bisa menulis sepuluh bab lagi yang sama sekali baru mengenai topik rancangan evolusioner yang selamanya menarik ini. Tapi itu akan menjadi buku yang lain. Dan, hemat saya, *Climbing Mount Improbable* (Penguin, 1996) adalah judul buku yang lain tersebut. Kendati bisa dianggap berdiri sendiri dan genap dibaca terpisah, salah satu dari keduanya dapat pula dibaca sebagai kelanjutan dari yang lain. Pokok bahasan kedua buku itu memang berbeda, seperti semua bab buku ini yang berbeda satu sama lain, tetapi tema besarnya sama: Darwinisme dan rancangan.

Tentu saya akan membela kelanjutan tema besar Darwinian ini. Darwinisme adalah ihwal akbar, yang segi-seginya rancak dituang ke dalam lebih banyak buku dari yang sanggup ditulis seseorang sepanjang kariernya. Saya pun bukan ‘penulis sains’ profesional yang, setelah ‘selesai’ dengan evolusi, dituntut mengalihkan perhatian ke fisika atau astronomi. Buat apa pula? Sah bagi seorang sejarawan untuk menulis lebih dari satu buku tentang sejarah, ketimbang beralih ke sastra klasik atau matematika. Seorang empu masak menulis buku lain tentang segi baru di bidang masak-memasak, sama seperti pemikiran ‘urusan berkebun sebaiknya diserahkan kepada para ahli kebun’. Terlepas dari lebih luasnya ruang rak yang disediakan untuk kedua topik di atas di toko buku (dan meski kembali terdengar seperti perbandingan yang mengecilkan), Darwinisme merupakan ihwal yang lebih besar dari boga atau berkebun. Ini bidang saya, yang lingkungannya cukup memayungi bentang kepakaran seseorang seumur hidupnya.

Darwinisme menaungi semua kehidupan—manusia, hewan, tumbuhan, bakteri, dan, kalau saya benar di bab terakhir buku ini, ekstraterrestrial. Darwinisme menyediakan satu-satunya penjelasan memuaskan mengenai mengapa kita ada, mengapa kita jadi sedemikian rupa. Darwinisme merupakan landasan tempat bertumpu semua disiplin yang dikenal sebagai ilmu humaniora. Saya tidak bermaksud bahwa ilmu sejarah, kritik sastra, dan hukum mesti dirombak mengikuti bingkai Darwinian. Tidak, sama sekali tidak. Tapi semua karya manusia adalah hasil kerja otak, otak adalah perangkat pengolah data yang berevolusi, dan kita akan salah memahami hasil kerjanya kalau melupakan fakta fundamental ini. Kalau saja lebih banyak dokter memahami Darwinisme, manusia tidak akan menghadapi krisis resistansi antibiotik seperti sekarang ini. Evolusi Darwinian, seperti pernah diutarakan salah seorang pengulas buku ini, ‘adalah kebenaran alam paling menakjubkan yang pernah ditemukan oleh sains’. Saya imbuhi, ‘atau yang bakal ditemukan oleh sains’.

Beberapa buku lain telah muncul dalam dua puluh tahun sejak *The Blind Watchmaker* diterbitkan. Buku-buku ini mestinya ingin saya tulis dan tentunya akan saya rujuk jika penulisan *The Blind Watchmaker* saya ulangi. *The Ant and the Peacock* yang dirangkai indah oleh Helena

Cronin, dan karya Matt Ridley yang tak kalah jernih *The Red Queen* tentu akan memengaruhi penulisan ulang bab mengenai seleksi seksual. Karya Daniel Dennett *Darwin's Dangerous Idea* akan mewarnai penafsiran historis dan filosofis saya di semua titik, dan sikap blak-blakannya yang menyegarkan akan menambah kadar berani dalam bab-bab penting buku saya. Karya otoritatif Mark Ridley *Evolution* akan menjadi sumber petunjuk yang selalu terbuka bagi saya dan pembaca. *The Language Instinct* karya Steven Pinker pasti mengilhami saya untuk mengerjakan ihwal bahasa dari sudut pandang evolusi, kalau saja ia tidak melakukannya dengan amat piawai. Begitu juga dengan bab 'Darwinian medicine' kalau saja Randolph Nesse dan George Williams tidak menuliskan pokok tersebut dalam buku mereka yang brilian (meskipun judul yang dipaksakan penerbit kepada para penulis malang ini, '*Why we get sick*' ('Kenapa kita sakit'), sungguh aneh bin tak bermanfaat).

Masih ada saja orang yang berupaya menyangkal kebenaran evolusi, dan tanda-tanda bahwa pengaruh mereka makin kuat, setidaknya di beberapa wilayah di Amerika Serikat, cukup menggelisahkan. Kendati orang-orang konservatif ini punya argumen, sebagian besar berkuat di seputar gagasan 'rancangan'—yang kebetulan memang merupakan tema utama *The Blind Watchmaker*. Walaupun disusun untuk tujuan yang lebih dari sekadar balasan, setiap orang yang tergoda oleh argumen-argumen para kreasionis akan mendapati sanggahan telak atas sebagian—atau malah *semua*—argumen tersebut di buku ini.

Berkedok otoritas ilmiah, kaum propagandis antievolusi selalu didorong semangat keagamaan, sekalipun mereka mencoba meraih rasa percaya publik dengan menyembunyikan fakta tersebut. Seringnya, mereka sudah memilih mana yang mesti diyakini karena dulu orang tua mereka menganjurkan sebuah kitab kuno yang memberi tahu mana yang mesti diimani. Kalau bukti ilmiah yang mereka ketahui di masa dewasa bertentangan dengan kitab tersebut, pasti ada yang salah dengan bukti ilmiah itu. Karena semua metode penentuan usia radiometris sepakat bahwa bumi berumur miliaran tahun, jelas ada yang salah dengan semua metode penentuan usia radiometris. Kitab suci masa kecil itu tidak bisa, tidak *boleh*, salah.

Akan tetapi, asa itu tetap ada. Ketika *The Blind Watchmaker* pertama kali diterbitkan di Amerika Serikat, Norton mengutus saya untuk melakukan tur singkat di sana, dan saya berkesempatan menjawab berbagai pertanyaan lewat telepon di siaran radio. Saya sudah diwanti-wanti bahwa akan ada pertanyaan-pertanyaan ofensif dari para pendengar fundamentalis dan saya akui saya sangat menantikan kesempatan untuk menggilas argumen mereka. Namun, yang terjadi cukup di luar dugaan. Para pendengar yang menelepon sungguh tertarik dengan ihwal evolusi. Mereka tidak memusuhinya, mereka hanya tidak tahu apa-apa tentangnya. Alih-alih menggilas argumen, tugas saya jadi lebih membangun: mendidik publik tak berdosa. Hanya butuh hitungan menit untuk menggugah pemahaman mereka atas kekuatan Darwinisme sebagai penjelasan meyakinkan akan kehidupan. Saya menangkap kesan bahwa satu-satunya alasan mereka belum melihat kemungkinannya adalah karena ihwal ini sepenuhnya diabaikan dalam pendidikan mereka. Selain kesan tak masuk akal tentang 'monyet-monyet', mereka tak tahu sama sekali apa itu Darwinisme.

Saya teringat dengan salah seorang mahasiswa kreasionis yang, dalam proses seleksi masuk perguruan tinggi kebetulan diterima di Jurusan Zoologi Universitas Oxford. Sebelumnya dia mengecap pendidikan di sebuah kolese fundamentalis kecil di Amerika Serikat dan ditempa menjadi seorang kreasionis Bumi muda yang naif. Ketika sampai di Oxford, dia terdorong untuk menghadiri serangkaian kuliah mengenai evolusi. Di penghujung kelas dia menghampiri

dosennya (kebetulan, saya); seperti anak kecil yang mendapat mainan baru, wajahnya berbinar penuh suka cita: 'Wah!', soraknya, 'Ternyata, evolusi itu masuk akal.' Barang tentu. Seperti kata-kata yang tersablon di kaos yang dikirim dengan murah hati oleh seorang pembaca anonim dari Amerika kepada saya: *'Evolution – The Greatest Show on Earth – The Only Game in Town!'* ('Evolusi – Pertunjukan Terhebat di Muka Bumi – Satu-satunya Penjelasan atas Kehidupan!')

Richard Dawkins
Oxford, Januari 2006

Prakata

Buku ini ditulis dengan keyakinan kuat bahwa keberadaan kita dulu merupakan teka-teki terdahsyat, tetapi tidak demikian adanya sekarang karena teka-teki tersebut sudah dipecahkan. Darwin dan Wallace menguak tabir misteri itu, walau kita masih harus terus menambahkan catatan kaki bagi solusi yang mereka ajukan. Saya menulis buku ini karena kaget melihat begitu banyak orang yang tampaknya tidak hanya tidak menyadari solusi yang elegan nan indah bagi masalah mendasar ini tetapi, hebatnya, sering tidak sadar bahwa masalah itu ada!

Masalahnya adalah masalah rancangan kompleks. Komputer yang saya gunakan untuk menuliskan kata-kata ini memiliki kapasitas penyimpanan informasi sebesar 64 kilobita (satu bita dipakai untuk menyimpan satu karakter dalam teks). Komputer dirancang dengan sadar dan dibuat dengan sengaja. Otak yang Anda gunakan untuk memahami kata-kata saya merupakan susunan sel saraf sejumlah kurang lebih sepuluh juta kiloneuron. Jamak di antara miliaran sel saraf memiliki lebih dari seribu ‘kawat listrik’ yang menghubungkannya dengan sel-sel saraf lainnya. Selain itu, di level genetik molekuler, tiap-tiap dari lebih dari satu triliun sel di dalam tubuh mengandung sekitar seribu kali lebih banyak dari seluruh informasi digital yang dikodekan dengan persis di komputer saya. Kompleksitas organisme hidup setara dengan efisiensi elegan dari rancangan nyatanya. Kalau ada yang bilang bahwa rancangan sekompleks ini tak butuh penjelasan, saya angkat tangan. Tapi, setelah saya pikir lagi, tidak jadi. Tangan saya turunkan kembali. Salah satu tujuan saya di buku ini adalah menyampaikan sebagian dari kompleksitas biologis yang ajaib belaka pada mata yang masih tertutup baginya. Tapi karena sudah menyajikan misteri itu, tujuan lain saya adalah meniadakannya lagi dengan menjelaskan solusinya.

Menjelaskan adalah seni yang pelik. Anda bisa menjelaskan sesuatu sehingga pembaca memahami kata-katanya; bisa pula menjelaskan sesuatu sehingga pembaca benar-benar merasakan maknanya. Untuk melakukan yang kedua, kadang tidak cukup kalau hanya secara netral menggelar bukti di hadapan sidang pembaca. Anda harus menjadi seorang advokat dan memakai akal cerdas khas seorang advokat. Buku ini bukan risalah ilmiah yang tak memihak. Buku-buku lain mengenai Darwinisme disusun dengan sikap tersebut. Walau begitu, banyak dari buku-buku itu jernih, informatif, dan bisa menjadi pelengkap bacaan untuk buku ini. Jauh dari tak memihak, harus diakui bahwa bagian-bagian buku ini ditulis dengan hasrat yang, kalau dijumpai di jurnal ilmiah profesional, mungkin akan memancing komentar. Untuk menerangkan, itu sudah pasti. Tapi buku ini juga berupaya membujuk dan bahkan – *tujuan* bisa ditentukan tanpa praduga – menginspirasi. Saya ingin menginspirasi pembaca dengan visi keberadaan kita sebagai, pertama-tama, misteri yang membuat kita bergidik ngeri; dan sekaligus menyampaikan rasa suka cita atas fakta bahwa misteri tersebut punya solusi anggun yang dapat kita jangkau dengan akal kita. Terlebih, saya ingin membujuk pembaca: cara pandang Darwinian itu tidak *kebetulan* benar, tapi merupakan satu-satunya teori yang diketahui yang, pada prinsipnya, *bisa* memecahkan teka-teki keberadaan kita. Ini menjadikannya teori dengan kepuasan ganda. Kebenaran Darwinisme dapat dipertahankan secara meyakinkan, bukan hanya di planet ini, tetapi di seluruh bagian alam semesta yang dihinggapai kehidupan.

Di lain pihak, saya juga ingin menjaga jarak dari para advokat profesional. Seorang pengacara atau politikus dibayar untuk menjalankan renjana dan persuasinya atas nama klien atau dasar pikir yang mungkin secara pribadi tidak diyakininya. Saya tidak pernah dan tidak akan melakukannya. Saya mungkin tidak selalu benar, tapi saya bersungguh hati dengan kebenaran dan saya tidak pernah mengatakan hal yang tidak saya yakini benar. Dulu saya pernah tertegun saat berkunjung ke sebuah klub debat universitas untuk berdebat dengan kelompok kreasionis. Saat makan malam se usai debat, saya duduk di samping seorang perempuan muda yang pidato dukungannya untuk kreasionisme relatif kuat. Saya yakin dia *bukan* seorang kreasionis, dan karena itu saya memintanya untuk jujur: apa alasannya. Dengan ringan dia mengaku cuma sedang melatih keterampilan debatnya, dan merasa lebih tertantang kalau berargumen untuk pandangan yang tidak diyakininya. Ternyata di klub debat universitas peserta debat sudah biasa *disuruh* memihak argumen tertentu. Keyakinan mereka tidak masuk hitungan. Saya datang jauh-jauh untuk beradu pendapat di hadapan publik karena meyakini kebenaran mosi yang saya ajukan. Begitu saya tahu anggota klub debat menggunakan mosi sebagai wahana untuk bermain debat, saya memantapkan hati untuk menolak jika diundang lagi oleh klub debat yang justru mendorong advokasi tanpa integritas mengenai persoalan yang mempertaruhkan kebenaran ilmiah.

Entah mengapa, Darwinisme tampaknya lebih membutuhkan advokasi dibanding kebenaran yang sama kukuhnya di cabang-cabang sains yang lain. Banyak dari kita yang tidak mafhum teori kuantum, atau teori relativitas khusus dan umum Einstein, tapi hal ini tidak semata membuat kita *menentang* teori-teori ini! Tidak seperti ‘Einsteinisme’, Darwinisme tampaknya dianggap sebagai sasaran empuk bagi kritik dengan kadar ketidaktahuan apa pun. Saya kira bagi Darwinisme masalahnya adalah, seperti diterangkan oleh Jacques Monod dengan jitu, setiap orang *mengira* dia memahaminya. Teori ini memang sangat sederhana; gampang, seperti itu mungkin orang berpikir, kalau dibandingkan dengan hampir semua teori fisika dan matematika. Pada hakikatnya, teori ini hanya sebatas gagasan bahwa reproduksi nonacak, yang menghasilkan variasi keturunan, memiliki konsekuensi yang luas jika diberi waktu untuk berkembang tahap demi tahap. Tapi ada dasar yang kuat untuk yakin bahwa kesederhanaan ini semu. Jangan lupa bahwa, walau tampak sederhana, tidak satu orang pun memikirkan teori ini sampai masa Darwin dan Wallace di pertengahan abad kesembilan belas, hampir 200 tahun setelah Newton menulis *Principia*, dan hampir 2.000 tahun setelah Eratosthenes mengukur Bumi. Bagaimana bisa gagasan sesederhana itu terlewatkan begitu lama oleh para pemikir sekaliber Newton, Galileo, Descartes, Leibnitz, Hume, dan Aristoteles? Mengapa harus menunggu dua orang penyelidik alam zaman Victoria? Apa yang *salah* dengan para filsuf dan matematikawan sampai mereka melewatkannya? Dan mengapa bisa gagasan sekuat ini masih belum banyak diterima dan disadari masyarakat?

Hampir seolah-olah otak manusia itu dirancang khusus untuk salah memahami Darwinisme, dan sulit meyakinkannya. Ambil contoh persoalan ‘kebetulan’, yang sering dilebih-lebihkan sebagai kebetulan *buta*. Mayoritas besar orang yang menyerang Darwinisme sangat bernaafsu untuk lekas sampai ke kesimpulan keliru bahwa teori ini isinya cuma kebetulan acak. Karena kompleksitas makhluk hidup merupakan antitesis dari kebetulan, kalau Anda berpikir Darwinisme itu sepadan dengan kebetulan, barang tentu Anda akan membantah Darwinisme dengan enteng! Salah satu tugas saya adalah menghancurkan mitos yang kuat diyakini: bahwa Darwinisme adalah teori ‘kebetulan’. Hal lain yang tampaknya menjadi alasan kecenderungan kita untuk tidak meyakini

Darwinisme adalah bahwa otak kita dibentuk untuk menjajaki peristiwa dengan *skala waktu* yang terlampau jauh berbeda dari yang mencirikan perubahan evolusioner. Otak kita dapat mencerap proses-proses yang selesai dalam hitungan detik, menit, tahun, atau paling lama, puluhan tahun. Darwinisme adalah sebuah teori proses kumulatif yang begitu lambat hingga butuh ribuan hingga jutaan dasawarsa untuk selesai. Semua penilaian intuitif kita mengenai apa yang mungkin ternyata salah besar. Perangkat skeptisisme dan dalil probabilitas subjektif kita yang tersetel baik ini meleset jauh, karena disetel – ironisnya, oleh evolusi itu sendiri – untuk berfungsi dalam usia hidup yang beberapa dasawarsa saja. Butuh upaya imajinasi untuk lolos dari kurungan skala waktu yang manusiawi ini, sebuah upaya yang saya akan coba bantu.

Faktor lain penyebab otak kita cenderung menolak Darwinisme muncul dari keberhasilan dahsyat kita sebagai perancang kreatif. Dunia kita didominasi pencapaian-pencapaian teknik dan karya seni. Kita amat terbiasa berpikir bahwa keelokan yang rumit adalah tanda adanya rancangan terencana dan terampil. Mungkin inilah alasan terkuat bagi keyakinan, yang diamini oleh mayoritas besar orang yang pernah hidup, pada sesosok ilah adikodrati. Butuh lompatan imajinasi yang amat jauh bagi Darwin dan Wallace untuk melihat bahwa, bertentangan dengan segenap intuisi, ada cara lain dan, begitu Anda memahaminya, cara yang jauh lebih masuk akal, bahwa ‘rancangan’ kompleks dapat timbul dari kesederhanaan yang purba. Lompatan imajinasi itu begitu jauh sehingga, sampai hari ini, banyak orang tampaknya masih tak hendak melakukannya. Tujuan utama buku ini adalah membantu pembaca untuk melompat sejauh itu.

Lumrah kalau setiap penulis berharap buku mereka berdampak kekal ketimbang sementara. Tapi, di samping upaya keras mengegolkan perkaranya, advokat mana pun juga harus menanggapi advokat lain yang memiliki sudut pandang yang bertentangan, atau tampak bertentangan, dengannya. Ada risiko bahwa sebagian dari argumen-argumen ini, sepanas apa pun terasa sekarang, akan tampak usang dalam puluhan tahun mendatang. Paradoks ini sering dibicarakan orang: edisi pertama *The Origin of Species* lebih jernih dari edisi keenamnya. Ini karena, dalam edisi-edisi berikutnya, Darwin merasa harus menanggapi kritik kiwari edisi pertama, kritik yang sekarang tampak usang sehingga jawaban atasnya justru memperumit bacaan dan, di beberapa titik, bahkan menyesatkan. Akan tetapi, godaan untuk mengabaikan kritik-kritik terkini yang boleh jadi lekas dilupakan adalah godaan yang tidak usah dituruti, karena tanggapan tetap perlu diajukan bukan semata sebagai jawaban atas kritik, tetapi juga agar pembaca tidak kebingungan. Walau dalam hati saya punya firasat bab-bab mana saja dari buku saya yang kelak akan usang karenanya, pembaca – dan waktu – lah yang menjadi hakimnya.

Saya masygul melihat beberapa teman perempuan (untungnya tidak banyak) memperlakukan penggunaan kata ganti orang ketiga *he* seolah ada niat untuk mengecualikan mereka. Kalau pun ada yang perlu dikecualikan (bagusnya tidak ada) saya rasa saya bakal mengecualikan laki-laki, tapi pernah ketika untuk sementara saya mencoba merujuk pembaca umum saya dengan *she*, seorang feminis mencela dan menganggapnya sebagai sikap menggurui dan merendahkan: Mestinya saya pakai *he-or-she*, dan *his-or-her*. Mudah melakukannya kalau Anda tidak peduli pada bahasa, tapi kalau tidak peduli pada bahasa, Anda tidak pantas dibaca oleh laki-laki atau perempuan. Di buku ini, saya kembali ke kaidah lazim kata ganti dalam bahasa Inggris. Saya mungkin merujuk ‘pembaca’ dengan *he*, tetapi tidak menganggap pembaca saya secara spesifik laki-laki, seperti penutur bahasa Prancis tidak menganggap sebuah meja benar-benar berjenis kelamin perempuan. Malah, saya lebih sering membayangkan pembaca saya itu perempuan, tapi itu urusan pribadi saya dan saya jengah kalau anggapan-anggapan seperti itu dibenturkan dengan cara saya memakai bahasa ibu saya.

Rasa terima kasih saya pun bersifat pribadi. Namun, tidak semua bisa saya sebutkan namanya di sini. Penerbit saya menanggapi identitas para *referee* mereka tidak perlu ditutupi (bukan ‘pengulas’ – pengulas sejati, *tanpa mengurangi hormat saya kepada* orang-orang Amerika yang berusia di bawah 40 tahun, mengkritik buku hanya *setelah* diterbitkan, ketika sudah terlambat bagi penulis untuk berbuat apa-apa), dan saya merasa sangat terbantu dengan saran yang diberikan oleh John Krebs (sekali lagi), John Durant, Graham Cairns-Smith, Jeffrey Levinton, Michael Ruse, Anthony Hallam, dan David Pye. Richard Gregory berbaik hati mengkritik Bab 12, dan versi final bukunya disempurnakan dengan menghapus bab tersebut. Mark Ridley dan Alan Grafen, yang saat ini bahkan secara resmi bukan lagi mahasiswa saya, bersama dengan Bill Hamilton, merupakan pelita penuntun kelompok kolega tempat saya bertukar pikiran mengenai evolusi dan yang gagasan-gagasannya saya rasakan manfaatnya setiap hari. Mereka, Pamela Wells, Peter Atkins, dan John Dawkins telah membantu memberikan kritik atas bab-bab buku ini bagi saya. Sarah Bunney banyak membantu dalam penyempurnaan, dan John Gribbin mengoreksi sebuah kesalahan besar dalam buku ini. Alan Grafen dan Will Atkinson memberi saran mengenai masalah-masalah komputasi, dan Apple Macintosh Syndicate dari Jurusan Zoologi telah berbaik hati meminjamkan *printer* lasernya untuk menggambar biomorf.

Sekali lagi saya telah merasakan manfaat dinamisme tanpa henti yang senantiasa dihadirkan Michael Rodgers, yang kini tinggal di Longman. Ia, dan Mary Cunnane dari Norton, dengan terampil menginjak pedal gas (bagi semangat saya) dan pedal rem (bagi selera humor saya) tepat pada saatnya, sesuai kebutuhan. Sebagian buku ini ditulis selama cuti untuk studi yang diberikan Jurusan Zoologi dan New College. Akhirnya – utang budi yang seharusnya saya sebutkan di dua buku pertama saya – sistem bimbingan Oxford dan banyak mahasiswa bimbingan saya di kelas zoologi selama bertahun-tahun telah membantu mengasah sedikit kecakapan yang dapat saya miliki dalam seni menjelaskan yang rumit ini.

Richard Dawkins
Oxford, 1986

Bab 1

Menjelaskan yang Muskil

Hewan, dan kita manusia termasuk di dalamnya, adalah hal paling rumit yang ada di semesta ini. Semesta yang kita ketahui ini tentunya merupakan potongan kecil dari semesta yang sesungguhnya. Boleh jadi ada objek-objek lain yang lebih rumit dari kita di planet lain, dan boleh jadi sebagian dari mereka sudah tahu tentang kita. Tapi ini tidak mengubah poin yang ingin saya tekankan. Hal-hal rumit, di mana pun, pantas mendapatkan penjelasan yang sangat istimewa. Kita ingin tahu seperti apa asal mula keberadaan mereka dan mengapa mereka begitu rumitnya. Hemat saya, penjelasan untuk hal-hal rumit di mana saja di alam semesta besar kemungkinan sama; bagi kita, bagi simpanse, cacing, pohon ek, dan monster dari luar angkasa. Di sisi lain, penjelasannya akan berbeda untuk yang akan saya istilahkan sebagai hal ‘sederhana’, seperti batu, awan, sungai, galaksi, dan kuark. Ini semua hal-ihwal fisika. Simpanse dan anjing dan kelelawar dan kecoak dan manusia dan cacing dan dandelion dan bakteri dan alien dari galaksi lain adalah hal-ihwal biologi.

Perbedaannya terletak pada kompleksitas rancangan. Biologi adalah kajian atas hal-hal rumit yang tampak seperti dirancang untuk sebuah tujuan. Fisika adalah kajian hal-hal sederhana yang tidak memancing kita untuk berpikir soal rancangan. Sekilas, artefak buatan manusia seperti komputer dan mobil tampak seperti pengecualian. Benda-benda ini rumit dan jelas dirancang untuk sebuah tujuan, tapi tidak hidup, dan terbuat dari logam dan plastik, bukan darah dan daging. Di buku ini, benda-benda ini akan dengan tegas diperlakukan sebagai benda-benda biologis.

Mungkin pembaca akan bereaksi dengan bertanya, ‘Ya, tapi apa mereka *benar-benar* benda-benda biologis?’ Kata-kata adalah hamba, bukan tuan kita. Untuk tujuan tertentu, ada baiknya kata-kata dipakai dengan arti yang berbeda. Kebanyakan buku masakan menganggap lobster sebagai ikan. Ahli zoologi bisa berang dengan hal ini, dan menunjukkan bahwa lebih adil jika lobster menyebut manusia itu ikan, karena ikan merupakan saudara yang jauh lebih dekat dengan manusia ketimbang dengan lobster. Dan, bicara soal keadilan bagi lobster, saya ketahui bahwa baru-baru ini pengadilan harus memutuskan apakah lobster itu serangga atau ‘hewan’ (yang nantinya menentukan apakah merebus lobster hidup-hidup merupakan tindakan melanggar hukum atau tidak). Secara zoologi, lobster sudah pasti bukan serangga. Lobster itu hewan, sama seperti serangga, dan kita. Tak banyak faedahnya risau dengan cara orang menggunakan kata (walau di kehidupan nonprofesional saya cukup siap untuk risau dengan orang yang merebus lobster hidup-hidup). Juru masak dan pengacara perlu menggunakan kata-kata dengan cara-cara khusus, dan begitu pula dengan saya di buku ini. Jangan risaukan apakah mobil dan komputer ‘benar-benar’ benda biologis. Poinnya adalah kalau hal dengan kadar kerumitan seperti itu ditemukan di sebuah planet, tanpa ragu kita mesti menyimpulkan bahwa ada, atau pernah ada, kehidupan di planet tersebut. Mesin adalah produk langsung benda hidup; kompleksitas dan rancangannya berasal dari benda hidup, dan merupakan ciri adanya kehidupan di sebuah planet. Begitu juga dengan fosil, kerangka, dan bangkai.

Tadi saya katakan bahwa fisika adalah kajian hal-hal sederhana, dan ini pun mungkin sekilas tampak aneh. Fisika tampak seperti perkara rumit karena gagasan-gagasannya sukar kita pahami. Otak kita dirancang untuk memahami berburu dan meramu, berbiak dan membesarkan anak: sebuah dunia benda-benda berukuran sedang yang bergerak di gatra tiga dimensi dengan kecepatan sedang. Kita miskin alat untuk memahami yang sangat kecil dan yang sangat besar; hal-hal yang kurun waktunya diukur dalam pikodetik atau gigatahun; partikel-partikel yang tidak berposisi; daya dan medan yang tidak dapat kita sentuh, yang kita ketahui hanya melalui pengaruhnya terhadap hal-hal yang dapat kita lihat dan sentuh. Kita merasa fisika itu rumit karena sulit dipahami, dan karena buku-buku fisika sarat akan matematika yang sukar. Tapi benda-benda yang dipelajari fisikawan tetaplah benda-benda sederhana. Benda-benda tersebut berupa gumpalan gas atau partikel kecil, atau gundukan materi seragam seperti kristal, dengan pola atomis yang berulang hampir tanpa ujung. Benda-benda tersebut, setidaknya menurut standar biologis, tidak memiliki bagian-bagian gerak yang rumit. Benda-benda fisik besar seperti bintang sekalipun terdiri dari susunan bagian-bagian yang agak terbatas, yang ditata dengan agak sembarangan. Perilaku benda-benda fisik nonbiologis begitu sederhana sehingga kita masih bisa menggunakan bahasa matematika untuk menggambarkaninya; dan itu mengapa buku-buku fisika sarat akan matematika.

Buku-buku fisika mungkin rumit, tetapi buku-buku fisika, seperti mobil dan komputer, merupakan produk benda-benda biologis – otak manusia. Benda dan fenomena yang digambarkan buku fisika lebih sederhana dibanding satu sel saja di dalam tubuh penulisnya. Dan penulisnya merupakan himpunan triliunan sel, yang kebanyakan berbeda-beda, disusun dengan arsitektur dan teknik presisi canggih menjadi mesin kerja yang mampu menulis buku. Otak kita pun tidak punya cukup bekal untuk menangani titik-titik ekstrem kompleksitas, sama tak berdayanya ketika menghadapi titik-titik ekstrem ukuran dan titik-titik ekstrem fisika. Belum ada orang yang berhasil menciptakan matematika untuk menggambarkan keseluruhan pranata dan perilaku benda seperti seorang fisikawan, atau bahkan salah satu selnya saja. Yang dapat kita lakukan adalah memahami beberapa prinsip umum cara kerja benda hidup, dan mengapa benda tersebut ada.

Inilah gerbang masuk kita. Kita ingin tahu mengapa kita, dan semua benda rumit lainnya, ada. Dan sekarang kita bisa menjawab pertanyaan itu dalam kerangka umumnya, meskipun tidak mampu memahami detail-detail kompleksitas itu sendiri. Analoginya begini: sebagian besar kita tidak paham secara terperinci cara kerja pesawat terbang. Boleh jadi para pembuatnya pun tidak sepenuhnya paham juga: ahli mesin tidak sepenuhnya memahami cara kerja sayap, dan ahli sayap hanya lambat-lambat saja memahami cara kerja mesin. Ahli sayap pun tidak memahami cara kerja sayap dengan presisi matematis yang lengkap: mereka dapat memperkirakan perilaku sayap menghadapi turbulensi, hanya dengan mempelajari model sayap di terowongan angin atau dalam simulasi komputer – teknik yang juga dapat digunakan seorang ahli biologi untuk memahami binatang. Tapi betapa pun kita tidak sepenuhnya paham cara kerja pesawat terbang, kita semua paham proses umum penciptaannya. Pesawat terbang dirancang oleh manusia di atas papan gambar. Manusia-manusia lain membuat keping-keping penyusunnya dari gambar itu, lalu lebih banyak manusia lain (dengan bantuan mesin-mesin rancangan manusia) menyekrup, memaku, mengelas, atau merekatkan keping-keping tersebut, pada tempatnya masing-masing. Proses pembuatan pesawat terbang tidak secara fundamental misterius bagi kita karena manusialah yang membuatnya. Penyatuan bagian-bagian secara sistematis dan sengaja merupakan hal yang kita ketahui dan pahami, karena telah kita alami sendiri, sekalipun hanya melalui mainan bongkar-pasang Meccano atau Erector waktu masih kecil.

Bagaimana dengan tubuh kita sendiri? Kita semua adalah mesin, seperti pesawat terbang, hanya saja jauh lebih rumit. Apa kita dirancang di atas papan gambar juga, dan apa bagian-bagian tubuh kita dirakit oleh seorang insinyur kawakan? Jawabannya tidak. Mengejutkan memang, dan kita baru mengetahui dan memahaminya kira-kira satu abad belakangan ini. Ketika Charles Darwin pertama kali menjelaskan masalah ini, banyak orang tidak mau atau tidak bisa memahaminya. Saya sendiri dengan tegas menolak percaya pada teori Darwin saat pertama kali mendengarnya waktu masih kanak-kanak. Hampir semua orang sepanjang sejarah, hingga paruh kedua abad sembilan belas, telah kuat meyakini yang sebaliknya – teori Perancang Berkesadaran. Dan masih banyak yang seperti itu, mungkin karena penjelasan Darwinian yang sesungguhnya atas keberadaan kita masih betul-betul belum menjadi bagian rutin dari kurikulum pendidikan umum. Pun, teori ini masih luas disalahpahami.

Frasa ‘pembuat arloji’ dalam judul saya dipinjam dari risalah terkenal yang ditulis pakar teologi abad kedelapan belas William Paley. Karyanya *Natural Theology – or Evidences of the Existence and Attributes of the Deity Collected from the Appearances of Nature*, yang diterbitkan pada 1802, merupakan pembabaran ‘Argumen dari Rancangan’ paling dikenal, yang selalu menjadi argumen paling berpengaruh atas keberadaan Tuhan. Buku ini sangat saya kagumi, karena pada masanya si penulis berhasil melakukan hal yang sedang saya upayakan sekarang. Ia memiliki pokok pikiran, yang amat ia yakini, dan dengan segala daya upaya ia menerangkanjelaskannya. Ia takzim pada kompleksitas dunia makhluk hidup, dan tahu bahwa dunia ini perlu dijelaskan dengan cara yang sangat istimewa. Satu-satunya hal yang keliru – dan harus diakui kekeliruan ini cukup besar! – adalah penjelasannya itu sendiri. Teka-teki tersebut ia ganjar dengan jawaban tradisional religius, tetapi dengan cara penyampaian yang lebih jernih dan meyakinkan dari semua penjelasan sebelumnya. Penjelasan yang sebenarnya sama sekali berbeda, dan harus menunggu salah satu pemikir paling revolusioner sepanjang masa, Charles Darwin.

Paley mengawali *Natural Theology* dengan petikan terkenal ini:

Ketika menyeberangi padang rumput, seumpama kaki saya menginjak *batu*, dan saya ditanya bagaimana batu tersebut bisa ada di situ; saya mungkin menjawab bahwa, setahu saya, batu itu sudah ada di situ dari dahulu: dan mungkin tidak terlalu mudah untuk menunjukkan keabsurdan jawaban ini. Tapi seumpama saya menemukan *arloji* di atas tanah, dan ditanya bagaimana arloji tersebut ada di tempat itu; sulit bagi saya untuk memberikan jawaban yang sama, bahwa setahu saya arloji itu sudah ada di situ dari dahulu.

Di sini, Paley memahami perbedaan antara benda-benda fisik alami seperti batu, dan benda-benda hasil rancangan dan buatan seperti arloji. Ia lanjut menjelaskan dengan terperinci presisi pembentukan semua roda gigi dan pegas sebuah arloji, dan kerumitan penyusunannya. Kalau kita menemukan sebuah benda seperti arloji di padang rumput, sekalipun tidak tahu bagaimana arloji itu bisa ada di situ, presisi dan kerumitan rancangannya saja cukup untuk memaksa kita menyimpulkan

bahwa arloji itu pasti ada pembuatnya: bahwa pastilah ada, di suatu tempat dan waktu, seorang atau beberapa perajin, yang membentuknya sesuai tujuannya; yang memahami konstruksinya, dan merancang gunanya.

Tak ada yang dapat menyanggah kesimpulan ini, tegas Paley, tapi justru inilah yang dilakukan orang ateis ketika merenungkan karya alam, karena:

setiap tanda pembuatan, setiap wujud rancangan, yang ada pada arloji itu, ada pula pada karya alam; bedanya: pada alam, semua itu serba lebih, hingga melampaui semua hitungan.

Paley menyimpulkan pokok pikirannya dengan gambaran jentera kehidupan yang dibedah dengan indah dan khidmat, dimulai dari mata manusia, contoh favorit yang kemudian dipakai Darwin dan akan muncul kembali di sepanjang buku ini. Paley membandingkan mata dengan instrumen hasil rancangan seperti teleskop, dan menyimpulkan bahwa ' inilah bukti bahwa mata dibuat untuk melihat, seperti halnya teleskop dibuat untuk membantu mata melihat '. Mata, seperti teleskop, pasti ada perancangannya.

Argumen Paley diajukan dengan ketulusan hebat dan berdasar pada pengetahuan biologis terbaik di zamannya; tetapi, dengan segala hormat, argumen tersebut sama sekali salah. Analogi teleskop dan mata, arloji dan organisme hidup, adalah analogi yang keliru. Bertolak belakang dari kelihatannya, satu-satunya pembuat arloji di alam adalah daya fisika yang buta, walaupun dikerahkan dengan cara yang sangat istimewa. Pembuat arloji sejati meninjau masa depan: ia merancang roda gigi dan pegasnya, dan merencanakan kesalinghubungannya, dengan tujuan yang jelas di mata pikirannya. Seleksi alam, proses buta, tak sadar, dan otomatis yang ditemukan Darwin, dan yang kini kita ketahui merupakan penjelasan bagi keberadaan dan rupa kehidupan yang seolah bertujuan, tidak memiliki tujuan. Ia tidak memiliki pikiran dan mata pikiran. Ia tidak berencana untuk masa depan. Ia tidak bersaujana, tidak meninjau, tidak melihat. Kalaupun bisa dikatakan ia berperan seperti pembuat arloji di alam, ia pembuat arloji yang *buta*.

Saya akan menjelaskan ini, selengkapnyanya, nanti. Tapi tidak akan pernah saya mengecilkan keajaiban 'arloji-arloji' hidup yang mengilhami Paley. Sebaliknya, saya akan mencoba melukiskan perasaan saya bahwa di sini Paley semestinya bisa menjangkau lebih jauh lagi. Untuk urusan takjub dengan 'arloji-arloji' hidup, saya tidak tunduk pada siapa pun. Saya merasa lebih sehati dengan Pendeta William Paley dibanding dengan seorang filsuf modern tersohor, seorang ateis ternama, yang pernah membahas perkara ini dengan saya sambil makan malam. Saya katakan saya tidak bisa membayangkan menjadi seorang ateis sebelum tahun 1859, ketika *Origin of Species* Darwin diterbitkan. 'Bagaimana dengan Hume?', balas sang filsuf. 'Bagaimana Hume menjelaskan kompleksitas tertata dunia makhluk hidup?', tanya saya. 'Dia tidak menjelaskannya', kata sang filsuf. 'Mengapa pula perlu penjelasan istimewa?'

Paley tahu perkara ini perlu penjelasan istimewa; Darwin tahu, dan saya kira jauh di lubuk hatinya teman filsuf saya pun juga. Sudah menjadi tugas saya untuk menunjukkannya di sini. Mengenai David Hume sendiri, kadang disebut bahwa filsuf besar dari Skotlandia ini sudah membantah Argumen dari Rancangan satu abad sebelum Darwin. Tapi yang dilakukan Hume adalah mengkritik logika pengajuan teori rancangan di alam sebagai bukti *positif* atas adanya Tuhan. Ia tidak memberikan penjelasan *alternatif* dan membiarkan pertanyaan tersebut tetap tak bersimpul jawaban. Mengikuti Hume, seorang ateis sebelum masa Darwin dapat saja berkata: 'Saya tidak punya penjelasan untuk rancangan biologis kompleks. Tapi yang jelas Tuhan bukan jawabannya, jadi kita harus menunggu dan berharap ada yang mampu memberikan penjelasan yang lebih baik.' Saya tidak bisa tak merasa bahwa pendirian seperti itu, biarpun logis, membuat orang merasa tidak puas, dan bahwa walaupun ateisme itu boleh jadi *secara logika* dapat dipertahankan sebelum Darwin, Darwin membuat orang bisa menjadi ateis yang puas secara intelektual. Saya rasa Hume akan sepakat, tetapi beberapa tulisannya menyiratkan bahwa ia meremehkan kompleksitas dan keindahan rancangan biologis. Bocah penyelidik alam Charles Darwin bisa saja menunjukkan satu atau dua hal tentang itu, tapi Hume sudah 40 tahun wafat ketika Darwin mulai kuliah di Universitas Edinburgh tempat Hume belajar dulu.

Lugas saya berbicara soal kompleksitas, dan soal rancangan, seolah kata-kata ini sudah jelas artinya. Kelihatannya saja sudah jelas, dan secara intuitif sebagian besar orang dapat memahami arti kompleksitas. Tetapi kedua gagasan ini, kompleksitas dan rancangan, sangat penting perannya di dalam buku ini dan karenanya saya harus mencoba merangkum, dengan kata-kata yang sedikit lebih pas, rasa bahwa ada yang istimewa dengan hal-hal yang kompleks dan tampak dirancang ini.

Nah, apa itu hal yang kompleks? Bagaimana kita mengenalinya? Dalam konteks apa bisa dianggap benar bahwa arloji atau pesawat terbang atau cocomet atau orang itu kompleks, tetapi bulan itu sederhana? Poin pertama yang mungkin melintas di dalam benak kita, sebagai sifat penting dari suatu hal kompleks, adalah struktur yang heterogen. Puding susu merah jambu atau *blancmange* itu sederhana dalam arti, kalau kita belah dia jadi dua, kedua bagiannya akan memiliki komposisi internal yang sama: *blancmange* itu homogen. Mobil itu heterogen: berbeda dari *blancmange*, hampir seluruh bagian mobil itu berbeda satu sama lain. Dua kali setengah mobil tidak sama dengan sebuah mobil. Sering disimpulkan bahwa benda kompleks, berbeda dari yang sederhana, memiliki banyak bagian, dan bagian-bagian ini lebih dari satu jenisnya.

Heterogenitas, atau ‘keaneka-bagianan’, ini mungkin merupakan syarat penting, tetapi itu saja tidak cukup. Banyak benda lain beraneka-bagian dan heterogen dalam struktur internalnya, tanpa menjadi kompleks dalam arti yang ingin saya gunakan. Mont Blanc, contohnya, terdiri dari berbagai jenis batu, bercampur-aduk sedemikian rupa sehingga kalau dibelah di bagian mana pun, kedua bagian tersebut akan berbeda satu sama lain dalam hal komposisi internalnya. Mont Blanc punya heterogenitas struktur yang tidak dimiliki *blancmange*, tetapi tidak bisa disebut kompleks dalam arti yang digunakan seorang ahli biologi.

Mari kita coba jalan lain dalam pencarian definisi kompleksitas ini, dan kali ini kita gunakan gagasan probabilitas dari matematika. Anggaplah kita mencoba mengikuti definisi ini: hal yang kompleks adalah hal yang bagian-bagian pembentuknya disusun dengan cara yang tidak mungkin timbul akibat kebetulan semata. Meminjam analogi dari seorang astronom terkemuka, kalau Anda mencampur-adukkan bagian-bagian pesawat udara secara acak, kemungkinan bahwa tumpukan tersebut tahu-tahu menjadi pesawat Boeing yang berfungsi baik adalah begitu kecil, sehingga patut disamakan dengan nol. Ada miliaran cara untuk menyusun keping-keping pesawat terbang, dan hanya satu, atau segelintir saja, dari semua cara itu yang benar-benar menjadi pesawat terbang. Lebih jamak lagi cara untuk menyatukan serakan bagian-bagian tubuh manusia.

Cara menajaki definisi kompleksitas yang seperti ini cukup menjanjikan, tapi masih ada yang kurang. Boleh dikata, ada miliaran cara untuk menyusun keping-keping Mont Blanc, dan hanya satu saja yang menjadi Mont Blanc. Jadi apa yang membuat pesawat udara dan manusia itu rumit, sementara Mont Blanc sederhana? Semua tumpukan barang-barang rombongan itu unik dan, *dilihat setelah kejadian*, susunannya pun sama muskilnya dengan yang lain. Susunan gundukan onderdil usang di kuburan pesawat itu unik. Tak ada tumpukan barang rongsokan yang sama persis. Kalau Anda melempar serpihan pesawat ke beberapa tumpukan, peluang Anda untuk kebetulan menumpuk serpihan tersebut dengan susunan yang sama dua kali adalah sama rendahnya dengan peluang Anda membangun pesawat udara dengan cara melempar-tumpuk semua onderdilnya. Jadi, mengapa tidak kita bilang kalau timbunan sampah, atau Mont Blanc, atau bulan, itu sama kompleks dengan pesawat terbang atau seekor anjing, padahal dalam semua perkara ini susunan atomnya adalah ‘muskil’?

Ada 4.096 posisi dalam gembok kombinasi pada sepeda saya. Setiap posisi ini sama-sama ‘muskil’ dalam arti bahwa, kalau Anda memutar roda-rodanya secara acak, masing-masing dari 4.096 posisi ini sama-sama tidak mungkin muncul. Saya bisa memutar roda-rodanya secara acak, melihat nomor apa saja yang muncul dan berseru, setelah kejadian: ‘Luar biasa. Peluang munculnya nomor ini sama dengan 4.096:1. Ini mukjizat kecil!’ Itu sepadan dengan menganggap bahwa susunan tertentu batu di sebuah gunung, atau keping-keping besi di timbunan rongsokan, itu ‘kompleks’. Tapi salah satu dari 4.096 posisi roda tersebut betul-betul unik: kombinasi 1207 adalah satu-satunya susunan yang akan membuka gemboknya. Keunikan 1207 itu sudah diatur terlebih dahulu oleh pembuat gembok, bukan muncul kemudian. Kalau Anda memutar roda-roda kuncinya secara acak dan kebetulan langsung dapat angka 1207, Anda bisa mencuri sepeda saya, dan rasanya seperti keajaiban kecil telah terjadi. Kalau Anda sedang mujur dan berhasil membuka brankas bank yang dilindungi gembok kombinasi yang berlapis-lapis, itu namanya keajaiban besar, karena peluangnya berjuta-juta berbanding satu, dan Anda kaya raya dari hasil curian itu.

Nah, kebetulan menekan nomor keberuntungan yang membuka brankas bank itu sepadan, dalam analogi kita, dengan menimpuki besi rongsokan secara sembarang dan tahu-tahu berhasil merakit Boeing 747. Dari jutaan posisi kombinasi yang unik dan (kemudian) sama-sama muskil ini, hanya satu saja yang bisa membuka gemboknya. Demikian pula, dari jutaan susunan timbunan rongsokan yang unik dan (kemudian) sama-sama muskil itu, hanya satu (atau sedikit) saja yang bisa jadi pesawat terbang. Keunikan susunan yang bisa jadi pesawat terbang, atau yang bisa membuka gembok itu, bukan sesuatu yang diketahui kemudian. Sudah diatur terlebih dahulu. Si pembuat gembok menentukan kombinasinya, dan dia memberitahukannya kepada manajer bank. Kemampuan terbang merupakan sifat pesawat udara yang kita tentukan terlebih dahulu. Kalau kita melihat pesawat di udara, kita boleh yakin bahwa pesawat itu tidak dirakit secara sembarang dengan menumpuk-numpuk potongan besi, karena kita tahu bahwa kemungkinan susunan yang sembarang tersebut bisa terbang terlalu kecil.

Nah, kalau kita lihat semua kemungkinan cara menumpuk batu-batu Mont Blanc, benar bahwa hanya satu saja di antaranya yang merupakan Mont Blanc yang kita kenal. Tetapi Mont Blanc yang kita kenal itu ditentukan setelah kejadian. Cara apa saja untuk menumpuk sejumlah besar batu dapat menghasilkan timbunan yang disebut gunung, dan boleh jadi dinamai Mont Blanc. Tak ada yang istimewa dengan Mont Blanc yang kita kenal, tak ada yang ditentukan terlebih dahulu, tak ada yang setara dengan pesawat yang lepas landas, atau sepadan dengan pintu brankas yang mengayun terbuka dan uang yang meluber keluar.

Apa padanan pintu brankas yang mengayun terbuka, atau pesawat yang terbang, dalam konteks tubuh hidup? Ya, kadang hampir sepadan persis. Burung walet terbang. Tadi sudah kita lihat bahwa tidak mudah merakit mesin yang bisa terbang. Kalau semua sel dalam tubuh seekor walet disatukan secara acak, kemungkinan bahwa benda yang dihasilkan itu bisa terbang, sewajarnya, tidak beda dari nol. Tidak semua benda hidup itu terbang, tetapi mereka melakukan hal lain yang sama muskilnya, dan sama-sama dapat ditentukan terlebih dahulu. Paus tidak terbang, tapi berenang; dan paus berenang sesangkil walet terbang. Peluang bahwa kumpulan acak dari sel-sel paus itu bisa berenang, apalagi berenang cepat dan sangkil layaknya paus sungguhan, sangat kecil.

Di titik ini, filsuf bermata-elang (elang memiliki mata yang sangat canggih – Anda tidak bisa membuat mata elang dengan menyatukan lensa dan sel-sel peka cahaya secara sembarangan) akan berkemak-kemik tentang argumen memutar. Walet terbang tapi tidak berenang; paus

berenang tapi tidak terbang. Vonis keberhasilan pembauran acak kita sebagai perenang atau penerbang itu kita dilakukan setelah kejadian. Anggaplah kita sepakat untuk menilai keberhasilannya sebagai pe-X, dan membiarkan X terungkap nanti sampai kita selesai mencoba menyatukan sel-sel tersebut. Gumpalan acak sel-sel tersebut mungkin ternyata menjadi penggali liang yang sangkil seperti tikus tanah atau pemanjat yang tangkas seperti monyet. Mungkin dia piawai berselancar angin, atau terampil mencengkeram kain perca berminyak, atau membuat lingkaran yang makin kecil sampai akhirnya hilang ke bawah pasir. Daftarnya bisa berlanjut terus dan terus. Atau, apakah memang bisa?

Kalau daftarnya betul-betul *bisa* berlanjut terus dan terus, filsuf rekaan saya tadi mungkin ada benarnya. Kalau, tak peduli seberapa acak Anda mencampur-adukkan zat, hasil penggabungannya itu bisa kerap dibilang, setelah kejadian, terampil melakukan *sesuatu*, maka sah bagi Anda untuk mengatakan bahwa saya curang saat mencontohkan walet dan paus tadi. Tapi para ahli biologi punya syarat yang jauh lebih spesifik untuk mendefinisikan ‘terampil melakukan sesuatu’. Persyaratan minimum bagi kita untuk mengakui sebuah benda sebagai hewan atau tanaman adalah bahwa benda tersebut mesti berhasil *hidup* (lebih tepatnya bahwa dia, atau setidaknya sebagian dari jenisnya, mesti hidup cukup lama untuk berkembang biak). Memang benar bahwa ada cukup banyak cara untuk hidup – terbang, berenang, berayun dari pohon ke pohon, dan seterusnya. Tapi, *seberapa banyak pun cara untuk hidup, sudah pasti jauh lebih banyak cara untuk mati*, atau tidak hidup. Campur-baurkan sel-sel secara acak, terus selama miliaran tahun, dan tidak satu kali pun hasilnya bisa terbang atau berenang atau menggali atau berlari, atau berbuat *apa pun*, sepayah apa pun, yang bisa dianggap sebagai upaya bertahan hidup.

Sudah berpanjang-lebar kita berargumen, sudah saatnya kita ingat lagi mengapa tadi argumen ini kita munculkan. Kita tadi mencari cara tepat untuk mengungkapkan hal yang kita maksud saat mengatakan sesuatu itu rumit. Kita tadi mencoba menunjukkan apa yang sama-sama dimiliki manusia dan tikus tanah dan cacing tanah dan pesawat terbang dan arloji, tetapi tidak dimiliki *blancmange*, atau Mont Blanc, atau bulan. Jawaban yang kita tarik adalah bahwa hal-hal rumit memiliki sifat, yang dapat ditentukan di muka, yang mustahil diperoleh lewat kebetulan acak semata. Untuk perkara benda hidup, sifat yang ditentukan terlebih dahulu ini, dalam pengertian tertentu, disebut ‘kecakapan’; kecakapan dalam kemampuan tertentu seperti terbang, yang mungkin membuat seorang insinyur dirgantara berdecak kagum; atau kecakapan dalam arti lebih umum, seperti kemampuan mencegah kematian, atau kemampuan untuk melakukan propagasi gen dalam reproduksi.

Mencegah kematian adalah hal yang harus diupayakan. Saat dibiarkan sendiri – sebagaimana adanya ketika mati – tubuh cenderung kembali ke keadaan setimbang dengan lingkungannya. Jika Anda mengukur jumlah suhu, keasaman, kandungan air, atau potensi listrik dalam tubuh yang hidup, Anda lazimnya mendapati perbedaan yang kentara dengan jumlah hal-hal yang sama di lingkungan sekitarnya. Contohnya, tubuh kita biasanya lebih panas dari suhu sekitar kita, dan di udara dingin tubuh harus bekerja keras untuk mempertahankan perbedaan ini. Saat kita mati, kerja tersebut berhenti, perbedaan suhu mulai hilang, dan suhu tubuh menyatu dengan suhu sekitar. Tidak semua hewan berupaya begitu keras agar terhindar dari keadaan setimbang dengan suhu sekitarnya, tapi semua hewan melakukan upaya yang *serupa*. Misalnya, di negara yang kering, hewan dan tanaman berupaya mempertahankan kandungan cairan dalam sel-sel mereka, berupaya melawan kecenderungan alami mengalirnya air dari tubuh ke dunia kering di luar. Kalau gagal, mati. Secara lebih umum lagi, kalau benda hidup tidak giat berupaya mencegahnya,

lambat-laun mereka akan melebur ke sekitarnya, dan berhenti mengada sebagai entitas otonom. Itulah yang terjadi ketika mereka mati.

Terkecuali mesin-mesin buatan, yang telah kita sepakati untuk diangkat derajatnya menjadi benda hidup, benda-benda tidak hidup tidak berlaku seperti ini. Mereka menerima daya dan gaya yang cenderung membawa mereka ke dalam keadaan setimbang dengan lingkungannya. Mont Blanc sudah pasti sudah ada sejak dahulu kala, dan kemungkinan masih tetap ada untuk kedepannya, tetapi gunung ini tidak berupaya agar tetap ada. Bila batu sudah tunduk pada pengaruh gaya tarik bumi, ia bergeming pada tempatnya. Tidak perlu upaya untuk membuatnya tetap di sana. Mont Blanc ada, dan akan terus ada hingga hancur terurai atau rebah karena gempa. Ia tidak berupaya memperbaiki keusangan akibat usia, atau bangkit tegak setelah rata dengan tanah akibat gempa, layaknya tubuh yang hidup. Ia sekadar mematuhi hukum fisika yang biasa.

Apa ini berarti benda hidup tidak patuh pada hukum fisika? Tentu tidak. Tidak ada alasan untuk berpikir bahwa benda hidup melanggar hukum fisika. Tak ada yang adikodrati, tak ada 'daya hidup' yang menyaingi kekuatan-kekuatan fundamental fisika. Hanya saja, kalau Anda mencoba menggunakan hukum fisika, secara naif, untuk memahami perilaku tubuh yang hidup secara *utuh*, pemahaman Anda tidak akan jauh dari dangkal. Tubuh adalah benda kompleks dengan banyak bagian penyusun, dan untuk memahami perilakunya Anda harus menerapkan hukum fisika pada bagian-bagian tersebut, bukan pada tubuh secara keseluruhan. Perilaku tubuh sebagai kesatuan utuh akan muncul sebagai konsekuensi dari interaksi bagian-bagian itu.

Ambil contoh, hukum gerak. Kalau Anda melempar bangkai burung ke udara, garis lontarnya akan membentuk lengkung parabola sempurna, persis seperti dikatakan dalam buku-buku fisika, lalu mendarat di tanah dan diam di sana. Perilakunya seperti tubuh padat dengan massa tertentu dan hambatan angin juga berpengaruh di situ. Tapi kalau Anda melempar burung hidup ke udara, garis lontarnya tidak akan membentuk lengkung parabola lalu mendarat di tanah. Ia akan terbang menjauh, dan mungkin tidak hinggap di dalam batas desa sini. Ini karena burung itu memiliki otot yang bekerja melawan gaya tarik bumi dan kekuatan-kekuatan fisik lain yang menyokong seluruh tubuhnya. Hukum fisika dipatuhi dalam setiap sel ototnya. Hasilnya: otot menggerakkan sayap sedemikian rupa sehingga burung itu tetap mengudara. Burung itu tidak melanggar hukum gravitasi. Ia terus-menerus ditarik ke bawah oleh gravitasi, tetapi sayap-sayapnya giat bekerja – sembari tetap patuh pada hukum fisika dalam otot-ototnya – untuk menjaganya tetap di atas, meskipun gaya tarik bumi memengaruhinya. Kita akan berpikir bahwa ia menentang hukum fisika kalau kita cukup naif untuk memperlakukannya semata-mata sebagai gumpalan materi tanpa struktur dengan massa dan gaya hambat angin tertentu. Hanya bila kita ingat bahwa ia memiliki banyak bagian internal, yang kesemuanya mematuhi hukum fisika di levelnya masing-masing, baru kita memahami perilaku tubuhnya secara keseluruhan. Tapi tentu hal ini tidak cuma terjadi pada benda hidup. Berlaku juga bagi semua mesin buatan manusia, dan boleh jadi juga berlaku bagi setiap benda kompleks yang terdiri dari banyak bagian penyusun.

Sampai di sini saya ingin membahas topik terakhir di dalam bab yang agak filosofis ini: perkara maksud dari penjelasan. Sudah kita lihat apa maksud dari hal yang kompleks. Tapi penjelasan macam apa yang dapat dianggap memuaskan saat kita bertanya seperti apa cara kerja mesin yang rumit, atau tubuh yang hidup? Jawabannya ada di paragraf sebelumnya. Kalau ingin memahami cara kerja sebuah mesin atau tubuh yang hidup, kita lihat bagian-bagian penyusunnya dan mencari tahu cara interaksinya satu sama lain. Kalau ada hal kompleks yang belum kita mengerti, kita dapat memahaminya dalam kerangka bagian-bagian sederhana yang sudah kita mengerti.

Kalau saya tanya seorang insinyur bagaimana cara kerja mesin uap, saya punya bayangan yang cukup jelas seperti apa jawaban umum yang saya anggap memuaskan. Seperti Julian Huxley sudah pasti saya tidak terkesan jika si insinyur berkata mesin tersebut didorong oleh '*daya gerak lokomotif*'. Dan kalau dia mulai melantur dengan bercerita bahwa setiap komponennya saling bersinergi, saya akan langsung menyela: 'Kalau itu, saya juga tahu. Tapi coba jelaskan cara *kerjanya*.' Yang ingin saya dengar adalah cara bagian-bagian sebuah mesin berinteraksi satu dengan yang lain untuk menghasilkan perilaku keseluruhan mesin tersebut. Untuk awalan, saya siap menerima penjelasan dalam satuan sub-komponen yang agak besar, yang struktur internal dan perilakunya mungkin agak rumit dan belum terjelaskan. Unit-unit penjelasan awal yang memuaskan itu bisa bernama, misalnya, peti api, ketel uap, silinder, piston, pengatur uap. Si insinyur kemudian menyatakan, awalnya tanpa penjelasan, apa kerja unit-unit ini. Saya akan menerimanya untuk sementara, tanpa bertanya bagaimana masing-masing unit menjalankan kerjanya sendiri. *Atas dasar* fakta bahwa tiap-tiap unit melakukan kerjanya sendiri, saya bisa memahami caranya berinteraksi untuk membuat mesin tersebut bergerak.

Tentu kemudian saya boleh bertanya bagaimana cara kerja tiap-tiap bagian tersebut. Setelah menerima *fakta* bahwa pengatur uap mengatur aliran uap, dan setelah menggunakan fakta ini untuk memahami perilaku keseluruhan mesin tersebut, rasa penasaran lalu saya alihkan pada pengatur uap itu sendiri. Sekarang saya ingin memahami bagaimana pengatur uap bisa berperilaku seperti itu, dalam kerangka bagian-bagian internalnya sendiri. Ada hierarki sub-komponen di dalam komponen. Kita menjelaskan perilaku sebuah komponen di level mana pun, dalam kerangka interaksi antara semua sub-komponen yang susunan internalnya sendiri, untuk sementara, diterima begitu saja. Kita kupas hierarki tersebut, hingga mencapai unit-unit yang begitu sederhana sehingga, sewajarnya, kita tidak lagi merasa perlu menyelidikinya lebih lanjut. Sudah tentu, misalnya, sebagian besar kita puas dengan sifat batang-batang besi kaku, dan bersedia menggunakannya sebagai unit penjelasan bagi mesin-mesin kompleks yang mengandung batang-batang besi kaku tersebut.

Fisikawan, lumrahnya, tidak langsung menerima batang besi apa adanya. Mereka ingin tahu mengapa batang besi itu kaku, dan lanjut mengupas hierarkinya beberapa lapis lagi hingga ke satuan partikel fundamental dan kuark. Tapi kebanyakan kita tak punya waktu untuk itu. Untuk setiap susunan kompleks di level apa pun, penjelasan yang memuaskan biasanya dapat diperoleh jika kita mengupas hierarkinya satu atau dua lapis dari lapisan awal, tidak lebih. Perilaku mobil dijelaskan dalam kerangka silinder, karburator, dan busi. Benar bahwa tiap-tiap komponen ini berada di puncak piramida penjelasan di level yang lebih dalam. Tapi kalau Anda tanya saya tentang cara kerja mobil dan saya menjawab dalam kerangka hukum Newton dan hukum termodinamika, Anda akan merasa jawaban saya muluk-muluk (dan bukan main muluk-muluknya kalau saya menjawab dalam kerangka partikel fundamental). Memang benar bahwa, di level terdalam, perilaku sebuah mobil perlu dijelaskan dalam kerangka interaksi antara partikel-partikel fundamental. Tapi jauh lebih berguna untuk menjelaskannya dalam kerangka interaksi antara piston, silinder, dan busi.

Perilaku sebuah komputer dapat dijelaskan dalam kerangka interaksi antara gerbang-gerbang elektronis semikonduktor, dan perilaku gerbang-gerbang tersebut, pada gilirannya, dijelaskan oleh fisikawan pada level yang lebih dalam lagi. Tapi, untuk tujuan umum, Anda buang-buang waktu kalau mencoba memahami perilaku sebuah komputer secara keseluruhan di level-level tersebut. Terlalu banyak gerbang elektronis dan terlalu banyak kesalingsambungan di antaranya. Penjelasan yang memuaskan bisa muncul dalam kerangka interaksi komponen dalam jumlah

yang wajar. Itu mengapa, kalau ingin memahami cara kerja komputer, lebih baik kalau penjelasan awal disajikan dalam kerangka sekitar setengah lusin sub-komponen utama – memori, prosesor, pencadang data, unit kontrol, pengatur input-output, dll. Setelah memahami interaksi antara setengah lusin komponen utama, baru kita boleh bertanya tentang susunan internal dari komponen-komponen utama ini. Hanya insinyur komputer ahli yang kemungkinan terjun sampai ke level gerbang AND dan gerbang NOR, dan hanya fisikawan saja yang akan menyelam lebih jauh lagi, ke level cara elektron berperilaku dalam medium semikonduksi.

Bagi orang yang suka dengan nama-nama berakhiran ‘-isme’, barangkali nama yang paling pas untuk pendekatan saya dalam memahami cara kerja hal-hal adalah ‘reduksionisme hierarkis’. Kalau Anda baca majalah-majalah intelektual populer, mungkin Anda melihat bahwa ‘reduksionisme’ itu salah satu hal yang, seperti dosa, hanya disebut oleh orang-orang yang menentanginya. Menyebut diri sebagai seorang reduksionis akan terkesan, di beberapa kalangan, seperti mengaku sebagai pemakan bayi. Tapi, karena tidak ada orang yang benar-benar pemakan bayi, tidak ada pula orang yang reduksionis, dalam arti yang patut ditentang. Reduksionis semu itu – yang ditentang setiap orang, tetapi yang hanya ada dalam khayalan mereka saja – mencoba menjelaskan hal-hal rumit *langsung* dalam kerangka bagian-bagian *terkecil*, dan bahkan, menurut versi ekstrem mitosnya, dalam kerangka *hakikat* dari bagian-bagian itu! Di lain pihak, seorang reduksionis hierarkis menjelaskan entitas kompleks di level tertentu mana pun dalam hierarki susunannya, dalam kerangka entitas yang hanya satu level di bawah dalam hierarki tersebut; entitas yang kemungkinan cukup kompleks sehingga membutuhkan pereduksian lebih lanjut ke bagian-bagian penyusunnya; dan seterusnya. Sudah jelas – walau reduksionis khayali pemakan bayi konon menyangkalnya – bahwa jenis penjelasan yang cocok di level-level atas dalam hierarki tersebut cukup berbeda dari jenis penjelasan yang cocok di level-level bawah. Itu mengapa mobil lebih baik dijelaskan di level karburator ketimbang kuark. Tapi si reduksionis hierarkis juga tahu bahwa karburator dijelaskan dalam kerangka unit-unit yang lebih kecil ..., yang dijelaskan dalam kerangka unit-unit yang lebih kecil ..., yang pada akhirnya dijelaskan dalam kerangka partikel-partikel fundamental terkecil. Reduksionisme, dalam pengertian ini, hanyalah nama lain dari keinginan jujur untuk memahami cara kerja hal-hal.

Bagian ini kita awali dengan mencari tahu seperti apa penjelasan atas hal-hal rumit yang dapat memuaskan kita. Kita baru menimbang pertanyaan ini dari sudut pandang mekanisme: bagaimana cara kerjanya? Kita simpulkan bahwa perilaku suatu hal yang rumit mesti dijelaskan dalam kerangka interaksi antara bagian-bagian penyusunnya, yang tertata dalam lapisan-lapisan beruntun sebuah hierarki yang rapi. Tapi timbul pertanyaan lain: bagaimana hal yang rumit itu bisa ada? Ini pertanyaan inti yang diangkat di dalam buku ini, jadi saya tidak akan bahas lebih lanjut di sini. Cukup saya sebutkan bahwa prinsip umum dalam memahami ihwal mekanisme juga berlaku untuknya. Hal yang rumit adalah hal yang keberadaannya kita rasa menggajjal kalau diterima apa adanya, karena ia terlalu ‘muskil’. Tidak mungkin ia mengada karena suatu kebetulan semata. Kita akan jelaskan proses mengada tersebut sebagai konsekuensi dari transformasi yang bertahap, kumulatif, langkah-demi-langkah dari hal-hal yang lebih sederhana, dari benda-benda purba yang cukup sederhana hingga bisa mewujudkan karena kebetulan semata. Persis seperti ‘reduksionisme langkah-besar’ yang tidak mampu menjelaskan mekanisme, dan harus diganti dengan serangkaian pengupasan langkah-demi-langkah turun menyusuri hierarkinya, kita pun tidak dapat menjelaskan hal kompleks sebagai hal yang *bermuasal* dalam satu langkah besar. Sekali lagi kita harus memilih serangkaian langkah kecil, yang kali ini disusun secara beruntun dalam garis waktu.

Ahli kimia fisik dari Oxford, Peter Atkins, mengawali buku yang ditulisnya dengan apik, *The Creation*, dengan:

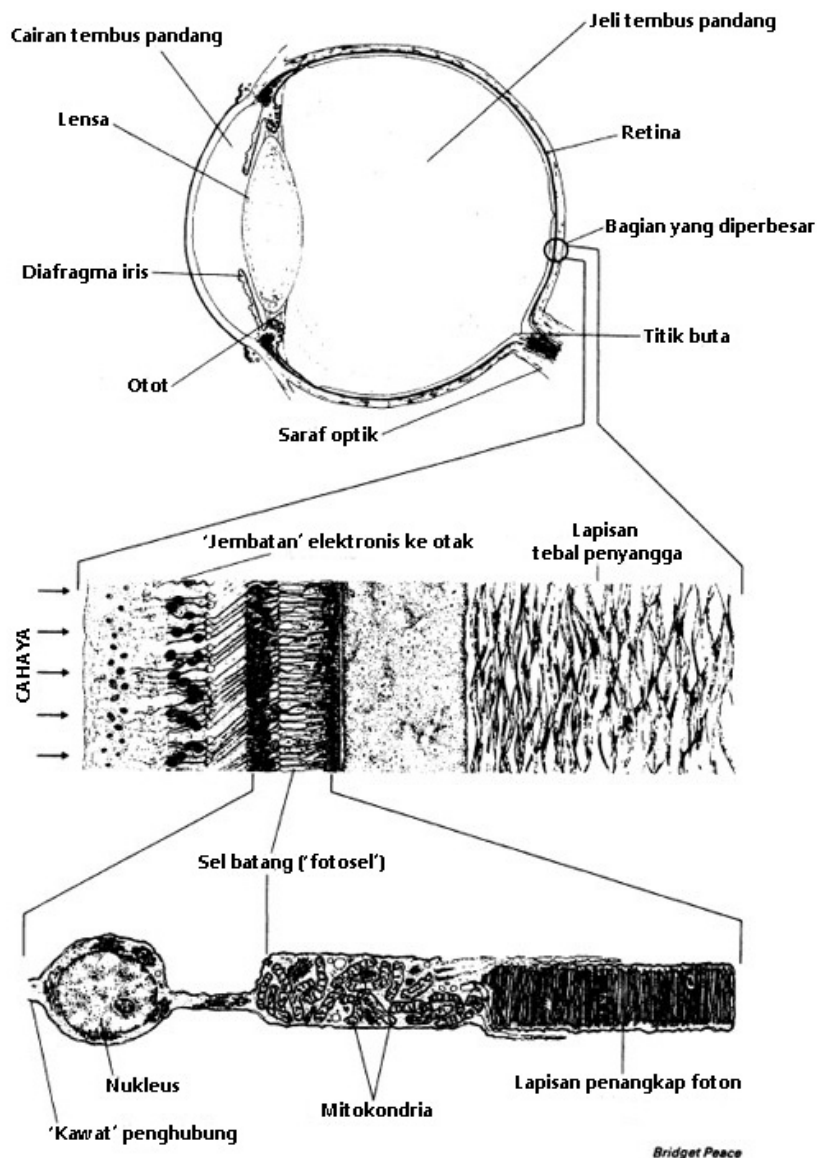
Saya akan membawa pikiran Anda dalam sebuah perjalanan. Perjalanan ini perjalanan mencari pengertian, yang membawa kita ke tepi ruang, waktu, dan pemahaman. Di situ saya ajukan: tidak ada yang tidak dapat dipahami, tidak ada yang tidak bisa dijelaskan, semuanya sederhana semata ... Banyak isi alam semesta tidak butuh penjelasan. Gajah, misalnya. Begitu molekul tahu cara bersaing dan menciptakan molekul lain mengikuti citranya sendiri, gajah, dan hal-hal yang menyerupai gajah, lambat-laun akan berkeliaran di penjuru negeri.

Atkins menganggap bahwa evolusi hal-hal kompleks – pokok bahasan buku ini – tidak akan terelakkan begitu semua syarat fisik yang diperlukan sudah ditetapkan. Ia bertanya apa syarat-syarat fisik minimum yang dibutuhkan itu, semalas apa boleh sang Pencipta berbuat dalam kerja merancang, supaya memastikan bahwa alam semesta dan, kemudian, gajah serta hal-hal kompleks lainnya, lambat-laun akan mengada. Jawabannya, dari sudut pandangnya sebagai seorang ilmuwan fisika, adalah bahwa sang Pencipta itu boleh semalas nian. Unit-unit fundamental asli yang perlu kita dalilkan, untuk memahami mewujudnya segala sesuatu, adalah sama sekali kosong (menurut sebagian fisikawan) atau (menurut sebagian fisikawan lain) berupa unit-unit yang paling sederhana, terlampau sederhana hingga tak butuh perbuatan seakbar Penciptaan sengaja.

Atkins berkata bahwa gajah dan hal-hal kompleks tidak membutuhkan penjelasan. Tapi itu karena ia seorang ilmuwan fisika, yang menanggapi teori evolusi ahli biologi benar adanya. Ia tidak sungguh-sungguh bermaksud bahwa gajah tidak perlu dijelaskan; alih-alih, cukuplah para ahli biologi yang menjelaskannya, sejauh para ahli tersebut boleh menganggap fakta-fakta fisika tertentu benar adanya. Oleh karena itu, tugasnya sebagai ilmuwan fisika adalah menjustifikasi bahwa fakta-fakta fisika tersebut benar adanya. Dan ia berhasil melakukannya. Posisi saya, pelengkap. Saya seorang ahli biologi. Saya menganggap fakta-fakta fisika, fakta-fakta dunia sederhana, benar adanya. Kalau para ahli fisika masih belum bersepakat mengenai fakta-fakta sederhana yang belum lagi dipahami, itu bukan urusan saya. Tugas saya, menjelaskan gajah, dan dunia hal-hal kompleks, dalam kerangka hal-hal sederhana yang sudah atau masih berupaya dipahami para ahli fisika. Perkara ahli fisika adalah perkara asal mula pertama dan hukum-hukum alam pamungkas. Perkara ahli biologi adalah perkara kompleksitas. Ahli biologi mencoba menjelaskan cara kerja, dan cara mengada, hal-hal kompleks, dalam kerangka hal-hal yang lebih sederhana. Ia boleh menganggap tugasnya paripurna ketika ia telah sampai pada entitas-entitas yang begitu sederhana sehingga bisa dengan aman diserahkan ke tangan fisikawan.

Saya sadar bahwa pencirian benda kompleks versi saya – muskil secara statistik ke arah yang ditentukan bukan setelah kejadian – tampak idiosinkratis. Begitu pula dengan pencirian fisika sebagai kajian hal-hal sederhana. Kalau Anda lebih suka cara lain dalam mendefinisikan kompleksitas, saya tidak peduli dan dengan senang hati saya ikut definisi Anda dalam perbincangan kita. Tapi saya peduli bahwa, apa pun istilah yang kita pilih untuk *menyebut* sifat muskil-secara-statistik-ke-arah-yang-ditentukan-bukan-setelah-kejadian, sifat penting ini membutuhkan penjelasan dengan usaha yang istimewa. Inilah sifat yang mencirikan benda-benda biologis, dan membedakannya dari benda-benda fisika. Jenis penjelasan yang kita kemukakan tidak boleh bertolak-belakang dengan hukum-hukum fisika. Malah, penjelasan ini akan menggunakan hukum-hukum fisika semata. Tapi di sini hukum-hukum fisika didayagunakan dengan cara yang spesial, tidak seperti yang biasanya dibahas di dalam buku-buku pelajaran fisika. Cara istimewa tersebut adalah cara Darwin. Saya akan kemukakan esensi fundamentalnya di Bab 3 dengan pokok istilah *seleksi kumulatif*.

Sementara itu, saya ingin mengikuti Paley dalam menekankan besarnya masalah mesti dijelaskan, akbarnya kompleksitas biologis dan indah serta anggunnya rancangan biologis. Bab 2 merupakan pembahasan panjang mengenai sebuah contoh, ‘radar’ pada kelelawar, yang ditemukan jauh setelah masa hidup Paley. Dan di sini, di bab ini, saya taruh sebuah ilustrasi (Gambar 1) bola mata bersama dengan dua ‘pembesaran’ beruntun pada bagian-bagian terperinci – andai saja saat Paley masih hidup sudah ada mikroskop elektron! Gambar bagian atas adalah bagian bola mata itu sendiri. Pembesaran di level ini menunjukkan mata sebagai instrumen optis. Tampak jelas kemiripannya dengan sebuah kamera. Diafragma selaput pelangi (iris) bertugas untuk terus-menerus menyesuaikan bukaan, *f stop*. Lensa, yang sebetulnya hanya bagian dari sebuah sistem lensa majemuk, bertugas mengatur bagian-bagian pemfokusan. Fokus diubah dengan menekan lensa dengan otot-otot (kalau pada bunglon, dengan menggerakkan lensa maju atau mundur, seperti pada kamera buatan manusia). Citra mendarat pada retina di bagian belakang, merangsang fotosel.



Gambar 1

Bagian tengah Gambar 1 menunjukkan hasil pembesaran sebagian kecil dari retina. Cahaya masuk dari kiri. Sel-sel peka cahaya ('fotosel') bukanlah hal pertama yang dikenai cahaya. Sel-sel ini tertanam di dalam dan membelakangi cahaya. Fitur ganjil ini disebutkan lagi nanti. Hal pertama yang dikenai cahaya itu justru sel-sel ganglion yang merupakan 'jembatan elektronis' di antara fotosel dan otak. Sebetulnya sel-sel ganglion bertugas mengolah terlebih dahulu informasi dengan cara-cara yang canggih sebelum direlai ke otak, dan karena itu agaknya kurang adil kalau diistilahkan dengan 'jembatan'. 'Komputer satelit' mungkin nama yang lebih sepadan. Kawat-kawat dari sel-sel ganglion mengulur di sepanjang permukaan retina ke 'titik buta', tempatnya menyelam melalui retina, membentuk kabel batang utama ke otak, saraf optik. Ada kira-kira tiga juta sel ganglion dalam 'jembatan elektronis' ini, yang bertugas mengumpulkan data dari sekitar 125 juta fotosel.

Bagian bawah gambar menampilkan satu fotosel yang diperbesar, sel batang. Saat melihat arsitektur pelik dari sel ini, ingatlah bahwa semua kompleksitas tersebut diulang 125 juta kali pada tiap retina. Dan kompleksitas yang sebanding diulang triliunan kali di mana pun di seluruh tubuh. Angka 125 juta fotosel itu kira-kira 5.000 kalinya jumlah titik resolusi dalam foto majalah yang berkualitas baik. Selaput-selaput lipat pada bagian kanan gambar fotosel adalah pranata pengumpul cahaya yang sebetulnya. Bentuknya yang berlapis-lapis meningkatkan efisiensi fotosel dalam menangkap foton, partikel fundamental penyusun cahaya. Kalau foton tidak tertangkap selaput pertama, selaput kedua yang menangkapnya, dan seterusnya. Karena inilah ada mata yang mampu mendeteksi satu foton. Emulsi film tercepat dan terpeka yang tersedia bagi para juru kamera membutuhkan foton sekitar 25 kali lebih banyak agar dapat mendeteksi setitik cahaya. Benda-benda berbentuk belah ketupat di bagian tengah sel tersebut sebagian besar mitokondria. Mitokondria dijumpai bukan hanya pada fotosel, tetapi di sebagian besar sel-sel lainnya. Masing-masing dapat dibayangkan sebagai pabrik kimia yang, dalam menghasilkan energi sebagai produk utamanya, mengolah lebih dari 700 zat kimia, dalam jalur-jalur perakitan yang panjang dan jalin-menjalin, yang terangkai di sepanjang permukaan selaput dalam yang berlipat-lipat dengan ruwetnya. Yang bulat bundar di sebelah kiri Gambar 1 itu adalah nukleus. Lagi-lagi, ini adalah ciri-ciri semua sel hewan dan tanaman. Tiap nukleus, seperti yang nanti kita saksikan di Bab 5, mengandung basis data terkode secara digital yang lebih besar, dalam hal kandungan informasinya, dari 30 jilid *Encyclopaedia Britannica*. Dan angka ini hanya untuk *tiap* sel, bukan seluruh sel di dalam tubuh.

Sel batang pada bagian bawah gambar itu hanya satu sel saja. Jumlah total sel dalam tubuh (manusia) adalah sekitar 10 triliun. Saat Anda makan *steak*, itu sama dengan mencabik-cabik lebih dari 100 miliar eksemplar *Encyclopaedia Britannica*.

BAB 2

Rancangan yang Baik

Seleksi alam adalah pembuat arloji yang buta, buta karena ia tidak melihat ke depan, tidak merencanakan ganjaran, tidak memandang suatu tujuan. Tapi hasil-hasil hidup dari seleksi alam begitu hebatnya membuat kita merasa menyaksikan rancangan yang seolah merupakan buah karya seorang empu arloji, mencengangkan kita dengan ilusi rancangan dan perencanaan. Tujuan buku ini adalah memecahkan paradoks ini sampai pembaca merasa tuntas, dan tujuan bab ini adalah untuk makin mencengangkan pembaca dengan kuasa ilusi rancangan itu. Akan kita lihat satu contohnya dan dari situ dapat kita simpulkan bahwa, untuk urusan kompleksitas dan keindahan rancangan, penjelasan Paley belum apa-apa.

Tubuh atau organ yang hidup boleh dibilang telah dirancang dengan baik jika memiliki atribut-atribut yang mungkin telah disematkan oleh insinyur cerdas dan berpengetahuan agar organisme tersebut mampu mencapai suatu tujuan, seperti terbang, berenang, melihat, makan, berkembang biak, atau, lebih luasnya, agar gen-gennya bertahan hidup dan bereplikasi. Apakah rancangan tubuh atau organ tersebut yang *terbaik* yang bisa dirancang seorang insinyur, tidak perlu kita acuhkan. Karena sering, yang terbaik dari satu insinyur, dalam perkara apa pun, dilampaui oleh yang terbaik dari insinyur yang lain, khususnya insinyur lain yang hidup di masa lebih akhir dalam sejarah teknologi. Tapi setiap insinyur dapat mengenali suatu benda yang telah dirancang, biar yang buruk sekali pun, untuk suatu tujuan; dan ia dapat menduga tujuan tersebut hanya dengan melihat struktur benda itu. Di Bab 1 kita banyak mengudar gagasan untuk segi-segi yang filosofis. Di bab ini, saya akan memaparkan satu contoh faktual yang saya yakin akan membuat insinyur mana pun terkesan: sonar ('radar') pada kelelawar. Dalam menjelaskan tiap poinnya, saya akan awali dengan sebuah masalah yang dihadapi mesin hidup ini; lalu saya jajaki solusi yang mungkin akan dipertimbangkan seorang insinyur yang bijak untuk menjawab masalah tersebut; pada akhirnya, saya akan hadirkan solusi yang diambil oleh alam. Contoh yang satu ini, tentunya, hanya untuk ilustrasi saja. Kalau seorang insinyur terkesan oleh kelelawar, ia akan terkesan pula oleh contoh rancangan hidup lain yang tak terhitung jumlahnya.

Masalah yang dihadapi kelelawar: mencari jalan di kegelapan. Mereka berburu di malam hari, dan tidak bisa menggunakan cahaya untuk membantu menemukan mangsa dan menghindari rintangan. Mungkin Anda berpikir: salahnya sendiri, kenapa mereka tidak mengubah kebiasaan dan berburu di siang hari saja? Tapi ekonomi siang hari sudah terlalu dieksploitasi oleh makhluk-makhluk lain seperti burung. Karena makan bisa dicari di malam hari, dan karena jam kerja siang sudah dikerubuti hewan lain, seleksi alam telah memilih kelelawar yang berburu mangsa di malam hari. Omong-omong, ada kemungkinan pola hidup nokturnal ini juga dilakukan nenek moyang kita semua, kaum mamalia. Di masa ketika dinosaurus mendominasi ekonomi siang hari, nenek moyang mamalia kita mungkin hanya mampu bertahan hidup karena menemukan cara mengais rezeki di malam hari. Baru setelah dinosaurus punah secara misterius sekitar 65 juta tahun yang lalu nenek moyang kita bisa muncul ke siang hari secara besar-besaran.

Kembali ke perkara kelelawar tadi, persoalan teknik yang mereka hadapi: bagaimana mencari jalan dan mencari mangsa tanpa cahaya? Kelelawar bukan satu-satunya makhluk yang menghadapi kesulitan ini sekarang. Sudah pasti, serangga-serangga penerbang malam yang mereka mangsa juga harus bisa mencari jalannya sendiri. Ikan laut dalam dan paus mendapat

hanya sekelumit cahaya atau tanpa cahaya sama sekali di siang maupun malam hari karena sinar matahari tidak dapat menembus jauh ke bawah permukaan air. Ikan dan lumba-lumba yang hidup di perairan yang amat berlumpur tidak bisa melihat karena, meskipun ada cahaya, cahaya itu terhalang dan terpecah oleh kotoran di air. Banyak hewan modern lain bertahan hidup dalam kondisi sulit atau tidak mungkin melihat.

Lalu apa solusi yang mungkin dipertimbangkan seorang insinyur untuk masalah bermanuver di dalam gelap? Akal pertama yang mungkin melintas adalah membuat cahaya, dengan lentera atau senter. Kunang-kunang dan beberapa jenis ikan (biasanya dengan bantuan bakteri) punya daya untuk membuat cahayanya sendiri, tapi prosesnya tampak menguras tenaga. Kunang-kunang menggunakan cahayanya untuk menarik perhatian pasangan. Ini tidak membutuhkan terlalu banyak tenaga: titik kecil cahaya kunang-kunang jantan dapat dilihat oleh betina dari kejauhan di malam gelap, karena matanya terpapar langsung pada sumber cahaya itu sendiri. Menggunakan cahaya untuk mencari jalan di lingkungan sekitar membutuhkan tenaga yang jauh lebih besar, karena mata harus mendeteksi sebagian kecil cahaya yang dipantulkan tiap jengkal wilayah tersebut. Oleh karena itu, jika digunakan sebagai lampu sorot untuk menerangi jalan dan bukan isyarat untuk pihak lain, sumber cahaya yang dipakai harus jauh lebih terang. Lagi pula, terlepas dari alasan besarnya jumlah energi yang harus digunakan, tampak bahwa, kecuali untuk segelintir jenis ikan laut dalam yang aneh rupa, tidak ada hewan selain manusia yang memakai cahaya buatan untuk mencari jalan.

Apa lagi solusi yang dapat dipikirkan si insinyur? Ya, orang buta kadang tampak punya kemampuan mengindra yang luar biasa terhadap rintangan di jalan mereka. Kemampuan ini dinamai dengan istilah ‘penglihatan muka’, karena orang buta bilang rasanya seperti sentuhan di wajah mereka. Ada juga laporan mengisahkan seorang bocah buta total yang mampu mengendarai sepeda roda tiganya dengan kecepatan wajar keliling kompleks di dekat rumahnya, dengan ‘penglihatan muka’. Eksperimen menunjukkan bahwa, faktanya, ‘penglihatan muka’ tidak ada kaitannya dengan sentuhan atau bagian depan wajah, walaupun sensasinya *terasa* di muka, seperti rasa sakit semu (*phantom limb pain*) yang dirasakan orang yang kaki atau tangannya diamputasi. Sensasi ‘penglihatan muka’, ternyata, sebetulnya masuk melalui telinga. Tanpa sadar, orang buta sebetulnya menggunakan *gema*, dari langkah kaki mereka sendiri dan bunyi-bunyi lainnya, untuk merasakan adanya rintangan. Sebelum hal ini ditemukan, para insinyur sudah membuat instrumen untuk memanfaatkan prinsip tersebut, misalnya untuk mengukur kedalaman laut di bawah kapal. Setelah teknik ini ditemukan, tidak lama kemudian para perancang senjata mengadaptasikannya untuk mendeteksi kapal selam. Kedua pihak dalam Perang Dunia Kedua amat mengandalkan perangkat-perangkat ini, dengan nama sandi seperti Asdic (Inggris) dan Sonar (Amerika), begitu juga dengan teknologi lain yang serupa: Radar (Amerika) atau RDF (Inggris), yang menggunakan gema radio, bukan gema suara.

Para pelopor teknologi Sonar dan Radar tidak mengetahuinya, tapi seluruh dunia sekarang tahu bahwa kelelawar, atau tepatnya seleksi alam atas kelelawar, telah menyempurnakan sistem ini puluhan juta tahun lebih awal, dan ‘radar’ mereka mencapai kualitas deteksi dan navigasi yang akan membuat seorang insinyur tercengang kagum. Secara teknis keliru kalau kita menyebutnya ‘radar’, karena mereka tidak menggunakan gelombang radio. Sonar istilah yang lebih tepat. Tetapi teori-teori matematika yang mendasari radar dan sonar sangatlah mirip, dan sebagian besar pemahaman ilmiah kita atas perincian tindak-tanduk kelelawar didapat dengan menerapkan teori radar pada kelelawar. Ahli hewan dari Amerika, Donald Griffin, yang berjasa besar dalam penemuan sonar pada kelelawar, menciptakan istilah ‘*echolocation*’ (‘ekolokasi’)

untuk memayungi sonar dan radar, baik yang dipakai oleh hewan maupun oleh instrumen buatan manusia. Pada praktiknya, kata ini tampak lebih sering digunakan untuk merujuk sonar pada hewan.

Tidak betul kalau kita anggap seolah-olah semua kelelawar itu sama. Mirip seperti membahas soal anjing, singa, musang, beruang, dubuk, panda, dan berang-berang sekali pukul hanya karena mereka semua karnivora. Berbagai kelompok kelelawar menggunakan sonar dengan cara yang secara radikal berbeda, dan mereka tampaknya ‘menemukan’ cara ini masing-masing, seperti Inggris, Jerman, dan Amerika mengembangkan teknologi radar mereka sendiri-sendiri. Tidak semua kelelawar menggunakan ekolokasi. Codot (kelelawar besar pemakan buah) punya penglihatan yang bagus, dan kebanyakan mereka menggunakan mata saja untuk mencari jalan. Akan tetapi, satu atau dua spesies kelelawar buah, contohnya *Rousettus*, mampu mencari jalan di lingkungan gelap gulita yang tidak dapat dijangkau oleh mata setajam apa pun. Mereka menggunakan sonar, tapi sonar yang jenisnya lebih kasar dari yang digunakan kelelawar bertubuh lebih kecil yang biasa kita temukan di kawasan iklim sedang. Ketika terbang, *Rousettus* berdecap-decap dengan kuat dan ritmis, dan menentukan arah gerak dengan mengukur kelang waktu antara setiap decapan dan gemanya. Sebagian besar decap-decapan *Rousettus* cukup jelas terdengar telinga kita (yang berarti decapan tersebut berupa suara, bukan suara ultra (ultrasonik): suara ultra sama saja dengan suara, kecuali dalam hal frekuensinya yang terlalu tinggi untuk dapat didengar manusia).

Teorinya, makin tinggi titi nada suara, makin baik untuk sonar yang akurat. Ini karena suara bertiti nada rendah memiliki jenjang gelombang yang panjang yang tidak dapat memastikan jarak di antara benda-benda yang berdekatan. Demikian pula, idealnya rudal yang menggunakan gema sebagai sistem pemandunya akan menghasilkan suara dengan titi nada yang sangat tinggi. Memang, sebagian besar kelelawar menggunakan suara yang titi nadanya teramat sangat tinggi, terlalu tinggi untuk didengar manusia – suara ultra. Tidak seperti *Rousettus*, yang dapat melihat dengan sangat baik dan yang menggunakan suara bertiti nada relatif rendah dan tidak diubah-ubah untuk melakukan ekolokasi sederhana guna melengkapi penglihatannya yang sudah baik, kelelawar yang berukuran lebih kecil tampil sebagai mesin gema berteknologi tinggi. Mata mereka kecil dan, seringnya, mungkin tak banyak berguna. Mereka hidup di dunia gema, dan mungkin otak mereka bisa menggunakan gema untuk melakukan hal yang mirip dengan ‘melihat’ citra, walaupun hampir tidak mungkin bagi kita untuk dapat ‘membayangkan’ seperti apa rupa citra tersebut. Bunyi yang mereka hasilkan tidak seperti bunyi peluit anjing, yang cuma sedikit terlalu tinggi untuk dapat didengar manusia. Kerap kali bunyi-bunyi tersebut jauh melampaui nada tertinggi yang pernah didengar atau bisa dibayangkan siapa pun. Kita beruntung karena, kebetulan, tidak bisa mendengarnya. Suara-suara ini bukan main kuatnya dan memekakkan telinga. Manusia tak mungkin bisa tidur kalau dapat mendengar suara mereka.

Kelelawar ini ibarat miniatur pesawat mata-mata, yang dilengkapi seperangkat alat canggih. Otak mereka berupa kotak rekayasa elektronik yang disetel dengan telitinya, diprogram dengan perangkat lunak canggih yang dibutuhkan untuk mengurai sandi dunia gema secara seketika. Paras mereka serupa muka iblis yang tampak mengerikan hingga kita melihat diri mereka yang sejati: jentera bergaya anggun yang piawai memancarkan suara ultra ke arah yang diinginkan.

Kendati kita tidak bisa mendengar langsung denyut-denyut ultrasonik yang dihasilkan kelelawar ini, kita bisa mencoba memahami apa yang terjadi dengan bantuan sebuah mesin penerjemah atau ‘pendeteksi kelelawar’. Mesin ini menerima denyut-denyut tersebut melalui mikrofon ultrasonik khusus, dan mengubah tiap denyut ke bentuk decapan atau tona yang dapat

didengar melalui pengeras suara. Kalau kita bawa ‘pendeteksi kelelawar’ ini ke lingkungan tempat kelelawar mencari makan, kita akan mendengar *kapan* tiap denyut kelelawar dipancarkan, meskipun tidak dapat mendengar seperti apa ‘bunyi’ denyut-denyut itu sebetulnya. Kalau kelelawar kita itu *Myotis*, salah satu jenis kelelawar kecil berwarna coklat yang lazim dijumpai, kita akan mendengar serangkaian decapan dalam kecepatan sekitar 10 per detik saat kelelawar tersebut terbang menjelajah dalam misi rutinnya. Kecepatan ini kira-kira sama dengan kecepatan teleprinter standar, atau kecepatan tembak senapan mesin Bren.

Dengan demikian, dapat dianggap bahwa citra dunia yang dijelajahi kelelawar tersebut diperbarui 10 kali per detik. Citra visual kita sendiri tampak terus-menerus diperbarui selama mata kita terbuka. Kita bisa mencicipi rasa citra dunia yang diperbarui secara berselang-selang, dengan menggunakan stroboskop di malam hari. Kadang hal ini juga dilakukan di diskotek, dan efek yang dihasilkannya dramatis. Orang yang sedang bergoyang di lantai dansa tampak seperti rentetan sikap gerak statis yang bergeming. Tentu saja, kalau stroboskopnya kita setel makin cepat, citra tersebut makin mendekati penglihatan ‘malar’ yang normal. ‘Penyampelan’ penglihatan stroboskopis pada kecepatan kira-kira 10 sampel per detik akan hampir sama baiknya dengan penglihatan ‘malar’ normal untuk beberapa tujuan biasa, walaupun kurang baik untuk tujuan menangkap bola atau serangga.

Itu baru kecepatan sampel kelelawar yang terbang biasa. Ketika kelelawar coklat kecil itu mendeteksi serangga dan mulai berancang-ancang untuk mencegat mangsa, kecepatan decapannya naik. Lebih cepat dari senapan mesin, dengan kecepatan puncak hingga 200 denyut per detik, ketika kelelawar tersebut akhirnya mendekat ke sasaran bergeraknya. Untuk meniru keadaan ini, kita harus mempercepat stroboskop kita hingga berkedip dua kali lebih cepat dari siklus bolak-balik listrik dari gardu ke rumah kita, kedip yang tidak kita sadari ada pada lampu selang neon. Di dunia visual yang ‘berdenyut’ dengan frekuensi setinggi itu, sudah pasti tidak ada kesulitan untuk melakukan semua fungsi visual normal kita, untuk main ping-pong sekalipun. Kalau kita bayangkan otak kelelawar membentuk sebuah citra dunia yang sebanding dengan citra-citra visual kita, kecepatan denyut itu saja cukup untuk membayangkan bahwa citra gema si kelelawar mungkin setidaknya semendetail dan ‘semalar’ citra visual kita. Tentu, mungkin ada alasan lain mengapa citra tersebut tidak begitu mendetail seperti citra visual kita.

Kalau kelelawar mampu membuat kecepatan sampelnya melonjak hingga 200 denyut per detik, mengapa mereka tidak terus-terusan begitu? Karena mereka ternyata memiliki ‘kenop’ pengendali kecepatan pada ‘stroboskop’ mereka, mengapa tidak diputar ke kecepatan maksimal secara permanen, supaya pengindraan dunia sekitar mereka senantiasa dalam kualitas paling jernih, dan selalu siaga untuk menanggapi keadaan darurat apa pun? Salah satu alasannya adalah karena kecepatan tinggi ini hanya cocok untuk sasaran dekat. Kalau satu denyutan terlalu kencang membuntuti denyutan pendahulunya, denyutan itu bercampur dengan gema dari denyutan pendahulu yang kembali dari sasaran jauh. Andai pun ini bukan alasannya, kemungkinan kelelawar tidak selalu menjaga denyutannya dalam kecepatan tertinggi sebagai upaya menghemat tenaga. Menghasilkan denyut-denyut ultrasonik yang kencang pasti mahal ‘biayanya’; mahal di tenaga, mahal di ketahanan telinga dan organ suara, mungkin mahal di komputasi otak juga. Otak yang setiap detik mengolah 200 gema yang masing-masing unik ini mungkin sudah tidak sanggup memikirkan hal yang lain. Menghasilkan denyut dengan kecepatan 10 per detik itu pun kemungkinan cukup mahal, tapi jauh lebih murah ketimbang kecepatan maksimal 200 per detik. Seekor kelelawar yang mempercepat decapannya akan membayar ‘harga’ lebih mahal dalam hal tenaga, dsb., tetapi justru tidak sepadan dengan peningkatan

ketajaman hasilnya. Bila satu-satunya benda yang bergerak di sekitar situ adalah kelelawar itu sendiri, dunia sekeliling yang hadir dalam rentetan sepuluh sinyal per detik sudah tampak cukup serupa sehingga tidak perlu disampelkan lebih kerap lagi. Ketika di lingkungan sekitar ada benda bergerak yang lain, apalagi serangga yang terbang dengan gerakan memuntir, berkelok, dan berkelit susah-payah untuk lolos dari kejaran pemangsa, manfaat ekstra percepatan sampel yang dilakukan kelelawar lebih sepadan dengan kenaikan harganya. Tentu saja pertimbangan biaya dan manfaat di paragraf ini adalah perkiraan, tetapi hampir pasti seperti itulah yang terjadi.

Insinyur yang hendak merancang perangkat radar atau sonar yang efisien langsung dihadapkan pada masalah: denyut-denyut yang dihasilkan mesti amat sangat kencang. Denyut-denyut tersebut harus kencang karena ketika suara dipancarkan, muka gelombang merambat seperti bola yang terus meluas. Intensitas suara tersebar dan, dalam arti tertentu, ‘membuyar’ di atas seluruh permukaan bola tersebut. Bidang permukaan dari bola mana pun berbanding lurus dengan radius kuadrat tersebut. Karena itu, intensitas suara di titik tertentu mana saja pada bola tersebut menurun, tidak berbanding lurus dengan jarak (radius) tetapi berbanding lurus dengan jarak kuadrat dari sumber suara, seiring muka gelombang merambat maju dan bolanya membesar. Ini berarti suara jadi cepat sayup saat menjauh dari sumbernya, dalam hal ini kelelawar.

Ketika menumbuk sebuah benda, umpamanya lalat, suara yang sudah membuyar tersebut dipantulkan. Suara pantulan ini kemudian memancar, menjauh dari lalat dalam muka gelombang berbentuk bola yang terus meluas. Seperti halnya suara asli tadi, suara pantulan ini pun makin meredup seiring bertambahnya jarak kuadrat dari lalat. Di saat gemanya kembali ke kelelawar, meredupnya intensitas suara tersebut berbanding lurus, bukan dengan jarak lalat dari kelelawar, bukan pula dengan jarak kuadratnya, tetapi seperti kuadrat pangkat dua – empat kali lipat dari jarak tersebut. Artinya, amat sangat sayup. Sebagian dari masalah ini dapat teratasi jika kelelawar memancarkan suara dengan alat yang sepadan dengan megafon, tapi hanya jika ia sudah tahu arah sasarannya. Bagaimanapun juga, kalau kelelawar hendak menerima gema yang memadai dari sasaran yang jauh, decitan yang dikeluarkannya pastilah sangat kencang, dan instrumen yang mendeteksi gema tersebut, yaitu telinga, pastilah sangat peka terhadap suara-suara yang sayup sekali – gema-gema tersebut. Seperti telah kita lihat, kelelawar memang sering memekik sangat kencang, dan telinga mereka sangat peka.

Nah, begini masalah yang akan mendera si insinyur yang mencoba merancang mesin bak-kelelawar. Kalau mikrofon, atau telinganya, sepeka itu, ada bahaya besar karena bisa rusak parah akibat denyut suara yang dikeluarkannya begitu kencang. Tak ada guna mencoba mengatasi masalah ini dengan membuat suaranya lebih sayup, karena nanti gemanya jadi terlalu sayup untuk bisa didengar. Dan tak ada guna mencoba mengatasi masalah *itu* dengan membuat mikrofon (‘telinga’) lebih peka, karena nanti malah jadi lebih rentan rusak akibat suara yang keluar, meskipun sedikit lebih sayup! Ini dilema yang melekat pada perbedaan intensitas yang dramatis antara suara yang keluar dan gema yang kembali, perbedaan tak terelakkan yang disebabkan oleh hukum-hukum fisika.

Apa jalan keluar lain yang mungkin terlintas di dalam benak si insinyur? Saat para perancang radar di Perang Dunia Kedua menghadapi masalah serupa, mereka mengajukan solusi yang disebut radar ‘kirim/terima’. Sinyal radar dikirim dalam bentuk denyut-denyut yang sangat kuat, yang mampu merusak antena yang sangat sensitif yang menunggu gema-gema sayup datang kembali. Sirkuit ‘kirim/terima’ memutuskan sambungan antena penerima untuk sementara, persis sebelum denyut keluar dipancarkan, lalu disambung kembali tepat saat akan menerima gema.

Kelelawar sudah mengembangkan teknologi ‘kirim/terima’ jauh-jauh hari, mungkin jutaan tahun sebelum nenek moyang manusia turun dari pohon. Begini cara kerjanya. Pada telinga kelelawar, seperti pada telinga manusia juga, suara diteruskan dari gendang telinga ke sel-sel mikrofonis peka suara melalui jembatan berupa tiga tulang kecil yang, karena bentuknya, disebut dengan istilah Latin yang berarti martil, landasan, dan sanggurdi. Omong-omong, letak-gantung ketiga tulang ini persis seperti rancangan yang akan dirakit seorang teknisi sistem suara *hi-fi* guna memunculkan fungsi ‘pencocokan impedans’ yang diperlukan, tapi itu cerita lain. Yang penting di sini adalah bahwa sebagian kelelawar memiliki otot-otot matang yang melekat pada tulang sanggurdi dan martil. Jika otot-otot ini ditarik, tulang-tulang tersebut tidak meneruskan suara dengan efisien – seperti membisukan mikrofon dengan menyumbat diafragma getarnya dengan ibu jari. Kelelawar mampu menggunakan tiga otot ini untuk mematikan telinganya untuk sementara. Otot-otot ini berkontraksi tepat sebelum kelelawar memancarkan denyut suara keluar, menyumbat telinga supaya tidak rusak karena denyut kencang tersebut. Kemudian otot-otot tersebut melemas sehingga kepekaan telinga maksimal kembali untuk menerima gema dengan tepat waktu. Sistem sakelar kirim/terima ini hanya dapat berfungsi baik jika kelelawar bisa menjaga akurasi pengaturan waktu yang sangat jitu. Kelelawar *Tadarida* mampu mengencangkan dan melemaskan otot-otot sakelarnya 50 kali per detik, selaras sempurna dengan denyut ultrasonik bak-senapan mesin ini. Sungguh sistem pengaturan waktu yang hebat, setara dengan trik cerdas yang digunakan sebagian pesawat tempur selama Perang Dunia Pertama. Peluru yang ditembakkan senapan mesin pesawat tempur ini selalu terlontar ‘melalui’ baling-baling, dengan pengaturan waktu yang diselaraskan secara amat teliti dengan perputaran baling-baling sehingga peluru selalu lolos di antara bilah-bilahnya dan tidak pernah mengenainya.

Masalah selanjutnya yang mungkin dihadapi insinyur kita adalah sebagai berikut. Jika perangkat sonar mengukur jarak ke sasaran dengan mengukur durasi hening di antara pancaran suara dan kembalinya gema – metode yang tampaknya memang digunakan *Rousettus* – suara-suara tersebut pastinya berupa denyut-denyut yang sangat singkat dan terputus-putus (seperti nada-nada stakato). Suara yang panjang dan berlarut-larut pasti masih akan berlangsung ketika gemanya kembali, dan, sekalipun sebagian sudah diredam oleh otot-otot sakelar kirim/terima tadi, akan menghalangi pendeteksian gema. Memang, idealnya denyut-denyut yang dihasilkan kelelawar mesti sangat singkat. Tetapi makin singkat suaranya, makin sulit membuatnya cukup bertenaga untuk menghasilkan gema yang baik. Tampaknya kita kembali dihadapkan pada pilihan sulit gara-gara hukum-hukum fisika. Di benak para insinyur kita yang cerdas mungkin melintas dua solusi, yang memang muncul ketika mereka tersandung masalah yang sama di teknologi radar. Solusi yang mana yang dipilih tergantung pada tujuan mana yang lebih penting: mengukur kisaran (seberapa jauh objek dari instrumen) atau mengukur kecepatan (seberapa cepat objek bergerak, relatif terhadap instrumen). Solusi pertama dikenal oleh para insinyur radar dengan istilah ‘radar kicau’.

Sinyal radar dapat kita bayangkan sebagai serangkaian denyut, tetapi setiap denyut memiliki, istilahnya, frekuensi pembawa. Ini sepadan dengan ‘titi nada’ sebuah denyut suara atau suara ultra. Seperti yang telah kita ketahui, pekikan kelelawar memiliki kecepatan pengulangan-denyut sebesar puluhan hingga ratusan kali per detik. Tiap-tiap denyut tersebut memiliki frekuensi pembawa puluhan ribu hingga ratusan ribu daur per detik. Dengan kata lain, setiap denyut adalah jeritan yang melengking tinggi. Demikian pula, setiap denyut radar adalah ‘jeritan’ gelombang radio, dengan frekuensi pembawa yang tinggi. Fitur khusus dari radar kicau ini: setiap jeritan tidak memiliki frekuensi pembawa yang tetap. Alih-alih, frekuensi pembawanya melesat ke atas dan ke bawah sekitar satu oktaf. Kalau dicari padanan suaranya, tiap pancaran radar itu ibarat

siul godaan yang naik-turun. Kelebihan radar kicau, jika dibandingkan dengan denyut bertiti nada tetap, adalah sebagai berikut. Tidak jadi masalah jika kicauan awalnya masih berlangsung ketika gemanya kembali. Keduanya tidak akan saling rancu. Ini karena setiap gema yang dideteksi setiap kali merupakan cerminan dari bagian awal kicauan tersebut, dan karena itu titi nadanya berbeda.

Para perancang radar manusia telah memanfaatkan teknik cerdik ini dengan amat baik. Apakah ada bukti bahwa kelelawar telah ‘menemukan’ teknik ini juga, seperti halnya sistem sakelar kirim/terima? Ya, faktanya banyak spesies kelelawar menghasilkan pekikan yang melesat turun, biasanya sekitar satu oktaf, selama tiap pekikan. Pekikan yang bersuit-suit ini dikenal sebagai frekuensi termodulasi (FM), yang tampak persis seperti yang diperlukan untuk memanfaatkan teknik ‘radar kicau’. Akan tetapi, sejauh ini bukti yang ada mengemukakan bahwa kelelawar menggunakan teknik tersebut bukan untuk membedakan gema dari suara asli yang menghasilkannya, tetapi untuk tugas yang lebih halus: membedakan gema dari gema yang lain. Seekor kelelawar hidup di dunia penuh gema dari benda dekat, benda jauh, dan benda-benda di semua jarak antaranya. Kelelawar harus bisa membedakan gema-gema ini. Kalau suara yang dihasilkan kelelawar itu berupa kicau-kicauan yang melesat turun dan bersuit-suitan, pembedaannya beres berdasarkan titi nada. Ketika sebuah gema dari benda jauh akhirnya kembali ke kelelawar, gema tersebut menjadi gema yang ‘lebih tua’ dari gema yang secara bersamaan kembali dari objek dekat. Dan karenanya bertiti nada lebih tinggi. Ketika kelelawar dihadapkan pada gema-gema yang saling bertumbukan dari beberapa benda, aturan praktisnya begini: titi nada lebih tinggi berarti lebih jauh.

Akal cerdik kedua yang mungkin melintas di benak si insinyur, khususnya yang lebih tertarik untuk mengukur kecepatan sebuah sasaran yang bergerak, adalah memanfaatkan hal yang disebut para fisikawan dengan istilah Efek Doppler. Boleh juga disebut ‘efek ambulans’ karena sangat mirip dengan titi nada yang mendadak turun seperti yang dihasilkan sirene ambulans saat melintasi pendengar dengan cepat. Efek Doppler terjadi ketika sumber suara (atau cahaya atau jenis gelombang lainnya) dan penerima suara tersebut bergerak nisbi (relatif) satu sama lain. Paling mudah diumpamakan dengan sumber suara bergeming dan pendengarnya bergerak. Bayangkan sirene di atap sebuah pabrik mengiang terus-menerus, dalam satu nada. Suara dipancarkan ke luar sebagai serangkaian gelombang. Gelombang ini tidak dapat dilihat karena berupa gelombang tekanan udara. Kalau bisa dilihat bentuknya menyerupai gelombang melingkar yang menyebar ke luar ketika kita melempar kerikil ke tengah kolam yang tenang. Bayangkan beberapa kerikil jatuh cepat dan berturut-turut ke tengah kolam, sehingga gelombang-gelombang terus-menerus memancar dari pusatnya. Kalau kita tambatkan perahu mainan kecil di sebuah titik tertentu di kolam, perahu tersebut akan terjungkat-jungkit, berirama naik dan turun, ketika gelombang lewat di bawahnya. Frekuensi jungkat-jungkit si perahu ini bisa disamakan dengan titi nada sebuah suara. Nah, anggap perahu tersebut tidak ditambatkan, tetapi meluncur ke seberang kolam, ke arah titik pusat tempat lingkaran-lingkaran gelombang itu berasal. Perahu itu masih akan terjungkat-jungkit saat ditumbuk muka gelombang secara berurutan. Tetapi sekarang frekuensi tumbukan perahu dengan gelombang menjadi lebih tinggi, karena perahu melintas menuju pusat gelombang. Perahu mainan itu akan terjungkat-jungkit lebih cepat. Di lain pihak, ketika perahu telah melewati sumber gelombang dan bergerak menjauh ke sisi yang lain, frekuensi jungkat-jungkitnya pasti menurun.

Demikian pula, jika kita memacu sepeda motor (lebih baik jika tidak bising) melewati sirene pabrik yang mengiang, ketika kita mendekati pabrik tersebut titi nadanya akan naik: telinga kita

menjala gelombang-gelombang itu lebih cepat ketimbang kalau kita berdiri diam. Dengan dalil yang sama, bila sepeda motor kita telah melewati pabrik dan bergerak menjauh dari sana, titi nadanya akan makin rendah. Jika kita berhenti bergerak, kita akan mendengar titi nada sirene yang sesungguhnya, titi nada pertengahan di antara dua titi nada yang telah digeser secara efek Doppler. Karena itu, jika kita tahu titi nada asli sirene itu, secara teoretis kita dapat mencari tahu seberapa cepat kita bergerak menuju ke dan menjauh dari sumber suara cukup dengan menyimak titi nada sebagaimana terdengar telinga dan membandingkannya dengan titi nada yang 'sejati'.

Prinsip yang sama berlaku ketika sumber suara bergerak dan pendengar diam. Itu mengapa efek Doppler bisa terjadi pada mobil ambulans. Agak mustahil dikatakan bahwa Christian Doppler sendiri mendemonstrasikan efek yang diteorikannya ini dengan menyewa drumben untuk bermain musik di atas gerbong yang terbuka saat kereta melaju kencang melewati penonton yang terkesima. Yang penting adalah gerak relatifnya, dan untuk Efek Doppler, tidak jadi perkara apakah sumber suara yang bergerak melewati telinga, atau telinga yang bergerak melewati sumber suara. Jika dua kereta berpapasan, masing-masing berkecepatan 125 mil/jam, seorang penumpang di salah satu kereta akan mendengar suara peluit dari kereta lain melesat turun dengan Pergeseran Doppler yang dramatis, karena kecepatan relatifnya adalah 250 mil/jam.

Efek Doppler dipakai di jebakan kecepatan (*speed trap*) radar polisi untuk pengendara kendaraan bermotor. Instrumen statis memancarkan sinyal radar ke jalan. Gelombang radar dipantulkan oleh mobil yang mendekat, dan direkam oleh perangkat penerima. Makin cepat mobil melaju, makin tinggi pergeseran Doppler dalam frekuensinya. Dengan membandingkan frekuensi ke luar dan frekuensi gema yang kembali, petugas, atau lebih tepatnya instrumen otomatis mereka, dapat menghitung kecepatan tiap mobil. Jika polisi bisa memanfaatkan teknik ini untuk mengukur kecepatan pengendara yang kebut-kebutan, boleh kita menduga bahwa kelelawar pun memakainya untuk mengukur kecepatan serangga mangsa?

Jawabannya ya. Kelelawar kecil yang dikenal sebagai kelelawar sepatu kuda telah lama diketahui memancarkan bunyi *huu* panjang alih-alih decapan stakato atau siulan yang nadanya menurun. Kata 'panjang' di situ berarti panjang menurut ukuran kelelawar. Bunyi *huu* tersebut panjangnya tetap kurang dari sepersepuluh detik. Dan kerap kali 'siulan' dipakukan ke ujung dari tiap *huu*, seperti dijelaskan berikut ini. Pertama-tama, bayangkan seekor kelelawar sepatu kuda terus-menerus mengeluarkan gumaman ultrasonik sembari terbang cepat menuju objek diam, misalnya sebatang pohon. Muka gelombangnya menumbuk pohon dengan lebih cepat karena kelelawar bergerak menuju pohon tersebut. Jika sebuah mikrofon disembunyikan di pohon tersebut, akan 'terdengar' suara dengan titi nada yang bergeser naik secara Doppler akibat gerakan si kelelawar. Tidak ada mikrofon di sana, tapi titi nada gema yang dipantulkan balik dari pohon akan bergeser naik secara Doppler. Nah, di saat muka gelombang gema tersebut mengalir balik dari pohon menuju kelelawar yang sedang terbang mendekat, kelelawar itu masih bergerak cepat ke arah muka gelombang. Oleh karenanya, ada pergeseran Doppler yang naik lebih jauh dalam persepsi kelelawar terhadap titi nada gema tersebut. Pergerakan kelelawar itu berbuntut pergeseran Doppler ganda, yang magnitudonya merupakan indikasi persis dari kecepatan kelelawar yang nisbi (relatif) terhadap pohon. Maka dari itu, dengan membandingkan titi nada pekikannya dengan titi nada gema yang kembali, kelelawar (atau komputer bawaan yang tertanam di otaknya), secara teori, mengalkulasi seberapa cepat ia bergerak menuju pohon. Kelelawar tidak tahu seberapa jauh pohon tersebut, tetapi informasi ini tetap berguna.

Kalau objek yang memantulkan gema itu bukan benda tak bergerak seperti pohon, melainkan seekor serangga, konsekuensi Doppler-nya akan lebih rumit, tetapi kelelawar tetap dapat mengalkulasi kecepatan gerak relatif antara dirinya dan sasaran, jenis informasi bak rudal canggih yang pasti dibutuhkan seekor kelelawar pemburu. Sebetulnya, sebagian kelelawar menggunakan trik yang lebih menarik dari sekadar pemancaran bunyi *huu* dengan titi nada konstan dan mengukur titi nada gema yang kembali. Dengan teliti mereka menyesuaikan titi nada bunyi *huu* yang keluar, agar titi nada gema tetap konstan setelah mengalami pergeseran Doppler. Saat mereka melesat menuju serangga yang bergerak, titi nada pekikan mereka terus-menerus berubah, senantiasa memburu titi nada yang diperlukan untuk menjaga ketetapan titi nada gema yang kembali. Trik cerdik ini menjaga gema pada titi nada yang paling pas dengan kepekaan telinga mereka – dan ini penting karena gemanya sangat sayup. Kemudian mereka dapat memperoleh informasi yang diperlukan untuk kalkulasi Doppler mereka, dengan memantau titi nada yang perlu dihasilkan bunyi *huu* agar gema yang kembali bertiti nada tetap. Saya tidak tahu apakah perangkat buatan manusia, sonar atau radar, menggunakan trik canggih ini. Tetapi melihat bahwa ide-ide paling cerdik di bidang ini tampaknya telah terlebih dahulu dikembangkan oleh kelelawar, saya berani bertaruh jawabannya ya.

Tentunya dua teknik yang agak berbeda ini, teknik pergeseran Doppler dan teknik ‘radar kicau’, digunakan untuk mencapai tujuan yang berbeda. Sebagian kelompok kelelawar mengkhususkan diri pada salah satu dari teknik itu, sebagian lain untuk teknik yang satunya. Beberapa kelompok kelelawar mencoba meraih yang terbaik dari dua dunia tersebut, dengan melakukan ‘siulan’ FM di ujung (atau kadang di pangkal) bunyi *huu* panjang berfrekuensi konstan. Trik aneh lain yang dipakai kelelawar sepatu kuda berkenaan dengan gerakan daun telinga luar mereka. Tidak seperti kelelawar lainnya, kelelawar sepatu kuda menggerakkan daun telinga luar dengan sapuan cepat maju-mundur yang silih berganti. Dapat dibayangkan bahwa tambahan gerakan cepat dari permukaan alat dengar yang nisbi (relatif) terhadap sasarannya ini menimbulkan modulasi yang bermanfaat dalam pergeseran Doppler, modulasi yang memasok informasi tambahan. Saat telinga mengepak ke arah sasaran, gerakan menuju sasaran menjadi makin cepat. Saat telinga mengepak berlawanan dengan arah sasaran, kebalikannya terjadi. Otak kelelawar ‘tahu’ arah kepakian tiap telinga, dan pada prinsipnya mampu melakukan kalkulasi penting untuk memanfaatkan informasi tersebut.

Kemungkinan masalah tersulit yang dihadapi semua kelelawar adalah bahaya ‘sumbatan’ tak sengaja oleh pekikan kelelawar lainnya. Para peneliti telah melakukan eksperimen untuk mencoba mengganggu navigasi kelelawar dengan membunyikan suara ultrasonik buatan yang kencang ke arah mereka. Rupa-rupanya, teknik tersebut sulit berhasil. Setelah melihat kejadiannya, kita mungkin sudah bisa menduga hal ini. Kelelawar pasti telah menemukan cara untuk menghindari gangguan semacam ini jauh-jauh hari. Banyak spesies kelelawar bertengger dalam kumpulan sangat besar, di dalam gua yang pasti sarat dengan buncahan suara ultra dan gema yang memekakkan telinga. Namun, kelelawar tetap bisa terbang cepat di dalam gua, tidak menabrak dinding atau temannya dalam keadaan gelap gulita. Bagaimana cara seekor kelelawar melacak gemanya sendiri, dan tidak terkecoh dengan gema kelelawar lain? Solusi pertama yang mungkin melintas di benak seorang insinyur adalah semacam penyandian frekuensi: tiap kelelawar mungkin punya frekuensi pribadinya sendiri, seperti frekuensi stasiun radio yang berbeda-beda. Boleh jadi begitu, tetapi ceritanya tidak berhenti di sana.

Cara kelelawar menghindari sumbatan frekuensi dari kelelawar lain belum lagi dipahami sempurna, tetapi petunjuk menarik dipetik dari eksperimen yang mencoba untuk mengecoh

kelelawar. Ternyata kita bisa secara aktif mengecoh sebagian kelelawar dengan membunyikan pekikan mereka *sendiri* dengan *tundaan* buatan. Dengan kata lain, bunyikan gema palsu dari pekikan mereka sendiri. Kendalikan perangkat elektronik penunda gema palsu itu, dan kita bahkan mungkin dapat membuat kelelawar mencoba mendarat di birai ‘semu’. Saya rasa yang dialami kelelawar ini sama dengan fenomena melihat dunia melalui lensa.

Tampaknya kelelawar mungkin menggunakan sesuatu yang dapat disebut dengan istilah ‘filter keanehan’. Tiap-tiap gema dari pekikan kelelawar itu sendiri menghasilkan gambaran dunia yang masuk akal dalam kerangka gambar dunia yang terbentuk lewat gema-gema sebelumnya. Kalau otak kelelawar mendengar gema dari pekikan kelelawar lain, dan mencoba menggabungkannya ke dalam gambaran dunia yang telah terbentuk sebelumnya, hasilnya tidak masuk akal. Akan tampak seolah objek-objek di dunia tersebut mendadak melompat ke arah yang sembarang. Objek-objek di dunia nyata tidak berperilaku seganjil itu; jadi otak dapat menyaring gema tersebut dan mengategorikannya sebagai suara latar. Kalau peneliti yang melakukan eksperimen mengumpani kelelawar dengan ‘gema-gema’ yang diperlambat atau dipercepat dari pekikan kelelawar itu sendiri, gema-gema palsu tersebut *akan* masuk akal dalam kerangka gambaran dunia yang telah dibentuk kelelawar itu sebelumnya. Gema-gema palsu ini diterima oleh filter keanehan karena mereka masuk akal dalam konteks gema-gema sebelumnya. Gema itu membuat posisi objek tampak bergeser, tapi hanya sedikit saja – dan ini memang mungkin dilakukan oleh objek-objek di dunia nyata. Otak kelelawar beranggapan bahwa dunia yang digambarkan oleh sedenyut gema mana pun akan sama persis seperti dunia yang digambarkan denyut-denyut sebelumnya, atau sedikit saja berbeda: serangga yang dikuntit mungkin bergerak sedikit, misalnya.

Ada satu risalah terkenal dari filsuf Thomas Nagel yang berjudul ‘*What is it like to be a bat?*’ (‘Seperti apa menjadi kelelawar?’). Risalah tersebut tidak membahas kelelawar sebanyak perkara filosofis membayangkan ‘menjadi hal yang bukan kita. Lalu mengapa kelelawar yang disebut sebagai pembanding untuk pertanyaan filosofis ini? Karena pengalaman yang dimiliki kelelawar dengan ekolokasinya dianggap sangat ganjil dan terasing dari pengalaman kita sendiri. Kalau Anda ingin mengalami seperti apa menjadi kelelawar, jangan masuk gua, lalu berteriak atau mengadu dua batang sendok, lalu sengaja mengukur tundaan waktu sebelum mendengar kembali gemanya, dan dari situ menghitung seberapa jauh jarak dindingnya.

Itu tidak lebih dari mengatakan seperti inilah melihat warna: gunakan alat untuk mengukur panjang gelombang cahaya yang masuk ke mata: kalau panjang, warnanya merah, kalau pendek warnanya nila atau biru. Sudah jadi fakta fisika bahwa cahaya yang kita sebut merah itu memiliki panjang gelombang yang lebih panjang dari cahaya yang kita sebut biru. Panjang gelombang yang berbeda menyalakan fotosel peka-merah dan peka-biru di dalam retina kita. Tapi tidak ada jejak konsep panjang gelombang dalam sensasi subjektif kita akan warna. ‘Seperti apa’ melihat biru atau merah tidak ada kaitannya dengan cahaya mana yang gelombangnya lebih panjang. Walaupun itu penting (biasanya tidak), tinggal diingat saja, atau (seperti saya) lihat di buku. Demikian pula, seekor kelelawar mengindra posisi seekor serangga menggunakan hal yang kita sebut gema. Tapi sudah pasti kelelawar tidak lagi berpikir dalam kerangka tundaan gema ketika ia mengindra seekor serangga, seperti kita yang tidak lagi berpikir dalam kerangka panjang gelombang ketika mengindra biru atau merah.

Kalaupun kita memaksa diri mencoba melakukan yang mustahil (membayangkan seperti apa menjadi kelelawar), saya menebak bahwa ekolokasi bagi mereka mungkin agak serupa dengan melihat bagi kita. Kita ini hewan yang begitu visual sampai-sampai tidak lagi menyadari betapa

peliknya urusan melihat itu. Benda-benda ‘di luar sana’, dan kita pikir kita ‘melihat’ mereka di luar sana. Tetapi saya yakin bahwa sebetulnya hasil pengindraan kita itu merupakan model komputer rumit di dalam otak, yang dibangun atas dasar informasi yang masuk dari luar sana, tetapi diubah di dalam kepala ke bentuk informasi yang bisa *digunakan*. Perbedaan panjang gelombang dalam cahaya di luar sana disandikan sebagai perbedaan ‘warna’ di model komputer di dalam kepala. Bentuk dan atribut-atribut lainnya disandikan dengan cara yang sama, disandikan ke dalam bentuk yang mudah dimengerti. Sensasi melihat, bagi kita, sangat berbeda dari sensasi mendengar, tapi ini bukan semata-mata karena perbedaan fisis antara cahaya dan suara. Lagi pula, cahaya dan suara sama-sama diterjemahkan oleh organ-organ indra ke dalam denyut-denyut saraf yang sejenis. Mustahil kita tahu, dari atribut fisis sebuah denyut saraf, apakah informasi yang disampaikan itu tentang cahaya, tentang suara, atau tentang bau. Sensasi melihat itu sangat berbeda dari sensasi mendengar dan sensasi mencium karena otak lebih nyaman menggunakan model internal yang berbeda-beda untuk dunia netra, dunia rungu, dan dunia bau. Hal ini karena kita *secara internal menggunakan* informasi visual dan informasi bunyi secara berbeda-beda untuk tujuan berbeda-beda sehingga sensasi melihat dan mendengar pun begitu berbeda. Bukan lantas karena perbedaan fisik antara cahaya dan bunyi.

Tetapi kelelawar menggunakan informasi *suara* untuk tujuan yang sangat mirip dengan tujuan kita menggunakan informasi *visual*. Kelelawar menggunakan suara untuk mengindra dan terus-menerus memperbarui persepsinya terhadap benda-benda di ruang tiga dimensi, persis seperti kita yang menggunakan cahaya. Oleh karena itu, tipe model komputer internal yang dibutuhkan adalah yang sesuai untuk representasi internal atas posisi benda yang berubah-ubah di ruang tiga dimensi. Maksud saya: bentuk pengalaman subjektif seekor hewan merupakan khazanah dari model komputer internal hewan tersebut. Model itu akan dirancang, dalam evolusi, agar sesuai untuk representasi internal yang berguna, terlepas dari rangsangan fisis yang diterimanya dari luar. Kelelawar dan kita *membutuhkan* model internal yang sejenis untuk merepresentasikan posisi benda-benda di ruang tiga dimensi. Fakta bahwa kelelawar membangun model internalnya dengan bantuan gema, sementara kita dengan bantuan cahaya, tidak relevan. Bagaimanapun, informasi dari luar tersebut selalu diterjemahkan ke dalam denyut saraf yang sejenis saat dikirim ke otak.

Karena itu, saya menduga kelelawar ‘melihat’ dengan cara yang kira-kira sama seperti kita, meskipun medium fisis yang melaluinya dunia ‘di luar sana’ diterjemahkan ke dalam denyut-denyut saraf itu sangat berbeda – suara ultrasonik dan bukan cahaya. Kelelawar bahkan mungkin menggunakan sensasi yang kita sebut warna untuk tujuannya sendiri, mewakili perbedaan di dunia luar yang tidak ada kaitannya dengan fisika panjang gelombang, tetapi yang peran fungsionalnya, bagi kelelawar, mirip dengan peran warna bagi kita. Mungkin kelelawar jantan memiliki permukaan tubuh yang bertekstur halus sehingga suara gema yang dipantulkannya dicerap oleh yang betina sebagai warna yang indah, sepadan dengan bulu warna-warni burung cenderawasih. Pemadanan ini tidak saya maksudkan sebagai kiasan samar. Adalah mungkin bahwa sensasi subjektif yang dialami kelelawar betina saat ‘melihat’ seekor pejantan itu berupa, katakanlah, warna merah terang: sensasi yang sama saat saya melihat burung flamingo. Atau, setidaknya, perbedaan sensasi yang dialami kelelawar betina itu dengan sensasi visual saya melihat flamingo tidak lebih dari perbedaan sensasi visual saya melihat flamingo dengan sensasi seekor flamingo melihat flamingo lainnya.

Donald Griffin berkisah soal peristiwa yang terjadi pada 1940 ketika ia dan koleganya Robert Galambos pertama sekali melaporkan penemuan baru mereka tentang fakta ekolokasi kelelawar

di hadapan sidang konferensi ahli zoologi yang tersentak kaget dengan isi laporan mereka. Salah seorang ilmuwan yang tersohor begitu marah tak percaya sampai-sampai

ia meremas bahu Galambos dan mengguncang-guncangkannya sembari mengomel bahwa yang kami kemukakan itu konyol. Radar dan sonar saat itu masih menjadi pengembangan teknologi militer yang sangat dirahasiakan, dan gagasan bahwa kelelawar dapat melakukan hal yang sedikit saja sepadan dengan pencapaian termutakhir ilmu teknik elektronika dianggap oleh kebanyakan orang bukan hanya tidak masuk akal tetapi menjijikkan.

Mudah untuk maklum dengan sikap ilmuwan tersohor yang skeptis tersebut. Kesungkanannya untuk percaya sangatlah manusiawi. Dan demikianlah adanya manusia. Karena indra manusiawi kita *tidak* mampu melakukan yang kelelawar lakukan lah maka kita sulit mempercayainya. Karena kita hanya bisa memahaminya dengan alat bantu buatan, dan kalkulasi matematis di atas kertas, kita sukar membayangkan seekor binatang kecil mampu melakukannya di kepalanya. Padahal kalkulasi matematis yang diperlukan untuk menjelaskan prinsip-prinsip penglihatan sama kompleks dan sulitnya, tapi tak seorang pun kesulitan untuk percaya bahwa hewan-hewan kecil bisa melihat. Alasan kenapa standar ganda ini ada sederhana saja: kita bisa melihat tapi tidak bisa melakukan ekolokasi.

Saya bisa membayangkan, di semesta yang lain konferensi yang dihadiri makhluk-makhluk mirip kelelawar yang terpelajar dan buta terperanjat saat diberi tahu bahwa hewan lain yang bernama manusia sebetulnya mampu menggunakan sinar-sinar tak terdengar yang baru ditemukan dan dinamai ‘cahaya’, yang masih merupakan pokok pengembangan teknologi militer sangat rahasia, sebagai cara mereka mencari jalan. Manusia-manusia rendahan ini hampir-hampir tuli (masih bisa mendengar sedikit *sih* dan bahkan mengucapkan sekelumit geraman bulat yang lambatnya bukan main, tapi mereka hanya menggunakan suara-suara ini untuk urusan biasa seperti berkomunikasi satu sama lain; mereka tampak tidak mampu menggunakan suara untuk mendeteksi benda terbesar sekalipun). Mereka punya organ yang amat khusus yang disebut ‘mata’ untuk memanfaatkan sinar-sinar ‘cahaya’. Matahari adalah sumber utama sinar cahaya, dan luar biasanya manusia mampu memanfaatkan gema-gema kompleks yang dipantulkan benda-benda saat sinar cahaya dari matahari menumbuk permukaannya. Mereka punya perangkat canggih bernama ‘lensa’, yang bentuknya tampak dihitung secara matematis sehingga bisa membengkokkan sinar-sinar yang hening ini sedemikian rupa muncul pemetaan 1:1 antara benda-benda di dunia luar dan ‘citra’ yang ada di selemba sel yang disebut ‘retina’. Sel-sel retina ini mampu, secara misterius, membuat cahaya itu ‘dapat didengar’ (sebut saja begitu), dan merelai informasinya ke otak. Matematikawan kita ini telah menunjukkan bahwa, dengan melakukan kalkulasi rumit yang benar, secara teoretis navigasi lapangan mungkin dilakukan secara aman dengan sinar-sinar cahaya ini, sama efektifnya seperti yang biasa dilakukan dengan suara ultrasonik – dan di beberapa seginya bahkan *lebih* efektif lagi! Tapi siapa sangka manusia rendahan bisa melakukan kalkulasi ini?

Pengindraan suara lewat gema oleh kelelawar hanya satu dari ribuan contoh yang bisa saya pilih untuk mengemukakan perihal rancangan yang baik. Hewan tampak seperti dirancang oleh fisikawan atau insinyur yang canggih secara teori dan cerdik secara praktik, tapi tidak berarti kelelawar itu sendiri tahu atau paham teori tersebut seperti seorang fisikawan memahaminya. Kelelawar mesti dianggap sepadan dengan *instrumen* perangkat radar polisi, bukan orang yang merancang instrumen tersebut. Perancang alat pengukur kecepatan radar polisi itu memahami teori Efek Doppler, dan mengungkapkan pemahaman ini dalam persamaan matematis, yang ditulis jelas di atas kertas. Pemahaman si perancang itu menubuh ke dalam rancangan instrumen tersebut, tetapi instrumen itu sendiri tidak memahami cara kerjanya. Instrumen itu mengandung komponen-komponen elektronik, yang dirangkai sehingga bisa membandingkan dua frekuensi

radar secara otomatis dan mengonversi hasilnya ke dalam satuan-satuan yang mudah dimengerti – mil per jam. Komputasinya rumit, tapi bisa dilakukan sekotak kecil komponen elektronik modern yang dirangkai dengan benar. Tentu saja, otak canggih yang berkesadaranlah yang merangkainya (atau paling tidak merancang bagan rangkaiannya), tetapi kerja kotak tersebut dari waktu ke waktu tidak melibatkan otak berkesadaran.

Dengan mengalami teknologi elektronik, kita disiapkan untuk menerima gagasan bahwa mesin yang tak berkesadaran dapat berperilaku seolah ia memahami gagasan-gagasan matematis yang kompleks. Gagasan ini dapat langsung disamakan dengan kerja mesin-mesin hidup. Seekor kelelawar adalah mesin, yang elektronika internalnya dirangkai sehingga otot-otot sayapnya membawanya memburu serangga, seperti rudal tak berkesadaran memburu pesawat terbang. Sejauh ini naluri kita, yang berasal dari teknologi, sudah benar. Tetapi pengalaman akan teknologi juga membuat kita menduga bahwa di balik pewujudan mesin yang canggih ada akal perancang yang berkesadaran dan bertujuan. Intuisi kedua inilah yang keliru untuk perkara mesin hidup. Dalam perkara mesin hidup, ‘perancangannya’ adalah seleksi alam yang tak berkesadaran, pembuat arloji yang buta.

Saya harap pembaca sama terkesimanya seperti saya, atau seperti William Paley kalau saja ia masih hidup, saat mendengar kisah-kisah kelelawar ini. Tujuan saya, di satu sisi, identik dengan tujuan Paley. Saya tidak ingin pembaca meremehkan karya-karya hebat alam dan masalah-masalah yang kita hadapi saat menjelaskannya. Ekolokasi kelelawar, kendati tidak diketahui di masa Paley, akan menjadi contoh yang sama baiknya dengan contoh-contoh yang ia pakai. Paley menerangkan argumennya dengan menambah sekian banyak contoh. Ia membahas seluruh tubuh, dari ujung kepala hingga ujung kaki, menunjukkan betapa setiap bagian, setiap perincian, sama seperti bagian dalam arloji yang dirangkai indah. Saya pun akan senang melakukan hal yang sama, karena ada banyak cerita menakjubkan untuk dikisahkan, dan saya suka bercerita. Tapi sungguh saya tidak perlu menambah sekian banyak contoh. Satu atau dua sudah cukup. Hipotesis yang bisa menjelaskan navigasi kelelawar adalah kandidat bagus untuk menjelaskan apa pun di dunia kehidupan, dan kalau penjelasan Paley atas yang mana pun dari contoh yang diajukannya itu salah, kita tidak bisa membetulkannya dengan menambah contoh lain. Hipotesisnya adalah bahwa arloji-arloji yang hidup secara harfiah dirancang dan dibangun oleh seorang empu arloji. Hipotesis modern kita adalah bahwa pekerjaan itu dilakukan oleh seleksi alam dalam langkah-langkah evolusi yang bertahap.

Dewasa ini, para ahli teologi tidak segamblang Paley. Mereka tidak menuding mekanisme-mekanisme hidup yang kompleks dan berkata bahwa mereka sudah pasti dirancang oleh seorang pencipta, sama seperti arloji. Tapi ada kecenderungan untuk menudingnya dan mengatakan bahwa ‘Mustahil untuk percaya’ bahwa kompleksitas, atau kesempurnaan, yang sedemikian rupa bisa berevolusi melalui seleksi alam. Setiap kali saya membaca komentar seperti itu, saya selalu merasa ingin menulis ‘Itu kan menurutmu’ di tepi kertasnya. Ada banyak contoh (saya hitung 35 di satu bab) dalam buku yang baru-baru ini diterbitkan *The Probability of God* karangan Uskup Birmingham, Hugh Montefiore. Saya akan gunakan buku ini untuk semua contoh saya hingga akhir bab ini, karena buku ini merupakan suatu upaya yang tulus dan jujur, dikerjakan oleh penulis yang memiliki reputasi dan pendidikan yang baik, untuk membuat teologi alam lebih sesuai dengan semangat zaman. Jujur di situ sungguh-sungguh berarti jujur. Tidak seperti kolega-koleganya sesama pakar agama, Uskup Montefiore tidak takut untuk mengetengahkan bahwa pertanyaan ada tidaknya Tuhan merupakan pertanyaan fakta yang definit. Ia tidak mencoba mengelak dengan pernyataan seperti ‘Agama Kristen itu cara hidup. Pertanyaan *ada*

tidaknya Tuhan disisihkan: itu hanyalah khayalan belaka yang diciptakan oleh ilusi-ilusi realisme'. Fisika dan kosmologi dibicarakan di beberapa bagian buku tersebut, dan saya tidak kompeten untuk berkomentar di kedua bidang ini, tapi perlu saya garisbawahi bahwa penulisnya tampak menggunakan para fisikawan tulen sebagai narasumbernya. Andai saja ia melakukan hal yang sama di bagian-bagian yang membahas biologi. Sayangnya, ia lebih memilih untuk meninjau karya-karya Arthur Koestler, Fred Hoyle, Gordon Rattray-Taylor, dan Karl Popper! Uskup Montefiore percaya dengan evolusi, tapi tidak yakin bahwa seleksi alam merupakan penjelasan memadai untuk arah jalan yang dilalui evolusi (sebagian karena, seperti banyak orang lainnya, ia keliru dengan memandang seleksi alam sebagai seleksi 'acak' dan 'tak bermakna').

Ia sangat sering menggunakan pandangan yang disebut Bantahan dari Kesangsian Pribadi. Dalam satu bab saja, secara berturut-turut kita menjumpai frasa-frasa berikut ini:

... tampak tidak terdapat penjelasan dalam dasar pikir Darwinian ... Sama sukarnya untuk menjelaskan ... Sulit dipahami ... Tidak mudah dimengerti ... Sama sulitnya untuk menjelaskan ... Tidak mudah bagi saya untuk memahami ... Tidak mudah bagi saya untuk melihat ... Sukar saya rasa untuk memahami ... tampaknya tidak masuk akal menjelaskan ... saya tidak dapat memahami seperti apa... neo-Darwinisme tampak tidak memadai untuk menjelaskan berbagai kompleksitas dari perilaku hewan ... tidak mudah untuk memahami bagaimana perilaku seperti itu dapat berevolusi melalui seleksi alam saja ... Mustahil untuk ... Bagaimana mungkin organ sekompleks itu bisa berevolusi? ... Tidak mudah untuk melihat ... Sulit untuk melihat ...

Bantahan dari Kesangsian Pribadi merupakan bantahan yang sangat lemah, seperti diutarakan Darwin sendiri. Di beberapa perkara tertentu, bantahan ini berdasar pada ketidaktahuan semata. Misalnya, salah satu fakta yang dirasa sulit dipahami oleh Uskup Montefiore adalah warna putih beruang kutub.

Mengapa beruang kutub berwarna putih tidak selamanya mudah dijelaskan dengan premis-premis neo-Darwinian. Untuk kamuflase? Kalau beruang kutub penguasa Kutub Utara, tentu mereka sama sekali tidak perlu berevolusi menjadi berwarna putih demi kamuflase.

Pernyataan ini sebaiknya diterjemahkan:

Saya pribadi, duduk di meja kerja saya ini, belum pernah ke Kutub Utara, belum pernah melihat beruang kutub di habitat liarnya, dan dengan latar belakang pendidikan kesusastraan dan teologi klasik, sejauh ini belum mampu memikirkan alasan mengapa warna putih akan bermanfaat bagi beruang kutub.

Dalam kasus ini, asumsi yang dikedepankan adalah bahwa hanya hewan mangsa yang membutuhkan kamuflase. Yang terlewatkan adalah bahwa kemampuan untuk bersembunyi dari mangsanya juga berguna bagi hewan pemangsa. Beruang kutub menguntit anjing laut yang beristirahat di atas es. Kalau anjing laut melihat beruang dari jauh, dia bisa kabur. Saya curiga, kalau saja Uskup Montefiore membayangkan beruang cokelat amerika yang menguntit anjing laut di salju, ia pasti langsung menemukan jawaban atas persoalannya.

Argumen beruang kutub ini tampak hampir-hampir terlalu mudah dipatahkan, tetapi bukan itu poin pentingnya. Sekalipun pakar paling terkemuka di dunia tidak mampu menjelaskan fenomena biologis yang luar biasa, tidak berarti fenomena itu tidak dapat dijelaskan. Ada banyak misteri yang bertahan selama berabad-abad, pun akhirnya berhasil dijelaskan. Sebenarnya, sebagian besar ahli biologi modern tidak akan kepayahan untuk menjelaskan masing-masing dari 35 contoh soal yang diajukan Uskup Montefiore dalam kaitannya dengan teori seleksi alam, kendati tidak semuanya semudah soal beruang kutub. Tapi kita tidak sedang menguji kecerdikan akal manusia. Sekalipun ditemukan satu contoh yang *tidak bisa* kita jelaskan, kita semestinya menahan diri untuk tidak menarik kesimpulan muluk dari ketidakmampuan kita sendiri. Darwin sendiri sangat jernih mengenai poin ini.

Ada versi-versi bantahan dari kesangsian pribadi yang lebih serius, yang tidak berdasar pada ketidaktahuan atau kurangnya kemampuan berpikir cerdas semata. Salah satu bentuk argumen tersebut langsung memakai rasa takjub luar biasa yang kita semua alami ketika dihadapkan dengan mesin yang sangat kompleks, seperti kesempurnaan paripurna dari perlengkapan ekolokasi kelelawar. Implikasinya adalah bahwa pasti benar kalau segala hal yang semenakjubkan ini tidak mungkin berevolusi melalui seleksi alam. Uskup Montefiore mengutip pernyataan G. Bennett, dengan persetujuannya, tentang jaring laba-laba:

Mustahil bagi orang yang telah menyaksikan hasil kerja berjam-jam ini untuk ragu bahwa spesies laba-laba saat ini maupun nenek moyangnya bukan arsitek dari jaring tersebut atau bahwa jaring tersebut dapat dibayangkan mengada sedikit demi sedikit melalui variasi acak; sama absurdnya dengan membayangkan padu-padan bangunan Parthenon yang rumit dan tepat-jitu dihasilkan dengan menyatukan keping-keping batu pualam.

Tidak mustahil sama sekali. Itu yang saya yakini, dan saya punya pengalaman dengan laba-laba dan jaringnya.

Uskup Montefiore bergeser ke mata manusia, dengan sebuah pertanyaan retorik (seolah jawabannya tidak ada), 'Bagaimana mungkin sebuah organ sekompleks itu berevolusi?' Ini bukan bantahan, tapi semata-mata penegasan atas kesangsian. Saya rasa ada dua faktor yang mendasari kesangsian intuitif yang menyeret pemahaman kita saat menghadapi persoalan yang disebut Darwin sebagai organ dan komplikasi yang amat sempurna. Pertama, akal kita tidak secara intuitif mampu mencerpai luasnya bentang waktu yang tersedia bagi perubahan evolusi. Sebagian besar orang-orang yang skeptis dengan seleksi alam mudah menerima bahwa perubahan kecil seperti penggelapan warna yang berevolusi dalam berbagai spesies kapei-kapei dapat terjadi akibat seleksi alam sejak era revolusi industri. Tapi, kendati demikian, mereka memperlakukan betapa kecilnya perubahan ini. Seperti digarisbawahi oleh Uskup Montefiore, kapei-kapei berwarna gelap itu bukanlah *spesies baru*. Saya sepakat bahwa ini memang perubahan kecil, tidak sepadan dengan evolusi mata, atau ekolokasi. Begitupun, kapei-kapei hanya perlu seratus tahun untuk melakukan perubahan tersebut. Seratus tahun tampak lama bagi kita, karena lebih lama dari rentang usia manusia. Tapi bagi seorang ahli geologi, angka ini seribu kali lebih pendek dari waktu yang biasa diukurnya!

Mata tidak menjadi fosil, sehingga kita tidak tahu berapa lama tipe mata kita ini perlu berevolusi untuk mencapai kompleksitas dan kesempurnaannya dari ketiadaan, tapi waktu yang tersedia itu beberapa ratus miliar tahun. Sebagai perbandingannya, pikirkan perubahan yang ditempa manusia dalam waktu yang jauh lebih singkat lewat seleksi genetik atas anjing. Dalam beberapa ratus, atau paling lama ribuan, tahun saja kita telah berhasil mengubah serigala ke anjing Peking, Bulldog, Chihuahua, dan Saint Bernard. Ah, tapi tetap saja masih *anjing*, kan? Belum berubah menjadi '*jenis*' hewan yang lain? Ya, kalau bermain kata seperti itu terasa menyenangkan hati, silakan sebut saja anjing. Tapi coba pikirkan waktunya. Anggaplah waktu total yang habis untuk mengevolusikan semua jenis anjing ini dari serigala itu satu langkah kaki. Lalu, dengan skala yang sama, berapa jauh Anda harus berjalan untuk kembali ke Lucy dan sejenisnya, fosil-fosil manusia paling pertama yang berjalan tegak lurus? Jawabannya sekitar 2 mil. Dan berapa jauh Anda harus berjalan untuk kembali ke awal mula evolusi di Bumi? Jawabannya Anda harus merencak dari London ke Bagdad. Bayangkan jumlah total perubahan yang terjadi dari serigala ke Chihuahua, lalu kalikan dengan jumlah langkah jalan kaki dari London ke Bagdad. Anda akan dapat membayangkan secara intuitif jumlah perubahan yang dapat terjadi dalam evolusi alami yang sesungguhnya.

Dasar kedua bagi rasa sangsi kita tentang evolusi organ-organ sangat kompleks seperti mata manusia dan telinga kelelawar adalah penerapan intuitif teori probabilitas. Uskup Montefiore mengutip C. E. Raven mengenai burung kukuk. Burung-burung ini bertelur di sarang burung-burung lain, yang tanpa sadar menjadi orang tua asuh anak-anaknya. Seperti begitu banyak adaptasi biologis lainnya, teknik yang dipakai burung kukuk tidak tunggal, melainkan jamak. Beberapa fakta mengenai burung kukuk cocok dengan cara hidupnya yang seperti parasit. Misalnya, induk kukuk punya kebiasaan bertelur di sarang burung lainnya, dan anak kukuk punya kebiasaan menendang anak asli inangnya keluar dari sarang. Kedua kebiasaan ini membantu keberhasilan burung kukuk dalam kehidupan parasitisnya. Raven melanjutkan:

Akan terlihat bahwa masing-masing dari rentetan kondisi ini bahu-membahu demi mencapai keberhasilan bersama. Tapi kalau sendiri-sendiri, tidak berguna. Keseluruhan *Opus perfectum* harus dicapai serentak. Peluang timbulnya hal ini bukan karena kejadian acak sebagai serangkaian kebetulan semata, seperti tadi sudah kita sebutkan, teramat sangat besar.

Bantahan seperti ini, pada prinsipnya, lebih bermartabat ketimbang argumen yang berdasar pada kesangsian mentah belaka. Mengukur kemuskilan statistis dari suatu prasaran adalah cara yang tepat untuk menilai sejauh mana prasaran tersebut dapat dipercayai. Memang, metode ini akan kita gunakan beberapa kali di buku ini. Tapi harus diterapkan dengan benar! Ada dua hal yang keliru dalam argumen yang dikemukakan Raven. Pertama, merancukan seleksi alam dengan ‘keacakan’, yang sangat sering terjadi dan, boleh dibilang cukup membikin jengkel. Mutasi itu acak; seleksi alam itu justru kebalikannya acak. Kedua, tidak *benar* bahwa ‘kalau sendiri-sendiri, tidak berguna’. Tidak benar bahwa keseluruhan karya sempurna itu harus dicapai secara serentak. Tidak benar bahwa masing-masing saling tergantung dalam mencapai keberhasilan bersama. Mata/telinga/sistem ekolokasi/sistem parasitisme burung kukuk yang paling sederhana dan belum sempurna sekalipun masih lebih baik daripada tanpa organ/sistem sama sekali. Tanpa mata, Anda buta. Dengan setengah mata, Anda setidaknya mampu mengesan kasar arah datangnya pemangsa, sekalipun tidak mampu memandang dengan fokus dan jernih. Dan ini boleh jadi penentu antara hidup dan mati. Perkara-perkara ini akan dibedah lagi lebih terperinci di dua bab berikutnya.

BAB 3

Mengakumulasi Perubahan Kecil

Sudah sama-sama kita lihat bahwa benda-benda hidup terlalu muskil dan terlalu indah ‘terancang’ untuk mengada karena kebetulan belaka. Kalau begitu, kok bisa ada? Jawabannya, yang ditemukan oleh Darwin, adalah karena transformasi bertahap, langkah-demi-langkah, dari awal-mula yang sederhana, dari entitas purba yang cukup sederhana untuk bisa mengada karena kebetulan belaka. Tiap-tiap perubahan beruntun dalam proses evolusi bertahap itu cukup sederhana, *relatif terhadap pendahulunya*, untuk bisa muncul karena kebetulan. Tetapi rangkaian utuh langkah-langkah kumulatif tersebut sama sekali bukan proses kebetulan, jika Anda lihat kompleksnya produk akhir yang terbentuk bila dibandingkan dengan titik awal-mulanya. Proses kumulatif tersebut diarahkan oleh ketahanan hidup yang nonacak. Bab ini bertujuan

memeragakan daya dari *seleksi kumulatif* ini sebagai sebuah proses yang secara fundamental bersifat nonacak.

Kalau Anda berjalan menyusuri pantai berbatu kerikil, Anda akan menyadari bahwa batu-batu kerikil tersebut tidak tersusun acak. Batu-batu kerikil yang lebih kecil biasanya ditemukan di bidang tertentu di sepanjang pantai, sedangkan yang lebih besar ditemukan di bidang atau garis yang lain. Batu-batu kerikil itu dipilah, disusun, dipilih. Suku yang tinggal di dekat pantai tersebut boleh jadi terpana menyaksikan bukti sistematika pilah-susun tersebut. Mereka kemudian mungkin menciptakan mitos mengenainya, yang barangkali bercerita tentang Roh Agung di angkasa yang memiliki cita dan rasa tertib yang luar biasa. Kita mungkin mendengarkan kisah takhayul ini dengan mangut-mangut maklum, kemudian menjelaskan bahwa susunan tersebut sebetulnya disebabkan gaya fisika yang buta: dalam hal ini, gerak ombak. Ombak tidak punya tujuan pun niatan. Tidak ada cita yang rapi, tidak ada cita sama sekali. Ombak hanya menyerakkan energinya ke batu kerikil, dan kerikil besar punya respons yang berbeda dari kerikil kecil terhadap perlakuan ombak ini sehingga 'tempat parkir' keduanya di pantai itu pun berbeda. Kerapian kecil muncul dari kekacauan, dan tidak ada rencana di balik kejadian ini.

Ombak dan kerikil merupakan contoh sederhana sebuah sistem yang menghasilkan kenonacakan dengan sendirinya. Dunia ini sarat akan sistem semacam itu. Contoh paling sederhana yang bisa saya munculkan adalah lubang. Hanya benda yang lebih kecil dari lubang itulah yang dapat melaluinya. Ini berarti jika benda-benda acak ditaruh di atas lubang tersebut, kemudian ada gaya yang menggoyang dan mendesak benda-benda itu secara acak, setelah beberapa saat benda-benda di atas dan di bawah lubang akan terpilah secara nonacak. Ruang di bawah lubang akan cenderung memuat benda-benda yang lebih kecil dari lubang, dan ruang di atasnya akan cenderung memuat benda-benda yang lebih besar. Manusia sudah lama memanfaatkan prinsip sederhana menghasilkan kenonacakan ini dalam alat yang kita kenal sebagai ayakan.

Tata Surya merupakan susunan stabil berisi planet, komet, dan puing-puing yang mengorbit pada matahari, dan tata surya kita diduga merupakan salah satu dari sekian banyak tata orbit di alam semesta. Makin dekat sebuah satelit ke matiharinya, makin cepat ia harus bergerak agar dapat mengimbangi gaya tarik matahari tersebut dan tetap stabil berada pada orbitnya. Untuk setiap orbit, hanya ada satu kecepatan gerak yang dapat digunakan satelit untuk tetap berada pada orbit tersebut. Jika bergerak dengan kecepatan yang lain, ia akan hanyut ke kedalaman luar angkasa, atau menabrak Matahari, atau berpindah ke orbit yang lain. Dan kalau kita lihat planet-planet tata surya kita, tampak nyata bahwa setiap planet tersebut bergerak persis dengan kecepatan yang tepat untuk tetap stabil mengorbit mengelilingi Matahari. Apa ini mukjizat sebuah rancangan ilahi? Tidak, hanya salah satu jenis 'ayakan' alam saja. Tentu saja semua planet yang kita lihat mengelilingi matahari pasti bergerak persis dengan kecepatan yang tepat agar tetap pada orbitnya. Kalau tidak, kita tidak akan melihatnya karena planet tersebut tidak akan berada di sana! Sama tentunya juga, ini bukan bukti rancangan berkesadaran. Hanya jenis ayakan yang lain saja.

Pengayakan tatanan sederhana ini saja tidak cukup untuk menjelaskan sejumlah besar tatanan nonacak yang kita saksikan pada benda hidup. Jauh dari cukup. Ingat lagi analogi gembok kombinasi. Jenis kenonacakan yang dapat dihasilkan dengan pengayakan sederhana ini kira-kira

sama dengan membuka gembok kombinasi yang cuma punya satu roda putar: mudah membukanya dengan mengandalkan kemujuran saja. Di pihak lain, jenis kenonacakan yang kita saksikan pada sistem-sistem kehidupan sepadan dengan gembok kombinasi raksasa dengan roda-roda putar yang hampir tak terhitung jumlahnya. Untuk menghasilkan molekul hayati seperti hemoglobin, pigmen merah pada darah, dengan pengayakan sederhana itu sama dengan mengambil semua komponen asam amino pembentuk hemoglobin, mencampuradukkannya secara acak, dan berharap, untung-untung, molekul hemoglobin akan terbentuk kembali dengan sendirinya. Jumlah keberuntungan yang dibutuhkan untuk prestasi ini tidak terbayangkan, dan oleh Isaac Asimov dan lainnya dipakai sebagai *mind-boggler* (pembingung pikiran).

Satu molekul hemoglobin terdiri dari empat rantai asam amino yang saling berpuntir. Kita lihat dulu satu saja dari empat rantai ini. Satu rantai terdiri dari 146 asam amino. Terdapat 20 jenis asam amino yang biasa ditemukan dalam benda-benda hidup. Jumlah kemungkinan cara untuk menyusun 20 jenis benda dalam rantai dengan 146 mata itu teramat sangat banyak. Asimov menyebutnya ‘bilangan hemoglobin’. Mudah dikalkulasikan, tapi mustahil untuk membayangkan jawabannya. Yang pertama dari 146 mata rantai tersebut bisa saja mengandung yang mana pun dari 20 asam amino itu. Mata rantai kedua juga bisa saja mengandung salah satu dari 20 asam amino, sehingga jumlah rantai dua-mata yang mungkin adalah 20×20 , sama dengan 400. Jumlah rantai tiga-mata yang mungkin adalah $20 \times 20 \times 20$, sama dengan 8.000. Jumlah rantai 146-mata yang mungkin adalah 20 dikali 20 sebanyak 146 kali. Jumlahnya bikin melongo. Satu juta itu 1 dengan 6 nol setelahnya. Satu miliar (1.000 juta) itu 1 dengan 9 nol setelahnya. Angka yang kita cari, ‘bilangan hemoglobin’ itu, (sekitar) angka 1 dengan 190 nol setelahnya! 1 berbanding angka itulah kemungkinan untuk membentuk hemoglobin secara kebetulan semata. Dan satu molekul hemoglobin hanya merupakan secuil kecil dari kompleksnya tubuh yang hidup. Pengayakan sederhana saja barang tentu sangat jauh dari kata mampu untuk menghasilkan jumlah tatanan pada benda hidup. Pengayakan adalah satu komponen esensial dalam pembentukan tatanan hidup, tapi masih jauh dari keseluruhan ceritanya. Dibutuhkan hal lain. Untuk menjelaskan poin ini, saya perlu membedakan seleksi ‘selangkah’ dari seleksi ‘kumulatif’. Ayakan sederhana yang kita bahas sejauh ini di bab ini adalah contoh seleksi selangkah. Tatanan hidup merupakan produk dari seleksi kumulatif.

Inilah perbedaan hakiki antara seleksi selangkah dan seleksi kumulatif. Dalam seleksi selangkah, entitas-entitas dipilih atau dipilah, batu kerikil atau apa pun itu, dipilah sekali, titik. Di sisi lain, dalam seleksi kumulatif, entitas-entitas ‘bereproduksi’; atau dengan kata lain hasil dari satu kali proses pengayakan kemudian diayak lagi, lalu diayak lagi, dan seterusnya. Entitas-entitas diseleksi atau dipilah selama ‘bergenerasi-generasi’ secara beruntun. Produk akhir dari satu generasi seleksi adalah titik awal untuk generasi seleksi berikutnya, dan begitu seterusnya selama bergenerasi-generasi. Lumrah saja kalau kita pinjam istilah-istilah seperti ‘bereproduksi’ dan ‘generasi’, yang memang berasosiasi dengan benda hidup, karena benda hidup adalah contoh utama yang kita ketahui sebagai benda-benda yang ikut serta dalam seleksi kumulatif. Pada praktiknya mungkin hanya benda hiduplah yang ikut serta dalam seleksi kumulatif. Tapi saya tidak mau buru-buru berasumsi dengan langsung menyimpulkannya demikian.

Kadang awan, yang diuli dan diremas asal-asalan oleh angin, bisa tampak seperti objek yang kita kenal. Ada sebuah foto yang banyak diterbitkan, yang diambil oleh pilot pesawat kecil, awan yang tampak mirip dengan wajah *Yesus*, menatap dari langit. Kita semua pernah melihat awan yang mengingatkan kita akan sesuatu – kuda laut, misalnya, atau wajah yang tersenyum.

Kemiripan ini muncul dari seleksi selangkah; maksudnya: sebuah kebetulan saja. Karena itu, tidak terlalu mengesankan. Kemiripan simbol-simbol zodiak dengan hewan-hewan yang menjadi namanya, Scorpio, Leo, dan seterusnya, sama tak mengesankannya dengan ramalan para peramal. Kemiripan tersebut tidak membuat kita terkagum-kagum seperti kita terkagum melihat adaptasi biologis – produk seleksi kumulatif. Kita sebut kemiripan serangga daun dengan daun atau belalang sembah dengan segugus bunga kembang sepatu itu ganjil, luar biasa, atau menakjubkan. Kemiripan awan dengan seekor musang itu biasa saja, hampir tak cukup untuk membuat teman di samping kita ikut tertarik perhatiannya. Selain itu, kita juga sering berubah pikiran tentang mirip seperti apa persisnya awan itu.

<i>Hamlet.</i>	Engkau lihatkah nun di langit awan yang hampir serupa unta?
<i>Polonius.</i>	Dilihat dari besarnya, memanglah seperti unta.
<i>Hamlet.</i>	Bagiku tampak seperti musang.
<i>Polonius.</i>	Boleh jadi seperti musang.
<i>Hamlet.</i>	Atau seperti paus?
<i>Polonius.</i>	Amat mirip paus.

Saya tidak tahu siapa yang pertama sekali mengemukakan bahwa, kalau diberi cukup waktu, seekor monyet yang asal memencet mesin ketik dapat menulis semua karya Shakespeare. Frasa kuncinya di sini, tentu saja, kalau diberi cukup waktu. Mari kita batasi tugas yang dihadapi monyet kita ini. Andaikan monyet itu mesti menulis, bukan kumpulan karya lengkap Shakespeare, tapi kalimat pendek '*Methinks it is like a weasel*' ('Bagiku tampak seperti musang'), dan kita buat ini relatif lebih mudah dengan memberinya mesin ketik yang papan ketiknya terbatas, yang cuma punya 26 huruf (kapital) dan spasi. Berapa lama sampai dia menulis kalimat kecil ini?

Kalimat itu punya 28 karakter, jadi kita asumsikan si monyet punya serangkaian 'upaya', yang masing-masing terdiri dari 28 ketukan di papan ketik. Jika dia mengetik frasa tersebut dengan benar, eksperimennya berakhir. Jika tidak, kita beri lagi satu 'upaya' untuk mengetik 28 karakter. Saya tidak punya kenalan monyet, tapi untungnya putri saya yang berusia 11 bulan sangat berpengalaman dalam urusan acak-mengacak, dan dia mau sekali menggantikan peran si monyet pengetik ini. Ini yang diketikkannya pada komputer.

UMMK JK CDZZ F ZD DSDSKSM
S SS FMCV PU I DDRGLKDXRRDO
RDTE QDWFDVIOY UDSKZWDCCVYT
H CHVY NMGNBAYTDFCCVD D
RCDFYYRM N DFSKD LD K WDWK
JKAUIZMZI UXDKIDISFUMDKUDXI

Karena dia juga punya urusan penting lain, saya jadi harus memprogram komputer tadi untuk membuat simulasi bayi atau monyet yang mengetik dengan asal.

WDLDMNLT DTJBKWIRZREZLMQCO P

Y YVMQKZPGJXWVHGLAWFVCHQYOPY
MWR SWTNUXMLCDLEUBXTQHNZVJQF
FU OVAODVYKDGXDEKYVMOGGS VT
HZQZDSFZIHIVPHZPETPWVOVPMZGF
GEWRGZRPBCTPGQMCKHFDBGW ZCCF

Dan seterusnya. Tidak sulit untuk mengalkulasi berapa lama wajarnya kita harus menunggu hingga komputer (atau bayi atau monyet) acak itu mengetik METHINKS IT IS LIKE A WEASEL. Coba bayangkan jumlah total frasa dengan panjang yang tepat yang *mungkin bisa* diketik oleh monyet atau bayi atau komputer acak tersebut. Kalkulasinya sama saja dengan yang kita buat untuk contoh hemoglobin tadi, dan besar hasilnya serupa. Terdapat 27 huruf (dengan ‘spasi’ dihitung sebagai satu huruf) yang mungkin ditempatkan di posisi pertama. Karena itu, peluang si monyet untuk kebetulan mengetik huruf pertama dengan benar – M – adalah 1 banding 27. Peluangnya untuk mengetik dua huruf pertama dengan benar – ME – adalah peluangnya untuk mengetik huruf kedua dengan benar – E – (1 banding 27) *jika* dia juga mengetik huruf pertama – M – dengan benar. Berarti, $1/27 \times 1/27$, sama dengan $1/729$. Peluangnya untuk mengetik kata pertama dengan benar – METHINKS – adalah $1/27$ untuk tiap-tiap dari 8 huruf tersebut; berarti $(1/27) \times (1/27) \times (1/27) \times (1/27) \dots$, dst. 6 kali, atau $(1/27)$ pangkat 8. Peluangnya untuk mengetik seluruh kalimat berisi 28 karakter itu dengan benar adalah $(1/27)$ pangkat 28, atau $(1/27)$ dikalikan dirinya sendiri sebanyak 28 kali. Peluangnya kecil sekali, kira-kira 1 banding 10.000 juta juta juta juta juta. Istilah halusnya, butuh waktu yang amat panjang hingga kalimat yang kita cari itu muncul. Apalagi kalau disuruh menulis kumpulan karya lengkap Shakespeare.

Habis perkara untuk seleksi selangkah variasi acak. Bagaimana dengan seleksi kumulatif; seberapa lebih efektif jadinya? Sangat jauh lebih efektif, mungkin lebih efektif dari dugaan awal kita, walau sebetulnya sudah jelas kalau kita renungkan lebih jauh. Kita gunakan lagi monyet komputer kita, tapi dengan perbedaan krusial dalam programnya. Dia mulai lagi dengan memilih rangkaian acak berisi 28 huruf, persis seperti sebelumnya:

WDLMNLT DTJBKWIRZREZLMQCO P

Sekarang, kalimat acak ini ‘berkembang biak’. Komputer menduplikasinya berulang kali, tapi dengan peluang galat acak tertentu – ‘mutasi’ – dalam penyalinannya. Komputer memeriksa kalimat-kalimat mutan tak bermakna ini, ‘keturunan’ dari kalimat awalnya, kemudian memilih satu yang, *sekecil apa pun*, paling menyerupai kalimat sarannya, METHINKS IT IS LIKE A WEASEL. Dalam contoh ini, kalimat pemenang ‘generasi’ berikutnya ternyata:

WDLTMNLT DTJBSWIRZREZLMQCO P

Tak tampak seperti peningkatan, memang! Tapi prosedur ini diulangi, sekali lagi ‘keturunan’ mutan ‘dibiakkan’ dari kalimat itu, dan ‘pemenang’ yang baru dipilih. Berlanjut terus, generasi demi generasi. Setelah 10 generasi, kalimat yang dipilih untuk ‘dibiakkan’ adalah:

MDLDMNLS ITJISWHRZREZ MECS P

Setelah 20 generasi:

MELDINLS IT ISWPRKE Z WECSEL

Sekarang, mata yang awas akan dapat melihat kemiripannya dengan kalimat sasaran. Setelah 30 generasi, sudah tidak diragukan lagi:

METHINGS IT ISWLIKE B WECSEL

Di generasi ke-40, tinggal satu huruf saja yang keliru:

METHINKS IT IS LIKE I WEASEL

Dan akhirnya tepat sasaran pada generasi ke-43. Percobaan kedua di komputer itu dimulai dengan kalimat:

Y YVMQKZPFJXWVHGLAWFVCHQXYOPY,

yang kemudian diturunkan (setiap sepuluh generasi) menjadi:

Y YVMQKSPFTXWSHLIKEFV HQYSPY

YETHINKSPITXISHLIKEFA WQYSEY

METHINKS IT ISSLIKE A WEFSEY

METHINKS IT ISBLIKE A WEASES

METHINKS IT ISJLIKE A WEASEO

METHINKS IT IS LIKE A WEASEP

dan mencapai kalimat sasaraannya pada generasi ke-64. Dalam percobaan ketiga, komputer mulai dengan:

GEWRGZRPBCTPGQMCKHFDBGW ZCCF

dan mencapai METHINKS IT IS LIKE A WEASEL dalam 41 generasi ‘pembiakan’ selektif.

Berapa tepatnya waktu yang dibutuhkan komputer untuk mencapai sasaraannya tidak penting. Tapi kalau Anda ingin tahu, satu putaran penuh pertama selesai selagi saya keluar makan siang. Kira-kira setengah jam. (Penggemar komputer mungkin berpikir ini terlalu lamban. Alasannya karena program tersebut ditulis dengan bahasa BASIC, komputer yang baru belajar bicara. Ketika saya tulis ulang dengan Pascal, cuma perlu 11 detik.) Komputer memang sedikit lebih cepat untuk urusan seperti ini dibanding monyet, tapi perbedaannya tidak betul-betul signifikan. Yang perlu diperhatikan di sini adalah perbedaan antara waktu yang dibutuhkan seleksi *kumulatif* dan waktu yang dibutuhkan komputer yang sama, yang bekerja dengan kecepatan yang sama, untuk mencapai kalimat sasaran itu jika dipaksa menggunakan prosedur *seleksi selangkah*: sekitar satu juta juta juta juta juta tahun. Ini lebih dari satu juta juta juta kali lebih lama dari usia alam semesta sejauh ini. Sebetulnya akan lebih adil jika kita katakan bahwa, dibandingkan dengan waktu yang dibutuhkan seekor monyet atau komputer yang diprogram acak untuk mengetik kalimat sasaran kita, usia total alam semesta sejauh ini masih sangat pendek, terlalu pendek untuk bisa berada di dalam margin galat untuk kalkulasi kasar semacam ini. Sementara, waktu yang dibutuhkan komputer yang bekerja secara acak tapi dengan beban *seleksi kumulatif* untuk mengerjakan tugas yang sama berada dalam kisaran yang dapat dipahami manusia, antara 11 detik dan waktu yang dibutuhkan untuk makan siang.

Maka, ada perbedaan besar antara seleksi kumulatif (yang setiap peningkatannya, seberapa kecil pun itu, dipakai sebagai dasar untuk perkembangan ke depannya), dan seleksi selangkah (yang setiap ‘upaya’ merupakan upaya baru). Kalau kemajuan evolusi harus bertumpu pada seleksi selangkah, tidak akan pernah ada kemajuan. Akan tetapi, jika ada jalan bagi kekuatan buta alam ini untuk mengadakan kondisi yang diperlukan bagi seleksi *kumulatif*, konsekuensinya boleh jadi ganjil dan ajaib. Dan memang itulah yang terjadi di planet ini, dan kita sendiri merupakan salah satu dari konsekuensi yang paling kini, kalau bukan yang paling aneh bin ajaib.

Luar biasa kalau Anda masih membaca kalkulasi seperti kalkulasi hemoglobin saya seolah sebagai argumen yang *membantah* teori Darwin. Orang-orang yang melakukan ini, kebanyakan merupakan pakar di bidangnya sendiri, astronomi atau apa pun itu, tampak betul-betul yakin bahwa Darwinisme menjelaskan tatanan hidup dalam kerangka kebetulan – ‘seleksi selangkah’ – semata. Keyakinan bahwa evolusi Darwinian ini ‘acak’ tidak hanya keliru. Tapi juga kebalikan dari kebenarannya. Peluang hanyalah satu bahan minor dalam resep Darwinian, tapi bahan terpentingnya adalah seleksi kumulatif yang pada dasarnya *non*acak.

Awan tidak mampu masuk ke dalam seleksi kumulatif. Tidak ada mekanisme yang memungkinkan awan dengan bentuk tertentu dapat menghasilkan anak awan yang mirip dengan dirinya. Kalau mekanisme seperti itu ada, kalau awan yang mirip musang atau unta bisa menghasilkan silsilah awan-awan lain yang bentuknya kira-kira sama, seleksi kumulatif berpeluang terjadi. Tentu, awan kadang memang terpecah dan membentuk awan ‘anak’, tapi ini tidak cukup untuk seleksi kumulatif. Penting pula bahwa ‘keturunan’ awan tersebut mesti *lebih* menyerupai ‘induknya’ daripada ‘induk’ tua lainnya di dalam ‘populasi’ tersebut. Poin teramat penting ini rupa-rupanya telah disalahpahami oleh sebagian filsuf yang, belakangan ini, meminati teori seleksi alam. Selanjutnya, penting pula bahwa peluang sebuah awan untuk bertahan dan menghasilkan salinannya itu harus bergantung pada bentuknya. Mungkin di suatu galaksi nun jauh di angkasa kondisi-kondisi ini benar-benar mengemuka, dan hasilnya, jika sudah melalui jutaan tahun, adalah rupa kehidupan berbentuk gumpalan yang sangat halus. Bisa jadi cerita fiksi ilmiah yang bagus – *Awan Putih*, judulnya – tapi untuk konteks kita kali ini model komputer seperti model monyet/Shakespeare lebih mudah diterima akal.

Walaupun bisa digunakan untuk menjelaskan perbedaan antara seleksi selangkah dan seleksi kumulatif, model monyet/Shakespeare ini mengandung kekeliruan mendasar. Salah satunya adalah bahwa, dalam tiap generasi ‘pembiasaan’ selektif, kalimat ‘keturunan’ mutannya dinilai menurut kriteria kemiripannya dengan kalimat sasaran *akhir yang ideal*: METHINKS IT IS LIKE A WEASEL. Hidup tidak seperti itu. Evolusi tidak punya tujuan jangka panjang. Tidak ada sasaran akhir, tidak ada kesempurnaan paripurna yang berlaku sebagai kriteria seleksi, kendati pikiran manusia cukup *ge-er* untuk merayakan gagasan absurd bahwa spesies kita adalah tujuan akhir evolusi. Dalam kehidupan nyata, kriteria seleksinya selalu berjangka pendek: untuk bertahan hidup saja atau, lebih umum lagi, berhasil bereproduksi. Kalau, setelah jutaan tahun, yang tampak seperti kemajuan menuju suatu tujuan nun jauh itu, setelah ditilik kemudian, kelihatan telah tercapai, hal ini semata-mata merupakan konsekuensi insidental dari seleksi jangka pendek yang terjadi selama bergenerasi-generasi. ‘Pembuat arloji’, alias seleksi alam kumulatif itu, buta terhadap masa depan dan tak punya tujuan jangka panjang.

Kita bisa mengubah model komputer kita untuk menyertakan poin ini. Kita juga bisa membuatnya lebih realistis di berbagai segi kondisi lainnya. Huruf dan kata merupakan manifestasi khas manusia. Karena itu, kita akan suruh komputer untuk membuat gambar. Mungkin kita bahkan akan melihat bentuk-bentuk mirip hewan berevolusi di komputer tersebut, dengan seleksi kumulatif rupa-rupa mutan. Kita tidak akan membuat praduga atas perihal ini dengan menanamkan gambar hewan tertentu sebagai awalnya. Kita mau gambar-gambar itu muncul semata-mata sebagai hasil seleksi kumulatif mutasi acak.

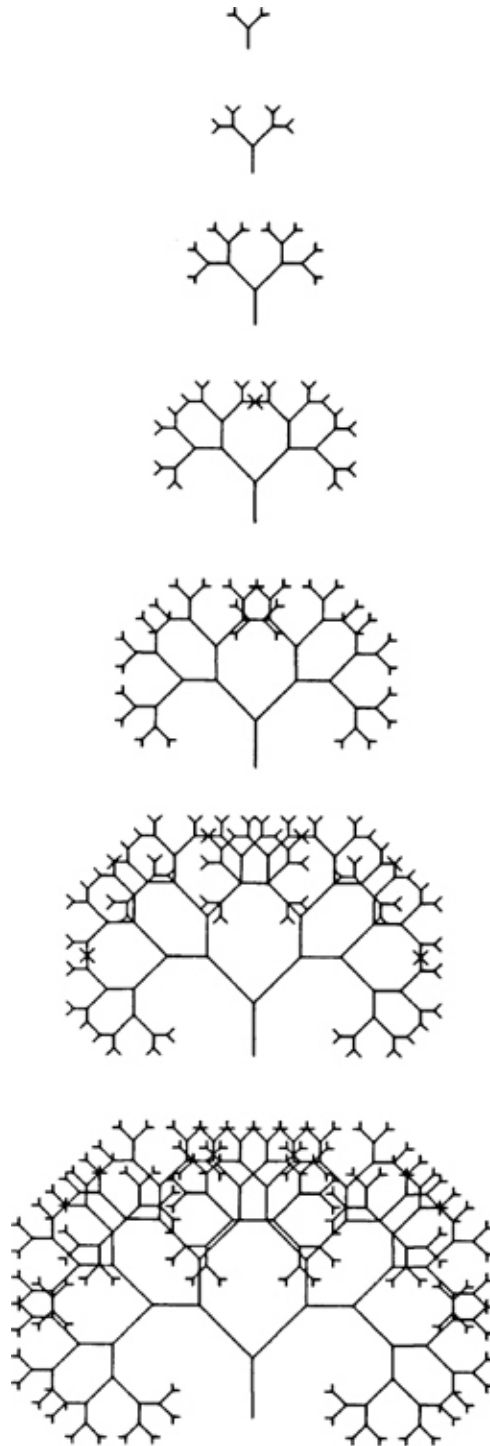
Dalam kehidupan nyata, rupa tiap-tiap hewan dihasilkan dengan perkembangan embrionik. Evolusi terjadi karena, dalam pembiakan beruntun, terdapat perbedaan tipis dalam perkembangan embrioniknya. Perbedaan ini terjadi karena perubahan (mutasi – inilah unsur acak kecil dalam proses yang tadi saya bicarakan) pada gen-gen yang mengendalikan

perkembangannya. Oleh karena itu, dalam model komputer kita, harus ada hal yang sepadan dengan perkembangan embrionik, dan hal yang sepadan dengan gen yang dapat bermutasi. Ada banyak cara untuk memenuhi semua spesifikasi ini dalam sebuah model komputer. Saya pilih satu dan menulis sebuah program yang memuat cara tersebut. Sekarang saya akan deskripsikan model komputer ini, karena saya rasa informasi di baliknya patut Anda ketahui. Kalau Anda tidak tahu-menahu tentang komputer, ingat saja bahwa komputer adalah mesin yang melakukan persis seperti yang diperintahkan tetapi sering memunculkan hasil yang mengagetkan. Serangkaian instruksi untuk sebuah komputer disebut dengan istilah program.

Perkembangan embrionik jauh terlalu rumit untuk disimulasikan secara realistis di komputer kecil. Kita harus merepresentasikannya dengan analogi yang disederhanakan. Kita harus mencari aturan membuat gambar yang sederhana yang dapat dengan mudah dipatuhi komputer, dan yang dapat dibuat beragam karena pengaruh ‘gen’. Aturan menggambar apa yang harus kita pilih? Buku teori ilmu komputer kerap mengilustrasikan kekuatan pemrograman ‘rekursif’ dengan prosedur *pohon-tumbuh* yang sederhana. Komputer mulai dengan menggambar satu garis tegak lurus. Kemudian garis tersebut bercabang dua. Kemudian tiap cabang tadi terbagi lagi menjadi dua anak cabang. Kemudian tiap anak cabang tadi terbagi lagi menjadi dua cucu cabang, dan seterusnya. Sifatnya ‘rekursif’ karena aturan yang sama (dalam hal ini aturan pencabangan) diterapkan secara lokal di sekujur pohon yang tumbuh. Seberapa besar pun pohon tersebut bertumbuh, aturan pencabangan yang sama tetap berlaku pada ujung-ujung semua rantingnya.

‘Kedalaman’ rekursinya berarti jumlah cabang anak-cucu-cicit- ... yang boleh tumbuh, sebelum proses tersebut dihentikan. Gambar 2 menunjukkan apa yang terjadi ketika Anda memerintahkan komputer untuk tunduk betul pada aturan menggambar yang sama, tetapi terus lanjut ke berbagai kedalaman rekursi. Di tingkat-tingkat rekursi tinggi, polanya menjadi cukup rumit, tapi Anda bisa dengan mudah melihat di dalam Gambar 2 bahwa pola tersebut masih dihasilkan dengan aturan pencabangan sederhana yang sama persis. Sudah jelas, inilah yang terjadi di pohon sungguhan. Pola pencabangan pohon beringin atau pohon apel tampak kompleks, tetapi sebetulnya tidak. Aturan pencabangan dasarnya sangat sederhana. Karena aturan ini diterapkan secara rekursif pada semua cabang di seluruh pohonlah – cabang membentuk anak cabang, lalu tiap anak cabang membentuk cucu cabang, dan seterusnya – pohon tersebut akhirnya menjadi besar dan lebat.

Pencabangan rekursif juga merupakan metafora yang bagus untuk perkembangan embrionik untuk tumbuhan dan hewan pada umumnya. Saya tidak bermaksud bahwa embrio hewan itu tampak seperti pohon-pohon bercabang. Tidak. Tapi semua embrio tumbuh melalui pembelahan sel. Sel selalu membelah menjadi dua sel anak. Dan gen selalu mengerahkan efek-efek pamungkasnya pada tubuh melalui pengaruh *lokalnya* pada sel, dan pada pola-pola pencabangan dua arah dari pembelahan sel. Gen seekor hewan bukanlah sebuah desain besar, cetak biru bagi seluruh tubuhnya. Seperti yang akan kita lihat, gen lebih mirip sebuah resep daripada cetak biru; resep yang diikuti *bukan* oleh embrio yang sedang berkembang secara keseluruhan, tetapi oleh tiap sel atau tiap gugus lokal sel-sel yang sedang membelah. Saya tidak menyangkal bahwa embrio, dan kemudian tubuh dewasanya, *memiliki* rupa skala besar. Tapi rupa skala besar ini *timbul* karena banyak efek-efek seluler kecil yang bersifat lokal di sekujur tubuh yang sedang berkembang itu, dan efek-efek lokal ini utamanya terdiri dari pencabangan dua arah, dalam rupa pembelahan sel dua arah. Melalui pengaruhnya terhadap kejadian-kejadian lokal inilah gen akhirnya bisa mengerahkan pengaruhnya pada tubuh dewasa.

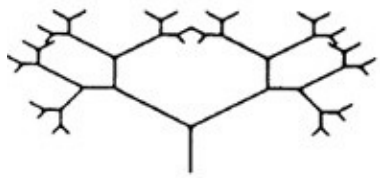


Gambar 2

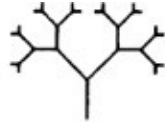
Karena itu, aturan pencabangan sederhana untuk menggambar pohon tampak seperti analogi yang masuk akal untuk perkembangan embrionik. Dengan demikian, kita membungkusnya ke dalam prosedur komputer kecil, melabelinya PERKEMBANGAN, dan bersiap menyematkannya ke dalam program yang lebih besar berlabel EVOLUSI. Sebagai langkah pertama menuju penulisan program yang lebih besar ini, perhatian kita alihkan pada gen. Bagaimana kita merepresentasikan ‘gen’ di dalam model komputer kita? Di dunia nyata, gen melakukan dua hal:

memengaruhi perkembangan dan diteruskan ke generasi berikutnya. Pada hewan dan tumbuhan nyata, terdapat puluhan ribu gen, tapi kita batasi saja menjadi sembilan untuk model komputer kita. Masing-masing dari sembilan gen ini direpresentasikan secara sederhana dengan sebuah bilangan di dalam komputer, yang akan disebut sebagai *nilainya*. Nilai dari gen tertentu bisa jadi, misalnya, 4, atau -7.

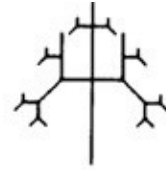
Bagaimana supaya gen-gen ini bisa memengaruhi perkembangan? Ada banyak hal yang bisa dilakukannya. Tapi ide dasarnya adalah bahwa gen-gen tersebut mesti mengerahkan pengaruh kuantitatif minor pada aturan menggambar, yaitu PERKEMBANGAN, tadi. Contohnya, satu gen boleh jadi memengaruhi sudut pencabangan, gen yang lain memengaruhi panjang cabang tertentu. Hal lain yang sudah jelas bisa dilakukan gen adalah memengaruhi kedalaman rekursinya, jumlah pencabangan beruntun yang akan terjadi. Efek ini saya sematkan pada Gen 9. Oleh karena itu, Gambar 2 dapat dilihat sebagai gambar tujuh organisme terkait yang identik satu sama lain dalam segala hal kecuali untuk Gen 9. Tidak akan saya perincikan apa saja yang dilakukan oleh masing-masing dari delapan gen lainnya. Anda bisa membayangkan *jenis* hal seperti apa yang mereka lakukan dengan mempelajari Gambar 3. Pohon dasarnya ada di bagian tengah gambar, salah satu dari yang ada di Gambar 2. Yang mengelilingi pohon pusat ini adalah delapan pohon lainnya. Semuanya sama dengan pohon pusat, kecuali bahwa satu gen, gen yang berbeda dalam masing-masing dari yang delapan itu, telah berubah – ‘bermutasi’. Contohnya, gambar di sebelah kanan pohon pusat menunjukkan apa yang terjadi bila Gen 5 bermutasi dengan tambahan +1 bagi nilainya. Kalau ruangnya cukup, saya ingin mencetak gambar 18 mutan di sekeliling pohon pusatnya. Kenapa 18 pohon? Karena ada sembilan gen, dan masing-masing gen dapat bermutasi ke arah ‘atas’ (nilainya bertambah 1) atau ke arah ‘bawah’ (nilainya berkurang 1). Jadi lingkaran berisi 18 pohon ini cukup untuk merepresentasikan semua mutan selangkah yang *mungkin* diturunkan dari satu pohon pusat.



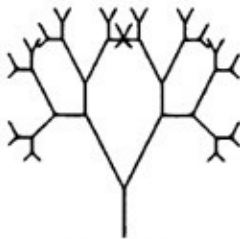
Gen 1 -



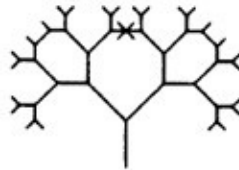
Gen 9 -



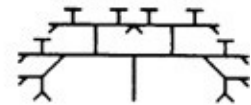
Gen 1 +



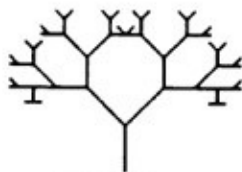
Gen 5 -



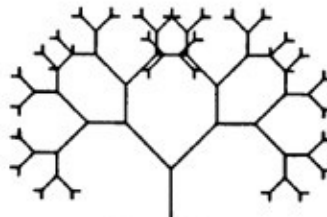
Pohon dasar



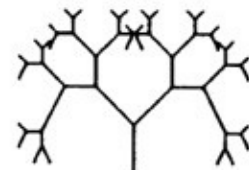
Gen 5 +



Gen 7 -



Gen 9 +



Gen 7 +

Gambar 3

Masing-masing dari pohon ini memiliki ‘formula genetik’ uniknya sendiri, nilai numerik dari sembilan gennya. Saya tidak menuliskan formula genetik tersebut karena, bila sendiri, mereka tidak ada artinya. Gen sungguhan pun seperti itu. Gen baru mulai berarti saat diterjemahkan, melalui sintesis protein, ke dalam aturan tumbuh bagi sebuah embrio yang sedang berkembang. Dan di dalam model komputer ini pun nilai-nilai numerik dari sembilan gen tersebut hanya berarti bila diterjemahkan ke dalam aturan tumbuh untuk pola pohon yang mencabang. Tapi Anda dapat membayangkan hal yang dilakukan masing-masing gen dengan *membandingkan* tubuh dari dua organisme yang diketahui berbeda dalam sebuah gen tertentu. Bandingkan, misalnya, pohon dasar di tengah gambar dengan dua pohon di sisi kiri dan kanannya, dan Anda akan bisa membayangkan apa yang dilakukan oleh Gen 5.

Persis seperti ini pulalah cara kerja ahli genetika di dunia nyata. Ahli genetika biasanya tidak tahu seperti apa gen mengerahkan efeknya pada embrio. Mereka pun tidak tahu formula genetik utuh dari hewan mana pun. Tapi dengan membandingkan tubuh dari dua hewan dewasa yang diketahui *berbeda* satu gen saja, mereka bisa melihat apa efek yang dimiliki satu gen tersebut. Lebih rumit dari itu karena efek-efek gen berinteraksi satu dengan yang lain dengan cara yang

lebih rumit dari penambahan sederhana. Begitu pula dengan pohon-pohon komputer ini. Sama persis, seperti yang akan tampak pada gambar-gambar berikutnya.

Anda akan memperhatikan bahwa semua bentuk di sumbu kiri simetris dengan bentuk di sumbu kanan. Itu memang batasan yang saya kenakan pada prosedur PERKEMBANGAN. Saya lakukan untuk alasan estetika; sebagian demi menghemat jumlah gen yang diperlukan (jika gen tidak memunculkan efek gambar cermin pada kedua sisi pohonnya, sisi kanan dan kiri masing-masing akan membutuhkan satu gen sendiri); dan sebagian lagi karena saya berharap dapat mengevolusikan bentuk-bentuk mirip hewan; lagi pula, kebanyakan tubuh hewan itu memang cukup simetris. Karena itu pula, dari sekarang saya akan berhenti menyebut makhluk-makhluk ini 'pohon', dan mulai menyebutnya 'tubuh' atau 'biomorf'. Biomorf adalah nama yang diciptakan oleh Desmond Morris untuk bentuk-bentuk yang samar-samar mirip hewan dalam karya-karya lukisan surealisnya. Lukisan-lukisan ini punya tempat khusus di relung hati saya, karena salah satunya pernah direproduksi menjadi sampul buku pertama saya. Desmond Morris mengklaim bahwa biomorf-biomorfnya 'berevolusi' di dalam pikirannya, dan bahwa evolusi tersebut dapat dilacak balik dengan memperhatikan lukisan-lukisan yang dibuatnya secara beruntun.

Kembali ke biomorf komputer kita, dan lingkaran 18 mutan yang mungkin muncul, yang diwakili oleh delapan biomorf yang tercantum di dalam Gambar 3. Karena tiap-tiap anggota lingkaran ini hanya satu langkah mutasi saja dari biomorf pusat, mudah bagi kita untuk menganggapnya sebagai *anak-anak* dari induk pusatnya. Kita punya analogi REPRODUKSI, yang, seperti PERKEMBANGAN, dapat kita bungkus dalam sebuah program komputer kecil lainnya, siap untuk disematkan ke dalam program besar EVOLUSI kita. Dua hal penting mengenai REPRODUKSI. Pertama, tidak ada seks; reproduksi itu aseksual. Saya anggap biomorf-biomorf ini betina, karena hewan-hewan aseksual seperti kutu daun pada dasarnya hampir selalu berupa betina. Kedua, mutasi saya semuanya dibatasi untuk terjadi sekali setiap waktu. Anak hanya berbeda di salah satu dari sembilan gen dari induknya; lagi pula, semua mutasi terjadi dengan penambahan +1 atau -1 pada nilai gen induk terkait. Ini cuma ketentuan yang manasuka: bisa berbeda dan masih tetap realistis secara biologi.

Berbeda halnya dengan fitur berikutnya dari model tersebut, yang mencerminkan prinsip fundamental ilmu biologi. Bentuk setiap anak tidak diturunkan langsung dari bentuk induknya. Tiap anak memperoleh bentuknya dari nilai-nilai dari sembilan gennya sendiri (yang memengaruhi sudut, jarak, dan seterusnya). Dan tiap anak memperoleh sembilan gennya dari sembilan gen induknya. Itu juga yang terjadi di dunia nyata. Genlah yang diteruskan dari generasi ke generasi; tubuh tidak. Gen memengaruhi perkembangan embrionik tubuh yang didudukinya. Gen-gen yang sama itu kemudian diteruskan ke generasi berikutnya atau tidak sama sekali. Sifat dari gen-gen tersebut tidak terpengaruhi oleh partisipasinya dalam perkembangan tubuh, tapi kemungkinannya diteruskan boleh jadi dipengaruhi oleh keberhasilan tubuh yang pewujudannya mereka bantu. Itu mengapa, di dalam model komputer ini, kedua prosedur yang disebut PERKEMBANGAN dan REPRODUKSI itu ditulis sebagai dua wadah yang kedap air. Keduanya kedap air kecuali bahwa REPRODUKSI meneruskan nilai-nilai gen ke PERKEMBANGAN, tempatnya memengaruhi aturan pertumbuhan. PERKEMBANGAN tentu saja tidak meneruskan nilai gen kembali ke REPRODUKSI – itu sama saja dengan 'Lamarckisme' (lihat Bab 11).

Dua modul program sudah kita himpun, dan namai dengan PERKEMBANGAN dan REPRODUKSI. REPRODUKSI meneruskan gen ke generasi-generasi berikutnya, dengan

kemungkinan adanya mutasi. PERKEMBANGAN mengambil gen-gen yang disediakan REPRODUKSI di setiap generasi, dan menerjemahkan gen-gen tersebut ke dalam tindakan menggambar, lalu ke dalam gambar sebuah tubuh pada layar komputer. Tiba waktunya untuk menyatukan kedua modul ini ke dalam program besar bernama EVOLUSI.

EVOLUSI pada dasarnya terdiri dari pengulangan REPRODUKSI tanpa akhir. Di setiap generasi, REPRODUKSI mengambil gen-gen yang dipasok padanya oleh generasi sebelumnya, dan menyerahkannya ke generasi berikutnya tetapi dengan galat acak yang minor: mutasi. Mutasi terjadi dengan ditambahkannya +1 atau -1 pada nilai gen yang dipilih secara acak. Ini berarti bahwa, seiring berjalannya generasi, jumlah total perbedaan genetik dari nenek moyang asali bisa jadi sangat jauh, secara kumulatif, selangkah kecil demi selangkah kecil. Tapi walaupun mutasi-mutasinya acak, tidak demikian halnya dengan perubahan kumulatif yang terjadi dari generasi ke generasi. Keturunan di dalam setiap generasi berbeda dari induknya secara acak. Tapi keturunan mana yang dipilih untuk lanjut ke generasi berikutnya tidak acak. Di titik inilah seleksi Darwinian masuk. Kriteria seleksinya bukan gen-gen itu sendiri, tetapi tubuh-tubuh yang bentuknya dipengaruhi oleh gen-gen tersebut melalui PERKEMBANGAN.

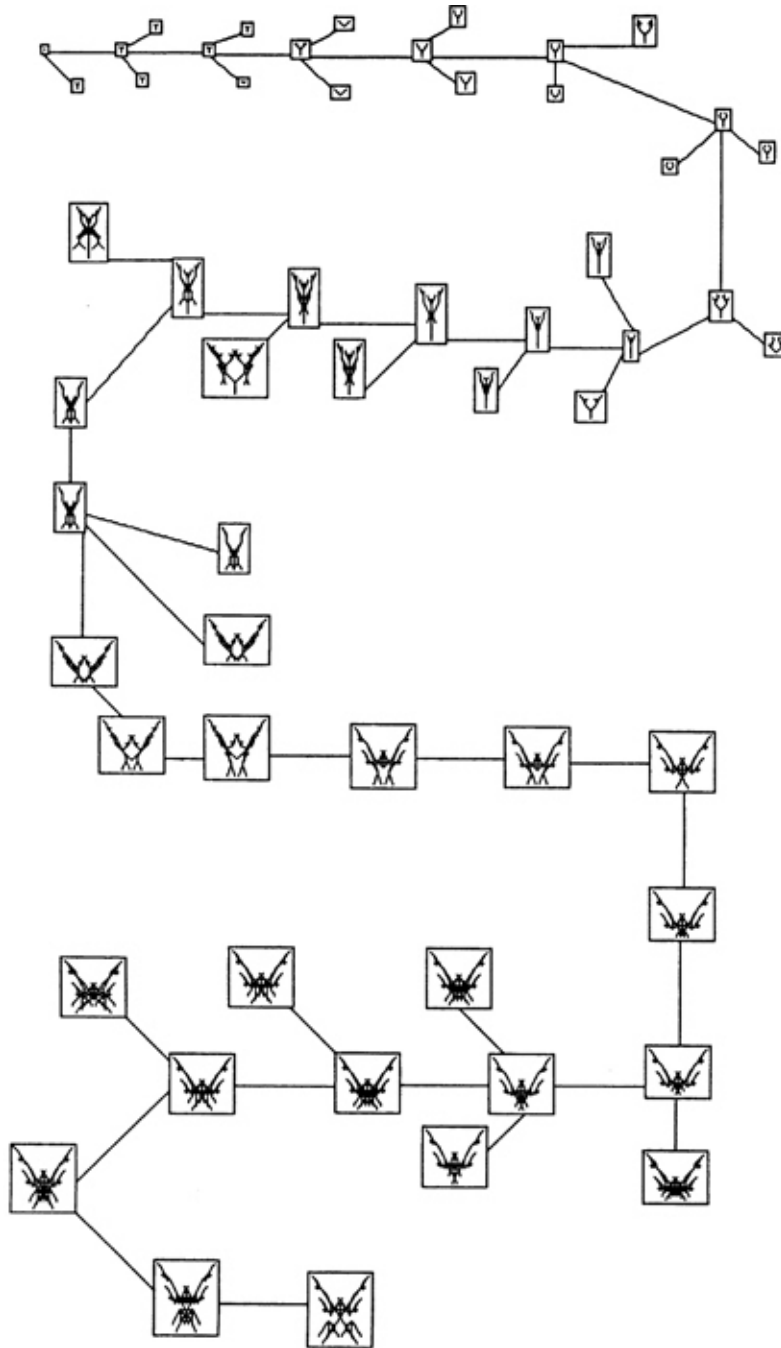
Selain DIREPRODUKSI, gen-gen pada tiap generasi juga diserahkan ke PERKEMBANGAN, yang menumbuhkan tubuh yang sesuai pada layar, mengikuti aturan-aturan ketat yang diterapkannya sendiri. Dalam setiap generasi, seluruh 'perindukan' 'anak' (yaitu individu-individu generasi berikutnya) ditampilkan. Semua anak ini adalah anak-anak mutan dari induk yang sama, yang berbeda satu gen saja dari induknya. Tingkat mutasi yang amat tinggi ini merupakan fitur yang secara khusus tan-biologis dari model komputer kita. Dalam kehidupan nyata, probabilitas bermutasinya sebuah gen itu seringkali kurang dari satu banding sejuta. Tingkat mutasi tinggi ini diimbuhkan ke dalam model tersebut agar seluruh gambar yang ditampilkan di layar komputer akurat dipandang mata manusia, dan manusia tak punya kesabaran menunggu hingga sejuta generasi untuk menyaksikan terjadinya mutasi!

Mata manusia berperan aktif dalam cerita ini. Mata manusia adalah agen penyeleksi. Mata manusia menyurvei kumpulan keturunan dan memilih satu untuk dibiakkan. Yang terpilih kemudian menjadi induk generasi berikutnya, dan sekumpulan anak mutannya ditampilkan serentak di layar. Mata manusia di sini melakukan hal yang sama persis dengan yang dilakukannya dalam membiakkan anjing ras atau mawar blasteran. Dengan kata lain, model kita ini merupakan model seleksi buatan, bukan seleksi alam. Kriteria 'kesuksesan'-nya tidak lantas berupa kriteria bertahan hidup, sebagaimana adanya di seleksi alam sejati. Dalam seleksi alam sejati, kalau sebuah tubuh berhasil bertahan hidup, gen-gennya secara otomatis bertahan hidup karena berada di dalam tubuh tersebut. Jadi, gen-gen yang bertahan hidup cenderung, secara otomatis, merupakan gen-gen yang memberikan kualitas-kualitas yang membantu tubuh tersebut bertahan hidup. Di sisi lain, kriteria seleksi model komputer ini bukan bertahan hidup, tetapi kemampuan untuk menuruti kehendak manusia. Bukan kehendak yang sembarangan, karena kita bisa memutuskan untuk memilih secara konsisten kualitas tertentu seperti 'mirip pohon beringin'. Akan tetapi, dari pengalaman saya, manusia penyeleksi ini lebih sering bersikap plin-plan dan oportunis. Ini pun tidak seperti jenis-jenis seleksi alam tertentu.

Manusia memberitahu komputer yang mana dari perindukan keturunan yang akan dibiakkan. Gen-gen dari yang dipilih itu diteruskan ke REPRODUKSI, dan sebuah generasi baru pun dimulai. Proses ini, seperti halnya evolusi yang nyata, terus berlanjut selama-lamanya. Tiap generasi biomorf hanya terpisah satu langkah mutasi saja dari pendahulu dan penerusnya. Tetapi

setelah 100 generasi EVOLUSI, biomorf-biomorf ini bisa berjarak hingga 100 langkah mutasi dari leluhur aslinya. Dan dalam 100 langkah mutasi, banyak hal bisa terjadi.

Tak pernah terbayangkan saya *seberapa* banyak, ketika pertama sekali saya bermain-main dengan program EVOLUSI yang baru saya tulis. Yang paling mengejutkan saya adalah bahwa biomorf-biomorf tersebut dengan cukup cepat bisa tidak lagi tampak seperti pohon. Struktur pencabangan dua arah dasarnya tetap di situ, tetapi dengan cepat tertutupi karena garis-garisnya seling-silang satu dengan yang lain, membuat gumpalan warna padat (hitam dan putih saja di gambar cetaknya). Gambar 4 menunjukkan satu riwayat evolusi yang mengandung tidak lebih dari 29 generasi. Nenek moyangnya merupakan makhluk mungil, setitik saja. Walaupun tubuh nenek moyangnya berupa sebuah titik, seperti setitik bakteri di dalam lendir purba, tersembunyi di dalamnya potensi untuk mencabang dengan pola yang persis sama dengan pohon pusat Gambar 3: ini cuma karena Gen 9-nya menyuruhnya mencabang sebanyak nol kali! Semua makhluk yang digambarkan di halaman itu diturunkan dari titik tersebut. Namun, agar halamannya tidak berantakan, saya tidak mencetak semua keturunan yang saya lihat. Yang saya cetak hanyalah anak dari tiap generasi yang berhasil (yakni, induk dari generasi berikutnya) dan satu atau dua saudaranya yang tidak berhasil. Jadi, gambar tersebut pada dasarnya menunjukkan hanya satu garis utama evolusi saja, yang dipandu oleh seleksi estetik saya. Semua tahap di garis utama ditunjukkan.



Gambar 4

Mari kita lihat beberapa generasi pertama dari garis utama evolusi di Gambar 4. Titik tersebut menjadi Y di generasi 2. Dalam dua generasi berikutnya, Y tersebut membesar. Lalu cabang-cabangnya menjadi sedikit melengkung, seperti katapel yang dirajin dengan baik. Di generasi 7, lengkung tersebut makin cembung, sehingga kedua cabang itu hampir bertemu. Cabang-cabang melengkung itu membesar, dan masing-masing mendapatkan dua embel-embel kecil di generasi 8. Di generasi 9, embel-embel ini hilang lagi, dan batang katapelnya memanjang. Generasi 10 tampak seperti irisan bunga; cabang-cabang samping yang melengkung itu menyerupai kelopak-

kelopak yang menangkupi embel-embel atau ‘stigma’ di tengahnya. Di generasi 11, bentuk ‘bunga’ yang sama telah membesar dan menjadi sedikit lebih rumit.

Kisahnya tidak saya narasikan lebih lanjut. Gambar itu sudah berbicara, terus hingga 29 generasi. Perhatikan betapa tiap generasi sedikit saja berbeda dari induk dan saudara-saudaranya. Karena masing-masing sedikit berbeda dari induknya, wajar saja kalau masing-masing akan sedikit *lebih* berbeda dari kakek-neneknya (dan dari cucunya), dan makin berbeda lagi dari buyutnya (dan cicitnya). Seperti itulah evolusi *kumulatif*, kendati, karena tingginya tingkat mutasi yang diterapkan, kita mempercepatnya dengan laju yang tidak realistis. Karena ini, Gambar 4 tampak lebih serupa silsilah *spesies* ketimbang silsilah individu-individu, tetapi prinsipnya sama.

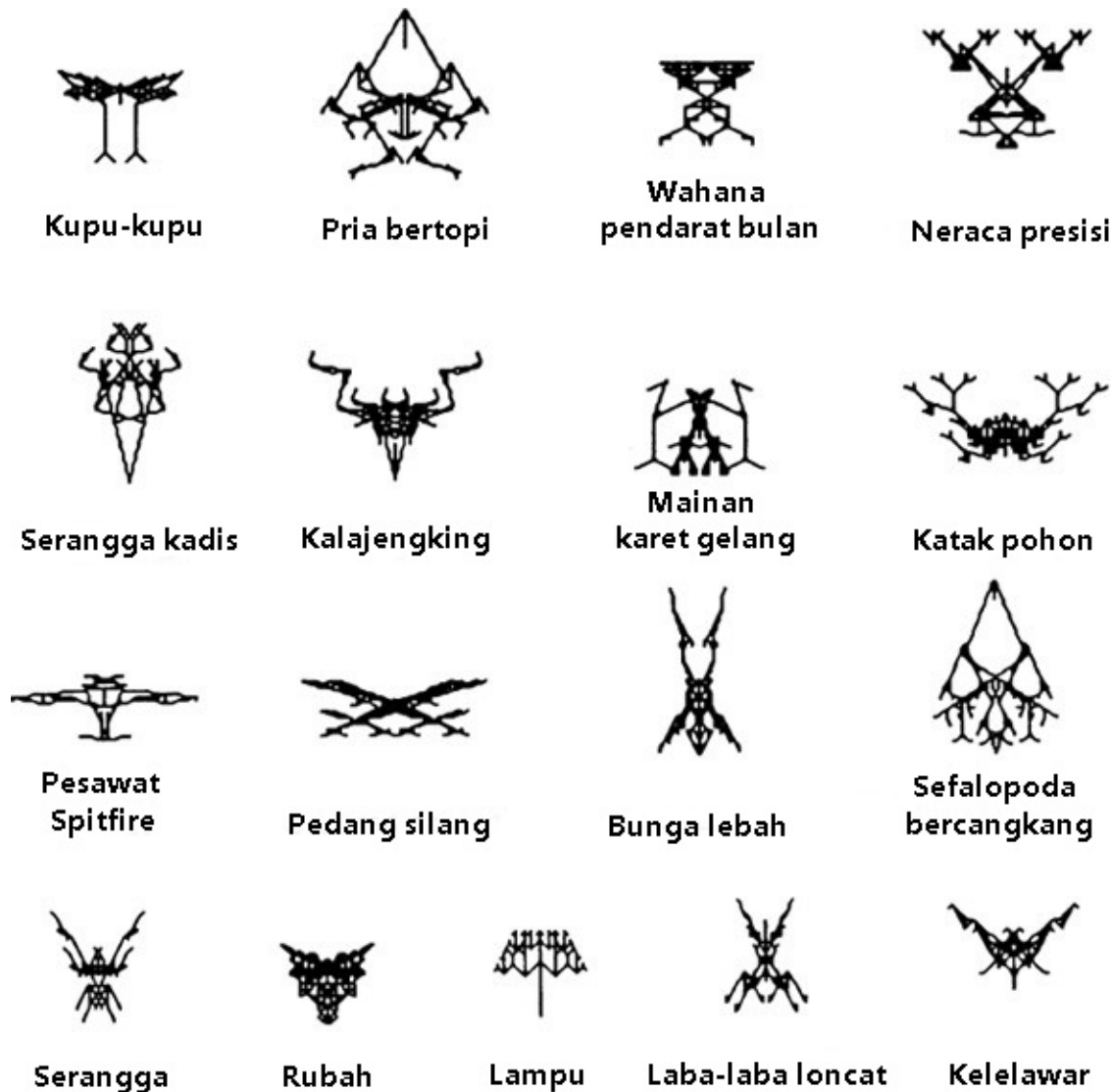
Waktu program komputernya saya tulis, saya tidak menduga bahwa evolusinya akan melampaui aneka bentuk mirip pohon. Saya menyangka bentuknya akan seperti pohon willow, pohon aras Lebanon, pohon poplar Lombardy, rumput laut, atau mungkin tanduk rusa. Yang malah muncul di layar ternyata di luar intuisi saya sebagai seorang ahli biologi, pengalaman 20 tahun menulis program komputer, dan mimpi paling liar yang pernah saya alami. Saya tidak ingat kapan persisnya di dalam rangkaian tersebut pertama sekali saya sadar bahwa evolusi kemiripan dengan sesuatu yang menyerupai serangga itu mungkin terjadi. Dengan menduga-duga, saya mulai membiakkan, generasi demi generasi, anak mana pun yang paling mirip serangga. Kesangsian saya tumbuh sejajar dengan evolusi kemiripannya. Anda lihat hasil-hasil akhirnya di bagian bawah Gambar 4. Memang kakinya delapan seperti laba-laba, dan bukan enam seperti serangga. Tapi biarpun begitu, tetap saja! Saya masih tidak dapat menyembunyikan dari Anda luapan gembira yang saya rasakan ketika pertama kali menyaksikan makhluk-makhluk indah ini muncul di depan mata saya. Sayup-sayup saya mendengar akor-akor megah pembuka *Also sprach Zarathustra* (‘lagu tema 2001’) bermain di benak saya. Saya tak bisa makan, dan malam itu serangga-serangga ‘saya’ ini berkerumun di balik kelopak mata saat saya mencoba tidur.

Ada dijual permainan-permainan komputer yang pemainnya berilusi tengah berkelana di sebuah labirin bawah tanah, yang memiliki geografi yang terbatas meskipun kompleks, dan di sana ia berjumpa dengan naga, minotaurus, dan musuh-musuh dari dunia mitos lainnya. Dalam permainan-permainan ini, jumlah monster-monsternya agak sedikit. Monster-monster itu dirancang oleh programmer manusia, begitu juga geografi labirinnya. Dalam permainan evolusi, baik versi komputer maupun yang nyata, pemain (atau pengamatnya) juga merasa seolah berkelana melalui sebuah labirin berisi lorong-lorong yang mencabang, tetapi yang jumlah lajunya tak terbatas, dan monster-monster yang dijumpai di sana tidak dirancang dan tidak terduga. Dalam kelana saya melalui telaga-telaga Negeri Biomorf, saya telah berjumpa udang peri, kuil Aztec, jendela gereja Gotik, gambar kanguru gaya aborigin, dan, di satu kesempatan yang melekat di ingatan tapi tak sempat saya ulangi, karikatur Profesor Logika Wykeham yang lumayan. Gambar 5 adalah koleksi kecil lain dari ruang piala saya, yang semuanya berkembang dengan cara yang sama. Perlu saya tekankan bahwa bentuk-bentuk ini bukan tafsiran pelukis. Mereka semua tidak diutak-atik atau direkayasa sama sekali. Masih sama persis dengan yang digambar komputer ketika bentuk-bentuk tersebut berevolusi di dalamnya. Peran mata manusia terbatas pada tugas *menyeleksi*, di antara keturunan yang bermutasi secara acak di sepanjang generasi-generasi evolusi kumulatif.

Sekarang sudah ada model evolusi yang jauh lebih realistis dari model yang dimunculkan monyet-monyet pengetik karya Shakespeare. Tetapi model biomorf ini masih kurang. Ia

menunjukkan kepada kita daya seleksi kumulatif untuk menghasilkan variasi rupa quasi-biologis yang hampir tak terbatas, tetapi sifat seleksinya masih buatan, bukan alam. Mata manusia yang menyeleksi. Bisakah kita sisihkan mata manusia, dan membuat komputer yang melakukan seleksinya sendiri, atas dasar kriteria yang realistis secara biologi? Lebih sulit dari kelihatannya. Patut saya jelaskan sedikit mengapa.

Gampang sebetulnya memilih formula genetik tertentu, asalkan Anda bisa membaca gen-gen semua hewannya. Tapi seleksi alam tidak memilih gen secara langsung. Seleksi alam memilih *efek-efek* gen tersebut terhadap tubuh, yang istilah teknisnya efek fenotipik. Mata manusia pintar memilih efek-efek fenotipik, seperti tampak pada banyak peranakan anjing, sapi, dan merpati, serta, kalau boleh saya bilang, seperti tampak pada Gambar 5. Untuk membuat komputer bisa memilih efek-efek fenotipik secara langsung, kita mesti menulis program pengenalan pola yang sangat rumit. Program-program pengenalan pola memang ada. Dipakai untuk membaca teks cetak dan bahkan tulisan tangan. Tapi program-program ini canggih dan pelik, perlu komputer besar dan cepat untuk menjalankannya. Sekalipun program pengenalan pola seperti itu tidak di luar kemampuan pemrograman saya, dan di luar kapasitas komputer kecil 64-kilobita yang saya punya, saya tidak akan repot-repot menggunakannya. Ini tugas yang lebih baik dikerjakan mata manusia, bersama – dan ini poin pentingnya – komputer 10-giganeuron di dalam tempurung kepala.



Gambar 5

Tidaklah terlalu sulit untuk membuat komputer ini memilih fitur-fitur umum yang kasar seperti, katakanlah, kurus-tinggi, gemuk-pendek, mungkin juga lekuk montok, runcing, atau bahkan bak hiasan rokoko. Salah satu caranya adalah dengan memprogram komputer untuk mengingat *jenis-jenis* sifat yang telah dipilih oleh manusia, dan mengusahakan seleksi dari jenis umum yang sama terus ke depannya. Tapi ini belum mendekatkan kita pada simulasi seleksi alam. Pokok pentingnya adalah bahwa alam tidak membutuhkan daya komputasi untuk memilih, kecuali dalam kasus-kasus khusus seperti dalam cara merak betina memilih merak jantan. Di alam, pelaku seleksinya polos, dingin, dan lugas. Setan pencabut nyawa. Tentu saja, alasan bertahan hidup itu sama sekali tidak sederhana – itu mengapa seleksi alam mampu membentuk hewan dan tumbuhan dengan kompleksitas yang begitu hebat. Tapi ada hal yang sangat mentah dan lugas tentang kematian itu sendiri. Dan alam hanya perlu kematian nonacak untuk memilih fenotipe, dan gen-gen yang dikandungnya.

Untuk menyimulasikan seleksi alam secara menarik di dalam komputer, kita mesti melupakan hiasan rokoko dan sifat-sifat lain yang telah ditentukan secara visual. Kita mesti memusatkan

perhatian pada simulasi kematian nonacak. Di dalam komputer, biomorf-biomorf mesti berinteraksi dengan simulasi lingkungan berbahaya. Hidup-mati mereka dalam lingkungan tersebut akan ditentukan oleh sesuatu hal dalam bentuknya. Idealnya, lingkungan berbahaya tersebut mesti berisi biomorf-biomorf lain yang berevolusi: ‘pemangsa’, ‘mangsa’, ‘parasit’, ‘pesaing’. Bentuk biomorf mangsa mesti menentukan kerentanannya untuk ditangkap, misalnya, oleh bentuk-bentuk biomorf pemangsa. Kriteria kerentanan tersebut semestinya tidak direka oleh programernya. Tapi mesti *muncul*, dengan cara yang sama seperti munculnya bentuk-bentuk itu sendiri. Dengan begitu, evolusi di dalam komputer tersebut bisa benar-benar berjalan, karena semua kondisi untuk memunculkan ‘perlombaan senjata’ yang menguat sendiri akan terpenuhi (lihat Bab 7), dan saya tidak berani menduga-duga di mana titik akhirnya. Sayangnya, saya rasa kecakapan saya sebagai programmer tidak cukup untuk merekayasa dunia tiruan semacam itu.

Mungkin para programmer pengembang permainan dingdong yang bising dan kasar – Space Invaders dan sebangsanya – itulah yang cukup lihai melakukannya. Di program-program ini, sebuah dunia tiruan disimulasikan. Di dalamnya ada geografi, biasanya tiga-dimensi, dan dimensi waktunya melaju cepat. Benda-benda berkelejoan ke sana ke mari di ruang simulasi tiga dimensi, saling tubruk, saling tembak sampai lantak, saling telan di tengah-tengah suara bising yang bikin pusing. Begitu asyiknya simulasi ini hingga pemain dengan *joystick*-nya tersihir ilusi seakan-akan dia sendiri merupakan bagian dari dunia tiruan tersebut. Saya kira puncak dari pemrograman seperti ini dicapai dalam bilik-bilik yang dipakai untuk melatih pilot-pilot pesawat udara dan pesawat luar angkasa. Tapi program-program ini pun tampak ‘kacangan’ jika dibandingkan dengan program yang harus ditulis untuk menyimulasikan munculnya perlombaan senjata antara pemangsa dan mangsanya, yang disematkan ke dalam ekosistem tiruan yang lengkap sempurna. Akan tetapi, tetap bisa dilakukan. Kalau ada programmer profesional di luar sana yang merasa ingin berkolaborasi menjawab tantangan ini, saya sambut.

Sementara itu, ada hal lain yang jauh lebih mudah, dan yang hendak saya coba saat musim panas tiba. Saya akan taruh komputernya di tempat rindang di kebun. Layarnya layar berwarna. Saya sudah punya versi program yang menggunakan sedikit lebih banyak ‘gen’ untuk mengontrol warna, dengan cara yang sama seperti sembilan gen lain mengontrol bentuk. Saya akan mulai dengan biomorf yang kurang-lebih latam dan berwarna cerah. Komputer akan secara serempak menampilkan sekisar keturunan mutan dari biomorf tersebut, yang berbeda secara bentuk dan/atau pola warna. Saya yakin lebah, kupu-kupu, dan serangga lainnya akan datang bertandang dan ‘memilih’ dengan cara menubruk titik tertentu di layar tersebut. Ketika sejumlah pilihan tertentu telah dimasukkan, komputer akan mengusap bersih layarnya, ‘membiakkan’ dari biomorf pilihan, dan menampilkan generasi keturunan mutan berikutnya.

Besar harapan saya bahwa, setelah sejumlah besar generasi, serangga-serangga liar itu akan menyebabkan terjadinya evolusi bunga-bunga, di dalam komputer. Kalau ya, bunga-bunga komputer itu berevolusi dengan tekanan seleksi yang sama persis dengan yang menyebabkan bunga-bunga asli berevolusi di alam liar. Harapan saya ini berpijak pada fakta bahwa serangga kerap hinggap di gumpalan warna-warna terang di busana wanita (dan juga pada berbagai eksperimen lebih sistematis yang telah dipublikasikan). Kemungkinan lainnya, yang membuat saya lebih bersemangat lagi, adalah bahwa serangga-serangga liar itu mungkin menyebabkan terjadinya evolusi bentuk-bentuk mirip serangga. Preseden untuk hal ini – sekaligus tumpuan harapan saya – adalah karena dahulu lebah-lebah telah menyebabkan evolusi tumbuhan anggrek lebah. Lebah-lebah jantan, selama bergenerasi-generasi evolusi kumulatif yang dialami anggrek,

telah menciptakan bentuk mirip lebah dengan cara mencoba bersetubuh dengan bunga, dan karenanya membawa serbuk sari dari bunga itu. Bayangkan ‘bunga lebah’ Gambar 5 yang berwarna. Bukankah ini akan merangsang berahi Anda kalau jadi lebah?

Alasan utama pesimisme saya adalah karena penglihatan serangga bekerja dengan cara amat berbeda dari kita. Layar video dirancang untuk mata manusia, bukan mata lebah. Bisa berarti bahwa, walaupun kita dan lebah melihat anggrek lebah, dengan caranya masing-masing, sebagai mirip lebah, lebah mungkin tidak melihat citra layar video sama sekali. Yang tampak di mata lebah mungkin cuma 625 garis-garis pindaian saja! Walaupun begitu, tetap patut dicoba. Saat buku ini diterbitkan, saya akan temukan jawabannya.

Ada satu klise populer, yang biasanya diutarakan dengan nada bicara yang bakal disebut Stephen Potter ‘gedebuk’, yang berbunyi bahwa yang keluar dari komputer tidak lebih dari yang masuk. Versi lainnya: komputer berbuat persis seperti diperintahkan, dan karenanya komputer tidak pernah punya daya cipta. Klise ini benar hanya dalam konteks yang remehnya minta ampun; seperti bilang bahwa Shakespeare tidak pernah menulis apa pun kecuali hal yang diajarkan guru sekolah pertamanya untuk dituliskan: kata-kata. Saya memprogram EVOLUSI ke dalam komputer, tetapi serangga-serangga, kalajengking, pesawat tempur *spitfire*, atau wahana pendarat bulan ‘saya’ itu tidak saya rencanakan. Sedikit pun saya tidak menyangka kalau mereka akan muncul, dan itu mengapa kata ‘muncul’ tepat untuk menggambarkan mereka. Memang, mata saya yang melakukan seleksi yang memandu evolusinya, tetapi di setiap tahap saya hanya berhadapan dengan sejumlah keturunan yang ditawarkan oleh mutasi acak, dan ‘strategi’ seleksi saya, jika memang dapat disebut strategi, bersifat oportunis, plin-plan, dan rabun jauh. Saya tidak membidik sasaran jauh, sama seperti seleksi alam.

Bisa saya dramatisir ini dengan membahas suatu kali ketika saya *memang* mencoba membidik suatu sasaran jauh. Pertama-tama, saya mau terus-terang dulu. Lagi pula, Anda mungkin sudah bisa menerkannya. Riwat evolusi Gambar 4 merupakan sebuah rekonstruksi. Itu bukan kali pertama saya melihat serangga-serangga ‘saya’. Ketika mereka awalnya muncul menyibak tabir bentuknya, saya tidak punya alat untuk merekam gen-gennya. Mereka di situ, di layar komputer, dan saya tidak bisa menggapainya, tidak bisa mengurai gen-gennya. Saya biarkan komputer tetap menyala sembari saya memutar otak, mencari-cari cara untuk menyimpannya, tapi sama sekali tidak ada. Gen-gennya terkubur terlalu dalam, persis seperti di kehidupan nyata. Saya bisa mencetak gambar tubuh-tubuh serangga itu, tetapi gen-gennya sudah hilang. Saya langsung memodifikasi programnya supaya lain kali rekam formula genetik yang tetap bisa diakses, tetapi sudah terlambat. Saya kehilangan serangga-serangga saya.

Saya mulai mencoba ‘menemukan’ mereka lagi. Mereka pernah sempat berevolusi, jadi tampaknya hal tersebut mungkin terjadi lagi. Seperti akor yang hilang, mereka menghantui saya. Saya berkelana melalui Negeri Biomorf, bergerak melewati bentang alam tak berujung makhluk-makhluk dan wujud-wujud aneh, tapi tak saya temukan serangga-serangga itu. Saya tahu mereka pasti mengintai di suatu tempat di sana. Saya tahu gen-gen yang menjadi titik awal evolusi yang pertama. Saya punya gambar tubuh-tubuh serangga saya. Saya bahkan punya gambar rangkaian evolusi tubuh-tubuh yang dari leluhur berupa titik perlahan-lahan menjadi serangga-serangga saya. Tapi tidak saya ketahui formula genetik mereka.

Mungkin Anda pikir semestinya mudah untuk mereka-ulang lajur evolusi tersebut, tapi ternyata tidak. Alasannya, yang nanti akan saya bahas lagi, adalah terlampau banyaknya jumlah *kemungkinan* biomorf yang bisa ditawarkan lajur evolusi yang cukup panjang, sekali pun bila

jumlah gen yang bervariasi hanya sembilan. Beberapa kali dalam ziarah saya melewati Negeri Biomorf, saya seperti sudah dekat dengan pendahulu serangga-serangga saya, tapi kemudian, walau sudah berupaya keras sebagai pelaku seleksi, evolusi beranjak pada hal yang terbukti merupakan jejak yang keliru. Akhirnya, selama kelana evolusi saya melalui Negeri Biomorf – dengan rasa jaya yang hampir sama kuatnya dengan kali pertama – saya berhasil memiting mereka lagi. Saya (sampai sekarang) tidak tahu apakah serangga-serangga ini sama persis dengan yang pertama, serangga-serangga ‘akor Zarathustra yang hilang’, atau apakah ‘konvergen’ (lihat bab berikutnya) secara dangkal saja, tapi cukup baguslah. Kali ini tidak ada lagi kesalahan: Saya tuliskan formula genetiknya, dan saya bisa ‘mengevolusikan’ serangga-serangga kapan pun yang saya mau.

Ya saya memang sedikit melebih-lebihkan dramanya, tapi ada poin serius yang ingin saya tekankan di sini. Maksud dari cerita itu adalah bahwa sekali pun saya yang memprogram komputer tersebut, memberi perintah dengan sangat terperinci, saya tetap tidak merencanakan hewan-hewan yang berevolusi, dan saya sendiri terkejut ketika pertama sekali melihat para pendahulunya. Begitu tak berdayanya saya dalam mengontrol laju evolusinya sehingga, sekali pun saya ingin sekali melacak kembali lajur evolusi tertentu, hal tersebut ternyata hampir mustahil dilakukan. Saya tidak yakin mampu menemukan serangga-serangga saya lagi kalau saja saya tidak mencetak gambar *himpunan lengkap* para pendahulu evolusinya, dan saya tetap kepayahan dan kerepotan saat mencarinya. Apakah ketakberdayaan si programmer dalam mengendalikan atau memperkirakan arah jalan evolusi di komputer ini tampak paradoks? Apakah ini berarti ada hal yang misterius, atau bahkan mistis, tengah terjadi di dalam komputer itu? Tentu tidak. Pun di dalam evolusi hewan dan tumbuhan nyata, tidak ada hal mistis yang terjadi. Kita dapat menggunakan model komputer untuk menyelesaikan paradoks ini, dan belajar hal baru tentang evolusi nyata dalam prosesnya.

Saya nyatakan di depan: dasar dari pemecahan paradoks ini adalah sebagai berikut. Himpunan biomorf yang ada sudah pasti, masing-masing secara permanen berada pada tempatnya sendiri di sebuah ruang matematis. Permanen pada tempatnya berarti, kalau saja Anda tahu formula genetiknya, Anda bisa langsung menemukannya; lagi pula, tetangga-tetangganya di ruang khusus ini adalah biomorf-biomorf yang berbeda satu gen saja darinya. Karena saya sudah tahu formula genetik serangga-serangga saya, saya dapat mereproduksi mereka sekehendak hati, dan saya bisa memerintahkan komputer untuk ‘mengevolusikan’ mereka dari titik awal arbitrer mana pun. Ketika pertama kali Anda mengevolusikan makhluk baru dengan seleksi buatan di dalam sebuah model komputer, rasanya seperti menjalani proses kreatif. Dan memang seperti itulah. Tapi yang sebetulnya Anda lakukan adalah *mencarinya* karena makhluk tersebut, secara matematis, sudah berada di tempatnya sendiri di ruang genetik Negeri Biomorf. Disebut proses kreatif sejati karena tugas mencari makhluk tertentu itu sangat sulit, semata-mata karena amat sangat luasnya Negeri Biomorf, dan jumlah total makhluk yang berada di sana hampir-hampir tak berhingga. Penelusuran tidak mungkin dilakukan kalau tanpa arah dan acak. Anda harus memanfaatkan prosedur penelusuran yang lebih efisien, alias kreatif.

Ada orang yang percaya bahwa komputer mencoba semua kemungkinan kombinasi langkah saat bertanding catur dengan mereka. Hal ini membuat pikiran mereka lebih tenteram setelah dipecundangi komputer dalam permainan catur. Tapi pikiran seperti itu salah kaprah. Ada terlalu banyak kemungkinan langkah catur: ruang penelusurannya miliaran kali terlampaui besar untuk bisa ‘tersandung’ langkah yang benar. Seni menulis program catur yang baik adalah dengan memikirkan jalan pintas yang efisien melalui ruang penelusuran itu. Seleksi kumulatif, baik

seleksi buatan dalam model komputer atau seleksi alam di dunia nyata, merupakan prosedur penelusuran yang efisien, dan konsekuensinya tampak mirip sekali dengan kecerdasan kreatif. Lagi pula, itulah inti Argumen dari Rancangan William Paley. Secara teknis, yang kita lakukan ketika bermain gim biomorf komputer hanyalah *mencari* hewan yang, dari sudut pandang matematis, menunggu ditemukan. Rasanya seperti proses kreasi artistik. Menelusuri ruang kecil, yang berisi beberapa entitas saja, biasanya tidak terasa seperti proses kreatif. Dolanan anak ‘alip bidal’ (*hunt the thimble*) tidak terasa kreatif. Membolak-balik secara acak sambil berharap tersandung benda yang dicari biasanya bisa berhasil kalau ruang yang perlu digeledah itu kecil saja. Seiring bertambah lebarnya ruang penelusuran, prosedur penelusuran yang makin canggih pun jadi perlu. Prosedur penelusuran yang efektif, bila ruang penelusurannya *cukup* luas, jadi tidak bisa dibedakan dari kreativitas sejati.

Model-model biomorf komputer menjelaskan poin-poin ini dengan baik, dan mereka merupakan jembatan penunjuk jalan antara proses-proses kreatif manusia, seperti merangkai strategi memenangi permainan catur, dan kreativitas evolusi seleksi alam, pembuat arloji yang buta. Untuk melihatnya, kita harus menyusun Negeri Biomorf sebagai ‘ruang’ matematis, sebuah tamasya varietas morfologis yang tak berujung tetapi teratur, dan yang setiap makhluk di dalamnya berada pada tempatnya, menunggu ditemukan. 17 makhluk di Gambar 5 disusun tanpa urutan khusus di atas halaman. Tetapi di Negeri Biomorf itu sendiri, masing-masing menduduki posisi uniknya sendiri, yang ditentukan dengan formula, dikelilingi para tetangganya sendiri. Semua makhluk di Negeri Biomorf memiliki hubungan spasial yang pasti satu sama lain. Apa artinya? Makna apa yang dapat dikaitkan dengan posisi spasial?

Ruang yang kita bahas adalah ruang genetik. Tiap hewan memiliki posisinya sendiri di dalam ruang genetik. Tetangga-tetangga dekat di ruang genetik ini adalah hewan-hewan yang berbeda satu mutasi saja satu sama lain. Pada Gambar 3, pohon dasar yang berada di tengah dikelilingi oleh 8 dari 18 tetangga dekatnya di ruang genetik. 18 tetangga untuk seekor hewan adalah 18 jenis anak yang berbeda yang dapat diturunkannya, dan 18 jenis induk yang berbeda yang menjadi titik asalnya, menurut aturan model komputer kita. Menjauh selangkah, tiap hewan memiliki 324 (18×18 , mengabaikan mutasi-balik supaya sederhana) tetangga, himpunan hewan yang mungkin merupakan cucu, kakek, bibi, atau keponakannya. Menjauh selangkah lagi, tiap hewan memiliki 5.832 ($18 \times 18 \times 18$) tetangga, himpunan hewan yang mungkin merupakan cicit, buyut, sepupu pertama, dll.

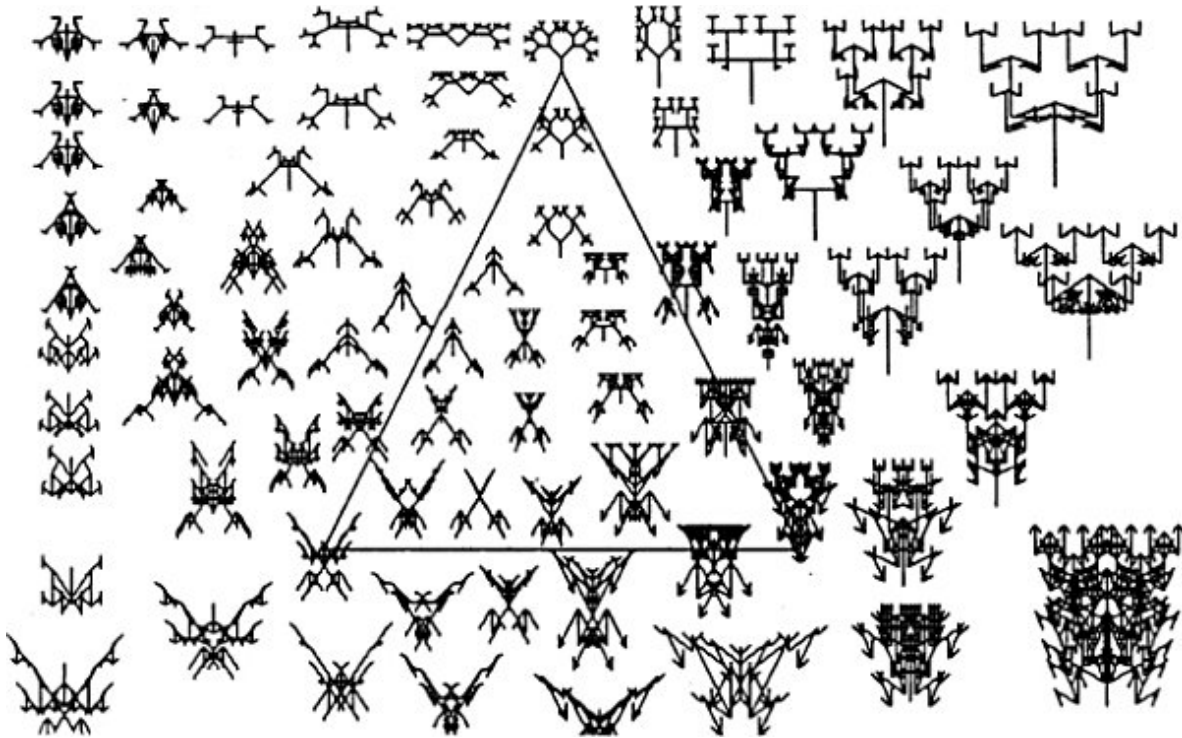
Apa tujuan dari kerangka pikir ruang genetik ini? Ke mana kita dibawanya? Jawabannya, supaya kita mendapat cara memahami evolusi sebagai sebuah proses yang kumulatif dan bertahap. Pada setiap generasi, menurut aturan-aturan model komputer ini, adalah mungkin untuk bergeser selangkah saja melalui ruang genetik. Dalam 29 generasi, tidak mungkin untuk bergeser lebih dari 29 langkah, di ruang genetik, menjauhi leluhur asalnya. Setiap riwayat evolusi terdiri dari satu lajur, atau lintasan, tertentu, melalui ruang genetik. Misalnya, riwayat evolusi yang dicatat di dalam Gambar 4 merupakan sebuah lintasan berkelok melalui ruang genetik, menghubungkan satu titik ke seekor serangga, dan melewati 28 tingkat perantara. Inilah yang saya maksud ketika menggunakan kiasan ‘berkelana’ melalui Negeri Biomorf.

Saya ingin mencoba merepresentasikan ruang genetik ini dalam rupa sebuah gambar. Masalahnya, gambar bersifat dua dimensi. Ruang genetik tempat para biomorf berada bukan ruang dua dimensi. Bukan pula ruang tiga dimensi. Tapi ruang sembilan dimensi! (Hal yang

paling patut diingat mengenai matematika adalah jangan takut. Tidak sesulit yang kadang pura-pura dilagakkan para rahib matematika itu. Setiap kali saya merasa agak gentar, saya selalu ingat diktum Silvanus Thompson dalam *Calculus Made Easy*: 'Yang bisa dilakukan seorang dungu bisa dilakukan si dungu yang lain'.) Kalau saja kita bisa menggambar dalam sembilan dimensi, kita bisa membuat tiap-tiap dimensi bertalian dengan salah satu dari sembilan gen tersebut. Posisi seekor hewan tertentu, misalnya kalajengking atau kelelawar atau serangga, sudah dibakukan di dalam ruang genetik oleh nilai numerik dari sembilan gennya. Perubahan evolusi itu terdiri dari laluan selangkah demi selangkah di sepanjang ruang sembilan dimensi. Jumlah perbedaan genetik di antara satu hewan dan lainnya, dan karenanya waktu yang dibutuhkan untuk berevolusi, dan kesulitan berevolusi dari satu ke yang lainnya, diukur sebagai *jarak* satu sama lain di dalam ruang sembilan dimensi.

Ah, tapi kita tidak bisa menggambar dalam sembilan dimensi. Saya mencari cara memanipulasinya, cara membuat gambar dua dimensi yang dapat melukiskan seperti apa rasanya bergeser dari satu titik ke titik lain di dalam ruang genetik sembilan dimensi Negeri Biomorf. Ada beragam cara untuk melakukannya, dan saya pilih satu yang saya sebut dengan istilah trik segitiga. Lihat Gambar 6. Di ketiga sudut segitiga ini terdapat tiga biomorf yang dipilih secara manusuka. Yang di sudut puncak itu pohon dasarnya, yang di sudut kiri salah satu serangga 'saya', dan yang di sudut kanan tidak bernama tapi saya rasa bentuknya cantik. Seperti semua biomorf, masing-masing dari ketiganya ini memiliki formula genetiknya sendiri, yang menentukan posisi uniknya di dalam ruang genetik sembilan dimensi.

Segitiga tersebut terletak di atas 'bidang' datar dua dimensi yang mengiris hipervolume sembilan dimensi ini (yang bisa dilakukan seorang dungu bisa dilakukan si dungu yang lain). Bidang ini seperti sekeping kaca yang ditusukkan ke dalam agar-agar. Di atas kaca, segitiganya digambar, dan juga beberapa dari biomorf yang, karena formula genetiknya, boleh berada di bidang datar tersebut. Lalu apa yang membolehkan mereka? Di sinilah tiga biomorf di setiap sudut segitiga tadi masuk. Mereka disebut biomorf jangkar.

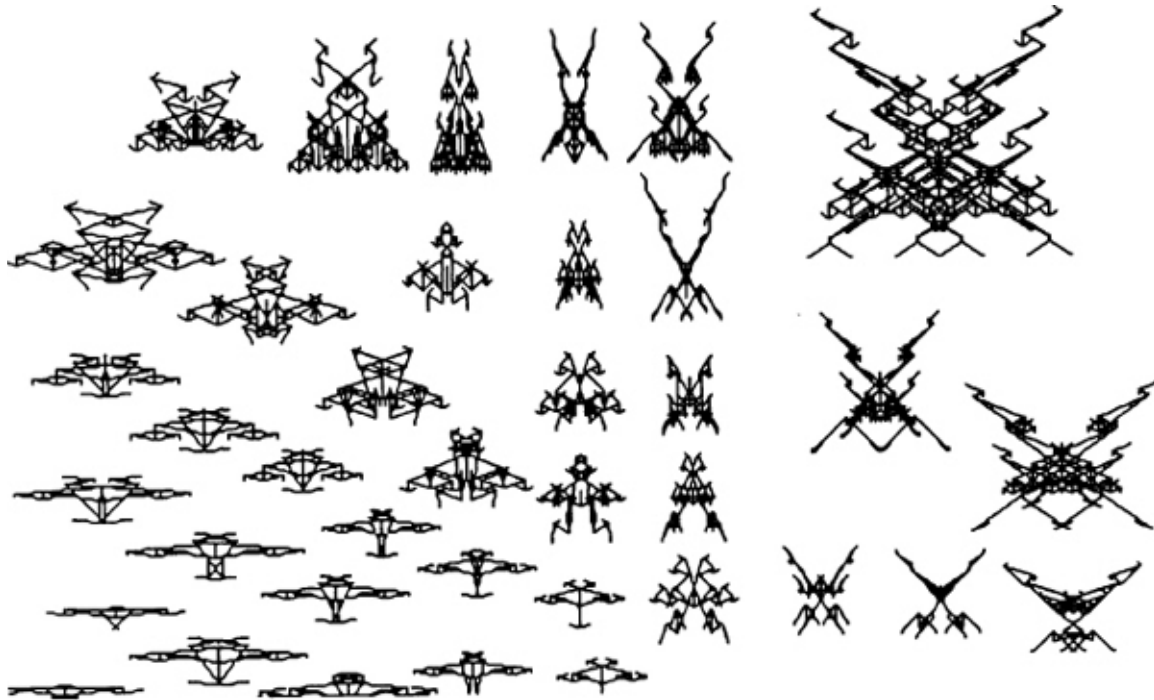


Gambar 6

Ingat bahwa pengertian ‘jarak’ dalam ‘ruang’ genetik adalah bahwa biomorf-biomorf yang mirip secara genetik merupakan tetangga dekat, sementara biomorf-biomorf yang berbeda secara genetik merupakan tetangga jauh. Pada bidang ini, jarak-jarak tersebut semuanya dihitung dengan mengacu pada tiga biomorf jangkar tadi. Di titik mana pun di atas lembar kaca itu, di dalam atau di luar segitiga, formula genetik yang sesuai untuk titik tersebut dihitung sebagai ‘rata-rata tertimbang’ dari formula genetik dari ketiga biomorf jangkar tadi. Anda pasti sudah menebak seperti apa penimbangannya dilakukan. Dilakukan menurut jarak-jaraknya di atas halaman, lebih tepatnya *kedekatan*, dari titik sorotan ke ketiga biomorf jangkar itu. Jadi, makin dekat dengan serangga di atas bidang itu, makin mirip seranggalah biomorf-biomorf di dekat-dekatnya. Saat bergeser di atas kaca mengarah ke pohon, ‘serangga-serangga’ itu makin tidak mirip serangga dan makin mirip pohon. Jika Anda bergerak ke pusat segitiga, hewan-hewan yang Anda jumpai di sana, misalnya laba-laba dengan pohon lilin tujuh cabang gaya Yahudi di atas kepalanya itu, merupakan ‘kompromi genetik’ di antara ketiga biomorf jangkar tadi.

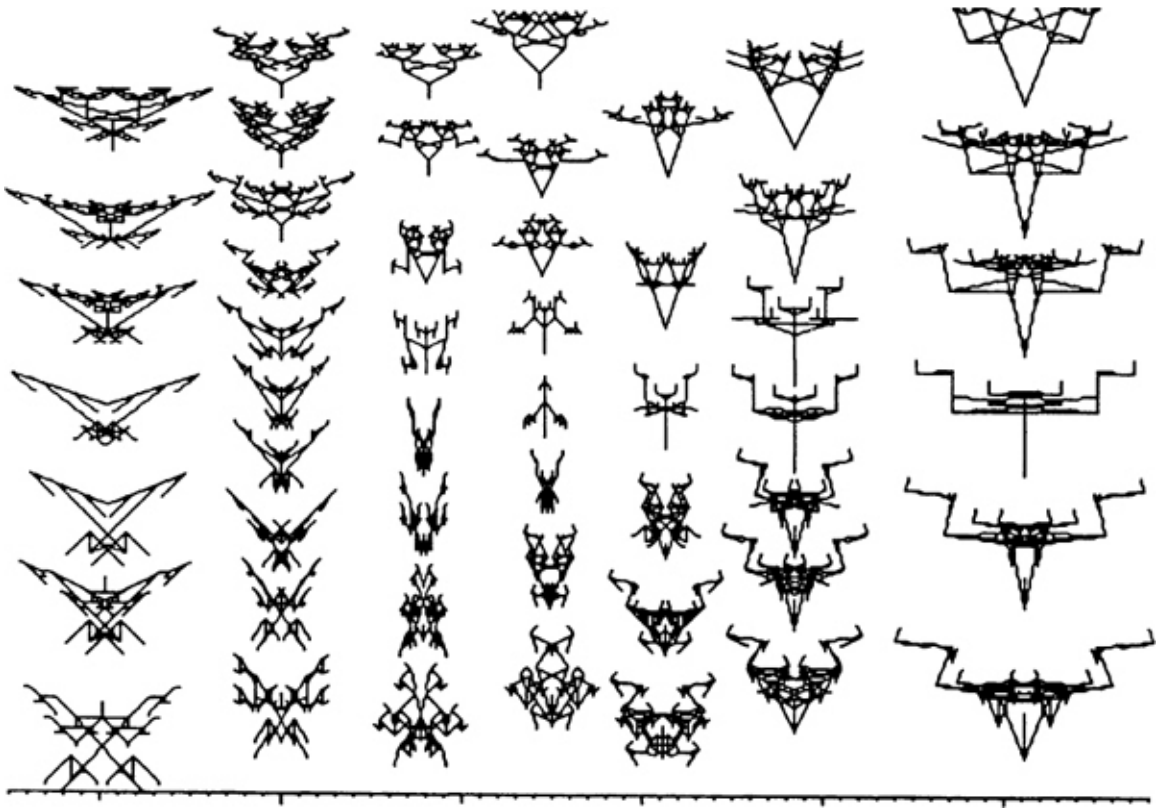
Tapi penjelasan ini terlalu menonjolkan ketiga biomorf jangkar tersebut. Memang, komputer menggunakan mereka untuk menghitung formula genetik yang sesuai untuk setiap titik pada gambar itu. Tapi tiga titik jangkar mana pun di atas bidang itu juga bisa melakukan trik ini dengan sama baiknya, dan hasil-hasilnya pun akan identik. Untuk itulah, pada Gambar 7 saya tidak menggambar segitiganya. Gambar 7 sejenis dengan Gambar 6. Bidang yang ditunjukkannya saja yang berbeda. Salah satu dari tiga titik jangkarnya, kali ini di sebelah kanan, adalah serangga yang sama. Dua titik jangkar yang lain, kali ini, adalah pesawat tempur *spitfire* dan bunga lebah, yang keduanya tampak pada Gambar 5. Di bidang ini Anda juga akan melihat bahwa biomorf-biomorf tetangga dekat lebih mirip satu sama lain ketimbang biomorf-biomorf tetangga jauh. *Spitfire*, misalnya, merupakan bagian dari skuadron pesawat yang serupa, yang terbang dalam formasi. Karena serangganya berada di kedua lembar kaca, bisa Anda bayangkan

kedua lembar kaca tersebut saling menembus dari suatu sudut. Mengacu pada Gambar 6, putaran bidang di Gambar 7 ‘bertumpu pada’ serangga.



Gambar 7

Karena mengganggu, hilangnya segitiga ini merupakan perbaikan bagi metode kita. Segitiga ini memberikan penekanan yang tidak semestinya pada tiga titik tertentu di dalam bidang tersebut. Masih ada satu perbaikan lagi. Dalam Gambar 6 dan 7, jarak spasial mewakili jarak genetik, tetapi *skalanya* semua terdistorsi. Satu inci ke atas tidak lantas sepadan dengan satu inci ke samping. Karena itu, kita harus memilih tiga biomorf jangkar kita dengan teliti, supaya jarak-jarak genetiknya satu sama lain semuanya sama. Gambar 8 menyajikan perbaikan ini. Lagi-lagi, segitiganya tidak digambar. Tiga jangkarnya adalah kalajengking dari Gambar 5, serangga lagi (kembali serangga menjadi ‘tumpuan’ putaran bidangnya), dan biomorf yang belum tercirikan di bagian atas. Ketiga biomorf ini semuanya berjarak 30 mutasi satu sama lain. Ini berarti sama mudahnya untuk berevolusi dari satu titik jangkar ke yang mana pun dari dua titik jangkar lainnya. Yang terpenting, paling tidak 30 langkah genetik harus diambil. Titik-titik kecil di sepanjang margin bawah Gambar 8 mewakili satuan-satuan jarak yang diukur dalam gen. Bayangkan itu sebagai penggaris genetik. Penggaris ini tidak berfungsi sebatas arah horizontal saja. Anda bisa mengubah-ubah arahnya, dan mengukur jarak genetik, sekaligus waktu evolusi minimal, di antara satu titik di atas bidang tersebut dan titik yang lain (sayangnya, tidak seperti itu di atas halaman, karena *printer* komputernya mendistorsi proporsinya, tapi efek ini terlalu sepele untuk dipersoalkan, walaupun jawaban yang Anda peroleh akan meleset sedikit kalau Anda hanya menghitung titik-titik pada penggaris tersebut).



Gambar 8

Bidang-bidang dua dimensi yang mengiris ruang genetik sembilan dimensi ini melukiskan seperti apa kira-kira rasanya berjalan menelusuri Negeri Biomorf. Guna meningkatkan kualitas rasa tersebut, Anda harus ingat bahwa evolusi tidak terbatas pada satu bidang datar. Dalam susur evolusi sejati, Anda bisa ‘singgah’, kapan saja, di bidang yang lain, misalnya dari bidang Gambar 6 ke bidang Gambar 7 (di wilayah serangga, tempat kedua bidang tersebut saling mendekat).

Tadi saya katakan bahwa ‘penggaris genetik’ Gambar 8 memungkinkan kita menghitung waktu minimum yang diperlukan untuk berevolusi dari satu titik ke titik lainnya. Memang begitu, mengingat batasan-batasan model aslinya, tetapi penekanannya ada pada kata *minimum*. Karena serangga dan kalajengking terpisah satu sama lain sejauh 30 satuan genetik, hanya butuh 30 generasi untuk berevolusi dari yang satu ke yang lainnya *kalau Anda tidak salah belok*; kalau Anda memang tahu persis formula genetik apa yang Anda tuju, dan cara mengatur arah menuju formula genetik tersebut. Mengatur arah menuju sasaran genetik yang jauh ini tidak terjadi di evolusi yang sesungguhnya.

Sekarang mari kita gunakan biomorf-biomorf ini untuk kembali ke pokok penting yang dikemukakan oleh monyet pengetik drama Hamlet: pentingnya perubahan bertahap, selangkah-demi-selangkah, dalam evolusi, bukan kebetulan semata. Mulai dengan melabeli kembali rangkaian titik di bagian bawah Gambar 8, tetapi dalam satuan yang lain. Alih-alih mengukur jarak sebagai ‘jumlah gen yang harus berubah dalam evolusi’, kita akan mengukur jarak sebagai ‘peluang kebetulan melompati jaraknya, akibat kemujuran semata, dalam sekali loncat’. Untuk itu, sekarang kita harus longgarkan salah satu batasan yang telah saya pasang ke dalam gim komputer tadi: dan nanti akan tampak terang alasan batasan tersebut saya terapkan. Batasannya

adalah setiap anak hanya ‘diizinkan’ untuk berjarak satu mutasi saja dari induknya. Dengan kata lain, hanya satu gen saja yang boleh bermutasi sekali waktu, dan gen tersebut boleh mengubah ‘nilainya’ hanya sebatas +1 atau -1. Dengan melonggarkan batasan ini, sekarang gen-gen, berapa pun jumlahnya, boleh bermutasi secara bersamaan, dan mereka boleh menambahkan jumlah berapa pun, positif atau negatif, ke nilai yang dimilikinya. Sebetulnya, kelonggaran batasan seperti ini agak *keterlaluan*, karena itu berarti nilai-nilai genetik yang muncul bisa jadi mulai dari minus tak berhingga ke plus tak berhingga. Cukuplah kalau kita batasi nilai-nilai gennya dengan bilangan tunggal saja, berkisar dari -9 hingga +9.

Jadi, dalam batas-batas yang lebar ini, secara teoretis kita mengizinkan mutasi, dengan sekali pukul, dalam satu generasi, mengubah kombinasi mana pun dari sembilan gen yang ada. Selain itu, nilai tiap gen dapat berubah ke jumlah berapa pun, asalkan tidak melebar ke bilangan ganda. Apa artinya ini? Artinya, secara teoretis evolusi bisa melompat, dalam satu generasi, dari satu titik mana pun di dalam Negeri Biomorf ke titik lainnya. Bukan hanya suatu titik di satu bidang, tetapi suatu titik di seluruh hipervolume sembilan dimensi itu. Kalau, misalnya, Anda ingin melompat dalam satu kelebatan dari serangga ke rubah pada Gambar 5, ini resepnya. Tambahkan angka-angka berikut ini ke nilai-nilai Gen 1 sampai 9, berturut-turut: -2,2,2,-2,2,0,-4,-1,1. Tapi karena urusan kita adalah lompatan-lompatan acak, *semua* titik di Negeri Biomorf sama-sama mungkin menjadi tujuan untuk salah satu lompatan ini. Jadi, peluang untuk melompat ke tujuan *tertentu* mana pun, taruhlah rubah, atas dasar kemujuran belaka, mudah dihitung. Peluangnya sama dengan jumlah total biomorf di dalam ruang tersebut. Seperti bisa Anda lihat, kita tengah memulai kalkulasi yang jumlahnya teramat sangat banyak. Ada sembilan gen, dan masing-masing bisa memiliki berapa pun dari 19 nilai. Jadi jumlah total biomorf yang *bisa* menjadi tujuan lompatan selangkah kita adalah 19 dikali dirinya sendiri sebanyak 9 kali: 19 pangkat 9. Hasilnya kira-kira setengah triliun biomorf. Kecil kalau dibandingkan dengan ‘bilangan hemoglobin’ Asimov, tapi tetap saja boleh dibilang jumlah yang besar. Kalau Anda mulai dari serangga, dan melompat seperti kutu loncat pikun setengah triliun kali, Anda boleh berharap mendarat di tempat rubah sekali.

Apa implikasi hal ini terhadap evolusi yang sesungguhnya? Lagi-lagi, penegasan atas pentingnya perubahan *bertahap*, selangkah-demi-selangkah. Ada orang-orang evolusionis yang menyangkal bahwa kebertahapan semacam ini perlu dalam evolusi. Kalkulasi biomorf kita menunjukkan *persisnya* satu alasan mengapa perubahan bertahap, selangkah-demi-selangkah, itu penting. Ketika saya katakan Anda bisa berharap evolusi melompat dari serangga ke salah satu tetangga dekatnya, tetapi *tidak* melompat dari serangga langsung ke rubah atau kalajengking, begini persisnya maksud saya. Kalau lompatan acak sungguhan itu sungguh terjadi, maka lompatan dari serangga ke kalajengking itu pastilah mungkin terjadi. Malah *sama* mungkinnya dengan lompatan dari serangga ke salah satu tetangga dekatnya. Tapi akan sama mungkinnya pula dengan satu lompatan dari biomorf lain mana pun di negeri tersebut. Dan di situ letak masalahnya. Karena jumlah biomorf di dalam negeri itu setengah triliun, dan jika tidak satu pun dari mereka lebih mungkin menjadi tujuan dibanding lainnya, peluang untuk bisa melompat ke satu tujuan *tertentu* itu terlalu kecil.

Perhatikan bahwa mengasumsikan ada ‘tekanan seleksi’ nonacak yang kuat pun tidak banyak membantu. Biar pun Anda diimingi janji upeti raja kalau beruntung bisa melompat ke kalajengking, silakan saja. Perbandingan kemungkinan bagi keberhasilan Anda masih setengah triliun banding satu. Tapi jika, alih-alih melompat, Anda *berjalan*, selangkah demi selangkah, dan diberikan hadiah sekeping uang logam setiap kali Anda melangkahkan kaki ke arah yang

benar, Anda akan sampai di tempat kalajengking dalam waktu yang sangat singkat. Tidak mesti sesingkat 30 generasi, tapi tetap saja sangat cepat. Secara *teoretis* melompat bisa berarti dapat hadiah utama lebih cepat – dalam satu loncatan. Tapi karena jumlah kemungkinan kegagalan itu begitu digdaya, serangkaian langkah kecil, yang masing-masing bertumpu pada keberhasilan langkah-langkah sebelumnya, menjadi satu-satunya cara.

Nada bicara paragraf saya sebelumnya bisa memicu kesalahpahaman, yang harus saya jernihkan. Lagi-lagi terdengar seperti evolusi itu punya sasaran jauh, menuju target-target seperti kalajengking. Seperti sudah kita saksikan, tidak begitu. Tapi kalau istilah sasaran ini kita definisikan sebagai *segala hal yang meningkatkan peluang bertahan hidup*, masih boleh. Kalau seekor hewan itu menjadi induk, ia pasti cukup pintar bertahan hidup setidaknya sampai dewasa. Adalah mungkin bahwa anak mutan dari induk tersebut lebih pintar dalam bertahan hidup. Tapi kalau si anak bermutasi besar-besaran, sehingga bergeser jauh sekali dari induknya di dalam ruang genetik, seperti apa peluang si anak menjadi lebih baik dari induknya? Jawabannya kecil sekali. Dan alasannya adalah hal yang baru saja kita saksikan dalam model biomorf kita. Kalau lompatan mutasi yang tengah kita timbang ini lompatan yang sangat besar, jumlah *kemungkinan* tujuan lompatan itu pun teramat sangat besar. Dan karena, seperti kita lihat di Bab 1, jumlah ragam cara untuk mati itu jauh lebih besar dari jumlah ragam cara untuk hidup, mungkin sekali lompatan acak yang besar di dalam ruang genetik berujung pada kematian. Bahkan satu lompatan kecil acak dalam ruang genetik itu saja cukup mungkin berakhir dengan ajal. Tapi makin kecil lompatannya, makin besar peluang untuk hidup, dan makin besar kemungkinan lompatan tersebut berbuah peningkatan. Tema ini akan kita tilik lagi di bab berikutnya.

Penggambaran standar berperilaku di Negeri Biomorf saya cukupkan sampai di sini. Saya harap penjelasan ini tidak terasa terlalu mengawang-awang. Masih ada ruang matematis lain yang berisi, bukan biomorf-biomorf bergen sembilan, tetapi hewan berdarah-daging yang terbuat dari miliaran sel, yang masing-masing mengandung puluhan ribu gen. Bukan ruang biomorf, tetapi ruang genetik sungguhan. Hewan-hewan nyata yang pernah hidup di muka Bumi itu hanya secuil dari hewan-hewan teoretis yang *bisa saja* ada. Hewan-hewan nyata ini adalah produk dari sejumlah sangat kecil lintasan evolusi melalui ruang genetik. Mayoritas besar lintasan-lintasan teoretis yang melalui ruang hewan menghasilkan monster-monster yang mustahil. Hewan-hewan yang nyata berkerumun di sekitaran monster-monster hipotetis ini, yang masing-masing bertengger di tempat uniknya sendiri di hiper-ruang genetik. Tiap hewan yang nyata dikelilingi oleh sekelompok kecil tetangga, yang sebagian besar tidak pernah ada, tapi yang sebagian kecil merupakan leluhurnya, keturunannya, dan sepupunya.

Manusia dan dubuk, ameba dan babi tanah, cacing pipih dan cumi-cumi, burung dodo dan dinosaurus, berdiam di suatu tempat di dalam ruang matematis akbar ini. Teorinya, kalau kita cukup terampil dalam rekayasa genetika, kita bisa bergerak dari titik mana pun di dalam ruang hewan ini ke titik lain mana pun. Dari titik awal mana pun kita bisa bergerak melalui labirin tersebut, sedemikian rupa, untuk menciptakan kembali burung dodo, tiranosaurus, dan trilobit. Kalau saja kita tahu gen-gen mana yang perlu digerumit, keping-keping kromosom mana yang perlu diduplikasi, diinversi, atau dihapus. Saya ragu apa kita bakal cukup pintar untuk melakukannya, tetapi makhluk-makhluk yang hayatnya sudah berakhir ini mengintai di sana selamanya di sudut-sudut sepi mereka dalam hipervolume genetik yang gadang, menunggu untuk *ditemukan* kalau kita cukup tahu cara mengatur arah yang tepat melalui labirin tersebut. Kita bahkan mungkin mampu *mengevolusikan* rekonstruksi persis burung dodo dengan membiakkan merpati secara selektif, walaupun butuh waktu sejuta tahun sampai eksperimen tersebut selesai.

Tapi saat kita masih terhadang untuk mewujudkan perjalanan tersebut, imajinasi bukanlah pengganti yang tak layak. Bagi orang-orang, seperti saya, yang bukan matematikawan, komputer bisa menjadi kawan imajinasi yang berdaya. Seperti matematika, ia tidak hanya melanjarkan imajinasi. Tetapi juga mendisiplinkan dan mengendalikannya.

BAB 4

Meletak Jejak di Ruang Satwa

Seperti kita lihat di Bab 2, banyak orang merasa kesulitan untuk meyakini bahwa sesuatu seperti mata, contoh favorit Paley, yang begitu kompleks dan terancang baik, dengan begitu banyak komponen yang saling berkaitan, dapat muncul dari awalan-awalan kecil lewat serangkaian perubahan bertahap, selangkah demi selangkah. Kita jenguk kembali persoalan ini, berbekal intuisi-intuisi baru yang telah diberikan biomorf-biomorf kepada kita. Jawab dua pertanyaan berikut:

1. Mungkinkah mata manusia muncul langsung dari tanpa mata sama sekali, dalam selangkah?
2. Mungkinkah mata manusia muncul langsung dari suatu hal yang sedikit berbeda darinya, yang bisa kita sebut dengan X?

Jawaban untuk Pertanyaan 1 jelas-jelas *tidak*. Kemungkinan negasi atas jawaban ‘ya’ untuk pertanyaan seperti Pertanyaan 1 bermiliar-miliar kali lebih besar dari jumlah atom di alam semesta. Dibutuhkan lompatan raksasa yang muskil nian di dalam hiper-ruang genetik untuk mencapai hal ini. Jawaban untuk Pertanyaan 2, sama jelasnya, *ya*, asalkan perbedaan antara mata modern dan X yang persis mendahuluinya itu cukup kecil. Dengan kata lain, asalkan keduanya cukup dekat satu sama lain di ruang segala struktur yang mungkin ada. Kalau jawaban untuk Pertanyaan 2 itu ternyata tidak, kita tinggal mengulang pertanyaan yang sama dengan derajat perbedaan yang lebih kecil. Teruskan sampai kita menemukan derajat perbedaan yang cukup kecil sehingga Pertanyaan 2 dapat dijawab dengan ‘ya’.

X *diartikan* sebagai sesuatu yang sangat mirip mata manusia, cukup mirip sehingga mata manusia mungkin dihasilkan dengan satu perubahan saja pada X. Kalau bayangan Anda atas X dirasa mustahil memunculkan mata manusia langsung daripadanya, itu hanya berarti Anda memilih X yang keliru. Buat bayangan X Anda itu makin mirip mata manusia, hingga Anda menemukan X yang *memang* Anda yakini mungkin untuk menjadi pendahulu langsung mata manusia. Pasti ada satu yang bisa Anda bayangkan, sekalipun bayangan itu mungkin lebih, atau kurang, awas dari bayangan saya!

Nah, setelah menemukan X yang membuat Pertanyaan 2 berjawab ya, kita berlakukan pertanyaan yang sama pada X itu sendiri. Dengan garis nalar yang sama, kita pasti menyimpulkan bahwa X kemungkinan muncul, langsung dalam sekali perubahan saja, dari sesuatu yang sedikit berbeda dengannya lagi, yang bisa kita sebut X’. Tentu, kita kemudian dapat melacak asal muasal X’ ke sesuatu hal lain yang sedikit berbeda darinya, X’’, dan seterusnya. Dengan mengetengahkan serangkaian X yang cukup panjang, kita bisa melihat bahwa mata manusia diturunkan dari sesuatu yang bukan sedikit, tetapi *jauh*, berbeda darinya. Kita bisa ‘berjalan’ jauh membelah ‘ruang hewan’, dan gerakan kita ini mungkin asalkan dilakukan dengan langkah-langkah yang cukup kecil. Beranjak kita ke pertanyaan ketiga.

3. Adakah rangkaian X yang sinambung, yang menghubungkan mata manusia modern dengan keadaan tanpa mata sama sekali?

Jelas di mata saya, jawabannya ya, asalkan rangkaian X-nya *cukup panjang*. Mungkin Anda merasa 1.000 X itu sudah banyak, tapi kalau Anda perlu melangkah lebih agar seluruh

peralihannya menjadi mungkin dalam bayangan Anda, tambah saja menjadi 10.000 X. Dan kalau 10.000 masih belum cukup, tambah lagi menjadi 100.000, dan seterusnya. Tentu saja kecukupan waktu menjadi langit-langit pembatas ruang permainan kita ini, karena hanya boleh ada satu X per generasi. Praktisnya, pertanyaan itu sendiri menjelma menjadi: Adakah cukup waktu hingga generasi-generasi tersebut bisa berkembang secara beruntun? Kita tidak bisa menjawab dengan pasti berapa jumlah generasi yang dibutuhkan. Tapi kita tahu bahwa waktu geologis itu lama sekali. Untuk membayangkan besaran waktu yang sedang kita bicarakan ini: jumlah generasi yang memisahkan kita dari para leluhur pertama kita sudah pasti sampai ribuan juta. Dengan, katakanlah, seratus juta X, kita semestinya bisa merakit serangkaian gradasi mungil yang menghubungkan mata manusia ke apa pun itu!

Sampai di sini, dengan proses penalaran yang kurang-lebih abstrak, kita telah menyimpulkan bahwa ada serangkaian X terbayang, yang masing-masing cukup mirip dengan para tetangganya sehingga mungkin bisa berubah menjadi salah satu tetangganya itu, seutas rangkaian panjang yang menghubungkan mata manusia ke keadaan tanpa mata sama sekali. Tapi belum kita peragakan bahwa rangkaian X ini benar-benar ada. Ada dua pertanyaan lagi yang perlu kita jawab.

4. Menimbang tiap anggota rangkaian X hipotetis yang menghubungkan mata manusia ke keadaan tanpa mata sama sekali, apakah mungkin bahwa tiap-tiap anggota rangkaian tersebut ada karena mutasi acak pendahulunya?

Ini sebetulnya perkara embriologi, bukan genetika; dan sama sekali terpisah dari pertanyaan yang menjadi perhatian Uskup Birmingham dan lainnya. Mutasi harus terjadi melalui modifikasi proses-proses perkembangan embrionik yang sudah ada. Boleh dikemukakan bahwa ada jenis-jenis proses embrionik tertentu yang sangat patuh pada variasi ke arah-arrah tertentu, dan resistan terhadap variasi ke arah-arrah lainnya. Saya akan kembali ke perkara ini di Bab 11, jadi di sini saya hanya akan menekankan kembali perbedaan antara perubahan kecil dan besar. Makin kecil perubahan yang Anda kemukakan, makin kecil perbedaan antara X'' dan X', secara embriologis makin mungkin terjadi mutasi. Di bab sebelumnya kita telah melihat bahwa, secara statistik saja, mutasi besar *tertentu* mana pun pada dasarnya lebih muskil dari mutasi kecil mana pun. Maka dari itu, apa pun masalah yang diangkat Pertanyaan 4, setidaknya dapat kita lihat bahwa makin kecil perbedaan antara X' dan X'', makin kecil pula masalahnya. Rasanya, asalkan perbedaan di antara entitas-entitas tetangga di sepanjang rangkaian menuju mata kita ini *cukup kecil*, mutasi-mutasi yang perlu terjadi hampir pasti akan muncul. Lagi pula, dari tadi yang kita bahas ini memang soal perubahan-perubahan kuantitatif minor dalam sebuah proses embrionik yang sudah ada. Ingatlah bahwa, serumit apa pun status quo embriologis yang terdapat pada suatu generasi, tiap-tiap *perubahan* mutasi di dalam status quo tersebut bisa jadi sangat kecil dan sederhana.

Masih ada satu pertanyaan terakhir yang perlu kita jawab:

5. Menimbang tiap anggota rangkaian X yang menghubungkan mata manusia ke keadaan tanpa mata sama sekali, apakah mungkin bahwa tiap-tiap anggota rangkaian itu cukup baik kerjanya sehingga mampu membantu ketahanan hidup dan reproduksi hewan tersebut?

Agak aneh memang, sebagian orang berpikir bahwa jawaban atas pertanyaan ini sudah pasti 'tidak'. Misalnya, saya kutip dari buku Francis Hitching yang berjudul *The Neck of the Giraffe or Where Darwin Went Wrong* (terbit tahun 1982). Bisa saja sebetulnya saya mengutip kata-kata

yang pada dasarnya sama dari hampir setiap traktat Saksi-Saksi Yehuwa, tapi saya pilih buku ini karena penerbit dengan reputasi bagus (Pan Books Ltd) menganggap buku tersebut layak terbit, terlepas dari jamaknya kesalahan yang seharusnya dapat cepat ditemukan kalau saja seorang lulusan biologi yang masih menganggur, atau malah yang masih kuliah S1, diminta untuk membaca cepat naskah tersebut. (Favorit saya, kalau boleh saya tuliskan dua guyonan ‘orang dalam’, adalah penganugerahan gelar kesatria untuk Profesor John Maynard Smith, dan penggambaran Profesor Ernst Mayr, pengkritik besar genetika matematis yang paling tidak matematis tapi pintar bicara itu, sebagai ‘begawan besar’ genetika matematis.)

Agar mata bisa berfungsi, langkah-langkah teratur rapi berikut ini perlu terjadi (ada banyak hal lain yang terjadi secara serempak, tapi deskripsi yang disederhanakan secara kasar ini saja sudah cukup untuk menuding masalah pada teori Darwinian). Mata harus bersih dan lembap, keadaan yang dijaga oleh interaksi kelenjar air mata dan kelopak yang bisa digerakkan, yang bulu matanya juga bertindak sebagai penyaring kasar sinar matahari. Cahaya kemudian melewati bagian transparan kecil dari selimut pelindung luar (*kornea*), terus lanjut melalui *lensa* yang memfokuskannya di belakang *retina*. Di sini 130 juta sel batang dan kerucut yang peka cahaya menimbulkan reaksi-reaksi fotokimiawi yang mengubah cahaya menjadi denyut-denyut listrik. Sekitar 1.000 juta denyut ini diteruskan setiap detiknya, dengan cara yang belum cukup dimengerti, ke otak yang kemudian menindak-lanjutinya.

Nah cukup terbukti di sini bahwa kalau sedikit saja ada kesalahan *di sepanjang* proses ini – kalau kornea kabur, atau pupil gagal membesar, atau lensa menjadi buram, atau pemfokusannya keliru – maka citra yang dapat dikenali itu tidak terbentuk. Bagi mata, pilihannya dua: berfungsi total atau tidak sama sekali. Lalu bagaimana mata berevolusi melalui langkah-langkah perbaikan Darwinian yang teramat sangat kecil, liat, dan perlahan itu? Apakah betul-betul mungkin bahwa beribu-ribu mutasi yang bertumpu pada kemujuran belaka ini terjadi secara kebetulan sehingga lensa dan retina, yang tak bisa bekerja kalau tidak bersama, secara serentak berevolusi? Apa nilai ketahanan hidup bagi mata yang tidak dapat melihat?

Argumen luar biasa ini sangat sering diajukan, dugaan saya, karena orang *ingin* percaya pada kesimpulannya. Coba timbang pernyataan bahwa ‘kalau sedikit saja ada kesalahan ... kalau pemfokusannya keliru ... citra yang dapat dikenali itu tidak terbentuk’. Kemungkinan bahwa Anda membaca kata-kata ini dengan kacamata tidak jauh dari 50/50. Coba lepas kacamata Anda, dan lihat ke sekeliling. Anda masih berpikir bahwa ‘citra yang dapat dikenali tidak terbentuk’? Kalau Anda laki-laki, kemungkinannya 1:12 bahwa Anda buta warna. Mungkin juga Anda mengalami kelainan mata (astigmatisme). Tanpa kacamata, bukan tidak mungkin pandangan Anda jadi kabur. Salah seorang teoretikus evolusi paling terhormat di zaman ini (walau belum bergelar kesatria) begitu jarang membersihkan kacamatanya sehingga penglihatannya pun mungkin tetap saja kabur, tetapi ia tampaknya santai saja dan, menurut pengakuannya sendiri, dia dulu terampil bermain tenis dinding dengan hanya satu mata. Kalau kacamata Anda hilang, mungkin kawan-kawan Anda akan kesal karena Anda tidak mengenali mereka saat berpapasan di jalan. Tapi Anda sendiri akan lebih kesal lagi kalau sampai ada yang bilang: ‘Karena penglihatanmu sekarang tidak sempurna, lebih baik kamu sekalian tutup mata saja sampai nanti kamu menemukan kacamatamu lagi.’ Tapi itulah esensi yang diajukan penulis yang paragrafnya saya kutip tadi.

Ia juga menyatakan, seolah sudah jelas, bahwa lensa dan retina tidak dapat berfungsi kalau tidak bersama. Kata siapa? Salah satu orang dekat saya pernah menjalani operasi katarak pada kedua matanya. Lensa kedua matanya sudah diangkat. Tanpa kacamata dia tidak bisa bermain tenis atau membidik sasaran dengan senapan. Tapi tetap dia yakin bahwa lebih baik punya mata tanpa lensa daripada tak punya mata sama sekali. Dengan mata tanpa lensa, Anda masih bisa tercegah dari menabrak dinding atau menubruk orang lain. Kalau Anda makhluk di alam liar, barang tentu Anda bisa menggunakan mata tak berlensa Anda untuk mendeteksi bentuk menjulang dan arah datangnya pemangsa. Di dunia purba, tempat sebagian makhluk tak bermata

dan sebagian lagi bermata tak berlensa, yang bermata tak berlensa pasti lebih diuntungkan. Dan ada serangkaian X yang sinambung, yang masing-masing perbaikan kecil dalam hal ketajaman citra di dalamnya, dari kabur buram ke penglihatan manusia yang sempurna, kemungkinan meningkatkan peluang organisme tersebut untuk bertahan hidup.

Buku tersebut kemudian mengutip Stephen Jay Gould, paleontolog kenamaan dari Harvard, dengan berkata:

Kita menghindari pertanyaan besarnya, Apa bagusnya 5 persen dari sebilangan mata? dengan menyetengahkan bahwa pemilik pranata yang baru jadi tersebut tidak menggunakannya untuk melihat.

Hewan purba dengan 5 persen mata memang bisa saja menggunakannya untuk hal selain penglihatan, tapi bagi saya setidaknya tampak sama mungkinnya bahwa ia menggunakannya untuk 5 persen penglihatan. Dan sebetulnya saya rasa itu bukan pertanyaan besar. Penglihatan yang kualitasnya 5 persen dari milik Anda atau saya tentu saja jauh lebih baik dibandingkan tanpa penglihatan sama sekali. Begitu juga, 1 persen penglihatan masih lebih baik dari buta total. Dan 6 persen masih lebih baik dari 5, 7 persen lebih baik dari 6, dan seterusnya sepanjang rangkaian sinambung yang bertahap tersebut.

Masalah semacam ini menjadi perhatian sebagian pemerhati hewan yang melindungi diri dari pemangsa dengan ‘mimikri’. Serangga ranting tampak mirip ranting dan karenanya selamat dari terkaman burung. Serangga daun tampak mirip daun. Banyak spesies kupu-kupu yang bisa dimakan melindungi diri dengan meniru rupa spesies-spesies berbahaya atau beracun. Kemiripan-kemiripan ini jauh lebih mengesankan dari kemiripan awan dengan musang. Dilihat dari berbagai segi, kemiripan tersebut pun lebih mengesankan dari kemiripan serangga-serangga ‘saya’ dengan serangga sungguhan. Lagi pula, serangga sungguhan punya enam kaki, bukan delapan! Seleksi alam yang asli punya generasi yang jumlahnya paling tidak sejuta kali lebih banyak dari yang saya punya, untuk menyempurnakan kemiripannya.

Kita memakai kata ‘mimikri’ untuk perkara ini, bukan karena kita pikir hewan-hewan tersebut dengan sadar meniru benda-benda lain, tetapi karena seleksi alam telah memilih individu-individu yang tubuhnya disangka benda lain. Dengan kata lain, para leluhur serangga ranting yang tidak mirip ranting tidak berketurunan. Richard Goldschmidt, ahli genetika Jerman-Amerika, adalah ilmuwan tersohor yang berargumen bahwa evolusi *awal* dari kemiripan-kemiripan semacam itu tidak mungkin dipilih oleh seleksi alam. Seperti diutarakan Gould, seorang pengagum Goldschmidt, tentang serangga peniru kotoran: ‘apa unggulnya kalau tampak mirip 5 persen seperti tahu?’ Terutama karena pengaruh Gould, saat ini sudah menjadi tren untuk mengatakan bahwa Goldschmidt diremehkan di masa hidupnya, dan bahwa kita sebetulnya bisa belajar banyak darinya. Berikut ini contoh dari penalarannya.

Ford mengemukakan ... tentang setiap mutasi yang kebetulan memberikan ‘kemiripan tipis’ pada spesies yang lebih terlindungi, yang menambah kelebihan, sekecil apa pun, bagi spesies tersebut. Kita harus bertanya seberapa tipis kemiripan itu mestinya agar dapat bernilai selektif. Dapatkah kita berasumsi bahwa burung dan monyet dan juga belalang sembah (atau yang paling cerdik di antara mereka) merupakan pengamat menakutkan sehingga mampu melihat kemiripan ‘tipis’ tersebut dan dikecoh olehnya? Saya rasa ini asumsi yang berlebihan.

Sarkasme semacam ini justru menjadi senjata makan tuan bagi siapa saja yang berada di tanah gamang yang ditapaki Goldschmidt di sini. Pengamat *menakutkan*? Yang paling *cerdik* di antara mereka? Siapa pun akan berpikir bahwa burung dan monyet *mendapat untung* karena terkecoh oleh kemiripan yang tipis itu! Goldschmidt mestinya bilang: ‘Dapatkah kita berasumsi bahwa burung, dll. (atau yang paling bodoh di antara mereka) merupakan pengamat yang *buruk*?’ Begitupun, ada dilema yang nyata di sini. Kadar kemiripan serangga ranting purba

dengan ranting pastilah tipis sekali. Seekor burung pastilah memiliki pengamatan yang amat sangat *buruk* kalau sampai terkecoh olehnya. Tetapi kemiripan serangga ranting modern dengan ranting luar biasa bagus, sampai ke detail-detail kecil seperti kelopak dan tulang daun palsu. Burung-burung yang pemangsa selektifnya telah memberikan sentuhan akhir pada evolusi serangga ranting ini pastilah, setidaknya secara umum, memiliki pengamatan yang amat sangat *baik*. Mereka pastilah sulit sekali dikecoh karena, kalau tidak, serangga-serangga itu tidak akan berevolusi menjadi peniru sempurna sebagaimana adanya sekarang: mereka akan tetap menjadi peniru yang relatif tidak sempurna. Bagaimana kita dapat mengurai kontradiksi yang tampak jelas ini?

Salah satu upaya menjawabnya: pengamatan burung berkembang di rentang waktu evolusi yang sama dengan kamuflase serangga. Mungkin, sedikit berkelakar, serangga purba yang tampak seperti 5 persen tahi bisa mengecoh burung purba yang penglihatannya cuma 5 persen. Tapi bukan jawaban seperti itu yang ingin saya ajukan. Saya duga, memang, bahwa seluruh proses evolusinya, dari kemiripan tipis hingga mimikri nyaris sempurna, telah terjadi, dengan agak cepat, berkali-kali pada berbagai kelompok serangga, selama kurun waktu panjang ketika penglihatan burung sudah sebaik sekarang.

Jenis jawaban lain yang telah diajukan untuk dilema ini adalah sebagai berikut. Mungkin tiap-tiap spesies burung atau monyet memiliki penglihatan yang buruk dan terpaku pada satu aspek terbatas saja dari seekor serangga. Mungkin satu spesies pemangsa melihat hanya warnanya, yang lain hanya bentuknya, yang lain hanya teksturnya, dan seterusnya. Maka, seekor serangga yang mirip sebatang ranting dalam satu aspek terbatas saja akan mengecoh salah satu jenis pemangsa, walaupun tetap dimakan oleh jenis-jenis pemangsa lainnya. Seiring berjalannya evolusi, makin banyak fitur kemiripan yang ditambahkan ke dalam khazanah serangga-serangga itu. Mimikri pamungkas yang sempurna dari aneka segi ini dihasilkan oleh kumpulan seleksi alam yang diberikan berbagai macam spesies pemangsa. Tidak satu pun pemangsa melihat bentuk sempurna dari mimikri tersebut, hanya kita yang melihatnya.

Tampak seperti menyiratkan bahwa hanya kitalah yang cukup ‘cerdik’ untuk melihat mimikri tersebut dalam bentuknya yang paripurna. Bukan hanya karena kesombongan manusia, tapi ada penjelasan lain, yang lebih saya suka. Tidak peduli seberapa baik penglihatan seekor pemangsa dalam kondisi tertentu, dalam kondisi lain penglihatan itu bisa jadi buruk sekali. Dengan mudah kita bisa mafhum akan hal ini dari pengalaman kita sendiri dengan penglihatan yang kelewat buruk hingga penglihatan yang sempurna. Kalau saya melihat seekor serangga ranting, 8 inci dari ujung hidung saya di siang bolong, saya pasti tidak akan terkecoh olehnya. Saya akan melihat kaki-kaki panjangnya memeluk tangkai pohon. Saya mungkin bisa memergoki simetri tak alami yang tidak ada pada ranting sungguhan. Tapi kalau saya, dengan mata kepala yang sama, berjalan di dalam hutan di hari senja, saya mungkin takkan mampu membedakan hampir seluruh serangga berwarna buram dari ranting dan carang yang mencuat dan berseliweran di mana-mana. Citra serangga mungkin melewati tepi retina saya, bukan di wilayah tengah yang lebih peka. Serangga itu mungkin 50 yard jauhnya, sehingga hanya menjadi seintik citra di retina saya. Cahayanya mungkin sangat remang sehingga saya hampir tidak melihat apa pun.

Malah, tidak peduli *seberapa* tipis, seberapa buruk kadar kemiripan seekor serangga dengan setangkai ranting, pastilah ada *sekadar* aram temaram, atau seukur jarak dari mata, atau semacam usikan dari perhatian pemangsa, sehingga mata yang sangat baik sekali pun akan terkecoh oleh kemiripan yang tipis itu. Kalau Anda merasa itu tidak mungkin untuk contoh yang Anda bayangkan, temaramkan sedikit cahayanya, atau menjauh sedikit dari objek imajinernya!

Poinnya adalah ada banyak serangga yang terselamatkan oleh kemiripan yang kelewat tipis dengan setangkai ranting atau sehelai daun atau sebongkah tahi, ketika serangga itu jauh dari pemangsa, atau ketika pemangsa melihatnya di hari senja, atau ketika pandangan pemangsa terhalang kabut, atau ketika pemangsa itu terusik perhatiannya oleh betina yang sedang berahi. Dan ada banyak serangga yang terselamatkan, mungkin dari terkaman pemangsa yang sama, karena kemiripannya yang bukan main dengan setangkai batang, ketika pemangsa tersebut kebetulan melihatnya dari jarak yang relatif dekat dan dalam keadaan yang relatif terang. Yang penting tentang intensitas cahaya, jarak serangga dari pemangsa, jarak citra dari pusat retina, dan variabel-variabel serupa lainnya, adalah bahwa semuanya itu merupakan variabel yang *sinambung*. Mereka semua berbeda-beda dengan derajat yang nirakal, dari ujung ekstrem ketakterlihatan hingga ujung ekstrem keterlihatan. Variabel-variabel sinambung semacam itu mendorong terjadinya evolusi yang sinambung dan bertahap pula.

Masalah yang dikemukakan Richard Goldschmidt – salah satu dari sekian masalah yang membuatnya, hampir di sepanjang karier profesionalnya, mendekap keyakinan ekstrem bahwa evolusi berlangsung dengan lompatan-lompatan besar dan bukan langkah-langkah kecil – ternyata bukan masalah sama sekali. Dan kebetulan juga, kita sudah peragakan sendiri bahwa, lagi-lagi, 5 persen penglihatan lebih baik dari nol persen. Mutu penglihatan saya tepat di tepi retina mungkin bahkan lebih buruk dari 5 persen mutu penglihatan di pusat retina saya, seperti apa pun Anda hendak mengukur mutunya. Tapi saya masih bisa mengesan adanya truk atau bus besar dari ujung jauh mata saya. Karena saya bersepeda setiap hari ke tempat kerja, fakta ini boleh jadi telah menyelamatkan nyawa saya. Saya perhatikan bedanya ketika hari sedang hujan dan saya memakai topi. Mutu penglihatan kita di malam hari pastilah jauh lebih buruk dari 5 persen mutunya di siang hari. Tapi banyak makhluk purba yang mungkin terselamatkan karena melihat hal yang memang penting, ‘macan’ bergigi sabel mungkin, atau karang curam, di tengah malam.

Dari pengalaman pribadi kita semua tahu, contohnya di malam-malam gelap, bahwa ada rangkaian sinambung dengan tahap-tahap yang luar biasa kecil dari buta total hingga penglihatan sempurna, dan bahwa setiap langkah di sepanjang rangkaian itu menyumbang manfaat yang berarti. Dengan melihat dunia melalui teropong dwikanta yang dapat diatur kefokusannya, kita bisa lekas yakin bahwa ada rangkaian kualitas pemfokusan yang bertahap, dan setiap tahap di sepanjang rangkaian tersebut bermutu lebih baik dari tahap sebelumnya. Dengan memutar kenop penyeimbang warna di perangkat televisi berwarna, kita bisa yakin bahwa ada rangkaian peningkatan progresif yang bertahap dari hitam putih ke tampilan berwarna. Diafragma iris yang membuka dan menutup pupil mencegah silaunya cahaya terang, sekaligus memungkinkan kita melihat di cahaya remang. Kita semua mengalami seperti apa rasanya tidak memiliki diafragma iris ketika untuk sekejap mata kita tersilaukan oleh lampu depan mobil yang melaju ke arah kita. Walau kesilauan ini terasa tak menyenangkan, atau bahkan berbahaya, tidak berarti mata kita berhenti berfungsi! Klaim bahwa ‘Bagi mata, pilihannya dua: berfungsi total atau tidak sama sekali’ ternyata bukan hanya keliru, tapi terbukti jelas salah bagi orang yang mengingat 2 detik saja pengalamannya sendiri.

Kembali kita ke Pertanyaan 5. Menimbang tiap anggota rangkaian X yang menghubungkan mata manusia ke keadaan tanpa mata sama sekali, apakah mungkin bahwa tiap-tiap anggota rangkaian itu cukup baik kerjanya sehingga mampu membantu ketahanan hidup dan reproduksi hewan tersebut? Telah kita lihat kekonyolan asumsi kaum antievoluti bahwa jawabannya sudah pasti tidak. Tapi apakah jawabannya ya? Tidak seterang-jelas itu, tapi saya rasa memang ya.

Bukan hanya sudah jelas bahwa sebagian dari sebilangan mata itu lebih baik dari tanpa mata sama sekali. Kita juga bisa menemukan kemungkinan rangkaian perantaranya pada hewan-hewan modern. Tentu saja, ini tidak berarti bahwa para perantara modern benar-benar mewakili jenis-jenis purba. Tapi ini menunjukkan bahwa rancangan-rancangan perantara itu mampu berfungsi.

Sebagian hewan bersel tunggal memiliki bintik peka cahaya dengan layar pigmen kecil di baliknya. Layar ini menamenginya dari cahaya yang datang dari satu arah, yang ‘memberitahunya’ arah datangnya cahaya. Di antara hewan-hewan bersel jamak, berbagai jenis cacing dan sebagian kerang memiliki susunan yang sama, tetapi sel-sel peka cahaya bertameng pigmen mereka terkumpul di dalam sebuah cawan kecil. Hal ini membuat mereka sedikit lebih mampu dalam hal mencari arah, karena setiap selnya secara selektif ditamengi oleh sinar cahaya yang masuk ke dalam cawan tersebut dari sisinya sendiri. Dalam rangkaian sinambung dari lembar datar sel-sel peka cahaya melalui cawan dangkal hingga cawan dalam, tiap langkah di sepanjang rangkaian itu, seberapa kecil (atau besar) pun langkah tersebut, adalah sebuah peningkatan optik. Nah, jika Anda membuat cawan tersebut sangat dalam dan melipat sisi-sisinya, Anda membuat kamera lubang jarum tanpa lensa. Ada rangkaian sinambung yang bertahap dari cawan dangkal hingga kamera lubang jarum (untuk ilustrasi, lihat tujuh generasi pertama dari rangkaian evolusi pada Gambar 4).

Kamera lubang jarum membentuk citra yang tetap, makin kecil lubang jarumnya makin tajam (tapi juga makin redup) citranya, makin besar lubang jarumnya makin terang (tapi juga makin kabur) citranya. Moluska perenang *Nautilus*, makhluk agak aneh mirip cumi-cumi yang hidup di dalam cangkang seperti ammonit yang sudah punah itu (lihat ‘sefalopoda bercangkang’ dari Gambar 5), memiliki sepasang kamera lubang jarum sebagai matanya. Mata *Nautilus* pada dasarnya sama dengan bentuk mata kita, tetapi tidak ada lensa dan pupilnya hanya sebuah lubang yang bisa dimasuki air laut hingga ke bagian dalam rongga mata. Sebetulnya, *Nautilus* ini merupakan teka-teki tersendiri. Mengapa, dalam ratusan juta tahun sejak para leluhurnya pertama sekali berevolusi hingga memiliki mata lubang jarum, *Nautilus* tak kunjung menemukan prinsip lensa? Keuntungan memiliki lensa adalah citra yang tampak menjadi tajam *dan* terang. Yang mengkhawatirkan tentang *Nautilus* ini adalah bahwa, dilihat dari kualitasnya, retina makhluk ini akan jauh makin bermutu jika dilengkapi lensa. Ibarat sistem hi-fi dengan amplifier kelas wahid yang diasupi bunyi dari gramofon berjarum tumpul. Sistemnya sudah meronta minta diubah sedikit lagi. Di dalam hiper-ruang genetik, *Nautilus* tampak duduk persis di samping peningkatan yang jelas dan dekat, tapi langkah kecil tersebut tidak diambilnya. Mengapa? Michael Land dari Universitas Sussex, otoritas terkemuka kita untuk soal mata hewan invertebrata, prihatin dengan hal ini, begitu juga saya. Apakah karena mutasi yang diperlukan tersebut tidak dapat muncul mengingat cara berkembangnya embrio *Nautilus*? Saya tidak ingin mempercayainya, tapi juga tak punya penjelasan yang lebih baik. Setidaknya *Nautilus* makin menguatkan perkara bahwa mata tanpa lensa masih lebih baik dari tanpa mata sama sekali.

Kalau mata sudah bercawan, hampir setiap materi yang samar-samar cembung, samar-samar bening atau bahkan tembus cahaya di bukaannya bisa dianggap sebagai peningkatan, karena cirinya yang agak mirip lensa. Cahaya dikumpulkan di atas areanya, kemudian dipusatkan pada area retina yang lebih kecil. Begitu purwalensa yang masih mentah itu sudah ada, terdapat serangkaian peningkatan bertahap, yang menebalkannya dan membuatnya lebih bening dan lebih tidak terdistorsi, kecenderungan yang memuncak pada hal yang kita semua kenali sebagai lensa yang sejati. Kerabat *Nautilus*, cumi-cumi dan gurita, punya lensa sejati, mirip sekali dengan lensa kita, walaupun para leluhur mereka tentu mengembangkan prinsip mata-kamera ini secara

mandiri, sepenuhnya terlepas dari kita. Kebetulan, Michael Land beranggapan bahwa ada sembilan prinsip dasar pembentukan citra yang dipakai mata, dan sebagian besar dari semua prinsip ini berevolusi berkali-kali secara mandiri. Misalnya, prinsip pemantul-pinggian berlekuk secara radikal berbeda dari mata-kamera yang kita miliki (kita menggunakannya untuk teleskop radio, dan juga untuk teleskop-teleskop optik terbesar kita karena lebih mudah membuat cermin besar ketimbang lensa besar), dan prinsip ini ‘ditemukan’ secara mandiri oleh beragam moluska dan krustasea. Krustasea lain memiliki mata majemuk seperti serangga (betul-betul seperti sehampar mata-mata mungil), sementara moluska yang lain, seperti kita lihat tadi, memiliki mata-kamera berlensa seperti kita, atau mata-kamera lubang jarum. Untuk tiap-tiap jenis mata ini, tingkat-tingkat yang berkaitan dengan perantara-perantara evolusinya ada sebagai mata yang berfungsi bagi hewan-hewan modern lainnya.

Propaganda antievolusi sarat akan contoh-contoh sistem kompleks yang, konon, ‘mustahil’ terbentuk melalui serangkaian perantara bertahap. Biasanya ini hanya contoh lain ‘Bantahan dari Kesangsian Pribadi’ menyedihkan yang kita jumpai di Bab 2. Langsung setelah bagian yang membahas mata, misalnya, *The Neck of the Giraffe* lanjut membahas kumbang pembom, yang

menyemprotkan campuran hidroquinon dan hidrogen peroksida yang mematikan ke wajah musuhnya. Kedua bahan kimia ini, ketika bercampur, langsung meledak. Agar bisa menyimpan kedua bahan ini di dalam tubuhnya, Kumbang Pembom mengembangkan sebuah penghambat bahan kimia untuk membuatnya tidak berbahaya. Pada saat kumbang ini menyemprotkan cairan tersebut dari ekornya, sebuah anti-penghambat ditambahkan untuk campuran tersebut berdaya ledak kembali. Rentetan peristiwa yang dapat berujung pada evolusi proses yang demikian rumit, terkoordinir, dan pelik ini tidak sanggup dijelaskan secara biologis dengan dasar perkembangan langkah demi langkah sederhana. Jika keseimbangan kimiawinya berubah sedikit saja, kumbang-kumbang itu akan meledak semua.

Seorang ahli biokimia kolega saya telah berbaik hati memberikan sebotol hidrogen peroksida, dan hidroquinon yang setara dengan yang dimiliki 50 kumbang pembom. Sekarang saya akan mencampurkan keduanya. Menurut keterangan di atas, campuran ini akan meledak di muka saya. Kita lihat...

Saya masih hidup, kok. Saya menuang hidrogen peroksida ke hidroquinon, dan sama sekali tidak terjadi apa-apa. Hangat sedikit pun tidak. Dan saya memang sudah tahu: saya tidak seceroboh itu! Pernyataan bahwa ‘dua zat kimia ini, ketika bercampur, langsung meledak’, jelas-jelas menyesatkan, walaupun terus diulang di seluruh literatur kreasionis. Omong-omong, kalau Anda penasaran dengan kumbang pembom, begini cerita yang sebetulnya. Memang benar kumbang ini menyemprotkan campuran hidrogen peroksida dan hidroquinon yang panas perih ke musuhnya. Tapi campuran hidrogen peroksida dan hidroquinon tidak bereaksi galak kecuali ada katalis yang *ditambahkan*. Itulah yang diperbuat kumbang pembom. Mengenai prekursor evolusi sistem tersebut, hidrogen peroksida dan berbagai jenis quinon digunakan untuk tujuan lain dalam tata kimia tubuh. Para leluhur kumbang pembom hanya memanfaatkan zat kimia yang kebetulan memang sudah ada untuk tujuan lain. Seperti itulah cara kerja evolusi.

Pada halaman yang sama dengan pembahasan tentang kumbang pembom, ada pertanyaan: ‘Apa gunanya ... separuh paru-paru? Seleksi alam tentu saja akan menyingkirkan makhluk dengan keganjilan seperti itu, bukan melestarikannya.’ Pada manusia dewasa yang sehat, masing-masing paru terbagi ke dalam sekitar 300 juta bilik kecil, pada ujung dari sistem buluh-buluh yang mencabang. Arsitektur buluh-buluh ini mirip dengan pohon biomorf di bagian bawah Gambar 2 pada bab sebelumnya. Pada pohon tersebut, jumlah cabang beruntun, yang ditentukan oleh ‘Gen 9’, ada delapan, dan jumlah ujung rantingnya ada 2 pangkat 8, sama dengan 256. Anda susuri halaman tersebut ke bawah Gambar 2, dan jumlah ujung ranting-rantingnya berlipat ganda. Agar ujung ranting tersebut bisa berjumlah 300 juta, hanya dibutuhkan 29 kali

penggandaan beruntun. Perhatikan bahwa ada gradasi yang sinambung dari satu bilik hingga 300 juta bilik kecil, yang masing-masing langkah di sepanjang gradasi tersebut terjadi melalui pencabangan dua arah. Transisi ini dapat dicapai dalam 29 kali pencabangan, yang boleh dengan naif kita bayangkan sebagai jalan 29 langkah menyeberangi ruang genetik.

Pada paru-paru, hasil semua pencabangan ini membuat luas permukaan di dalam setiap paru 70 yard persegi lebih. Luas merupakan variabel penting bagi paru-paru, karena luaslah yang menentukan kecepatan oksigen diserap, dan limbah karbon dioksida dibuang. Nah, luas ini merupakan variabel yang *sinambung*. Luas bukan perkara punya tidak punya, tapi punya sedikit lebih banyak atau sedikit lebih sedikit. Lebih dari sebagian besar hal lain, luas paru berkontribusi pada perubahan *bertahap*, selangkah demi selangkah, dari 0 yard persegi hingga 70 yard persegi.

Ada banyak pasien bedah yang masih bisa berjalan dengan satu paru saja, dan sebagian dari mereka bahkan tinggal punya sepertiga dari luas paru normal. Mereka memang masih bisa berjalan, tapi tidak jauh, pun tidak cepat. Itu poinnya. Efek berkurangnya luas paru secara bertahap terhadap ketahanan hidup bukanlah efek mutlak, semua-atau-tidak-sama-sekali. Efeknya terhadap seberapa jauh, dan cepat, Anda bisa berjalan itu beragam, sinambung, dan bertahap. Efeknya terhadap lama harapan hidup Anda memang beragam, sinambung, dan bertahap. Luas paru yang sudah berada di bawah ambang tertentu tidak langsung berarti mati! Secara bertahap, kematian makin mungkin terjadi seiring menyempitnya luas paru, di bawah luas optimal (dan seiring melebarnya luas paru, di atas luas optimal yang sama, untuk berbagai alasan terkait limbah ekonomis).

Para leluhur kita yang pertama sekali mengembangkan paru-paru hampir pasti hidup di air. Kita dapat membayangkan cara mereka bernapas dengan melihat ikan modern. Sebagian besar ikan modern bernapas dengan insang, tapi banyak spesies ikan yang hidup di air rawa yang keruh melengkapi teknik bernapas ini dengan menghirup udara di permukaan. Mereka menggunakan bilik internal mulutnya sebagai semacam purwaparut kasar, dan rongga ini kadang diperbesar menjadi kantong bernapas yang kaya pembuluh darah. Seperti kita lihat, tak sulit membayangkan serangkaian X yang sinambung, yang menghubungkan satu kantong dengan hasil pencabangan ke 300 juta kantong seperti pada paru manusia modern.

Menariknya, banyak ikan modern mempertahankan kantong tunggalnya, dan memakainya untuk tujuan yang sama sekali berbeda. Walaupun mungkin awalnya berfungsi sebagai paru, melalui evolusi, kantong ini menjadi gelembung renang, sebuah perangkat cerdas yang dipakai ikan untuk tetap setimbang secara hidrostatik. Biasanya, seekor hewan yang tidak memiliki kantong udara di dalam tubuhnya akan sedikit lebih berat dari air, sehingga tenggelam ke dasar. Ini mengapa hiu harus terus berenang agar tidak tenggelam. Hewan yang memiliki saku-saku udara besar di tubuhnya, seperti kita dengan paru-paru besar kita, cenderung terangkat ke permukaan. Di suatu titik di tengah-tengah malaran ini, hewan dengan kantong udara yang pas ukurannya tidak tenggelam pun terangkat, tetapi mengambang mantap dalam kesetimbangan sempurna. Inilah trik yang telah disempurnakan oleh ikan modern, selain hiu. Berbeda dari hiu, mereka tak perlu capek-capek berenang supaya tidak tenggelam. Sirip dan ekor mereka berfungsi sebagai kemudi dan pendorong sigap. Mereka tidak lagi mengandalkan udara luar untuk mengisi kantong tersebut karena sudah memiliki kelenjar-kelenjar khusus penghasil gas. Dengan kelenjar-kelenjar ini dan cara lainnya, volume gas di dalam kantong tersebut mereka atur dengan jitu, dan karenanya mereka dapat setimbang mantap secara hidrostatik.

Beberapa spesies ikan modern dapat keluar dari air. Contoh ekstremnya adalah ikan betok India, yang jarang sekali masuk ke air. Ikan ini secara mandiri mengembangkan jenis paru yang cukup beda dari leluhur kita – bilik udara yang mengelilingi insangnya. Ikan lain utamanya hidup di air tetapi sesekali keluar sebentar ke daratan. Inilah yang mungkin dilakukan para leluhur kita. Keluar dari air ini ada durasinya, yang beragam secara sinambung, hingga ke nol. Kalau Anda ikan yang hidup dan bernapas di dalam air, tetapi sesekali menjelajahi daratan, mungkin untuk menyeberang dari satu genangan berlumpur ke genangan lain supaya dapat selamat dari kekeringan, bukan hanya separuh paru, tapi seperseratus paru pun akan bermanfaat bagi Anda. Tidak jadi perkara *seberapa* kecil paru purba Anda, dengan paru itu Anda pasti bisa tahan berada di luar air selama *beberapa* saat, yang lebih lama daripada tanpa paru. Waktu adalah variabel yang sinambung. Tidak ada perbedaan mutlak di antara hewan yang bernapas di dalam dan di luar air. Beragam hewan dapat menghabiskan 99 persen waktu mereka di dalam air, 98 persen, 97 persen, dan seterusnya hingga 0 persen. Pada setiap langkah di sepanjang malaran itu, luas paru yang meningkat sedikit saja dapat memberikan keuntungan. Ada kesinambungan, keberlanjutan, di sepanjang garisnya.

Apa guna setengah sayap? Seperti apa awal-mula sayap? Banyak hewan melompat dari dahan ke dahan, dan kadang jatuh ke tanah. Khususnya pada hewan kecil, seluruh permukaan tubuhnya, ibarat *airfoil* purba, menangkap udara dan membantu lompatan tersebut, atau menghambat gerak jatuhnya. Setiap kecenderungan untuk meningkatkan rasio luas permukaan terhadap bobot tubuh akan berguna, misalnya lembar kulit yang tumbuh di sudut-sudut sendi. Dari sini, ada serangkaian gradasi sinambung menuju sayap-sayap layang, dan kemudian sayap-sayap kepak. Tentu saja ada jarak yang tidak dapat dilompati oleh hewan-hewan purba dengan purwasayap. Sama jelasnya, untuk *setiap* derajat kekecilan atau kekasaran permukaan penangkap udara purba, pasti ada *sejumlah* jarak, seberapa pendek pun jarak tersebut, yang bisa dilompati dengan kepak dan yang tidak bisa tanpa kepak.

Atau, jika kepak sayap tersebut menghambat gerak jatuhnya si hewan, kita tidak dapat berkata bahwa ‘Kalau ukurannya kurang sedikit saja sayap itu tidak ada gunanya’. Sekali lagi, tidak peduli *seberapa* kecil dan tak mirip sayap pun kepak-kepak sayap pertama itu. Pasti ada ketinggian, sebut saja t , yang akan membuat leher hewan tersebut patah kalau jatuh dari situ, tetapi tetap hidup kalau ketinggiannya sedikit lebih rendah. Di zona kritis ini, meningkatnya kemampuan permukaan tubuh untuk menangkap udara dan menghambat laju jatuhnya, seberapa kecil pun peningkatan tersebut, dapat menentukan hidup atau matinya si hewan tadi. Seleksi alam kemudian akan memilih kepak-kepak sayap purwarupa yang kecil itu. Ketika kepak-kepak sayap kecil ini sudah menjadi norma, ketinggian kritis t tadi akan sedikit bertambah. Nah, peningkatan kecil kepak-kepak sayap akan menentukan hidup dan matinya si hewan. Begitu seterusnya, hingga ada sayap yang layak.

Ada hewan-hewan modern yang dengan indah melukiskan setiap tahap di atas malaran ini. Ada katak yang melayang dengan selaput-selaput besar di antara jari-jari kakinya, ular pohon dengan tubuh pipih yang mampu menangkap udara, kadal dengan kepak di sepanjang tubuhnya; dan beberapa jenis mamalia lain yang melayang dengan membran-membran yang membentang di antara kaki-tangannya, yang menunjukkan kepada kita seperti itulah kiranya kelelawar berawal. Bertolak belakang dengan literatur kreasionis, bukan hanya hewan dengan ‘setengah sayap’, hewan-hewan dengan seperempat, tiga perempat sayap, dan seterusnya pun lazim ditemukan. Gagasan malaran terbang menjadi makin lebih persuasif kalau kita ingat bahwa hewan-hewan yang sangat kecil cenderung mengambang lembut di udara, seperti apa pun

bentuknya. Saya sebut persuasif karena terdapat malaran yang amat bertahap dari ukuran kecil hingga besar.

Gagasan perubahan kecil kumulatif melalui langkah yang jamak merupakan gagasan yang sangat kuat, dan mampu menjelaskan beraneka-ragam hal yang tidak terjelaskan tanpanya. Seperti apa awal-mula bisa ular? Banyak hewan menggigit, dan ludah hewan mana pun mengandung protein yang, kalau masuk ke luka, dapat menyebabkan reaksi alergi. Gigitan ular-ular tak berbisa sekali pun bisa menyebabkan reaksi sakit bagi sebagian orang. Ada rangkaian bertahap dan sinambung dari ludah biasa hingga bisa mematikan.

Seperti apa awal-mula telinga? Setiap kulit dapat mendeteksi getaran kalau bersentuhan dengan sumber getaran tersebut. Pendengaran adalah hasil perkembangan indra raba. Seleksi alam dapat dengan mudah meningkatkan bakat ini secara bertahap hingga cukup peka untuk mampu mendeteksi getaran-getaran sentuh yang amat *halus*. Di titik ini kulit secara otomatis sudah cukup peka untuk menangkap getaran *udara* dari suara yang cukup lantang dan/atau cukup dekat. Seleksi alam kemudian memilih evolusi organ-organ khusus – telinga – untuk mendeteksi getaran udara yang berasal dari jarak-jarak yang makin lama makin jauh. Mudah untuk melihat bahwa pasti ada lintasan sinambung peningkatan selangkah demi selangkah, di sepanjang garis evolusinya. Seperti apa awal-mula ekolokasi? Setiap hewan yang dapat mendengar bisa mendengar gema. Lazim bagi manusia buta untuk belajar memanfaatkan gema-gema ini. Versi belum sempurna dari keterampilan seperti ini pada mamalia purba telah menyediakan bahan mentah yang cukup melimpah sebagai landasan seleksi alam, yang melalui tahap demi tahap berujung pada kesempurnaan paripurna yang dijumpai pada kelelawar.

Lima persen penglihatan lebih baik daripada tidak sama sekali. Lima persen pendengaran lebih baik daripada tidak sama sekali. Lima persen efisiensi terbang lebih baik daripada tidak sama sekali. Sepenuhnya dapat dipercaya bahwa setiap organ atau perangkat yang dapat kita lihat merupakan hasil dari sebuah lintasan mulus melalui ruang hewan, lintasan yang setiap tingkat perantaranya telah membantu ketahanan hidup dan reproduksi. Di mana pun ada X pada hewan sungguhan, dan X adalah organ yang terlalu kompleks untuk muncul secara kebetulan dalam selangkah saja, maka menurut teori evolusi melalui seleksi alam, sepersekian X pastilah lebih baik dari tanpa X sama sekali; dan dua persekian X pastilah lebih baik dari sepersekian; dan seratus persen X pastilah lebih baik dari sembilan puluh persen X. Sama sekali tidak sulit bagi saya untuk menerima bahwa pernyataan ini benar bagi mata, telinga (termasuk telinga kelelawar), sayap, serangga bersambaran dan serangga peniru, rahang ular, sengat, kebiasaan burung kukuk dan semua contoh lain yang diketengahkan dalam propaganda antievolusi. Memang benar ada banyak X yang *dapat dibayangkan* yang membuat pernyataan ini *tidak* benar, ada banyak jalur evolusi yang dapat dibayangkan yang makhluk-makhluk perantaranya *bukan* merupakan peningkatan dari para pendahulunya. Tapi semua X tersebut tidak ditemukan di dunia nyata.

Darwin menulis (dalam *Asal-Mula Spesies*):

Apabila dapat diperagakan bahwa ada organ kompleks yang mustahil terbentuk melalui sejumlah besar modifikasi halus beruntun, teori saya pasti runtuh.

Seratus dua puluh lima tahun kemudian, kita tahu jauh lebih banyak tentang hewan dan tumbuhan daripada Darwin, dan masih belum ada satu kasus organ kompleks pun yang saya ketahui tidak mungkin terbentuk melalui sejumlah besar modifikasi halus beruntun. Saya tidak yakin kasus semacam itu akan pernah ditemukan. Kalaupun ternyata ada – dan harus organ yang

benar-benar kompleks, serta, seperti akan kita lihat di bab-bab berikutnya, harus dengan definisi yang sangat ketat untuk istilah ‘halus’ – saya akan berhenti meyakini Darwinisme.

Kadang kala, riwayat tahap-tahap perantara ini tertulis jelas ke dalam bentuk hewan-hewan modern, bahkan dalam rupa ketidaksempurnaan yang terang-jelas dalam rancangan akhirnya. Stephen Gould, dalam esainya yang hebat *The Panda's Thumb*, telah menunjukkan bahwa evolusi dapat lebih kuat disokong oleh bukti ketidaksempurnaan yang jelas ketimbang bukti kesempurnaan. Saya berikan dua contohnya saja.

Ikan yang hidup di dasar laut memanfaatkan bentuknya yang pipih dan menyatu dengan kontur dasar laut. Ada dua jenis ikan pipih yang amat berbeda yang hidup di dasar laut, dan keduanya mengevolusikan kepipihan mereka dengan cara-cara yang cukup berbeda. Tubuh ikan *skate* dan pari, kerabat hiu, memipih secara, boleh dibilang, sangat jelas. Tubuh keduanya tumbuh ke samping, membentuk ‘sayap-sayap’ besar. Mereka seperti hiu yang baru dilindas mesin gilas uap, tapi tetap simetris dan ‘ke arah yang benar’. Ikan-ikan *plaice*, *sole*, *halibut* dan kerabat mereka menjadi pipih dengan cara yang berbeda. Mereka adalah ikan bertulang keras (dengan gelembung renang) yang bersaudara dengan ikan haring, ikan trout, dll., dan tidak ada hubungan sama sekali dengan hiu. Tidak seperti hiu, ikan-ikan bertulang keras, dikarenakan struktur kerangkanya, memiliki kecenderungan unik untuk memipih secara vertikal. Tubuh ikan haring, misalnya, lebih bersifat ‘tinggi’ daripada lebar. Ikan ini menggunakan seluruh tubuh pipih vertikalnya itu sebagai bidang renang, yang membelah air ketika ia berenang. Oleh karena itu, lumrah saja jika ketika para leluhur ikan *plaice* dan *sole* mulai hidup di dasar laut, mereka rebah ke *samping* dan bukan tiarap seperti para leluhur ikan *skate* dan pari. Tapi hal ini menimbulkan masalah karena salah satu matanya selalu melihat ke pasir dan tidak bisa dipakai. Dalam evolusi, masalah ini dipecahkan dengan ‘menggeser’ mata bawah tadi ke sisi atas.

Kita melihat proses penggeseran ini terjadi kembali dalam perkembangan setiap anak ikan pipih bertulang keras. Anak ikan pipih memulai kehidupannya dengan berenang di dekat permukaan air, dan bentuk tubuhnya simetris dan pipih vertikal seperti ikan haring. Tetapi kemudian tengkoraknya mulai tumbuh secara ganjil, asimetris, dan cengkol, sehingga satu matanya, misalnya yang kiri, berpindah ke atas kepala hingga sampai di sisi lainnya. Ikan yang masih belia ini kemudian menetap di dasar, kedua matanya menatap ke atas, penglihatan bak-Picasso yang aneh. Kebetulan juga, sebagian spesies ikan pipih kedua matanya berakhir di sisi kanan, sebagian lain di sebelah kiri, dan sebagian lagi di sisi kiri atau kanan.

Bukti asal-usul yang cengkol dan menyimpang ini melekat pada tengkorak ikan pipih bertulang keras. Ketaksempurnaannya yang nyata merupakan kesaksian kuat atas sejarah kunonya, sejarah perubahan selangkah demi selangkah, dan bukan rancangan yang disengaja. Tidak seorang perancang waras pun akan membayangkan kejanggalan semacam itu kalau diminta menciptakan dengan bebas seekor ikan pipih di atas papan gambar yang kosong. Saya duga sebagian besar perancang akan membayangkan hal yang lebih mirip seekor ikan *skate*. Tapi evolusi tak pernah dimulai dari papan gambar yang kosong. Ia harus dimulai dari apa yang sudah ada. Untuk perkara leluhur ikan *skate*, pendahulunya adalah hiu-hiu perenang bebas. Hiu pada umumnya tidak memipih secara horizontal sebagaimana ikan bertulang keras perenang bebas seperti haring. Bagaimanapun juga, hiu sudah sedikit pipih dari punggung ke perutnya. Ini berarti bahwa ketika sebagian hiu purba pertama sekali bermukim di dasar laut, terjadi pergeseran yang lancar ke bentuk ikan *skate*, yang tiap-tiap perantaranya merupakan hasil peningkatan halus, mengingat kondisi dasar lautnya, dari pendahulunya yang sedikit kalah pipih.

Di lain pihak, ketika leluhur ikan *plaice* dan *halibut*, para perenang bebas yang, seperti ikan haring, pipih vertikal dari kanan ke kiri, bermukim di dasar laut, lebih mudah baginya untuk rebah ke salah satu sisi tubuhnya daripada terhuyung-huyung mencoba menyeimbangkan diri di atas perutnya yang setipis mata pisau! Sekalipun laluan evolusi yang dilewati menakdirkannya untuk mengalami distorsi yang rumit dan mungkin ‘mahal’ (kedua mata ada di sisi yang sama), sekalipun cara ikan *skate* menjadi ikan pipih mungkin *pada akhirnya* menjadi rancangan terbaik bagi ikan bertulang keras juga, ikan-ikan perantara yang semestinya ada di jalur evolusi ini ternyata dalam jangka waktu singkat tidak seberhasil para rival mereka yang berbaring di atas salah satu sisi tubuhnya itu. Para rival yang berbaring di atas salah satu sisi tubuhnya itu jauh lebih pintar, dalam jangka pendek, bertengger di dasar laut. Dalam hiper-ruang genetik, ada sejulur lintasan mulus yang menghubungkan ikan purba bertulang keras perenang bebas dengan ikan pipih bertengkorak cengkol yang berbaring di atas salah satu sisi tubuhnya. Tidak terdapat lintasan mulus yang menghubungkan para leluhur ikan bertulang keras tersebut dengan ikan pipih yang tengkurap. Spekulasi ini tidak mutlak benar, karena ada ikan bertulang keras yang mengembangkan kepipihan secara simetris, mirip ikan *skate*. Mungkin ikan perenang bebas leluhur mereka sudah sedikit pipih karena suatu alasan lain.

Contoh kedua tentang laju evolusi yang tidak terjadi karena para perantaranya kurang beruntung, sekalipun mungkin pada akhirnya akan lebih baik andai saja mereka bertahan hidup, terkait retina mata kita (dan semua makhluk bertulang belakang lainnya). Seperti saraf lainnya, saraf optik berupa kabel batang, sebundel kawat-kawat ‘berinsulasi’, yang dalam hal ini kira-kira tiga juta jumlahnya. Tiap-tiap dari tiga juta kawat ini menautkan satu sel di dalam retina ke otak. Anda bisa membayangkannya ibarat kawat-kawat yang menghubungkan himpunan tiga juta fotosel (lebih tepatnya, tiga juta stasiun relai yang mengumpulkan informasi dari fotosel yang jumlahnya lebih besar lagi) ke komputer yang akan mengolah informasi tersebut di otak. Semua kawat tersebut dikumpulkan dari seluruh retina ke dalam satu bundel, yang menjadi saraf optik bagi mata tersebut.

Insinyur mana pun, lumrah saja, akan berasumsi bahwa semua fotosel itu akan menghadap cahaya, dengan kawat-kawatnya menjulur ke belakang ke arah otak. Ia akan tertawa kalau mendengar bahwa fotosel-fotosel itu boleh jadi membelakangi cahaya, dengan kawat-kawatnya terulur dari sisi yang *paling dekat* dengan cahaya. Tapi justru inilah yang terjadi pada semua retina vertebrata. Tiap fotosel, nyatanya, tersambung terbalik, dan kawatnya menyembul ke sisi yang terdekat dengan cahaya. Kawatnya terpaksa lewat di atas permukaan retina, ke sebuah titik tempatnya menyelam melalui sebuah lubang di dalam retina (yang disebut ‘titik buta’) untuk bergabung dengan saraf optik. Ini berarti cahaya tersebut, alih-alih diberi jalur bebas hambatan ke fotosel, terpaksa melewati belantara kawat-kawat penghubung, dan boleh jadi pula mengalami setidaknya semacam pelaifan dan distorsi (mungkin tidak banyak, memang, tapi tetap saja akan menjadi *prinsip* yang kurang berkenan di hati insinyur yang mengidolakan kerapian!).

Saya tidak tahu seperti apa persisnya penjelasan bagi keadaan ganjil ini. Kurun waktu evolusinya terjadi dahulu sekali. Tapi saya siap bertaruh bahwa hal ini pasti ada kaitannya dengan lintasan, jalur yang melalui padanan dunia nyata untuk Negeri Biomorf, yang memang harus dilewati agar bisa memutar retina ke arah yang benar, dimulai dari organ purba apa pun yang mendahului mata tersebut. Lintasan semacam itu mungkin ada, tetapi lintasan hipotetis tersebut, ketika mewujudkan di dalam tubuh-tubuh hewan perantara, ternyata merugikan – secara sementara saja, tetapi itu pun sudah cukup. Daya penglihatan hewan-hewan perantara ini bahkan lebih buruk dari para leluhurnya yang belum sempurna, dan fakta bahwa mereka sebetulnya

tengah membangun penglihatan mata yang lebih baik untuk para keturunan jauhnya tidak cukup menjadi pelipur! Yang penting adalah ketahanan hidup di sini dan saat ini.

‘Hukum Dollo’ menyatakan bahwa evolusi itu tak terbalikkan. Hal ini sering dirancukan dengan bejibun omong-kosong idealis tentang sifat kemajuan yang tidak terelakkan, yang kerap dipasangkan dengan omong-kosong tak berdasar bahwa evolusi ‘melanggar Hukum Kedua Termodinamika’ (mereka yang merupakan bagian dari setengah dari penduduk terdidik yang, menurut novelis C.P. Snow, tahu apa itu Hukum Kedua, akan menyadari bahwa hukum tersebut dilanggar oleh evolusi tidak lebih dari pertumbuhan seorang bayi melanggar hukum tersebut). Tak ada alasan mengapa kecenderungan-kecenderungan umum dalam evolusi tidak semestinya dibalikkan. Jika ada kecenderungan menuju tanduk rusa besar untuk beberapa waktu dalam evolusi, tentu bisa ada pula kecenderungan berikutnya menuju tanduk rusa yang lebih kecil lagi. Hukum Dollo sebetulnya hanya berupa pernyataan bahwa mengikuti lintasan evolusi yang sama persis dua kali (atau, malah, lintasan *tertentu* mana pun), baik ke arah maju ataupun mundur, itu muskil secara statistis. Satu langkah mutasi itu tentu dapat dibalikkan. Tapi untuk jumlah langkah mutasi yang lebih besar, sekali pun dalam kasus biomorf dengan sembilan gen kecilnya, ruang matematis dari seluruh lintasan yang mungkin ada itu begitu luas sehingga peluang berujungnya dua lintasan di titik yang sama menjadi sangat kecil. Untuk hewan-hewan sungguhan, jumlah gen yang sangat besar makin mempertegas kebenaran hal ini. Tidak ada yang misterius atau mistis dengan Hukum Dollo, tidak pula perlu kita ‘uji’ di alam bebas. Hukum ini sekadar mengikuti hukum-hukum probabilitas yang elementer.

Untuk alasan yang sama, makin muskil pula bahwa selintas jalur evolusi itu dapat dilalui dua kali. Dan akan tampak sama muskilnya, untuk alasan statistis yang sama, bahwa dua garis evolusi dari titik-titik awal berbeda-beda mesti bertemu pada titik akhir yang persis sama.

Oleh karena itu, banyaknya ditemukan di alam nyata contoh pertemuan garis-garis evolusi yang independen, dari titik awal yang amat berbeda, di titik yang tampak mirip sekali seperti titik akhir yang sama, menjadi kesaksian kuat bagi daya seleksi alam. Bila kita teliti lebih dekat, kita temukan – dan alangkah mengkhawatirkan jika tidak – bahwa pertemuan tersebut tidak bersifat total. Aneka garis evolusi tersebut menyingkap asal-usul independennya dalam banyak poin perincian. Misalnya, mata gurita mirip sekali dengan mata manusia, tetapi kawat-kawat yang terulur dari fotosel-fotoselnya tidak mengarah ke depan ke arah cahaya, seperti mata kita. Dalam hal ini, mata gurita dirancang dengan lebih ‘masuk akal’. Mata gurita dan mata manusia tiba pada titik akhir yang serupa, dari titik awal yang amat berbeda. Dan fakta ini tersingkap dalam hal perincian-perincian seperti ini.

Kemiripan-kemiripan yang kelihatan konvergen ini seringkali tampak amat sangat mencolok, dan saya akan curahkan sisa bab ini untuk membahas beberapa dari kemiripan tersebut. Kemiripan-kemiripan ini merupakan peragaan daya seleksi alam paling impresif dalam merakit rancangan-rancangan yang baik. Tetapi fakta bahwa rancangan-rancangan yang seolah mirip ini juga berbeda, menjadi saksi atas asal-usul dan riwayat evolusinya yang mandiri. Dasar pemikirannya adalah bahwa, apabila suatu rancangan itu cukup baik sehingga dapat berevolusi sekali, *prinsip* rancangan yang sama itu pun cukup baik untuk dapat berevolusi dua kali, dari titik-titik awal yang berbeda, di bagian-bagian kerajaan hewan yang berbeda pula. Hal ini terlukiskan dengan sempurna dalam kasus yang kita gunakan sebagai ilustrasi atas rancangan yang baik itu sendiri – ekolokasi.

Sebagian besar pengetahuan kita tentang ekolokasi berasal dari kelelawar (dan instrumen buatan manusia), tetapi kelihaian ini juga dimiliki sejumlah kelompok hewan yang tidak saling berhubungan. Setidaknya ada dua kelompok burung yang melakukannya, dan kemampuan ini telah disempurnakan hingga tingkat kualitas yang sangat tinggi oleh lumba-lumba dan paus. Selain itu, ekolokasi hampir pasti 'ditemukan' secara terpisah oleh sedikitnya dua kelompok kelelawar yang berbeda. Burung-burung yang melakukannya adalah burung minyak Amerika Selatan, dan walet gua dari Timur Jauh, yang sarangnya dijadikan sup sarang walet. Kedua jenis burung ini bersarang jauh di dalam gua-gua yang gelap gulita, dan keduanya bernavigasi dalam keadaan tanpa atau minim cahaya menggunakan gema-gema dari decapan-decapan vokal mereka sendiri. Bunyi decapan kedua jenis burung ini dapat didengar manusia, bukan suara ultrasonik seperti decapan kelelawar yang lebih istimewa itu. Dan, kedua spesies burung ini nyatanya tidak mengembangkan ekolokasi hingga sama canggihnya dengan kelelawar. Decapan-decapan mereka bukan FM, tidak pula tampak pas untuk pengukuran kecepatan ala efek Doppler. Boleh jadi, seperti codot (*Rousettus*), mereka hanya mengukur waktu jeda hening di antara setiap decapan dan gemanya.

Dengan begitu, kita boleh yakin benar bahwa masing-masing dari kedua spesies burung ini telah menemukan ekolokasi sendiri-sendiri, terpisah pula dari kelelawar. Garis penalaran ini sama dengan jenis penalaran yang kerap digunakan kaum evolusionis. Kami melihat ribuan spesies burung, dan mengamati bahwa mayoritas spesies-spesies tersebut tidak menggunakan ekolokasi. Hanya dua genus kecil burung yang tidak berkaitan saja yang melakukannya, dan keduanya tidak memiliki kesamaan selain bahwa mereka hidup di gua-gua. Walaupun kita yakin semua burung dan kelelawar pasti memiliki leluhur yang sama kalau cukup jauh kita melacak balik silsilahnya, leluhur yang sama tersebut juga merupakan leluhur semua mamalia (termasuk kita) dan semua burung. Mayoritas besar mamalia dan mayoritas besar burung tidak menggunakan ekolokasi, dan mungkin sekali leluhur mereka pun juga tidak (terbang pun tidak, karena ini lagi satu teknologi lain yang dikembangkan secara independen melalui evolusi beberapa kali). Masuk akal bila teknologi ekolokasi dikembangkan secara independen pada kelelawar dan burung, persis seperti ilmuwan Inggris, Amerika, dan Jerman yang mengembangkan teknologi ini sendiri-sendiri. Jenis penalaran yang sama, pada skala yang lebih kecil, berujung pada kesimpulan bahwa leluhur burung minyak dan walet gua juga tidak menggunakan ekolokasi, dan bahwa kedua genus ini telah mengembangkan teknologi yang sama sendiri-sendiri.

Pada mamalia pun, kelelawar bukan satu-satunya kelompok yang telah mengembangkan teknologi ekolokasi secara mandiri. Beberapa jenis mamalia, misalnya celurut, tikus, dan anjing laut, tampak memanfaatkan gema pada skala lebih kecil, seperti manusia buta, api satu-satunya hewan yang dapat menyaingi kelelawar dalam hal kecanggihan teknologi ekolokasinya adalah paus. Paus dibagi ke dalam dua kelompok utama, paus bergigi dan paus balin. Keduanya, tentu, merupakan mamalia yang diturunkan dari leluhur penghuni daratan, dan mereka pun boleh jadi telah 'menemukan' cara hidup paus secara sendiri-sendiri, bermula dari leluhur penghuni daratan yang berbeda pula. Paus bergigi meliputi paus sperma, paus pembunuh, dan berbagai spesies lumba-lumba, yang kesemuanya memburu mangsa yang relatif besar seperti ikan dan cumi-cumi, yang mereka tangkap di rahangnya. Beberapa paus bergigi, yang di antaranya baru lumba-lumba saja yang sudah dikaji secara menyeluruh, telah mengevolusikan peralatan pembunyi gema yang canggih di dalam kepala mereka.

Lumba-lumba memancarkan rentetan cepat decapan bertiti nada tinggi, yang sebagian dapat kita dengar, sebagian ultrasonik. Mungkin saja ‘buah melon’, kubah menonjol di bagian depan kepala lumba-lumba, yang – kebetulan sekali – tampak seperti kubah radar yang menonjol aneh pada pesawat mata-mata ‘peringatan lanjut’ Nimrod, itu ada perannya dalam pemancaran sinyal-sinyal sonar ke arah depan, tetapi fungsi-fungsi pastinya belum dipahami. Seperti kelelawar, ada ‘kecepatan jelajah’ decapan yang relatif lambat, yang dapat melejit ke dengungan kecepatan tinggi (400 decapan per detik) ketika hewan ini sudah dekat dengan mangsanya. Kecepatan jelajah yang ‘lambat’ ini pun sebetulnya sudah cukup cepat. Lumba-lumba sungai yang hidup di perairan berlumpur mungkin merupakan ekolokator paling terampil, tetapi sebagian lumba-lumba laut terbuka telah terbukti, lewat berbagai tes, cukup lihai juga. Lumba-lumba hidung botol Atlantik mampu membedakan lingkaran, bujur sangkar, dan segitiga (yang luasnya semua sama) hanya dengan menggunakan sonarnya. Hewan ini mampu membedakan mana yang lebih dekat dari dua target di hadapannya, saat perbedaan jarak keduanya hanya 1¼ inci pada jarak utuh sekitar 7 yard darinya. Ia mampu mendeteksi bola baja yang ukurannya setengah bola golf, dari jarak 70 yard. Performa ini memang tidak sebaik *penglihatan* manusia di bawah terang cahaya matahari, tetapi mungkin lebih baik dari *penglihatan* manusia di bawah remang cahaya bulan.

Ada pendapat menarik bahwa lumba-lumba, kalau mau, punya potensi untuk dengan sangat mudah mengkomunikasikan ‘gambar-gambar batin’ satu sama lain. Mereka hanya perlu memakai suara-suara serbaguna mereka untuk meniru pola bunyi yang akan dihasilkan gema-gema dari benda tertentu. Dengan begitu, mereka bisa mengungkapkan gambar-gambar batin dari benda-benda tersebut. Belum ada bukti untuk pendapat yang naim ini. Secara teori, kelelawar juga bisa, tetapi lumba-lumba kandidat yang lebih kuat karena secara umum mereka lebih suka bergaul. Mereka juga mungkin ‘lebih cerdas’, tapi ini tidak lantas relevan sebagai bahan pertimbangan. Instrumen yang diperlukan untuk mengkomunikasikan gambar-gambar gema tidak lebih rumit dari instrumen yang sudah dimiliki kelelawar dan lumba-lumba untuk melakukan ekolokasi. Dan malaran bertahap di antara kemampuan memakai suara untuk membuat gema dan kemampuan memakai suara untuk meniru gema dapat terbentuk dengan mudah.

Setidaknya dua kelompok kelelawar, dua kelompok burung, paus bergigi, dan mungkin beberapa jenis mamalia lainnya pada skala lebih kecil, telah bertemu di titik yang sama, yaitu teknologi sonar, di suatu waktu selama ratusan juta tahun terakhir. Kita tidak dapat mengetahui apakah hewan-hewan lain yang kini telah punah – pterodactyl mungkin? – juga telah mengembangkan teknologi ini secara mandiri melalui evolusi.

Sejauh ini tidak ada serangga dan ikan yang diketahui menggunakan sonar, tetapi dua kelompok ikan yang cukup berbeda, satu di Amerika Selatan dan satu di Afrika, telah mengembangkan sistem navigasi yang kurang-lebih serupa, yang tampak seperti solusi yang sama canggihnya dan yang dapat dianggap berkaitan, tetapi berbeda, untuk masalah yang sama. Kedua kelompok ikan ini memiliki sebutan ikan listrik tegangan rendah. Frasa ‘tegangan rendah’ di sini ditambahkan untuk membedakannya dari ikan listrik tegangan tinggi, yang menggunakan medan-medan listrik, bukan untuk navigasi, tetapi untuk menyengat mangsa. Teknik sengatan ini, kebetulan, juga telah ditemukan secara terpisah oleh beberapa kelompok ikan yang tidak saling berkaitan, contohnya ‘belut’ listrik (yang bukan belut sejati tapi bentuknya konvergen dengan belut sungguhan) dan pari listrik.

Ikan listrik tegangan rendah Amerika Selatan dan Afrika cukup tidak berkaitan satu sama lain, tetapi keduanya hidup di jenis perairan yang sama di benuanya masing-masing, perairan yang terlalu berlumpur sehingga penglihatan jadi tidak efektif. Prinsip fisika yang mereka manfaatkan – medan-medan listrik di air – bahkan lebih asing bagi pengetahuan kita dibandingkan dengan prinsip yang dipakai kelelawar dan lumba-lumba. Kita setidaknya punya bayangan subjektif tentang apa itu gema, tapi kita hampir tidak dapat membayangkan seperti apa mengindra medan listrik. Kita bahkan baru tahu bahwa listrik itu ada dua ratus tahun yang lalu. Sebagai manusia subjektif kita tidak dapat berempati dengan ikan listrik, tapi kita, sebagai fisikawan, dapat memahami mereka.

Coba lihat ikan masak di atas piring dan dengan mudah dapat Anda perhatikan otot-otot di bawah tiap sisi tubuhnya tersusun ke dalam sebaris segmen, sebuah *baterai* unit-unit otot. Di kebanyakan ikan, segmen-segmen ini berkontraksi secara beruntun untuk mendorong tubuh, meliuk, dan melejitkannya ke depan. Pada tubuh ikan listrik, baik yang bertegangan tinggi atau rendah, otot-otot ini menjadi baterai listrik. Tiap segmen ('sel') baterai menghasilkan tegangan. Tegangan-tegangan ini saling bersambung dalam rangkaian di sepanjang tubuh ikan sehingga, pada ikan listrik tegangan tinggi seperti sidat listrik, aliran listrik yang dihasilkan oleh baterai ini mencapai 1 ampere dengan tegangan 650 volt. Seekor sidat listrik cukup kuat untuk membuat seorang laki-laki dewasa pingsan. Ikan listrik tegangan rendah tidak membutuhkan voltase atau arus listrik kuat karena tujuan mereka murni untuk mengumpulkan informasi.

Prinsip elektrolokasi, istilahnya, sudah cukup baik dipahami di tataran fisika walau tentu saja belum di tataran seperti apa menjadi ikan listrik. Catatan berikut ini berlaku sama terhadap ikan listrik tegangan rendah Afrika dan Amerika Selatan: konvergensi keduanya memang menyeluruh itu. Arus mengalir dari separuh depan tubuh ikan tersebut, keluar ke air dalam garis-garis yang melengkung balik dan kembali ke ujung ekor ikan itu. Bukan 'garis-garis' yang benar-benar diskret, tetapi 'medan' yang sinambung, ibarat kepompong listrik tak kasatmata yang mengelilingi tubuh si ikan. Namun, agar visualisasinya mudah kita cerna, bayangkan sekelompok garis-garis melengkung yang keluar melalui serangkaian pintu-pintu angin yang ditempatkan di sepanjang paruh depan tubuhnya. Semua garis ini melengkung di air dan berbalik ke ujung ekor ikan itu. Ikan ini memiliki hal yang setara dengan voltmeter mungil yang memantau voltase pada tiap 'pintu angin'. Kalau ikan tersebut mengawang di perairan terbuka tanpa halangan di sekitarnya, garis-garis itu berbentuk lengkung-lengkung sempurna. Voltmeter mungil pada tiap pintu angin mencatat voltase tersebut 'normal' bagi pintu anginnya. Tapi jika ada halangan di sekitar, katakanlah seongkah batu atau makanan, garis-garis arus yang kebetulan menumbuk halangan tersebut akan diubah. Hal ini akan mengubah voltase di pintu angin mana pun yang garis arusnya terpengaruh, dan voltmeter di pintu angin tersebut akan mencatat fakta itu. Jadi secara teori, sebuah komputer, dengan membandingkan pola voltase-voltase yang dicatat voltmeter di semua pintu angin, dapat menghitung pola halangan-halangan di sekitar ikan. Itulah yang rupa-rupanya diperbuat otak ikan ini. Sekali lagi, tidak berarti bahwa ikan ini matematikawan yang lihai. Mereka punya perangkat yang menyelesaikan berbagai persamaan, seperti otak kita secara tak sadar menyelesaikan persamaan setiap kali kita menangkap bola.

Tubuh ikan itu sendiri mesti dijaga agar betul-betul kaku. Komputer di dalam kepalanya tak sanggup menanggung distorsi tambahan yang akan timbul jika tubuhnya melekok atau memuntir seperti ikan biasa. Ikan listrik telah, setidaknya dua kali secara mandiri, menemukan cara

navigasi pintar ini, tetapi ada harga yang harus dibayar: kehilangan cara berenang normal ikan yang sangat efisien, dengan melekok-lekokkan seluruh tubuhnya. Mereka telah memecahkan masalah dengan membuat tubuh tetap kaku seperti batang besi tetapi mereka memiliki satu sirip panjang di sepanjang tubuhnya. Jadi, bukan sekujur tubuhnya yang berlekuk-lekok ketika berenang, tapi cukup sirip panjang ini saja. Ikan ini tetap bisa bergerak di air, walau lambat, dan ternyata mengorbankan kecepatan sepadan dengan hasilnya: keuntungan navigasi tampaknya melampaui kerugian laju renang yang lamban. Menariknya lagi, ikan listrik Amerika Selatan telah menemukan solusi yang hampir sama persis seperti ikan listrik Afrika, meski tidak betul-betul sama. Perbedaannya cukup mencolok. Kedua kelompok ini telah mengembangkan satu sirip panjang di setiap jengkal panjang tubuhnya, tetapi sirip ikan listrik Afrika ada di bagian punggung, sementara sirip ikan listrik Amerika Selatan ada di bagian perut. Perbedaan detail seperti ini merupakan ciri khas dalam evolusi yang konvergen, seperti telah kita lihat bersama. Hal ini pun tentunya merupakan ciri desain-desain konvergen yang dihasilkan para insinyur manusia.

Kendati mayoritas ikan listrik tegangan rendah, baik di kelompok Afrika maupun Amerika Selatan, mengeluarkan listriknya dalam bentuk denyut-denyut diskret dan disebut spesies ‘denyut’, ada juga spesies minoritas di kedua kelompok ini yang melakukannya dengan cara lain, dan disebut spesies ‘gelombang’. Saya tidak akan membahas perbedaannya lebih lanjut. Yang menarik untuk bab ini adalah bahwa pemisahan teknik denyut dan gelombang ini telah berevolusi dua kali, sendiri-sendiri, di kelompok Dunia Baru dan Dunia Lama yang tidak berkaitan.

Salah satu contoh paling ganjil dari evolusi konvergen yang saya ketahui adalah hewan tonggeret periodik. Sebelum membahas konvergensinya, saya harus paparkan dahulu keterangan latarnya. Banyak serangga mengalami pemisahan masa hidup yang lumayan kaku, antara tahap makan di kala remaja yang lama dan tahap kembang biak di kala dewasa yang cukup singkat. Lalat capung, misalnya, menghabiskan sebagian besar waktu hidupnya sebagai larva bawah-air, kemudian muncul di udara selama sehari, durasi yang mendefinisikan kehidupan dewasa mereka. Kita dapat mengibaratkan lalat dewasa ini sebagai biji bersayap tumbuhan seperti ara, dan larvanya sebagai tumbuhan itu sendiri. Perbedaannya: ara punya banyak biji dan menjatuhkannya selama bertahun-tahun secara beruntun, sementara larva lalat capung hanya memunculkan seekor lalat dewasa saja tepat di ujung hidupnya. Nah, tonggeret periodik membawa tren lalat capung ini ke titik ekstremnya. Serangga dewasanya hidup selama beberapa minggu, tetapi masa ‘remaja’ (secara teknis disebut ‘nimfa’, bukan larva) berlangsung selama 13 tahun (pada sebagian varietas) atau 17 tahun (pada varietas lain). Serangga-serangga dewasa ini muncul hampir secara bersamaan, setelah menghabiskan 13 (atau 17) tahun bersembunyi di bawah tanah. Wabah tonggeret, yang terjadi di wilayah mana pun dalam kurun waktu 13 (atau 17) tahun sekali, merupakan ledakan spektakuler yang membuatnya mendapat sebutan keliru, ‘belalang’ (*locust*) di logat Inggris Amerika. Varietas-varietas ini dikenal, secara berturut-turut, sebagai tonggeret 13 tahunan dan tonggeret 17 tahunan.

Nah, ini fakta luar biasanya. Ternyata tidak hanya ada satu spesies tonggeret 13 tahunan dan satu spesies tonggeret 17 tahunan. Sebetulnya ada tiga spesies, dan masing-masing dari ketiganya memiliki varietas atau ras 17 tahunan dan 13 tahunan. Pembagian ke dalam ras 13 tahunan dan ras 17 tahunan ini telah terjadi secara terpisah minimal tiga kali. Tampak seolah kurun-kurun waktu perantaranya (14, 15, dan 16 tahunan) telah terpisah secara konvergen, minimal tiga kali. Mengapa? Kita tidak tahu. Satu-satunya pendapat yang muncul adalah bahwa

yang istimewa dengan 13 dan 17, jika dibanding 14, 15, dan 16, adalah kedua angka tersebut merupakan bilangan prima. Bilangan prima adalah bilangan yang tidak dapat dibagi bulat dengan bilangan lain. Gagasannya adalah bahwa suatu ras hewan yang mewabah secara berkala akan membuat musuh, pemangsa, atau parasitnya mengalami masa 'panen' dan 'paceklik'. Jika jadwal wabah-wabah ini diatur hati-hati agar terjadi dalam sebilangan prima tahun sekali, musuh-musuhnya akan jauh lebih kesulitan untuk menyelaraskan pola ini dengan daur hidup mereka sendiri. Jika wabah tonggeret meledak 14 tahun sekali, misalnya, mereka bisa saja dieksploitasi oleh spesies parasit yang memiliki daur hidup 7 tahunan. Gagasan yang ganjil, tapi tidak lebih ganjil dari fenomena itu sendiri. Kita sungguh-sungguh tidak tahu apa yang istimewa dari 13 dan 17 tahun. Yang penting bagi konteks kita di sini adalah pasti ada *sesuatu* yang istimewa dengan kedua bilangan tersebut, karena tiga spesies tonggeret yang berbeda telah secara sendiri-sendiri berkonvergensi ke pola itu.

Contoh-contoh konvergensi dalam skala besar terjadi ketika dua atau lebih benua terpisah untuk waktu yang lama, tapi 'cara-cara kerja' yang paralel diadopsi oleh hewan-hewan yang tidak berkaitan di masing-masing benua tersebut. Istilah 'cara-cara kerja' di sini berarti cara hidup, seperti menggali lubang bagi cacing, menggali terowongan bagi semut, memburu herbivora besar, makan daun. Evolusi konvergen dari beraneka ragam cara kerja mamalia di benua-benua Amerika Selatan, Australia, dan Dunia Lama adalah contohnya.

Benua-benua ini dulu pernah bergandeng. Karena usia hidup kita diukur dengan satuan dasawarsa, dan bahkan peradaban dan wangsa manusia diukur hanya dalam satuan abad, kita terbiasa berpikir bahwa peta dunia, garis-garis luar benua itu, sudah baku. Teori bahwa benua-benua itu bergeser terpisah sudah diajukan dahulu sekali oleh geofisikawan Jerman Alfred Wegener, tapi sebagian besar orang menertawakannya hingga lama setelah Perang Dunia Kedua. Fakta bahwa Amerika Selatan dan Afrika tampak seperti dua keping teka-teki *jigsaw* memang diakui, tetapi diasumsikan sebagai kebetulan yang membikin geli belaka. Dalam salah satu revolusi tercepat dan terlengkap yang pernah dikenal sains, teori 'pergeseran benua' yang tadinya kontroversial kini diterima secara universal dengan nama tektonika lempeng. Bukti bahwa benua-benua itu telah bergeser, bahwa Amerika Selatan memang memisah dari Afrika misalnya, melimpah banyaknya, tapi buku ini bukan tentang geologi dan saya tidak akan menjabarkannya. Bagi kita, poin pentingnya adalah bahwa skala waktu bergesernya benua-benua tersebut sama dengan skala waktu berevolusinya garis-garis keturunan hewan, dan kita tidak dapat mengabaikan pergeseran benua kalau ingin memahami pola-pola evolusi hewan di benua-benua tersebut.

Hingga sekitar 100 juta tahun yang lalu, Amerika Selatan masih berdempet dengan Afrika di sisi timur dan dengan Antartika di sisi selatan. Antartika berdempet dengan Australia, dan India berdempet dengan Afrika via Madagaskar. Maka dahulu ada satu benua selatan yang besar, yang kita sebut Gondwanaland, yang terdiri dari kesatuan daratan yang sekarang kita kenal dengan Amerika Selatan, Afrika, Madagaskar, India, Antartika, dan Australia. Ada pula satu benua utara yang besar yang disebut Laurasia, yang terdiri dari daratan yang kini kita kenal dengan Amerika Utara, Greenland, Eropa, dan Asia (selain India). Amerika Utara dahulu tidak tersambung dengan Amerika Selatan. Kira-kira 100 juta tahun yang lalu terjadi pemisahan daratan akbar, dan sejak itu benua-benua tersebut perlahan-lahan bergerak menuju posisinya sekarang (dan tentu akan terus bergerak ke depannya). Afrika berdempet dengan Asia via Arabia dan menjadi bagian dari benua besar yang sekarang kita sebut Dunia Lama. Amerika Utara bergeser menjauh dari Eropa, Antartika bergeser ke selatan ke lokasi esnya sekarang. India memisahkan diri dari Afrika

dan beranjak menyeberangi perairan yang sekarang dikenal sebagai Samudera India, dan akhirnya mendesak ke sisi selatan Asia dan menaikkan daratan tinggi Himalaya. Australia bergeser menjauh dari Antartika ke laut terbuka, menjadi benua pulau yang berkilo-kilometer jauhnya dari mana saja.

Pecahnya Gondwanaland, benua besar belahan selatan, ini kebetulan dimulai di era dinosaurus. Ketika Amerika Selatan dan Australia pecah dan memulai kurun pengucilannya yang panjang dari bagian-bagian lain dunia, masing-masing membawa serta kargo dinosaurusnya sendiri, dan juga hewan-hewan lain yang lebih tidak mencolok yang kemudian menjadi leluhur dari mamalia modern. Ketika, belakangan, untuk alasan yang belum dipahami dan merupakan subjek bagi spekulasi, dinosaurus (kecuali kelompok dinosaurus yang kini kita sebut burung) punah, mereka semua punah dari seluruh muka bumi. Hal ini membuka 'lapangan kerja' yang lowong bagi hewan-hewan penghuni daratan. Kekosongan ini sebagian besar diisi, selama kurun waktu jutaan tahun evolusi, oleh mamalia. Poin menariknya bagi kita di sini adalah bahwa terdapat tiga kekosongan independen, dan ketiganya diisi secara independen oleh mamalia di Australia, Amerika Selatan, dan Dunia Lama.

Semua mamalia primitif yang kebetulan berada di ketiga wilayah ini ketika dinosaurus hampir serentak hilang dari lapangan kerja besar adalah hewan-hewan kecil dan sepele, barangkali nokturnal, yang tadinya dibayangi dan digagahi dinosaurus. Di tiga wilayah ini, mereka bisa saja berevolusi ke arah yang secara radikal berlainan. Sampai batas tertentu, inilah yang terjadi. Di Dunia Lama tidak ada satu hewan pun yang menyerupai kungkang tanah besar Amerika Selatan, yang kini sudah punah itu. Di antara beraneka ragam mamalia Amerika Selatan, ada marmot raksasa (sudah punah), yang ukurannya sebesar badak modern tapi hewan pengerat (saya terpaksa bilang badak 'modern' karena fauna Dunia Lama mencakup badak raksasa sebesar rumah dua lantai). Tapi walaupun masing-masing dari ketiga benua tersebut menghasilkan mamalia khasnya sendiri, pola besar evolusi di ketiga wilayah ini sama. Di ketiga wilayah tersebut mamalia yang kebetulan sudah ada sejak awal mulai menyebar dalam evolusi, dan menghasilkan satu hewan spesialis untuk tiap cara kerja yang, seringkali, memiliki kemiripan mencolok dengan hewan spesialis padanannya di dua wilayah yang lain. Tiap cara kerja, baik itu menggali liang, berburu hewan besar, merumput di padang, dan seterusnya, merupakan ihwal dari evolusi konvergen yang independen di dua atau tiga benua terpisah tersebut. Selain tiga tapak utama evolusi independen ini, pulau-pulau yang lebih kecil seperti Madagaskar punya kisah-kisah menarik yang serupa, tapi tidak saya bahas di sini.

Kecuali mamalia aneh yang bertelur dari Australia – platipus berparuh bebek dan pemakan semut berduri – semua mamalia modern masuk ke dalam salah satu dari dua kelompok besar. Kedua kelompok tersebut adalah marsupialia (yang bayi-bayinya terlahir kecil sekali dan kemudian diasuh di dalam kantong) dan plasentalia (kita semua sisanya). Marsupialia mendominasi Australia dan plasentalia Dunia Lama, sementara di Amerika Selatan kedua kelompok ini sama-sama memainkan peran penting. Amerika Selatan rumit karena terpapar gelombang invasi sporadis oleh mamalia dari Amerika Utara.

Panggung sudah siap, sekarang kita saksikan beberapa tokoh lakonnya: cara kerja dan konvergensi itu sendiri. Salah satu cara kerja penting di sini adalah pemanfaatan dataran berselimutkan rerumputan yang dikenal dengan beragam nama: pangonan, pastura, sabana, dll. Para praktisi cara kerja ini meliputi golongan kuda (spesies utamanya di Afrika disebut zebra dan ragamnya di gurun disebut keledai), dan golongan lembu, seperti bison di Amerika utara, yang kini diburu hingga hampir punah. Herbivora lazimnya memiliki usus yang sangat panjang, yang

mengandung aneka bakteri peragi, karena rumput merupakan makanan berkualitas buruk dan perlu proses pencernaan panjang. Alih-alih menerapkan interval makan, mereka biasanya memamah, hampir-hampir tanpa henti. Debit besar bahan tumbuhan mengalir di isi perut mereka seperti sungai, sepanjang hari. Hewan-hewan ini umumnya sangat besar, dan kerap bergerak dalam kawanan besar. Tiap-tiap herbivora besar ini merupakan gudang makanan berharga bagi pemangsa mana saja yang mampu memanfaatkannya. Konsekuensi dari hal ini, seperti kita lihat nanti, adalah timbulnya suatu cara kerja yang khusus menangani tugas sulit menangkap dan memangsa mereka. Itulah tugas pemangsa. Dan yang saya maksud dengan ‘suatu’ cara kerja di sini adalah sehimpunan ‘sub-cara kerja’: singa, macan tutul, citah, anjing hutan, dan dubuk semuanya berburu dengan cara khas mereka sendiri. Sub-divisi serupa juga dijumpai pada herbivora, dan pada seluruh ‘cara kerja’ lainnya.

Herbivora memiliki indra tajam yang mereka pakai untuk terus mewaspadai pemangsa, dan mereka biasanya mampu berlari sangat kencang untuk kabur darinya. Acapkali kaki-kaki hewan herbivora ini panjang dan langkai, dan mereka biasanya berlari dengan ujung jari-jari kaki, yang melalui evolusi telah memanjang dan diperkuat khusus. Bagian di ujung jari-jari khusus ini membesar dan mengeras, dan kita menyebutnya kuku. Lembu punya dua jari besar di ujung-ujung tiap kaki: kuku ‘belah’ yang biasa. Kuda pun sama kecuali bahwa, barangkali karena kebetulan historis, mereka berlari hanya dengan satu jari kaki saja, bukan dua. Satu jari kakinya ini dahulu merupakan jari tengah dari lima jari kaki purbanya. Jari-jari kaki yang lain itu hampir hilang sepenuhnya selama masa evolusi, kendati ada kalanya muncul kembali dalam kejadian ‘kemunduran’ ganjil.

Nah, Amerika Selatan, seperti kita lihat tadi, terisolasi selama kurun berevolusinya kuda dan lembu di bagian-bagian lain dunia ini. Tetapi Amerika Selatan memiliki daratan rumput luasnya sendiri, dan kelompok herbivora besar di kawasan ini berevolusi untuk bisa memanfaatkan sumber daya tersebut. Ada raksasa besar mirip badak yang tak ada hubungannya dengan badak yang sebenarnya. Tengkorak sebagian herbivora mula Amerika Selatan menunjukkan bahwa mereka ‘menciptakan’ belalai sendiri, terpisah dari hewan gajah yang sebenarnya. Sebagian mirip unta, sebagian tampak seperti bukan makhluk bumi (saat ini), atau seperti khimaera aneh hewan-hewan modern. Kelompok yang disebut litopterna memiliki kaki yang bukan main miripnya dengan kaki kuda, tapi sama sekali tidak terkait dengan kuda. Kemiripan dangkal ini menipu seorang ahli dari Argentina di abad kesembilan belas yang menyangka, dengan sikap bangga nasionalis yang bisa dimaklumi, bahwa inilah leluhur semua kuda di seluruh dunia. Faktanya, litopterna mirip kuda secara permukaan saja, dan konvergen. Kehidupan daratan rumput amat serupa di seluruh dunia, dan kuda serta litopterna secara sendiri-sendiri mengevolusikan sifat-sifat yang sama untuk mengatasi masalah-masalah kehidupan di daratan rumput. Khususnya, litopterna, seperti kuda, kehilangan semua jari kaki mereka kecuali jari tengah di setiap kaki, yang membesar menjadi sendi bawah kaki dan menumbuhkan kuku. Kaki seekor litopterna hampir tidak bisa dibedakan dari kaki seekor kuda, tapi kedua hewan ini hanya kerabat jauh saja.

Di Australia, para penjelajah dan perumputnya sangat berbeda – kanguru. Kanguru juga perlu bergerak cepat, tetapi mereka melakukannya dengan cara lain. Alih-alih mencongklang sempurna dengan empat kaki seperti kuda (dan kemungkinan juga seperti litopterna), kanguru menyempurnakan gaya lari yang berbeda: lompat dua kaki dengan seutas ekor besar penyeimbang tubuh. Kurang berfaedah kalau kita berdebat soal gaya lari mana yang ‘lebih baik’. Keduanya sama-sama sangat mangkus kalau tubuh berevolusi sedemikian rupa untuk

memanfaatkannya dengan sempurna. Kuda dan litopterna kebetulan mencongklang dengan empat kaki, sehingga kaki-kaki mereka pun hampir identik. Kanguru kebetulan melompat dengan dua kaki, sehingga memiliki kaki-kaki belakang besar dan ekor yang unik (paling tidak setelah dinosaurus). Kanguru dan kuda tiba di titik akhir yang berbeda dalam ‘ruang hewan’, kemungkinan karena perbedaan yang bersifat kebetulan dalam hal titik awalnya.

Beralih ke para pemakan daging yang dijauhi para perumpit besar ini, kita temukan beberapa konvergensi menakjubkan lainnya. Di Dunia Lama, kita ketahui ada pemburu besar seperti serigala, anjing, dubuk, dan kucing besar – singa, harimau, macan tutul, dan citah. Kucing besar yang baru-baru ini punah adalah (‘harimau’) gigi sabel, yang dinamai demikian karena gigi taring kolosalnya yang mencuat ke bawah dari rahang atas di depan nganga yang sudah pasti mengerikan. Baru-baru ini saja ada kucing atau anjing di Australia atau Dunia Baru (puma dan jaguar baru-baru ini saja berevolusi dari kucing-kucing Dunia Lama). Tapi di kedua benua tersebut, padanan marsupialnya ada. Di Australia, *thylacine*, atau ‘harimau’ marsupialia (sering disebut harimau Tasmania karena bertahan hidup sedikit lebih lama di sana daripada di daratan utama Australia), secara tragis tersingkir punah, dibantai besar-besaran karena dianggap ‘hama’ dan dijadikan ‘hewan buruan’ oleh manusia (masih ada sedikit asa bahwa hewan ini mungkin masih bertahan hidup di bagian-bagian terpencil Tasmania, wilayah-wilayah yang saat ini justru sedang terancam kerusakan demi kepentingan penyediaan ‘lapangan kerja’ bagi manusia). Omong-omong, hewan ini jangan disangka *dingo* (anjing Australia), yang memang anjing sejati, yang dibawa ke Australia belum lama ini oleh manusia (aborigin). Film sinema yang dibuat pada 1930an mengenai harimau Tasmania yang terakhir diketahui, mondar-mandir gelisah dalam kandang sepinya di kebun binatang, menunjukkan hewan yang bukan main miripnya dengan anjing, sifat marsupialnya hanya kentara sedikit lewat pembawaan tulang panggul dan kaki belakangnya yang agak tak mirip anjing, mungkin karena kantongnya. Bagi pencinta anjing, merenungkan pendekatan alternatif terhadap rancangan tubuh anjing ini, pengelana evolusi yang berjalan di jalur lain yang searah tapi terpisah 100 juta tahun ini, hewan yang sebagian mirip anjing tapi sebagian lagi sama sekali asing dan alien ini, merupakan pengalaman yang menggugah. Mungkin mereka hama bagi manusia, tapi manusia hama yang jauh lebih besar bagi mereka; saat ini tidak ada lagi harimau Tasmania yang tersisa dan surplus manusia luar biasa banyaknya.

Di Amerika Selatan pun tidak ada anjing atau kucing sejati selama kurun panjang waktu isolasi yang tengah kita bahas ini tapi, seperti di Australia, padanan marsupialnya ada. Barangkali yang paling dahsyat adalah *Thylacosmilus*, yang tampak persis ‘harimau’ gigi sabel yang baru saja punah dari Dunia Lama, bahkan lebih-lebih dari itu kalau kita perhatikan lagi. Nganga belatinya lebih lebar lagi dan, saya bayangkan, lebih mengerikan lagi. Namanya menyiratkan hubungan dekat-tapi-dangkalnya dengan si gigi sabel (*Smilodon*) dan serigala Tasmania (*Thylacinus*), tapi dalam hal leluhur, hewan ini sangat jauh dari keduanya. Hewan ini sedikit lebih dekat dengan harimau Tasmania karena sama-sama marsupialia, tetapi keduanya mengevolusikan rancangan karnivora besarnya sendiri-sendiri di benua yang berbeda; terpisah satu sama lain dan dari para karnivora plasental, kucing dan anjing sejati Dunia Lama.

Australia, Amerika Selatan, dan Dunia Lama punya sejumlah besar contoh evolusi konvergen jamak lainnya. Di Australia ada ‘tikus tanah’ marsupialia, sekilas hampir tak dapat dibedakan dari tikus-tikus tanah di benua-benua lainnya, tetapi berkantong, mencari makan dengan cara yang sama seperti tikus tanah lainnya dan memiliki cakar depan yang besar dan kuat untuk mengais liang. Ada pula tikus berkantong di Australia, walau dalam hal ini kemiripannya tidak

begitu lekat dan cara cari makannya pun agak berbeda. Makan semut (dan di sini ‘semut’ merupakan istilah umum yang juga meliputi rayap – konvergensi lain yang nanti akan kita lihat) merupakan satu ‘cara kerja’ yang digeluti beragam mamalia konvergen. Hewan-hewan ini dapat dipecah ke dalam sub-divisi seperti pemakan semut penggali liang, pemakan semut pemanjat pohon, dan pemakan semut yang melanglang di permukaan tanah. Di Australia, seperti bisa kita duga, ada pemakan semut marsupialia. Disebut *Myrmecobius*, hewan ini memiliki moncong panjang yang cekung, yang menjulur ke dalam sarang-sarang semut, dan lidah panjang yang lengket yang dipakai untuk menyapu bersih mangsanya. Hewan ini merupakan pemakan semut yang bermukim di tanah. Australia juga memiliki pemakan semut penggali liang: pemakan semut berduri. Hewan ini bukan marsupialia, melainkan anggota kelompok mamalia yang bertelur, monotremata, yang begitu jauh dari kita (manusia bersempu lebih dekat dengan hewan marsupialia dibandingkan dengan mamalia bertelur ini). Pemakan semut berduri ini pun memiliki moncong panjang yang lancip, tetapi duri-duri di punggungnya membuatnya sekilas lebih mirip landak daripada pemakan semut biasa lainnya.

Amerika Selatan bisa saja dengan mudah memiliki pemakan semut marsupial, di samping ‘harimau’ gigi sabel marsupialnya, tetapi ternyata memakan semut sudah lebih dahulu menjadi cara kerja mamalia plasental. Pemakan semut terbesar masa kini adalah *Myrmecophaga* (bahasa Yunani untuk ‘pemakan semut’), pemakan semut besar pelanglang tanah dari Amerika Selatan dan barangkali merupakan spesialis pemakan semut paling ekstrem di dunia. Seperti *Myrmecobius*, marsupialia dari Australia, hewan ini memiliki moncong yang panjang dan lancip, sangat panjang dan lancip malah, dan lidah yang panjang dan bukan main lengketnya. Amerika Selatan juga memiliki pemakan semut kecil pemanjat pohon, yang merupakan sepupu dekat *Myrmecophaga* dan tampak seperti miniatur dan versi lebih tidak ekstrem darinya, dan rupa perantara ketiganya. Kendati merupakan mamalia plasental, para pemakan semut ini sangat jauh dari semua hewan plasentalia Dunia Lama. Mereka bagian dari famili Amerika Selatan yang unik, yang juga mencakup armadilo dan kungkang. Famili plasental kuno ini hidup bersama marsupialia dari masa-masa awal isolasi benua tersebut.

Pemakan semut Dunia Lama meliputi berbagai spesies trenggiling di Afrika dan Asia, mulai dari tipe pemanjat pohon hingga tipe penggali, yang tubuhnya agak mirip buah pinus dengan moncong-moncong lancip. Di Afrika juga ada babi tanah aneh (‘beruang semut’), yang setengah spesialis dalam hal gali-menggali. Satu fitur yang mencirikan semua pemakan semut, baik yang marsupial, monotremata, atau plasental, adalah tingkat metabolisme tubuhnya yang amat sangat rendah. Tingkat metabolisme tubuh adalah kecepatan bakar ‘api’ kimiawi di dalam tubuh hewan-hewan ini, yang paling mudah diukur sebagai suhu darah. Ada kecenderungan bahwa tingkat metabolisme tubuh bergantung pada ukuran badan mamalia pada umumnya. Hewan-hewan yang lebih kecil cenderung memiliki tingkat metabolisme tubuh yang lebih tinggi, persis mesin mobil kecil yang cenderung berputar lebih cepat dari mesin mobil besar. Tapi sebagian hewan memiliki tingkat metabolisme tubuh yang tinggi untuk ukuran tubuhnya, dan pemakan semut, dari keturunan dan kemiripan mana pun, cenderung memiliki tingkat metabolisme tubuh yang sangat rendah untuk ukurannya. Tidak jelas mengapa bisa begitu, tetapi fitur ini sangat mencolok konvergensinya di antara hewan-hewan yang tidak memiliki kesamaan selain kebiasaannya memakan semut, dan hampir pasti hal ini berkaitan dengan kebiasaan makan mereka itu.

Seperti telah kita lihat, seringkali ‘semut’ yang dimakan pemakan semut sebetulnya bukan semut, tetapi rayap. Rayap kerap juga disebut ‘semut putih’, tetapi mereka ini justru berkerabat dengan kecoak, bukan semut sejati, yang berkerabat dengan lebah dan tawon. Rayap sekilas

mirip semut karena mereka secara konvergen telah mengadopsi kebiasaan yang sama. Atau tepatnya, aneka kebiasaan yang sama, karena terdapat banyak cabang cara kerja semut/rayap, dan kedua hewan ini telah mengadopsi sebagian besar dari cara-cara tersebut secara sendiri-sendiri. Sebagaimana sering terjadi dalam evolusi konvergen, perbedaan sama mencoloknya dengan kemiripan.

Semut dan rayap sama-sama hidup dalam koloni besar yang sebagian besar terdiri dari para pekerja mandul dan tak bersayap, yang baktinya ditujukan bagi produksi sangkil kasta-kasta reproduktif bersayap yang terbang untuk mendirikan koloni-koloni baru. Perbedaan menariknya, pada semut semua pekerjaanya betina mandul, sementara pada rayap pekerjaanya jantan dan betina mandul. Koloni semut dan rayap sama-sama memiliki satu (atau kadang beberapa) ‘ratu’ bertubuh besar, kadang (pada semut pun rayap) besarnya mengerikan. Pada semut maupun rayap, angkatan kerjanya sama-sama dapat diisi oleh kasta-kasta spesialis seperti prajurit. Kadang mereka ini mesin tempur yang amat berdedikasi, terutama dalam hal rahang-rahang besarnya (pada semut, tapi pada rayap, ‘moncong meriam’ untuk perang kimia), sampai-sampai mereka tidak bisa makan sendiri dan terpaksa disuapi oleh para pekerja tan-prajurit. Spesies semut tertentu sejajar dengan spesies rayap tertentu. Contohnya, kebiasaan budidaya jamur telah muncul, secara sendiri-sendiri, pada semut (di Dunia Baru) dan rayap (di Afrika). Semut (atau rayap) mencari bahan tanaman yang tidak mereka cerna sendiri, tetapi dibuat menjadi kompos yang mereka pakai untuk bertani jamur. Jamur itulah yang mereka makan. Tempat tumbuh jamur ini, pada kasus semut dan rayap, tidak lain ada di sarang-sarang semut atau rayap itu sendiri. Kebiasaan budidaya jamur juga telah ditemukan secara independen dan konvergen (lebih dari sekali) oleh beberapa spesies kumbang.

Ada juga konvergensi-konvergensi menarik di dalam kelompok semut. Kendati sebagian besar koloni semut hidup bermukim di sarang yang tetap, rupa-rupanya cara hidup berkelana dengan sepasukan besar tentara penjarah juga bisa diterapkan. Sebutannya: kebiasaan legiuner. Memang semua semut meramban dan mencari makan, tapi kebanyakan mereka kembali ke sarang dengan barang-barang beslahan, dan sang ratu serta pinak eraman tetap tinggal di sarang. Di pihak lain, dalam kebiasaan berkelana secara legiuner, pasukan tentara membawa serta sang ratu dan pinak eraman bersama mereka. Telur dan larva digendong di rahang-rahang pekerja. Di Afrika, kebiasaan legiuner ini telah dikembangkan oleh semut safari (siafu). Di Amerika Tengah dan Selatan, ‘semut tentaranya’ mirip sekali dengan semut siafu dalam hal kebiasaan dan perawakannya. Tapi mereka tidak berkerabat dekat. Mereka sudah pasti mengevolusikan ciri cara kerja ‘ketentaraan’ secara independen dan konvergen.

Semut siafu dan semut tentara sama-sama memiliki koloni yang luar biasa besar, hingga sejuta pada semut tentara, hingga 20 juta pada semut siafu. Keduanya memiliki masa nomaden yang diselingi masa ‘stataris’, berupa perkemahan atau ‘bivak’ yang relatif stabil. Semut tentara dan semut siafu, atau koloni-koloni mereka yang sama-sama seperti satuan-satuan bak ameba, merupakan pemangsa kejam tak kenal ampun di rimbanya masing-masing. Keduanya memabat habis hewan apa pun yang ada di jalan mereka, dan keduanya menebar hawa haru biru di tanahnya sendiri. Penduduk desa di berbagai wilayah Amerika Selatan diketahui terbiasa mengosongkan seisi desa mereka ketika pasukan besar semut tentara mendekat, dan kembali ketika legiun tersebut telah lewat, menyapu bersih setiap kecoa, laba-laba, dan kalajengking dari atap-atap jerami sekalipun. Waktu kecil dulu di Afrika, saya ingat saya lebih takut pada semut siafu daripada singa atau buaya. Patut kita menjernihkan pamor hebat hewan ini dengan

mengutip kata-kata Edward O. Wilson, otoritas terkemuka untuk dunia persemutan yang juga penulis buku *Sociobiology*:

Berikut ini jawaban yang saya kemukakan untuk pertanyaan tentang semut yang paling sering diajukan kepada saya: Tidak, semut siafu bukan teror hutan yang sesungguhnya. Walaupun koloni semut siafu merupakan 'binatang' dengan bobot lebih dari 20 kg dan memiliki 20 juta mulut dan sengat dan sudah barang tentu merupakan ciptaan terhebat dalam dunia serangga, ia tetap tidak sepadan dengan cerita-cerita seram yang dikisahkan tentangnya. Lagi pula, gerumut semut siafu hanya dapat melewati semeter tanah setiap tiga menit. Tikus semak yang biasa saja bisa menghindar, apalagi manusia dan gajah, dan mengamati-hiruk-pikuk kerubut semut ini dengan santai, objek yang sebetulnya lebih cocok disebut aneh dan ajaib daripada jahat, titik puncak kisah evolusi yang memang berbeda dari mamalia tetapi tetap masih mungkin terbayangkan di dunia ini.

Ketika sudah dewasa di Panama saya menyingkir dan mengamati-padanan Dunia Baru dari semut siafu yang saya takuti waktu kecil dulu di Afrika, mengalir di samping saya seperti sungai beriak, dan saya bisa bersaksi atas keanehan dan keajaiban mereka. Berjam-jam pasukan legiun tersebut berbaris lewat, berjalan tumpang-tindih di atas tanah, sembari saya menunggu sang ratu. Akhirnya muncullah dia, dan hadiratnya luar biasa. Mustahil kita bisa melihat tubuhnya. Baginda ratu muncul semata-mata sebagai gerak ombak hiruk-pikuk semut pekerja, serupa bola peristaltik yang menggelegak berisi semut-semut dengan lengan yang kait-mengait. Beliau ada di suatu tempat di tengah-tengah gelegak bola semut pekerja ini, sementara di sekelilingnya barisan prajurit berjaga mengancam dengan rahang menganga, siap membunuh dan mati mempertahankan sang ratu. Saking penasaran ingin melihat ratu semut: saya menusuk-nusuk bola semut pekerja itu dengan tongkat panjang, sia-sia mencoba menciduknya. Secepat kilat 20 prajurit membenamkan capit kekar nan besar mereka ke tongkat saya, barangkali tak sudi melepasnya, sementara lusinan tamtama lainnya mengerubuti tongkat itu, membuat saya sigap melepaskannya.

Saya tak kunjung bisa mengintip sang ratu, tapi di suatu tempat di dalam bola mendidih itulah ia berada, bank pusat data, repositori DNA induk dari seantero koloninya. Para prajurit dengan capit menganga itu siap mati demi ratunya, bukan karena mereka cinta sang ibu, bukan karena mereka dilatih dalam idealisme kepahlawanan, tapi karena otak mereka dan rahang mereka dibangun oleh gen-gen yang dimeteraikan dari cetakan induk yang dibawa di dalam tubuh ratu semut itu sendiri. Mereka berperilaku layaknya prajurit gagah berani karena telah mewarisi gen-gen dari garis silsilah panjang para ratu leluhur yang hidupnya, dan gen-gennya, telah diselamatkan para prajurit yang sama gagah beraninya seperti mereka. Para prajurit saya ini telah mewarisi, dari ratunya kini, gen-gen yang sama dengan yang diwarisi para prajurit lama dari ratu-ratu leluhur mereka. Para prajurit saya ini mengawal salinan-salinan induk dari petunjuk-petunjuk yang membuat mereka melakukan pengawalan tersebut. Mereka mengawal kearifan para leluhur, Tabut Perjanjian. Pernyataan-pernyataan aneh ini akan saya jernihkan di bab berikutnya.

Saya merasakan keanehan ini dulu, serta keajaibannya, bukan tak bercampur dengan terungkitnya lagi rasa takut yang sudah setengah terlupakan, tetapi teralih-rupakan dan disempurnakan dengan pemahaman seorang dewasa, yang tidak saya punya waktu kecil dulu di Afrika, tentang makna dari semua pertunjukan itu. Disempurnakan juga dengan pengetahuan bahwa kisah pasukan legiun ini telah mencapai titik kulminasi evolusi yang sama bukan satu kali, tetapi dua. Walau sangat mirip, mereka ini bukan semut siafu dari mimpi buruk kanak-kanak saya, tetapi sepupu-sepupu jauhnya yang hidup di Dunia Baru. Mereka melakukan hal yang sama dengan semut siafu, untuk alasan yang sama. Malam sudah tiba dan saya pun pulanglah, kembali menjadi anak kecil yang kena sima, tetapi bersuka cita dalam dunia pemahaman baru yang telah menggantikan kengerian kelim yang saya alami di benua Afrika.

BAB 5

Kuasa dan Arsip

Rinai DNA di luar sana. Di bantaran kanal Oxford di bawah kebun saya, ada sebuah pohon willow besar, dan pohon ini memompa benih-benih berbulu halus ke udara. Tidak ada gerak udara yang ajek, dan benih-benih ini melayang ke luar ke segala arah dari pohon itu. Ke hulu dan hilir kanal, sejauh teropong saya memandang, airnya putih melulu dengan bintik-bintik empuk mengambang, dan bisa dipastikan bintik-bintik ini telah menyelimuti tanah dengan radius yang sama ke arah-arah lainnya juga. Serat kapas ini sebagian besar terbuat dari selulosa, jauh lebih besar dari kapsul mungil yang mengandung DNA, informasi genetiknya. Kandungan DNA ini memang cuma sebagian kecil saja dari ukuran totalnya. Tapi mengapa saya bilang rinai DNA dan bukan rinai selulosa? Jawabannya karena DNA itulah pokoknya. Bulu halus selulosa itu, kendati lebih tebal, hanyalah parasut, yang akan dibuang. Seluruh penampakan ini, serat kapas, bunga panjang terkulai, pohon, semuanya, menyokong satu kegiatan saja: penyebaran DNA ke sekeliling negeri. Bukan sembarang DNA, tapi DNA yang karakter-karakter tersandinya mengimla petunjuk-petunjuk khusus untuk membangun pohon-pohon willow yang akan mencurahkan satu generasi baru benih-benih berbulu halus lainnya. Noktah-noktah berbulu halus ini, secara harfiah, menyebarkan petunjuk cara membuat dirinya sendiri. Mereka ada karena para leluhurnya berhasil melakukan hal yang sama. Rinai petunjuk di luar sana; rinai program; rinai algoritme penumbuh pohon penyebar bulu. Ini bukan metafora, melainkan kebenaran gamblang semata. Sama gamblangnya dengan ungkapan rinai disket *floppy*.

Gamblang dan benar, tapi belum lama dipahami. Beberapa tahun yang lalu, kalau Anda bertanya kepada hampir semua ahli biologi tentang apa yang istimewa dengan benda hidup dibandingkan benda nonhidup, ia akan bercerita tentang zat istimewa yang disebut protoplasma. Protoplasma tidak seperti zat lainnya; ia hidup, giat, berdenyut, kenyal-kenyal, 'peka' (cara saklek untuk bilang 'responsif'). Kalau Anda potong-potong tubuh hidup sampai kepingan terkecilnya, Anda akan sampai pada bintik protoplasma murni. Suatu kali di abad lalu, padanan Professor Challenger, tokoh rekaan Arthur Conan Doyle, di kehidupan nyata mengira bahwa 'selut globigerina' di dasar laut itu protoplasma murni. Saat saya masih anak sekolah, para penulis buku ajar masih membahas protoplasma kendati, waktu itu, pengetahuan mereka mestinya sudah lebih baik. Dewasa ini Anda tidak pernah mendengar atau melihat kata tersebut. Sudah mati, semati phlogiston dan eter universal. Tidak ada yang istimewa dengan zat-zat yang menjadi bahan pembuat benda-benda hidup. Benda-benda hidup merupakan kumpulan molekul, seperti semua benda lainnya.

Yang istimewa adalah bahwa molekul-molekul ini disatukan dalam pola-pola yang jauh lebih rumit dari molekul-molekul benda nonhidup, dan penyatuan ini dilakukan dengan mengikuti program-program, perangkat-perangkat petunjuk cara penyusunannya, yang dibawa serta dalam tubuh organisme-organisme itu sendiri. Mungkin mereka memang bergetar dan berdenyut dan berkenyal-kenyal dengan 'kepekaan', dan berpijar dengan kehangatan 'jiwa', tapi semua khazanah ini muncul secara kebetulan. Yang bersemayam di dalam inti setiap benda hidup bukanlah api, bukanlah napas, bukanlah 'percikan nyawa'. Melainkan informasi, kata, petunjuk. Kalau mau metafora, jangan bayangkan api dan percikan dan napas. Bayangkan semiliar karakter

digital yang berlainan, yang terpatir pada loh-loh kristal. Kalau Anda ingin memahami kehidupan, jangan bayangkan gel dan selut yang giat dan berdenyut, bayangkan teknologi informasi. Inilah yang saya isyaratkan di bab sebelumnya, ketika saya merujuk ratu semut sebagai bank data sentral.

Kebutuhan dasar bagi teknologi informasi tingkat lanjut adalah semacam wadah penyimpanan dengan sejumlah besar lokasi memori. Tiap lokasi harus mampu berada di dalam satu dari sejumlah keadaan yang berlainan. Memang seperti itulah teknologi informasi *digital* yang kini mendominasi dunia kecerdasan kita. Ada jenis teknologi informasi lain yang didasarkan pada informasi *analog*. Informasi pada rekaman gramofon biasa bersifat analog. Informasi disimpan di dalam alur bergelombang. Informasi pada cakram laser modern (sering disebut '*compact disc*', istilah yang disayangkan karena tidak informatif dan biasanya dilafalkan secara keliru dengan penekanan pada suku kata pertama) bersifat digital, disimpan di serangkaian lubang-lubang sangat kecil, yang masing-masing pasti ada atau pasti tidak ada: tidak ada setengah ada dalam hal ini. Itulah fitur diagnostik sebuah sistem digital: unsur-unsur fundamentalnya pasti ada dalam satu keadaan atau pasti ada dalam keadaan lain, tanpa setengah-setengah, tanpa antara atau kompromi.

Teknologi informasi gen bersifat digital. Fakta ini ditemukan oleh Gregor Mendel di abad lalu, walaupun tidak seperti itu cara Mendel mengemukakannya. Mendel menunjukkan bahwa warisan dari kedua orang tua tidak kita terima dalam bentuk campuran. Warisan itu kita terima dalam partikel-partikel diskret. Untuk tiap-tiap partikel ini, kita mewarisinya atau tidak sama sekali. Sebetulnya, seperti diketengahkan R. A. Fisher, salah satu pendiri aliran yang kini dikenal sebagai neo-Darwinisme, fakta pewarisan partikulat ini senantiasa ada di depan kita, setiap kali kita berpikir tentang seks. Kita mewarisi atribut-atribut dari orang tua laki-laki dan perempuan, tapi setiap kita itu laki-laki atau perempuan, bukan hermafrodit. Setiap bayi baru lahir memiliki *probabilitas* yang kira-kira setara untuk mewarisi kelaki-lakian atau keperempuanan, tetapi setiap bayi mewarisi salah satunya saja, dan tidak merupakan paduan keduanya. Kini kita tahu bahwa hal yang sama juga berlaku untuk semua partikel warisan kita. Partikel-partikel tersebut tidak bercampur, tetapi tetap berlainan dan terpisah saat dikocok dan dikocok ulang di sepanjang jalan menelusuri generasi demi generasi. Tentu, kerap tampak ada pencampuran yang kental dalam efek-efek yang diakibatkan unit-unit genetik ini pada tubuh. Kalau seorang tinggi kawin dengan seorang pendek, atau seorang berkulit hitam dengan seorang berkulit putih, keturunan mereka sering di antara keduanya. Tapi penampakan pencampuran ini berlaku hanya untuk efek-efek pada tubuh, dan disebabkan oleh sejumlah efek-efek kecil dari partikel-partikel yang besar jumlahnya. Partikel-partikel itu sendiri tetap terpisah dan berlainan ketika diteruskan ke generasi berikutnya.

Perbedaan antara pewarisan campur dan pewarisan partikulat telah menjadi pokok teramat penting dalam sejarah gagasan evolusi. Di masa Darwin, setiap orang (kecuali Mendel yang, aneh sendiri, terabaikan hingga akhir hayatnya) berpikir bahwa pewarisan adalah pencampuran. Seorang insinyur dari Skotlandia, Fleeming Jenkin, mengemukakan bahwa fakta (dulu memang disangka fakta) pewarisan campur sepenuhnya mengesampingkan seleksi alam sebagai teori evolusi yang masuk akal. Ernst Mayr dengan agak rampus mengomentari bahwa risalah Jenkin 'berdasar pada semua prasangka dan kesalahpahaman yang biasa dimiliki ilmuwan fisis'. Begitupun, Darwin sangat gundah dengan argumen Jenkin. Argumen ini dengan berandang diutarakan Jenkin dalam perumpamaan laki-laki kulit putih yang terdampar di sebuah pulau yang dihuni orang-orang 'negro':

biarpun ia punya setiap kelebihan yang dapat kita bayangkan ada dalam diri seorang kulit putih dibandingkan orang-orang pribumi; biarpun dalam perjuangan bertahan hidup peluangnya untuk berumur panjang jauh lebih unggul ketimbang para kepala suku pribumi; tapi tetap saja tidak bisa disimpulkan bahwa, setelah sejumlah generasi atau selama-lamanya, para penduduk pulau itu akan berkulit putih. Tokoh kita yang terdampar ini kemungkinan besar menjadi raja; ia akan membunuh begitu banyak orang kulit hitam dalam perjuangan hidupnya; ia akan punya begitu banyak istri dan anak, sementara para hambanya akan hidup dan mati membujang ... Mutu-mutu si kulit putih kita ini barang tentu memampukannya berpanjang usia, tapi tetap ia tak berdaya, sebanyak apa pun generasi yang diturunkannya, untuk mengubah keturunan para hambanya itu menjadi putih ... Di generasi pertama akan ada lusinan blasteran muda yang cerdas, jauh lebih unggul dalam kecerdasan rata-rata ketimbang kaum negro. Kita boleh menduga, selama beberapa generasi, takhta akan diduduki oleh raja yang kulitnya kurang-lebih berwarna kuning, tapi dapatkah kita percaya bahwa seisi pulau itu lambat-laun akan dihuni oleh penduduk berkulit putih, atau berkulit kuning sekali pun, atau bahwa para penghuni pulau itu akan memperoleh tenaga, semangat, kecerdasan, kesabaran, kendali diri, daya tahan, sifat-sifat yang memampukan tokoh kita untuk membunuh begitu banyak leluhur mereka, dan memperanakan begitu banyak keturunan; sifat-sifat yang akan dipilih oleh proses bertahan hidup, walaupun proses itu bisa memilih?

Jangan terpengaruh dengan asumsi-asumsi rasis keunggulan kulit putih di situ. Di masa Jenkin dan Darwin, asumsi seperti ini memang tidak dipertanyakan, sebagaimana asumsi spesiesis kita tentang *hak asasi manusia*, martabat *manusia*, dan kekudusan nyawa *manusia* tidak dipertanyakan di masa ini. Argumen Jenkin dapat kita bahasakan ulang dalam analogi yang lebih netral. Kalau Anda mencampur cat putih dengan cat hitam, hasilnya adalah cat abu-abu. Kalau Anda mencampur cat abu-abu dengan cat abu-abu, Anda tidak dapat merekonstruksi warna putih atau warna hitam aslinya lagi. Campur-mencampur cat ini tidak jauh amat dari pandangan pra-Mendelian tentang hereditas, dan bahkan budaya populer zaman sekarang pun kerap mengungkapkan hereditas dalam kerangka pikir percampuran 'darah'. Argumen Jenkin adalah argumen tentang penjenuhan. Seiring melanjutnya generasi, dengan asumsi dasar pewarisan campur, variasi akan menjadi jenuh. Keceragaman akan makin pekat. Lama-kelamaan, tidak ada lagi variasi yang tersisa untuk dikerjakan seleksi alam.

Kendati pasti terdengar masuk akal, argumen ini bukan hanya argumen untuk membantah seleksi alam, tetapi lebih berupa argumen melawan fakta tak terelakkan tentang hereditas itu sendiri! Nyata-nyata tidak *benar* kalau variasi itu hilang seiring bertambahnya generasi. Orang-orang masa kini *tidak* lebih saling mirip dibandingkan orang-orang di masa kakek-nenek kita dahulu. Variasi tetap terjaga. Terdapat sehimpunan variasi untuk diseleksi. Hal ini ditunjukkan secara matematis pada 1908 oleh W. Weinberg, dan secara terpisah oleh matematikawan *nyentrik* G. H. Hardy, yang kebetulan, seperti tercatat dalam buku taruhan kampusnya (dan saya), pernah bertaruh 'Setengah sen dari hartanya sampai mati, bahwa besok matahari akan terbit' dengan seorang kolega. Tapi butuh R. A. Fisher dan kolega-koleganya, para pendiri genetika populasi modern, untuk menyusun jawaban lengkap bagi Fleeming Jenkin dalam kerangka teori genetika *partikel* Mendel. Ini ironi di kala itu karena, seperti akan kita lihat di Bab 11, pada awal abad ke-20 para pengikut Mendel yang terkemuka menganggap diri mereka anti-Darwinian. Fisher dan kolega-koleganya menunjukkan bahwa seleksi Darwinian masuk akal, dan masalah yang diketengahkan Jenkin terselesaikan dengan elegan: jika yang berubah dalam evolusi adalah *kekerapan* nisbi dari partikel-partikel, atau gen-gen, herediter yang berlainan, masing-masing dari padanya ada atau tidak ada di dalam tubuh si individu tersebut. Darwinisme pasca-Fisher disebut neo-Darwinisme. Sifat digitalnya bukan merupakan fakta insidental yang kebetulan berlaku dalam teknologi informasi genetik. Kedigitalan barangkali memang prasyarat penting yang harus ada agar Darwinisme dapat bekerja.

Dalam teknologi elektronik kita, lokasi-lokasi digital yang diskret ini hanya memiliki dua tataran, yang biasa diwakili dengan 0 dan 1 walau Anda boleh saja menggantinya dengan tinggi dan rendah, nyala dan mati, atas dan bawah: yang penting, kedua tataran ini harus berbeda, dan informasi dari pola tatarannya dapat 'dibaca' sehingga dapat memengaruhi sesuatu. Teknologi

elektronik menggunakan berbagai media fisik untuk menyimpan semua 1 dan 0 ini, termasuk cakram magnetis, pita magnetis, kartu dan pita ceklok, dan ‘cip-cip’ terpadu berisi banyak unit semikonduktor kecil.

Media penyimpanan utama di dalam benih-benih pohon willow, semut, dan semua sel hidup lainnya tidak bersifat elektronis tetapi kimiawi. Yang dimanfaatkan adalah jenis-jenis molekul tertentu yang mampu melakukan proses ‘pemolimeran’, yaitu menggabungkan rantai molekul dengan panjang tak tertentu. Ada banyak jenis polimer. Contohnya, ‘polietilena’ terbuat dari rantai-rantai panjang molekul kecil yang disebut etilena – etilena yang dipolimerkan. Pati dan selulosa adalah gula yang dipolimerkan. Beberapa polimer, alih-alih menjadi rantai seragam satu molekul kecil seperti etilena, merupakan rantai dengan dua atau lebih molekul kecil yang berbeda jenis. Begitu heterogenitas semacam ini masuk ke rantai polimer, teknologi informasi secara teoretis menjadi mungkin. Jika ada dua jenis molekul kecil di rantai tersebut, keduanya dapat dianggap sebagai, berturut-turut, 1 dan 0, dan segera saja informasi, berapa pun jumlahnya, apa pun jenisnya, dapat disimpan, asalkan rantainya cukup panjang. Polimer-polimer khusus yang digunakan oleh sel-sel hidup disebut polinukleotida. Ada dua famili utama polinukleotida dalam sel-sel hidup, yang singkatnya disebut DNA dan RNA. Keduanya merupakan rantai molekul-molekul kecil yang disebut nukleotida. DNA dan RNA adalah rantai-rantai heterogen, dengan empat jenis nukleotida yang berbeda. Tentunya, di sinilah terletak kesempatan untuk menyimpan informasi. Alih-alih dua tataran (1 dan 0) saja, teknologi informasi sel-sel hidup menggunakan empat tataran, yang lazimnya diwakili dengan huruf A, T, C, dan G. Prinsip teknologi informasi biner dua-tataran seperti yang kita punya hanya berbeda tipis dengan prinsip teknologi informasi empat-tataran seperti yang dimiliki sel hidup.

Seperti sudah saya sebutkan di Bab 1, dalam satu saja sel manusia terdapat daya tampung informasi yang cukup untuk menyimpan tiga atau empat kali lipat 30 jilid lengkap *Encyclopaedia Britannica*. Saya tidak tahu angkanya untuk benih pohon willow atau semut, tapi akan sama mengejutkannya. Dalam DNA sebiji benih bunga lili atau dalam satu sel sperma salamander saja ada cukup ruang untuk menyimpan 60 kali lipat *Encyclopaedia Britannica*. Beberapa spesies ameba, yang dengan zalim disebut ‘primitif’, memiliki informasi yang setara banyaknya dengan 1.000 *Encyclopaedia Britannica* di dalam DNA mereka.

Yang membuat takjub, hanya sekitar 1 persen saja dari informasi genetik di dalam, misalnya, sel-sel manusia, yang tampak benar-benar terpakai: kira-kira sepadan dengan satu jilid *Encyclopaedia Britannica*. Tidak diketahui mengapa 99 persen lainnya ada. Di buku saya sebelumnya, saya mengajukan bahwa yang 99 persen itu mungkin parasit, yang memanfaatkan upaya 1 persen sisanya, teori yang belakangan ini telah diterima ahli biologi molekuler dengan nama ‘DNA egois’. Bakteri memiliki daya tampung informasi yang 1.000 kali lebih kecil dari sel manusia, dan kemungkinan hampir semuanya digunakan: ruang yang tersisa untuk parasit sempit sekali. DNA-nya ‘hanya’ bisa menampung satu salinan Kitab Perjanjian Baru!

Para insinyur rekayasa genetik telah memiliki teknologi untuk menuliskan Kitab Perjanjian Baru atau lainnya ke dalam DNA bakteri. ‘Makna’ dari simbol-simbol dalam semua teknologi informasi bersifat manasuka, dan kita boleh-boleh saja menggunakan 26 huruf dari abjad kita untuk kombinasi, katakanlah triplet, dari abjad 4 huruf DNA (dan ada cukup ruang untuk semua bentuk huruf kecil dan besar serta 12 karakter tanda baca juga). Sayangnya, perlu sekitar lima abad-manusia untuk menuliskan Kitab Perjanjian Baru ke dalam bakteri, jadi saya rasa tidak ada yang mau repot-repot melakukannya. Tapi kalau dilakukan, kecepatan reproduksi bakteri itu sama dengan kecepatan mencetak 10 juta eksemplar Kitab Perjanjian Baru dalam sehari, idaman

setiap misionaris kalau saja orang bisa membaca abjad DNA tapi, ah, karakter-karakternya begitu kecil sehingga 10 juta eksemplar Kitab Perjanjian Baru itu dapat serentak menari di atas permukaan kepala jarum pentol.

Memori komputer elektronik biasanya diklasifikasikan menjadi ROM dan RAM. ROM singkatan dari *read only memory* (memori ‘baca saja’). Definisi lebih ketat: memori ‘tulis sekali, baca berkali-kali’. Pola semua 0 dan 1 itu ‘dipatrikan’ (*‘burned’*) ke dalamnya sekali saja pada saat pembuatannya. Pola ini kemudian tidak berubah sepanjang usia memori tersebut, tapi informasinya dapat dibaca berkali-kali. Memori elektronik lainnya, disebut RAM, dapat ‘ditulis’ (orang lama-lama cepat terbiasa dengan janggalnya jargon komputer ini) dan bisa juga dibaca. Oleh karena itu, RAM dapat melakukan segala hal yang dapat dilakukan ROM, bahkan lebih. Kepanjangannya ini menyesatkan, jadi tidak usah saya sebut saja. Poin mengenai RAM adalah bahwa Anda dapat menaruh pola 1 dan 0 apa pun ke dalam bagian mana pun darinya, seberapa kali pun. Memori sebuah komputer kebanyakan RAM. Saat saya mengetikkannya, kata-kata ini langsung masuk ke RAM, dan program pengolah kata yang mengendalikan segala sesuatunya juga berada di dalam RAM, kendati secara teoretis dapat dipatrikan ke dalam ROM dan tidak pernah diubah lagi. ROM dipakai untuk repertoar tetap program-program baku, yang diperlukan lagi dan lagi, dan yang tidak bisa Anda ubah meskipun ingin.

DNA adalah ROM. Bisa dibaca jutaan kali, tapi hanya ditulis sekali – ketika pertama sekali dirakit pada saat kelahiran sel tempatnya bersemayam. DNA di dalam sel-sel individu mana pun ‘dipatrikan’, dan tidak pernah berubah sepanjang hayat individu tersebut, kecuali karena kemerosotan acak yang langka sekali terjadi. Begitupun, DNA dapat disalin. DNA digandakan setiap kali sel membelah. Pola nukleotida A, T, C, dan G disalin persis sama ke dalam DNA masing-masing dari triliunan sel baru yang terbentuk ketika seorang bayi tumbuh besar. Saat individu baru dibuahi, pola data yang baru dan unik ‘dipatrikan’ ke dalam ROM DNA-nya, dan pola tersebut akan sama melulu selama hidupnya. Pola itu disalinkan ke dalam semua selnya (kecuali sel-sel reproduksi, yang hanya menerima separuh salinan acak dari DNA-nya saja, seperti akan kita lihat nanti).

Semua memori komputer, ‘ROM’ maupun ‘RAM’, itu *beralamat*. Ini berarti bahwa setiap lokasi di dalam memori itu memiliki label, biasanya berupa angka, tetapi ini hanya kesepakatan yang manusuka. Kita perlu memahami beda antara *alamat* dan *muatan* dari suatu lokasi memori. Tiap lokasi dikenali melalui alamatnya. Misalnya, dua huruf pertama dari bab ini, ‘Hu’, saat ini berada di lokasi 6446 dan 6447 RAM komputer saya, yang memiliki jumlah total lokasi RAM 65.536. Di kali yang lain, muatan dari kedua lokasi tersebut bisa berbeda. Muatan dari sebuah lokasi adalah apa pun yang baru saja dituliskan di dalam lokasi itu. Tiap lokasi ROM juga memiliki alamat dan muatan. Bedanya, tiap lokasi memiliki muatan yang itu-itu saja, selamanya.

DNA disusun di sepanjang benang-benang kromosom, seperti pita-pita komputer yang panjang. Semua DNA di dalam setiap sel kita dialamati dengan cara yang sama seperti ROM komputer, atau pita komputer. Angka dan nama yang kita gunakan untuk melabeli suatu alamat bersifat manusuka, persis seperti memori komputer juga. Yang pokok, satu lokasi tertentu di dalam DNA saya sama persis sesuai dengan satu lokasi tertentu di dalam DNA Anda: alamat keduanya sama. *Muatan* dari lokasi DNA 321762 saya bisa jadi sama atau berbeda dengan muatan lokasi 321762 Anda. Tapi lokasi 321762 di sel saya berada di posisi yang sama persis dengan lokasi 321762 di sel Anda. ‘Posisi’ di sini berarti posisi di sepanjang benang kromosom tertentu. Posisi fisik pasti dari seutas kromosom di dalam sebuah sel tidak penting. Malah, kromosom itu mengambang di dalam cairan sehingga posisi fisiknya berbeda-beda, tapi setiap

lokasi di sepanjang kromosom itu beralamat sama persis secara urutan linier di sepanjang kromosom, sebagaimana halnya setiap lokasi di sepanjang pita komputer tetap berada di alamat yang sama, sekalipun pita tersebut terserak di lantai, tidak tergulung rapi. Kita semua, manusia, memiliki susunan *alamat* DNA yang sama, tetapi tidak berarti *muatan* dari semua alamat tersebut sama. Inilah sebab utama mengapa kita semua berbeda-beda.

Spesies-spesies lain tidak memiliki susunan *alamat* yang sama. Simpanse, misalnya, punya 48 kromosom; kita 46. Benar-benar tidak mungkin kita membandingkan muatan, secara alamat demi alamat, karena alamat-alamat tersebut tidak saling sejajar di sepanjang sawar spesiesnya. Akan tetapi, spesies-spesies yang berkerabat dekat, seperti simpanse dan manusia, memiliki potongan-potongan besar muatan berdekatan yang begitu mirip sehingga dapat dengan mudah kita kenali sebagai ‘pada dasarnya sama’, sekalipun kita tidak bisa menggunakan sistem pengalamatan yang persis sama untuk kedua spesies ini. Hal yang mendefinisikan sebuah spesies adalah semua anggotanya memiliki sistem pengalamatan yang sama untuk DNA mereka. Dengan beberapa pengecualian kecil, semua anggota spesies punya jumlah kromosom yang sama, dan setiap lokasi di sepanjang satu kromosom memiliki nomor lawan persisnya di posisi yang sama di sepanjang kromosom yang berhubungan dengannya pada semua anggota lain dari spesies itu. Yang bisa berbeda di antara para anggota suatu spesies adalah muatan dari lokasi-lokasi tersebut.

Perbedaan dalam hal muatan di masing-masing individu muncul seperti ini, dan di sini harus saya tekankan bahwa konteks bicara saya adalah spesies-spesies yang bereproduksi secara seksual, seperti kita. Sel sperma dan sel telur masing-masing mengandung 23 kromosom. Tiap lokasi beralamat di salah satu sel sperma saya sesuai dengan sebuah lokasi beralamat tertentu di setiap sel sperma saya yang lain, dan di setiap sel telur (atau sperma) Anda. Semua sel saya yang lain mengandung 46 – dua kali lipatnya. Alamat-alamat yang sama digunakan dua kali pada masing-masing dari sel-sel ini. Setiap sel mengandung dua kromosom 9, dan dua versi lokasi 7230 di sepanjang kromosom 9. Seperti halnya pada anggota-anggota lain spesies tersebut, muatan keduanya bisa jadi sama atau beda. Ketika satu sel sperma, dengan 23 kromosomnya, dibuat dari satu sel tubuh dengan 46 kromosomnya, sel sperma tersebut hanya memperoleh satu saja dari dua salinan tiap lokasi yang beralamat. Yang mana yang diperolehnya bisa dianggap acak. Begitu pula dengan sel telur. Alhasil, setiap sel sperma yang dihasilkan dan setiap sel telur yang dihasilkan itu unik secara *muatan* lokasi-lokasinya, walaupun sistem pengalamatannya identik dalam seluruh anggota suatu spesies (dengan pengecualian-pengecualian yang cukup minor untuk kita abaikan). Ketika sperma membuahi sel telur, tentu saja 46 kromosom terbentuk lengkap; dan keempat puluh enam kromosom ini kemudian diduplikasi di dalam semua sel embrio yang tengah berkembang itu.

Tadi saya katakan bahwa ROM tidak dapat ditulisi kecuali pada saat awal pembuatannya. Hal yang sama juga berlaku bagi DNA di dalam sel, dengan pengecualian kesalahan penyalinan acak yang kadang-kadang terjadi. Tapi kiranya bank data kolektif yang terdiri dari ROM-ROM seluruh spesies itu dapat ditulisi secara konstruktif. Ketahanan hidup nonacak dan keberhasilan reproduksi individu-individu di dalam spesies tersebut secara efektif ‘menuliskan’ instruksi-instruksi cara bertahan hidup yang lebih baik ke dalam memori genetik kolektif dari spesies itu seiring bertambahnya generasi. Perubahan evolusi yang dialami suatu spesies didominasi perubahan-perubahan jumlah salinan tiap-tiap dari aneka *muatan* yang terdapat pada tiap-tiap lokasi DNA beralamat, dari generasi ke generasi. Tentu saja, setiap salinan itu senantiasa harus berada di dalam tubuh individu spesiesnya. Tapi yang penting dalam evolusi adalah perubahan-perubahan kekerapan muatan alternatif pada tiap alamat di dalam *populasi*. Sistem

pengalamatannya tetap sama, tetapi profil statistis muatan lokasinya berubah seiring abad berganti abad.

Sesekali, tapi jarang sekali, sistem pengalamatannya itu sendiri yang berubah. Simpanse memiliki 24 pasang kromosom dan kita 23. Leluhur kita dan simpanse sama, jadi di satu titik pada jalur silsilah kita atau jalur silsilah simpanse pasti terjadi perubahan dalam jumlah kromosomnya. Kita yang kehilangan satu kromosom (dua bergabung satu), atau simpanse yang ketambahan satu (satu membelah dua). Pasti ada setidaknya satu individu yang memiliki jumlah kromosom yang berbeda dari orang tuanya. Ada pula perubahan-perubahan yang sesekali terjadi dalam seluruh sistem genetiknya. Seluruh kodenya, seperti kita lihat nanti, kadang bisa tersalin ke kromosom-kromosom yang sama sekali berbeda. Kita tahu karena kita menemukan, terserak di sekitar kromosom-kromosom tersebut, rentetan-rentetan panjang teks DNA yang identik.

Ketika informasi di dalam sebuah memori komputer telah dibaca dari suatu lokasi tertentu, salah satu dari dua hal ini bisa terjadi. Dituliskan di suatu tempat yang lain, atau terlibat dalam semacam ‘aksi’. Dituliskan di suatu tempat yang lain berarti disalin. Kita telah melihat bahwa DNA siap disalin dari satu sel ke sel yang baru, dan bahwa potongan-potongan DNA dapat disalin dari satu individu ke individu yang lain: anaknya. ‘Aksi’ itu lebih rumit. Untuk komputer, salah satu jenis aksi adalah eksekusi instruksi program. Di dalam ROM komputer saya, nomor-nomor lokasi 64489, 64490, dan 64491, bila disandingkan, mengandung sebuah pola muatan tertentu – 1 dan 0 yang – saat ditafsirkan sebagai instruksi, membuat bunyi bip di pelantang suara kecil komputer tersebut. Pola bitanya adalah 10101101 00110000 11000000. Pola bita ini tidak secara inheren bersifat *ngebip* atau bising. Efeknya terhadap pelantang suara tidak dapat didefinisikan dari pola itu sendiri. Efek tersebut muncul hanya karena cara rangkai komponen-komponen lain komputer itu. Demikian pula, pola-pola di dalam kode empat-huruf DNA memang menghasilkan efek, misalnya pada warna mata atau perilaku, tetapi efek-efek ini tidak inheren di dalam pola-pola data DNA itu sendiri. Efeknya muncul semata-mata sebagai akibat dari cara kembang komponen-komponen lain embrio tersebut, yang pada gilirannya dipengaruhi oleh efek-efek dari pola-pola bagian-bagian lain dari DNA itu. Interaksi antargen ini akan menjadi tema utama Bab 7.

Sebelum dapat dilibatkan ke dalam aksi apa pun, simbol-simbol kode DNA harus diterjemahkan dahulu ke dalam media lain. Pertama-tama, simbol-simbol itu ditranskripsikan ke simbol-simbol RNA yang sesuai persis dengannya. RNA juga memiliki abjad empat huruf. Dari sini, simbol-simbol itu diterjemahkan ke dalam polimer jenis lain yang disebut polipeptida atau protein. Dapat juga disebut asam poliamino, karena unit-unit dasarnya memang asam-asam amino. Terdapat 20 jenis asam amino di dalam sel-sel hidup. Semua protein hayati merupakan rantai-rantai yang terbuat dari 20 komponen penyusun dasar ini. Meski berupa rantai asam amino, mayoritas protein tidak selamanya panjang menjuntai. Tiap rantai menggulung menjadi simpul rumit, yang bentuk pastinya ditentukan oleh urutan asam-asam aminonya. Oleh karena itu, bentuk simpul ini selalu sama untuk setiap rangkaian asam amino tertentu. Rangkaian asam amino ini pada gilirannya ditentukan dengan pasti oleh simbol-simbol kode di sepanjang utas DNA (melalui RNA sebagai perantaranya). Maka dari itu, kiranya bentuk gulung tiga-dimensi dari sebuah protein ditentukan oleh rangkaian satu-dimensi dari simbol-simbol kode di dalam DNA.

Prosedur penerjemahannya melibatkan ‘kode genetik’ tiga-huruf yang masyhur itu. Kode genetik ini serupa kamus, yang di dalamnya masing-masing dari 64 ($4 \times 4 \times 4$) kemungkinan *triplet* simbol-simbol DNA (atau RNA) diterjemahkan ke dalam salah satu dari 20 asam amino

atau simbol ‘berhenti membaca’. Ada tiga tanda baca ‘berhenti membaca’ ini. Banyak dari asam amino dikodekan dengan lebih dari satu triplet (seperti bisa Anda duga, karena ada 64 triplet, tapi hanya ada 20 asam amino saja). Seluruh penerjemahan ini, dari ROM DNA yang berurut ketat hingga bentuk protein tiga-dimensinya yang karat, merupakan prestasi luar biasa teknologi informasi digital. Langkah-langkah selanjutnya yang diambil gen untuk memengaruhi tubuh hampir-hampir mirip cara komputer.

Setiap sel hidup, sel bakteri sekalipun, dapat dibayangkan sebagai pabrik kimia raksasa. Pola-pola DNA, atau gen-gen, mengarahkan efeknya dengan memengaruhi rangkaian peristiwa di dalam pabrik kimia tersebut, dan ini dilakukan lewat pengaruhnya terhadap bentuk tiga-dimensi molekul-molekul protein. Kata raksasa mungkin terasa janggal, mengingat yang kita bicarakan cuma sel, apalagi kalau Anda ingat bahwa 10 juta sel bakteri muat di permukaan kepala jarum pentol. Tapi Anda juga mesti ingat bahwa tiap-tiap sel ini mampu menampung seluruh isi Kitab Perjanjian Baru dan, selain itu, ukurannya *memang* raksasa kalau diukur dari jumlah mesin canggih yang dikandungnya. Tiap mesin ini merupakan molekul protein besar, yang disatukan di bawah pengaruh untai DNA tertentu. Molekul-molekul protein yang disebut enzim merupakan mesin, dalam arti bahwa tiap molekul ini menyebabkan terjadinya reaksi kimia tertentu. Tiap jenis mesin protein menghasilkan produk kimia tertentu sendiri. Untuk melakukannya, ia memanfaatkan bahan-bahan mentah yang mengambang di sekitar sel, yang kemungkinan besar merupakan produk mesin-mesin protein lainnya. Untuk membayangkan ukuran mesin-mesin protein ini, masing-masing terbuat dari sekitar 6.000 atom, besar sekali untuk ukuran sebuah molekul. Sebuah sel mengandung kira-kira sejuta keping besar perangkat ini, dan ada lebih dari 2.000 jenisnya, yang masing-masing menjalankan satu operasi khusus di dalam pabrik kimia tersebut – sel itu sendiri. Ciri produk-produk kimia dari enzim-enzim itulah yang membuat sel memiliki bentuk dan perilakunya sendiri.

Karena semua sel tubuh mengandung gen yang sama, mungkin tampak mengejutkan kalau semua sel tubuh tidak sama. Alasannya karena sebuah subset gen yang berbeda *dibaca* di berbagai jenis sel, sementara yang lainnya diabaikan. Pada sel-sel hati, bagian-bagian ROM DNA yang secara spesifik relevan dengan bangunan sel-sel ginjal tidak dibaca, begitu juga sebaliknya. Bentuk dan perilaku sebuah sel bergantung pada gen-gen mana di dalam sel tersebut yang sedang dibaca dan diterjemahkan ke dalam produk-produk proteinnya. Ini kemudian bergantung pula pada zat-zat kimia yang sudah ada di dalam sel itu, yang sebagian bergantung pada gen-gen mana yang sebelumnya telah dibaca di dalam sel tadi, dan sebagian lagi bergantung pada sel-sel jirannya. Ketika satu sel membelah menjadi dua, kedua sel anak itu tidak mesti sama. Dalam sel telur yang dibuahi, misalnya, zat-zat kimia tertentu berkumpul di satu ujung sel itu, sementara zat-zat kimia yang lain di ujung satunya. Ketika sel yang terpolarisasi seperti itu membelah, kedua sel anaknya menerima alokasi bahan kimia yang berbeda. Ini berarti di dalam kedua sel anak tersebut gen yang dibaca adalah gen yang berbeda. Dari titik itu semacam proses divergensi yang menguat sendiri pun berlanjut. Bentuk akhir seluruh tubuh, ukuran kaki-tangannya, perangkaian kawat-kawat otaknya, pewaktuan pola-pola perilakunya, semua ini merupakan konsekuensi tidak langsung dari interaksi di antara beraneka macam sel, yang perbedaannya timbul, pada gilirannya, melalui berbagai gen yang dibaca. Proses-proses divergensi ini paling baik dianggap otonom lokal seperti prosedur ‘rekursif’ dari Bab 3, bukan sebagai proses yang dikoordinir dalam desain sentral yang besar.

‘Aksi’, dalam konteks bab ini, adalah hal yang dimaksud seorang ahli genetika ketika membahas ‘efek fenotipik’ dari sebuah gen. DNA berefek pada tubuh, pada warna mata,

renyuknya rambut, kekuatan perilaku agresif, dan ribuan atribut lain, yang semuanya disebut efek-efek fenotipik. DNA mengarahkan efek-efek ini awalnya secara lokal, setelah dibaca oleh RNA dan diterjemahkan ke dalam rantai-rantai protein, yang kemudian memengaruhi bentuk dan perilaku sel. Inilah satu dari dua cara membaca informasi yang ada di dalam pola DNA. Cara lain: dengan menduplikasinya ke dalam unting DNA baru. Inilah penyalinan yang kita bahas tadi.

Ada perbedaan fundamental di antara kedua rute transmisi informasi DNA ini: transmisi vertikal dan horizontal. Informasi ditransmisikan secara vertikal ke DNA lain di dalam sel-sel (yang membentuk sel-sel lain) yang membentuk sel sperma atau sel telur. Karenanya ia ditransmisikan secara vertikal ke generasi berikutnya, kemudian, secara vertikal lagi, ke generasi masa depan yang tak terhingga jumlahnya. Saya mengistilahkannya 'DNA arsip'. Ia berpotensi abadi. Suksesi sel-sel tempat berjalannya DNA arsip disebut garis nutfah. Garis nutfah adalah seperangkat sel, di dalam tubuh, yang menjadi pendahulu sel sperma atau sel telur dan karenanya menjadi pendahulu generasi-generasi ke depannya. DNA juga ditransmisikan secara *menyamping* atau horizontal: ke DNA di dalam sel-sel nongaris nutfah seperti sel-sel hati atau sel-sel kulit; ke RNA di dalam sel itu sendiri, kemudian ke protein dan berbagai efek pada perkembangan embrionik, dan karenanya pada rupa dan perilakunya yang dewasa. Anda dapat membayangkan transmisi horizontal dan transmisi vertikal seperti dua subprogram yang disebut PERKEMBANGAN dan REPRODUKSI pada Bab 3.

Seleksi alam itu melulu tentang keberhasilan diferensial DNA rival dalam mentransmisikan dirinya secara vertikal di dalam arsip-arsip spesies tersebut. 'DNA rival' berarti muatan alternatif dari alamat-alamat tertentu di dalam kromosom-kromosom spesies itu. Beberapa gen lebih berhasil dari gen-gen rivalnya dalam bertahan di arsip-arsip tersebut. Walaupun transmisi *vertikal* di sepanjang arsip-arsip spesies tersebut pada akhirnya menentukan arti 'keberhasilan' itu, kriteria keberhasilan itu sendiri biasanya berupa *aksi* yang dilakukan gen pada tubuh, melalui transmisi *menyampingnya*. Ini pun persis seperti model komputer biomorf. Misal, umpamanya pada harimau ada gen tertentu yang, melalui pengaruh menyampingnya dalam sel-sel rahang, membuat gigi sedikit lebih tajam dari gigi yang bakal tumbuh atas pengaruh gen rival. Harimau dengan gigi yang lebih tajam dapat membunuh mangsa dengan lebih efisien dibanding harimau biasa; karena itu keturunannya lebih banyak; karena itu ia meneruskan, secara vertikal, lebih banyak salinan gen penajam gigi tersebut. Tentu saja ia tetap meneruskan semua gen lain yang dimilikinya, tetapi hanya 'gen gigi tajam' saja yang akan mendapati dirinya, *secara purata*, ada dalam tubuh harimau-harimau bergigi tajam. Gen itu sendiri memperoleh manfaat, dalam hal transmisi vertikalnya, dari efek rata-rata yang disebabkan pada seluruh rentetan tubuh-tubuh tersebut.

Kinerja DNA sebagai medium arsip sungguh luar biasa. Dalam hal kemampuan untuk mengawetkan sebuah pesan, ia jauh melampaui loh batu. Sapi dan tumbuhan kacang polong (dan kita semuanya) memiliki sebuah gen yang hampir identik, yang disebut gen H4 histon. Teks DNA-nya sepanjang 306 karakter. Tidak bisa dibayangkan bahwa gen ini menempati alamat yang sama di semua spesies, karena membandingkan label-label alamat di antara spesies itu tidak ada artinya. Tapi bisa dibayangkan bahwa ada teks sepanjang 306 karakter pada sapi, yang hampir identik dengan teks sepanjang 306 karakter pada kacang polong. Sapi dan kacang polong hanya berbeda dua karakter saja dari 306 karakter ini. Kita tidak tahu pasti kapan leluhur sapi dan kacang polong hidup, tapi bukti fosil menunjukkan angkanya antara 1.000 dan 2.000 juta tahun yang

lalu. Sebutlah 1,5 miliar tahun yang lalu. Sepanjang waktu yang (bagi manusia) tak terbayangkan lamanya ini, masing-masing dari kedua silsilah yang mencabang dari leluhur jauhnya itu telah mempertahankan 305 dari 306 karakter yang ada (rata-rata: bisa juga silsilah yang satu mempertahankan semuanya sementara yang lain 304 saja). Dalam kurun ratusan tahun saja, huruf-huruf yang terpahat pada batu nisan sudah tidak terbaca.

Artinya, pelestarian dokumen DNA H4-histon itu lebih mengesankan lagi karena, tidak seperti loh batu, yang bertahan dan melestarikan teksnya itu bukanlah struktur fisiknya. Teks tersebut disalin dan disalin kembali berkali-kali dari generasi ke generasi, seperti naskah-naskah kitab suci berbahasa Ibrani yang menjalani ritual penyalinan oleh ahli kitab setiap 80 tahun sekali untuk mencegahnya usang. Sulit untuk mengira-ngira tepatnya berapa kali dokumen H4 histon telah disalin dan disalin ulang dalam garis silsilah yang berujung pada sapi dari leluhur yang sama dengan kacang polong, tapi kemungkinan tidak kurang dari 20 miliar kali. Sulit juga untuk mencari tolok ukur yang dapat dipakai untuk membandingkan pelestarian lebih dari 99 persen informasi dalam 20 miliar rentetan penyalinan. Tapi mari kita coba membayangkannya dengan analogi permainan bisik-bisik berantai. Bayangkan ada 20 miliar juru ketik duduk berbaris. Panjang barisan ini sama dengan keliling Bumi 500 kali. Juru ketik pertama menulis satu halaman dokumen dan menyerahkannya pada juru ketik di sebelahnya. Ia menyalinnya dan menyerahkan salinannya ke yang berikutnya. Ia menyalinnya lagi dan menyerahkannya ke yang berikutnya, begitu seterusnya. Akhirnya, pesan tersebut sampai di ujung barisan, dan kita membacanya (atau tepatnya cicit ke-12.000 kita, kalau semua juru ketiknya memiliki kecepatan bak sekretaris yang lihai). Seberapa 'setia' isi salinan terakhir itu dengan isi pesan awalnya?

Untuk menjawabnya, kita harus membuat asumsi mengenai akurasi para juru ketiknya. Coba kita balik pertanyaannya. Seberapa piawai harusnya tiap juru ketik itu agar mampu menyamai performa DNA? Jawabannya hampir terlalu menggelikan untuk diutarakan. Setiap juru ketik harus memiliki tingkat kesalahan sekitar satu banding satu triliun; yang berarti, ketikannya harus cukup jitu sehingga dalam mengetik Kitab Injil 250.000 kali sekali duduk ia hanya membuat satu kesalahan saja. Di dunia nyata, seorang sekretaris yang lihai memiliki tingkat kesalahan sekitar satu per halaman. Ini berarti sekitar setengah miliar kali tingkat kesalahan gen H4 histon. Barisan sekretaris sungguhan akan menurunkan kualitas kemiripan salinan dengan teks aslinya dari 100 ke 99 persen saat sekretaris urutan ke-20 dari 20 miliar selesai mengetik salinannya. Di urutan ke-10.000, teks asli yang selamat tersisa kurang dari 1 persen. Titik degradasi yang hampir total ini akan tercapai sebelum 99,9995 persen juru ketik sisanya melihat teks tersebut.

Perbandingan seperti ini memang agak curang, tetapi cukup mencolokkan mata kita. Kesan yang saya munculkan adalah kita sedang mengukur kesalahan penyalinan. Tapi dokumen H4 histon tidak sekadar disalin; ia pun harus berurusan dengan seleksi alam. Histon teramat penting bagi ketahanan hidup. Gen ini digunakan dalam rekayasa struktur kromosom-kromosom. Mungkin memang terjadi banyak sekali kesalahan *penyalinan* gen H4 histon, tetapi organisme mutan tersebut tidak bertahan hidup, atau setidaknya tidak bereproduksi. Agar perbandingannya adil, kita harus berasumsi bahwa di kursi masing-masing juru ketik itu ada pistol, yang diatur sedemikian rupa sehingga kalau ia membuat kesalahan ia langsung ditembak mati, tempatnya digantikan juru ketik cadangan (pembaca yang 'lemah jantung' mungkin lebih suka membayangkan kursi pelontar yang melemparkan juru ketik durjana ini keluar dari barisan, tapi pistol memberi kita gambaran yang lebih realistis tentang seleksi alam).

Jadi, cara mengukur pelestarian DNA ini, dengan melihat jumlah perubahan yang benar-benar terjadi selama waktu geologis, memadukan kesetiaan penyalinan tulen dengan efek-efek saring

seleksi alam. Yang kita lihat sekarang hanyalah keturunan perubahan DNA yang berhasil saja. Keturunan yang tidak selamat tentu saja tidak lagi bersama kita. Bisakah kita mengukur ketepatan penyalinan aktual di lapangan, sebelum seleksi alam bekerja pada tiap generasi gen-gen baru? Ya, ini kebalikan dari hal yang dikenal sebagai kecepatan mutasi, dan bisa diukur. Probabilitas suatu huruf tertentu disalin keliru pada tiap penyalinan ternyata sedikit lebih dari satu berbanding satu miliar. Selisih antara kecepatan mutasi dan kecepatan menubuhnya perubahan ke dalam gen histon selama evolusi, sama dengan nilai efektivitas seleksi alam dalam melestarikan dokumen kuno ini.

Konservatisme gen histon selama miliaran tahun ini luar biasa untuk ukuran genetika. Gen-gen lain lebih cepat berubah, kemungkinan karena seleksi alam lebih toleran dengan variasi-variasi di antaranya. Misalnya, gen-gen pengkode protein yang dikenal sebagai fibrinopeptida berubah dalam evolusi dengan kecepatan yang cukup dekat dengan kecepatan mutasi dasar. Ini mungkin berarti semua kesalahan dalam detail-detail protein-protein ini (yang dihasilkan selama pembekuan darah) tidak banyak berarti bagi organisme tersebut. Gen-gen hemoglobin memiliki kecepatan perubahan yang berada di tengah-tengah histon dan fibrinopeptida. Kemungkinan toleransi seleksi alam terhadap kesalahan-kesalahannya pun sedang. Hemoglobin mengerjakan tugas penting di dalam darah, dan detail-detailnya pun berarti; tetapi beberapa varian alternatifnya tampak mampu mengerjakan tugas ini sama baiknya.

Di sini kita menghadapi hal yang tampak sedikit paradoksal, tapi tidak kalau kita pikirkan lebih jauh. Molekul yang evolusinya paling lambat, seperti histon, ternyata justru yang paling terpapar seleksi alam. Fibrinopeptida merupakan molekul yang perkembangannya paling cepat karena seleksi alam hampir benar-benar mengabaikannya. Molekul ini bebas berkembang sesuai kecepatan mutasi. Hal ini tampak paradoksal karena kita begitu menekankan seleksi alam sebagai daya penggerak evolusi. Karenanya, kalau seleksi alam tidak ada, kita boleh menduga bahwa evolusi tidak ada. Sebaliknya, kita mungkin mengira, dan ini dapat dimaklumi, bahwa ‘tekanan seleksi’ yang kuat berarti evolusi yang cepat. Tapi malah yang kita jumpai adalah bahwa seleksi alam memiliki efek hambat terhadap evolusi. Kecepatan dasar evolusi, ketika seleksi alam alpa, adalah kecepatan maksimal yang mungkin ada. Itu sama artinya dengan kecepatan mutasi.

Tidak betul-betul paradoksal. Kalau kita tilik lebih teliti, kita lihat bahwa tidak mungkin sebaliknya. Evolusi oleh seleksi alam tidak mungkin lebih cepat dari kecepatan mutasi, karena mutasi itu, pada akhirnya, merupakan satu-satunya cara variasi baru bisa memasuki spesies. Yang bisa dilakukan seleksi alam adalah menerima variasi-variasi baru tertentu, dan menolak sisanya. Kecepatan mutasi menjadi ambang batas atas bagi kecepatan laju evolusi. Faktanya, kebanyakan seleksi alam itu berkenaan dengan upaya mencegah perubahan evolusi, ketimbang upaya mewujudkannya. Ini tidak berarti, saya tekankan betul, bahwa seleksi alam itu proses yang murni destruktif. Ia pun bisa juga konstruktif, dengan cara-cara yang akan dijelaskan di Bab 7.

Kecepatan mutasi itu sendiri pun cukup lamban. Ini berarti bahwa, tanpa seleksi alam sekalipun, kinerja kode DNA dalam melestarikan arsipnya itu sangat impresif. Perkiraan konservatifnya adalah bahwa, tanpa seleksi alam, DNA bereplikasi dengan begitu akurat hingga kesalahan penyalinan 1 persen dari karakter-karakter di dalamnya itu baru terjadi setelah lima juta generasi replikasi. Para juru ketik khayalan kita tadi masih tak berdaya diatasi DNA, sekalipun seleksi alam tidak ada. Untuk menyamai DNA tanpa seleksi alam, para juru ketik ini harus mampu mengetik seluruh isi Perjanjian Baru dengan satu kali kesalahan saja. Itu artinya, masing-masing dari mereka harus sekitar 450 kali lebih akurat dari sekretaris biasa di dunia

nyata. Tentu saja angka ini jauh lebih sedikit dari setengah miliar, yang merupakan faktor pembandingan kelebihan-akuratan gen H4 histon *setelah seleksi alam* dari seorang sekretaris biasa; tapi angka ini tetap saja sangat mengesankan.

Tapi saya sudah tidak adil terhadap para juru ketik kita. Saya berasumsi bahwa mereka tidak mampu mengenali kesalahan mereka dan meralatnya. Saya berasumsi bahwa proses selaras akhir naskahnya tidak ada. Kenyataannya, tentu, mereka menjalankan proses selaras akhir itu. Karena itu, barisan miliaran juru ketik saya tidak akan membuat ketepatan salinan terhadap naskah aslinya merosot sesederhana yang saya lukiskan tadi. Mekanisme penyalinan DNA melakukan proses koreksi kesalahan yang sama secara otomatis. Kalau tidak, akurasi menakjubkan seperti yang saya sudah saya gambarkan tidak akan tercapai. Prosedur penyalinan DNA mencakup berbagai proses ‘selaras akhir’. Proses ini justru amat penting karena huruf-huruf kode DNA sama sekali tidak jumud, seperti hieroglif yang dipahatkan pada batu granit. Sebaliknya, molekul-molekul ini begitu kecil – ingat isi Perjanjian Baru yang muat ditaruh di atas kepala paku – sehingga senantiasa diusik oleh desakan-desakan molekul biasa yang terjadi karena panas. Ada aliran tetap, perputaran huruf dalam pesan tersebut. Dalam setiap sel manusia, sekitar 5.000 huruf DNA per hari mengalami degenerasi, dan langsung diganti oleh mekanisme perbaikannya. Kalau mekanisme perbaikannya tidak ada dan berhenti bekerja, pesan tersebut, pelan tapi pasti, sirna. Menyelaraskan akhir teks yang baru disalin itu cuma kasus khusus kerja perbaikan yang biasa. Selaras akhirlah yang banyak bertanggung jawab atas kejituan dan ketepatan luar biasa DNA dalam menyimpan informasi.

Kita telah melihat bahwa molekul-molekul DNA merupakan pusat dari sebuah teknologi informasi spektakuler. Mereka mampu mengemas sejumlah besar informasi digital ke dalam ruang yang amat kecil; dan mereka mampu mengawetkan informasi ini – dengan kesalahan yang amat sangat sedikit, tapi tetap saja ada – untuk waktu yang lama sekali, hingga jutaan tahun. Ke mana kita dibawa oleh fakta-fakta ini? Kita di bawa ke arah suatu kebenaran inti tentang kehidupan di muka Bumi, kebenaran yang saya singgung di paragraf pembuka saya tentang benih pohon willow. Artinya, organisme hidup ada sebagai penyokong DNA, bukan sebaliknya. Belum tampak jernih memang, tapi saya harap Anda terpancing untuk berpikir ke arah sana. Pesan-pesan yang dikandung molekul-molekul DNA hampir-hampir kekal kalau dilihat dari skala waktu masa hidup individu. Masa hidup pesan-pesan DNA (kecuali di beberapa kasus mutasi) diukur dalam unit-unit yang berkisar dari jutaan tahun hingga ratusan juta tahun; atau, dengan kata lain, berkisar dari 10.000 hingga satu triliun masa hidup individu. Tiap organisme mesti dipandang sebagai wahana sementara, tempat pesan-pesan DNA menghabiskan secuil kecil masa hidup geologisnya.

Dunia ini penuh dengan segala yang ada ...! Memang begitu, tapi memangnya kenapa? Segala sesuatu itu ada karena baru-baru ini mengada atau karena punya kualitas yang membuatnya tidak hancur di masa lampau. Batu tidak cepat mengada, tetapi begitu ada, ia keras dan tahan lama. Kalau tidak begitu, ia tidak jadi batu, ia jadi pasir. Dan memang ada yang jadi pasir; itu mengapa ada yang namanya pantai! Yang kebetulan tahan lama itulah yang mengada sebagai batu. Di lain pihak, embun ada bukan karena tahan lama, tetapi karena baru saja mengada dan belum lagi menguap. Tampaknya ada dua jenis ‘kelayakadaan’: jenis embun, yang dapat dirangkum sebagai ‘kemungkinan mengada tapi tidak tahan lama’; dan jenis batu, yang dapat dirangkum sebagai ‘sulit mengada tetapi kemungkinan bertahan lama begitu ada’. Batu itu tahan lama dan embun itu ‘dapat-mengada’. (Saya sudah coba cari kata yang lebih mudah dicerna, tapi tak bisa.)

Kualitas terbaik dari kedua jenis ‘kelayakadaan’ itu ada pada DNA. Molekul-molekul DNA itu sendiri, sebagai entitas fisik, serupa embun. Dalam kondisi yang tepat, mereka mengada dengan sangat cepat, tapi tidak satu pun ada untuk waktu yang lama, dan semuanya akan hancur dalam hitungan beberapa bulan saja. Mereka tidak tahan lama layaknya batu. Tetapi *pola-pola* yang mereka bawa dalam rangkaianannya itu sama tahan lamanya seperti batu terkeras. Pola-pola tersebut sanggup mengada selama jutaan tahun, dan itulah mengapa mereka masih ada hingga saat ini. Perbedaan hakikinya dari embun: embun baru tidak diperanakkan dari embun lama. Embun pasti menyerupai embun yang lain, tapi mereka tidak secara spesifik menyerupai embun ‘induk’nya sendiri. Tidak seperti molekul-molekul DNA, mereka tidak membentuk garis silsilah, dan karenanya tidak mampu meneruskan pesan. Embun mengada lewat penjaan yang semerta, pesan-pesan DNA lewat replikasi.

Truisme seperti ‘dunia ini sarat akan hal yang mampu ada di dunia’ memang remeh, hampir-hampir konyol, sampai kita menerapkannya pada jenis daya tahan yang spesial, daya tahan dalam bentuk silsilah begitu banyak salinan. Pesan-pesan DNA memiliki jenis daya tahan yang berbeda dari batu, dan jenis ke-dapatmengada-an yang berbeda dari embun. Untuk molekul-molekul DNA, ‘mampu ada di dunia’ maknanya sama sekali tidak pasti dan tautologis. ‘Mampu ada di dunia’ ternyata meliputi kemampuan untuk membangun mesin seperti Anda dan saya, hal paling rumit di alam semesta yang kita kenal ini. Kita akan lihat bagaimana bisa demikian.

Pada dasarnya, alasannya adalah karena khazanah DNA yang telah kita kenali ternyata merupakan bahan dasar yang diperlukan untuk proses seleksi kumulatif apa pun. Di model-model komputer kita di Bab 3, dengan sengaja kita padukan ke dalam komputer bahan-bahan dasar seleksi kumulatif. Agar seleksi kumulatif dapat terjadi, beberapa entitas yang khazanahnya membentuk bahan-bahan dasar tersebut harus ada dahulu. Nah, mari kita lihat apa saja bahan-bahan tersebut. Sembari melakukannya, kita tetap ingat fakta bahwa bahan-bahan yang sama, setidaknya dalam bentuknya yang belum sempurna, pasti telah muncul secara semerta di Bumi asal, karena kalau tidak, seleksi kumulatif, dan kehidupan, tidak akan pernah bermula. Yang kita bahas di sini bukan spesifik tentang DNA, tetapi tentang bahan-bahan dasar yang dibutuhkan agar kehidupan bisa timbul di mana pun di alam semesta.

Ketika nabi Yehezkiel berada di lembah penuh tulang, ia bernubuat pada tulang-tulang tersebut agar mereka menyatu. Kemudian ia bernubuat pada tulang-tulang itu dan tumbuhlah daging dan urat-urat padanya. Tapi masih belum ada napas hidup pada tulang-tulang itu. Bahan paling vital, bahan kehidupan, masih kurang. Planet yang mati punya atom, molekul, dan gumpalan besar zat, yang saling berdesak dan berdekap secara acak, sesuai hukum-hukum fisika. Hukum-hukum fisika kadang menyebabkan atom dan molekul menyatu seperti tulang-tulang kering Yehezkiel, kadang memisahkannya. Imbuhan atom yang cukup besar dapat terbentuk, dan dapat pula tercerai-berai kembali. Tapi masih belum ada napas hidup padanya.

Yehezkiel memanggil napas hidup dari empat penjuru angin untuk masuk ke dalam tulang-tulang yang kering itu. Apa bahan vital yang mesti dimiliki sebuah planet mati seperti Bumi awal, kalau ia punya peluang untuk perlahan-lahan hidup, seperti yang dialami planet kita ini? Bukan napas, bukan angin, bukan ramuan ajaib. Bukan zat sama sekali, tapi *sifat*, sifat swareplikasi. Inilah bahan dasar seleksi kumulatif. Sebagai akibat dari hukum-hukum fisika biasa, mestilah mewujud entitas-entitas dengan kemampuan *menyalin-diri* atau, saya istilahkan, *replikator*. Dalam kehidupan modern, peran ini diemban, hampir seluruhnya, oleh molekul-molekul DNA, tapi apa pun yang dapat menghasilkan salinan juga bisa melakukannya. Kita boleh curiga, para replikator pertama di muka Bumi purba bukanlah molekul-molekul DNA.

Mustahil molekul DNA yang sudah sempurna tiba-tiba mengada tanpa bantuan molekul-molekul lain yang biasanya hanya ada dalam sel-sel hidup. Para replikator pertama kemungkinan lebih mentah dan sederhana dari DNA.

Ada dua bahan lain yang diperlukan, yang biasanya timbul dengan sendirinya dari bahan pertama: replikasi-diri itu sendiri. Sesekali, mesti terjadi kesalahan dalam upaya menyalin diri; sistem DNA saja kadang salah, dan tampaknya para replikator pertama di planet Bumi jauh lebih tak menentu. Dan setidaknya sebagian dari para replikator ini mesti *berkuasa* atas masa depannya sendiri. Bahan terakhir ini terdengar lebih seram dari yang sebenarnya. Maksud sebetulnya adalah bahwa sebagian sifat dari para replikator ini mesti berpengaruh atas probabilitas replikasinya. Setidaknya dalam bentuk dasarnya, mungkin inilah akibat tak terelakkan dari fakta dasar replikasi-diri itu sendiri.

Jadi tiap replikator membuat salinan atas dirinya sendiri. Tiap salinan sama dengan aslinya, dan memiliki sifat yang sama dengan aslinya. Tentu saja, di antara semua sifat ini terdapat sifat membuat (kadang disertai kesalahan) *lebih banyak* salinan dirinya sendiri. Jadi, tiap replikator berpotensi menjadi ‘leluhur’ dari garis replikator keturunan yang panjangnya tak terhingga, melesak jauh ke masa depan, dan mencabang untuk berpotensi menghasilkan replikator keturunan yang jumlahnya makin besar. Tiap salinan baru pasti terbuat dari bahan-bahan mentah, komponen penyusun lebih kecil yang berkeliaran. Agaknya para replikator ini berlaku sebagai semacam cetakan, atau templat. Komponen-komponen yang lebih kecil masuk ke dalam cetakan itu sedemikian rupa sehingga tiruan cetakannya pun terbuat. Kemudian, tiruan ini lepas dan mampu berlaku sebagai cetakan sendiri. Karena itu, ada *populasi* replikator yang berpotensi untuk tumbuh. Populasi ini tidak akan tumbuh tak berhingga, karena lambat-laun pasokan bahan mentahnya, unsur-unsur lebih kecil yang masuk ke dalam cetakan itu, akan membatasinya.

Sekarang kita hadirkan bahan kedua dalam argumen ini. Kadang penyalinannya tidak akan sempurna. Kesalahan akan terjadi. Kemungkinan kesalahan tidak akan pernah sirna sepenuhnya dari proses penyalinan mana pun, walaupun probabilitasnya dapat ditekan ke level rendah. Ini yang selalu dikejar produsen produk *hi-fi* (*high-fidelity*), dan proses replikasi DNA, seperti telah kita saksikan, begitu hebat dalam menekan kesalahan. Tapi replikasi DNA modern merupakan urusan teknologi tinggi, dengan teknik-teknik selaras akhir teliti yang telah disempurnakan selama bergenerasi-generasi seleksi kumulatif. Sebaliknya, seperti telah kita lihat, para replikator pertama mungkin berupa perkakas aneh yang relatif mentah dan kikuk.

Nah, kembali ke populasi replikator kita, dan lihat seperti apa jadinya efek penyalinan yang tak menentu ini. Barang tentu, alih-alih munculnya populasi seragam replikator yang identik, yang ada ialah populasi campuran. Kemungkinan banyak dari hasil penyalinan tak menentu ini akan kehilangan sifat replikasi-diri yang dimiliki ‘induk’nya. Tapi beberapa darinya tetap punya sifat replikasi-diri, kendati dari segi yang lain tetap berbeda dari induknya. Salinan-salinan kesalahan ini kemudian diduplikasi dalam populasi tersebut.

Waktu membaca kata ‘kesalahan’, singkirkan dari benak Anda semua asosiasi buruknya. Kesalahan di sini berarti kesalahan dari sudut pandang penyalinan *hi-fi*. Boleh jadi kesalahan tersebut berujung pada penyempurnaan. Saya berani bilang banyak hidangan baru yang elegan tercipta karena seorang juru masak salah saat mencoba mengikuti resepnya. Sejauh saya bisa mengklaim pernah memunculkan ide-ide ilmiah yang orisinal, ide-ide tersebut kadang, tadinya, muncul karena salah paham, atau salah baca, ide-ide orang lain. Kembali ke replikator purba

kita, walau sebagian besar kesalahsalinan mungkin berujung pada menipisnya keefektifan penyalinan, atau simnanya sifat menyalin-diri, sebagian kecil mungkin malah jadi *lebih baik* dalam urusan replikasi-diri dibandingkan replikator induk yang memunculkan mereka.

Apa arti ‘lebih baik’ di sini? Pada akhirnya akan berarti lebih efisien dalam replikasi-diri, tapi apa maksud hal ini dalam praktiknya? Tiba waktunya memperkenalkan ‘bahan’ ketiga. Saya menyebutnya ‘kuasa’, dan nanti Anda akan tahu mengapa. Ketika kita membahas replikasi sebagai proses pencetakan, kita lihat bahwa langkah terakhir dalam proses tersebut mestilah salinan baru lepas dari cetakan lama. Waktu yang dibutuhkan untuk pelepasan ini dapat dipengaruhi sifat yang akan saya sebut ‘daya rekat’ cetakan lama itu. Misalkan dalam populasi replikator kita ini, yang berbeda-beda karena kesalahan penyalinan dahulu saat ‘penurunannya’, beberapa varietas kebetulan lebih rekat dari yang lain. Varietas yang sangat rekat menahan tiap salinan baru rata-rata lebih dari satu jam sebelum akhirnya lepas dan prosesnya dapat dimulai kembali. Varietas yang kurang rekat melepaskan tiap salinan baru kurang dari sedetik setelah pembentukannya. Mana dari kedua varietas ini yang akan mendominasi populasi replikator tersebut? Jawabannya sudah pasti. Kalau hanya ini sifat yang membedakan kedua varietas tersebut, jumlah yang rekat pasti jauh lebih sedikit di dalam populasi itu. Yang tidak rekat menghasilkan salinan-salinan yang tidak rekat seribu kali lebih lekas dari kecepatan yang rekat menghasilkan salinan yang rekat. Varietas dengan daya rekat sedang akan melakukan propagasi-diri dengan kecepatan sedang pula. ‘Tren evolusi’ akan mengarah pada berkurangnya daya rekat.

Hal yang serupa dengan seleksi alam elementer ini telah diduplikasi dalam tabung uji. Ada sebuah virus yang dinamai Q-beta yang hidup sebagai parasit bakteri usus *Escherichia coli*. Q-beta tidak memiliki DNA tetapi mengandung, dan malah didominasi oleh, satu unting RNA molekul terkait. RNA bisa tereplikasi layaknya DNA.

Dalam sel yang normal, molekul-molekul protein dirakit sesuai spesifikasi skema RNA. Inilah salinan skema yang berfungsi, diduplikasi dari skema induk DNA yang disimpan di dalam arsip sel yang berharga. Tapi secara teoretis, bisa dibangun sebuah mesin khusus – sebuah molekul protein seperti mesin-mesin seluler lainnya – yang menduplikasi salinan-salinan RNA dari salinan-salinan RNA lainnya. Mesin seperti itu disebut molekul *RNA-replicase* (sintetase RNA). Sel bakterinya sendiri biasanya tidak berguna dan tidak membangun mesin-mesin ini. Tapi karena sintetase RNA ini cuma molekul protein seperti yang lainnya, mesin-mesin pembangun protein serbaguna dari sel bakteri ini dapat dengan mudah diubah untuk membangunnya, persis seperti peralatan mesin di pabrik mobil yang, di masa perang, dapat dengan cepat diubah untuk membuat amunisi: tinggal mengasupinya dengan cetak biru yang benar saja. Inilah titik masuk virusnya.

Bagian utama virus ini adalah skema RNA Sepintas, ia tidak dapat dibedakan dari semua cetak biru RNA lain yang mengambang di sekitar, setelah diduplikasi dari skema induk DNA bakteri. Tapi kalau Anda membaca ‘catatan kaki’ RNA virus ini, Anda akan menemukan sesuatu yang bengis tertulis di sana. Huruf-hurufnya menguraikan skema untuk membuat sintetase RNA: untuk membuat mesin-mesin yang membuat salinan-salinan skema-skema RNA yang sama persis, yang membuat mesin-mesin yang membuat salinan-salinan skema-skemanya, yang membuat ...

Jadi, pabriknya dibajak oleh cetak biru egois ini. Agaknya, pabriknya memang minta dibajak. Kalau Anda mengisi pabrik dengan mesin-mesin yang begitu canggih sehingga mampu membuat apa pun yang diperintahkan cetak birunya, tidak usah kaget kalau cepat atau lambat muncul

sebuah cetak biru yang memerintahkan mesin-mesin itu untuk membuat salinan dirinya sendiri. Pabrik itu sesak dengan mesin-mesin nakal yang makin banyak jumlahnya, yang gegas membuat cetak biru nakal untuk membuat mesin-mesin baru yang akan memperbanyak dirinya sendiri. Akhirnya, bakteri malang ini pecah dan jutaan virus berhamburan, menginfeksi bakteri baru. Begitulah daur hidup normal virus di alam bebas.

Tadi saya sebut sintetase RNA dan RNA sebagai, berturut-turut, mesin dan cetak biru. Di satu sisi memang begitu (dan nanti bisa diperdebatkan di ranah-ranah lainnya di satu bab berikutnya), tetapi mereka merupakan juga molekul, dan ahli kimia dapat memurnikan, membotolkan, dan menyimpannya di rak. Inilah yang dilakukan Sol Spiegelman dan para koleganya di Amerika pada tahun 1960-an. Waktu itu mereka menaruh dua molekul ke dalam larutan, dan hal luar biasa terjadi. Dalam tabung uji tersebut, molekul-molekul RNA berlaku sebagai templat bagi sintesis salinan-salinan dirinya sendiri, dibantu dengan adanya sintetase RNA. Alat-alat mesin dan cetak birunya diekstraksi dan ditaruh di tempat penyimpanan dingin, terpisah satu dengan yang lain. Kemudian, begitu mereka dapat saling bersinggungan lagi, dan juga dengan molekul-molekul kecil yang dibutuhkan sebagai bahan mentah, di air, keduanya kembali melancarkan trik lama mereka sekalipun kali ini mereka di tabung uji, bukan lagi di sel hidup.

Hanya butuh satu langkah pendek dari titik ini ke seleksi alam dan evolusi di dalam laboratorium. Ini cuma versi kimiawi dari biomorf-biomorf komputer kita. Inti dari metode eksperimental yang digunakan adalah menjejerkan sebaris panjang tabung uji yang masing-masing mengandung larutan sintetase RNA, dan juga bahan-bahan mentahnya, molekul-molekul kecil yang digunakan untuk sintesis RNA. Tiap tabung uji mengandung alat-alat mesin dan bahan mentahnya, tapi sejauh ini mereka bergeming, tak berbuat apa-apa karena tidak ada cetak biru sebagai dasar kerjanya. Baru kemudian sejumlah kecil RNA diteteskan ke tabung uji pertama. Perangkat sintetase RNA langsung bergeliat dan memproduksi begitu banyak salinan dari molekul-molekul RNA yang baru saja dimasukkan, yang menyebar ke seluruh bagian tabung uji. Lalu setetes larutan dari tabung uji pertama diambil dan ditaruh ke tabung uji kedua. Proses tadi berulang sendiri di tabung uji kedua. Setelahnya, setetes lagi diambil dari sana dan digunakan untuk membenihi tabung uji ketiga, dan seterusnya.

Terkadang, karena kesalahan penyalinan acak, molekul RNA mutan yang sedikit berbeda muncul secara semerta. Kalau ternyata varietas baru ini lebih unggul dari yang lama, unggul dalam arti bahwa, mungkin karena 'daya rekatnya' yang lemah, ia bereplikasi lebih cepat atau lebih efektif, varietas baru ini tentu langsung menyebar ke seluruh bagian tabung uji, melebihi jumlah varietas induk yang memunculkannya. Kemudian, ketika setetes larutan diambil dari tabung uji tersebut untuk membibiti tabung uji berikutnya, varietas mutan yang barulah yang menjadi pembibitnya. Kalau kita telaah semua RNA yang ada di barisan panjang tabung uji tersebut, yang kita lihat adalah, tidak lain tidak bukan, perubahan evolusi. Varietas RNA yang unggul secara kompetitif, yang dihasilkan di akhir dari beberapa 'generasi' tabung uji tersebut dapat dibotolkan dan dinamai untuk dipakai lagi nanti. Misalnya, salah satu varietasnya, dinamai V2, memperbanyak diri jauh lebih cepat dari RNA Q-beta biasa, kemungkinan karena ukurannya lebih kecil. Tidak seperti RNA Q-beta, ia tidak perlu 'repot-repot' memuat skema-skema pembuatan sintetase RNA. Sintetase RNA-nya diberikan gratis oleh pelaku eksperimen. RNA V2 dipakai sebagai titik awal untuk percobaan menarik yang dilakukan Leslie Orgel dan koleganya di California. Di dalam eksperimen tersebut, mereka menciptakan lingkungan yang 'sulit' bagi sampelnya.

Ke dalam tabung uji mereka tambahkan racun yang bernama etidium bromida, yang menghambat proses sintesis RNA dengan merusak alat-alat mesinnya. Orgel dan koleganya mulai dengan larutan racun yang lemah. Awal-awalnya, kecepatan sintesisnya memang melambat karena pengaruh racun, tetapi setelah berevolusi melalui sekitar sembilan ‘generasi’ transfer tabung uji, terseleksi lah seutas RNA baru yang resistan terhadap racun itu. Kecepatan sintesis RNA kini sepadan dengan RNA V2 normal yang tidak diracuni. Lalu Orgel dan koleganya menggandakan konsentrasi racunnya. Lagi-lagi, kecepatan replikasi RNA-nya anjlok, tapi setelah kurang-lebih 10 transfer uji tabung seutas RNA baru yang kebal dengan konsentrasi racun yang lebih tinggi itu pun berkembang. Kemudian konsentrasi racunnya digandakan lagi. Dengan begitu, melalui penggandaan beruntun, mereka berhasil mengembangkan seutas RNA yang mampu memperbanyak diri dalam lingkungan dengan konsentrasi etidium bromida amat tinggi, 10 kali lebih pekat dibanding racun yang menghambat replikasi leluhurnya, RNA V2. Mereka menyebut RNA baru yang resistan itu V40. Evolusi V40 dari V2 membutuhkan sekitar 100 ‘generasi’ transfer tabung uji (tentunya, ada banyak generasi replikasi RNA yang berlangsung di antara tiap transfer tabung uji).

Orgel juga telah bereksperimen dengan skenario tanpa enzim. Ia mendapati bahwa molekul-molekul RNA dapat mereplikasi dirinya sendiri secara spontan dalam keadaan ini, meski lambat sekali. Mereka tampaknya butuh zat katalis lain, seperti zat besi. Ini fakta penting karena, di hari-hari mula kehidupan ketika para replikator ini muncul pertama kali, tidak bisa kita mengandaikan bahwa sudah ada enzim yang membantu replikasi mereka. Tetapi, zat besi mungkin sudah ada.

Eksperimen pelengkap dilakukan sekitar satu dasawarsa lalu di laboratorium sekolah Jerman berpengaruh yang meneliti asal-usul kehidupan pimpinan Mandred Eigen. Para pekerja ini menyediakan sintetase RNA dan komponen-komponen penyusun RNA di dalam tabung ujinya, tetapi mereka *tidak* membibiti larutannya dengan RNA. Begitupun, sebuah molekul RNA besar berkembang *secara spontan* di dalam tabung uji tersebut, dan molekul yang sama itu mengevolusikan dirinya kembali, lagi dan lagi, dalam eksperimen-eksperimen terpisah yang dilakukan kemudian! Setelah pemeriksaan yang teliti, dipastikan bahwa tidak terdapat kemungkinan infeksi molekul-molekul RNA yang terjadi tanpa sengaja. Ini hasil luar biasa, kalau Anda timbang kemuskilan statistis molekul besar yang sama bisa muncul spontan dua kali. Sama muskilnya dengan pengetikan spontan METHINKS IT IS LIKE A WEASEL. Seperti frasa dalam model komputer kita, molekul RNA yang terseleksi itu terbangun lewat evolusi *kumulatif* yang bertahap.

Varietas RNA yang dihasilkan, berulang kali, dalam eksperimen-eksperimen ini memiliki ukuran dan struktur yang sama dengan molekul-molekul yang dihasilkan Spiegelman. Namun, kalau molekul Spiegelman berevolusi lewat ‘degenerasi’ dari RNA virus Q-beta yang lebih besar dan terjadi secara alami, molekul grup Eigen membangun dirinya dari keadaan yang hampir-hampir hampa. Formula ini pintar beradaptasi dengan lingkungan yang dibentuk oleh tabung-tabung uji berisi sintetase RNA yang siap-pakai. Oleh karenanya, ia berkonvergensi lewat seleksi kumulatif dari dua titik awal yang jauh berbeda. Molekul-molekul RNA Q-beta yang lebih besar lebih lemah daya adaptasinya dengan lingkungan tabung uji, tetapi lebih mampu beradaptasi dengan lingkungan yang dihadirkan sel-sel *E.coli*.

Eksperimen-eksperimen seperti ini membantu kita memahami sifat seleksi alam yang sepenuhnya otomatis dan tanpa disengaja. ‘Mesin-mesin’ sintetase RNA tidak ‘tahu’ mengapa mereka membuat molekul-molekul RNA: itu cuma produk susulan dari bentuknya saja. Dan molekul-molekul RNA itu sendiri tidak menyusun strategi agar dirinya terduplikasi. Kalaupun

mereka bisa berpikir, tidak ada alasan jelas mengapa suatu entitas berpikir mesti terdorong untuk membuat salinan dirinya sendiri. Kalau saya tahu cara membuat salinan diri saya sendiri, saya kurang yakin mau lebih memprioritaskan proyek replikasi diri ini dibanding segala hal lain yang ingin saya lakukan: mengapa pula mesti begitu? Tapi motivasi tidak relevan bagi molekul.

Struktur RNA virusnya saja yang *kebetulan* terbentuk sedemikian rupa sehingga ia membuat mesin seluler yang memproduksi salinan dirinya sendiri. Dan kalau ada entitas, di mana pun di alam semesta ini, yang kebetulan berciri pintar memperbanyak diri, otomatis makin banyak salinan dari entitas tersebut yang sudah pasti *akan* mengada. Tidak hanya itu, tapi, karena otomatis mereka membentuk silsilah dan kadang salah salin, versi-versi terbarunya cenderung ‘lebih pandai’ dalam menyalin dirinya dibanding versi-versi sebelumnya, karena kuatnya proses seleksi kumulatif tadi. Sungguh simpel dan otomatis. Begitu mudah diduga, sampai hampir tak terelakkan lagi.

Molekul RNA yang ‘berhasil’ di dalam tabung uji itu berhasil karena ciri intrinsiknya sendiri, yang seumpama dengan ‘daya rekat’ dari contoh rekaan saya tadi. Tapi ciri seperti ‘daya rekat’ ini agak membosankan. Ciri seperti itu sifatnya elementer bagi si replikator itu sendiri, ciri yang berefek langsung terhadap probabilitas replikasinya. Bagaimana kalau replikator tersebut punya efek terhadap hal lain, yang berdampak pada hal lain, yang berdampak pada hal lain, yang ... hingga akhirnya, secara tidak langsung berdampak pada peluang replikator itu sendiri untuk tereplikasi? Anda akan melihat bahwa, kalau rantai sebab-akibat yang panjang ini ada, kaidah fundamental kita di atas akan tetap bertahan. Replikator yang kebetulan mampu tereplikasi akan mendominasi dunia, *tidak peduli seberapa panjang dan tak langsungnya* rantai sebab-akibat yang memengaruhi probabilitas mereka untuk tereplikasi. Dan, untuk alasan yang sama, dunia akan berisikan mata-mata rantai sebab-akibat ini. Kita akan melihat mata-mata rantai tersebut, dan terpana.

Dalam organisme-organisme modern, kita melihatnya selalu. Itulah mata dan kulit dan tulang dan jari kaki dan otak dan naluri. Inilah semua alat-alat replikasi DNA. Mereka disebabkan oleh DNA, dalam arti perbedaan mata, kulit, tulang, naluri, dll. disebabkan oleh perbedaan DNA. Mereka mengerahkan pengaruh atas replikasi DNA yang menjadi sebab mereka, dan mereka memengaruhi ketahanan hidup dan reproduksi tubuh-tubuhnya – yang mengandung DNA yang sama, dan yang karenanya bernasib sama seperti DNA tersebut. Makanya, DNA itu sendiri mengerahkan pengaruh atas replikasinya sendiri, melalui atribut-atribut tubuh. Bisa dibilang, DNA mengerahkan kuasa atas masa depannya sendiri, dan tubuh dan organ dan pola perilaku adalah instrumen kuasa tersebut.

Bicara soal kuasa, maksudnya adalah konsekuensi para replikator yang memengaruhi masa depannya sendiri, setaklangsung apa pun konsekuensi tersebut. Berapa banyak mata rantai dari sebab ke akibat tidak jadi perkara. Kalau si sebab ini berupa entitas swareplikasi, maka si akibat, seberapa jauh dan tak langsungnya dia itu, bisa masuk radar seleksi alam. Saya akan merangkum ide besarnya ini dengan menceritakan kisah tentang berang-berang. Detailnya memang seumpama, tapi pasti tidak jauh dari kebenarannya. Walaupun belum ada orang yang melakukan riset tentang perkembangan sambungan otak pada berang-berang, riset serupa telah dilakukan pada hewan lain, seperti cacing. Saya meminjam kesimpulannya dan menerapkannya pada berang-berang, karena berang-berang lebih menarik dan ramah pada manusia ketimbang cacing.

Satu gen mutan pada seekor berang-berang hanya berupa perubahan satu huruf dalam teks berisi semiliar huruf; perubahan di gen G. Saat berang-berang muda tumbuh dewasa, perubahan ini disalin, bersama dengan seluruh huruf lain di dalam teks tersebut, ke dalam seluruh selnya.

Pada sebagian besar sel, gen G tidak dibaca; tapi gen-gen lainnya, yang relevan dengan kerja tipe-tipe sel lain tersebut, iya. Akan tetapi, G dibaca di sebagian sel dalam otak yang tengah berkembang. Dibaca dan ditranskripsikan ke dalam salinan-salinan RNA. Salinan-salinan aktif RNA ini berkeliaran di bagian dalam sel, dan akhirnya beberapa bertumbukan dengan mesin-mesin pembuat protein yang disebut ribosom. Mesin-mesin pembuat protein ini membaca skema aktif RNA tersebut, dan memproduksi molekul-molekul protein sesuai spesifikasinya. Molekul-molekul protein ini mengikal ke bentuk yang ditentukan oleh rangkaian asam amino mereka sendiri, yang kemudian diatur oleh rangkaian kode DNA gen G. Ketika G bermutasi, perubahan ini memunculkan satu perbedaan krusial pada rangkaian asam amino yang biasanya ditentukan oleh gen G, dan karenanya pada bentuk kumparan molekul protein itu.

Molekul-molekul yang terubah sedikit ini diproduksi massal oleh mesin-mesin pembuat protein di dalam sel-sel otak yang berkembang. Mereka kemudian berlaku sebagai enzim, mesin yang membuat senyawa-senyawa lain di dalam sel: produk-produk gen. Lalu, produk-produk gen G sampai di selaput yang menyelimuti sel itu, dan terlibat dalam proses terhubungnya sel tersebut dengan sel-sel lain. Karena skema DNA yang awal tadi sudah berubah sedikit, kecepatan produksi dari sebagian senyawa-senyawa selaput ini berubah. Hal ini kemudian mengubah cara sel-sel otak tertentu yang tengah berkembang terhubung satu sama lain. Perubahan halus dalam diagram jaringan bagian tertentu dari otak berang-berang itu telah terjadi, konsekuensi tak langsung, dan sangat berbeda, dari suatu perubahan di dalam teks DNA.

Nah, rupa-rupanya, bagian ini di dalam otak berang-berang, karena posisinya di dalam diagram jaringan tadi, terlibat dalam salah satu perilaku berang-berang: membangun bendungan. Tentu saja, bagian-bagian lain dari otak berang-berang juga urun peran setiap kali berang-berang membangun bendungan tapi, ketika mutasi G memengaruhi bagian tertentu dari diagram jaringan otak ini, perubahan tersebut memicu munculnya efek khusus pada perilaku itu. Saat berenang dengan menjepit batang kayu di rahangnya, berang-berang itu mendongak lebih tinggi. Lebih tinggi daripada berang-berang tanpa mutasi. Hal ini membuat lumpur, yang melekat pada kayu, lebih berpotensi tidak terbilas bersih selama berang-berang berenang. Karenanya, kayu tersebut jadi lebih lengket, yang berarti ketika berang-berang mendorongnya masuk ke bendungan, kayu itu lebih berpotensi untuk tidak lepas. Kondisi ini cenderung berlaku sama untuk semua kayu yang ditempatkan berang-berang yang telah bermutasi. Meningkatnya daya rekat kayu tersebut adalah konsekuensi, yang (sekali lagi) bersifat amat tidak langsung, dari perubahan dalam teks DNA-nya.

Makin lengket kayu-kayunya, makin kuat struktur bendungannya, makin sukar pula ia pecah. Karenanya, ukuran danau yang dibentuk bendungan tersebut lebih besar, yang membuat sarang di tengah-tengah danau itu lebih aman dari pemangsa. Karenanya, jumlah keturunan yang berhasil dibiakkan oleh berang-berang tersebut cenderung meningkat. Kalau kita perhatikan seluruh populasi berang-berang, yang memiliki gen termutasi, rata-rata, akan cenderung membiakkan lebih banyak keturunan dibanding yang tidak memiliki gen termutasi. Keturunan tersebut akan cenderung mewarisi dari orang tuanya salinan-salinan arsip dari gen terubah yang sama persis. Maka dari itu, di dalam populasi tersebut, bentuk gen ini akan menjadi lebih jamak seiring bertambahnya generasi. Pada akhirnya, ia menjadi norma, dan tidak lagi pantas dicap sebagai 'mutan'. Kualitas umum bendungan berang-berang pun naik satu tingkat.

Fakta bahwa cerita ini hipotetis, dan bahwa detailnya bisa jadi salah, tidak relevan. Bendungan berang-berang berevolusi melalui seleksi alam, dan karena itu kejadian sebenarnya tidak akan jauh berbeda, kecuali dalam hal detail-detail praktisnya, dari cerita yang saya kisahkan tadi. Implikasi umum dari cara pandang atas kehidupan ini dijelaskan dan diberikan dalam buku saya *The Extended Phenotype*, dan saya tidak akan mengulangi argumennya di sini. Anda akan lihat bahwa di dalam cerita hipotetis ini ada tidak kurang dari 11 mata dalam rantai sebab-akibat yang menautkan gen berubah ke kemampuan ketahanan hidup yang meningkat. Aslinya mungkin lebih banyak. Setiap mata rantai tersebut, baik yang berefek pada paduan kimiawi di dalam sel, yang berefek pada cara sel-sel otak saling terhubung, yang berefek pada perilaku, atau yang akhirnya berefek pada ukuran danau, sah dianggap sebagai *akibat* dari sebuah perubahan pada DNA. Walaupun jumlah mata rantainya 111, tidak jadi perkara. Setiap efek yang dimunculkan suatu perubahan pada sebuah gen terhadap probabilitas replikasinya sendiri adalah target bagi seleksi alam. Semua itu sangat sederhana, dan terjadi secara otomatis serta tak terencana. Hal semacam itu hampir-hampir tak terelakkan, begitu bahan-bahan dasar seleksi kumulatif – replikasi, kesalahan, dan kuasa – telah muncul mengada. Tapi bagaimana ini bisa terjadi? Bagaimana semua itu bisa ada di muka Bumi, sebelum kehidupan ada? Kita akan lihat seperti apa pertanyaan sulit ini mungkin terjawab, di bab berikutnya.

BAB 6

Asal-mula dan Mukjizat

Kebetulan, keberuntungan, pertepatan, mukjizat. Salah satu topik utama bab ini adalah mukjizat dan apa maksudnya. Tesis yang saya ajukan: peristiwa yang biasanya kita sebut mukjizat itu tidak gaib, tetapi merupakan bagian dari spektrum peristiwa alam yang kurang-lebih muskil. Dengan kata lain, mukjizat, walaupun terjadi, adalah kemujuran luar biasa yang tak disangka-sangka. Peristiwa-peristiwa tidak bisa langsung digolongkan menjadi peristiwa alami *versus* mukjizat.

Ada beberapa bakal peristiwa yang terlalu muskil untuk dibayangkan, tapi kita baru mengetahui kemuskilan itu setelah menghitungnya. Dan untuk menghitungnya, kita harus tahu berapa banyak *waktu* atau, lebih umum lagi, berapa banyak *peluang* yang ada, agar peristiwa itu dapat terjadi. Kalau waktu dan peluangnya tak berhingga, tidak ada yang mustahil. Bilangan-bilangan besar khas astronomi, dan rentang waktu luas khas geologi, memutar-balikkan semua perkiraan lazim kita tentang apa yang bisa diduga dan apa yang mukjizat. Saya akan susun pokok bahasan ini dengan satu contoh spesifik yang juga merupakan tema utama dari bab ini: seperti apa kehidupan bermula di muka bumi? Untuk menyampaikan poin ini dengan jelas, saya akan pusatkan pembahasan pada satu teori asal-mula kehidupan tertentu, walau teori modern mana pun mengenai asal-mula kehidupan juga memadai.

Kita boleh menerima sejumlah keberuntungan dalam penjelasan-penjelasan kita, tapi jangan terlalu besar. Pertanyaannya, *seberapa* besar? Panjangnya waktu geologis mengizinkan kita untuk mendalilkan kebetulan muskil lebih banyak dari yang diizinkan pengadilan tapi, begitupun, tetap ada batasnya. Seleksi kumulatif adalah kunci dari semua penjelasan modern tentang kehidupan. Seleksi kumulatif menjejerkan peristiwa mujur yang dapat diterima (mutasi acak) dalam satu rangkaian nonacak sehingga, di ujung rangkaian itu, hasil akhirnya menampilkan ilusi keberuntungan tak terperi, amat terlalu muskil untuk terjadi karena kebetulan semata, sekalipun diberi rentang waktu jutaan kali lebih panjang dari usia alam semesta sejauh ini. Seleksi kumulatif, kuncinya. Tapi ia sendiri pun harus ada yang memulai, dan kita, mau tidak mau, harus mendalilkan suatu peristiwa kebetulan *selangkah* sebagai asal-mula seleksi kumulatif itu sendiri.

Dan langkah pertama yang vital ini sulit karena, pada intinya, sepertinya ada paradoks. Proses-proses replikasi yang kita ketahui tampak membutuhkan mesin rumit agar berfungsi. Jika ‘perkakas mesin’ sintetase RNA ada, fragmen-fragmen RNA akan berevolusi, berulang kali dan secara konvergen, menuju titik akhir yang sama, titik akhir yang hampir-hampir mustahil. Namun, kemustahilan itu mulai pupus begitu Anda renungkan daya seleksi kumulatif. Tapi seleksi kumulatif ini perlu dibantu agar bisa bermula. Ia tetap bergeming jika kita tidak menambahkan katalis, seperti ‘perkakas mesin’ sintetase RNA yang dipaparkan di bab sebelumnya. Dan katalis itu, tampaknya, tidak mungkin mengada secara semerta kalau tidak diarahkan molekul-molekul RNA yang lain. Molekul-molekul DNA bereplikasi di dalam mesin-mesin sel yang rumit, dan kata-kata tertulis bereplikasi di dalam mesin-mesin fotokopi, tapi keduanya tampak tak mampu melakukan replikasi spontan tanpa mesin-mesin pendukungnya. Mesin fotokopi mampu menyalin cetak birunya sendiri, tapi ia tidak bisa mengada secara semerta. Biomorf-biomorf siap bereplikasi di lingkungan yang disediakan program komputer

yang ditulis dengan pas, tapi mereka tidak dapat menulis program itu sendiri atau membangun komputer untuk menjalankannya. Teori pembuat arloji yang buta itu sangat kuat kalau kita boleh berasumsi ada replikasi dan, karenanya, ada seleksi kumulatif. Tapi kalau replikasi itu sendiri membutuhkan mesin-mesin kompleks, dan karena satu-satunya cara yang kita ketahui agar mesin-mesin kompleks itu bisa mengada adalah seleksi kumulatif, maka ada masalah di sini.

Tentu saja, mesin-mesin seluler modern, perangkat replikasi DNA dan sintesis protein, memiliki semua ciri mesin yang berevolusi hingga tingkat tinggi dan dirancang khusus. Kita telah melihat betapa mencengangkannya kemampuan mesin-mesin ini dalam menyimpan data secara akurat. Mengingat ukurannya yang superkecil, kerumitan dan kompleksitas rancangannya setaraf dengan mata manusia pada level yang lebih kasar. Semua pihak yang telah memikirkan perkara ini sepakat bahwa perangkat sekompleks mata manusia tidak mungkin mengada lewat seleksi selangkah. Sayangnya, hal yang sama tampaknya berlaku bagi, setidaknya, bagian-bagian perangkat mesin seluler tempat DNA itu sendiri bereplikasi, dan ini berlaku bukan hanya bagi sel-sel makhluk lanjut-kembang seperti kita dan ameba, tapi juga bagi makhluk yang relatif lebih primitif seperti bakteri dan ganggang biru-hijau.

Jadi, seleksi kumulatif dapat menghasilkan kompleksitas, sementara seleksi selangkah tidak. Tapi seleksi kumulatif tidak dapat bekerja kalau tidak ada mesin replikasi minimal dan daya replikatornya, dan satu-satunya mesin replikasi yang kita ketahui tampak terlalu rumit untuk mengada kalau bukan karena bergenerasi-generasi seleksi kumulatif! Ada yang memandang ini sebagai cacat besar dari teori pembuat arloji yang buta. Mereka menganggap inilah bukti pamungkas bahwa pasti ada perancang, bukan pembuat arloji yang *buta* melainkan pembuat arloji gaib yang berencana. Mungkin, sang Pencipta tidak mengendalikan suksepsi peristiwa evolusi dari hari ke hari; mungkin ia tidak merancang harimau dan domba, mungkin ia tidak membuat pohon, tapi ia *lah* yang menyiapkan mesin replikasi dan daya replikator yang asali, mesin DNA dan protein awal yang memungkinkan seleksi kumulatif, dan karena itu evolusi.

Ini argumen yang rapuh bukan main, malah bisa dibilang argumen senjata-makan-tuan. Masalah sulit yang ingin kita jelaskan adalah kompleksitas tertata. Begitu kita boleh *mendalilkan* kompleksitas tertata, biarpun dalam rupa kompleksitas tertata mesin pereplikasi DNA/protein, relatif mudah untuk menghadirkannya sebagai pembangkit kompleksitas yang lebih tertata lagi. Memang itulah isi sebagian besar buku ini. Tapi tentu saja Tuhan mana pun yang mampu merancang secara cerdas hal sekompleks mesin replikasi DNA/protein pasti setidaknya sama kompleks dan tertatanya dengan mesin itu sendiri. Jauh lebih kompleks dan tertata lagi bahkan, kalau kita bayangkan ia *juga* mampu mendengarkan doa dan mengampuni dosa. Menjelaskan asal-usul mesin DNA/protein dengan menghadirkan Perancang ilahi sama saja dengan tidak menjelaskan apa-apa, karena asal-usul Perancang itu sendiri tetap tidak terjelaskan. Anda terpaksa mengatakan sesuatu seperti 'Tuhan itu sudah selalu ada', dan kalau memang mau semalas itu, sekalian saja 'DNA sudah selalu ada', atau 'Kehidupan sudah selalu ada', titik.

Makin kita menjauh dari mukjizat, kemuskilan akbar, kebetulan dahsyat, peristiwa kebetulan besar, dan makin menyeluruh kita mampu mengurai peristiwa kebetulan besar ke dalam serangkaian peristiwa kebetulan kecil yang kumulatif, makin memuaskan penjelasan kita bagi akal yang rasional. Tapi di bab ini yang kita tanyakan adalah *seberapa* muskil, seberapa *ajaib*, suatu peristiwa itu boleh kita dalilkan. Apa satu peristiwa kebetulan murni terbesar, keberuntungan ajaib tanpa cela, yang boleh kita ajukan dalam teori-teori kita, dan merasa bahwa

penjelasan atas kehidupan tersebut tetap memuaskan? Agar seekor monyet dapat menulis 'Methinks it is like a weasel', secara murni kebetulan, memang dibutuhkan keberuntungan yang besarnya bukan kepalang; sangat besar tapi masih bisa diukur. Kita sudah menghitung peluangnya: 1 berbanding kira-kira 10 ribu juta juta juta juta juta (10⁴⁰). Tidak seorang pun dapat betul-betul memahami atau membayangkan bilangan sebesar itu, sehingga kita pikir derajat kemuskilan setinggi itu bersalin-makna dengan mustahil. Tapi walaupun derajat kemuskilan setinggi ini tidak dapat dicerna akal, jangan lari ketakutan darinya. Angka 10⁴⁰ mungkin besar sangat, tapi kita masih bisa menuliskannya, dan masih bisa memakainya dalam kalkulasi. Lagi pula, masih ada angka-angka yang lebih besar. 10⁴⁶, misalnya, bukan hanya lebih besar; Anda harus menambahkan 10⁴⁰ dengan dirinya sendiri sejuta kali agar memperoleh 10⁴⁶. Bagaimana kalau ternyata kita dapat mengumpulkan 10⁴⁶ monyet yang masing-masing diberi mesin ketik? Dengan syahdunya, salah satu dari mereka akan mengetik 'Methinks it is like a weasel', dan ada lagi yang hampir pasti bisa mengetik 'I think therefore I am' ('*Aku berpikir maka aku ada*'). Tentu, masalahnya, kita tidak bisa mewujudkan sidang monyet pengetik sebesar itu. Kalaupun semua materi di alam semesta berubah menjadi monyet, masih kurang. Mukjizat seekor monyet mengetik 'Methinks it is like a weasel' terlalu besar secara kuantitatif, terlalu besar (walau masih *dapat diukur*) untuk bisa kita sertakan ke dalam teori tentang kejadian sesungguhnya. Tapi kita tidak akan menyadari ini kalau tidak menghitungnya.

Jadi, ada level-level keberuntungan murni, yang tidak hanya terlalu besar bagi imajinasi manusia yang lemah ini, tetapi juga terlalu besar untuk kalkulasi makul kita tentang asal-mula kehidupan. Nah, kembali ke pertanyaan kita, seberapa besar level keberuntungan sebesar apa mukjizat, yang *boleh* kita dalilkan? Jangan lari dari pertanyaan ini hanya karena angka-angka besar menghantui. Pertanyaan ini sah sempurna, dan kita setidaknya bisa mencatat apa saja yang perlu kita ketahui untuk menghitung jawabannya.

Ini satu pertimbangan menarik. Jawaban pertanyaan kita – seberapa besar keberuntungan yang boleh kita dalilkan – bergantung pada apakah planet kita ini satu-satunya yang memiliki kehidupan, atau apakah alam semesta berlimpah kehidupan. Satu hal yang kita tahu pasti, kehidupan telah muncul sekali, di sini, di planet ini. Tapi kita tidak tahu-menahu apakah ada kehidupan di tempat lain di alam semesta. Mungkin saja tidak ada. Tapi, ada yang sudah menghitung bahwa pasti ada kehidupan di tempat lain, dengan dasar-dasar berikut (yang sesat-pikirnya akan saya tunjukkan nanti). Kemungkinan ada, paling tidak, 10²⁰ (100 miliar miliar) planet di alam semesta yang kira-kira cocok. Kita tahu kehidupan telah muncul di sini, jadi tidak mungkin *sama sekali* muskil. Oleh karena itu, setidaknya beberapa di antara miliaran miliar planet-planet lain tersebut hampir pasti memiliki kehidupan.

Kekeliruan dari argumen ini terletak pada penyimpulan bahwa, *karena kehidupan telah muncul di sini*, berarti ia tidak muskil-muskil amat. Perhatikan bahwa penyimpulan ini berasumsi bahwa apa pun yang telah terjadi di Bumi kemungkinan telah terjadi di tempat lain di alam semesta. Ini namanya lompatan kesimpulan. Dengan kata lain, argumen statistis seperti ini, bahwa pasti ada kehidupan di suatu tempat lain di alam semesta karena ada kehidupan di sini, menggunakan hal yang masih perlu dibuktikan kebenarannya sebagai asumsi. Tidak berarti kesimpulan bahwa ada kehidupan di seluruh alam semesta itu salah. Tebakan saya, mungkin saja benar. Berarti argumen tersebut bukan argumen sama sekali. Ia cuma asumsi.

Nah, untuk pembahasan kita, mari gunakan asumsi alternatifnya: bahwa kehidupan muncul sekali saja, dan kemunculan itu terjadi di sini, di Bumi. Gampang kita tergoda untuk menolak asumsi ini karena alasan-alasan emosional. Bukankah asumsi semacam itu tampak kuno sekali?

Bukankah itu mirip dengan ajaran gereja bahwa Bumi merupakan pusat alam semesta, dan bintang-bintang hanyalah noktah-noktah cahaya yang menghiasi angkasa (atau, yang lebih lancang lagi, bahwa bintang-bintang punya pengaruh astrologis dalam kehidupan kecil kita ini)? Bukankah jemawa namanya kalau berasumsi bahwa, dari miliaran miliar planet di alam semesta, dunia kita yang terpencil ini, di tata surya kita yang terpencil ini, di galaksi kita yang terpencil ini, adalah satu-satunya yang berkehidupan? Kenapa, sih, harus di planet *kita*?

Maaf, kendati saya bersyukur betul bahwa kita telah lepas dari kepicikan gereja abad pertengahan dan saya memandang hina ramalan astrologi modern, retorika tentang keterpencilan di paragraf sebelumnya hanyalah retorika kosong belaka. *Sepenuhnya* mungkin bahwa planet terpencil kita ini memang satu-satunya yang berkehidupan. Pokok yang ingin saya garisbawahi adalah *andaikan* hanya ada satu planet yang berkehidupan, planet tersebut *pastilah* planet kita, karena ‘kita’ ada di sini dan sedang membahasnya! Kalau asal-mula kehidupan *merupakan* peristiwa yang begitu muskil sehingga hanya terjadi di satu planet saja di alam semesta, maka planet kita inilah dia. Jadi, tidak bisa kita memakai fakta bahwa Bumi ini berkehidupan untuk menyimpulkan bahwa kehidupan pasti bisa muncul di planet lain. Argumen semacam itu hanya berputar-putar saja. Kita harus terlebih dahulu membahas seberapa mudah atau sulit kehidupan bermula di sebuah planet, sebelum bisa mulai menjawab pertanyaan berapa banyak planet lain di alam semesta yang berkehidupan.

Tapi bukan ini pertanyaan awal kita tadi. Pertanyaan kita adalah, seberapa banyak keberuntungan yang boleh kita asumsikan dalam sebuah teori asal-mula kehidupan di Bumi? Saya tadi bilang bahwa jawabannya tergantung pada apakah kehidupan itu hanya muncul sekali, atau berkali-kali. Kita mulai dengan menamai probabilitas, serendah apa pun itu, munculnya kehidupan di planet acak mana pun dari jenis tertentu. Sebutlah angka ini ‘probabilitas kemunculan semerta’ atau PKS. PKS inilah yang kita cari saat duduk membaca buku ilmu kimia, atau mencetuskan percik api melalui campuran gas-gas atmosfer di laboratorium, dan menghitung peluang munculnya secara spontan molekul-molekul yang bereplikasi di atmosfer planet yang tipikal. Taruhlah bahwa tebakan terbaik kita untuk PKS kita ini amat sangat kecil, misalnya, satu berbanding semiliar. Ini probabilitas yang begitu kecil sehingga kita hampir tidak bisa berharap mampu menduplikasi peristiwa yang sama ajaib dan luar biasa beruntungnya seperti asal-mula kehidupan dalam eksperimen laboratorium kita. Tapi kalau kita asumsikan (dan kita pantas berasumsi agar diskusi kita berdasar) bahwa kehidupan itu bermula sekali saja di alam semesta, maka kita *boleh* mendalilkan sejumlah besar keberuntungan ke dalam sebuah teori, karena ada begitu banyak planet di alam semesta yang *bisa saja* menjadi tempat bermulanya kehidupan. Kalau, seperti diperkirakan, ada 100 miliar miliar planet, ini sama dengan 100 miliar kali lebih besar dari PKS sangat kecil yang kita dalilkan tadi. Kesimpulannya, jumlah maksimal keberuntungan yang boleh kita dalilkan, sebelum kita menolak satu teori asal-mula kehidupan tertentu, adalah satu berbanding N , di mana N merupakan jumlah planet yang cocok menjadi tempat bermulanya kehidupan di alam semesta. Frasa ‘yang cocok’ ini banyak muatannya, tapi mari kita tarik garis batas atasnya: 1 berbanding 100 miliar miliar untuk jumlah keberuntungan maksimal yang boleh kita asumsikan di dalam argumen ini.

Coba renungkan apa artinya ini. Kita datang ke ahli kimia dan bilang: keluarkan semua buku teks dan mesin penghitung; raut pensilmu, asah akalmu; isi kepalamu dengan formula, dan botolmu dengan metana dan amonia dan hidrogen dan karbon dioksida dan semua gas lain yang mungkin ada di planet purba yang tidak hidup; ramu semua itu; cetuskan kilat lewat atmosfer rekaan, dan ilham lewat kecerdasan; bawa serta semua metode cerdik kimia yang ada, dan beri

kami perkiraan yang paling jitu mengenai probabilitas terbentuknya molekul swareplikasi secara semerta di sebuah planet yang biasa. Atau, dengan kata lain, berapa lama kami harus menunggu sebelum kejadian kimiawi acak di planet tersebut, senggol-senggol termal acak dari atom dan molekul, dapat berbuah molekul swareplikasi?

Ahli kimia tidak tahu jawaban atas pertanyaan ini. Kebanyakan kimiawan modern mungkin berkata bahwa kita harus menunggu lama sekali, kalau diukur dengan standar masa hidup manusia, tapi mungkin tidak begitu lama, kalau diukur dengan standar masa kosmologis. Sejarah fosil bumi menunjukkan bahwa kita punya sekitar semiliar tahun – satu ‘eon’, istilah mudahnya – sebagai bekal awal, karena selama itulah kira-kira jarak waktu antara terbentuknya Bumi sekitar 4,5 miliar tahun yang lalu dan era organisme fosil yang pertama. Tapi poin dari argumen ‘jumlah planet’ kita adalah, biarpun si ahli kimia berkata kita harus menunggu ‘mukjizat’, harus menanti semiliar miliar tahun (jauh lebih lama dari usia alam semesta), kita masih bisa menerima vonis ini dengan kalem. Kemungkinan besar ada lebih dari semiliar miliar planet di alam semesta. Kalau tiap planet ini bertahan selama Bumi, bekal masa kita jadi semiliar miliar miliar tahun-planet. Bagus sudah! Mukjizat diterjemahkan ke dalam politik praktis lewat perkalian.

Ada satu asumsi terselubung di balik argumen ini. Ya, sebetulnya banyak, tapi ada satu yang ingin secara khusus saya bahas. Ini asumsinya: begitu kehidupan (replikator dan seleksi kumulatif) bermula, ia selalu berkembang hingga makhluk-makhluknya mengevolusikan kecerdasan yang cukup untuk berspekulasi tentang asal-usul mereka. Kalau tidak demikian, estimasi jumlah keberuntungan yang boleh kita ajukan harus dikurangi. Tepatnya, peluang maksimal asal-mula kehidupan di sebuah planet tertentu yang boleh didalilkan teori kita adalah jumlah planet yang ada di alam semesta dibagi peluang berevolusinya kehidupan yang cukup cerdas untuk berspekulasi tentang asal-usulnya sendiri.

Tampak agak aneh memang kalau ‘cukup cerdas untuk berspekulasi tentang asal-usulnya sendiri’ dianggap variabel yang relevan. Untuk memahami alasannya, coba timbang asumsi alternatif ini. Misalkan asal-mula kehidupan itu peristiwa yang lumayan mungkin terjadi, tapi evolusi kecerdasan yang muncul kemudian ternyata makin muskil, menuntut keberuntungan besar. Misalkan asal-usul kecerdasan itu begitu muskil sehingga cuma terjadi di satu planet saja di alam semesta ini, sekalipun kehidupan telah bermula di banyak planet. Maka, karena kita tahu kita cukup cerdas untuk membahas pertanyaan ini, kita tahu bahwa planet yang satu itu pastilah Bumi. Nah, misalkan asal-mula kehidupan, *dan* asal-usul kecerdasan yang berkembang karenanya, *sama-sama* merupakan peristiwa yang amat muskil. Maka probabilitas sebuah planet, seperti Bumi, untuk mengalami keberuntungan ganda adalah *hasil* dari dua probabilitas yang rendah, dan ini sama dengan probabilitas yang jauh lebih kecil.

Seolah dalam teori asal-mula kita ini kita diberi jatah keberuntungan. Di ambang batas atasnya, jatah ini sama banyaknya dengan jumlah planet yang cocok di alam semesta. Kita boleh ‘memakai’ jatah ini sebagai komoditas terbatas dalam upaya kita menjelaskan keberadaan kita sendiri. Kalau kita memakai hampir semua jatah keberuntungan kita dalam teori tentang bagaimana kehidupan bermula di sebuah planet, maka kita boleh mendalilkan sedikit saja keberuntungan di bagian-bagian lanjutan teori tersebut; misalnya, di bagian evolusi kumulatif otak dan kecerdasan. Kalau kita tidak menghabiskan jatah keberuntungan kita dalam teori asal-mula kehidupan, kita masih punya sisa untuk dipakai pada teori evolusi lanjutan, setelah seleksi kumulatif bermula. Kalau kita ingin menggunakan sebagian besar jatah keberuntungan kita dalam teori asal-usul kecerdasan, maka tinggal sedikit saja yang tersisa untuk dipakai pada teori asal-mula kehidupan: kita harus memunculkan teori bahwa asal-mula kehidupan itu hampir-

hampir tidak terelakkan. Atau, kalau kita tidak perlu menghabiskan jatah keberuntungan pada dua tahap teori kita ini, kita bisa menggunakan sisanya untuk mendalilkan kehidupan di tempat lain di alam semesta.

Saya pribadi merasa, begitu seleksi kumulatif telah dimulai dengan benar, kita hanya perlu mendalilkan jumlah keberuntungan yang relatif sedikit pada evolusi kehidupan dan kecerdasan yang terjadi setelahnya. Hemat saya, seleksi kumulatif, begitu dimulai, cukup kuat untuk membuat evolusi kecerdasan itu mungkin terjadi, kalau bukan tak terelakkan. Ini berarti, kalau mau, kita bisa memakai hampir seluruh jatah keberuntungan yang boleh didalilkan dalam sekali pukul, pada teori asal-mula kehidupan di sebuah planet. Oleh karena itu, kita punya, kalau mau dipakai, peluang 1 berbanding 100 miliar miliar sebagai batas atasnya (atau 1 berbanding berapa pun jumlah planet yang kita pikir ada) untuk dipakai pada teori asal-mula kehidupan. Inilah jumlah keberuntungan maksimal yang boleh kita dalilkan dalam teori kita. Misalkan kita ingin mengajukan bahwa kehidupan dimulai ketika DNA dan mesin-mesin replikasi berbasis proteinnya itu kebetulan muncul secara semerta. Kita boleh saja mengajukan teori seboros itu, asalkan peluang terjadinya peristiwa kebetulan ini di sebuah planet tidak melebihi satu berbanding 100 miliar miliar.

Batas atas ini mungkin tampak besar. Mungkin pula cukup mampu mengakomodir kemunculan DNA atau RNA secara spontan. Tapi tetap sangat jauh dari cukup kalau tidak ada seleksi kumulatif. Bisa merakit tubuh prima yang terbang selihai walet, atau berenang selincah lumba-lumba, atau melihat setajam elang, dalam sekali kebetulan saja – seleksi selangkah – itu peluangnya satu berbanding angka yang jauh melebihi (jangan jumlah planet) jumlah atom di alam semesta! Mau bagaimana pun, kita pasti membutuhkan sejumlah besar seleksi kumulatif dalam penjelasan kita atas kehidupan.

Walaupun dalam teori asal-mula kehidupan ini kita berhak memakai jatah maksimum keberuntungan yang jumlahnya, mungkin, sama dengan 1 berbanding 100 miliar miliar, firasat saya mengatakan kita hanya butuh tidak lebih dari sebagian kecilnya saja. Asal-mula kehidupan di sebuah planet boleh jadi merupakan peristiwa yang sangat muskil menurut standar kita yang biasa, atau malah standar laboratorium kimia, tapi tetap cukup mungkin terjadi, tidak hanya sekali tetapi berkali-kali, di seluruh alam semesta. Kita boleh anggap argumen statistis mengenai jumlah planet ini sebagai argumen pilihan terakhir. Di akhir bab ini saya akan mengajukan poin paradoksal bahwa teori yang kita cari mungkin memang *mesti* tampak muskil, atau bahkan ajaib, bagi penilaian subjektif kita (mengingat batas penilaian subjektif kita itu sendiri). Akan tetapi, masih masuk akal kalau kita memulainya dengan mencari teori asal-mula kehidupan dengan derajat kemuskilan terkecil. Kalau teori bahwa DNA dan mesin penyalinnya muncul secara spontan itu begitu muskil sehingga memaksa kita berasumsi bahwa kehidupan itu amat langka di alam semesta, dan bahkan hanya terjadi di Bumi saja, pilihan pertama kita adalah mencoba mencari teori yang lebih mungkin. Nah, bisakah kita memunculkan spekulasi tentang cara-cara yang relatif *mungkin* agar seleksi kumulatif dapat bermula?

Kata ‘berspekulasi’ memang punya nuansa makna peyoratif, tapi di sini ceritanya lain. Kita memang hanya bisa berspekulasi kalau peristiwa yang dibahas terjadi empat miliar tahun yang lalu dan terjadi, apalagi, di dunia yang pastinya lain sekali dari yang kita kenal saat ini. Misalnya, hampir pasti dahulu tidak ada oksigen bebas di atmosfer. Walau perkimiaan dunia sudah berubah, *hukum-hukum* kimia belum berubah (itu mengapa disebut hukum). Dan para ahli kimia modern cukup paham dengan hukum-hukum tersebut untuk mampu membuat spekulasi yang berdasar, spekulasi yang harus melewati uji kemungkinan ketat yang diwajibkan hukum tersebut.

Anda tidak bisa asal-asalan dan sembarangan berspekulasi, dengan khayalan melantur liar seperti fiksi ilmiah dengan klise-klise tidak memuaskan itu: ‘mesin hiper’, ‘lengkung waktu’, dan ‘mesin kemuskilan ananta’-nya. Dari semua spekulasi yang mungkin ada tentang asal-mula kehidupan, kebanyakan menyalahi hukum-hukum kimia dan tak perlu dihiraukan, sekalipun kita menggunakan seluruh argumen penghabisan kita tentang jumlah planet. Oleh karena itu, spekulasinya harus teliti dan selektif, agar bisa konstruktif. Tapi Anda memang harus jadi ahli kimia untuk bisa melakukannya.

Saya ahli biologi, bukan kimia, dan saya mesti memasrahkan hitung-hitungan yang benar pada ahlinya. Beda ahli kimia, beda pula teori andalannya, dan kita tidak pernah kekurangan teori. Saya bisa saja secara objektif mencoba memaparkan semua teori ini di hadapan Anda. Itu pas untuk buku ajar mahasiswa. Tapi ini bukan buku ajar. Gagasan dasar *Pembuat Arloji yang Buta* adalah bahwa kita tidak perlu mendalilkan seorang perancang untuk memahami kehidupan, atau semua hal lain di alam semesta. Kita di sini berurusan dengan *jenis* solusi yang mesti dicari, karena jenis masalah yang kita hadapi. Saya rasa ini paling baik dijelaskan bukan dengan mengamati semua teori satu per satu, tetapi dengan melihat *satu* saja sebagai contoh seperti apa masalah dasarnya – seperti apa seleksi kumulatif bermula – *dapat* dipecahkan.

Nah, teori mana yang dipilih untuk sampel representatif saya? Sebagian besar buku ajar amat condong pada kelompok teori yang berdasar pada gagasan ‘sup purba’ organik. Mungkin atmosfer Bumi sebelum kehidupan muncul itu mirip atmosfer planet-planet lain yang masih tak berkehidupan. Tanpa oksigen, sarat hidrogen dan air, karbon dioksida, sangat mungkin juga ada amonia, metana, dan gas-gas organik sederhana lainnya. Ahli kimia tahu bahwa iklim tanpa oksigen seperti ini cenderung kondusif bagi terbentuknya sintesis spontan senyawa-senyawa organik. Di dalam botol-botol percobaan, mereka telah menyiapkan rekonstruksi kondisi Bumi purba. Mereka mencetuskan percikan listrik (simulasi atas kilat) ke botol-botol itu, dan sinar ultraviolet, yang pasti jauh lebih pekat sebelum Bumi punya lapisan ozon, pelindungnya dari sinar matahari. Hasil dari eksperimen-eksperimen ini menggembirakan. Molekul-molekul organik, yang sebagian di antaranya bertipe sama dengan yang lazimnya ditemukan pada benda-benda hidup, secara spontan merakit dirinya sendiri di dalam botol-botol ini. DNA ataupun RNA belum muncul, tetapi komponen-komponen penyusun dari molekul-molekul besar ini, yang disebut purina dan pirimidina, sudah. Begitu pula dengan komponen-komponen penyusun protein: asam amino. Mata rantai yang hilang dari kelompok teori-teori ini adalah asal-mula replikasi. Komponen-komponen penyusun itu belum bergabung untuk membentuk rantai swareplikasi seperti RNA. Mungkin, suatu saat nanti.

Tapi, bagaimana pun juga, teori sup purba organik bukanlah teori yang saya pilih untuk mengilustrasikan jenis solusi yang mesti kita cari. Saya sudah memilihnya di buku pertama saya, *The Selfish Gene*, jadi saya kira di sini saya akan menjajal teori yang agaknya kurang populer (walau belakangan ini mulai didukung), yang bagi saya setidaknya memiliki peluang bagus untuk benar. Nyali teori ini cukup memikat, dan memang dengan baik melukiskan ciri-ciri yang harus dimiliki teori asal-mula kehidupan yang memuaskan. Nama teori ini adalah teori ‘mineral anorganik’. Pencetusnya seorang kimiawan dari Glasgow Graham Cairns-Smith. Pertama sekali diajukan 20 tahun lalu dan sejak itu dikembangkan dan dielaborasi dalam tiga buku. Buku ketiga, *Seven Clues to the Origin of Life*, memperlakukan asal-mula kehidupan sebagai teka-teki yang membutuhkan pemecahan ala Sherlock Holmes.

Pandangan Cairns-Smith tentang mesin-mesin DNA/protein adalah bahwa besar kemungkinan kemunculannya relatif baru, mungkin sebaru tiga miliar tahun yang lalu. Sebelum itu, ada

banyak generasi seleksi kumulatif, yang berdasar pada entitas-entitas bereplikasi yang agak lain. Begitu DNA ada, ia terbukti menjadi replikator yang jauh lebih efisien, dan yang efeknya jauh lebih berdaya bagi replikasinya sendiri, sehingga sistem replikasi asali yang melahirkannya terbuang dan terlupakan. Mesin-mesin DNA modern, menurut pandangan ini, adalah pendaatang anyar, perampas peran replikator fundamental, yang telah mengambil alih peran tersebut dari replikator yang lebih awal dan bakal. Bukan tidak mungkin proses perampasan ini berupa rangkaian, tetapi proses replikasi asalnya pastilah cukup sederhana hingga dapat terjadi melalui hal yang saya istilahkan ‘seleksi selangkah’ tadi.

Ahli kimia membagi subjek telitian mereka ke dalam dua cabang, organik dan anorganik. Ilmu kimia organik adalah ilmu kimia untuk satu unsur saja, yaitu karbon. Ilmu kimia anorganik berkenaan dengan semua unsur lainnya. Karbon memang penting dan pantas memiliki cabang ilmu kimianya sendiri, sebagian karena ilmu kimia kehidupan itu memang ilmu kimia karbon, dan sebagian lagi karena ciri-ciri yang membuat ilmu kimia karbon cocok bagi kehidupan juga membuatnya cocok bagi proses-proses industri, seperti di industri plastik. Ciri hakiki karbon yang membuatnya begitu cocok bagi kehidupan dan sintetika industrial adalah bahwa atom-atomnya bergabung membentuk repertoar tak terbatas yang terdiri dari aneka jenis molekul sangat besar. Unsur lain yang memiliki ciri seperti ini adalah silikon. Kendati perkimiaan kehidupan Bumi modern itu serba perkimiaan karbon, belum tentu seperti itu di seluruh alam semesta, dan mungkin juga tidak selalu begitu di Bumi ini. Cairns-Smith percaya bahwa kehidupan asali di planet ini bertumpu pada kristal-kristal anorganik, seperti silikat, yang mampu mereplikasi diri. Kalau benar begitu, replikator organik, dan DNA, pasti telah mengambil alih atau merampas peran ini.

Ia mengetengahkan beberapa argumen untuk kemungkinan umum wacana ‘pengambilalihan’ ini. Kubah batu, misalnya, merupakan struktur stabil yang mampu berdiri bertahun-tahun sekalipun tidak ada semen yang mengikatnya. Membangun struktur kompleks melalui evolusi itu ibarat membangun kubah tak bersemen dan Anda hanya boleh meletakkan satu batu sekali waktu. Kalau dipikir naif, ini hal yang mustahil. Kubah baru bisa berdiri begitu batu terakhir ditaruh pada tempatnya, tapi tahap-tahap sebelumnya tidak stabil. Namun, kubah seperti itu cukup mudah dibangun kalau kita boleh mengurangi dan menambahkan batu. Pertama-tama, bangun timbunan batu yang padu, lalu bangun kubahnya di atas landasan yang padu ini. Lalu, begitu semua batu kubah telah berada pada tempatnya masing-masing, termasuk batu pengunci tepat di puncaknya, pelan-pelan singkirkan batu-batu penyokong di bawahnya dan, dengan sedikit keberuntungan, kubah itu akan tetap berdiri. Stonehenge awalnya sukar dimengerti hingga kita sadar bahwa para pembangunnya menggunakan semacam perancah, atau mungkin lerengan tanah, *yang sudah tidak ada*. Kita hanya dapat melihat hasil akhirnya, dan perancah yang sudah hilang itu harus kita simpulkan belakangan. Demikian juga, DNA dan protein merupakan dua pilar dari sebuah kubah yang kukuh dan anggun, yang bertahan begitu semua bagian penyusunnya ada secara bersamaan. Sukar membayangkannya muncul lewat proses selangkah demi selangkah kecuali dulu ada perancah yang hilang sudah. Perancah itu sendiri pastilah terbangun melalui bentuk seleksi kumulatif yang lebih dini, yang sifatnya hanya dapat kita duga. Tapi prosesnya pasti bertumpu pada entitas-entitas yang mampu bereplikasi, yang punya kuasa atas masa depannya sendiri.

Cairns-Smith menduga bahwa replikator asali merupakan kristal-kristal dari materi anorganik, seperti yang ditemukan pada tanah liat dan lumpur. Kristal hanyalah susunan besar atom atau molekul yang teratur dalam keadaan padu. Karena ciri yang dapat kita bayangkan sebagai

‘bentuk’nya, atom dan molekul kecil cenderung mudah berkumpul secara angger dan teratur. Hampir seolah mereka memang ‘ingin’ mengikat-padu dengan cara tertentu, tapi ilusi ini hanyalah konsekuensi tak-sengaja dari ciri-ciri mereka. Cara yang mereka ‘pilih’ untuk berhimpun inilah yang membentuk kristal. Artinya juga, dalam kristal besar seperti intan sekalipun, bagian mana saja dari kristal tersebut sama *persis* dengan bagian lainnya, kecuali di tempat-tempat yang ada cacatnya. Kalau kita bisa mengerdil ke skala atomis, kita akan melihat larik-larik atom yang hampir tak berujung, memanjang dalam bentuk garis-garis lurus sejauh mata memandang, seperti galeri repetisi geometris.

Karena yang kita sorot di sini adalah replikasi, hal pertama yang perlu kita selidiki: bisakah kristal mereplikasi strukturnya? Kristal terbuat dari begitu banyak lapisan atom (atau padanannya), dan tiap lapisan menumpangi lapisan di bawahnya. Atom (atau ion; perbedaannya tidak perlu kita hiraukan) mengapung bebas dalam larutan, tapi jika kebetulan berjumpa dengan kristal, mereka cenderung merapat masuk ke permukaan kristal tersebut. Larutan garam mengandung ion sodium dan ion klorida yang saling berdesakan secara, kurang-lebih, semrawut. Kristal garam biasa merupakan susunan padat dan teratur dari ion-ion sodium yang berpadu-padan dengan ion-ion klorida dengan sudut-sudut yang tepat pas. Ketika ion-ion yang mengapung di air itu kebetulan berbenturan dengan permukaan keras kristal tersebut, mereka cenderung melekat. Dan mereka melekat pas di tempat yang tepat untuk menambahkan lapisan baru pada kristal itu persis seperti lapisan di bawahnya. Jadi begitu pembentukan kristal dimulai, ia tumbuh, dan tiap lapisannya sama dengan lapisan di bawahnya.

Kadang, kristal terbentuk secara spontan di dalam larutan. Kadang, pembentukannya harus ‘dibibiti’, dengan partikel debu atau kristal-kristal kecil yang dimasukkan dari tempat lain. Cairns-Smith mengajak kita untuk mencoba eksperimen berikut. Larutkan sejumlah besar fixer ‘hypo’ (larutan kimia untuk cuci film foto) di air yang sangat panas. Lalu biarkan larutan ini dingin, jangan biarkan debu masuk. Larutan itu kini ‘kelewat-jenuh’, siap-sedia membuat kristal, tapi tanpa kristal-kristal bibit untuk memulai prosesnya. Saya kutip dari buku Cairns-Smith, *Seven Clues to the Origin of Life*:

Pelan-pelan buka tutup gelas kimianya, jatuhkan secuil kecil kristal ‘hypo’ ke atas permukaan larutan itu, dan terpukaulah melihat reaksinya. Kristal tampak tumbuh; berkali-kali patah dan patahan-patahan itu pun bertumbuh pula ... Gelas kimia Anda disesaki kristal, yang sebagian sampai beberapa sentimeter panjangnya. Lalu, setelah beberapa menit, semuanya berhenti. Larutan ajaib itu kehilangan khasiatnya – walau kalau mau melihat pertunjukan itu lagi, panasi dan dinginkan saja kembali gelas kimia itu ... kelewat-jenuh berarti berlarutan lebih dari yang semestinya ... larutan kelewat-jenuh yang dingin itu hampir tidak tahu harus apa. Ia harus ‘diberi tahu’ dengan menambahkan sepotong kristal yang unit-unitnya (yang jumlahnya bermiliar-miliar) sudah berpadu-padan secara khas kristal-kristal ‘hypo’. Larutan itu harus dibibiti.

Beberapa zat kimia punya potensi untuk mengkristal dalam dua cara. Grafit dan intan, misalnya, sama-sama merupakan kristal karbon murni. Atom-atomnya identik. Perbedaan kedua zat ini terletak hanya pada pola geometris padu-padan atom-atom karbonnya. Pada intan, atom-atom karbon berpadu-padan dengan pola segi empat yang amat sangat stabil. Itu mengapa intan keras sekali. Pada grafit, atom-atom karbonnya tersusun dalam bentuk segi enam datar yang bertumpuk-tumpuk. Ikatan di antara lapisan-lapisannya lemah, dan karenanya mudah bergeser. Itu mengapa grafit terasa licin dan digunakan sebagai pelumas. Sayangnya Anda tidak bisa mengkristalkan intan dari larutan dengan cara membibitinya, seperti hypo. Kalau bisa, Anda pasti sudah kaya. Eh, kalau dipikir lagi, tidak jadi, karena semua orang bisa melakukannya.

Nah, misalkan ada larutan suatu zat yang kelewat-jenuh, seperti hypo yang mudah mengkristal dari larutan, dan seperti karbon yang mampu mengkristal dalam salah satu dari dua cara tadi. Cara yang satu mungkin seperti grafit, yang atom-atomnya tersusun berlapis-lapis, sehingga

terbentuk menjadi kristal datar; sementara cara lainnya menghasilkan kristal berbentuk intan yang tebal-tebal. Secara bersamaan, secuil kecil kristal datar dan secuil kecil kristal tebal kita jatuhkan ke dalam larutan kelewat-jenuh itu. Kita dapat menggambarkan reaksi yang terjadi lewat elaborasi deskripsi Cairns-Smith mengenai eksperimen hypo-nya. Terpukaulah melihat reaksinya. Kedua kristal tampak tumbuh; berkali-kali patah dan patahan-patahan itu pun bertumbuh pula. Kristal datar memperanakkan populasi kristal datar. Kristal tebal memperanakkan populasi kristal tebal. Kalau satu jenis kristal itu cenderung tumbuh dan membelah lebih cepat dari yang lain, itu berarti seleksi alam dalam bentuknya yang sederhana telah terjadi. Tapi proses ini masih kekurangan satu bahan vital untuk dapat memunculkan perubahan evolusi. Bahan tersebut adalah variasi hereditas, atau padanannya. Harus ada aneka ragam varian kecil, bukan dua jenis kristal saja, yang membentuk silsilah bentuk serupa, dan kadang ‘bermutasi’ menghasilkan bentuk-bentuk baru. Apakah kristal asli punya ciri yang berkenaan dengan mutasi hereditas?

Tanah liat dan lumpur dan batu terbuat dari kristal-kristal sangat kecil. Jumlah ketiganya melimpah di Bumi, dan besar kemungkinan dari dahulu sudah begitu. Bila Anda lihat permukaan beberapa jenis tanah liat dan mineral lainnya dengan mikroskop pemindai elektron, Anda akan menyaksikan pemandangan yang indah menakjubkan. Kristal-kristal tumbuh seperti barisan bunga atau kaktus, taman kelopak-kelopak mawar tanhayati, sulur-sulur kecil seperti tanaman berair yang saling-silang, pipa-pipa organ yang meremang, bentuk-bentuk sudut rumit yang berlipat-lipat seperti origami kristal kecil, sungut-sungut yang menggeliat seperti cacing atau odol yang diremas. Pola-pola tertib ini menjadi lebih mencolok lagi pada level pembesaran yang lebih tinggi. Pada level yang menyingkap posisi aktual atom-atom, permukaan sebuah kristal tampak memiliki keberaturan layaknya kain wol tebal hasil anyaman mesin. Tapi – dan ini poin pentingnya – ada cacat. Tepat di tengah bentangan pola anyaman rapi itu bisa jadi ada tambalan, yang identik dengan semua yang lain tapi memuntir ke sudut berbeda sehingga ‘anyaman’nya berangsur ke arah lain. Atau anyamannya mungkin tetap ke arah yang sama, tetapi tiap barisnya ‘tergelincir’ setengah baris ke samping. Hampir semua kristal yang terbentuk secara alami pasti ada cacatnya. Dan begitu muncul, cacat ini biasanya disalin sebagai lapisan kerak kristal berikutnya yang menumpang di atas lapisan sebelumnya.

Cacat bisa terjadi di mana pun di atas permukaan sebuah kristal. Kalau tebersit tentang daya tampung untuk menyimpan informasi (seperti saya), Anda bisa membayangkan sejumlah besar pola cacat yang berbeda-beda yang dapat dibuat di atas permukaan sebuah kristal. Semua kalkulasi tentang membuntel Kitab Perjanjian Baru ke dalam DNA sebuah bakteri dapat dilakukan, pun sama impresifnya, pada hampir semua kristal. Yang dimiliki DNA, tapi tidak kristal, adalah alat pembaca informasi. Mengesampingkan masalah pembacaan ini, Anda dapat dengan mudah merancang kode arbitrer di mana cacat dalam struktur atomis sebuah kristal mengindikasikan bilangan-bilangan biner. Anda bisa membuntel beberapa Kitab Perjanjian Baru ke dalam sebuah kristal mineral yang ukurannya sekecil kepala jarum pentol. Di skala yang lebih besar, seperti inilah kiranya informasi musik disimpan di atas permukaan cakram laser (*‘compact’*). Not-not musik digubah, oleh komputer, ke dalam bilangan-bilangan biner. Laser dipakai untuk mengetsa pola cacat-cacat kecil di permukaan cakram yang mulus bak kaca itu. Tiap lubang kecil yang dietsa merupakan bilangan 1 biner (atau 0; labelnya manasuka). Saat Anda memutar cakram, sinar laser lain ‘membaca’ pola cacat-cacat tersebut, dan komputer khusus yang ditanamkan ke pemutar mengembalikan bilangan-bilangan biner ke bentuk getaran suara, yang diperbesar sehingga Anda dapat mendengarnya.

Meskipun cakram laser dewasa ini dipakai untuk musik, Anda dapat membuntel seluruh jilid *Encyclopaedia Britannica* ke dalamnya, dan membacanya dengan teknik laser yang sama. Cacat-cacat pada kristal di level atomis jauh lebih kecil dari liang-liang yang dietsakan di atas permukaan cakram laser, sehingga kristal kemungkinan mampu mengemas lebih banyak informasi ke satu bidang tertentu. Molekul-molekul DNA, yang kapasitas penyimpanan informasinya sudah cukup mengesankan kita, itu sendiri sebetulnya mirip dengan kristal. Kendati secara teoretis mampu menyimpan informasi dalam jumlah yang mencengangkan seperti DNA atau cakram laser, bukan berarti kristal-kristal tanah liat pernah melakukannya. Peran kristal-kristal tanah liat dan mineral lainnya dalam teori ini adalah sebagai replikator asali ‘berteknologi rendah’, yang pada akhirnya digantikan oleh DNA berteknologi tinggi. Kristal-kristal ini terbentuk secara spontan di perairan planet kita tanpa ‘mesin-mesin’ rumit yang dibutuhkan DNA. Cacat-cacatnya pun terbentuk secara spontan, dan sebagian darinya dapat direplikasi dalam lapisan-lapisan kristal yang terbentuk kemudian. Kalau fragmen-fragmen kristal yang cacatnya pas itu kemudian sempal, kita dapat membayangkannya berlaku sebagai ‘bibit’ bagi kristal-kristal baru, yang masing-masing ‘mewarisi’ pola cacat ‘induknya’.

Nah, sudah ada gambaran spekulatif kristal-kristal mineral di Bumi purba yang memeragakan sebagian dari ciri-ciri replikasi, memperbanyak diri, keturunan, dan mutasi yang perlu ada agar seleksi kumulatif dapat bermula. Masih ada satu bahan lagi yang hilang, ‘kuasa’: sifat replikator itu mesti memengaruhi kemungkinannya untuk direplikasi. Bila kita membahas tentang replikator secara abstrak, kita melihat bahwa ‘kuasa’ itu dapat berupa ciri-ciri langsung replikator itu sendiri, ciri-ciri intrinsik seperti ‘daya rekat’. Di tingkat yang elementer seperti ini, istilah ‘kuasa’ tampaknya berlebihan. Saya menggunakannya hanya karena potensinya di tahap-tahap lanjutan dalam evolusi: misalnya, daya taring seekor ular untuk menurunkan (melalui konsekuensi tak langsungnya terhadap ketahanan hidup ular) kode-kode DNA untuk taring. Baik berupa kristal-kristal mineral ataupun cikal-bakal langsung dari DNA itu sendiri, kita dapat menduga bahwa ‘kuasa’ yang dikerahkan para replikator berteknologi rendah ini bersifat langsung dan elementer, seperti daya rekat. Perkakas kuasa yang lebih canggih, seperti taring ular atau bunga anggrek, muncul belakangan.

Lalu apa arti ‘kuasa’ bagi tanah liat? Ciri-ciri insidental apa yang dapat memengaruhi kemungkinan bahwa varietas tanah liat yang sama akan menyebar ke berbagai penjuru negeri? Tanah liat terbuat dari komponen penyusun kimiawi seperti asam silika dan ion-ion logam, dalam bentuk larutan di sungai dan aliran air setelah melarut – ‘melapuk’ – keluar dari batuan-batuan jauh di hulu sana. Jika kondisinya tepat, mereka menghablur dari larutan itu lagi di hilir, membentuk tanah liat. (Sebetulnya, frasa ‘aliran air’ di konteks ini lebih berarti rembesan dan cucuran air tanah, bukan sungai yang mengalir deras. Tapi, untuk mudahnya, saya akan tetap menggunakan arti umum dari frasa ini.) Terbentuk tidaknya satu jenis kristal tanah liat tertentu bergantung pada, antara lain, kecepatan dan pola aliran airnya. Tapi endapan tanah liat juga dapat *memengaruhi* aliran air tersebut. Ini terjadi ketika jenjang, bentuk, dan tekstur tanah yang dialiri air tersebut secara tak sengaja diubah. Bayangkan ada varian tanah liat yang kebetulan mampu membentuk ulang struktur tanah sehingga alirannya makin kencang. Konsekuensinya: tanah liat tersebut tersapu lagi. Jenis tanah liat ini dapat dianggap tidak terlalu ‘berhasil’. Tanah liat lain yang dapat dianggap gagal adalah yang mengubah aliran sedemikian rupa sehingga varian rivalnya yang justru diuntungkan.

Tentu saja, bukan berarti kita anggap tanah liat itu memang ‘ingin’ terus ada. Dari tadi, yang kita bicarakan hanyalah konsekuensi insidental, peristiwa-peristiwa yang terjadi akibat ciri-ciri

yang kebetulan saja dimiliki replikator tersebut. Bayangkan varian tanah liat yang lain lagi. Yang satu ini kebetulan menghambat aliran air sedemikian rupa sehingga pengendapan tanah liat jenisnya *sendiri* makin mungkin terjadi. Tentunya, varian kedua ini cenderung menjadi banyak, karena kebetulan mampu memanipulasi aliran air demi 'keuntungan'-nya sendiri. Varian ini akan menjadi varian tanah liat yang 'berhasil'. Tapi sejauh ini kita baru berurusan dengan seleksi selangkah. Bagaimana dengan seleksi kumulatifnya? Bisakah bermula?

Mari berspekulasi sedikit lebih jauh lagi: misalkan sebuah varian tanah liat meningkatkan peluangnya untuk mengendap, dengan membendung aliran air. Ini merupakan konsekuensi tak sengaja dari struktur cacat khas yang dimiliki tanah liat tersebut. Di aliran air mana pun yang ada tanah liat seperti ini, genangan-genangan besar yang dangkal terbentuk di atas bendungan, dan aliran utama airnya teralih ke jalur yang baru. Di dalam kolam-kolam yang menggenang ini, makin banyak jenis tanah liat yang sama mengendap. Sukses kolam-kolam dangkal ini diteruskan di sepanjang aliran air mana pun yang kebetulan 'terinfeksi' kristal-kristal bibit dari jenis tanah liat ini. Nah, karena aliran utama air teralihkan, di musim kemarau kolam-kolam dangkal ini lebih mudah mengering. Tanah liatnya kering kerontang dipanggang sinar matahari, dan lapisan atasnya ditiup angin menjadi debu. Tiap partikel debu ini mewarisi struktur cacat yang menjadi ciri tanah liat induk yang mendirikan bendungan, struktur yang memberinya ciri pembendung. Jika dianalogikan dengan rinai informasi genetik pohon willow yang jatuh di saluran air, bisa dibilang debu ini membawa 'instruksi' cara membendung aliran air yang, pada akhirnya, akan menghasilkan debu-debu lagi. Debu ini melanglang buana dibawa angin, dan kemungkinan besar sebagian partikelnya tidak sengaja mendarat di aliran air yang lain, yang masih belum 'terinfeksi' bibit-bibit tanah liat jenis pembendung ini. Begitu terinfeksi jenis debu yang tepat, aliran air yang baru itu mulai menumbuhkan kristal-kristal tanah liat pembuat bendungan, dan seluruh daur pengendapan, pembendungan, pengeringan, dan pengikisannya pun dimulai lagi.

Menyebut daur ini daur 'kehidupan' berarti berasumsi, tapi memang begitulah kira-kira wataknya, dan daur tersebut juga memiliki kemampuan daur kehidupan sejati dalam hal mengawali seleksi kumulatif. Karena aliran-aliran air terinfeksi 'bibit-bibit' debu yang diterbangkan dari aliran lain, kita bisa menyusun aliran-aliran air ini dalam tatanan 'leluhur' dan 'keturunan'. Tanah liat yang membendung kolam-kolam di aliran B mendarat dalam bentuk kristal-kristal debu yang diterbangkan angin dari aliran A. Lambat-laun, kolam-kolam aliran B akan mengering dan menghasilkan debu, yang akan menginfeksi aliran F dan P. Merunut sumber tanah liat pembuat bendungan tadi, kita dapat menyusun aliran-aliran ini ke dalam 'pohon keluarga'. Setiap aliran yang terinfeksi memiliki aliran 'induk', dan dapat pula memiliki lebih dari satu aliran 'anak'. Tiap aliran itu seumpama tubuh, yang 'perkembangan'-nya dipengaruhi 'gen-gen' bibit debu, tubuh yang nantinya membiakkan bibit-bibit debu yang baru. Tiap 'generasi' di dalam daur ini dimulai ketika kristal-kristal bibit memisah dari aliran air induknya dalam bentuk debu. Struktur berhablur masing-masing partikel debu ini disalin dari tanah liat di aliran air induknya. Ia meneruskan struktur berhablur tersebut ke aliran air anaknya, yang bertumbuh, menjamak, dan akhirnya merantaukan 'bibit-bibit' baru lagi.

Struktur kristal purba ini dilestarikan pada generasi-generasi berikutnya kecuali ada kesalahan yang kadang terjadi dalam proses pertumbuhan kristal, perubahan sesekali dalam pola peletakan atom-atomnya. Lapisan-lapisan berikutnya dari kristal yang sama akan menyalin kesalahan yang sama, dan jika kristal itu pecah menjadi dua, ia akan menghasilkan subpopulasi kristal yang telah berubah. Nah, jika perubahan tersebut menjadikan kristal tersebut kurang atau lebih efisien dalam

daur pembendungan/pengeringan/pengikisan, hal ini akan memengaruhi jumlah salinan yang dimilikinya dalam ‘generasi-generasi’ berikutnya. Kristal-kristal yang telah berubah itu mungkin, misalnya, lebih mudah membelah (‘bereproduksi’). Tanah liat yang terbentuk dari kristal-kristal yang telah berubah mungkin memiliki daya bendung yang lebih kuat dalam aspek detail yang mana pun. Ia mungkin lebih mudah retak setelah sekian lama terpapar sinar matahari. Ia mungkin lebih mudah menyerpih menjadi debu. Partikel-partikel debunya mungkin lebih mudah diterbangkan angin, layaknya bulu-bulu bibit pohon willow. Beberapa tipe kristal mungkin mempersingkat ‘daur hidup’nya, dan karena itu mempercepat ‘evolusi’nya. Ada banyak kesempatan bagi ‘generasi-generasi’ penerus untuk makin ‘pandai’ dalam membiakkan generasi-generasi berikutnya. Dengan kata lain, ada banyak kesempatan berlangsungnya seleksi kumulatif yang sederhana.

Gagasan-gagasan kecil yang liar ini, yang diimbuhi oleh Cairns-Smith sendiri, berkenaan hanya dengan salah satu dari beberapa jenis ‘daur hidup’ mineral yang bisa mengawali perjalanan seleksi kumulatif di sepanjang jalan vitalnya. Masih ada yang lainnya. Berbagai varietas kristal dapat hijrah ke aliran-aliran air yang baru, bukan dengan cara menyerpih menjadi ‘bibit-bibit’ debu, tapi dengan mengiris aliran airnya sendiri menjadi banyak subaliran kecil yang menyebar, dan pada akhirnya bertemu dan menginfeksi sistem-sistem sungai yang baru. Beberapa varietas mungkin merekayasa air terjun yang lebih cepat melapukkan batu-batu, dan karenanya memperlekas pelarutan bahan-bahan mentah yang dibutuhkan untuk membuat tanah liat baru di hilir sungai. Beberapa varietas kristal mungkin mengoptimalkan dirinya dengan cara menyusahkan varietas-varietas ‘rival’ yang bersaing memperebutkan bahan mentah. Sebagian varietas mungkin menjadi ‘pemangsa’, mengurai varietas rival dan menggunakan unsur-unsurnya sebagai bahan mentah. Tetap ingat bahwa semua ini terjadi tanpa indikasi rekayasa ‘sengaja’, baik di konteks ini maupun dalam kehidupan modern berbasis DNA. Dengan sendirinya dunia sarat akan varietas-varietas tanah liat (atau DNA) yang *kebetulan* memiliki ciri yang membuatnya bertahan dan menyebarkan diri.

Sekarang kita naik ke tingkat berikutnya dari argumen ini. Beberapa silsilah kristal kebetulan merangsang sintesis zat-zat baru yang mendorong jalan mereka ke ‘generasi-generasi’ berikutnya. Zat-zat sekunder ini (setidaknya pada mulanya) tidak akan memiliki silsilah leluhur-keturunannya sendiri, tapi tetap akan dibuat lagi oleh tiap generasi replikator utama. Mereka dapat dianggap sebagai alat-alat yang dipakai silsilah kristal bereplikasi, cikal-bakal ‘fenotipe’ primitif. Cairns-Smith meyakini bahwa molekul-molekul *organik* ini menonjol di antara ‘alat-alat’ yang tidak bereplikasi dari para replikator kristal anorganiknya. Molekul-molekul organik kerap dipakai dalam industri kimia anorganik komersial karena efek-efeknya pada aliran fluida, dan pada pemecahan atau pertumbuhan partikel-partikel anorganik: pendeknya, jenis efek yang dapat memengaruhi ‘keberhasilan’ silsilah kristal-kristal yang bereplikasi. Misalnya, mineral tanah liat yang punya nama merdu montmorilonit cenderung mengurai ketika sejumlah kecil molekul organik yang punya nama sumbang karboksimetil selulosa ada. Di lain pihak, karboksimetil selulosa dengan jumlah yang lebih kecil justru berefek sebaliknya: membantu menjaga keutuhan partikel-partikel montmorilonit. Tanin, jenis molekul organik lainnya, dipakai dalam industri perminyakan untuk membuat lumpur lebih mudah dibor. Kalau para juru bor dapat mengeksploitasi molekul-molekul organik untuk memanipulasi aliran dan kemudahan mengebor lumpur, tidak ada alasan bagi mineral-mineral swareplikasi untuk tidak mengeksploitasi seleksi kumulatif dengan cara yang sama.

Di titik ini, teori Cairns-Smith mendapatkan bonus gratis kemungkinan tambahan. Kebetulan para kimiawan lain pendukung teori-teori ‘sup purba’ organik yang lebih konvensional, telah lama menerima bahwa mineral-mineral tanah liat punya peran. Mengutip salah satunya (D. M. Anderson), ‘Luas diterima bahwa beberapa, atau mungkin banyak, dari reaksi dan proses kimia abiotik yang berujung pada asal-usul mikro-organisme di Bumi terjadi dini sekali dalam sejarah Bumi di dekat permukaan mineral tanah liat dan substrat anorganik lainnya.’ Anderson melanjutkan dengan lima ‘fungsi’ mineral tanah liat dalam membantu bermulanya kehidupan organik, misalnya ‘Konsentrasi reaktan-reaktan kimiawi melalui adsorpsi’. Tidak perlu kita sebutkan, atau bahkan pahami, kelimanya di sini. Bagi kita, yang penting adalah bahwa masing-masing dari lima ‘fungsi’ mineral tanah liat ini dapat diputarbalikkan, untuk menunjukkan kedekatan hubungan yang dapat terjadi antara sintesis kimiawi organik dan permukaan tanah liat. Oleh karena itu teori ini diuntungkan karena replikator tanah liat menyintesis molekul-molekul organik dan menggunakannya untuk tujuan sendiri.

Dengan detail lebih banyak dari yang dapat saya tampung di sini, Cairns-Smith membahas seperti apa awal-awalnya para replikator kristal tanah liat menggunakan protein, gula, dan yang terpenting, asam nukleat seperti RNA. Ia menduga bahwa RNA pertama sekali dipakai murni untuk tujuan struktural, seperti para juru bor menggunakan tanin atau kita menggunakan sabun dan detergen. Molekul-molekul seperti RNA, karena rantai punggungnya bermuatan negatif, cenderung menyelimuti sisi-sisi luar partikel-partikel tanah liat. Ini sudah ranah ilmu kimia yang berada di luar cakupan kita. Bagi kita, yang perlu disorot adalah bahwa RNA itu, atau semacamnya, sudah lama ada sebelum mampu mereplikasi diri. Ketika akhirnya mampu mereplikasi diri, ia merupakan perangkat yang dievolusikan ‘gen-gen’ kristal mineral untuk meningkatkan efisiensi pembuatan RNA (atau molekul semacamnya). Tetapi, begitu molekul swareplikasi yang baru ada, seleksi kumulatif jenis baru dapat bermula. Tadinya hanya berupa sampingan, para replikator baru ini sekarang jauh lebih efisien dibanding kristal-kristal asali yang diambil alihnya. Mereka berevolusi lebih jauh lagi, dan akhirnya menyempurnakan kode DNA yang kita kenal sekarang. Para replikator mineral asali tadi disingkirkan seperti perancah yang usang, dan semua kehidupan modern berevolusi dari leluhur bersama yang relatif baru, dengan satu sistem genetik seragam dan sistem biokimia yang sebagian besar seragam.

Dalam buku *The Selfish Gene* saya berspekulasi bahwa mungkin kita sekarang berada di ambang pengambilalihan genetik jenis baru. Para replikator DNA membangun ‘mesin-mesin ketahanan hidup’nya sendiri – tubuh-tubuh organisme hidup, termasuk kita. Sebagai bagian dari peralatannya, tubuh mengevolusikan otak, komputer bawaan yang tertanam padanya. Otak mengevolusikan kemampuan berkomunikasi dengan otak lain melalui bahasa dan tradisi budaya. Tapi lingkungan baru tradisi budaya ini membuka kemungkinan baru bagi entitas swareplikasi. Para replikator baru ini bukan DNA dan bukan pula kristal tanah liat. Mereka berupa pola-pola informasi yang hanya dapat berkembang di dalam otak atau produk buatan otak – buku, komputer, dan seterusnya. Tapi, karena otak, buku, dan komputer itu ada, para replikator baru ini, yang saya sebut mem untuk membedakannya dari gen, dapat menyebarkan diri dari otak ke otak, dari otak ke buku, dari buku ke otak, dari otak ke komputer, dari komputer ke komputer. Saat menyebar, mereka dapat berubah, bermutasi. Dan barangkali mem-mem ‘mutan’ dapat mengarahkan semacam pengaruh yang saya sebut di sini ‘kuasa replikator’. Ingat bahwa ini berarti pengaruh apa pun yang memengaruhi kemungkinan penyebaran mereka sendiri. Evolusi di bawah pengaruh para replikator baru ini – evolusi memis – sedang dalam masa cikal-bakalnya. Ia terejawantahkan dalam fenomena yang kita sebut evolusi kebudayaan. Evolusi kebudayaan jauh lebih pesat ketimbang evolusi berbasis DNA, yang membuat orang makin

mudah membayangkan wacana ‘pengambilalihan’ tadi. Dan kalau pengambilalihan replikator jenis baru ini dimulai, dapat dibayangkan bahwa ia akan meloncat jauh sekali meninggalkan DNA induknya (dan, kalau Cairns-Smith benar, tanah liat kakeknya). Bila demikian, kita boleh yakin bahwa komputer akan menjadi pelopor.

Bisakah nanti di kemudian hari komputer-komputer cerdas berspekulasi tentang asal-usulnya sendiri yang sudah terlupakan? Akankah tercetus, dalam benak salah satu dari mereka, kebenaran sesat bahwa mereka berasal dari bentuk kehidupan yang lebih jauh dan mula, yang berakar pada senyawa-senyawa kimia karbon organik, dan bukan pada prinsip-prinsip elektronik berbasis silikon seperti tubuhnya sendiri? Akankah seorang Cairns-Smith robotik menulis buku berjudul *Ambil-Paksa Elektronik*? Akankah ia kembali menemukan padanan elektronis untuk metafora kubah kita, dan menyadari bahwa komputer tidak mungkin ada secara semerta, tetapi pasti berawal dari proses seleksi kumulatif yang lebih mula? Akankah ia mengulik dan mereka-reka bahwa DNA mungkin merupakan replikator awalnya, korban perampasan makhluk elektronis? Dan apakah ia cukup mampu menduga bahwa DNA itu sendiri pun mungkin perampas replikator yang lebih dahulu dan purba: kristal-kristal silikat anorganik? Kalau ia tipe pemikir imajinatif, akankah ia pun melihat bahwa pada akhirnya kehidupan kembali ke basis silikon itu merupakan hal yang wajar, dan DNA tidak lebih dari sekadar selingan, kendati bertahan lebih lama dari tiga eon?

Ini fiksi ilmiah, dan mungkin terdengar mengada-ada. Tidak apa-apa. Lagi pula teori Cairns-Smith sendiri, dan malah semua teori tentang asal-mula kehidupan, mungkin terdengar terlalu mengada-ada bagi Anda dan sulit dipercaya. Anda merasa teori tanah liat Cairns-Smith, dan teori sup purba organik yang lebih ortodoks, itu terlalu muskil? Terdengar seperti perlu mukjizat agar atom-atom yang berdesak acak itu bisa menyatu membentuk molekul swareplikasi? Kadang saya pun merasa begitu. Tapi mari kita selami lebih dalam masalah mukjizat dan kemuskilan ini. Saya akan mengetengahkan poin yang paradoksal tetapi justru makin menarik. Sebagai ilmuwan, kita malah mestinya khawatir kalau asal-mula kehidupan *tidak* tampak bak mukjizat bagi kesadaran manusiawi kita sendiri. Teori yang (bagi kesadaran manusia biasa) tampak bak mukjizat *justru* merupakan jenis teori yang mestinya kita cari dalam perkara asal-mula kehidupan ini. Argumen ini, yang berisi pembahasan mengenai apa maksud mukjizat, akan dimuat dalam sisa dari bab ini. Ia juga menjadi perpanjangan dari argumen mengenai miliaran planet yang kita hadirkan tadi.

Jadi, apa maksudnya mukjizat? Mukjizat adalah suatu hal yang terjadi, tetapi yang bukan main mengejutkan. Jika patung batu pualam Bunda Maria tiba-tiba melambaikan tangannya kepada kita, kita akan menganggapnya mukjizat, karena semua pengalaman dan pengetahuan kita mengatakan bahwa batu pualam tidak berkelakuan seperti itu. Baru saja saya ucapkan ‘Biarlah saya disambar petir menit ini juga’. Jika petir benar-benar menyambar saya menit itu juga, itu akan dianggap mukjizat. Dan sebetulnya kedua kejadian ini tidak akan diklasifikasikan oleh sains sebagai kejadian yang sama sekali mustahil. Keduanya hanya akan dinilai sebagai sangat muskil, dan patung yang melambaikan tangannya itu lebih muskil ketimbang sambaran petir. Petir memang menyambar orang. Kita semua bisa saja disambar petir, tetapi probabilitasnya sangat rendah di setiap menitnya (walau *Guinness Book of Records* pernah menerbitkan gambar menarik seorang pria dari Virginia, berjulukan manusia penghantar petir, yang dalam masa pemulihan di rumah sakit setelah disambar petir ketujuh kalinya, dengan raut muka dihiasi gurat-gurat rasa gelisah). Satu-satunya hal ajaib dari cerita rekaan saya tadi adalah *kebetulan* di antara saya yang disambar petir dan mantra pemanggil musibah yang saya rapalkan.

Kebetulan adalah kemuskilan yang dilipatgandakan. Probabilitas saya disambar petir dalam setiap menit hidup saya itu mungkin 1 berbanding 10 juta (perkiraan kasarnya). Probabilitas saya memanggil sambaran petir di menit mana pun dalam hidup saya juga amat rendah. Saya baru saja melakukannya sekali dalam 23.400.000 menit hidup saya sejauh ini, dan saya tidak yakin akan melakukannya lagi, jadi sebut saja peluangnya satu berbanding 25 juta. Untuk menghitung probabilitas gabungan dari kebetulan yang terjadi dalam menit mana pun, kita mengalikan kedua probabilitas tersebut. Untuk hitung-hitungan kasar saya, peluangnya satu berbanding 250 triliun. Jika kebetulan sebesar ini terjadi pada saya, saya akan menyebutnya mukjizat dan ke depannya saya akan menjaga mulut saya. Tapi biarpun peluang terjadinya kebetulan tersebut amat sangat rendah, kita masih bisa menghitungnya. Tidak betul-betul nihil.

Nah, untuk perkara patung batu pualam tadi, molekul-molekul batu pualam padat tetaplah terus saling berdesakan ke arah yang acak. Desakan semua molekul ini sifatnya saling mementahkan, sehingga tangan patung tersebut tetap diam. Tapi jika, secara kebetulan yang luar biasa, semua molekul tersebut bergerak ke arah yang sama secara bersamaan, tangannya akan bergerak. Jika mereka semua kemudian berbalik arah secara bersamaan, tangannya pun bergerak balik. Dengan begitu, adalah *mungkin* bagi patung batu pualam untuk melambatkan tangan pada kita. Hal itu bisa terjadi. Peluang terjadinya kebetulan ini tak terbayangkan kecilnya, tapi tidak sampai tak terhitung. Seorang fisikawan kolega saya telah berbaik hati menghitungnya. Peluangnya satu berbanding angka yang nolnya terlalu panjang, sampai-sampai usia seluruh alam semesta sejauh ini tidak cukup untuk menuliskannya! Secara teori, dengan perbandingan probabilitas yang sama, seekor lembu pun bisa melompati rembulan. Kesimpulan dari bagian argumen kita yang ini adalah bahwa kita bisa *menghitung* hingga ke wilayah-wilayah kemuskilan ajaib yang jauh lebih besar dari hal yang bisa kita *bayangkan* sebagai hal yang mungkin.

Sekarang, mari kita lihat perkara hal yang kita anggap mungkin. Yang dapat kita bayangkan sebagai hal yang mungkin itu serupa pita sempit di tengah-tengah spektrum kemungkinan yang jauh lebih lebar. Kadang lebih sempit dari yang sebetulnya ada di sana. Cahaya akan jadi perumpamaan yang pas untuk ini. Mata kita dibangun untuk menangani pita frekuensi elektromagnetik yang sempit (yang kita sebut cahaya), yang berada di tengah-tengah spektrum: dari gelombang radio panjang di satu ujung ke sinar-X pendek di ujung satunya. Kita tidak bisa melihat sinar-sinar di luar pita sempit cahaya itu, tapi kita bisa menghitungnya, dan bisa membangun instrumen untuk mendeteksinya. Begitu pula, kita tahu bahwa skala ukuran dan waktu memanjang ke kedua arah yang jauh di luar ranah yang dapat kita visualisasikan. Akal kita tidak sanggup menangani jarak-jarak besar yang dihadapi ilmu astronomi atau jarak-jarak kecil yang dihadapi ilmu fisika atomis, tetapi kita dapat merepresentasikan jarak-jarak tersebut dalam simbol-simbol matematika. Akal kita tidak dapat membayangkan rentang waktu sependek pikodetik, tetapi kita dapat membuat kalkulasi mengenai pikodetik, dan dapat membangun komputer yang dapat menyelesaikan kalkulasi dalam hitungan pikodetik. Akal kita tidak mampu membayangkan rentang waktu sepanjang sejuta tahun, apalagi ribuan juta tahun yang biasa dihitung para ahli geologi.

Persis seperti mata yang hanya dapat melihat pita sempit frekuensi-frekuensi elektromagnetik yang diimbuhkan seleksi alam pada para leluhur kita, otak kita pun dibangun untuk menangani pita-pita ukuran dan waktu yang sempit pula. Barangkali leluhur kita memang tak perlu bergelut dengan ukuran dan waktu di luar kisaran sempit kebutuhan sehari-hari, sehingga otak kita pun tidak pernah mengevolusikan kapasitas untuk membayangkannya. Mungkin memang ada artinya bahwa ukuran tubuh kita yang hanya beberapa kaki ini berada kira-kira di tengah kisaran ukuran

yang dapat kita bayangkan. Dan masa hidup kita yang hanya beberapa dasawarsa ini kira-kira berada di tengah kisaran waktu yang dapat kita bayangkan.

Begitu pula dengan kemuskilan dan mukjizat. Bayangkan skala kemuskilan berjenjang, yang sepadan dengan skala ukuran dari atom ke galaksi, atau skala waktu dari pikodetik ke eon. Pada skala tersebut, kita beri berbagai titik penanda. Di ujung kiri skala itu adalah peristiwa yang sudah pasti, seperti probabilitas matahari terbit esok hari – pokok yang menjadi ajang taruhan setengah sennya G. H. Hardy. Di dekat ujung kiri skala ini adalah hal-hal yang sedikit saja lebih tidak mungkin, seperti sekali melempar sepasang dadu dan langsung mendapat angka enam ganda. Peluangnya 1 berbanding 36. Dan saya rasa kita semua cukup sering berhasil melakukannya. Bergeser ke ujung kanan dari spektrum ini, titik penanda lainnya adalah probabilitas kartu sempurna dalam permainan bridge, di mana masing-masing dari empat pemain menerima lengkap 13 kartu yang sama jenisnya. Peluang terjadinya peristiwa ini adalah 1 berbanding 2.235.197.406.895.366.368.301.559.999. Kita sebut saja ini satu *remian*, satuan ukur bagi kemuskilan. Kalau sesuatu dengan nilai kemuskilan satu remian ini diperkirakan terjadi dan kemudian betul-betul terjadi, kita mesti menganggapnya mukjizat, kecuali kita curiga ada kecurangan. Tapi ini *bisa saja* terjadi dalam pembagian kartu yang jujur, dan masih amat sangat jauh lebih mungkin jika dibandingkan dengan patung batu yang melambatkan tangannya tadi. Bagaimanapun juga, seperti telah kita lihat, peristiwa patung batu melambai ini sekali pun tetap berhak punya tempat di sepanjang spektrum peristiwa yang mungkin terjadi. Ia tetap bisa diukur, meski dalam satuan yang jauh lebih besar dari gigareman. Di antara lemparan dadu enam ganda, dan pembagian kartu bridge yang sempurna, ada kisaran peristiwa-peristiwa yang kurang-lebih muskil yang kadang memang terjadi, termasuk kejadian orang disambar petir, menang lotre tebak skor bola, *hole-in-one* dalam golf, dan seterusnya. Di suatu titik di dalam kisaran ini juga terdapat kebetulan-kebetulan yang membuat kita merasa ngeri, seperti memimpikan seseorang pertama kalinya setelah berpuluh tahun, dan keesokan paginya mendengar kabar kematian orang tersebut. Kebetulan-kebetulan yang membuat kita bergidik ngeri ini sangat berkesan bila terjadi pada kita atau salah seorang teman kita, tapi kemuskilannya baru sebesar pikoremian.

Nah, setelah skala kemuskilan matematis ini terbentuk, lengkap dengan poin-poin penandanya, sekarang mari kita soroti subkisaran di skala itu yang dapat kita geluti dengan pikiran dan percakapan biasa. Lebar dari berkas lampu sorot kita ini sepadan dengan kisaran sempit frekuensi-frekuensi elektromagnetik yang dapat dilihat mata kita, atau dengan kisaran sempit ukuran atau masa, yang dekat dengan ukuran dan usia hidup kita sendiri, sehingga bisa kita bayangkan. Pada spektrum kemuskilan itu, lampu sorot ternyata hanya menyinari kisaran sempit dari ujung kiri (kepastian) hingga peristiwa mukjizat kecil, seperti *hole-in-one* atau mimpi yang menjadi nyata. Masih terdapat kisaran luas dari kemuskilan yang dapat dihitung secara matematis di luar kisaran berkas cahaya lampu sorot itu.

Otak kita dibangun oleh seleksi alam untuk menilai probabilitas dan risiko, seperti halnya mata kita dibangun untuk menilai panjang gelombang elektromagnetik. Kita bisa menghitung risiko dan peluang, dalam kisaran kemuskilan yang berguna bagi hidup manusia. Ini berarti risiko seperti, katakanlah, ditanduk kerbau saat kita memanahnya, disambar petir saat berlindung di bawah satu-satunya pohon di lapangan di kala hujan petir, atau tenggelam saat mencoba berenang menyeberangi sungai. Risiko-risiko yang dapat diterima ini setaraf dengan masa hidup kita yang beberapa dekade saja. Kalau secara biologis kita bisa, dan mau, hidup sampai sejuta tahun, mestilah lain cara kita menilai risiko. Misalnya, jangan sampai kita terlalu sering

menyeberang jalan karena kalau menyeberang jalan setiap hari selama setengah juta tahun, sudah pasti akan tertabrak.

Evolusi telah melengkapi otak kita dengan kesadaran subjektif akan risiko dan kemuskilan yang pas bagi makhluk dengan masa hidup kurang dari seabad. Para leluhur kita senantiasa perlu mengambil keputusan dengan risiko dan probabilitas, dan karenanya seleksi alam telah memampukan otak kita untuk menilai probabilitas yang dapat terjadi dalam masa hidup kita yang singkat. Kalau di suatu planet ada makhluk dengan masa hidup sejuta abad, kisaran lampu sorot risiko mereka akan menyinari hingga jauh ke arah ujung kanan spektrumnya. Mereka sudah akan menduga bahwa sesekali set kartu sempurna akan mereka terima, dan tidak akan kesulitan untuk merasa biasa saja jika hal tersebut benar terjadi. Tapi mereka pun tetap akan pucat kalau melihat patung batu melambatkan tangannya, karena orang harus hidup beremi-remian tahun lebih lama dari mereka untuk bisa melihat mukjizat sebesar ini.

Apa urusan semua ini dengan teori-teori asal-mula kehidupan? Argumen ini kita mulai dengan menyepakati bahwa teori Cairns-Smith, dan teori sup purba, terdengar agak tak meyakinkan dan muskil bagi kita. Lumrah kalau kita cenderung menolak teori-teori ini karena itu. Tapi ingat, 'kita' adalah makhluk yang otaknya dilengkapi dengan lampu sorot risiko yang berkasnya sekurus pensil, yang menyinari ujung kiri jauh dari malaran matematis risiko-risiko yang dapat dihitung. Penilaian subjektif kita mengenai hal yang tampak pasti terjadi tidak relevan dengan yang sebenarnya terjadi. Penilaian subjektif alien dengan masa hidup sejuta abad agaknya akan berbeda. Ia akan menganggap peristiwa seperti asal-mula molekul replikasi pertama yang didalilkan teori seorang kimiawan sebagai hal yang cukup mungkin terjadi; sementara kita, yang oleh evolusi diberi perkakas untuk hidup di dunia dalam hitungan beberapa dekade saja, akan menilainya sebagai mukjizat yang mencengangkan. Bagaimana kita memutuskan sudut pandang siapa yang benar, kita atau alien yang panjang umur itu?

Jawabannya sederhana. Sudut pandang alien yang panjang umur itu adalah sudut pandang yang tepat untuk menjajaki kemungkinan teori seperti teori Cairns-Smith atau teori sup purba. Mengapa? Karena dua teori tersebut mendalilkan suatu peristiwa – kemunculan spontan entitas swareplikasi – yang terjadi hanya sekali dalam sekitar semiliar tahun, sekali per eon. Satu setengah eon adalah waktu yang telah berlangsung antara titik asal-mula Bumi dan fosil-fosil mirip bakteri pertama. Bagi otak yang terbatas pada satuan dekade seperti otak kita, peristiwa yang terjadi sekali per eon itu begitu langka hingga tampak seperti mukjizat besar. Bagi alien berumur panjang tadi, peristiwa ini tampak tidak seajaib *hole-in-one* bagi kita – dan rata-rata kita mungkin kenal seseorang yang kenal seseorang yang pernah mencetak *hole-in-one*. Dalam menilai teori-teori asal-mula kehidupan, skala waktu subjektif alien berumur panjang itulah yang relevan, karena kira-kira sepadan dengan skala waktu yang menaungi asal-mula kehidupan. Penilaian subjektif kita tentang kemungkinan teori asal-mula kehidupan agaknya keliru seratus juta kali lipat.

Atau malah mungkin penilaian subjektif kita meleset lebih jauh lagi. Otak kita dibekali oleh alam tidak hanya untuk menilai risiko-risiko dalam waktu singkat, tetapi juga untuk menilai risiko terjadinya peristiwa pada kita sendiri, atau pada selingkar kecil orang-orang yang kita kenal. Ini karena otak kita tidak berevolusi di bawah kondisi-kondisi yang didominasi media massa. Berita berarti bahwa, kalau hal muskil terjadi pada siapa pun, di mana pun di muka bumi ini, kita akan membaca tentangnya di surat kabar atau di buku *Guinness Book of Records*. Kalau di hadapan khalayak seorang orator, di mana pun di dunia ini, menantang petir untuk menyambarnya jika dia berucap dusta, dan ternyata petir memang langsung menyambar, kita

akan membacanya sebagai berita dan terkaget-kaget karenanya. Tapi ada beberapa miliar manusia di dunia ini yang *bisa saja* mengalami kejadian itu, jadi kebetulan tersebut sebenarnya tidak sehebat kelihatannya. Otak kita kemungkinan besar dibekali oleh alam untuk menilai risiko-risiko terjadinya peristiwa pada diri kita sendiri, atau pada beberapa ratus orang di segugus kecil desa-desa yang jaraknya selemparan batu, yang kabar tentangnya boleh jadi didengar leluhur tribal kita. Saat membaca berita di koran tentang kebetulan luar biasa yang terjadi pada seseorang di Valparaiso atau Virginia, kita lebih tercengang dari semestinya. Lebih tercengang sekitar seratus juta kali mungkin, kalau itu rasio antara populasi dunia yang disurvei surat kabar kita dan populasi suku yang kabar tentangnya ‘diduga’, oleh otak kita yang telah berevolusi, bisa didengar.

‘Kalkulasi probabilitas’ ini juga relevan dengan penilaian kita atas kemungkinan teori-teori asal-mula kehidupan. Bukan karena populasi manusia di Bumi, tetapi karena populasi planet di alam semesta, populasi planet tempat kehidupan *bisa saja* bermula. Ini sama dengan argumen yang kita jumpai tadi di bab ini, jadi tidak perlu kita bahas lagi. Coba balik ke bayangan skala berjenjang peristiwa-peristiwa muskil yang ditandai dengan patok kebetulan seperti kartu sempurna dan lemparan dadu tadi. Pada skala berjenjang remian dan mikroremian ini, tandai tiga titik baru berikut. Probabilitas kehidupan muncul pada sebuah planet (dalam, katakanlah, semiliar tahun), kalau kita berasumsi bahwa kehidupan muncul sekitar sekali per tata surya. Probabilitas kehidupan muncul di sebuah planet kalau kehidupan muncul sekali per galaksi. Probabilitas kehidupan di sebuah planet yang terpilih secara acak kalau kehidupan muncul sekali saja di seantero alam semesta. Labeli tiga titik ini, berturut-turut, sebagai Bilangan Tata Surya, Bilangan Galaksi, dan Bilangan Alam Semesta. Ingat, ada sekitar 10.000 juta galaksi. Kita tidak tahu ada berapa tata surya dalam masing-masing galaksi karena kita hanya dapat melihat bintang, bukan planet, tapi tadi kita memakai perkiraan bahwa mungkin ada 100 miliar miliar planet di alam semesta.

Saat kita menilai kemuskilan sebuah peristiwa yang didalilkan oleh, misalnya teori Cairns-Smith, kita mesti menilainya, bukan terhadap apa yang secara subjektif kita anggap mungkin atau muskil, tetapi terhadap bilangan-bilangan seperti ketiga bilangan ini, Bilangan Tata Surya, Bilangan Galaksi, dan Bilangan Alam Semesta. Yang mana dari ketiga bilangan ini yang paling pas tergantung pada yang mana dari ketiga pernyataan ini yang kita rasa paling mendekati kebenarannya:

1. Kehidupan muncul hanya di satu planet saja di seluruh alam semesta (dan planet tersebut, seperti kita lihat tadi, pastilah planet Bumi).
2. Kehidupan muncul kira-kira di satu planet per galaksi (di galaksi kita, Bumi adalah planet yang mujur itu).
3. Bermulanya kehidupan merupakan peristiwa yang cukup mungkin terjadi, sehingga bisa muncul sekitar sekali per tata surya (di tata surya kita, Bumi adalah planet yang mujur itu).

Tiga pernyataan ini mewakili tiga pandangan penanda tentang uniknya kehidupan. Keunikan kehidupan yang sebenarnya mungkin terletak di suatu titik di antara ujung-ujung ekstrem yang diwakili oleh Pernyataan 1 dan Pernyataan 3. Mengapa saya bilang begitu? Mengapa mesti kita abaikan kemungkinan keempat, bahwa bermulanya kehidupan itu jauh *lebih* mungkin terjadi dari yang diajukan Pernyataan 3? Argumen ini tidak kuat, tapi kira-kira begini penjelasannya. Apabila bermulanya kehidupan merupakan peristiwa yang jauh lebih mungkin terjadi dari yang

dikemukakan Bilangan Tata Surya, saat ini mestinya kita telah berjumpa dengan kehidupan luar angkasa, kalau bukan secara langsung (apa pun bentuknya), setidaknya dalam bentuk gelombang radio.

Kerap ditunjukkan bahwa para ahli kimia gagal dalam upayanya menduplikasi bermulanya kehidupan secara semerta di dalam laboratorium mereka. Fakta ini dipakai seolah menjadi bukti bahwa teori-teori yang coba diuji oleh para kimiawan tersebut sudah pasti keliru. Tapi sebetulnya bisa juga kita katakan bahwa kita justru mesti waswas kalau ternyata mudah saja bagi ahli kimia untuk memunculkan kehidupan secara spontan di dalam tabung-tabung uji mereka. Mengapa? Karena eksperimen ahli kimia diukur dalam satuan tahun, bukan ribuan miliar tahun, dan karena hanya sedikit, bukan ribuan miliar, ahli kimia yang terlibat dalam pelaksanaan eksperimen-eksperimen tersebut. Apabila bermulanya kehidupan secara spontan ternyata merupakan peristiwa yang cukup mungkin untuk terjadi dalam kurun beberapa dasawarsa eksperimen kimia, maka kehidupan mestinya telah muncul berkali-kali di Bumi, dan berkali-kali di planet-planet yang jaraknya berada dalam kisaran gelombang radio dari Bumi. Tentu saja ini tergantung berhasil tidaknya ahli kimia menduplikasi kondisi-kondisi Bumi mula tapi, biar begitu, karena kita tidak dapat menjawabnya, argumen ini layak dijajaki.

Apabila bermulanya kehidupan itu merupakan peristiwa yang mungkin terjadi menurut standar-standar biasa manusia, maka sejumlah besar planet yang jaraknya dari Bumi berada dalam kisaran gelombang radio mestinya telah mengembangkan teknologi radio dari dahulu (mengingat gelombang radio menyebar dengan kecepatan 186.000 mil per detik) sehingga kita mestinya sudah menangkap paling tidak satu transmisi selama beberapa puluh tahun terakhir ini. Kemungkinan ada sekitar 50 bintang dalam kisaran gelombang radio kalau kita berasumsi mereka telah memiliki teknologi radio selama kita. Tapi lima puluh tahun itu cuma sekejap mata, dan kalau sampai ada peradaban lain yang sudah hampir bersinggungan dengan kita, itu bakal jadi peristiwa kebetulan akbar. Kalau dalam kalkulasi kita dianggap peradaban-peradaban itu telah memiliki teknologi radio 1.000 tahun yang lalu, akan ada sekitar satu juta bintang dalam kisaran gelombang radio (bersama berapa pun banyaknya jumlah planet yang mengorbit pada masing-masing dari bintang tersebut). Kalau kita sertakan peradaban yang telah memiliki teknologi radio dari 100.000 tahun yang lalu, seantero galaksi dengan triliunan bintangnya itu akan masuk dalam kisaran gelombang radio. Tentu saja, sinyal-sinyal siaran akan banyak melaif kalau sudah menyebar ke jarak yang sejauh itu.

Di titik ini kita tiba di paradoks berikut. Apabila teori asal-mula kehidupan itu cukup ‘mungkin’, menurut cara subjektif kita menilai kemungkinan, ia menjadi *terlalu* ‘mungkin’ mengingat betapa sedikitnya jumlah kehidupan yang kita amati di alam semesta. Menurut argumen ini, teori yang kita cari *mestilah* teori yang tampak tak mungkin bagi imajinasi kita yang terbatas pada Bumi secara ruang dan dasawarsa secara waktu. Dengan pemahaman ini, teori Cairns-Smith dan teori sup purba sekalipun tampak agak berisiko menjadi terlalu mungkin! Setelah semua penjelasan ini, harus saya akui bahwa, karena ada begitu banyak ketidakpastian dalam semua kalkulasinya, walaupun seorang ahli kimia *ternyata* berhasil menciptakan kehidupan spontan, saya tidak akan begitu risau!

Kita masih tidak tahu persis seperti apa seleksi alam dimulai di Bumi. Bab ini tujuannya sederhana: menjelaskan seperti apa *mestinya*, bukan persisnya, kehidupan bermula. Tiadanya teori asal-mula kehidupan yang berterima dengan pasti jangan dianggap sebagai batu sandungan

bagi seluruh cara pandang Darwinian, sebagaimana anggapan (mungkin lebih tepatnya harapan) yang kadang muncul. Bab-bab sebelumnya telah menyingkirkan hal-hal tampak seperti sandungan, dan bab berikutnya akan menggusur satu lagi: gagasan bahwa seleksi alam cuma bisa menghancurkan, tanpa pernah bisa membangun.

BAB 7

Evolusi Konstruktif

Orang kadang berpikir seleksi alam itu daya yang murni negatif, mampu mencabuti yang ganjil dan gagal, tapi tak mampu membangun kompleksitas, keindahan, dan efisiensi rancangan. Bukankah ia cuma mengurangi dari apa yang sudah ada, dan tidakkah proses kreatif sejati mesti menambahkan sesuatu juga? Pertanyaan ini bisa sebagian dijawab dengan menunjuk patung. Tak ada yang ditambahkan ke sebangkah batu pualam. Seniman patung hanya mengurangi saja, tapi hasilnya tetap berupa patung yang indah. Tapi metafora ini bisa menyesatkan, karena ada orang yang langsung loncat ke bagian yang keliru – fakta bahwa pematung merupakan perancang berkesadaran – dan gagal menangkap maksud penting dari metafora tersebut: fakta bahwa pematung bekerja dengan mengurangi, bukan menambah. Bagian metafora yang ini pun jangan dilebih-lebihkan. Seleksi alam mungkin memang hanya mengurangi, tapi mutasi bisa menambah. Ada berbagai cara bagi mutasi dan seleksi alam, di sepanjang rentang waktu geologis yang panjang, untuk membangun kompleksitas yang lebih banyak menambah daripada mengurangi. Ada dua cara utama pembangunan ini bisa terjadi. Cara pertama bernama ‘genotipe terkoadaptasi’; cara kedua bernama ‘perlombaan senjata’. Keduanya sekilas saling berbeda, tapi keduanya berada di bawah tajuk yang sama: ‘koevolusi’ dan ‘gen sebagai lingkungan bagi sesamanya’.

Pertama, gagasan ‘genotipe terkoadaptasi’. Gen menyebabkan suatu efek tertentu *hanya* karena sudah ada suatu pranata yang menjadi landasan kerjanya. Gen tidak dapat memengaruhi perangkaan otak kecuali ada otak yang telah terangkai. Tidak akan ada otak yang dirangkai kecuali ada embrio yang berkembang lengkap. Dan tidak akan ada embrio yang berkembang lengkap kecuali ada program peristiwa-peristiwa kimiawi dan seluler, yang dipengaruhi begitu banyak gen lainnya, dan begitu banyak pengaruh sebab-akibat nongenetik lainnya. Efek-efek tertentu yang disebabkan gen bukan merupakan ciri intrinsik dari gen-gen tersebut. Efek-efek itu merupakan ciri dari proses-proses embriologis, proses-proses yang *sudah ada* yang detail-detailnya dapat *diubah* oleh gen, yang terjadi di tempat tertentu pada waktu tertentu selama perkembangan embrionik. Kita telah melihat wacana ini diperagakan, dalam bentuknya yang elementer, lewat perkembangan biomorf-biomorf komputer.

Dapat diartikan bahwa seluruh proses perkembangan embrionik bisa dipandang sebagai sebuah upaya gotong-royong, yang dijalankan bersama-sama oleh gen-gen. Embrio-embrio disatukan oleh gen-gen giat di dalam organisme yang tengah berkembang, secara bersama-sama. Nah, ini kunci memahami seperti apa kolaborasi ini terjadi. Dalam seleksi alam, gen selalu dipilih karena kemampuannya berkembang di lingkungan tempatnya berada. Lingkungan ini sering kita anggap dunia luar, dunia para pemangsa dan iklim. Tapi dari sudut pandang tiap gen, mungkin bagian terpenting dari lingkungannya *adalah semua gen lain yang dijumpainya*. Dan di mana sebuah gen ‘berjumpa’ gen-gen lain? Kebanyakan di sel-sel dari tubuh-tubuh turunan tempatnya berada. Tiap gen dipilih karena kemampuannya bekerja sama dengan populasi gen-gen lain yang kemungkinan ditemuinya di dalam tubuh-tubuh tersebut.

Populasi sejati gen, yang merupakan lingkungan kerja bagi gen mana saja, bukan cuma kumpulan sementara yang kebetulan berhimpun di dalam sel-sel tubuh individu mana pun. Setidaknya pada spesies-spesies yang bereproduksi secara seksual, kumpulan ini berisi semua

gen dalam populasi individu-individu yang kawin silang – ‘kolam’ gen. Salinan tertentu dari sebuah gen (gen dalam arti sekumpulan atom) senantiasa ada pada satu sel dari satu individu. Tapi himpunan atom yang merupakan satu salinan tertentu dari sebuah gen itu bersifat fana. Ia memiliki durasi hidup sepanjang beberapa bulan saja. Seperti telah kita lihat, gen berumur panjang sebagai satu unit evolusi bukanlah suatu struktur fisik, tetapi *informasi* kearsipan tekstual yang terus disalin dari generasi ke generasi. Replikator tekstual ini keberadaannya tersebar. Ia tersebar luas secara ruang di antara berbagai individu, dan tersebar luas secara waktu selama bergenerasi-generasi. Dilihat dari ketersebarannya ini, suatu gen bisa dibilang ‘bertemu’ dengan gen lain ketika mereka berbagi tempat di sebuah tubuh. Ia boleh ‘berharap’ bertemu berbagai gen lain di tubuh-tubuh yang lain di lain waktu dalam keberadaan tersebarnya, dan dalam gerak-jalannya melalui waktu geologis. Gen yang berhasil adalah yang bertahan baik dalam lingkungan-lingkungan yang disediakan gen-gen lain yang kemungkinan ditemuinya dalam banyak tubuh lainnya. ‘Bertahan baik’ dalam lingkungan-lingkungan semacam itu kelak sepadan dengan ‘berkolaborasi’ bersama gen-gen yang lain ini. Paling tampak gamblang dalam kasus lintasan biokimia.

Lintasan biokimia merupakan rangkaian zat kimia yang membentuk tingkat-tingkat suksesif di dalam suatu proses berfaedah, seperti pelepasan energi atau sintesis suatu zat penting. Setiap langkah di lintasan itu membutuhkan enzim – salah satu molekul besar yang dibentuk untuk bertindak ibarat mesin di sebuah pabrik kimia. Pada lintasan kimia ini, beda langkah, beda pula enzim yang dibutuhkan. Kadang ada dua, atau lebih, lintasan kimia alternatif yang berakhir pada ujung manfaat yang sama. Kendati berpucuk pada hasil yang identik, kedua lintasan ini memiliki tingkat-tingkat antara yang berbeda, dan biasanya titik-titik awalnya pun berbeda pula. Yang mana pun dari kedua lintasan ini bisa melakukannya, dan mana yang dipakai tidak jadi perkara. Hewan mana pun perlu memastikan untuk tidak mencoba melakukan keduanya sekaligus, karena hal itu akan berakibat pada kerancuan dan ketakefisienan kimiawi.

Nah, misalkan Lintasan 1 membutuhkan suksesi enzim A1, B1, dan C1, untuk menyintesis zat kimia D yang diinginkan, sementara Lintasan 2 membutuhkan enzim A2, B2, dan C2 supaya menghasilkan produk akhir yang sama. Tiap enzim dibuat oleh suatu gen tertentu. Jadi, untuk mengevolusikan lini perakitan bagi Lintasan 1, gen-gen suatu spesies yang mengkodekan A1, B1, dan C1 perlu berkoevolusi. Untuk mengevolusikan lini perakitan bagi Lintasan 2, gen-gen suatu spesies yang mengkodekan A2, B2, dan C2 perlu berkoevolusi. Pilihan antara kedua koevolusi ini tidak timbul lewat perencanaan matang. Hasil tersebut muncul karena tiap gen dipilih berdasarkan keserasiannya dengan gen-gen lain yang *kebetulan sudah mendominasi populasi tersebut*. Jika populasinya kebetulan sudah kaya akan gen-gen untuk B1 dan C1, maka iklimnya pas untuk memilih gen A1, bukan A2. Sebaliknya, jika populasi tersebut sudah kaya akan gen-gen untuk B2 dan C2, maka iklimnya akan pas untuk memilih gen A2, bukan A1.

Tidak akan sederhana itu memang, tapi Anda akan memahami: salah satu aspek terpenting dari ‘iklim’ tempat gen dipilih atau tidak dipilih adalah gen-gen lain yang sudah jamak di dalam populasi tersebut; gen-gen lain yang kemungkinan berada di tubuh yang sama dengannya. Karena hal yang sama juga pasti berlaku bagi gen-gen ‘lain’ itu sendiri, terbentuklah regu-regu gen yang semuanya berevolusi ke arah solusi kooperatif untuk berbagai masalah. Gen-gen itu sendiri tidak berevolusi, hanya bertahan atau gagal bertahan di kolam gen tersebut. ‘Regu’nyalah yang berevolusi. Regu-regu lain mungkin sama baiknya, atau bahkan lebih baik. Tetapi begitu satu regu telah mulai mendominasi kolam gen dari suatu spesies, regu tersebut otomatis diuntungkan. Sukar bagi regu minoritas untuk meringsek masuk, sekalipun regu minoritas

tersebut, pada akhirnya, bekerja lebih efisien. Regu mayoritas secara otomatis sulit tergantikan, karena memang berstatus mayoritas. Tidak berarti regu mayoritas itu tidak akan pernah tergantikan. Kalau tidak, evolusi akan terhenti. Tapi bukan berarti ada semacam kelembaman bawaan tertanam di dalamnya.

Tentunya argumen semacam ini tidak terbatas pada biokimia saja. Hal yang sama dapat diterapkan pada gugus-gugus gen-gen serasi yang membangun bagian-bagian mata, telinga, hidung, kaki, seluruh bagian yang saling bekerja sama pada tubuh seekor hewan. Gen-gen pembuat gigi yang cocok untuk mengunyah daging cenderung dipilih pada 'iklim' yang didominasi oleh gen-gen pembuat usus yang cocok untuk mencerna daging. Sebaliknya, gen-gen pembuat gigi penggiling tumbuhan cenderung dipilih pada iklim yang didominasi oleh gen-gen pembuat usus yang cocok untuk mencerna tumbuhan. Dan sebaliknya untuk kedua perkara tersebut. Regu-regu 'gen makan daging' cenderung berevolusi bersama, dan regu-regu 'gen makan tumbuhan' cenderung berevolusi bersama. Malah, ada kalanya sebagian besar gen aktif di dalam tubuh bisa dibilang saling bekerja sama sebagai regu karena, seiring waktu evolusi, masing-masing dari mereka (yaitu, salinan-salinan purba dirinya sendiri) pernah menjadi bagian dari lingkungan tempat seleksi alam memilih (gen-gen) yang lain. Kalau ditanya mengapa leluhur singa mengembangkan kebiasaan gen makan daging, sementara leluhur antelop mengembangkan kebiasaan makan tumbuhan, jawabannya boleh jadi karena kebetulan semata. Kebetulan, dalam arti bahwa bisa saja leluhur singa yang mengembangkan kebiasaan makan tumbuhan, dan leluhur antelop yang mengembangkan kebiasaan makan daging. Tapi begitu satu silsilah telah *mulai* membangun regu gen untuk menangani urusan daging (bukan tumbuhan), prosesnya menguat sendiri. Dan begitu silsilah yang lain telah mulai membangun regu gen untuk menangani urusan tumbuhan (bukan daging), proses *itu* pun menguat sendiri ke arah sebaliknya.

Salah satu hal utama yang pastilah terjadi di masa awal evolusi organisme hidup adalah meningkatnya jumlah gen yang ikut serta dalam kerja sama semacam itu. Gen yang dimiliki bakteri jauh lebih sedikit dari hewan dan tumbuhan. Peningkatan ini mungkin muncul lewat berbagai jenis duplikasi gen. Ingat, sebuah gen hanyalah seutas simbol-simbol tersandikan, seperti berkas di cakram komputer; dan gen-gen dapat disalin ke bagian-bagian lain dari kromosom, persis seperti berkas dapat disalin ke bagian-bagian lain dari cakram tersebut. Pada cakram komputer saya yang menampung bab ini, resminya hanya ada tiga berkas. Maksud saya dengan 'resminya' adalah bahwa sistem operasi komputer memberi tahu saya hanya ada tiga berkas. Saya bisa memintanya untuk membaca salah satunya, dan tersajikanlah susunan karakter alfabetis satu-dimensi, termasuk karakter-karakter yang sekarang Anda baca. Semua rapi dan teratur, tampaknya. Tapi sebetulnya, pada cakram itu sendiri, susunan teks tersebut sama sekali tidak rapi dan teratur. Anda bisa paham ini kalau lepas dari disiplin sistem operasi resmi komputer tersebut, dan menulis program pribadi Anda sendiri untuk mengurai apa yang sebetulnya ditulis pada setiap sektor cakram tersebut. Ternyata fragmen masing-masing dari tiga berkas saya itu terpecah, tersedip satu sama lain dan dengan fragmen berkas-berkas lama yang sudah saya hapus dan lupakan. Setiap fragmen dapat muncul, sama persis atau berbeda tipis, dalam setengah lusin tempat di seantero bidang cakramnya.

Mengapa begitu? Ceritanya menarik, dan patut dibahas karena bisa menjadi analogi yang baik bagi ranah genetika. Saat Anda perintahkan komputer untuk menghapus berkas, perintah tersebut tampak dipatuhi. Tapi sebetulnya teks dari berkas tersebut tidak dihapus. Yang dihapus hanyalah semua *penunjuk* ke berkas itu. Ibarat memerintahkan pustakawan untuk memusnahkan novel *Lady Chatterley's Lover*, tapi yang ia lakukan: mencabut kartu dari indeks kartu, dan

membiarkan bukunya tetap di rak. Bagi komputer, cara ini cara kerja paling hemat tenaga, karena ruang yang tadinya dihuni oleh berkas yang ‘dihapus’ langsung tersedia untuk berkas baru, segera setelah penunjuk ke berkas lama itu disingkirkan. Justru buang-buang waktu kalau repot-repot mengisi ruang itu dengan angka nol. Berkas lama itu sendiri tidak akan betul-betul sirna hingga semua ruangnya terpakai untuk menyimpan berkas-berkas baru.

Tapi penggunaan kembali ruang ini terjadi secara tak beraturan. Berkas-berkas baru tidak betul-betul sama ukurannya dengan yang lama. Ketika mencoba menyimpan berkas baru ke cakram, komputer mencari fragmen ruang pertama yang tersedia, menuliskan bagian-bagian berkas baru sebanyak bisa, kemudian mencari fragmen ruang lain, menulis sedikit lagi, dan seterusnya hingga seluruh berkas tersebut habis ditulis di *suatu tempat* pada cakramnya. Berkas tersebut tampak padu dan tersusun rapi di mata manusia karena komputer teliti dalam mencatat ‘penunjuk’ arah ke alamat semua fragmen yang terpencar itu. ‘Penunjuk-penunjuk’ ini seperti penunjuk ‘lanjut ke halaman 94’ yang dipakai *New York Times*. Alasan kenapa banyak salinan dari satu fragmen teks ditemukan di cakram adalah karena kalau, seperti semua bab saya, teksnya telah disunting dan disunting ulang lusinan kali, tiap-tiap hasil suntingan itu akan disimpan baru pada cakram teks yang (hampir) sama. Penyimpanan ini mungkin kelihatan seperti menyimpan berkas yang sama. Tapi seperti kita lihat tadi, teks tersebut sebetulnya akan berulang kali dipencar-pencar ke semua ‘celah’ yang tersedia pada cakram. Karenanya, ada banyak salinan dari satu fragmen teks yang bisa ditemukan di seluruh permukaan cakram, terlebih kalau cakram tersebut sudah lama dan sering dipakai.

Nah, sistem operasi DNA sebuah spesies itu memang sudah sangat tua, dan ada bukti bahwa, dilihat dalam jangka panjang, sistem ini melakukan hal yang agak mirip dengan yang dilakukan komputer dengan berkas-berkas cakramnya. Sebagian dari bukti tersebut berasal dari fenomena ‘intron’ dan ‘ekson’ yang sangat menarik. Dalam satu dekade terakhir, telah ditemukan bahwa ‘satu’ gen mana pun, dalam arti satu untai teks DNA yang dibaca secara sinambung, tidak semua disimpan di satu tempat. Kalau Anda betul-betul membaca huruf-huruf kode sebagaimana muncul di sepanjang kromosom (kalau Anda melakukan hal yang sama dengan keluar dari disiplin ‘sistem operasi’nya), Anda akan menemukan fragmen-fragmen ‘arti’, yang disebut ekson, yang dipisahkan oleh bagian-bagian ‘tanarti’ yang disebut intron. Satu ‘gen’ dalam arti fungsional sebetulnya dibagi ke dalam rangkaian fragmen (ekson-ekson) yang dipisah oleh intron-intron tak bermakna. Seolah tiap ekson diakhiri dengan penunjuk ‘lanjut ke halaman 94’. Gen yang lengkap, karenanya, adalah seluruh rangkaian ekson, yang sebetulnya dirangkai hanya saat akhirnya dibaca oleh sistem operasi ‘resmi’ yang menerjemahkannya ke dalam protein.

Bukti selanjutnya berasal dari fakta bahwa kromosom-kromosom itu dikotori teks genetik lama yang tidak lagi dipakai, tetapi yang masih bisa dikenali artinya. Bagi seorang programer komputer, pola distribusi fragmen-fragmen ‘fosil genetik’ ini bukan main mengingatkan pada pola teks pada permukaan cakram lama yang telah banyak dipakai untuk menyunting teks. Pada beberapa jenis hewan, sebagian besar dari jumlah total gen sebetulnya tidak pernah dibaca. Gen-gen ini, kalau bukan tanarti, adalah ‘gen-gen fosil’ yang sudah usang.

Kadang, fosil-fosil tekstual ini mewujud kembali, seperti pengalaman saya saat menulis buku ini. Sebuah kesalahan komputer (atau, supaya adil, bisa saja kesalahan manusia) telah membuat saya tak sengaja ‘menghapus’ cakram yang memuat Bab 3. Tentunya teks itu sendiri belum terhapus bersih semuanya. Yang sudah pasti terhapus adalah *penunjuk* ke tempat tiap ‘ekson’ berawal dan berakhir. Sistem operasi ‘resmi’nya tidak dapat membaca apa pun lagi, tapi ‘secara tak resmi’ saya bisa bermain insinyur-insinyuran genetik dan memeriksa semua teks pada

cakram tersebut. Yang saya lihat adalah teka-teki *jigsaw* yang membingungkan dari keping-keping tekstual, sebagian baru, sebagian lagi ‘fosil-fosil’ kuno. Dengan menyatukan keping-keping *jigsaw* ini, saya mampu mereka-ulang bab tersebut. Tapi seringnya saya tidak tahu mana fragmen yang baru, mana yang fosil. Tidak jadi masalah karena, kecuali untuk detail-detail minor yang memerlukan penyuntingan baru, mereka semua sama saja. Setidaknya sebagian dari ‘fosil-fosil’, atau ‘intron-intron’ usang ini, telah mewujud kembali. Mereka menyelamatkan saya dari kesukaran, dan saya tidak terpaksa harus menulis ulang seluruh bab itu lagi.

Ada bukti bahwa, pada spesies hidup pun, ‘gen-gen fosil’ kadang mewujud kembali, dan digunakan kembali setelah terbengkalai selama sejuta tahun atau sekitarnya. Membahas detailnya akan menyeret kita terlalu jauh dari jalur utama bab ini, karena Anda pasti ingat pembicaraan kita ini sudah menyimpang. Pokok utamanya adalah bahwa kapasitas genetik total dari suatu spesies dapat meningkat karena duplikasi gen. Salah satu caranya adalah dengan memakai kembali salinan-salinan ‘fosil’ lama dari gen-gen yang sudah ada. Ada cara-cara lain, yang lebih cepat, untuk menyalin gen-gen ke bagian-bagian kromosom yang tersebar luas, seperti berkas-berkas yang disalin ke bagian-bagian lain dari sebuah cakram, atau beberapa cakram.

Manusia memiliki delapan gen terpisah yang disebut gen-gen globin (dipakai untuk membuat, antara lain, hemoglobin), pada berbagai kromosom. Tampak pasti bahwa kedelapan gen ini telah disalin dari satu gen globin pendahulu. Sekitar 1.100 juta tahun yang lalu, gen globin pendahulu berduplikasi, membentuk dua gen. Kita dapat menanggapi peristiwa ini karena bukti tersendiri tentang berapa cepat globin berevolusi secara habitual (lihat Bab 5 dan 11). Dari dua gen yang dihasilkan oleh duplikasi awal ini, satu menjadi leluhur semua gen yang membuat hemoglobin pada vertebrata. Yang satu lagi menjadi leluhur dari semua gen yang membuat mioglobin, keluarga protein terkait yang bergiat di otot. Aneka duplikasi yang terjadi kemudian telah memunculkan globin-globin alfa, beta, gamma, delta, epsilon, dan zeta. Menariknya, kita bisa menyusun pohon keluarga yang lengkap dari semua gen globin, dan bahkan menanggapi semua titik-titik divergensinya (globin delta dan beta, misalnya, terpisah sekitar 40 juta tahun yang lalu; globin epsilon dan gamma 100 tahun yang lalu). Tetapi kedelapan globin ini, yang diturunkan dari pencabangan leluhur-leluhur jauhnya, masih tetap ada di dalam diri setiap kita. Mereka memisah ke bagian-bagian lain dari kromosom satu leluhur, dan masing-masing kita telah mewarisinya pada kromosom-kromosom kita. Molekul berada di tubuh yang sama dengan para sepupu molekuler jauhnya. Pasti banyak sekali duplikasi semacam itu yang telah terjadi, di seantero kromosom, dan di sepanjang waktu geologis. Ini titik penting yang menegaskan bahwa kehidupan nyata itu lebih rumit dari biomorf-biomorf Bab 3. Mereka semua cuma punya sembilan gen. Mereka berevolusi melalui perubahan pada sembilan gen tersebut, bukan dengan menaikkan jumlah gen menjadi sepuluh. Pada hewan sungguhan sekalipun, duplikasi semacam ini cukup langka, tapi tidak sampai membatalkan pernyataan umum saya bahwa semua anggota suatu spesies berbagi sistem ‘pengalamanatan’ DNA yang sama.

Duplikasi di dalam spesies tersebut bukan satu-satunya cara meningkatnya jumlah gen-gen pekerja-sama di dalam evolusi. Kejadian yang lebih langka lagi, tapi mungkin tetap sangat penting, adalah penggabungan sebuah gen dari spesies lain – spesies yang amat jauh bahkan – yang kadang terjadi. Contohnya, ada hemoglobin dalam akar tumbuhan dari famili kacang polong. Ini tidak terjadi di famili tumbuhan lainnya, dan tampak hampir pasti bahwa hemoglobin masuk ke famili kacang polong melalui infeksi silang dari hewan, mungkin virus yang berlaku sebagai perantaranya.

Peristiwa yang istimewa pentingnya seperti ini, menurut teori ahli biologi Amerika Lynn Margulis yang makin banyak didukung, terjadi pada saat bermulanya sel eukariotik. Sel-sel eukariotik meliputi semua sel kecuali sel-sel bakteri. Dunia makhluk hidup, pada dasarnya, dibagi menjadi bakteri versus lainnya. Kita bagian dari yang lainnya, dan secara kolektif disebut eukariota. Perbedaan utama kita dari bakteri adalah bahwa sel kita memiliki sel mini yang diskret di dalamnya. Termasuk di dalamnya, inti sel, yang menjadi rumah bagi kromosom; objek kecil berbentuk bom yang disebut mitokondria (yang senyampang kita jumpai pada Gambar 1), yang berisi selaput-selaput dengan lekukan rumit; dan kloroplas di dalam sel-sel (eukariotik) tumbuhan. Mitokondria dan kloroplas memiliki DNA-nya sendiri, yang mereplikasi dan menyebarkan dirinya sendiri secara terpisah dari DNA utama di dalam kromosom-kromosom inti sel. Semua mitokondria di dalam diri Anda diturunkan dari populasi kecil mitokondria yang berjalan dari sel telur ibu Anda. Sperma terlalu kecil untuk dapat mengandung mitokondria, jadi mitokondria secara eksklusif menurun menyusuri garis betina, dan tubuh-tubuh jantan adalah jalan buntu bagi reproduksi mitokondrial. Kebetulan, ini berarti kita dapat menggunakan mitokondria untuk melacak leluhur kita, benar-benar hanya di sepanjang garis betina.

Teori Margulis: mitokondria dan kloroplas, dan beberapa struktur lain di dalam sel, masing-masing turun dari bakteri. Sel eukariotik terbentuk, mungkin 2 miliar tahun yang lalu, ketika beberapa jenis bakteri bahu-membahu karena manfaat yang bisa didapatkan masing-masing bakteri dari yang lainnya. Selama bereon-eon, mereka telah menjadi padu total dalam unit kerja sama yang menjadi sel eukariotik itu, sehingga hampir mustahil untuk mendeteksi fakta, kalau memang itu fakta, bahwa mereka awalnya bakteri yang saling terpisah.

Tampak bahwa, begitu sel eukariotik telah diciptakan, aneka rancangan yang sepenuhnya baru menjadi mungkin. Paling menarik dari sudut pandang kita, sel-sel dapat membuat tubuh-tubuh besar yang terdiri dari miliaran sel. Semua sel bereproduksi dengan membelah diri menjadi dua, masing-masing paruh mendapatkan paket gen yang lengkap. Seperti kita lihat pada kasus bakteri di atas kepala jarum pentol, suksesi pembelahan diri menjadi dua ini dapat menghasilkan sel dalam jumlah yang sangat besar dalam waktu singkat. Mulai dari satu dan membelah menjadi dua. Kemudian masing-masing dari yang dua itu membelah lagi, menjadi empat. Masing-masing dari yang empat itu membelah lagi, menjadi delapan. Jumlahnya terus naik berlipat ganda, dari 8 ke 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1.024, 2.048, 4.096, 8.192. Baru 20 kali pelipatgandaan saja, yang tidak butuh waktu lama, kita sudah sampai di angka jutaan. Setelah 40 kali pelipatgandaan jumlah selnya sudah lebih dari satu triliun. Pada kasus bakteri, jumlah besar sel yang dihasilkan rentetan pelipatgandaan ini berjalan sendiri-sendiri. Hal yang sama juga berlaku pada banyak sel eukariotik, misalnya protozoa seperti ameba. Langkah besar dalam evolusi terjadi ketika sel-sel yang telah diproduksi lewat pembelahan suksesif ini menyatu, bukan berjalan sendiri-sendiri. Struktur yang lebih tinggi kini dapat muncul, sebagaimana terjadi, pada skala perbandingan yang lebih kecil, dalam biomorf-biomorf komputer yang mencabang dua.

Kini, untuk pertama kalinya, ukuran tubuh besar mungkin mewujudkan. Tubuh manusia merupakan populasi kolosal sejati sel, yang semuanya turun dari satu leluhur, sel telur yang dibuahi; dan karena itu semuanya merupakan sepupu, anak, cucu, paman, dst. dari sel-sel lain di dalam tubuh itu. 10 triliun sel yang membentuk setiap kita merupakan produk dari beberapa lusin generasi penggandaan sel. Sel-sel ini diklasifikasikan ke dalam sekitar 210 jenis (menurut selera), yang semuanya dibangun oleh himpunan gen yang sama tapi dengan berbagai anggota himpunan gen tersebut yang diaktifkan di berbagai jenis sel. Inilah mengapa, seperti telah kita lihat, sel-sel hati berbeda dari sel-sel otak, dan sel-sel tulang berbeda dari sel-sel otot.

Gen-gen yang bekerja melalui organ-organ dan pola-pola perilaku tubuh multiseluler dapat meraih metode-metode pemastian penyebaran diri yang tidak tersedia bagi sel-sel tunggal yang bekerja sendiri. Tubuh-tubuh dengan banyak sel memungkinkan gen untuk memanipulasi dunia, dengan alat-alat yang dibangun pada skala yang teramat jauh lebih besar dari skala sel-sel tunggal. Mereka meraih manipulasi tak langsung skala besar ini lewat efek-efeknya yang lebih langsung pada skala miniatur sel-sel. Misalnya, mereka mengubah bentuk selaput sel. Sel-sel kemudian saling berinteraksi dalam populasi besar untuk menghasilkan efek-efek berkelompok skala besar seperti lengan atau kaki atau (secara lebih tak langsung) bendungan berang-berang. Sebagian besar dari sifat suatu organisme yang dapat kita lihat dengan mata telanjang itu disebut 'sifat timbul'. Biomorf-biomorf komputer sekalipun, dengan sembilan gennya, memiliki sifat timbul. Pada hewan sungguhan, sifat-sifat ini dihasilkan pada level seluruh tubuh, melalui interaksi di antara sel-sel. Suatu organisme berfungsi sebagai kesatuan utuh, dan gen-gennya dapat dikatakan memengaruhi diri organisme tersebut, sekalipun tiap salinan dari suatu gen mengerahkan pengaruh langsungnya hanya di dalam selnya sendiri.

Telah kita lihat bahwa satu bagian yang amat penting dari lingkungan sebuah gen adalah gen-gen lain yang kemungkinan dijumpainya dalam rentetan tubuh-tubuh dari generasi ke generasi. Gen-gen ini adalah gen-gen yang dipermutasikan dan dikombinasikan di dalam spesies tersebut. Spesies yang bereproduksi secara seksual dapat dibayangkan sebagai perangkat yang mempermutasikan urutan suatu himpunan diskret gen yang sudah saling terbiasa bersama ke dalam kombinasi-kombinasi yang berbeda. Spesies, menurut pandangan ini, merupakan kumpulan gen yang terus dikocok, yang bertemu satu sama lain di dalam spesiesnya, tapi tidak pernah bertemu gen-gen spesies lainnya. Tapi bisa juga gen-gen spesies yang berbeda, sekalipun tidak bertemu dalam jarak dekat di dalam sel, tetap menjadi bagian penting dari lingkungannya masing-masing. Hubungan mereka lebih sering bersifat berlawanan daripada berkawan, tetapi ini dapat dianggap sebagai pembalikan tanda semata. Di titik inilah kita tiba pada tema besar kedua dari bab ini: 'perlombaan senjata'. Ada perlombaan senjata di antara pemangsa dan mangsanya, parasit dan inangnya, bahkan – meskipun poin ini lebih pelik dan tidak akan saya bahas lebih lanjut – di antara yang jantan dan yang betina dalam spesies yang sama.

Perlombaan senjata berlangsung dalam waktu evolusi, bukan pada skala waktu masa hidup individu. Perlombaan ini berisi peningkatan kemampuan bertahan hidup salah satu silsilah (misalnya hewan mangsa), sebagai konsekuensi langsung dari peningkatan kemampuan evolusi silsilah yang lain (misalnya hewan pemangsa). Perlombaan senjata akan selalu terjadi bilamana setiap individu memiliki musuh yang mampu berevolusi untuk meningkatkan dirinya sendiri. Saya anggap perlombaan senjata ini penting sekali karena perlombaan senjatalah yang banyak memantik 'progresivitas' yang terdapat di dalam evolusi. Karena, bertolak belakang dari praduga sebelumnya, progresif bukanlah sifat bawaan evolusi. Kita akan menyadarinya jika menimbang apa akibatnya jika satu-satunya masalah yang harus dihadapi hewan hanyalah masalah cuaca dan aspek-aspek lain lingkungan tanhayati.

Setelah banyak generasi seleksi kumulatif di tempat tertentu, hewan dan tumbuhan setempat beradaptasi dengan kondisi, misalnya kondisi cuaca, di tempat tersebut. Kalau dingin, hewan-hewannya diselimuti bulu tebal. Kalau kering, mereka mengembangkan kulit kedap air berlapis lilin untuk menjaga sedikit air yang ada. Adaptasi dengan kondisi setempat memengaruhi setiap bagian tubuh, bentuk dan warnanya, organ dalamnya, perilakunya, dan perkiraan sel-selnya.

Kalau kondisi-kondisi tempat tinggal satu silsilah hewan itu tetap; katakanlah kering dan panas terus tanpa jeda selama 100 generasi, evolusi di silsilah tersebut kemungkinan besar akan

berhenti, setidaknya untuk urusan adaptasi dengan suhu dan kelembaban. Hewan-hewannya akan sangat mampu menyesuaikan diri dengan kondisi setempat. Ini tidak berarti mereka tidak bisa dirancang ulang untuk lebih baik lagi. Tidak berarti pula mereka tidak bisa meningkatkan dirinya dengan langkah evolusi yang *kecil* (dan, karenanya, yang lebih mungkin terjadi): tidak satu pun dari jiran *dekatnya* dalam padanan lokal bagi ‘ruang biomorf’ itu menjadi lebih baik lagi.

Evolusi akan bergeming hingga ada yang berubah pada kondisi tersebut: bermulanya zaman es, perubahan dalam curah hujan rata-rata di wilayah tersebut, pergeseran pola gerak angin. Perubahan-perubahan seperti itu terjadi bila skala waktu yang kita timbang itu sepanjang skala waktu evolusi. Konsekuensinya, evolusi biasanya tidak berhenti, tetapi terus ‘melacak’ perubahan yang terjadi pada lingkungan. Kalau suhu rata-rata wilayah itu turun secara ajek, dan tren ini terjadi selama berabad-abad, generasi-generasi suksesif hewan-hewan di sana akan didorong oleh ‘tekanan’ seleksi yang ajek ke arah, misalnya, bulu yang lebih panjang. Kalau, setelah suhu menurun selama beberapa ribu tahun kecenderungannya berbalik dan suhu rata-rata merangkak naik lagi, hewan-hewannya akan dipengaruhi tekanan seleksi baru, dan akan didorong kembali ke arah bulu yang lebih pendek.

Tapi sejauh ini kita baru menimbang sebagian kecil saja dari keadaan lingkungan, yaitu cuaca. Cuaca memang sangat penting bagi hewan dan tumbuhan. Pola-polanya berubah seiring pergantian abad, dan ini menjaga gerak evolusi karena ia ‘melacak’ perubahan-perubahan tersebut. Tapi pola-pola cuaca berubah secara serampangan dan tidak konsisten. Ada unsur-unsur lain dari lingkungan hidup hewan yang secara konsisten berubah ke arah yang durjana, dan hal ini pun dapat ‘dilacak’. Unsur lingkungan hidup ini adalah benda-benda hidup itu sendiri. Bagi pemangsa seperti seekor dubuk, unsur lingkungan yang setidaknya sama pentingnya dengan cuaca adalah mangsanya: populasi wildebeest, zebra, dan antelop yang selalu berubah. Bagi antelop dan hewan perumput lain yang berkeliaran mencari makan di padang terbuka, cuaca mungkin penting, tetapi singa, dubuk, dan hewan pemakan daging lainnya pun penting. Seleksi kumulatif akan memastikan hewan-hewan mampu berlari lebih cepat dari pemangsanya atau berpikir lebih cerdas dari mangsanya, seperti ia memastikan hewan-hewan mampu menyesuaikan diri dengan kondisi cuaca yang ada. Dan, persis seperti naik-turunnya kondisi cuaca jangka panjang ‘dilacak’ oleh evolusi, perubahan jangka panjang dalam kebiasaan dan persenjataan pemangsa juga akan dilacak oleh perubahan evolusi pada mangsanya. Dan, tentu, sebaliknya.

Kita dapat menggunakan istilah umum ‘musuh’ suatu spesies, untuk mengacu pada benda hidup lain yang giat menyulitkan hidup spesies tersebut. Singa adalah musuh zebra. Mungkin terdengar agak tak berperasaan kalau menyebut ‘Zebra adalah musuh singa’. Peran zebra dalam hubungan keduanya tampak terlalu tak berdosa dan terlalu dizalimi untuk disemati makna ‘musuh’ yang peyoratif. Tapi zebra melakukan segala upaya agar tidak dimakan singa, dan dari sudut pandang singa, hal ini membuat hidup jadi lebih sulit. Apabila zebra dan hewan perumput lainnya berhasil mencapai tujuannya, singa akan mati kelaparan. Jadi, dalam konteks ini, zebra merupakan musuh singa. Parasit seperti cacing pita adalah musuh bagi inangnya, dan inang adalah musuh bagi parasit karena mereka cenderung mengevolusikan cara untuk melawannya. Herbivora adalah musuh tumbuhan, dan tumbuhan adalah musuh herbivora, mengingat tumbuhan membuat duri dan zat kimia beracun atau yang rasanya membikin lidah amburadul.

Silsilah hewan dan tumbuhan, dalam waktu evolusi, akan ‘melacak’ perubahan musuh-musuhnya tak kalah tekun dari melacak perubahan-perubahan kondisi cuaca rata-rata. Peningkatan evolusioner dalam persenjataan dan taktik berburu citah itu, dari sudut pandang kijang, seperti iklim yang terus memburuk, dan perubahan ini dilacak dengan cara yang sama.

Tapi ada satu perbedaan besar di antara keduanya. Cuaca berubah dari abad ke abad, tetapi *tidak* berubah spesifik ke arah durjana. Cuaca tidak keluar sarang untuk ‘memburu’ kijang. Cita rata-rata akan berubah dari abad ke abad, seperti perubahan curah hujan tahunan rata-rata. Tapi, sementara curah hujan tahunan rata-rata naik dan turun tanpa alasan tertentu, cita rata-rata, dari abad ke abad, akan cenderung menjadi *lebih* lihai dari leluhurnya dalam urusan menangkap kijang. Ini karena suksesi cita, lain dari suksesi kondisi cuaca tahunan, itu sendiri pasti mengalami seleksi kumulatif. Cita cenderung menjadi lebih lincah kakinya, lebih awas matanya, lebih tajam giginya. Seperti apa pun ‘antagonis’nya cuaca dan kondisi-kondisi tanhayati lainnya itu, tak ada kecenderungan untuk makin lama makin antagonis. Musuh-musuh hidup, jika dilihat dari kaca mata waktu evolusi, memiliki kecenderungan persis seperti itu.

Kecenderungan hewan pemakan daging untuk makin ‘baik’ akan lekas mandek, seperti perlombaan senjata manusia (akibat biaya ekonomi yang nanti akan kita bahas), kalau mangsanya tidak memiliki kecenderungan yang paralel. Dan sebaliknya. Kijang, seperti cita, mengalami seleksi kumulatif, dan mereka pun akan cenderung, dari generasi ke generasi, makin kencang berlari, tangkas bereaksi, dan pintar bersembunyi di balik alang-alang. Mereka pun mampu berevolusi untuk menjadi lebih baik dari musuh-musuhnya, dalam hal ini musuh cita. Dari sudut pandang cita, suhu tahunan rata-rata tidak secara sistematis menjadi lebih baik atau lebih buruk dari tahun ke tahun, kecuali dalam hal bahwa bagi hewan yang telah beradaptasi dengan baik setiap perubahan adalah perubahan buruk. Tapi setiap tahun kijang rata-rata cenderung menjadi lebih buruk secara sistematis – lebih sukar ditangkap karena lebih pintar mengelak dari terkaman cita. Lagi-lagi, kecenderungan menuju peningkatan progresif pada kijang akan melambat lalu berhenti, kalau kecenderungan peningkatan yang paralel tidak diperagakan oleh pemangsanya. Pihak yang satu jadi sedikit lebih baik karena pihak yang lain sudah sedikit lebih baik. Dan sebaliknya. Proses ini membentuk lingkaran setan, pada skala waktu ratusan ribu tahun.

Di dunia bangsa manusia dengan skala waktunya yang lebih pendek, ketika dua musuh masing-masing secara progresif mengembangkan persenjataannya sebagai tanggapan atas perkembangan pihak lainnya, kita sebut ini ‘perlombaan senjata’. Analogi evolusinya cukup dekat sehingga istilah ini sah dipinjam, dan saya tidak berutang maaf kepada para kolega saya yang muluk-muluk hendak membersihkan bahasa kita dari citra makna sebenderang itu. Saya telah menyetengahkan gagasan ini di sini lewat contoh yang sederhana, kijang dan cita. Contoh ini saya pakai untuk menyampaikan perbedaan penting antara musuh hidup, yang mengalami perubahan evolusi, dan kondisi tandurjana yang tanhayati seperti cuaca, yang memang berubah, tetapi tidak secara sistematis dan evolusioner. Tapi sudah saatnya saya mengaku bahwa, dalam upaya saya menjelaskan satu pokok yang sah ini, saya mungkin telah menyesatkan pikiran pembaca. Jelas, kalau Anda pikir lagi, bahwa gambaran saya mengenai perlombaan senjata yang terus berkembang ini terlalu sederhana setidaknya dalam satu segi. Misalnya, kecepatan berlari. Sejauh ini, gagasan perlombaan senjata tampak menunjukkan bahwa cita dan kijang mestinya terus berkembang, dari generasi ke generasi, makin cepat hingga keduanya dapat bergerak lebih cepat dari suara. Hal ini belum dan tidak akan terjadi. Sebelum pembahasan mengenai perlombaan senjata kita lanjutkan, sudah menjadi tugas saya untuk mencegah terjadinya kesalahpahaman.

Ini pencegah salah paham yang pertama. Saya menghadirkan kesan tetap naiknya kemampuan menangkap mangsa pada cita, dan kemampuan menghindari pemangsa pada kijang. Mungkin pembaca kemudian berpikir bahwa ada semacam kemajuan abadi, tiap generasi baru pasti lebih

baik, lebih sempurna, dan lebih perkasa induknya. Kenyataannya sama sekali tidak seperti itu. Skala waktu yang dipakai untuk mendeteksi peningkatan signifikan, bagaimana pun juga, agaknya jauh lebih lama dari yang dapat dideteksi dengan membandingkan satu generasi tipikal dengan pendahulunya. 'Peningkatan'-nya pun jauh dari sifat terus-menerus. Tidak teratur, kadang mandek atau bahkan 'mundur', bukan gerak 'ke depan' yang tetap ke arah yang dikemukakan oleh gagasan perlombaan senjata. Sejauh dapat diamati, perubahan kondisi, perubahan daya-daya tanhayati yang saya rangkum dalam tajuk 'cuaca' tadi, agaknya akan melampaui tren perlombaan senjata yang malas dan tak menentu ini. Mungkin ada kalanya, untuk waktu yang lama, tidak ada 'kemajuan' dalam perlombaan senjata dan tidak terjadi perubahan evolusi sama sekali. Perlombaan senjata kadang berujung pada kepunahan, dan kemudian perlombaan senjata yang baru dimulai dari nol lagi. Akan tetapi, terlepas dari semua itu, gagasan perlombaan senjata sejauh ini tetap menjadi penjelasan yang paling memuaskan atas keberadaan mesin-mesin canggih nan kompleks yang dimiliki hewan dan tumbuhan. 'Peningkatan' progresif seperti yang disarankan oleh citra perlombaan senjata ini memang terjadi, sekalipun secara tidak teratur dan terputus-putus; sekalipun kecepatan bersihnya terlalu lambat untuk bisa dideteksi dalam masa hidup seorang manusia, atau bahkan dalam rentang waktu sejarah yang telah pernah tercatat.

Pencegah salah paham kedua adalah bahwa hubungan yang saya istilahkan 'musuh' tadi sebetulnya lebih rumit dari hubungan sederhana di antara dua pihak seperti yang dikemukakan dalam kisah citah dan kijang. Salah satu kerumitannya: suatu spesies itu bisa saja memiliki dua (atau lebih) musuh, dan musuh-musuhnya itu pun saling bermusuhan. Inilah prinsip di balik ungkapan setengah benar yang lazim diucapkan: rumput akan makin bagus kalau dimakan ternak (atau dipotong). Lembu makan rumput, dan karenanya dapat dianggap musuh bagi rumput. Tapi rumput juga punya musuh lain di dunia tumbuhan, gulma, yang kalau dibiarkan tumbuh merajalela, akan menjadi musuh yang lebih bebuyutan bagi rumput ketimbang lembu. Rumput memang menderita karena dimakan lembu, tapi gulma lebih menderita lagi. Oleh karena itu, efek bersih dari hadirnya lembu di padang rumput adalah keuntungan bagi rumput. Lembu ternyata, dalam konteks ini, menjadi kawan bagi rumput, bukan lawan.

Akan tetapi, lembu adalah musuh rumput karena *tetap* benar bahwa tumbuhan rumput itu lebih untung kalau tidak dimakan daripada dimakan lembu, dan tumbuhan mutan yang memiliki, katakanlah, senjata kimia yang melindunginya dari lembu, akan menebar lebih banyak benih (yang mengandung instruksi genetik untuk membuat senjata kimia tersebut) dari para rivalnya di spesies yang sama yang lebih pas di lidah lembu. Sekalipun dalam artian tertentu lembu itu 'kawan' bagi rumput, seleksi alam *tidak* memilih tumbuhan-tumbuhan rumput yang tercerabut dimakan lembu! Kesimpulan umum dari paragraf ini adalah sebagai berikut. Mungkin lebih mudah untuk membayangkan perlombaan senjata antara dua silsilah seperti lembu dan rumput, atau kijang dan citah, tetapi jangan sampai kita mengabaikan fakta bahwa kedua peserta lomba ini memiliki musuh lain yang saling sikut dalam perlombaan senjata lainnya. Pokok ini tidak akan saya perdalam di sini, tetapi dapat disusun sebagai salah satu penjelasan mengapa perlombaan senjata tertentu akan bergeming dalam keadaan stabil dan tidak berlanjut selamanya (tidak berujung pada pemangsa yang mengejar mangsanya dengan kecepatan Mach 2 dan seterusnya).

'Pencegah salah paham' ketiga bagi perlombaan senjata yang sederhana ini lebih merupakan poin menarik ketimbang pernyataan pencegah keliru sangka. Dalam pembahasan saya mengenai citah dan kijang, saya berkata bahwa citah, lain dari cuaca, memiliki kecenderungan, dari generasi ke generasi, untuk menjadi 'pemburu yang lebih baik', dan musuh yang lebih berat,

lebih mematikan bagi kijang. Tapi tidak lantas berarti mereka menjadi lebih *berhasil* dalam memangsa kijang. Inti dari gagasan perlombaan senjata adalah bahwa kedua pihak yang terlibat dalam perlombaan tersebut sama-sama memperbaiki diri, sembari makin menyusahkan pihak lawan di arena lomba. Tidak ada alasan khusus (setidaknya dalam pembahasan kita sejauh ini) untuk menduga bahwa salah satu pihak di dalam perlombaan senjata ini menjadi makin berhasil atau gagal dari yang lain. Malah, gagasan perlombaan senjata, dalam bentuknya yang paling murni, mengemukakan bahwa kemajuan dalam hal *tingkat keberhasilan* bagi kedua belah pihak yang berseteru ini seharusnya nihil, meskipun terdapat kemajuan yang sangat pasti dalam hal *peralatan* penunjang keberhasilan keduanya. Pemangsa jadi lebih pintar membunuh mangsanya, tapi pada saat yang sama mangsa jadi lebih pintar berkelit, sehingga hasil bersihnya adalah tiadanya perubahan dalam tingkat keberhasilan pemangsaan.

Implikasinya: jika, dengan bantuan mesin waktu, pemangsa dari satu era bisa bertemu mangsanya dari era lain, hewan yang lebih ‘modern’, baik pemangsa maupun mangsanya, akan mengungguli yang lebih ‘kuno’. Ini bukan eksperimen yang bisa dilakukan, kendati ada yang berasumsi bahwa fauna tertentu yang lebih terpencil dan terisolir, seperti hewan-hewan di Australia dan Madagaskar, dapat diperlakukan seolah mereka itu kuno, seolah perjalanan ke Australia itu seperti perjalanan ke masa lalu dengan mesin waktu. Orang-orang seperti itu berpikir bahwa spesies pribumi Australia biasanya punah karena pesaing atau musuh yang lebih unggul yang datang dari dunia luar, karena spesies pribumi merupakan model-model yang ‘lebih tua’ dan ‘usang’ di hadapan spesies penyerbu, ibarat kapal perang pertempuran Jutlandia yang baku hantam dengan kapal selam nuklir. Tapi asumsi bahwa Australia memiliki fauna ‘fosil hidup’ itu sulit dibenarkan. Mungkin ada benarnya, tapi lebih banyak salahnya. Saya khawatir ini cuma versi zoologi dari kepongahan sauvinistis, yang sepadan dengan sikap memandang setiap orang Australia itu buruh gelandangan kasar yang bodoh dan miskin dengan sumbat botol bergelantungan di sekeliling tepi topi yang dipakainya.

Prinsip nol perubahan dalam hal *tingkat* keberhasilan ini, tidak peduli seberapa maju *peralatan* penunjangnya, dijuluki dengan nama ‘efek Ratu Merah’ oleh ahli biologi dari Amerika Leigh van Valen. Dalam cerita *Through the Looking Glass*, Anda pasti ingat, Ratu Merah mencengkeram tangan Alice dan menyeretnya, makin lama makin cepat, berlari gila-gilaan menyusuri pinggiran desa, tapi seberapa cepat pun mereka berlari mereka tak kunjung beranjak dari tempat yang sama. Alice yang bingung berkata, ‘Kalau di negeri *kami*, orang biasanya akan sampai di tempat lain – kalau berlari sangat cepat dan lama seperti kita ini.’ ‘Lambat sekali negerimu itu!’ kata sang Ratu. ‘Kalau di *sini*, ya, *kau* harus berlari sekuat tenaga, supaya bisa tetap di tempat yang sama. Kalau mau ke tempat lain, kau harus berlari setidaknya dua kali lebih cepat dari itu!’

Label Ratu Merah ini memang lucu, tapi bisa menyesatkan kalau diartikan (dan kadang memang begitu) sebagai hal yang persis secara matematis, kemajuan relatif yang mutlak nol. Fitur menyesatkan lainnya adalah bahwa dalam cerita Alice, pernyataan Ratu Merah itu benar-benar paradoksal, yang tak ada titik temunya dengan akal sehat di dunia fisik yang nyata. Tapi efek Ratu Merah evolusioner van Valen tidak paradoksal sama sekali. Sepenuhnya sesuai dengan akal sehat, selama akal sehat itu digunakan dengan cerdas. Akan tetapi, kalau tidak paradoksal, perlombaan senjata dapat menimbulkan situasi yang dinilai sia-sia oleh pikiran manusia yang mengutamakan ekonomi.

Mengapa, misalnya, pohon-pohon di hutan itu tinggi sekali? Jawaban pendeknya: karena semua pohon yang lain itu tinggi, sehingga tidak satu pun pohon boleh tidak tinggi. Pohon itu

akan tertutup dari sinar matahari kalau tidak tambah tinggi. Begitulah kebenaran hakikinya, tapi ini bertentangan dengan pikiran manusia yang mengutamakan ekonomi. Tampak begitu tak berguna, begitu sia-sia. Bila semua pohon itu mencapai titik tertinggi kanopi hutan, semuanya kira-kira setara dalam jatah sinar matahari yang didupakannya, dan tidak ada satu pohon pun yang boleh lebih pendek. Tapi kalau saja mereka *semua* itu lebih pendek; kalau saja ada semacam kesepakatan serikat dagang untuk menurunkan tinggi kanopi hutan yang berlaku, *semua* pohon tersebut akan diuntungkan. Mereka akan saling bersaing di kanopi untuk mendapatkan sinar matahari yang sama, tetapi ‘harga’ yang harus dibayar jadi lebih ringan untuk bisa sampai ke kanopi tersebut. Ekonomi seluruh hutan akan diuntungkan, begitu juga dengan masing-masing pohon di dalamnya. Sayangnya, seleksi alam tidak peduli dengan ekonomi seluruh hutan, dan ia tidak punya tempat bagi kartel dan kesepakatan dagang. Ada perlombaan senjata di mana pohon-pohon hutan menjadi lebih besar dari generasi ke generasi. Pada setiap tingkat perlombaan senjata ini, menjadi tinggi untuk diri sendiri itu tidak ada manfaat intrinsiknya. Pada setiap tingkat perlombaan senjata, satu-satunya tujuan menjadi tinggi adalah agar relatif lebih tinggi dari pohon-pohon tetangga.

Ketika perlombaan senjata itu berlanjut, tinggi rata-rata pohon di kanopi hutan pun naik. Tetapi manfaat yang diperoleh pohon-pohon tersebut dengan menjadi tinggi tidak ikut naik. Merosot, malah, karena besarnya biaya pertumbuhan yang harus dibayar. Dari generasi ke generasi, pohon-pohon makin tinggi dan tinggi, tapi pada akhirnya, dalam arti tertentu, mungkin lebih untung kalau mereka tetap pada tingginya yang semula saja. Di titik inilah gejala ini sama dengan Alice dan Ratu Merah, tapi Anda dapat melihat bahwa, pada kasus pohon-pohon tadi, hal ini tidak betul-betul paradoksal. Sudah menjadi ciri perlombaan senjata, termasuk perlombaan senjata di dunia manusia, bahwa kendati semua pihak sebetulnya lebih untung kalau *tidak satu pun* dari mereka meningkat, begitu salah satu dari mereka meningkat, semua yang lain tidak akan aman kalau *tidak* ikut meningkat. Omong-omong, sekali lagi mesti saya tekankan bahwa cerita ini saya kisahkan terlalu sederhana. Saya tidak bermaksud bahwa setiap generasi pohon baru pasti lebih tinggi dari pohon-pohon dari generasi sebelumnya, bukan pula bahwa perlombaan senjata masih berlangsung.

Poin lain yang diilustrasikan oleh pohon-pohon tadi adalah bahwa perlombaan senjata tidak harus terjadi antara anggota-anggota spesies yang berbeda. Risiko tiap pohon ditutupi oleh anggota spesiesnya sendiri itu sama seperti risiko ditutupi oleh anggota spesies lain. Malah risikonya mungkin lebih parah, karena semua organisme mengalami ancaman persaingan yang lebih gawat dari spesiesnya sendiri daripada spesies lain. Anggota-anggota lain dari spesies sendiri merupakan pesaing yang jauh lebih khusus dalam memperebutkan sumber daya yang sama, ketimbang anggota-anggota spesies lainnya. Dalam satu spesies, ada juga perlombaan senjata antara peran jantan dan peran betina, dan antara peran induk dan peran keturunan. Saya sudah membahas ini di *The Selfish Gene*, dan tidak akan menyinggungnya lebih jauh di sini.

Cerita pohon ini saya pakai untuk mengetengahkan perbedaan umum yang penting antara dua jenis perlombaan senjata: simetris dan asimetris. Perlombaan senjata simetris terjadi di antara pesaing yang mencoba melakukan hal yang kurang-lebih sama dengan pesaing lainnya. Perlombaan senjata di antara pohon-pohon hutan yang berjuang menyongsong sinar matahari adalah satu contohnya. Berbagai spesies pohon tersebut tidak semua mencari makan dengan cara yang persis sama, tetapi dalam konteks perlombaan yang kita bahas ini – lomba memperoleh cahaya matahari di atas kanopi – mereka bersaing untuk sumber daya yang sama. Mereka ikut serta dalam suatu perlombaan senjata di mana keberhasilan satu pihak dirasakan sebagai

kegagalan pihak lain. Dan perlombaan senjata ini simetris karena kodrat keberhasilan dan kegagalan kedua belah pihak itu sama: menjulang tinggi ke puncak kanopi dan mendapat sinar matahari atau ditutupi oleh pohon lain.

Akan tetapi, perlombaan senjata antara citah dan kijang itu asimetris. Ia tetap perlombaan senjata sejati karena keberhasilan salah satu pihak dirasakan sebagai kegagalan pihak lainnya, tapi sifat keberhasilan dan kegagalan kedua belah pihak itu amat berbeda. Kedua pihak ‘mencoba’ melakukan hal yang sangat berbeda. Citah mencoba memangsa kijang. Kijang tidak mencoba memakan citah, tapi mencoba mengelak dari terkaman citah. Dari sudut pandang evolusi, perlombaan senjata asimetris lebih menarik, karena lebih berpotensi menghasilkan sistem senjata yang amat kompleks. Dapat kita lihat mengapa demikian lewat contoh teknologi senjata manusia.

Saya bisa saja menggunakan Amerika Serikat dan Uni Soviet sebagai contohnya, tapi tidak perlu sampai menyebut negara tertentu. Senjata yang diproduksi perusahaan di negara-negara industri maju mana pun pada akhirnya bisa saja dibeli oleh negara mana pun. Keberadaan senjata serbu yang ampuh, seperti rudal yang meluncur sedikit di atas permukaan laut atau darat (*surface skimming missile*) tipe Exocet, cenderung ‘mengundang’ penemuan perangkat penangkal yang efektif, misalnya perangkat pengacau radio untuk ‘membuat bingung’ sistem kendali rudal tersebut. Biasanya alat penangkal ini dibuat oleh negara musuh, tapi tidak tertutup kemungkinan dibuat oleh negara yang sama, atau bahkan perusahaan yang sama! Lagi pula, tidak ada perusahaan yang lebih mumpuni dalam merancang perangkat pengacau untuk rudal tertentu dari perusahaan produsen rudal tersebut. Sama sekali tidak mustahil kalau perusahaan yang sama memproduksi keduanya dan menjualnya ke pihak-pihak yang berseteru dalam perang. Saya cukup sinis untuk curiga bahwa hal itu mungkin sekali terjadi, dan dengan terang jelas ini melukiskan poin tentang *peralatan* yang meningkat sementara *keampuhannya* stagnan (dan biayanya naik).

Dari sudut pandang ini, pertanyaan apakah produsen dari kedua pihak yang bertentangan dari perlombaan senjata manusia itu saling bermusuhan atau saling identik jadi tidak relevan, dan ini justru menarik. Yang pokok di sini adalah bahwa, terlepas dari pembuatnya, perangkat itu sendiri saling bermusuhan, dalam artian khusus yang telah saya definisikan di bab ini. Rudal, dan perangkat pengacau khususnya, saling bermusuhan dalam arti keberhasilan yang satu bersalin makna dengan kegagalan yang lain. Saling bermusuhan atau tidaknya para perancang mereka tidak relevan, walau mungkin akan lebih mudah kalau diasumsikan mereka juga bermusuhan.

Sejauh ini saya telah membahas contoh rudal dan penangkalnya tanpa menekankan aspek progresif dan evolusioner, yang merupakan alasan utama saya menghadirkan contoh tersebut di bab ini. Poinnya di sini adalah bahwa rancangan misil itu tidak hanya mengundang, atau memancing, munculnya penangkal yang cocok, misalnya perangkat pengacau radio. Perangkat antirudal itu, pada gilirannya, akan memantik upaya menyempurnakan rancangan rudal tersebut, penyempurnaan yang secara khusus dilakukan demi melawan penangkal itu, perangkat anti-antirudal. Hampir seolah tiap penyempurnaan dalam rudal tersebut merangsang penyempurnaan berikutnya *bagi dirinya sendiri*, melalui efeknya pada penangkal tadi. Penyempurnaan peralatan berkembang sendiri. Inilah resep evolusi eksplosif yang lepas dari kekanganya.

Di akhir kurun waktu beberapa tahun terjadinya tek-tok penemuan dan penemuan-balasan ini, versi terbaru dari rudal dan penangkalnya akan mencapai derajat kecanggihan yang sangat tinggi. Tapi secara bersamaan – dan di sini muncul lagi efek Ratu Merah – tidak perlu berekspektasi

bahwa kedua pihak dalam perlombaan senjata ini bakal lebih berhasil menjalankan tugasnya dibanding keberhasilan mereka di awal perlombaan senjata. Malah jika rudal dan penangkalnya ini meningkat dengan kecepatan yang sama, dapat kita duga bahwa versi-versi paling mutakhir, paling maju, paling canggih, dan versi-versi paling dini, paling primitif, paling sederhana akan sama berhasilnya melawan perangkat penangkal dari eranya masing-masing. Rancangannya mengalami kemajuan, tapi pencapaiannya tidak, khususnya karena kemajuan rancangan di kedua pihak dalam perlombaan senjata ini setara. Malah, *karena* adanya kemajuan yang kira-kira setara di kedua belah pihak inilah maka kecanggihan rancangannya mengalami kemajuan yang luar biasa pula. Kalau satu pihak, katakanlah perangkat pengacau antirudal, melesat terlalu jauh di depan lintasan lomba rancangan ini, pihak yang lain, dalam hal ini rudal, akan berhenti digunakan dan dibuat, alias ‘punah’. Jauh dari paradoks seperti contoh kisah Alice yang asli, efek Ratu Merah dalam konteks perlombaan senjatanya ternyata fundamental bagi gagasan kemajuan progresif.

Saya tadi bilang bahwa perlombaan senjata asimetris lebih berpotensi memunculkan peningkatan progresif yang menarik ketimbang yang simetris, dan sekarang kita sudah lihat mengapa demikian, lewat contoh lomba senjata manusia yang mengilustrasikannya. Kalau satu negara memiliki bom 2-megaton, negara musuhnya akan mengembangkan bom 5-megaton. Hal ini memicu negara pertama untuk mengembangkan bom 10-megaton, yang kemudian memicu yang kedua untuk membuat bom 20-megaton, dan seterusnya. Inilah perlombaan senjata progresif sejati: tiap kemajuan di satu pihak memicu kemajuan balasan di pihak lain, dan hasilnya adalah peningkatan yang ajek seiring berjalannya waktu untuk atribut tertentu – dalam hal ini, daya ledak bomnya. Tetapi tidak terdapat hubungan mendetail satu-lawan-satu di antara rancangan-rancangan tersebut dalam perlombaan senjata simetris semacam itu, tidak ada ‘tautan’ atau ‘pautan’ detail-detail rancangan sebagaimana terdapat dalam perlombaan senjata asimetris antara rudal dan perangkat pengacau rudal. Perangkat pengacau rudal dirancang khusus untuk mengatasi fitur-fitur mendetail tertentu dari rudal; perancang alat penangkal ini mempertimbangkan detail-detail renik dari rancangan rudal musuhnya. Lalu, dalam merancang balasan bagi penangkal tersebut, perancang rudal generasi berikutnya memanfaatkan pengetahuannya tentang rancangan mendetail penangkal generasi sebelumnya. Tapi tidak seperti itu kejadiannya pada contoh bom-bom yang tonase ledaknya terus meningkat tadi. Barang tentu, perancang di satu pihak bisa saja membajak ide-ide cemerlang, meniru fitur-fitur desain, dari pihak lainnya. Tapi walaupun begitu, ini kebetulan saja. Adanya hubungan langsung yang mendetail bom Rusia dengan perincian tertentu dari bom Amerika bukanlah bagian *niscaya* dari rancangan bom Rusia tersebut. Dalam perkara perlombaan senjata asimetris, antara satu silsilah senjata dan penangkal khusus senjata tersebut, hubungan langsung itulah yang, dari ‘generasi’ ke ‘generasi’, berujung pada kecanggihan dan kompleksitas yang makin hebat.

Dalam dunia hidup pun, kita mesti menemukan rancangan kompleks dan canggih ketika berurusan dengan hasil akhir perlombaan senjata asimetris yang panjang, yang di dalamnya kemajuan di satu pihak selalu diimbangi, secara langsung, berhadap-hadapan, oleh *penangkal* (bukan pesaing) pihak lain yang sama berhasilnya. Hal ini kentara benar dalam perlombaan senjata antara pemangsa dan mangsanya, dan, mungkin lebih kentara lagi, dalam perlombaan senjata antara parasit dan inangnya. Sistem senjata elektronik dan akustik kelelawar, yang kita bahas di Bab 2, memiliki segala kecanggihan yang tepat-jitu yang boleh kita temukan dalam produk akhir perlombaan senjata yang panjang. Tidak mengagetkan bahwa kita bisa melacak perlombaan senjata yang sama pada pihak satunya. Serangga-serangga yang diburu kelelawar memiliki unit perangkat elektronik dan akustik yang sebanding canggihnya. Ada kapai-kapai

yang bahkan mampu memancarkan suara-suara (ultra) bak kelelawar yang tampak mengusik kelelawar pemangsanya. Hampir semua hewan berada dalam kondisi bahaya dimakan hewan lain atau bahaya gagal memakan hewan lain, dan sejumlah besar fakta mendetail mengenai hewan hanya masuk akal kalau kita ingat bahwa mereka merupakan produk akhir dari perlombaan senjata yang panjang dan getir. H. B. Cott, pengarang buku klasik *Animal Coloration*, menerangkan poin ini dengan baik pada 1940, pertama kalinya analogi perlombaan senjata digunakan secara tertulis dalam biologi:

Sebelum menyatakan bahwa kenampakan menipu seekor belalang atau kupu-kupu itu terlalu berlebihan mendetailnya, terlebih dahulu harus kita pastikan sekuat dan secermat apa penglihatan musuh-musuh alami kedua serangga tersebut. Kalau tidak, itu sama dengan menyatakan bahwa tameng baja sebuah kapal perang itu terlalu berat, atau jangkauan meriamnya terlalu jauh, tanpa mencari tahu kodrat dan kemampuan persenjataan musuhnya. Faktanya, dalam perjuangan purba hutan rimba, seperti dalam kecanggihan perang modern, kita menyaksikan berlangsungnya perlombaan senjata evolusioner yang hebat – yang hasilnya, untuk pertahanan, terejawantahkan pada perangkat-perangkatnya dalam rupa kecepatan, kewaspadaan, zirah, duri, kebiasaan menggali liang, kebiasaan nokturnal, cairan beracun, rasa yang memualkan, dan [penyamaran serta pewarnaan tubuh lain untuk tujuan melindungi diri]; dan untuk serangan, dalam atribut-atribut lawannya seperti kecepatan, kejutan, sergapan, tipuan, ketajaman penglihatan, cakar, gigi, sengat, saing beracun, dan [pancingan]. Persis seperti buruan yang berlari makin kencang karena pemburunya berlari makin kencang; atau zirah yang makin tebal karena senjata penyerangnya makin garang; perangkat sembunyi pun makin sempurna karena meningkatnya kecermatan.

Perlombaan senjata dalam teknologi manusia lebih mudah dipelajari daripada padanannya di dunia biologi karena terjadi jauh lebih cepat. Kita benar-benar dapat menyaksikan keberlangsungannya, dari tahun ke tahun. Di sisi lain, dalam hal perlombaan senjata dunia biologi, kita biasanya hanya dapat melihat produk akhirnya saja. Jarang sekali hewan atau tumbuhan yang telah mati memfosil, sehingga kadang mungkin bagi kita untuk melihat tahap-tahap progresif perlombaan senjata hewan sedikit lebih gamblang lagi. Salah satu contoh paling menarik dari hal ini berkenaan dengan perlombaan senjata elektronis, sebagaimana ditunjukkan dalam ukuran-ukuran otak hewan-hewan fosil.

Otak itu sendiri tidak memfosil tetapi tengkoraknya iya, dan rongga penampung otak – tempurung otak – kalau ditafsirkan dengan teliti, dapat mengindikasikan ukuran otak dengan baik. Saya katakan, ‘kalau ditafsirkan dengan teliti’, dan batasan maknanya penting dibahas di sini. Dari sekian banyak batasan lain, berikut ini salah satunya. Hewan-hewan besar cenderung berotak besar, sebagian karena ukuran badannya memang besar, tapi ini tidak lantas berarti bahwa mereka ‘lebih pintar’. Gajah otaknya lebih besar dari manusia tapi, mungkin cukup adil kalau dikata, kita suka berpikir bahwa kita lebih pintar dibanding gajah dan bahwa otak kita ‘benar-benar’ lebih besar kalau fakta bahwa kita ini hewan yang ukuran tubuhnya jauh lebih kecil ikut dimasukkan ke dalam hitungan. Otak kita memang memiliki *proporsi* yang jauh lebih besar dalam tubuh kita dibanding otak gajah dalam tubuh gajah, seperti terbukti tampak pada bentuk tengkorak kita yang menonjol. Ini bukan *sekadar* kesombongan spesies saja. Pada otak mana pun, sebagian besar mungkin dibutuhkan untuk melaksanakan kerja-kerja rutin seluruh tubuh, dan tubuh yang besar otomatis membutuhkan otak yang besar. Kita harus mencari cara ‘mengeluarkan’ bagian otak yang dapat diatribusikan hanya untuk ukuran tubuh saja dari kalkulasi kita, sehingga kita dapat membandingkan sisanya sebagai ‘kecerdasan’ sejati hewan-hewan. Dengan kata lain, kita perlu menemukan cara bagus dalam mendefinisikan apa persisnya arti kecerdasan sejati. Beda orang beda pula metode kalkulasinya, tapi mungkin indeks yang paling otoritatif adalah *encephalization quotient* atau EQ yang dipakai oleh Harry Jerison, tokoh terkemuka sejarah otak dari Amerika.

EQ sebetulnya dihitung dengan cara yang agak rumit, dengan logaritma bobot otak dan bobot tubuh, dan standarisasinya terhadap angka rata-rata untuk kelompok besar seperti mamalia

sebagai kelompok utuh. Persis seperti *intelligence quotient* atau IQ yang digunakan (atau mungkin juga disalahgunakan) oleh ahli psikologi distandarkan terhadap rata-rata dari seluruh populasi, EQ distandarkan terhadap, misalnya, seluruh mamalia. Persis seperti IQ 100 berarti, secara definisi, IQ yang identik dengan rata-rata seluruh populasi, EQ 1 berarti, secara definisi, EQ yang identik dengan rata-rata, misalnya, mamalia dengan ukuran tersebut. Perincian teknik matematisnya tidak jadi perkara. Kalau diungkapkan dengan kata-kata, EQ dari suatu spesies seperti badak atau kucing, adalah ukuran seberapa lebih besar (atau kecil) otak hewan tersebut dari ukuran yang *semestinya*, mengingat ukuran tubuh hewan tersebut. Seperti apa cara 'yang semestinya' itu dihitung tentu terbuka boleh dibantah dan dikritik. Fakta bahwa manusia memiliki EQ 7 dan kuda nil memiliki EQ 0,3 tidak lantas berarti bahwa manusia itu 23 kali lebih pintar dari kuda nil! Tapi EQ terukur tersebut mungkin mengindikasikan *sesuatu* tentang berapa besar 'daya komputasi' yang dimiliki seekor hewan di dalam kepalanya, di atas daya komputasi minimal yang tak dapat dikurangi lagi karena dibutuhkan untuk pengoperasian tubuh besar atau kecilnya itu.

EQ terukur ini berbeda-beda di antara mamalia modern. Tikus memiliki EQ sekitar 0,8, sedikit di bawah rata-rata untuk semua mamalia. Tupai agak lebih tinggi, sekitar 1,5. Mungkin dunia tiga-dimensi berisi pohon-pohon menuntut daya komputasi ekstra untuk mengendalikan presisi lompatannya, dan bahkan lebih lagi untuk memikirkan lintasan yang efisien di tengah labirin cabang-cabang yang mungkin atau mungkin tidak ada sambungannya. Monyet jauh di atas rata-rata, dan kera (khususnya kita) lebih tinggi lagi bahkan. Dalam kelompok monyet, ternyata beberapa jenis tertentu memiliki EQ lebih tinggi dari yang lain dan, menariknya, nilai EQ ada kaitannya dengan cara mereka mencari makan: monyet pemakan serangga dan buah otaknya lebih besar, untuk ukuran mereka, dibanding monyet pemakan daun. Cukup masuk akal kalau kita berargumen bahwa seekor hewan membutuhkan daya komputasi yang lebih kecil untuk mencari daun, yang melimpah di mana-mana, ketimbang mencari buah, yang mungkin perlu dicari, atau menangkap serangga, tugas yang lebih giat dan ligat lagi. Sayangnya, tampaknya sekarang cerita aslinya lebih rumit, dan variabel-variabel lain, seperti tingkat metabolisme, mungkin lebih penting. Pada mamalia secara keseluruhan, karnivora biasanya memiliki EQ sedikit lebih tinggi dari herbivora yang menjadi mangsanya. Pembaca mungkin bisa membayangkan mengapa demikian, tetapi hal ini sulit diuji kebenarannya. Tapi bagaimanapun, tampaknya inilah faktanya.

Sudah dulu pembahasan soal hewan modern. Jerison telah merekonstruksi EQ yang mungkin dimiliki hewan-hewan punah yang kini tersisa sebagai fosil saja. Ia harus memperkirakan ukuran otak dengan membuat cor plester dari bagian dalam tempurung otak. Prosesnya melibatkan cukup banyak dugaan dan perkiraan, tapi margin kesalahannya tidak cukup besar untuk menihilkan seluruh upayanya. Metode-metode cor plester, lagi pula, bisa diperiksa akurasinya, dengan menggunakan hewan modern. Kita andaikan tengkorak kering itu satu-satunya hal yang tersisa dari seekor hewan modern. Kita pakai cor plester untuk mengestimasi berapa besar otaknya dari tengkorak itu saja, kemudian kita bandingkan dengan otak asli untuk melihat seberapa jitu perkiraan kita itu. Pemastian dengan tengkorak modern ini meningkatkan derajat kepercayaan dalam perkiraan-perkiraan Jerison atas otak-otak yang sudah lama mati. Kesimpulannya adalah, pertama-tama, otak cenderung menjadi lebih besar seiring jutaan tahun berlalu. Di titik waktu mana pun, herbivora cenderung memiliki otak yang lebih kecil dari karnivora sezaman yang memangsa mereka. Tapi herbivora yang lebih belakangan cenderung berotak lebih besar dari yang lebih dahulu, begitu pula dengan karnivora. Pada fosil-fosil tersebut, kita tampak menyaksikan perlombaan senjata, atau tepatnya serangkaian perlombaan

senjata dimulai lagi, antara karnivora dan herbivora. Menariknya, ini sejajar dengan perlombaan senjata manusia, karena otak merupakan komputer bawaan yang digunakan karnivora dan herbivora, dan elektronika mungkin unsur yang paling pesat berkembang dalam teknologi senjata manusia masa kini.

Seperti apa perlombaan senjata berakhir? Kadang berakhir dengan punahnya salah satu pihak, yang kemudian membuat pihak lainnya berhenti berevolusi ke arah progresif tersebut, dan malah mungkin ‘mundur’ untuk alasan ekonomi yang sebentar lagi kita bahas. Di lain kasus, tekanan ekonomi dapat memaksa perlombaan senjata untuk berhenti, tetap stabil kendati salah satu pihak peserta lomba bisa terbilang terus memimpin di depan. Kecepatan berlari, misalnya. Pasti ada batas maksimal bagi kecepatan yang bisa dicapai citah dan kijang, batas yang dipancang oleh hukum-hukum fisika. Tapi baik citah maupun kijang tidak mencapai batas tersebut. Keduanya berhenti di satu titik yang lebih rendah yang, saya yakini, berciri ekonomis. Teknologi kecepatan tinggi itu tidak murah. Butuh tulang tungkai yang jenjang, otot yang liat, paru-paru yang lapang. Semua hal ini dapat dimiliki hewan mana pun yang betul-betul perlu berlari kencang, tapi ada *harga* yang harus dibayar. Dan harga belinya makin bukan main mahalnyanya. Harga tersebut diukur sebagai biaya yang diistilahkan ahli ekonomi sebagai ‘biaya kesempatan’. Biaya kesempatan dari suatu hal itu diukur sebagai jumlah dari semua hal lain yang harus Anda relakan agar bisa memperoleh sesuatu. Biaya menyekolahkan anak ke sekolah swasta dengan iuran bulanan mahal adalah semua hal yang terpaksa Anda relakan karenanya: mobil baru yang tidak jadi Anda beli, liburan bermandikan sinar mentari yang tidak jadi Anda beli (kalau Anda begitu kaya sehingga sanggup membeli semua ini dengan mudahnya, biaya kesempatan menyekolahkan anak ke sekolah swasta, bagi Anda, mungkin hampir tidak ada artinya). Bagi seekor citah, harga untuk menumbuhkan otot-otot kaki yang lebih besar adalah semua hal lain yang *mestinya bisa dilakukan* citah dengan bahan dan tenaga yang terpakai untuk membuat otot-otot kaki itu, misalnya menghasilkan lebih banyak susu untuk anak citah.

Tentu saja, tidak ada maksud untuk mengajukan bahwa citah melakukan hitung-hitungan akuntansi biaya di benaknya! Ini semua dilakukan secara otomatis oleh seleksi alam yang biasa. Citah rival yang tidak memiliki otot-otot kaki sebesar itu mungkin larinya tidak begitu kencang, tapi ia punya sumber daya cadangan untuk menghasilkan lebih banyak susu dan karenanya mungkin mampu memelihara satu anak lagi. Citah yang gen-gennya mampu memunculkan kompromi optimal antara kecepatan lari, produksi susu, dan semua hal lain sesuai anggaran yang dimilikinya, berpotensi membesarkan lebih banyak anak. Tidak pasti seperti apa kompromi niaga optimal antara, katakanlah, produksi susu dan kecepatan lari. Tentu akan berbeda untuk spesies lain, dan bisa naik-turun untuk tiap-tiap spesies. Yang pasti adalah bahwa kompromi semacam ini tidak terelakkan. Ketika citah dan kijang mencapai kecepatan lari maksimal yang sanggup mereka ‘beli’, sesuai ekonomi internal mereka sendiri, perlombaan senjata di antara keduanya akan berhenti.

Titik-titik henti ekonomis mereka masing-masing mungkin tidak membuat mereka benar-benar seimbang. Hewan mangsa mungkin akhirnya menghabiskan relatif lebih banyak anggaran untuk persenjataan defensif dibanding anggaran yang dihabiskan hewan pemangsa untuk persenjataan ofensif. Satu alasannya terangkum dalam hikayat Aesopian: Kelinci berlari lebih cepat dari rubah, karena kelinci berlari untuk menyelamatkan nyawanya, sementara rubah hanya berlari untuk mengejar makan malamnya. Dalam istilah ekonomi, ini berarti bahwa tiap rubah yang menggeser sumber dayanya ke proyek-proyek lain mampu bertahan hidup lebih baik ketimbang rubah-rubah yang membelanjakan hampir semua sumber dayanya demi teknologi

berburu. Di sisi lain, pada populasi kelinci, keseimbangan keuntungan ekonomis digeser ke individu-individu kelinci yang berinvestasi besar pada peralatan berlari cepat. Hasil akhir dari seimbangannya anggaran-anggaran ini secara ekonomis *pada* satu spesies adalah bahwa perlombaan senjata *antar*-spesies cenderung mengarah ke akhir yang sama-sama stabil, dengan satu pihak memimpin di depan.

Tidak mungkin kita menyaksikan perlombaan senjata dalam progres dinamisnya, karena hal tersebut agaknya tidak berlangsung pada suatu ‘saat’ waktu geologis tertentu, seperti waktu kita sekarang. Tetapi hewan-hewan yang akan terlihat di masa kita dapat ditafsirkan sebagai produk akhir sebuah perlombaan senjata yang berlangsung di masa lalu.

Sebagai kesimpulan untuk bab ini: gen-gen dipilih, bukan karena sifat-sifat intrinsiknya, tetapi berdasarkan interaksinya dengan lingkungannya. Satu komponen yang secara khusus penting dari lingkungan gen adalah gen-gen yang lain. Alasan umum mengapa ini merupakan komponen yang begitu penting adalah karena gen-gen lain juga berubah, dari generasi ke generasi di atas lintasan evolusi. Konsekuensi dari hal ini ada dua jenis utamanya.

Pertama, ini berarti gen-gen yang dipilih adalah yang memiliki ciri ‘bekerja sama’ dengan gen-gen lain yang kemungkinan dijumpainya dalam keadaan-keadaan yang kondusif bagi kerja sama tersebut. Hal ini secara khusus, kendati tidak secara eksklusif, terjadi pada gen-gen di dalam spesies yang sama, karena gen-gen di dalam suatu spesies kerap saling berbagi sel. Hal ini berujung pada evolusi himpunan-himpunan besar gen-gen yang saling bekerja sama, dan akhirnya pada evolusi tubuh-tubuh itu sendiri, sebagai hasil dari upaya kerja sama mereka. Tubuh individu merupakan wahana besar atau ‘mesin bertahan hidup’ yang dibangun oleh serikat kerja gen, demi melestarikan salinan-salinan dari tiap anggota serikat kerja tersebut. Mereka bekerja sama karena hendak memperoleh imbas hasil yang sama – ketahanan hidup dan reproduksi tubuh komunal – dan karena mereka merupakan bagian penting dari lingkungan kerja seleksi alam bagi mereka semua.

Kedua, keadaan tidak selalu kondusif bagi terciptanya kerja sama. Dalam pawai menyusuri waktu geologis, gen-gen saling berjumpa dalam keadaan yang memicu permusuhan. Hal ini secara khusus, kendati tidak secara eksklusif, terjadi pada gen-gen di spesies yang berbeda-beda. Pokok penting tentang spesies yang berbeda-beda ini adalah bahwa gen-gen mereka tidak bercampur – karena anggota-anggota spesies yang berbeda-beda tidak dapat saling kawin. Ketika gen-gen yang terpilih di satu spesies menciptakan lingkungan yang membuat gen-gen di spesies yang lain dipilih, acap kali hasilnya adalah perlombaan senjata evolusioner. Tiap perbaikan genetik baru yang dipilih pada satu pihak dalam perlombaan senjata tersebut – misal, pemangsa – mengubah lingkungan untuk seleksi gen-gen di pihak lain dalam perlombaan senjata itu – mangsanya. Perlombaan senjata seperti inilah yang banyak berkontribusi pada sifat *progresif* evolusi, pada evolusi kecepatan lari, kelihaian terbang, ketajaman penglihatan, kepekaan pendengaran, dan seterusnya, yang terus tersempurnakan. Perlombaan senjata ini tidak berlangsung selamanya, tetapi mandek ketika, misalnya, penyempurnaan yang lebih lanjut menjadi terlalu mahal biaya ekonomisnya bagi individu-individu hewan terkait.

Bab ini bab yang sulit, tapi tetap harus disertakan ke dalam buku ini. Tanpanya, kita akan merasa bahwa seleksi alam hanyalah proses destruktif semata, atau paling tidak proses menyangi saja. Kita telah menyaksikan dua cara seleksi alam dapat menjadi daya *konstruktif*. Cara yang satu berkenaan dengan hubungan kerja sama di antara gen-gen di dalam satu spesies.

Asumsi mendasar kita mestilah bahwa gen-gen itu merupakan entitas-entitas ‘egois’, yang mengupayakan penyebaran dirinya sendiri di dalam kolam gen spesies tersebut. Tetapi karena kentara sekali bahwa lingkungan sebuah gen itu terdiri dari gen-gen *lain* yang juga tengah diseleksi di kolam gen yang sama, gen-gen akan lolos seleksi kalau pintar bekerja sama dengan gen-gen lain di kolam gen yang sama. Inilah mengapa tubuh-tubuh sel yang besar, yang bekerja secara koheren menuju titik akhir kerja sama yang sama, telah berevolusi. Inilah mengapa yang ada adalah tubuh-tubuh, bukan replikator-replikator yang masih berjuang di dalam sup purba.

Tubuh-tubuh mengevolusikan ke-bertujuan-an yang terpadu dan selaras karena gen-gen dipilih di dalam lingkungan yang disediakan gen-gen lain *di dalam spesies yang sama*. Tapi karena gen-gen juga diseleksi di lingkungan yang disediakan gen-gen lainnya dalam spesies lain, perlombaan senjata pun berlangsung. Dan perlombaan senjata merupakan daya besar lain yang melontarkan evolusi ke arah-arrah yang kita kenal sebagai ‘rancangan’ kompleks yang ‘progresif’. Perlombaan senjata memiliki corak ‘tak terkendali’ yang tidak stabil secara inheren. Perlombaan senjata maju ke arah yang dapat dianggap tidak perlu dan sia-sia, dapat pula dianggap progresif dan selamanya menakjubkan bagi kita, pengamatnya. Bab berikutnya akan membahas kasus yang agak spesial: evolusi eksplosif yang tak terkendali, kasus yang disebut Darwin dengan istilah seleksi seksual.

BAB 8

Ledakan dan Puntiran

Akal manusia gemar sekali beranalogi. Kita secara kompulsif tertarik untuk mencari arti pada kemiripan tipis di antara proses-proses yang jauh berbeda. Pernah di Panama hampir seharian saya menonton pertarungan dua koloni padat semut pemotong daun, dan pikiran saya tak tahan untuk tidak membandingkan medan tempur penuh serakan anggota tubuh itu dengan gambar-gambar pertempuran Passchendaele yang pernah saya lihat. Seolah saya bisa mendengar letusan senjata dan mencium bau sangit asapnya. Tidak lama setelah buku pertama saya, *The Selfish Gene*, diterbitkan, secara terpisah dua orang pendeta mendatangi saya, dan keduanya sama-sama menganalogikan gagasan di buku itu dengan doktrin dosa asal. Darwin menerapkan gagasan evolusi secara cermat pada organisme-organisme hayati yang berubah rupa tubuhnya selama generasi-generasi yang tak terhitung jumlahnya. Penerus Darwin telah tergoda untuk melihat evolusi dalam segala hal; dalam berubahnya bentuk alam semesta, dalam ‘tahap-tahap’ perkembangan peradaban manusia, dalam perubahan ukuran panjang rok di gaya busana. Kadang analogi semacam itu bisa bermanfaat besar, tapi kita sering melebih-lebihkan analogi, dan terlalu girang dengan analogi yang begitu lemah sehingga tak bermanfaat atau bahkan berbahaya. Saya sudah terbiasa menerima surat benci, dan dari situ saya belajar bahwa salah satu ciri khas ketersinggungan yang sia-sia adalah penganalogian yang terlalu ria.

Di lain pihak, beberapa kemajuan dahsyat dalam ilmu pengetahuan muncul karena ada orang cerdas yang menemukan analogi antara pokok yang sudah dipahami, dan pokok lain yang masih menjadi teka-teki. Triknya: mencari titik seimbang antara terlalu banyak penganalogian yang tidak cermat dan kebutaan steril pada analogi yang bermanfaat. Ilmuwan yang sukses dan tukang racau yang rewel dibedakan oleh kualitas inspirasi mereka. Tapi saya curiga, pada praktiknya, perbedaannya bukan bertumpu pada kemampuan *melihat* adanya analogi, tetapi kemampuan *menolak* analogi bermudarat dan mengejar analogi bermanfaat. Kita lewati fakta bahwa di sini ada analogi yang lain lagi, yang boleh jadi pandir atau boleh jadi pintar (dan sudah pasti tidak orisinal), antara kemajuan ilmiah dan seleksi evolusi Darwinian, dan izinkan saya mengemukakan pokok yang relevan dengan bab ini. Saya akan mengajukan dua jalinan analogi yang saya rasa menginspirasi, tapi bisa jadi berlebihan kalau kita tidak teliti. Yang pertama adalah analogi antara berbagai proses yang disatukan oleh kemiripannya dengan ledakan. Yang kedua adalah analogi antara evolusi Darwinian sejati dan hal yang disebut evolusi kebudayaan. Saya merasa kedua analogi ini bisa bermanfaat – kalau tidak, buat apa saya mencurahkan satu bab sendiri untuknya? Yang jelas, pembaca sudah saya ingatkan.

Ciri ledakan yang relevan dengan pembahasan kita adalah hal yang oleh para insinyur diistilahkan ‘umpan balik positif’. Umpan balik positif paling mudah dipahami jika dibandingkan dengan lawannya, umpan balik negatif. Umpan balik negatif merupakan dasar dari sebagian besar proses kontrol dan pengaturan otomatis, dan salah satu contoh paling rapi dan paling dikenal adalah pengatur uap Watt. Mesin yang baik akan menghasilkan daya berolak pada kecepatan yang konstan, kecepatan yang tepat untuk tugasnya: menggiling, menenun, memompa, atau apa pun itu. Sebelum Watt, masalahnya adalah bahwa kecepatan putar ini tergantung pada tekanan uapnya. Setor bahan bakar ke mesin uap, mesin makin cepat; tapi bukan ini keadaan

yang dicari untuk pabrik giling atau alat tenun yang membutuhkan gerak seragam pada mesin-mesinnya. Pengatur uap Watt adalah sebuah katup otomatis yang mengatur aliran uap ke piston.

Trik pintarnya adalah mengaitkan katup ini dengan gerak putar yang dihasilkan mesin, sedemikian rupa sehingga makin cepat mesin berjalan, katup akan makin menghentikan aliran uapnya. Sebaliknya, ketika mesin berjalan lambat, katupnya membuka. Oleh karena itu, mesin yang berjalan terlalu lambat segera bertambah cepat, dan mesin yang terlalu cepat segera melambat. Cara jitu pengatur uap dalam mengukur kecepatan ini sederhana tapi efektif, dan prinsipnya masih digunakan hingga kini. Sepasang bola pada lengan berengsel berputar, digerakkan oleh mesin. Bila berputar cepat, bola-bola ini naik ke engsel-engselnya, dengan gaya sentrifugal. Bila berputar lambat, bola-bolanya turun. Lengan-lengan berengsel ini terkait langsung dengan katup uap. Dengan penyetelan yang tepat, pengatur uap Watt membuat mesin uap tetap berputar dengan kecepatan yang hampir konstan, terlepas dari fluktuasi besar di ruang bakarnya.

Prinsip dasar pengatur uap Watt adalah umpan balik negatif. Keluaran mesin (dalam hal ini gerak putar) diumpankan kembali ke dalam mesin (melalui katup uap). Umpan baliknya *negatif* karena keluaran besar (putaran cepat bola-bola) memiliki efek negatif terhadap masukannya (pasokan uap). Sebaliknya, keluaran kecil (putaran lambat bola-bola) memperbesar masukan (uap) – reaksi yang timbul berbanding terbalik dengan isyarat yang diberikan. Tapi tujuan saya mengemukakan gagasan umpan balik negatif adalah untuk membedakannya dari umpan balik positif. Tetap pada contoh mesin uap berpengatur gaya Watt, tapi kali ini kita utak-atik. Kita balikkan isyarat hubungan antara perangkat bola sentrifugal dan katup uap. Sekarang, bila bola berputar cepat, alih-alih menutup seperti rancangan Watt, katup *membuka*. Sebaliknya, jika bola melambat, alih-alih menderaskan, katup mengurangi aliran uap. Pada mesin berpengatur uap Watt yang normal, mesin yang mulai melambat akan segera mengoreksi kecenderungan ini dan melaju lagi ke kecepatan yang diinginkan. Tapi mesin yang sudah kita rekayasa ini justru sebaliknya. Kalau mulai melambat, ia justru akan makin lambat. Katup akan menutup, hingga mesin berhenti. Di lain pihak, kalau mesin hasil rekayasa kita ini ternyata bertambah cepat sedikit saja, alih-alih dikoreksi sebagaimana akan terjadi dalam mesin Watt yang sesungguhnya, kecenderungannya justru meningkat. Pertambahan kecepatan yang sedikit saja ini diperkuat oleh pengatur uap yang sudah kita akali tadi, sehingga mesinnya makin cepat. Akselerasi ini memberikan umpan balik positif, dan mesin pun makin bertambah kencang. Ini berlanjut sampai mesin pecah karena tekanan kuat dan roda gila yang tak terkendali terbang menghantam dinding pabrik, atau tekanan uap sudah habis dan kecepatan maksimal pun tercapai.

Kalau pengatur uap Watt memanfaatkan umpan balik negatif, pengatur uap rekaan kita ini mencontohkan proses sebaliknya: umpan balik positif. Proses-proses umpan balik positif bersifat tidak stabil dan tidak terkendali. Gangguan kecil yang terjadi di awal akan meningkat, dan memuntir tak terkendali, lalu berujung pada bencana atau akhirnya mereda di level yang lebih tinggi akibat proses-proses lainnya. Para insinyur merasa pengelompokan aneka ragam proses ke dalam tajuk umpan balik negatif, dan aneka ragam proses lainnya ke dalam tajuk umpan balik positif, ini berfaedah. Analogi-analogi ini bermanfaat bukan hanya dalam arti kualitatif yang samar, tetapi karena semua prosesnya memiliki matematika dasar yang sama. Ahli biologi yang mempelajari fenomena seperti kontrol suhu tubuh, dan mekanisme kepuasan yang mencegah terlalu banyak makan, mendapati bahwa matematika umpan balik negatif yang dipinjam dari insinyur ini bermanfaat. Sistem-sistem umpan balik positif lebih jarang dipakai ketimbang yang

negatif, baik oleh insinyur maupun tubuh hayati, tapi begitupun, umpan balik positiflah yang menjadi pokok bahasan bab ini.

Alasan insinyur dan tubuh hayati lebih banyak memanfaatkan sistem umpan balik negatif ketimbang positif adalah karena, tentu, pengaturan terkendali di dekat garis optimal itu bermanfaat. Proses-proses tak terkendali dan tak stabil, jauh dari bermanfaat, malah bisa berbahaya. Dalam ilmu kimia, ledakan adalah proses umpan balik positif yang tipikal, dan kita biasanya menggunakan kata ledakan untuk menggambarkan proses yang tak terkendali. Misalnya, kita menyebut seseorang itu memiliki temperamen yang meledak-ledak. Salah seorang guru sekolah saya adalah pria yang biasanya tenang, sopan, dan lemah-lembut, tapi kadang, dan ini disadarinya sendiri, emosinya bisa meledak. Kalau murid di kelas sudah keterlaluan, ia akan diam dahulu, tapi raut wajahnya menunjukkan ada hal tak biasa yang sedang bergolak di dalam dirinya. Kemudian, dimulai dengan nada bicara yang tenang dan wajar, ia akan bilang: 'Wah, wah Sudah tidak sanggup lagi. Emosi saya akan meledak. Saya ingatkan. Kalian tiarap semua di bawah meja. Saya berang.' Dari kalimat satu ke lainnya, nada suaranya kian tinggi, dan pada puncaknya ia merenggut apa pun dalam jangkauannya, buku, penghapus bertulang kayu, pemberat kertas, wadah tinta, dan melemparkannya dengan cepat, dengan kuat, dengan beringas tapi dengan bidikan liar, yang kurang-lebih mengarah pada anak laki-laki yang menyulut amarahnya. Emosinya kemudian pelan-pelan surut, dan keesokan hari ia akan meminta maaf dengan amat santun kepada anak laki-laki itu. Ia sadar ia telah lepas kendali, ia sadar ia telah terjerat dalam lingkaran umpan balik positif.

Tapi umpan balik positif tidak hanya berujung pada peningkatan tak terkendali; bisa juga berujung pada penurunan tak terkendali. Saya baru-baru ini menghadiri debat di Kongregasi, 'parlemen' Universitas Oxford, mengenai pantas tidaknya gelar kehormatan dianugerahkan kepada seseorang. Tidak seperti biasanya, keputusannya kontroversial. Setelah pemungutan suara, selama 15 menit waktu penghitungan kertas suara, orang-orang riuh-rendah bercakap-cakap sambil menantikan hasilnya. Di satu titik, percakapan itu anehnya berhenti, lalu hening senyap. Ini terjadi akibat sejenis umpan balik positif. Begini prosesnya. Pada percakapan yang riuh, derajat kebisingannya pasti naik turun, dan fluktuasi ini terjadi secara kebetulan dan biasanya tidak kita sadari. Salah satu fluktuasi kebetulan ini, yang mengarah ke keheningan, ternyata sedikit lebih mencolok dari biasanya, sehingga ada yang menyadarinya. Karena setiap orang gelisah menunggu pengumuman hasil pemungutan suara, mereka yang menyadari derajat kebisingan acak ini turun kemudian menghentikan percakapannya. Hal ini menyebabkan derajat kebisingan secara umum turun sedikit lagi, dan karena itu makin banyak orang yang menyadari ini dan menghentikan percakapan mereka. Umpan balik positif telah dimulai dan berlanjut agak cepat hingga aula tersebut hening senyap. Lalu, ketika sadar bahwa sebetulnya tidak ada apa-apa, ada tawa yang kemudian diikuti dengan eskalasi perlahan suara bising kembali ke tingkat sebelumnya.

Umpan balik positif yang paling kentara dan spektakuler adalah yang berakibat pada, bukan penurunan, tetapi kenaikan sesuatu yang tak terkendali: ledakan nuklir, guru yang naik pitam, perkelahian di kedai tuak, makian yang makin liar di Perserikatan Bangsa-Bangsa (pembaca boleh mengindahkan peringatan yang mengawali bab ini). Pentingnya umpan balik positif dalam urusan internasional secara tersirat dikenali dalam jargon 'eskalasi': ketika kita bilang bahwa Timur Tengah itu 'tong bubuk mesiu', dan ketika kita mengidentifikasi 'titik nyala'. Salah satu ungkapan paling dikenal mengenai gagasan umpan balik positif ada di dalam Injil Santo Matius: 'Karena setiap orang yang mempunyai, kepadanya akan diberi, sehingga ia berkelimpahan.

Tetapi siapa yang tidak mempunyai, apa pun juga yang ada padanya akan diambil dari padanya.' Bab ini mengenai umpan balik positif dalam evolusi. Ada beberapa fitur dalam organisme hayati yang tampak seolah merupakan produk akhir dari hal yang menyerupai proses evolusi eksplosif, tak terkendali, yang digerakkan oleh umpan balik positif. Perlombaan senjata yang dibahas di bab sebelumnya adalah versi ringan dari hal ini, tetapi contoh yang paling mencolok mata dapat dijumpai pada organ-organ daya tarik seksual.

Coba bujuk diri Anda untuk percaya, seperti dahulu saya dibujuk ketika masih kuliah strata satu, bahwa ekor kipas merak itu merupakan organ fungsional biasa seperti gigi atau ginjal, yang dilukis oleh seleksi alam untuk bertugas tidak lebih dari sekadar penanda jati diri si burung itu saja, agar tidak salah disangka sebagai spesies burung yang lain. Saya tidak pernah terbujuk, dan saya ragu Anda bisa terbujuk juga. Bagi saya, ekor kipas merak memiliki materai umpan balik positif yang mutlak. Ekor kipas merak jelas-jelas merupakan produk dari semacam ledakan yang tidak stabil dan tidak terkendali yang terjadi di masa evolusi. Begitu pula dugaan Darwin dalam teori seleksi seksualnya dan begitu pula, dalam penjabaran panjang lebar, dugaan penerus terhebat Darwin, R. A. Fisher. Setelah penalaran singkat, ia menyimpulkan (dalam bukunya *The Genetical Theory of Natural Selection*):

karenanya, perkembangan bulu burung jantan, dan preferensi seksual burung betina untuk perkembangan tersebut, pastilah berjalan beriringan dan, selama tidak dilawan kuat oleh kontraseleksi, prosesnya akan terus maju dengan kecepatan yang naik melulu. Bila kontraseleksi alpa, mudah membayangkan bahwa kecepatan perkembangan itu akan proporsional dengan perkembangan yang telah diperoleh, yang karenanya akan meningkat secara eksponensial seiring waktu, atau dalam gerak maju yang geometris.

Sudah jadi ciri Fisher: yang baginya 'mudah dibayangkan' tidak akan sepenuhnya dipahami oleh orang lain hingga setengah abad setelahnya. Ia tidak merasa perlu menjabarkan pernyataannya bahwa evolusi bulu burung yang memiliki daya tarik seksual dapat bergerak maju dengan kecepatan yang makin kencang, secara eksponensial, secara eksplosif. Dunia biologi membutuhkan sekitar 50 tahun untuk memahami ini dan akhirnya merekonstruksi sepenuhnya argumen matematis yang pasti dipakai Fisher, baik di atas kertas maupun di dalam benaknya, untuk membuktikan pokok tersebut kepada dirinya sendiri. Saya akan mencoba menjelaskan, murni dalam tulisan nonmatematis, gagasan-gagasan matematis ini yang, dalam bentuk modernnya, telah dikerjakan oleh ahli biologi matematis muda dari Amerika, Russell Lande. Kendati saya tidak akan begitu pesimis seperti Fisher sendiri yang, dalam Prakata untuk bukunya di tahun 1930, mengatakan 'Upaya saya membuat buku ini mudah dibaca sama sekali tidak berhasil', tetap saja, meminjam kata-kata seorang pengulas buku pertama saya, 'Peringatan pembaca: pastikan Anda memakai sepatu lari mental Anda'. Saya sendiri bersusah-payah untuk memahami gagasan-gagasan sulit ini. Di sini, meski diprotes oleh yang bersangkutan, saya harus berterima kasih kepada kolega dan mantan mahasiswa saya Alan Grafen, yang kasut lari bersayap mentalnya tiada sanding tiada banding, tapi yang juga memiliki kemampuan yang lebih langka: melepas kasut itu dan menjelaskan segala sesuatunya kepada yang lain. Tanpa ajarannya, saya tidak akan mampu menuliskan bagian tengah dari bab ini, dan itu mengapa saya menolak untuk memindahkan ucapan terima kasih saya ke bagian Prakata buku ini.

Sebelum kita membahas perkara sulit ini, saya harus mundur dahulu dan menjelaskan sedikit tentang asal-usul gagasan seleksi seksual. Seperti begitu banyak hal lain di bidang ini, gagasan ini berawal dari Charles Darwin. Darwin, walau lebih menekankan pada ketahanan hidup dan perjuangan untuk ada, mengetahui bahwa keberadaan dan ketahanan hidup hanyalah alat untuk satu tujuan. Tujuan tersebut adalah reproduksi. Seekor burung pegar bisa saja hidup sampai usia tua yang matang, tapi kalau tidak bereproduksi ia tidak akan meneruskan atribut-atribut yang

dimilikinya. Seleksi akan memilih sifat-sifat yang membuat seekor hewan berhasil bereproduksi, dan ketahanan hidup hanyalah sebagian dari upaya memenangkan perjuangan reproduksi. Di bagian-bagian lain dari perjuangan itu, yang paling atraktif di mata lawan jenisnya adalah yang berhasil. Darwin melihat bahwa, kalau seekor pegas atau merak atau cenderawasih jantan membeli daya tarik seksual, dengan taruhan nyawa sekalipun, burung-burung ini masih dapat meneruskan sifat-sifat daya tarik seksualnya melalui prokreasi yang sukses besar sebelum kematiannya. Ia menyadari bahwa ekor kipas merak pastilah menyusahkan pemiliknya, kalau kita tinjau dari sudut pandang ketahanan hidup, dan ia mengemukakan bahwa meningkatnya daya tarik seksual yang diberikan kualitas ini pada si jantan jauh melebihi sepadan. Karena menggemari analogi domestikasi, Darwin membandingkan ayam betina dengan peternak yang mengarahkan lajur evolusi hewan-hewan ternak di menurut selera estetis. Bisa juga kita bandingkan dengan orang yang memilih biomorf-biomorf komputer ke arah daya tarik estetis.

Darwin menerima selera si betina sebagai selera terberi. Eksistensi selera ini merupakan aksioma dari teori seleksi seksual Darwin, sebuah asumsi awal, bukan hal yang perlu dijelaskan tersendiri. Sebagian karena alasan inilah teori seleksi seksual Darwin dianggap hina, hingga diselamatkan oleh Fisher pada 1930. Sayangnya, banyak ahli biologi mengabaikan atau salah memahami Fisher. Julian Huxley dan lainnya mengajukan keberatan mereka: selera hewan betina bukan landasan yang sah bagi sebuah teori ilmiah sejati. Tapi Fisher menyelamatkan teori seleksi seksual, dengan memperlakukan preferensi hewan betina sebagai objek seleksi alam yang sah dalam dirinya sendiri, tidak kurang dari ekor si jantan. Preferensi betina merupakan pengejawantahan sistem saraf betina. Sistem saraf betina berkembang di bawah pengaruh gennya, dan karena itu atribut-atributnya kemungkinan besar telah dipengaruhi oleh seleksi di generasi-generasi sebelumnya. Sementara yang lain berpikir bahwa ornamen jantan berevolusi di bawah pengaruh preferensi betina yang jumud, Fisher berpikir bahwa preferensi betina berevolusi secara dinamis, beriringan dengan ornamen jantan. Mungkin Anda sudah mulai bisa melihat seperti apa hal ini akan bertautan dengan gagasan umpan balik positif.

Ketika kita membahas ide-ide teoretis yang sulit, biasanya kita bisa terbantu dengan contoh dari dunia nyata. Saya akan menggunakan ekor burung Sakabula (*Euplectes progne*) sebagai contoh. Ornamen yang terseleksi secara seksual mana pun sebetulnya bisa, tapi dalam penjelasan kali ini saya hendak menghadirkan contoh selain merak yang melulu dibicarakan (dalam pembahasan mengenai seleksi seksual). Sakabula jantan adalah burung hitam bertubuh ramping dengan gurat kontras berwarna oranye di bahunya. Ukuran burung ini kira-kira sama dengan burung pipit Inggris, tapi bulu ekor utama Sakabula, di musim kawin, bisa sampai 18 inci panjangnya. Sakabula kerap terlihat memamerkan atraksi terbangnya di atas padang rumput Afrika, berputar-putar dan meliak-liuk, seperti pesawat terbang dengan spanduk reklame panjang di ekornya. Tidak mengagetkan kalau burung ini tidak bisa terbang saat cuaca basah. Ekor sepanjang itu, biar kering sekalipun, pastilah menjadi beban untuk diseret ke mana-mana. Di sini kita hendak menjelaskan evolusi ekor panjang tersebut, yang kita duga merupakan proses evolusi yang eksplosif. Oleh karena itu, titik awal kita adalah burung purba yang tidak berekor panjang. Bayangkan ekor purba yang panjangnya kira-kira 3 inci, sekitar seperenam dari ekor Sakabula jantan modern di masa berahi. Perubahan evolusioner yang coba kita jelaskan adalah bertambah panjangnya ekor ini enam kali lipat.

Sudah jelas bahwa, saat kita mengukur hampir semua hal tentang hewan, meskipun sebagian besar anggota spesies tersebut cukup dekat dengan rata-ratanya, ada saja individu-individu yang sedikit di atas rata-rata, dan ada juga yang di bawah rata-rata. Dapat dipastikan bahwa ada

kisaran panjang ekor pada burung *Sakabula* purba, sebagian lebih panjang dan sebagian lagi lebih pendek dari panjang rata-rata 3 inci. Aman kalau kita berasumsi bahwa panjang ekor tersebut diatur oleh sejumlah besar gen, yang masing-masing memiliki efek kecil, dan efek-efek kecil ini berhimpun, bersama efek-efek pola makan dan variabel-variabel lingkungan lainnya, untuk membuat panjang ekor aktual dari seekor burung. Sejumlah besar gen yang efek-efeknya berhimpun ini disebut poligen. Sebagian besar ukuran pada diri kita, misalnya tinggi dan berat badan, dipengaruhi oleh sejumlah besar poligen. Model matematis seleksi seksual yang paling dekat saya ikuti, gubahan Rusell Lande, adalah model poligen.

Nah, kita harus mengalihkan perhatian kita ke si betina, serta cara mereka memilih si jantan. Mungkin tampak agak seksis kalau berasumsi bahwa betinalah yang memilih pasangan, bukan sebaliknya. Namun, ada alasan-alasan teoretis yang kuat untuk menduga bahwa demikianlah yang terjadi (lihat *The Selfish Gene*), dan kenyataan di lapangan memang biasanya begitu. Burung jantan *Sakabula* modern biasanya memikat sekelompok burung betina, kurang lebih enam ekor jumlahnya. Ini berarti ada surplus pejantan dalam populasi burung ini yang tidak bereproduksi. Ini kemudian berarti bahwa burung betina tidak kesulitan menemukan pasangan kawinnya, dan berhak untuk pilih-pilih. Burung jantan harus berupaya keras untuk memikat burung betina. Burung betina tidak perlu susah memikat burung jantan karena ia sudah pasti 'laku'.

Nah, setelah menerima asumsi bahwa betinalah yang memilih, berikutnya kita ambil langkah krusial yang diambil Fisher untuk memerang para pengkritik Darwin. Alih-alih setuju saja bahwa betina itu punya selera bawaannya sendiri, kita anggap preferensi betina sebagai variabel yang dipengaruhi secara genetik, persis sama dengan variabel-variabel lainnya. Preferensi betina merupakan variabel kuantitatif, dan kita dapat berasumsi bahwa preferensi ini dikendalikan oleh poligen, seperti panjang ekor si jantan itu sendiri. Poligen-poligen ini dapat memengaruhi sejumlah besar bagian dari otak si betina, atau bahkan matanya; apa pun yang dampaknya mengubah preferensi betina. Barang tentu preferensi betina ini mempertimbangkan banyak bagian dari tubuh si jantan, warna embel-embel di pundaknya, bentuk paruhnya, dan seterusnya; tapi kebetulan di sini kita tertarik pada evolusi panjang ekor burung jantan, dan karena itu kita pun tertarik pada preferensi betina terhadap ekor jantan yang berbeda-beda panjangnya. Maka, kita dapat mengukur preferensi betina ini dengan satuan yang sama persis dengan cara kita mengukur panjang ekor burung jantan – dalam inci. Poligen-poligen akan memastikan bahwa ada sebagian betina yang menyukai ekor burung jantan yang lebih panjang dari rata-rata, sebagian lain menyukai yang lebih pendek dari rata-rata, dan sebagian lagi menyukai ekor yang panjangnya rata-rata.

Sekarang masuk ke salah satu wawasan kunci dari seluruh teori ini. Walaupun *terungkap* hanya dalam perilaku betina, gen-gen preferensi betina ini juga ada di dalam tubuh-tubuh burung jantan. Demikian pula, gen-gen untuk panjang ekor burung jantan ada di dalam tubuh-tubuh burung betina, terlepas dari terungkap tidaknya gen-gen ini pada burung betina. Perihal gen-gen yang gagal mengungkapkan dirinya ini tidak sulit dipahami. Kalau seorang laki-laki memiliki gen untuk penis yang panjang, gen-gen tersebut dapat diteruskan baik ke anak perempuan maupun anak laki-lakinya. Gen-gen tersebut dapat terungkap dalam tubuh si anak laki-laki, sementara pada tubuh si anak perempuan, sudah pasti, tidak akan terungkap karena memang ia tidak memiliki penis. Tapi kalau laki-laki tersebut akhirnya memiliki cucu laki-laki, anak laki-laki dari anak perempuannya itu juga punya potensi yang sama untuk mewarisi penis panjangnya

seperti anak laki-laki dari anak laki-lakinya. Gen-gen bisa terbawa dalam tubuh tetapi tidak terungkap. Begitu pula, Fisher dan Lande berasumsi bahwa gen-gen untuk preferensi betina *terbawa* dalam tubuh-tubuh jantan, kendati hanya *terungkap* pada tubuh-tubuh betina. Dan gen-gen untuk ekor jantan ini terbawa dalam tubuh-tubuh betina, sekalipun tidak terungkap di sana.

Misalkan kita punya mikroskop khusus, yang memungkinkan kita untuk melihat ke dalam sel-sel burung mana pun dan memeriksa gen-gennya. Ambil burung jantan yang kebetulan memiliki panjang ekor di atas rata-rata, dan perhatikan gen-gen di dalam sel-selnya. Pertama-tama, lihat gen-gen untuk panjang ekor itu sendiri, dan tentu tidak mengejutkan kalau Anda mendapati bahwa burung jantan ini memiliki gen-gen pembuat ekor panjang: ini sudah pasti, karena burung itu *memang* berekor panjang. Tapi sekarang coba perhatikan gen-gennya untuk *preferensi* ekor. Di sini, kita tidak bisa mencari petunjuknya dari luar, karena gen-gen semacam itu hanya terungkap dalam tubuh betina. Kita harus melihatnya dengan mikroskop kita. Apa yang akan kita lihat? Kita akan melihat gen-gen yang membuat betina lebih menyukai ekor panjang. Sebaliknya, kalau kita melihat ke dalam burung jantan yang berekor pendek, kita mesti melihat gen-gen yang membuat burung betina lebih menyukai ekor pendek. Inilah poin kunci dalam argumen ini. Penalarannya sebagai berikut.

Kalau saya ini jantan dengan ekor panjang, ayah saya kemungkinan besar memiliki ekor panjang juga. Ini adalah hereditas yang biasa. Tapi juga, karena ayah saya dipilih sebagai pasangan kawin oleh ibu saya, ibu saya kemungkinan besar lebih menyukai jantan berekor panjang. Oleh karena itu, kalau saya telah mewarisi gen-gen untuk ekor panjang dari ayah saya, saya juga kemungkinan besar telah mewarisi gen-gen untuk lebih menyukai ekor panjang dari ibu saya. Dengan nalar yang sama, kalau Anda telah mewarisi gen-gen untuk ekor pendek, kemungkinan Anda juga telah mewarisi gen-gen yang membuat betina lebih menyukai ekor pendek.

Kita dapat mengikuti garis penalaran yang sama untuk betina. Kalau saya betina yang lebih menyukai jantan berekor panjang, kemungkinan besar ibu saya juga lebih menyukai jantan berekor panjang. Oleh karena itu, kemungkinan ayah saya pun berekor panjang, karena dia dipilih oleh ibu saya. Oleh karena itu, kalau saya telah mewarisi gen-gen untuk lebih menyukai ekor panjang, kemungkinan saya juga telah mewarisi gen-gen untuk berekor panjang, terlepas dari terungkap atau tidaknya gen-gen tersebut pada tubuh saya yang betina. Dan kalau saya telah mewarisi gen-gen untuk lebih menyukai ekor pendek, kemungkinan saya juga telah mewarisi gen-gen untuk *memiliki* ekor pendek. Kesimpulan umumnya sebagai berikut. Individu mana pun, jantan atau betina, kemungkinan mengandung gen-gen yang membuat si jantan *memiliki* sifat tertentu, *dan* gen-gen yang membuat si betina *lebih menyukai* sifat yang sama persis, apa pun sifat itu.

Jadi, gen-gen untuk sifat-sifat jantan, dan gen-gen yang membuat betina lebih menyukai sifat-sifat itu, tidak akan dikocok acak pada populasinya, tetapi akan cenderung dikocok *bersama-sama*. ‘Kebersamaan’ ini, yang dinamai dengan istilah teknis sulit ‘ketakseimbangan pautan’ (*linkage disequilibrium*), memainkan trik ganjilnya dengan persamaan-persamaan yang dikerjakan ahli genetika matematis. Ia memiliki konsekuensi ganjil dan ajaib, yang pada praktiknya, kalau Fisher dan Lande benar, tidak kurang dari evolusi eksplosif ekor merak dan Sakabula, dan sejumlah besar organ-organ daya tarik lainnya. Konsekuensi-konsekuensi ini hanya dapat dibuktikan secara matematis, tetapi masih mungkin diungkapkan dengan kata-kata, dan kita boleh mencoba menghadirkan cita rasa argumen matematis dalam bahasa nonmatematis. Sepatu lari mental tadi masih kita butuhkan, walau analogi sepatu panjat gunung sebetulnya lebih

pas. Tiap langkah di dalam argumen ini cukup sederhana, tapi ada serangkaian panjang langkah-langkah menuju puncak gunung pemahaman dan, sayangnya, kalau melewati satu saja dari langkah-langkah sebelumnya, langkah-langkah berikutnya tidak bisa dilalui.

Sejauh ini kita telah mengakui bahwa preferensi betina itu dapat berupa kisaran, dari betina yang lebih berselera dengan jantan berekor panjang ke betina dengan selera sebaliknya, jantan berekor pendek. Tapi kalau kita mengadakan jajak pendapat burung-burung betina di populasi tertentu, kita kemungkinan akan mendapati bahwa mayoritas betina memiliki selera umum yang sama soal pejantan mereka. Kita dapat mengungkapkan *kisaran* selera betina dalam populasi itu dengan satuan yang sama – inci – dengan cara kita mengungkapkan kisaran panjang ekor burung jantan. Dan kita dapat mengungkapkan preferensi betina *rata-rata* dalam satuan inci yang sama pula. Bisa jadi ternyata preferensi betina rata-rata sama persis dengan ukuran ekor jantan rata-rata, 3 inci untuk keduanya. Dalam hal ini, pilihan betina tidak akan menjadi daya evolusi yang memicu kecenderungan berubahnya panjang ekor jantan. Atau bisa jadi ternyata preferensi betina rata-rata itu jatuh pada ekor yang sedikit lebih panjang dari ekor rata-rata yang ada, katakanlah 4 inci, bukan 3. Untuk sementara, kita biarkan alasan timbulnya perbedaan ini tetap menjadi pertanyaan terbuka. Kita terima dahulu bahwa perbedaan itu memang ada dan mari kita ajukan pertanyaan mencolok berikutnya. Kalau mayoritas betina lebih menyukai jantan dengan ekor 4 inci, mengapa mayoritas jantan memiliki ekor 3 inci? Mengapa panjang ekor rata-rata pada populasi tersebut tidak bergeser ke 4 inci atas pengaruh seleksi seksual betinanya? Bagaimana bisa ada perbedaan 1 inci di antara rata-rata panjang ekor yang disukai dan rata-rata panjang ekor yang sebetulnya?

Jawabannya adalah karena selera betina bukan satu-satunya jenis seleksi yang memengaruhi panjang ekor jantan. Ekor punya tugas penting dalam kegiatan terbang, dan ekor yang terlalu panjang atau terlalu pendek akan menurunkan keefisienan terbang. Selain itu, ekor yang panjang perlu tenaga ekstra untuk dibawa-bawa, dan lebih banyak lagi tenaga yang dibutuhkan untuk membuatnya. Jantan dengan ekor 4 inci mungkin mudah memikat burung betina, tapi harga yang harus dibayarnya adalah gerak terbang yang kurang efisien, lebih besar energi yang terkuras, dan lebih rentan terhadap pemangsa. Kita dapat mengungkapkan ini dengan mengatakan bahwa ada ukuran panjang ekor yang *optimal secara asas manfaat*, berbeda dari yang optimal secara seleksi seksual: panjang ekor ideal dari sudut pandang kriteria kebergunaannya yang wajar; panjang ekor yang ideal dari semua sudut pandang selain daya pikat seksual.

Akankah panjang ekor rata-rata jantan yang aktual, 3 inci dalam contoh rekaan kita, sama dengan yang optimal secara asas manfaat? Tidak, yang optimal secara asas manfaat itu mestinya lebih pendek, katakanlah 2 inci. Alasannya adalah karena panjang ekor rata-rata yang aktual (3 inci) adalah hasil kompromi antara seleksi berdasarkan asas manfaat yang cenderung membuat ekor makin pendek, dan seleksi seksual yang cenderung membuat ekor makin panjang. Kita boleh menduga bahwa, kalau kebutuhan memikat burung betina itu tidak ada, panjang ekor rata-rata akan menyusut ke arah 2 inci. Kalau tidak perlu mengkhawatirkan tentang efisiensi terbang dan biaya energinya, panjang ekor rata-rata akan melejit ke arah 4 inci. Rata-rata aktual 3 inci adalah sebuah kompromi.

Kita masih belum menyentuh pertanyaan *mengapa* burung betina bersepakat untuk lebih menyukai ekor yang lebih panjang dari ukuran optimal secara asas manfaat. Sekilas gagasan ini tampak konyol. Burung-burung betina yang sadar gaya, dengan selera ekor yang lebih panjang dari kriteria rancangan baik yang semestinya, akan memiliki anak-anak jantan yang terancang buruk, dengan kemampuan terbang yang tidak efisien dan kikuk. Seekor betina mutan yang

kebetulan menyimpang dari tren gaya sehingga memiliki selera jantan berekor lebih pendek, khususnya betina mutan yang selera ekornya kebetulan berteepatan dengan ukuran optimal secara asas manfaat, akan menghasilkan anak-anak jantan yang efisien, terancang baik untuk terbang, yang sudah pasti akan memecundangi anak-anak jantan dari rivalnya: betina yang sadar gaya. Ah, tapi di sini letak masalahnya. Tersirat dalam metafora ‘gaya’. Anak-anak jantan dari betina mutan itu mungkin memang penerbang andal, tapi mereka tidak dipandang menarik oleh mayoritas betina di populasi tersebut. Mereka hanya akan memikat perhatian betina minoritas saja, betina-betina yang membangkang dari tren gaya; dan betina minoritas, terang jelas, lebih sulit ditemukan ketimbang betina mayoritas, karena memang jumlahnya lebih sedikit. Di dalam masyarakat yang hanya satu saja dari enam pejantan yang bisa kawin dan pejantan yang mujur ini punya harem besar, ikut arus selera mayoritas betina pasti besar faedahnya, faedah yang sangat mampu melampaui biaya asas manfaat dalam hal efisiensi tenaga dan gerak terbang.

Tapi begitupun, mungkin Anda mengeluh, seluruh argumen ini bertumpu pada asumsi manasuka. Anda mungkin mengakui bahwa, kalau memang kebanyakan betina lebih menyukai ekor panjang yang menyimpang dari asas manfaat, segala sesuatu setelahnya jadi masuk akal. Hanya saja, *mengapa* pula selera betina mayoritas ini bisa muncul? Mengapa mayoritas burung betina tidak lebih menyukai ekor yang *lebih kecil* ukurannya dari ukuran optimal secara asas manfaat, atau sama persis dengan ukuran optimal secara asas manfaat? Mengapa gaya tidak berjalan beriringan dengan utilitas? Jawabnya: yang mana pun dari semua skenario ini bisa terjadi, dan di banyak spesies besar kemungkinan sudah terjadi. Kasus rekaan saya tentang burung betina yang lebih menyukai ekor panjang memang manasuka. Tapi *apa pun* selera betina mayoritas yang kebetulan ada, dan tidak peduli seberapa manasuka pun selera itu, mesti akan ada kecenderungan bagi mayoritas itu untuk dipertahankan oleh seleksi atau bahkan, dalam kondisi-kondisi tertentu, justru ditingkatkan – dibesar-besarkan. Pada titik argumen inilah kurangnya justifikasi matematis dalam paparan saya menjadi kentara. Saya bisa saja mengajak pembaca untuk langsung menerima bahwa penalaran matematis Lande membuktikan poin tersebut, dan berhenti di situ. Mungkin itu justru pilihan terbijak yang mestinya saya ambil, tapi saya memilih untuk mencoba menerangkan bagian dari gagasan ini dengan kata-kata.

Kunci dari argumen ini terletak pada pokok yang telah kita mantapkan tadi, tentang ‘ketakseimbangan pautan’, ‘kebersamaan’ gen-gen untuk ekor dengan panjang tertentu – berapa pun itu – dan gen-gen terkait untuk sifat lebih menyukai ekor yang sama persis dengan panjang tersebut. ‘Faktor kebersamaan’ ini dapat kita bayangkan sebagai angka yang bisa diukur. Kalau faktor kebersamaan sangat tinggi, ini berarti, jika mengetahui gen-gen seekor burung untuk panjang ekor, kita dapat memperkirakan, dengan sangat jitu, gen-gen burung tersebut (jantan atau betina) untuk preferensinya, dan sebaliknya. Sebaliknya, kalau faktor kebersamaannya rendah, ini berarti pengetahuan mengenai gen-gen seekor burung untuk salah satu dari dua aspek tadi – preferensi atau panjang ekor – memberikan kita petunjuk samar saja tentang gen-gen burung tersebut (jantan atau betina) di aspek lainnya.

Hal yang memengaruhi tinggi-rendahnya faktor kebersamaan adalah kekuatan dari preferensi betina – seberapa toleran mereka dengan apa yang mereka anggap jantan yang tak sempurna; seberapa banyak dari variasi panjang ekor burung jantan itu diatur oleh gen-gen ketimbang oleh anasir-anasir lingkungan; dan seterusnya. Kalau, sebagai akibat dari semua efek ini, faktor kebersamaan – eratnya ikatan dari gen-gen untuk panjang ekor dan gen-gen untuk preferensi panjang ekor – itu sangat kuat, kita dapat menyimpulkan konsekuensi berikut ini. Setiap kali burung jantan dipilih karena ekor panjangnya, yang terjadi bukan hanya dipilihnya gen-gen

untuk ekor panjang. Pada saat yang sama, karena pautan ‘kebersamaan’, gen-gen untuk sifat *lebih menyukai* ekor panjang pun tengah dipilih. Ini berarti bahwa gen-gen yang membuat burung betina memilih pejantan dengan panjang ekor tertentu, ternyata, *memilih salinan dirinya sendiri*. Inilah bahan baku penting dari proses yang menguat sendiri: ia memiliki momentum penopang dirinya sendiri. Evolusi, ketika telah beranjak ke arah tertentu, dapat cenderung bertahan, bergerak terus di arah tersebut.

Kita juga dapat melihat hal ini dalam kerangka ‘efek janggut hijau’. Efek janggut hijau itu sebetulnya semacam lelucon akademis biologis. Murni hipotetis, tetapi tetap informatif. Wacana ini awalnya dikemukakan sebagai cara untuk menjelaskan prinsip fundamental yang mendasari teori penting W. D. Hamilton mengenai seleksi sanak saudara, yang panjang lebar saya bahas di buku *The Selfish Gene*. Hamilton, yang sekarang merupakan kolega saya di Oxford, menunjukkan bahwa seleksi alam akan memilih gen-gen untuk tingkah altruistik terhadap saudara dekat, karena salinan-salinan dari gen-gen yang sama persis itu kemungkinan besar juga ada di tubuh-tubuh saudara sendiri. Hipotesis ‘janggut hijau’ mengajukan pokok yang sama secara lebih umum, biarpun kurang praktis. Dalam argumen ini, kekerabatan hanyalah salah satu cara bagi gen untuk mampu secara praktis mengetahui letak salinan-salinan dirinya sendiri di tubuh-tubuh yang lain. Secara teoretis, gen dapat mengetahui letak salinan-salinannya sendiri dengan cara yang lebih langsung. Misalkan kebetulan muncul gen yang memiliki dua efek berikut (gen-gen dengan dua efek atau lebih itu lumrah): membuat pemiliknya memiliki ‘embel-embel’ mencolok seperti janggut hijau, serta memengaruhi otak mereka sedemikian rupa sehingga berperilaku altruistik terhadap individu-individu yang berjanggut hijau juga. Kebetulan yang cukup muskil, memang, tapi kalau ini pernah terjadi, konsekuensi evolusinya sudah jelas. Gen altruisme janggut hijau akan cenderung dipilih oleh seleksi alam, untuk alasan yang persis sama dengan gen altruisme terhadap keturunan atau sanak saudara. Setiap kali individu berjanggut hijau menolong sesamanya, gen untuk memberikan altruisme pembeda ini akan memilih salinan dirinya sendiri. Penyebaran gen janggut hijau akan terjadi secara otomatis dan tak terelakkan.

Tak seorang pun yang benar-benar percaya, saya pun tidak, bahwa efek janggut hijau, dalam bentuk yang ultra-sederhana ini, akan pernah ditemukan di alam. Di alam bebas, gen-gen lebih memilih salinannya sendiri melalui label-label yang kalah spesifik, tetapi lebih mungkin, dari janggut hijau. Kekerabatan hanyalah salah satu dari label semacam itu. ‘Saudara’ atau, pada praktiknya, hal seperti ‘ia yang baru menetas di sarang tempatku tumbuh dewasa’, adalah label statistis. Gen yang membuat individu-individu berperilaku altruistik terhadap pengemban label semacam itu memiliki peluang statistis yang baik untuk membantu salinan dirinya sendiri: karena saudara secara statistis lebih berpeluang memiliki gen yang sama. Teori seleksi kekerabatan Hamilton dapat dilihat sebagai salah satu kondisi yang memungkinkan jenis efek janggut hijau terwujud. Omong-omong, tetap ingat bahwa tidak ada maksud untuk mengatakan bahwa gen itu memang ‘mau’ membantu salinan dirinya sendiri. Maksudnya di sini: gen-gen yang kebetulan memiliki *efek* membantu salinan dirinya sendiri akan cenderung, secara sembarang, menjadi lebih banyak di dalam populasinya.

Karena itu, kekerabatan dapat dilihat sebagai satu kondisi yang memungkinkan hal seperti efek janggut hijau terjadi. Teori seleksi seksual Fisher dapat dijelaskan sebagai satu kondisi lain yang memungkinkan terwujudnya efek janggut hijau. Ketika para betina di dalam suatu populasi memiliki preferensi kuat untuk karakteristik jantan tertentu, maka, dengan garis penalaran yang sudah kita lalui tadi, tiap tubuh jantan akan cenderung mengandung salinan gen-gen yang

membuat betina lebih menyukai karakteristiknya sendiri. Jika seekor jantan telah mewarisi ekor panjang dari ayahnya, kemungkinan ia juga telah mewarisi dari ibunya gen-gen yang membuat si ibu memilih ekor panjang ayahnya. Jika si jantan ini berekor pendek, kemungkinan tubuhnya mengandung gen-gen untuk membuat betina lebih menyukai ekor pendek. Jadi, ketika seekor betina memilih pejantannya, yang mana pun preferensinya, kemungkinan gen-gen yang memengaruhi pilihannya itu *tengah memilih salinannya sendiri* di dalam tubuh si jantan. Mereka memilih salinannya sendiri menggunakan panjang ekor jantan sebagai labelnya, dengan versi cara yang lebih rumit dari cara gen janggut hijau hipotetis menggunakan janggut hijau sebagai labelnya.

Kalau setengah dari seluruh betina di dalam populasi itu lebih menyukai jantan berekor panjang, dan setengahnya lagi lebih menyukai jantan berekor pendek, gen-gen untuk pilihan betina tetap akan memilih salinan dirinya sendiri, tetapi tidak akan ada kecenderungan bahwa salah satu dari keduanya lebih dipilih secara umum. Mungkin populasi itu akan cenderung terbelah dua – faksi yang lebih suka ekor panjang, dan faksi yang lebih suka ekor pendek. Tapi terbelahnya ‘opini’ burung betina seperti ini merupakan keadaan yang tidak stabil. Begitu mayoritas, *seberapa pun tipisnya*, mulai terbentuk di antara para betina untuk lebih condong pada satu jenis preferensi ketimbang yang lain, mayoritas itu akan menguat pada generasi-generasi selanjutnya. Ini karena para jantan yang lebih disukai oleh betina dari kelompok opini minoritas akan lebih sulit mendapatkan pasangan kawin; dan betina dari kelompok opini minoritas ini akan memiliki anak-anak jantan yang relatif lebih sukar mendapatkan pasangan kawin, sehingga betina minoritas ini akan memiliki lebih sedikit cucu. Begitu minoritas kecil cenderung mengecil, dan mayoritas kecil cenderung membesar, kita sudah mendapatkan resep untuk umpan balik positif: ‘Karena setiap orang yang mempunyai, kepadanya akan diberi, sehingga ia berkelimpahan. Tetapi siapa yang tidak mempunyai, apa pun juga yang ada padanya akan diambil dari padanya.’ Begitu keseimbangannya menjadi gamang, awalan yang manasuka dan acak akan menguat sendiri. Seperti saat kita menebang pohon, kita mungkin tidak tahu pasti arah jatuhnya pohon, ke utara atau ke selatan; tetapi, setelah bergeming sesaat, begitu batang pohon mulai jatuh ke satu arah atau arah lainnya, tak ada yang dapat menahan lajunya.

Ikat lebih erat sepatu panjat gunung kita, dan bersiaplah mendaki lebih tinggi. Ingat bahwa seleksi oleh burung betina itu menarik ekor burung jantan ke satu arah, sementara seleksi ‘atas dasar asas manfaat’ menariknya ke arah lain (‘menarik’ dalam konteks makna evolusi, tentunya), dan panjang ekor rata-rata merupakan kompromi antara dua tarikan ini. Sekarang kita lihat satu kuantitas yang disebut ‘selisih pilihan’. Selisih pilihan adalah perbedaan antara panjang ekor rata-rata aktual dari burung jantan di populasi tersebut, dan panjang ekor ‘ideal’ yang benar-benar lebih disukai oleh rata-rata burung betina di populasi tersebut. Satuan-satuan ukur bagi selisih pilihan ini bersifat manasuka, sama seperti satuan ukur suhu Fahrenheit dan Celsius yang juga manasuka. Seperti skala Celsius yang merasa ‘nyaman’ meletakkan titik nolnya pada titik beku air, kita pun merasa ‘nyaman’ meletakkan angka nol kita pada titik setimbang antara tarikan seleksi seksual dan tarikan seleksi atas dasar asas manfaat. Dengan kata lain, selisih pilihan bernilai nol berarti perubahan evolusi berhenti karena kedua jenis seleksi yang berlawanan ini sama kuat.

Tentu, makin besar nilai selisih pilihan, makin kuat ‘tarikan’ evolusi dikerahkan oleh burung betina melawan tarikan seleksi alam atas dasar asas manfaat. Yang ingin kita perhatikan bukanlah nilai mutlak selisih pilihan pada suatu waktu tertentu, tetapi seperti apa selisih pilihan ini *berubah* dari generasi ke generasi. Sebagai akibat dari nilai selisih pilihan tertentu, ekor

bertambah panjang, dan pada saat yang sama (ingat bahwa gen-gen untuk memilih ekor panjang juga tengah dipilih bersamaan dengan gen-gen yang membuat ekor panjang), ukuran ekor ideal yang lebih disukai burung betina pun bertambah. Setelah satu generasi seleksi rangkap ini, panjang ekor rata-rata dan preferensi rata-rata panjang ekor pun bertambah, tapi mana yang paling meningkat jumlahnya? Dengan kata lain, kita bertanya: apa yang akan terjadi dengan selisih pilihannya?

Selisih pilihannya bisa saja tetap sama (kalau panjang ekor rata-rata dan preferensi rata-rata panjang ekor sama-sama naik dengan jumlah yang sama). Bisa juga bertambah kecil (kalau panjang ekor rata-rata lebih meningkat dibanding rata-rata panjang ekor yang lebih disukai). Atau, akhirnya, bisa bertambah besar (kalau panjang ekor rata-rata tetap meningkat, tetapi preferensi rata-rata panjang ekor meningkat lebih tinggi lagi). Anda bisa mulai melihat bahwa, kalau nilai selisih pilihan mengecil sementara ekor makin panjang, panjang ekor akan berevolusi ke arah panjang setimbang yang stabil. Tetapi kalau nilai selisih pilihan *membesar* sementara ekor makin panjang, secara teoretis ekor generasi-generasi masa depan akan melejit makin panjang dengan kecepatan yang terus meningkat. Tidak diragukan lagi, inilah yang telah dihitung Fisher sebelum tahun 1930, kendati kata-kata singkat di dalam bukunya tidak dipahami dengan jernih oleh orang lain saat itu.

Terlebih dahulu, mari kita lihat kasus mengecilnya selisih pilihan dari generasi ke generasi. Lambat-laun nilainya akan menjadi begitu kecil sehingga tarikan preferensi betina ke satu arah akan dilawan dengan kekuatan yang sama persis oleh seleksi berdasarkan asas manfaat ke arah lain. Kemudian, perubahan evolusi mandek, dan sistemnya pun disebut berada dalam keadaan setimbang. Hal menarik yang dibuktikan Lande adalah bahwa, setidaknya pada kondisi-kondisi tertentu, titik kesetimbangannya tidak hanya satu, tapi banyak (secara teoretis, bilangan tak berhingga yang disusun di atas garis lurus pada sebuah grafik, ya begitulah matematika!) Titik keseimbangannya tidak hanya satu, tapi banyak: untuk setiap kekuatan tarikan atas dasar asas manfaat ke satu arah, kekuatan preferensi betina berevolusi sedemikian rupa hingga mencapai suatu titik yang setimbang dengannya.

Jadi, jika kondisi-kondisinya membuat selisih pilihan cenderung mengecil dari generasi ke generasi, populasinya akan berhenti di titik 'terdekat' dengan titik setimbang. Di sini tarikan seleksi atas dasar asas manfaat ke satu arah akan dilawan sama kuat oleh tarikan seleksi betina ke arah lain, dan ekor jantan akan tetap sama panjangnya, berapa pun itu. Pembaca mungkin mengetahui bahwa ada sistem umpan balik negatif terjadi di sini, tetapi sistem umpan balik negatif yang agak ganjil. Anda selalu bisa mengenali sistem umpan balik negatif dengan melihat apa yang terjadi jika Anda 'mengganggu' titik idealnya, 'titik bakunya'. Kalau Anda mengganggu suhu ruangan dengan membuka jendela, misalnya, termostat akan merespons dengan menaikkan suhu pemanas sebagai penyeimbangannya.

Bagaimana sistem seleksi seksual dapat diganggu? Ingat bahwa skala waktu yang kita bahas adalah skala waktu evolusi. Sulit bagi kita untuk melakukan eksperimennya (yang sepadan dengan contoh membuka jendela tadi), dan tetap hidup untuk menyaksikan hasilnya. Tapi sudah pasti, di alam, sistem ini kerap diganggu, misalnya oleh fluktuasi spontan dan acak dalam jumlah jantan akibat peristiwa-peristiwa kebetulan, yang mujur maupun nahas. Bilamana ini terjadi, dengan kondisi-kondisi yang sudah kita bahas sejauh ini, kombinasi seleksi atas dasar asas manfaat dan seleksi seksual akan mengembalikan populasi ke titik terdekat dengan titik baku kesetimbangannya. Titik ini mungkin *tidak* akan sama dengan titik kesetimbangan yang sebelumnya, tetapi sedikit lebih tinggi, atau lebih rendah, di sepanjang garis titik-titik

kesetimbangan. Maka, seiring berjalannya waktu, populasi dapat naik atau turun di garis titik-titik kesetimbangan. Naik berarti ekornya bertambah panjang – secara teoretis, tidak ada batas berapa panjang. Turun berarti ekornya bertambah pendek – secara teoretis, bisa turun sampai nol.

Analogi termostat sering dipakai untuk menjelaskan gagasan titik kesetimbangan. Analogi ini dapat kita kembangkan untuk menjelaskan gagasan yang lebih sulit: sebuah *garis* dari beberapa kesetimbangan. Misalkan sebuah ruangan memiliki alat pemanas dan penyejuk, yang masing-masing memiliki termostatnya sendiri. Kedua termostat itu diatur untuk menjaga suhu ruangan tetap pada 70 derajat F. Jika suhu turun ke bawah 70, pemanas menyala dan penyejuk mati. Jika suhu naik ke atas 70, penyejuk menyala dan pemanas mati. Analog ekor burung Sakabula bukanlah suhu (yang tetap kira-kira konstan pada 70°), tetapi total kecepatan konsumsi listrik. Poinnya adalah ada banyak cara agar suhu yang diinginkan itu dapat tercapai. Bisa dicapai dengan kedua perangkat yang sama-sama bekerja keras, pemanas menyemburkan udara panas dan penyejuk berupaya menetralkan panasnya. Atau bisa dicapai dengan pemanas yang mengembuskan lebih sedikit udara panas, dan penyejuk mengikutinya dengan upaya penetralan yang lebih ringan. Atau bisa dicapai dengan kedua perangkat yang sama-sama hampir tidak beroperasi. Barang tentu, skenario terakhir merupakan solusi yang paling diinginkan jika ditinjau dari sudut pandang tagihan listrik tetapi, selama tujuan pokoknya mempertahankan suhu tetap 70 derajat, yang mana pun dari aneka kecepatan kerja ini akan sama-sama memuaskan. Alih-alih satu titik saja, yang ada adalah sebuah *garis* berisi titik-titik kesetimbangan. Tergantung pada perincian cara pemasangan sistemnya, tergantung tundaan pada sistem dan hal-hal lain yang menjadi perhatian para teknisi, secara teoretis kecepatan konsumsi listrik ruangan itu dapat naik dan turun di garis titik-titik kesetimbangan, sementara suhu ruangnya tetap sama. Kalau diganggu sehingga turun sedikit ke bawah 70 derajat, suhu ruangan akan kembali, tetapi tidak lantas kembali ke kombinasi kecepatan kerja pemanas dan penyejuk yang sama. Ia akan kembali ke titik lain di garis kesetimbangan itu.

Dalam istilah teknik praktis, cukup sulit untuk mengatur ruangan sehingga garis kesetimbangan sejati dapat terbentuk. Garis ini, pada praktiknya, kemungkinan ‘jatuh ke satu titik’. Argumen Russell Lande tentang garis kesetimbangan seleksi seksual pun berdasar pada asumsi-asumsi yang mungkin saja tidak terjadi di alam nyata. Argumen ini mengasumsikan, misalnya, bahwa akan ada pasokan mutasi baru yang ajek. Argumen ini mengasumsikan bahwa tindakan memilih, oleh betina, sepenuhnya bebas biaya. Kalau asumsi ini dilanggar, dan bisa saja begitu, ‘garis’ kesetimbangan akan jatuh ke satu titik keseimbangan saja. Tapi bagaimanapun juga, sejauh ini kita baru membahas kasus makin *mengecilnya* selisih pilihan seiring berjalannya generasi-generasi seleksi. Pada kondisi-kondisi lain, selisih pilihan dapat membesar.

Sudah cukup lama kita tinggalkan pembahasan ini. Jadi, mari kita ingat lagi apa artinya. Ada populasi yang para pejanteranya menjalani evolusi ciri tertentu seperti panjang ekor pada burung Sakabula, dengan pengaruh preferensi betina yang cenderung membuat ekor bertambah panjang dan seleksi atas dasar asas manfaat yang cenderung membuat ekor bertambah pendek. Alasan munculnya momentum dalam evolusi menuju ekor yang lebih panjang adalah karena, setiap kali seekor betina memilih seekor jantan dari tipe yang ‘disukai’nya, si betina, akibat asosiasi nonacak dari gen-gennya, tengah memilih salinan gen-gen yang sama yang membuatnya memilih tipe jantan tersebut. Jadi, dalam generasi berikutnya, yang terjadi bukan hanya si jantan cenderung memiliki ekor lebih panjang, tetapi si betina cenderung makin kuat preferensinya terhadap ekor panjang. Tidak jelas mana dari kedua proses bertahap ini yang paling cepat pada setiap generasi. Sejauh ini kita telah menimbang kasus panjang ekor bertambah lebih cepat, per

generasi, dari preferensi. Sekarang saatnya kita timbang kasus lain yang juga mungkin terjadi: preferensi meningkat dengan kecepatan yang lebih tinggi, per generasi, dibanding panjang ekor itu sendiri. Dengan kata lain, kita sekarang akan membahas kasus membesarnya nilai selisih pilihan seiring berjalannya generasi, bukan mengecil seperti di paragraf-paragraf sebelumnya.

Di sini konsekuensi teoretisnya bahkan lebih garib lagi dari yang sebelumnya. Alih-alih umpan balik negatif, yang ada umpan balik positif. Dari generasi ke generasi, ekor bertambah panjang, tetapi hasrat burung betina terhadap ekor panjang meningkat dengan kecepatan yang lebih tinggi. Ini berarti bahwa, secara teoretis, ekor tetap bertambah panjang, dan dengan kecepatan yang makin kencang seiring generasi berganti. Secara teoretis, ekor akan terus memanjang sekalipun sudah sepanjang 10 mil. Tentu pada praktiknya, aturan main ini akan telah berubah jauh sebelum panjang yang absurd ini tercapai, persis seperti mesin uap dengan pengatur Watt yang sudah dibalik fungsinya itu tidak akan *benar-benar* melaju hingga satu juta putaran per detik. Tapi walaupun kita harus melemahkan kesimpulan dari model matematis ini ketika tiba pada titik-titik ekstremnya, kesimpulan-kesimpulan model tersebut tetap dapat berlaku di berbagai kondisi yang secara praktis mungkin terjadi.

Terlambat 50 tahun, kita akhirnya memahami apa maksud Fisher, ketika dengan berani ia menyatakan bahwa ‘mudah membayangkan bahwa kecepatan perkembangan itu akan proporsional dengan perkembangan yang telah diperoleh, yang karenanya akan meningkat secara eksponensial seiring waktu, atau dalam gerak maju yang geometris’. Penalarannya jelas sama dengan Lande, ketika ia berkata: ‘Dua ciri yang dipengaruhi proses semacam itu, yakni perkembangan bulu burung jantan, dan preferensi seksual burung betina atas perkembangan tersebut, pastilah berjalan beriringan dan, selama tidak dilawan kuat oleh kontraseleksi, prosesnya akan terus maju dengan kecepatan yang naik melulu.’

Fakta bahwa Fisher dan Lande, dengan penalaran matematis, sama-sama sampai pada kesimpulan menarik yang sama tidak berarti bahwa teori mereka merupakan cerminan yang tepat atas kejadian sebenarnya di alam. Bisa jadi, seperti telah dikatakan ahli genetika dari Universitas Cambridge Peter O’Donald, salah satu otoritas terkemuka dalam teori seleksi seksual, bahwa ciri tak terkendali dari model Lande sudah ‘tertanam pada’ asumsi awalnya, sedemikian rupa sehingga tidak bisa tidak muncul pada kesimpulan penalaran matematisnya, dengan cara yang agak membosankan. Beberapa teoretikus, termasuk Alan Grafen dan W. D. Hamilton, lebih menyukai jenis-jenis teori alternatif yang di dalamnya pilihan dibuat oleh betina benar-benar memberi efek bermanfaat pada keturunannya, secara asas manfaat dan eugenis. Teori yang sama-sama mereka kerjakan adalah burung-burung betina bertindak sebagai dokter yang melakukan diagnosis, yang menyortir para pejantan yang lebih kebal parasit. Bulu berwarna cerah, menurut teori Hamilton yang secara karakteristik cemerlang ini, adalah cara burung jantan mengiklankan tubuh sehatnya.

Pentingnya parasit secara teoretis akan terlalu panjang untuk dijelaskan selengkapnya. Ringkasnya, masalah yang ada pada semua teori ‘eugenis’ pilihan betina adalah sebagai berikut. Kalau para betina benar-benar bisa berhasil memilih pejantan dengan gen-gen terbaik, kesuksesan itu akan menyempitkan kisaran pilihan yang tersedia ke depannya: akhirnya, kalau yang ada hanyalah gen-gen yang baik, maka tidak ada gunanya lagi untuk memilih. Parasit menyingkirkan penolakan teoretis ini. Alasannya adalah karena, menurut Hamilton, parasit dan inang selalu terlibat dalam perlombaan senjata *siklis* yang tidak pernah berhenti. Ini kemudian berarti bahwa gen-gen ‘terbaik’ di satu generasi burung tidak akan sama dengan gen-gen terbaik di generasi-generasi berikutnya. Kemampuan mengalahkan generasi parasit saat ini tidak akan

cukup untuk melawan generasi parasit berikutnya yang telah berevolusi. Oleh karena itu, akan selalu ada burung-burung jantan yang kebetulan secara genetik lebih mumpuni dari yang lain untuk mengalahkan kelompok parasit segenerasinya. Oleh karena itu, burung-burung betina selalu bisa menguntungkan keturunan mereka dengan memilih yang paling sehat dari generasi burung jantan terkini. Satu-satunya kriteria *umum* yang bisa dipakai generasi-generasi beruntun burung betina untuk memilih jantan yang sehat adalah indikator-indikator yang bisa juga dipakai oleh dokter hewan – mata jernih, bulu mengkilap, dan seterusnya. Hanya burung jantan yang sehat sejetiliah yang dapat menunjukkan gejala-gejala kesehatan ini. Oleh karena itu, seleksi alam memilih burung-burung jantan yang menampilkannya secara utuh, dan bahkan melebihi-lebihkannya menjadi bentuk ekor yang panjang dan menghampar seperti kipas.

Tapi teori parasit, kendati boleh jadi benar, bukan poin dari bab ‘ledakan’ saya ini. Kembali ke teori tak terkendali Fisher/Lande, yang sekarang dibutuhkan adalah bukti dari hewan-hewan sungguhan. Bagaimana kita mencari bukti semacam itu? Metode apa yang bisa dipakai? Satu pendekatan yang cukup meyakinkan dikerjakan oleh Malte Andersson, dari Swedia. Kebetulan, ia meneliti burung yang sama dengan yang saya contohkan di sini untuk membahas ide-ide teoretis ini, burung *Sakabula* jantan, dan ia mempelajari burung ini di habitat alaminya di Kenya. Eksperimen-eksperimen Andersson jadi mungkin dilakukan karena kemajuan teknologi terkini: lem super. Berikut ini garis nalarinya. Kalau benar bahwa panjang ekor aktual burung jantan merupakan kompromi antara ukuran optimal secara asas manfaat di satu sisi dan preferensi aktual burung betina di sisi lain, semestinya seekor burung jantan dapat dibuat super-menarik dengan memberikannya ekor yang ekstra panjang. Di titik inilah lem super itu jadi jawaban. Saya akan gambarkan eksperimen Andersson dengan ringkas, karena eksperimen ini merupakan contoh rancangan eksperimental yang jitu.

Andersson menangkap 36 burung *Sakabula* jantan, dan membaginya menjadi sembilan kelompok yang masing-masing berisi empat ekor. Tiap kelompok ini diperlakukan sama. Satu anggota dari tiap kelompok berisi empat ekor burung ini (yang dengan cermat dipilih acak untuk menghindari bias yang tak disadari) dipangkas ekornya hingga 14 sentimeter. Bagian yang dipangkas ini kemudian ditempelkan, dengan lem super, ke ujung ekor anggota kedua dari kelompok tersebut. Jadi, burung yang pertama memiliki ekor sengaja dipendekkan, burung yang kedua memiliki ekor panjang buatan. Untuk perbandingan, ekor burung ketiga dibiarkan apa adanya. Ekor burung keempat juga dibiarkan tetap sama panjang, tapi tidak apa adanya. Alih-alih, ujung-ujung bulu ekornya itu dipotong kemudian dilem kembali. Mungkin tampak tidak jelas gunanya, tetapi ini contoh baik yang menunjukkan betapa Anda harus teliti dalam merancang eksperimen. Bisa jadi fakta bahwa bulu-bulu ekornya telah dimanipulasi, atau fakta bahwa burung itu ditangkap dan telah kena campur tangan manusia, itulah yang memengaruhi burung tersebut, bukan perubahan panjang ekor itu sendiri. Kelompok 4 merupakan kelompok ‘kontrol’ untuk efek-efek semacam itu.

Tujuannya adalah membandingkan keberhasilan kawin tiap burung dengan rekan-rekan sekelompoknya yang telah menerima perlakuan berbeda-beda. Setelah masing-masing burung menerima satu dari empat perlakuan tersebut, mereka semua dibiarkan kembali ke kediaman di wilayah kekuasaannya masing-masing. Di situ mereka melanjutkan urusan rutin menarik perhatian burung-burung betina ke wilayahnya, untuk kawin, membangun sangkar dan bertelur. Pertanyaannya: anggota yang mana dari tiap kelompok berisi empat ekor burung ini yang paling berhasil memikat burung betina? Andersson mengukurnya, bukan dengan mengamati burung betina, tetapi dengan menunggu kemudian menghitung jumlah sarang yang ada telurnya di tiap

wilayah kekuasaan burung jantan. Temuannya: burung-burung jantan yang ekornya diperpanjang dengan bantuan lem tadi memikat burung-burung betina hampir empat kali lipat lebih banyak dari para pejantan yang ekornya dipangkas. Burung-burung dengan panjang ekor normal dan alami memiliki tingkat keberhasilan menengah.

Hasil-hasil ini ditelaah secara statistis, untuk menguji kalau-kalau hasil-hasil ini kebetulan semata. Kesimpulannya: kalau memikat betina adalah satu-satunya kriteria yang ada, burung jantan lebih baik kalau berekor lebih panjang dari ekor mereka yang sebetulnya. Dengan kata lain, seleksi seksual terus-menerus menarik ekor (dalam arti evolusi) ke arah lebih panjang. Fakta bahwa ekor-ekor asli lebih pendek dari yang lebih disukai burung betina menunjukkan bahwa pastilah ada tekanan seleksi lain yang menjaganya tetap lebih pendek. Seleksi 'asas manfaat' adalah tekanan tersebut. Agaknya burung-burung jantan dengan ekor yang amat panjang lebih cepat mati dari pejantan dengan ukuran ekor rata-rata. Sayangnya, Andersson tidak sempat mengikuti kelanjutan nasib burung-burung jantan yang telah diutak-atiknya itu. Kalau sempat, prediksinya adalah bahwa burung-burung jantan dengan tempelan bulu ekor ekstra semestinya, secara purata, mati lebih cepat dibanding pejantan normal, mungkin karena lebih rentan terhadap pemangsa. Di lain pihak, burung-burung jantan dengan ekor yang dipangkas, semestinya lebih panjang usia dibanding pejantan normal. Ini karena panjang normal dianggap sebagai kompromi antara ukuran optimal seleksi seksual dan ukuran optimal atas dasar asas manfaat. Kiranya burung-burung dengan ekor yang dipangkas itu lebih dekat dengan ukuran optimal atas dasar asas manfaat dan, maka dari itu, semestinya berusia lebih panjang. Akan tetapi, ada banyak dugaan dalam semua penjelasan ini. Kalau kerugian utama atas dasar asas manfaat dari ekor panjang ternyata adalah biaya ekonomi untuk menumbuhkannya, bukan meningkatnya bahaya kematian setelah ekor itu tumbuh, burung-burung jantan yang diberikan panjang ekor ekstra, sebagai kado gratis dari Andersson, agaknya tidak akan terlalu cepat mati sebagai akibatnya.

Sejauh ini saya menulis seolah preferensi betina akan cenderung menyeret ekor dan ornamen-ornamen lainnya ke arah membesar. Seperti kita lihat tadi, pada teorinya, tidak ada alasan bagi preferensi betina untuk tidak menarik ke arah yang berlawanan, misalnya ke arah ekor yang makin pendek, bukan makin panjang. Gelatik biasa memiliki ekor yang begitu pendek dan buntet sehingga orang bertanya-tanya apakah mungkin ekor itu memang lebih pendek dari yang 'semestinya' semata-mata demi mengejar tujuan atas dasar asas manfaat. Persaingan di antara burung-burung gelatik jantan begitu sengit, seperti yang mungkin bisa Anda duga dari kelantangan nyanyian mereka yang tidak proporsional. Nyanyian semacam itu mahal harganya, dan pernah ada seekor gelatik jantan yang bernyanyi sampai mati. Pejantan yang sukses memiliki lebih dari satu betina di wilayah kekuasaannya, seperti burung Sakabula. Dalam iklim persaingan yang begitu pekat ini, kita boleh menduga umpan balik positif dapat berlangsung. Mungkinkah ekor pendek gelatik merupakan produk akhir dari proses penyusutan evolusioner yang tak terkendali?

Terlepas dari gelatik, ekor kipas merak, dan ekor Sakabula jantan dan cenderawasih, yang terlalu mencolok mewahnya, amat mungkin dianggap sebagai produk-produk akhir evolusi yang meledak dan memuntir akibat umpan balik positif. Fisher dan para penerus modernnya telah menunjukkan kepada kita seperti apa kemungkinan kejadiannya. Apakah gagasan ini secara khusus terikat pada seleksi seksual saja, atau bisakah kita menemukan analogi-analogi meyakinkan pada jenis-jenis evolusi lainnya? Pertanyaan ini patut diajukan, karena ada aspek-aspek dari evolusi kita sendiri yang cukup menunjukkan bahwa hal eksplosif telah terjadi

padanya, khususnya dalam hal begitu cepatnya otak kita membesar dalam beberapa juta tahun terakhir. Telah dikemukakan bahwa hal ini terjadi akibat seleksi seksual itu sendiri, kecerdasan otak (atau manifestasi kecerdasan otak, seperti kemampuan mengingat langkah-langkah sebuah tarian ritual yang panjang lagi rumit) menjadi ciri yang diinginkan secara seksual. Tapi bisa juga ukuran otak meledak akibat pengaruh jenis seleksi yang lain, yang analog tapi tidak identik dengan seleksi seksual. Kiranya patut kita membedakan dua tingkat analogi yang mungkin bagi seleksi seksual, analogi lemah dan analogi kuat.

Analogi lemah begini saja nalarnya. Setiap proses evolusi yang produk akhir dari satu langkahnya merupakan tumpuan untuk langkah berikutnya dalam evolusi kemungkinan bersifat progresif, kadang secara eksplosif. Kita sudah menjumpai gagasan ini di bab sebelumnya, dalam bentuk ‘perlombaan senjata’. Tiap peningkatan evolusioner dalam rancangan pemangsa mengubah tekanan seleksi pada mangsanya, yang membuat mangsa makin lihai mengelak dari terkaman pemangsa. Hal ini, pada gilirannya, kembali menekan pemangsa untuk ikut berkembang juga. Proses ini kemudian terus bergerak naik secara memuntir. Seperti sudah kita lihat, sebagai akibat dari proses ini, pemangsa maupun mangsa belum tentu menikmati tingkat keberhasilan yang lebih tinggi, karena musuh-musuh mereka berkembang pada saat yang sama. Akan tetapi, mangsa maupun pemangsa sama-sama menjadi lebih *mumpuni* secara progresif. Inilah analogi lemah untuk seleksi seksual. Analogi kuat untuk seleksi seksual mencatat bahwa esensi dari teori Fisher/Lande adalah fenomena serupa ‘janggut hijau’ di mana gen-gen untuk pilihan betina secara otomatis cenderung memilih salinan *dirinya sendiri*, suatu proses dengan kecenderungan otomatis untuk menjadi eksplosif. Tidak jelas apakah ada contoh-contoh untuk fenomena sejenis ini selain seleksi seksual itu sendiri.

Saya curiga tempat yang cocok untuk mencari analogi-analogi bagi evolusi eksplosif semacam seleksi seksual adalah evolusi kebudayaan manusia. Ini karena, lagi-lagi, pilihan berdasarkan selera itu penting, dan pilihan semacam itu tunduk pada efek ‘tren gaya’ atau ‘mayoritas selalu menang’. Sekali lagi, peringatan yang saya pampang di awal bab ini perlu diindahkan. ‘Evolusi’ kebudayaan sama sekali bukan evolusi kalau kita pedantis dan puris dengan penggunaan kata-kata, tetapi terdapat cukup persamaan di antara keduanya untuk menjustifikasi perbandingan beberapa prinsipnya. Dalam melakukan hal ini, kita tidak boleh menganggap enteng perbedaannya. Mari kita urus perkara-perkara ini sebelum kembali ke persoalan puntiran eksplosif.

Sudah kerap dikemukakan – dan siapa saja pasti dapat melihatnya – bahwa ada yang kuasi evolusioner dalam banyak aspek sejarah manusia. Kalau Anda mengambil suatu aspek tertentu dari kehidupan manusia pada interval-interval berkala sebagai sampel, katakanlah Anda menyampel tataran pengetahuan ilmiah, jenis musik yang digubah, gaya busana, atau kendaraan angkut, pada interval-interval selama satu abad atau mungkin satu dasawarsa, Anda akan menemukan *tren*. Kalau ada tiga penyampelan, rentetan waktu A, B, dan C, maka, mengatakan bahwa ada tren sama dengan mengatakan bahwa ukuran yang diambil di waktu B akan menjadi peralihan antara ukuran yang diambil di waktu A dan C. Walaupun ada pengecualian, setiap orang akan sepakat bahwa tren-tren semacam ini mencirikan banyak aspek kehidupan beradab. Diakui, arah tren kadang berbalik (contohnya, ukuran panjang rok), tapi ini pun terjadi pada evolusi genetik.

Banyak tren, khususnya tren-tren dalam teknologi yang bermanfaat, bukan gaya yang sembrono, dapat dikenali, tanpa banyak perbantahan mengenai penakaran nilainya, sebagai *peningkatan*. Tidak diragukan, misalnya, bahwa kendaraan untuk menjelajahi dunia ini telah meningkat mantap tanpa pembalikan arah, selama 200 tahun terakhir, dari kendaraan yang ditarik kuda ke kendaraan bertenaga uap, dan memuncak kini dalam bentuk pesawat supersonik. Kata peningkatan saya gunakan secara netral. Saya tidak bermaksud bahwa setiap orang akan sepakat bahwa kualitas hidup manusia telah meningkat sebagai hasil dari perubahan-perubahan ini; saya sendiri sering meragukannya. Tidak pula saya bermaksud menyangkal pandangan umum bahwa standar keterampilan kerja telah *menurun* karena produksi massal telah menggantikan para pengrajin terampil. Tapi melihat alat transportasi murni dari sudut pandang *transportasi*, yang berarti bergerak dari satu bagian dunia ke bagian dunia lain, tidak akan ada perdebatan bahwa tren historisnya mengarah ke suatu peningkatan, sekalipun hanya dalam hal kecepatan. Begitu pula, selama kurun waktu beberapa dasawarsa atau bahkan tahun, ada peningkatan progresif pada mutu peralatan amplifikasi suara *high-fidelity* yang tidak dapat disangkal, sekalipun Anda bersepakat dengan saya bahwa kadang dunia ini akan menjadi tempat yang lebih nyaman kalau saja amplifier tidak pernah ditemukan. Yang berubah bukan selera, tetapi fakta objektif dan terukur bahwa mutu kesetiaan (*fidelity*) reproduksi sekarang lebih baik jika dibanding dengan tahun 1950, dan di tahun 1950 lebih baik jika dibanding dengan tahun 1920. Mutu reproduksi gambar, tanpa bisa disangkal, lebih baik pada pesawat televisi modern dibanding versi sebelumnya, kendati tentu hal yang sama mungkin tidak berlaku untuk mutu hiburan yang disiarkan. Mutu mesin pembunuh dalam perang menunjukkan tren dramatis menuju peningkatan – mampu membunuh lebih banyak manusia dengan lebih cepat dari tahun ke tahun. Anggapan bahwa hal ini bukan peningkatan terlalu jelas untuk dibahas lagi.

Tidak diragukan, dalam pengertian teknis yang sempit, segala sesuatu berkembang menjadi lebih baik seiring waktu. Tapi hal ini hanya berlaku dengan jelas untuk benda-benda yang bermanfaat secara teknis, seperti pesawat terbang dan komputer. Ada banyak aspek lain dari kehidupan manusia yang menunjukkan adanya tren, tetapi jelas bahwa tren ini bukan peningkatan. Bahasa jelas-jelas berevolusi. Trennya ada: bahasa makin beragam, dan dari abad ke abad setelah peragamannya ini penutur bahasa-bahasa tersebut makin tidak dapat saling mengerti. Sejumlah pulau di Pasifik akan menjadi bengkel lengkap untuk studi evolusi bahasa. Bahasa-bahasa di berbagai pulau tersebut jelas mirip satu sama lain, dan perbedaan-perbedaannya dapat diukur pasti dengan jumlah kata yang berbeda di antaranya, ukuran yang hampir analog dengan ukuran-ukuran taksonomi molekuler yang akan kita bahas di Bab 10 nanti. Perbedaan di antara bahasa-bahasa, yang diukur dalam jumlah kata yang berbeda, dapat disusun ke dalam alur grafik yang dibandingkan dengan jarak antarpulau, yang diukur dalam mil, dan ternyata titik-titik pada grafik tersebut membentuk kurva yang bentuk matematis pastinya mengindikasikan tingkat bauran dari pulau ke pulau. Kata-kata berkelana dengan perahu lesung, melompat dari pulau ke pulau pada selang-selang waktu yang proporsional dengan derajat keterpencilan pulau-pulau tersebut. Di dalam satu pulau, kata-kata berubah dengan kecepatan yang ajek, sangat mirip dengan cara gen sesekali bermutasi. Satu pulau, kalau terisolir betul, akan menunjukkan perubahan evolusioner bahasanya seiring waktu, dan karenanya makin terpecah dari bahasa-bahasa pulau-pulau lainnya. Pulau-pulau yang berdekatan tentu memiliki aliran baur kata yang lebih deras, melalui perahu lesung, dari pulau-pulau yang berjauhan. Bahasa-bahasa di sana juga memiliki leluhur bersama yang lebih kini dibanding bahasa-bahasa pulau-pulau yang terpisah jauh. Fenomena ini, yang menjelaskan pola teramati dari kemiripan antara pulau-pulau dekat dan jauh, merupakan analogi yang dekat dengan fakta-fakta tentang

burung-burung kutilang *finch* di berbagai pulau Kepulauan Galápagos yang menjadi inspirasi awal Charles Darwin. Gen-gen melompat pulau dalam tubuh-tubuh burung-burung itu, seperti kata-kata melompat pulau dalam perahu-perahu lesung.

Bahasa pun berevolusi. Tapi walaupun bahasa Inggris modern telah berevolusi dari bahasa Inggris Chaucerian, saya rasa tidak banyak orang yang ingin mengklaim bahwa bahasa Inggris modern merupakan peningkatan bahasa Inggris Chaucerian. Wacana peningkatan atau mutu biasanya tidak masuk ke benak kita saat berbicara soal bahasa. Malah, kalau masuk, sering kita melihat perubahan sebagai bentuk kemerosotan, sebagai penurunan. Kita cenderung melihat penggunaan lebih dahulu itu benar, dan perubahan terbaru itu korup. Tapi kita masih bisa mendeteksi tren-tren serupa evolusi yang bersifat progresif dalam pengertiannya yang murni abstrak dan bebas nilai. Dan kita bahkan dapat menemukan bukti umpan balik positif, dalam bentuk eskalasi (atau, kalau dilihat dari sudut lain, penurunan) dalam makna. Misalnya, kata bahasa Inggris *star* (bintang) dulu bermakna aktor film yang amat tersohor. Kemudian kata ini mengalami degenerasi makna, menjadi aktor biasa mana saja yang memainkan salah satu peran utama dalam sebuah film. Oleh karena itu, untuk menangkap kembali makna awalnya (pesohor kenamaan), kata tersebut harus dieskalasi menjadi *superstar*. Belakangan, publisitas studio film mulai menggunakan *superstar* untuk aktor-aktor yang belum banyak didengar orang, sehingga timbul lagi eskalasi ke kata *megastar*. Sekarang sudah ada beberapa *megastar* beken yang belum pernah didengar sebelumnya, setidaknya oleh saya, jadi mungkin kita perlu satu eskalasi lagi. Akankah nanti kata *hyperstar* kita dengar? Umpan balik positif serupa telah menyeret turun kualitas kata *chef*. Kata ini, tentunya, berasal dari bahasa Prancis *chef de cuisine*, yang berarti *chief* atau kepala dapur. Itulah makna yang diberikan dalam Kamus Oxford. Per definisinya, hanya bisa ada satu *chef* per dapur. Tapi mungkin untuk menaikkan harkatnya, koki (laki-laki) biasa, bahkan pembuat hamburger junior, mulai menyebut diri mereka *chef*. Akibatnya, sekarang frasa redundan *head chef* sering kita dengar!

Tapi kalau ini analogi untuk seleksi seksual, maksimal ia hanya mampu menjadi analogi dalam pengertian yang saya sebut ‘lemah’ tadi. Sekarang saya akan lompat langsung ke hal terdekat yang bisa saya bayangkan untuk analogi ‘kuat’: ke dunia rekaman musik ‘pop’. Kalau Anda mendengarkan diskusi di antara para pencinta musik pop, atau cuap-cuap penyiar di radio, Anda akan menemukan hal yang sangat ganjil. Sementara genre-genre kritik seni lain menyingkap keterpakuan pada gaya atau keterampilan pertunjukan, pada suasana, dampak emosi, pada kualitas dan ciri bentuk seni, sub-kultur musik ‘pop’ hampir-hampir secara eksklusif terpaku pada *popularitas itu sendiri*. Cukup jelas bahwa yang penting bagi musik itu bukan seperti apa kedengarannya, tapi *berapa banyak orang yang membelinya*. Seisi sub-kultur ini terobsesi dengan peringkat di tangga lagu, yang disebut Top 20 atau Top 40, yang semata-mata didasarkan pada angka penjualan saja. Hal penting yang dikejar pada satu album adalah di posisi mana dia bertengger di tangga lagu Top 20. Bila dipikir-pikir, ini fakta yang amat luar biasa, dan amat menarik kalau kita renungkan teori evolusi tak terkendali R. A. Fisher. Perhatikan juga bahwa penyiar radio jarang menyebutkan posisi terkini sebuah lagu di tangga lagu, tanpa menyebutkan posisinya di pekan lalu. Ini membuat pendengar dapat menilai bukan hanya popularitas terkini sebuah lagu tetapi juga kecepatan dan arah *perubahan* popularitasnya.

Tampaknya banyak orang membeli sebuah album semata-mata karena sejumlah besar orang lain (kemungkinan) membeli album yang sama. Bukti mengejutkan muncul dari fakta bahwa perusahaan-perusahaan rekaman ditengarai mengirimkan perwakilan mereka ke toko-toko penting untuk membeli sejumlah besar album rekaman mereka sendiri, untuk mendorong naik

angka penjualan ke zona ‘laris’. (Ini tidak sesulit kedengarannya, karena angka-angka Top 20 didasarkan pada keuntungan penjualan dari satu sampel kecil toko-toko kaset. Kalau Anda tahu mana saja toko-toko yang dijadikan sampel ini, Anda tidak harus membeli album sebanyak itu dari mereka untuk menetak dampak signifikan pada estimasi penjualan nasional. Ada juga cerita-cerita asli tentang pramuniaga di toko-toko kaset ini yang disuap.)

Pada tatarannya yang lebih ringan, fenomena yang sama tentang popularitas yang populer demi dirinya sendiri ini dikenal luas di dunia penerbitan buku, gaya busana wanita, dan periklanan secara umum. Salah satu hal terbaik yang bisa dikatakan seorang pengiklan tentang sebuah produk adalah produk itu jenis produk terlaris. Daftar-daftar buku terlaris diterbitkan setiap pekan, dan tidak diragukan lagi bahwa begitu sebuah buku terjual dalam jumlah eksemplar yang cukup untuk bisa masuk ke dalam salah satu dari daftar-daftar ini, penjualannya makin meningkat, semata-mata karena fakta itu saja. Penerbit menyatakan buku itu ‘mulai laris’, dan penerbit yang sedikit tahu tentang sains bahkan menyebut istilah ‘massa kritis untuk laris’. Analoginya di sini adalah bom atom. Uranium-235 itu stabil selama jumlahnya tidak terlalu banyak di satu tempat. Ada massa kritis yang, begitu terlampaui, membuat reaksi berantai atau proses tak terkendali dapat terjadi, dengan akibat yang mampu meluluh-lantakkan segala sesuatu. Bom atom mengandung dua gumpalan uranium-235, dan keduanya lebih kecil dari massa kritis. Ketika bom didetonasi, kedua gumpalan ini ditumbukkan, massa kritisnya terlampaui, dan berakhirlah riwayat sebuah kota maya. Ketika penjualan sebuah buku itu ‘mencapai titik kritis’, angka-angkanya sudah di titik di mana rekomendasi dari mulut ke mulut dan sebagainya dapat membuat penjualannya tiba-tiba melejit laris tak terkendali. Kecepatan penjualan tiba-tiba secara dramatis menjadi lebih besar dari sebelum titik massa kritis dicapai, dan mungkin ada kurun waktu pertumbuhan eksponensial sebelum penurunan tak terelakkan yang terjadi kemudian.

Fenomena yang mendasarinya tidak sulit dipahami. Pada dasarnya, ini contoh lain dari umpan balik positif. Kualitas asli sebuah buku, atau bahkan album musik pop, memang tidak dapat diabaikan dalam menentukan penjualannya tapi, begitu umpan balik positif mengintai, pasti muncul unsur manasuka yang begitu kuat dalam menentukan mana buku atau album yang berhasil, dan mana yang gagal. Kalau massa kritis dan melejit populer itu merupakan unsur-unsur penting dalam tiap kisah sukses, pasti ada sejumlah besar keberuntungan, dan ada banyak ruang untuk manipulasi dan eksploitasi oleh orang-orang yang memahami sistemnya. Pantas, misalnya, kalau Anda menggelontorkan sejumlah besar uang untuk mempromosikan buku atau album hingga ke titik ‘kritis’nya, karena kemudian Anda tidak perlu membelanjakan banyak uang untuk promosi setelahnya: umpan balik positif sudah mengambil alih tugas tersebut.

Umpan-umpan balik positif di sini memiliki kesamaan dengan umpan-umpan balik positif seleksi seksual menurut teori Fisher/Lande, tapi tetap ada bedanya. Merak betina yang lebih menyukai merak jantan berekor panjang dipilih semata-mata karena para betina *lainnya* memiliki preferensi yang sama. Kualitas si pejantan itu sendiri bersifat manasuka dan tidak relevan. Dalam konteks ini, penggemar musik yang menginginkan album tertentu hanya karena album itu menduduki posisi di Top 20 berperilaku persis seperti merak betina. Tapi mekanisme-mekanisme persis yang menjadi cara kerja umpan-umpan balik positif di kedua perkara ini berbeda. Dan, saya rasa, ini membawa kita kembali ke awal bab ini, dengan peringatan bahwa analogi boleh saja ditarik sampai jauh, tapi tidak terlalu jauh.

BAB 9

Menyela Kesenjangan Bersela

Anak-anak Israel, menurut kisah Keluaran, butuh waktu 40 tahun untuk menyeberangi padang pasir Sinai ke tanah yang dijanjikan. Jaraknya sekitar 322 km. Karena itu, kecepatan rata-rata mereka kira-kira 22 meter per hari, atau 0,9 meter per jam; atau katakanlah 2,7 meter per jam kalau pemberhentian malam hari tidak kita masukkan hitungan. Bagaimanapun cara menghitungnya, kita berhadapan dengan kecepatan rata-rata yang bukan main lambatnya, jauh lebih pelan dari hewan lambat kelambanan dalam peribahasa (keong, yang menurut *Guinness Book of Records*, punya rekor dunia 50,3 meter per jam). Tapi tentu saja, tidak ada orang yang benar-benar percaya bahwa kecepatan rata-rata ini terjaga ajek. Tentu saja bangsa Israel berjalan dalam kelang-kelang waktu tak beraturan, mungkin berkemah lama di suatu tempat sebelum melanjutkan perjalanan. Mungkin banyak dari anggota rombongan itu yang tidak mengerti betul bahwa mereka *berjalan* ke arah yang konsisten, dan mereka berkelok-kelok dari wahah ke wahah seperti yang biasa dilakukan para gembala di gurun. Saya ulangi, tidak ada orang yang benar-benar percaya bahwa kecepatan rata-rata ini terjaga ajek.

Tapi misalkan ada dua orang sejarawan fasih tampil ke atas panggung. Sejarah Alkitab sejauh ini, katanya, telah didominasi oleh mazhab ‘gradualistis’. Sejarawan ‘gradualis’, katanya, secara harfiah percaya bahwa bangsa Israel berjalan 22 meter per hari; mereka melipat tenda tiap pagi, menyeret kaki 22 meter ke arah timur-timur laut, kemudian berkemah lagi. Satu-satunya alternatif untuk ‘gradualisme’, katanya, adalah paham sejarah ‘bersela’ yang baru. Menurut kaum keberselaan muda yang radikal ini, bangsa Israel menghabiskan sebagian besar waktu mereka dalam keadaan ‘stasis’, tidak berpindah sama sekali, di satu tempat, seringkali hingga bertahun-tahun. Mereka kemudian melanjutkan perjalanan, agak cepat, ke perkemahan baru, tempat mereka kembali berdiam selama beberapa tahun. Laju langkah mereka menuju tanah yang dijanjikan itu bukan gradual dan malar, tapi tersentak-sentak: kurun panjang keadaan stasis yang disela kurun-kurun singkat pergerakan cepat. Lebih lagi, laju cepat pergerakan mereka tidak selalu ke arah tanah yang dijanjikan, tetapi ke arah yang hampir acak. Hanya ketika kita mengamati, setelah kejadian, skala besar pola *makromigrasi* merekalah baru kita bisa melihat tren ke arah tanah yang dijanjikan.

Demikianlah kefasihan retorika para sejarawan Alkitab dari mazhab keberselaan ini. Mereka pun menjadi sensasi media. Potret-potret mereka mempercantik sampul depan majalah-majalah berita beroplak besar. Acara-acara dokumenter televisi tentang sejarah Alkitab tidak lengkap kalau tidak menghadirkan wawancara dengan setidaknya satu tokoh keberselaan terkemuka. Orang yang tidak tahu hal lain mengenai kajian Alkitab hanya ingat satu fakta saja: bahwa di masa kegelapan sebelum kaum keberselaan melompat naik ke atas panggung, semua orang keliru. Perhatikan bahwa nilai publisitas dari kaum keberselaan ini tidak ada kaitannya dengan fakta bahwa perkataan mereka itu benar. Tapi erat kaitannya dengan dugaan bahwa semua otoritas pendahulu itu ‘gradualis’ dan keliru. Hal ini karena kaum keberselaan menyiarkan diri mereka sebagai kaum revolusioner sehingga mereka didengar, bukan karena mereka benar.

Cerita saya tentang para sejarawan Alkitab dari mazhab keberselaan ini, tentu saja, tidak benar-benar benar. Hanya perumpamaan untuk kontroversi yang seolah terjadi di antara para siswa evolusi biologis. Pada beberapa segi, perumpamaan ini tidak adil, tapi tidak sepenuhnya

tidak adil dan terdapat cukup kebenaran di dalamnya untuk membenarkan pengisahannya di awal bab ini. Di antara ahli-ahli biologi evolusi, ada satu paham yang amat tersohor, yang para pendukungnya menyebut diri mereka kaum keberselaan (*punctuationist*), dan mereka menciptakan istilah ‘gradualis’ untuk para pendahulu mereka yang paling berpengaruh. Mereka sangat populer di antara khalayak yang hampir tak tahu apa pun yang lain tentang evolusi, dan hal ini sebagian besar dikarenakan pemikiran mereka ditampilkan, oleh para wartawan dan bukan oleh mereka sendiri, berbeda secara radikal dari pemikiran-pemikiran kaum evolusionis sebelumnya, khususnya Charles Darwin. Sejauh ini, analogi injili saya masih adil.

Bagian yang membuat analogi saya tidak adil adalah bahwa dalam cerita para sejarawan Alkitab, ‘kaum gradualis’ itu *jelas-jelas* tidak ada, hanya rekaan kaum keberselaan semata. Dalam perkara ‘kaum gradualis’ evolusi, fakta bahwa mereka itu semu tidak jelas betul. Perlu diperagakan. Kata-kata Darwin dan banyak evolusionis lain bisa saja ditafsirkan bersifat gradualis secara maksud, tapi kemudian penting disadari bahwa kata *gradualis* dapat ditafsirkan berbeda-beda. Di sini saya akan menyusun sebuah tafsir dari kata *gradualis* yang menunjukkan bahwa hampir setiap orang itu gradualis. Dalam kasus evolusi, tidak seperti perumpamaan bangsa Israel tadi, memang ada kontroversi, tapi kontroversi ini hanyalah soal perincian-perincian kecil yang sama sekali tidak cukup penting untuk menjustifikasi sensasi media yang timbul karenanya.

Di antara kaum evolusionis, paham ‘keberselaan’ ini berpangkal dari kalangan paleontologi. Paleontologi adalah studi fosil. Studi ini merupakan cabang ilmu biologi yang amat penting, karena semua leluhur evolusioner sudah mati dahulu sekali dan fosil merupakan satu-satunya bukti langsung dari hewan dan tumbuhan yang hidup di masa lalu yang jauh itu. Kalau ingin tahu seperti apa rupa leluhur evolusioner kita, fosil adalah harapan utama. Begitu orang menyadari fosil itu apa (sebelumnya, fosil diklaim sebagai ciptaan iblis atau tulang-belulang para pendosa malang, yang ditenggelamkan air bah), menjadi jelas bahwa teori evolusi mana pun pasti memiliki ekspektasi tertentu tentang catatan fosil. Tapi sudah ada pembahasan tentang apa saja ekspektasi itu, dan inilah sebagian dari inti argumen paham keberselaan.

Kita beruntung karena punya fosil. Fakta geologi bahwa tulang, cangkang, dan bagian-bagian keras lain pada tubuh hewan, sebelum membusuk, kadang bisa meninggalkan bekas yang kemudian berlaku seperti cetakan, yang membentuk batuan yang sedang mengeras menjadi memori permanen bagi hewan tersebut, merupakan hal yang sangat menguntungkan. Kita tidak tahu berapa banyak dari jasad hewan yang terfosilkan setelah kematiannya – saya pribadi menganggap bisa menjadi fosil itu merupakan sebuah kehormatan – tapi tentu proporsinya kecil sekali. Akan tetapi, seberapa kecil pun proporsi jasad yang terfosilkan, ada hal-hal tertentu mengenai catatan fosil yang semestinya dianggap benar oleh evolusionis mana pun. Misalnya, kita akan sangat kaget kalau menemukan manusia fosil muncul di dalam catatan fosil bahkan sebelum mamalia berevolusi! Kalau muncul satu saja tengkorak mamalia yang diverifikasi benar dalam batu-batu berusia 500 juta tahun, seluruh teori evolusi modern akan hancur-lebur. Kebetulan, ini cukup menjadi jawaban atas desas-desus, yang diembuskan kaum kreasionis dan rekan pelancong jurnalis mereka, bahwa seluruh isi teori evolusi merupakan tautologi yang ‘tidak dapat difalsifikasi’. Ironisnya, ini jugalah alasan mengapa kaum kreasionis gemar sekali dengan jejak kaki manusia palsu, yang dipahat selama masa Depresi untuk mengelabui turis, di petelasan dinosaurus Texas.

Kalau fosil-fosil asli kita susun secara urut, dari tertua ke termuda, teori evolusi memperkirakan bahwa akan muncul semacam rangkaian yang rapi, bukan serakan yang kacau-

balau. Merujuk pada pokok bahasan bab ini, berbagai versi teori evolusi, misalnya ‘gradualisme’ dan ‘paham keberselaan’, mungkin memperkirakan munculnya jenis pola yang berbeda-beda. Perkiraan-perkiraan tersebut dapat diuji hanya jika kita punya cara *menanggali* fosil, atau setidaknya cara mengetahui urutan peletakannya. Masalah penanggalan fosil, dan solusi bagi masalah ini, membutuhkan pembahasan sampingan singkat, pembahasan sampingan pertama dari beberapa yang akan muncul di bab ini. Pembahasan ini penting bagi penjelasan tema utama bab ini.

Kita sudah lama tahu cara menyusun fosil dalam urutan peletakannya. Metodenya inheren dalam kata ‘peletakan’. Fosil-fosil yang lebih baru tentu saja terletak di atas, bukan di bawah, fosil-fosil yang lebih lama, dan karena itu terletak di atasnya dalam endapan-endapan batu. Kadang, letusan gunung api dapat membalikkan potongan batu, lalu tentu saja urutan penemuan fosil saat kita menggali ikut terbalik pula; tapi kejadian ini cukup langka sehingga akan sangat kentara kalau terjadi. Sekalipun kita jarang menemukan catatan historis yang lengkap saat menggali batu di area mana pun, catatan yang baik dapat disatukan dari bagian-bagian sezaman yang ditemukan di area yang berbeda-beda (sebetulnya, walau saya memakai citra ‘menggali’, ahli paleontologi jarang menggali hingga menembus lapisan-lapisan batu; mereka lebih mungkin menemukan fosil-fosil yang disibak erosi di kedalaman yang berbeda-beda). Jauh sebelum mereka tahu cara membuat penanggalan fosil dalam jutaan tahun yang sebetulnya, ahli paleontologi telah memunculkan skema era-era geologi yang bisa diandalkan, dan mereka tahu secara mendetail era mana yang mendahului era mana. Beberapa jenis cangkang tertentu merupakan indikator andal untuk mengetahui usia batu sampai-sampai menjadi salah satu indikator yang digunakan para pencari minyak bumi di lapangan. Akan tetapi, cangkang saja cuma bisa mengungkapkan usia relatif lapisan batu, bukan usia mutlak.

Belakangan, kemajuan dalam ilmu fisika telah menyediakan metode-metode penentuan tanggal mutlak, dalam jutaan tahun, untuk batu dan fosil yang dikandungnya. Metode-metode ini bersandar pada fakta bahwa unsur-unsur radioaktif tertentu meluruh pada kecepatan yang diketahui secara persis. Seolah ada jam sukat miniatur, yang dibuat dengan tingkat ketelitian tinggi, tertanam di batu-batu itu. Tiap jam sukat mulai aktif pada saat ia diletakkan. Yang perlu dilakukan ahli paleontologi hanyalah mengangkatnya dan membaca pengukur waktunya. Berbeda jenis jam sukat geologis berbasis peluruhan radioaktif, berbeda pula kecepatan lajunya. Jam sukat radiokarbon berputar dengan kecepatan tinggi, begitu cepat sehingga, setelah beberapa ribu tahun, pegasnya hampir usang dan jamnya tidak andal lagi. Tetap berguna untuk menentukan usia bahan organik pada skala waktu arkeologis/historis yang diukur dalam ratusan atau beberapa ribu tahun, tapi tidak terpakai untuk skala waktu evolusi yang diukur dalam jutaan tahun.

Untuk skala waktu evolusi, jam-jam jenis lain, seperti jam potasium-argon, lebih cocok. Jam potasium-argon itu begitu pelan sehingga tidak cocok untuk mengukur waktu di skala arkeologis/historis. Ibarat memakai jam tangan biasa untuk mengukur waktu atlet lari cepat 100 meter. Di lain pihak, untuk mengukur waktu maraton panjang seperti evolusi, jam seperti jam potasium-argon itu pas sekali. ‘Jam sukat’ radioaktif lainnya, masing-masing dengan kecepatan melambat yang khas, adalah jam rubidium-strontium dan uranium-torium-timbal. Jadi, pembahasan sampingan ini telah menunjukkan bahwa kalau sebuah fosil dimajukan ke hadapan seorang ahli paleontologi, ia biasanya bisa tahu kapan hewan tersebut hidup, pada skala waktu absolut jutaan tahun. Kita terlebih dahulu membahas penanggalan dan pewaktuan karena kita

tertarik pada anggapan-anggapan tentang catatan fosil yang dimiliki berbagai jenis teori evolusi – yang ‘bersela’, yang ‘gradual’, dll. Kini waktunya kita membahas apa saja anggapan tersebut.

Pertama, misalkan alam begitu berbaik hati pada ahli paleontologi (atau mungkin tidak, kalau kita pikir lagi kerja ekstra yang timbul karenanya), dan memberinya satu fosil untuk setiap hewan yang pernah hidup. Kalau saja kita bisa melihat catatan fosil yang lengkap seperti itu, yang dengan teliti disusun dalam urutan kronologisnya, sebagai evolusionis, apa yang menurut kita akan muncul? Kalau kita ‘gradualis’, dalam pengertian yang dikarikaturkan dalam perumpamaan bangsa Israel, kita mestinya membayangkan hal sebagai berikut. Rangkaian kronologis fosil akan selalu menunjukkan tren evolusioner yang mulus dengan kecepatan perubahan yang baku. Dengan kata lain, kalau ada tiga fosil, A, B, dan C – A leluhur B, B leluhur C – kita mesti menduga bahwa B merupakan titik tengah proporsional antara A dan C. Misalnya, kalau A berpanjang kaki 20 inci dan C 40 inci, kaki B mestinya ada di tengah-tengah kedua ukuran itu, dan panjang kaki B proporsional dengan panjang waktu di antara titik keberadaan A ke B.

Kalau kita tarik karikatur gradualisme ke kesimpulan logisnya, seperti menghitung kecepatan rata-rata bangsa Israel yang 22 meter per hari itu, kita bisa menghitung kecepatan rata-rata pemanjangan kaki tersebut dalam garis keturunan evolusioner dari A ke C. Kalau, katakanlah, A hidup 20 juta tahun sebelum C (padanan samar di dunia nyata untuk skenario ini adalah *Hyracotherium*, anggota tertua famili kuda yang diketahui, yang hidup kira-kira 50 juta tahun lalu), kecepatan pertumbuhan kakinya 20 inci per 20 juta tahun, atau satu per satu juta inci per tahun. Nah, karikatur orang gradualis ini mestinya percaya bahwa kaki tersebut tumbuh dengan mantap, dari generasi ke generasi, pada kecepatan yang lambat ini: katakanlah empat per satu juta inci per generasi, kalau kita asumsikan waktu alihgenerasi hewan serupa kuda itu sekitar 4 tahun. Si gradualis ini mestinya percaya bahwa, melalui jutaan generasi, individu-individu dengan kaki empat per satu juta inci lebih panjang dari rata-rata ini lebih diuntungkan dari individu-individu dengan panjang kaki rata-rata. Percaya dengan hal ini seperti percaya bahwa bangsa Israel berjalan menyeberangi gurun 22 meter per hari.

Demikian pula bahkan untuk salah satu perubahan evolusioner tercepat yang pernah diketahui, pembengkakan tengkorak manusia dari leluhur serupa *Australopithecus*, dengan volume otak kira-kira 500 sentimeter kubik (cc), ke volume otak rata-rata *Homo sapiens* sekitar 1.400 cc. Peningkatan volume otak sekitar 900 cc, hampir tiga kali lipat, ini dicapai dalam waktu tidak lebih dari tiga juta tahun. Menurut standar evolusi, ini merupakan kecepatan perubahan yang lekas: otak tampak membengkak seperti balon dan memang, dilihat dari beberapa sudut, tengkorak manusia modern agak mirip balon bulat bundar kalau dibandingkan dengan tengkorak *Australopithecus* yang lebih pipih dan berjidat landai. Tapi kalau kita menghitung jumlah generasi dalam tiga juta tahun (katakanlah empat per abad), kecepatan rata-rata evolusinya kurang dari satu per seratus sentimeter kubik per generasi. Karikatur penganut gradualisme mestinya percaya bahwa terjadi perubahan yang perlahan dan tetap, generasi demi generasi, sedemikian rupa sehingga setiap anak laki-laki di generasi baru sedikit lebih berotak dibanding ayahnya, lebih berotak 0,01 cc. Kemungkinan satu per seratus sentimeter kubik otak ekstra ini dianggap memberikan keuntungan signifikan dalam hal ketahanan hidup di tiap generasi penerus jika dibandingkan dengan generasi sebelumnya.

Tapi satu per seratus sentimeter kubik ini jumlah yang renik di hadapan kisaran ukuran otak yang kita jumpai di antara manusia-manusia modern. Ini contoh fakta yang acapkali dikutip: penulis Anatole France – bukan orang sembarang, pemenang hadiah Nobel – memiliki ukuran

otak kurang dari 1.000 cc, sementara di ujung kisaran ukuran otak yang lain, manusia dengan otak 2.000 cc bukan tidak ada (Oliver Cromwell kerap dikutip sebagai contohnya, kendati saya tidak tahu kebenaran informasi ini). Maka, peningkatan rata-rata sebesar 0,01 cc per generasi ini, yang diyakini oleh karikatur seorang gradualis memberikan keuntungan ketahanan hidup signifikan, hanya satu per seratus ribu dari bagian *perbedaan* antara otak Anatole France dan Oliver Cromwell! Untung saja karikatur seorang gradualis itu tidak benar-benar ada.

Kalau orang gradualis semacam ini merupakan karikatur semu – kincir angin bagi tombak kaum keberselaan – apakah ada orang gradualis lain yang benar-benar ada dan memegang teguh keyakinannya? Saya akan tunjukkan bahwa jawabannya ya, dan bahwa kalangan gradualis, dalam pengertian yang kedua, meliputi semua evolusionis yang waras, dan di antaranya, kalau Anda amati dengan teliti keyakinan mereka, orang-orang yang menyebut dirinya kaum keberselaan. Tapi kita harus memahami mengapa kaum keberselaan *berpikir* bahwa pandangan mereka revolusioner dan menarik. Titik awal untuk membahas masalah ini adalah fakta bahwa catatan fosil itu memiliki ‘celah’, dan ke celah inilah perhatian kita alihkan.

Sejak Darwin, kaum evolusionis telah menyadari bahwa, kalau kita urutkan semua fosil yang ada secara kronologis, fosil-fosil ini *tidak* membentuk rangkaian mulus perubahan yang hampir tidak kentara. Pastinya, kita bisa mencermati tren perubahan jangka panjang – kaki yang memanjang secara progresif, tengkorak yang membulat secara progresif, dan seterusnya – tapi tren-tren ini, seperti tampak pada catatan fosil, tersentak-sentak, tidak mulus. Darwin, dan sebagian besar orang lain yang mengikutinya, telah berasumsi bahwa hal ini terutama akibat ketidaksempurnaan catatan fosil. Darwin berpandangan bahwa catatan fosil yang lengkap, kalau saja ada, *akan* menunjukkan perubahan yang terjadi secara halus, bukan tersentak-sentak. Tapi karena fosilisasi itu kejadian untung-untungan, dan menemukan fosil-fosil yang ada itu bahkan membutuhkan kemujuran yang sama, kita jadi seperti punya film sinema yang sebagian besar bingkai gambarnya hilang. Kita pasti bisa melihat semacam pergerakan ketika memproyeksikan film fosil-fosil kita, tapi lebih tersentak-sentak ketimbang Charlie Chaplin, karena film Charlie Chaplin yang paling lama dan paling lecet sekalipun tidak kehilangan sembilan dari sepuluh bingkai gambarnya.

Ahli-ahli paleontologi Amerika Niles Eldredge dan Stephen Jay Gould, ketika pertama sekali mengemukakan teori kesetimbangan bersela mereka pada 1972, mengajukan prasaran yang sejak itu telah ditampilkan sebagai prasaran yang amat berbeda. Mereka mengemukakan bahwa, sebetulnya, catatan fosil mungkin tidak setaksepurna yang kita pikir. Mungkin ‘celah-celah’ tersebut adalah refleksi sejati dari kejadian yang sebenarnya, bukan konsekuensi yang menjengkelkan, tapi yang tak terelakkan, dari catatan fosil yang tak sempurna. Menurut mereka, mungkin evolusi memang berlangsung dengan letupan-letupan mendadak, menyela kurun-kurun waktu ‘stasis’ yang lama, ketika perubahan evolusioner tidak terjadi pada satu silsilah.

Sebelum kita menjenguk jenis letupan-letupan mendadak yang mereka bayangkan, ada beberapa kemungkinan makna ‘letupan mendadak’ lain yang sudah pasti tidak mereka maksudkan. Kemungkinan makna lain ini perlu kita sisihkan karena sering menjadi pangkal kesalahpahaman yang serius. Eldredge dan Gould sudah pasti sepakat bahwa beberapa celah yang amat penting di dalam catatan fosil itu memang bentuk ketidaksempurnaan. Dan celah yang sangat lebar juga. Misalnya, lapisan batu-batu dari periode Kambrium, 600 juta tahun tuanya, adalah batu-batu tertua tempat kita menemukan sebagian besar kelompok-kelompok invertebrata besar. Dan kita mendapati banyak dari mereka yang sudah dalam tataran evolusi lanjut, saat pertama kali muncul. Seolah mereka ditanamkan di situ, tanpa riwayat evolusi apa pun. Tak

perlu dibilang lagi, hal yang tampak seperti penanaman mendadak ini menggirangkan hati kaum kreasionis. Akan tetapi, kaum evolusionis dari garis mana pun yakin bahwa hal ini semata merepresentasikan celah yang sangat lebar di dalam catatan fosil, celah yang terjadi karena fakta bahwa, untuk alasan tertentu, sedikit sekali fosil yang masih bertahan dari kurun-kurun waktu sebelum 600 juta tahun yang lalu. Satu alasan kuatnya adalah karena banyak dari hewan-hewan ini yang tubuhnya hanya terdiri dari bagian lunak: tanpa cangkang atau tulang yang bisa terfosilkan. Kalau Anda seorang kreasionis, Anda mungkin berpikir ini cuma cari-cari alasan. Poin saya di sini adalah bahwa, untuk urusan celah-celah sebesar ini, penafsiran-penafsiran ‘kaum keberselaan’ dan ‘kaum gradualis’ itu tidak berbeda. Kedua aliran ini sama-sama memandang rendah kalangan kreasionis ilmiah, dan keduanya sepakat bahwa celah-celah *besar* itu nyata, dan bahwa celah-celah tersebut adalah ketaksempurnaan sejati dalam catatan fosil. Kedua aliran ini sepakat bahwa satu-satunya penjelasan alternatif dari kemunculan mendadak begitu banyak jenis hewan kompleks di era Kambrium adalah penciptaan ilahi, dan keduanya akan menolak alternatif ini.

Ada satu lagi kemungkinan makna yang menunjukkan evolusi mungkin dapat dibilang berlangsung dalam sentakan-sentakan mendadak, tapi yang juga bukan pengertian yang diajukan Eldredge dan Gould, setidaknya dalam sebagian besar tulisan-tulisan mereka. Dapat dibayangkan bahwa beberapa ‘celah’ yang kentara di dalam catatan fosil memang mencerminkan perubahan mendadak dalam satu generasi. Dapat dibayangkan bahwa memang tidak ada titik perantaranya; dapat dibayangkan bahwa perubahan evolusioner besar terjadi dalam satu generasi. Anak laki-laki bisa terlahir begitu lain dari ayahnya sehingga ia pas untuk digolongkan sebagai spesies yang lain dari spesies ayahnya. Ia individu mutan, dan mutasi tersebut begitu besar sehingga harus disebut sebagai makromutasi. Teori-teori evolusi yang bertumpu pada makromutasi disebut teori-teori ‘saltasi’, dari kata *saltus*, bahasa Latin untuk ‘lompatan’. Karena teori kesetimbangan bersela kerap dirancukan dengan teori saltasi yang sesungguhnya, saya merasa saltasi penting dibahas di sini, dan akan saya tunjukkan mengapa saltasi tidak bisa menjadi faktor berarti dalam evolusi.

Makromutasi – mutasi berefek besar – memang terjadi. Yang jadi persoalan bukan terjadi atau tidaknya, tapi berperan tidaknya makromutasi dalam evolusi; dengan kata lain, apakah makromutasi digabungkan ke dalam kolam gen suatu spesies, atau sebaliknya, apakah makromutasi selalu disingkirkan oleh seleksi alam. Contoh terkenal makromutasi adalah ‘antenapedia’ pada lalat buah. Pada serangga normal, ada kesamaan antara antena dan kaki, dan keduanya berkembang dengan cara yang mirip pada embrio. Tetapi perbedaan keduanya pun juga kentara, dan kedua jenis anggota tubuh ini dipakai untuk tujuan yang jauh berbeda: kaki untuk berjalan; antena untuk merasakan, mencium, atau mengindra segala hal. Lalat antenapedis adalah makhluk ganjil yang antenanya tumbuh persis seperti kaki. Atau, dengan kata lain, mereka ini lalat yang tidak punya antena, tetapi punya sepasang kaki ekstra, yang tumbuh dari soket-soket yang semestinya menjadi tempat tumbuh antena. Ini merupakan mutasi sejati yang terjadi akibat kesalahan dalam penyalinan DNA. Dan memang dapat berbiak kalau lalat-lalat ini ditangkar di laboratorium sehingga dapat bertahan hidup cukup lama untuk bereproduksi. Mereka tidak bisa bertahan lama di alam liar, karena gerakan mereka kikuk dan indra-indra vitalnya cacat.

Jadi, makromutasi memang terjadi. Tapi apakah berperan dalam evolusi? Orang-orang yang disebut saltasionis percaya bahwa makromutasi merupakan cara terjadinya lompatan-lompatan panjang evolusi dalam satu generasi. Richard Goldschmidt, yang kita singgung di Bab 4, adalah

seorang saltasionis sejati. Kalau saltasionisme itu benar, ‘celah-celah’ besar dalam catatan fosil tidak perlu jadi celah sama sekali. Contohnya, seorang saltasionis dapat percaya bahwa peralihan dari *Australopithecus* yang berjidat landai ke *Homo sapiens* yang berjidat seperti kubah itu terjadi dalam satu langkah makromutasional, dalam satu generasi. Perbedaan bentuk di antara dua spesies ini mungkin tidak sebesar perbedaan antara lalat buah normal dan lalat buah antenapedis, dan secara teoretis bisa dibayangkan bahwa *Homo sapiens* pertama merupakan anak ganjil – yang mungkin dikucilkan dan dimusuhi – dari dua orang tua *Australopithecus* yang normal.

Ada alasan-alasan kuat untuk menolak semua teori evolusi saltasionis semacam itu. Satu alasan yang agak membosankan adalah, kalau spesies baru memang muncul dalam satu langkah mutasi, anggota-anggota spesies baru itu mungkin kesulitan menemukan pasangan kawinnya. Tapi saya rasa alasan ini kurang gamblang dan menarik jika dibandingkan dengan dua alasan lain sudah disinggung ketika kita membahas mengapa lompatan-lompatan besar menyeberangi Negeri Biomorf itu dieliminir. Yang pertama dari poin-poin ini dikemukakan oleh statistikawan dan ahli biologi hebat R. A. Fisher, yang kita jumpai dalam pembahasan terkait di bab-bab sebelumnya. Fisher adalah penentang keras semua bentuk saltasionisme, ketika saltasionisme masih jauh lebih mendominasi ketimbang sekarang, dan ia menggunakan analogi berikut ini. Coba bayangkan, katanya, ada mikroskop yang hampir fokus, dan masih perlu disetel lagi posisi lensanya agar pandangan yang dihasilkan bisa tajam sempurna. Seperti apa peluang kita, kalau mengubah secara acak keadaan mikroskop itu (mutasi), untuk memperbaiki fokus dan mutu gambarnya secara umum? Fisher berkata:

Cukup jelas bahwa kecil sekali kemungkinan untuk memperbaiki setelahnya kalau kita melakukan perubahan besar, sementara kalau kita melakukan perubahan yang jauh lebih kecil dari yang terkecil yang sengaja dilakukan pembuat atau operator mikroskop itu, peluang perbaikannya mestilah hampir 50/50.

Saya sudah berkomentar bahwa yang bagi Fisher ‘mudah dilihat’ bisa membuat ilmuwan biasa susah-payah memahaminya, dan begitu pula dengan yang bagi Fisher ‘cukup jelas’. Akan tetapi, pemikiran selanjutnya hampir selalu menunjukkan bahwa ia benar, dan dalam hal ini kita bisa membuktikannya tanpa kesulitan berarti. Ingat bahwa tadi kita mengasumsikan fokus mikroskop tersebut hampir tepat. Misalkan lensanya sedikit lebih rendah dari yang semestinya untuk fokus sempurna, katakanlah satu per sepuluh inci terlalu dekat ke salindia. Nah kalau kita geser sedikit saja, katakanlah satu per seratus inci, ke arah acak, seperti apa peluang perbaikan fokusnya? Kalau kebetulan kita menggesernya satu per seratus inci ke *bawah*, fokusnya akan memburuk. Kalau kita kebetulan menggesernya satu per seratus inci ke *atas*, fokusnya akan membaik. Karena kita menggesernya ke arah yang acak, peluang masing-masing kemungkinan peristiwa ini 50/50. Makin kecil gerakan penyetelan, relatif ke kesalahan awal, peluang perbaikan fokusnya akan makin mendekati setengah. Demikian justifikasi untuk bagian kedua dari pernyataan Fisher.

Tapi sekarang, misalkan kita menggeser tabung mikroskop cukup jauh ke arah yang juga acak – setara dengan suatu makromutasi; katakanlah kita menggesernya satu inci. Nah, tidak peduli ke mana arah gesernya, ke atas atau ke bawah, kita tetap akan membuat fokusnya lebih parah dari sebelumnya. Kalau kebetulan kita geser ke bawah, tabung pantau mikroskop akan satu sepersepuluh inci lebih jauh dari posisi ideal (dan kemungkinan akan merusak salindianya). Kalau kebetulan kita geser ke atas, tabung pantau mikroskop akan sembilan per sepuluh inci lebih jauh dari posisi ideal. Sebelum digeser, tabung itu cuma sepersepuluh inci lebih jauh dari posisi ideal. Karena itu, pergeseran besar ‘makromutasional’ kita itu tindakan gegabah. Kita

telah menghitung penggeseran sangat besar ('makromutasi') dan penggeseran sangat kecil ('mikromutasi'). Tentu kita bisa melakukan kalkulasi yang sama untuk kisaran panjang geser yang menengah, tapi tidak ada gunanya. Saya rasa sekarang sudah cukup jelas bahwa makin kecil penggeserannya, makin kita mendekati kasus ekstrem di mana peluang perbaikannya 50/50; dan makin besar penggeserannya, makin kita mendekati kasus ekstrem di mana peluang perbaikannya nihil.

Pembaca pasti memperhatikan bahwa argumen ini bergantung pada asumsi awal: mikroskop tersebut sudah cukup dekat dengan fokus ideal sebelum kita mulai menyetelnya secara acak. Kalau mikroskop itu 2 inci melebar dari fokus, perubahan acak 1 inci akan berpeluang 50 persen untuk memperbaiki fokusnya, persis seperti perubahan acak seperseratus inci tadi. Dalam hal ini, 'makromutasi' tampak menguntungkan karena menyetel fokus mikroskop itu lebih cepat. Argumen Fisher, tentunya, akan berlaku di sini untuk 'megamutasi', katakanlah, penggeseran sejauh 6 inci ke arah yang acak.

Kalau begitu, mengapa Fisher memilih mikroskop yang sudah hampir fokus sebagai asumsi awalnya? Asumsi ini berpangkal pada peran mikroskop dalam analogi tersebut. Mikroskop yang sudah disetel acak itu sama dengan hewan mutan. Mikroskop yang belum disetel acak itu sama dengan orang tua normal, tak bermutasi dari hewan mutan tersebut. Karena sudah jadi orang tua, hewan ini pasti sudah cukup lama bertahan hidup sehingga dapat bereproduksi, dan karenanya tidak mungkin terlalu jauh dari setelan sempurna. Begitu pula, mikroskop sebelum perubahan acak itu tidak mungkin terlalu jauh dari fokus ideal, atau hewan yang disimbolkannya dalam analogi ini tidak mungkin bertahan hidup sama sekali. Memang ini cuma analogi, dan tidak ada gunanya berdebat apakah 'terlalu jauh' itu berarti satu inci atau sepersepuluh inci atau seperseribu inci. Poin pentingnya adalah bahwa kalau kita menimbang mutasi dengan besaran yang terus meningkat, akan tiba saatnya ketika makin besar mutasinya, makin kecil gunanya; sementara kalau kita menimbang mutasi dengan besaran yang terus menurun, akan tiba saatnya ketika peluang suatu mutasi untuk berguna itu 50 persen.

Argumen mengenai apakah makromutasi seperti antenapedia itu boleh jadi bermanfaat (atau setidaknya tidak berbahaya), dan karena itu apakah makromutasi dapat menyebabkan perubahan evolusioner, karenanya beralih ke *seberapa* 'makro' mutasi yang tengah kita timbang ini. Makin 'makro' mutasinya, makin mungkin ia merugikan, dan makin kecil peluangnya untuk bergabung ke evolusi suatu spesies. Kenyataannya, hampir semua mutasi yang pernah dipelajari dalam laboratorium genetika – yang cukup makro karena, kalau tidak, ahli genetika tidak akan menyadarinya – bersifat merugikan bagi hewan-hewan pemiliknya (ironisnya, saya pernah bertemu orang-orang yang berpikir bahwa argumen ini *menentang* Darwinisme!). Argumen mikroskop Fisher memberikan satu alasan untuk skeptis dengan teori-teori evolusi 'saltasi', setidaknya dalam bentuk ekstremnya.

Alasan umum lain untuk tidak meyakini saltasi sejati juga bersifat statistis, dan kekuatan alasan ini juga bergantung secara kuantitatif pada *seberapa* makro makromutasi yang tengah kita dalilkan. Dalam hal ini, alasan tersebut berkenaan dengan kompleksitas perubahan-perubahan evolusioner. Banyak, walau tidak semua, perubahan-perubahan evolusioner yang menarik perhatian kita itu merupakan kemajuan dalam kompleksitas rancangannya. Contoh ekstrem mata, yang dibahas di bab-bab sebelumnya, menjelaskan poin ini. Hewan dengan mata seperti mata kita berevolusi dari leluhur yang tak bermata sama sekali. Seorang saltasionis garis keras

mungkin mendalilkan bahwa evolusinya terjadi dalam mutasi selangkah. Orang tuanya tidak bermata, hanya kulit telanjang tempat mata itu mungkin ada. Ia memiliki keturunan ganjil dengan mata yang sempurna, lengkap dengan lensa pengatur fokus, diafragma iris yang membatasi jumlah cahaya, retina dengan jutaan fotosel triwarna, komplet dengan saraf-saraf yang sudah tersambung dengan benar hingga ke otak yang memberikannya penglihatan berwarna, stereoskopis, binokuler, dan tajam.

Dalam model biomorf, kita berasumsi bahwa peningkatan multidimensional semacam ini tidak mungkin terjadi. Ikhtisar dari alasan mengapa itu bukan asumsi yang masuk akal: untuk membuat mata dari tanpa mata sama sekali, yang dibutuhkan itu sejumlah besar peningkatan, bukan satu saja. Tiap peningkatan ini sendiri saja sudah cukup muskil, tapi tidak terlalu muskil sehingga mustahil. Makin besar jumlah peningkatan serentak yang kita timbang, makin muskil pula kejadiannya secara serentak. Kebetulan kejadian serentak ini sepadan dengan melompat jauh menyeberangi Negeri Biomorf, dan kebetulan mendarat di satu titik tertentu yang telah ditetapkan terlebih dahulu. Kalau kita memilih untuk menimbang peningkatan dalam jumlah yang cukup besar, kejadian gabungan ini menjadi begitu muskil sehingga, secara praktis, mustahil. Argumen ini telah cukup dikukuhkan, tapi mungkin kita tetap perlu menarik garis batas di antara dua jenis makromutasi yang hipotetis, yang keduanya *tampak* dieliminir oleh argumen kompleksitas tetapi hanya salah satu saja yang, sebetulnya, *memang* dieliminir oleh argumen kompleksitas. Saya melabelinya, untuk alasan yang akan jelas nanti, makromutasi Boeing 747 dan makromutasi Douglas DC8.

Makromutasi Boeing 747 adalah yang dieliminir oleh argumen kompleksitas yang baru saja diberikan tadi. Nama ini diambil dari kesalahpahaman ahli astronomi Sir Fred Hoyle mengenai seleksi alam. Ia membandingkan hal yang diduganya sebagai kemuskilan seleksi alam dengan angin ribut yang berembus di lapangan barang rongsokan dan kebetulan merakit pesawat Boeing 747. Seperti sudah kita lihat di Bab 1, ini analogi yang sama sekali keliru untuk seleksi alam, tetapi juga merupakan analogi yang sangat baik untuk gagasan tentang jenis-jenis makromutasi tertentu yang menimbulkan perubahan evolusioner. Kesalahan mendasar Hoyle terjadi karena ia, ternyata, (tanpa disadari) mengira bahwa teori seleksi alam *memang* bergantung pada makromutasi. Gagasan tentang satu makromutasi yang memunculkan mata sempurna dengan sifat yang dicantumkan di atas, dari kulit telanjang saja, memang sama muskilnya dengan angin ribut yang merakit pesawat Boeing 747. Ini mengapa saya namai jenis makromutasi hipotetis seperti ini makromutasi Boeing 747.

Makromutasi Douglas DC8 adalah mutasi yang, walau boleh jadi besar dalam magnitudo efeknya, ternyata tidak besar dalam kompleksitasnya. Douglas DC8 adalah pesawat terbang yang dibuat dengan memodifikasi pesawat terbang versi sebelumnya, DC8. Bentuknya seperti DC8, tetapi dengan badan yang dipanjangkan. Pesawat ini, setidaknya dari satu sudut pandang, merupakan penyempurnaan pesawat sebelumnya: ia mampu membawa lebih banyak penumpang dari DC8 yang lama. Pemanjangannya pun sangat signifikan, dan dapat disamakan dengan sebuah makromutasi. Menariknya lagi, penambahan panjang ini, sekilas, tampak kompleks. Untuk menambah panjang badan pesawat, tidak cukup dengan menyisipkan tabung kabin ekstra saja. Anda juga harus menambah panjang saluran, kabel, tabung udara, dan kabel listrik yang tak terhitung jumlahnya. Anda juga harus menaruh lebih banyak tempat duduk, asbak, lampu baca, pemilih musik 12 saluran, dan nosel bantuan pernapasan darurat. Sekilas Douglas DC8 tampak jauh lebih kompleks dari DC8 yang biasa, tapi benarkah begitu? Jawabannya, tidak. Setidaknya jika kita lihat bahwa hal-hal ‘baru’ yang ditambahkan pada pesawat yang lebih panjang itu

sebetulnya ‘tambahan hal yang sama’. Biomorf-biomorf pada Bab 3 kerap kali menunjukkan makromutasi jenis Douglas DC8..

Apa kaitannya ini dengan mutasi pada hewan sungguhan? Jawabannya: beberapa mutasi sungguhan itu menyebabkan perubahan besar yang mirip sekali dengan perubahan dari DC 8 ke Douglas DC8, dan sebagian dari mutasi ini, walaupun dapat dianggap mutasi ‘makro’, telah benar-benar digabungkan ke dalam evolusi. Semua ular, misalnya, memiliki lebih banyak tulang belakang ketimbang para leluhurnya. Kita bisa tahu pasti mengenai hal ini sekalipun tidak ada fosilnya, karena ular memiliki tulang belakang yang jauh lebih banyak dibanding para kerabatnya yang masih bertahan hingga sekarang. Selain itu, spesies-spesies ular memiliki jumlah tulang belakang yang berbeda-beda, yang berarti bahwa jumlah tulang belakang ini pasti telah berubah dalam evolusi sejak leluhur bersama mereka, dan perubahan ini terjadi cukup sering.

Nah, untuk mengubah jumlah tulang belakang pada seekor hewan, Anda perlu melakukan hal yang lebih dari sekadar menyisipkan tulang tambahan. Tiap tulang belakang memiliki satu set saraf, satu set pembuluh darah, satu set otot, dll. yang berkaitan dengannya, persis seperti tiap baris tempat duduk di kabin pesawat yang memiliki satu set bantal, satu set sandaran kepala, satu set soket *headphone*, satu set lampu baca beserta kabel-kabelnya, dll. Bagian tengah tubuh seekor ular, seperti bagian tengah badan pesawat, terdiri dari sejumlah *segmen*, yang banyak di antaranya sama persis satu sama lain, seberapa kompleks pun tiap segmen tersebut. Oleh karena itu, untuk menambahkan segmen-segmen baru, kita tinggal menduplikasinya saja. Karena sudah ada mesin-mesin genetik untuk membuat satu segmen ular – mesin-mesin yang amat sangat kompleks, yang membutuhkan banyak bergenerasi-generasi evolusi langkah demi langkah dan bertahap untuk terbangun – segmen-segmen baru yang identik dapat dengan mudah ditambahkan mutasi selangkah. Kalau kita bayangkan gen-gen itu sebagai ‘instruksi bagi embrio yang sedang berkembang’, satu gen untuk menyisipkan segmen-segmen ekstra dapat terbaca ‘tambah lagi yang sama di sini’. Saya membayangkan instruksi-instruksi untuk membangun Douglas DC8 yang pertama itu kurang lebih serupa.

Kita boleh yakin bahwa, pada evolusi ular, jumlah tulang belakang berubah dalam bilangan bulat, bukan pecahan. Kita tidak bisa membayangkan seekor ular dengan 26,3 tulang belakang. Kalau 26 tulang belakangnya bertambah, pasti menjadi 27, dan cukup jelas bahwa pasti ada kasus-kasus ketika seekor anak ular memiliki setidaknya satu tulang belakang lebih banyak dari orang tuanya. Ini berarti bahwa terdapat pula satu set penuh saraf, pembuluh darah, blok otot, dll. Dengan begitu, ular ini merupakan makromutan, tapi hanya dalam pengertian lemah ‘Douglas DC8’. Mudah bagi kita untuk percaya bahwa seekor ular dengan setengah lusin tulang belakang lebih banyak dari orang tuanya dapat muncul dalam mutasi selangkah. ‘Argumen kompleksitas’ terhadap evolusi saltasi tidak berlaku untuk makromutasi Douglas DC8 karena, kalau kita melihat secara terperinci sifat perubahannya, perubahan tersebut bukan makromutasi sejati sama sekali. Perubahan itu makromutasi kalau kita secara naif melihat produk akhirnya, ular yang dewasa. Kalau kita melihat *proses-proses* perkembangan embrionik, perubahan tersebut ternyata mikromutasi, dalam arti bahwa hanya perubahan kecil dalam *instruksi-instruksi* embrionik saja yang tampak berefek besar pada hewan dewasa. Begitu juga untuk kasus antenapedia pada lalat buah, dan banyak lagi kasus lainnya yang disebut ‘mutasi homeotis’.

Demikian pembahasan sampingan saya mengenai makromutasi dan evolusi saltatoris. Pembahasan ini penting karena teori kesetimbangan bersela kerap kali dirancukan dengan evolusi saltatoris. Tapi pembahasan ini *memang* sampingan, karena teori kesetimbangan bersela adalah topik utama bab ini, dan teori tersebut sebenarnya tidak berkaitan dengan makromutasi dan saltasi sejati.

‘Celah-celah’ yang dibicarakan Eldredge dan Gould dan ‘kaum bersela’ lainnya sama sekali tidak berkaitan dengan saltasi sejati, dan celah-celah ini jauh lebih kecil dari celah-celah yang menggairahkan kaum kreasionis. Selain itu, awalnya Eldredge dan Gould mengajukan teori mereka *tidak* untuk menentang secara radikal dan revolusioner Darwinisme ‘konvensional’ yang biasa (dan seperti itulah kemudian teori mereka disiarkan), tapi sebagai *akibat* dari Darwinisme konvensional yang sudah lama diterima, kalau dipahami dengan tepat. Untuk memperoleh pemahaman yang tepat ini, sayangnya kita memerlukan pembahasan sampingan lagi. Kali ini kita akan mendalami pertanyaan seperti apa spesies baru itu bermula, proses yang dikenal dengan istilah ‘spesiasi’.

Jawaban Darwin atas pertanyaan asal-mula spesies, secara umum, adalah bahwa spesies tersebut diturunkan dari spesies lain. Selain itu, pohon keluarga kehidupan adalah pohon yang mencabang, yang berarti bahwa lebih dari satu spesies modern dapat dilacak-balik ke satu spesies purba. Misalnya, singa dan harimau sekarang adalah anggota dari spesies yang berbeda, tetapi keduanya muncul dari satu spesies purba, dan kemunculan ini kemungkinan terjadi belum lama sekali. Spesies leluhur ini boleh jadi sama dengan salah satu dari dua spesies modern ini; atau bisa juga merupakan spesies modern ketiga; atau mungkin kini spesies tersebut telah punah. Begitu juga, manusia dan simpanse kini jelas-jelas merupakan spesies yang berbeda, tetapi leluhur keduanya beberapa juta tahun yang lalu tergolong ke dalam satu spesies saja. Spesiasi adalah proses di mana satu spesies menjadi dua spesies, yang salah satunya dapat sama dengan spesies leluhur aslinya.

Spesiasi dianggap sebagai masalah yang sulit karena hal ini. Semua anggota spesies bakal leluhur ini dapat kawin dengan sesamanya; dan memang, bagi banyak orang, inilah *arti* dari frasa ‘satu spesies’. Oleh karena itu, setiap kali satu spesies anak mulai ‘bertunas’, penunasan ini terancam kagol akibat proses kawin sesama spesies tadi. Dapat kita bayangkan bahwa bakal leluhur singa dan bakal leluhur harimau gagal memisah karena mereka terus kawin dengan sesamanya dan karena itu tetap mirip satu dengan yang lain. Jangan terlalu berlebihan memaknai penggunaan kata ‘kagol’ saya tadi, seolah singa dan harimau purba itu memang ‘ingin’ memisahkan diri. Yang saya maksud di sini adalah fakta gamblang bahwa spesies memang *telah* saling memisah dalam evolusi, dan sekilas fakta kawin sesama spesies ini membuat kita kesulitan melihat seperti apa pemisahan ini terjadi.

Agaknya hampir pasti bahwa jawaban prinsipiel yang tepat untuk masalah ini sudah jelas. Tidak akan ada masalah kawin sesama spesies kalau singa purba dan harimau purba kebetulan berada di bagian-bagian dunia yang berbeda, sehingga mereka tidak dapat saling kawin. Tentu, mereka tidak beranjak ke benua-benua lain supaya bisa saling terpisah: mereka tidak menganggap dirinya singa purba atau harimau purba! Tapi, karena satu spesies purba itu menyebar ke berbagai benua, katakanlah Afrika dan Asia, yang kebetulan berada di Afrika tidak lagi dapat kawin dengan yang kebetulan berada di Asia karena mereka tidak pernah saling berjumpa. Kalau terdapat kecenderungan bagi hewan-hewan di dua benua ini untuk berevolusi ke arah yang berbeda-beda, baik karena pengaruh seleksi alam atau karena pengaruh kebetulan,

kawin sesama spesies tidak lagi menjadi kendala bagi pemisahan mereka dan lambat-laun mereka menjadi dua spesies yang berbeda.

Saya menyebutkan benua yang berbeda agar penjelasan ini lebih terang, tapi prinsip keterpisahan geografis sebagai penghalang untuk kawin sesama spesies dapat juga berlaku bagi hewan-hewan yang hidup di sisi gurun yang berbeda, sisi pegunungan yang berbeda, sisi sungai yang berbeda, atau bahkan sisi jalan yang berbeda. Prinsip ini bisa juga berlaku untuk hewan-hewan yang tidak dipisah penghalang apa pun selain jarak yang sangat jauh. Celurut di Spanyol tidak dapat kawin dengan sesamanya di Mongolia, dan celurut Spanyol ini dapat memisah, secara evolusioner, dari celurut Mongolia, sekalipun ada rantai kawin sesama celurut yang tidak terputus antara yang di Spanyol dan Mongolia. Akan tetapi, gagasan keterpisahan geografis sebagai kunci bagi spesiasi ini tampak lebih kentara kalau kita membayangkan penghalang yang bersifat fisik, seperti laut atau pegunungan. Gugusan pulau-pulau kemungkinan merupakan lahan subur tempat tumbuhnya spesies baru.

Karena itu, di sinilah terletak gambaran neo-Darwinian ortodoks kita tentang seperti apa spesies tipikal itu ‘terlahir’, lewat pemisahan dari suatu spesies leluhur. Berawal dengan spesies leluhur, dalam populasi besar hewan-hewan yang agak seragam dan saling kawin dengan sesama spesiesnya, menyebar ke daratan yang luas. Bisa hewan apa saja, tapi mari kita lanjutkan contoh celurut kita tadi. Daratan luas ini dibelah oleh pegunungan. Kawasan pegunungan ini merupakan medan berat dan para celurut ini akan kesulitan untuk menyeberangnya, tetapi tidak mutlak mustahil sehingga sesekali satu atau dua celurut bisa sampai di dataran rendah di sisi lain pegunungan tersebut. Di sini mereka berkembang biak, dan mereka membentuk populasi spesies terencil, sepenuhnya terkucil dari populasi utama. Nah, kedua populasi ini berkembang biak dan berkembang biak secara terpisah, mencampur gen-gen mereka di tiap sisi pegunungan, tetapi tidak ke seberang pegunungan tersebut. Seiring berjalannya waktu, perubahan komposisi genetik dari satu populasi disebarkan dengan perkembangbiakan di seluruh populasi itu tapi *tidak* menyeberang ke populasi yang lain. Sebagian dari perubahan ini mungkin disebabkan seleksi alam, yang bisa jadi berbeda di kedua sisi pegunungan: sebaiknya kita tidak beranggapan bahwa kondisi cuaca dan pemangsa serta parasit di kedua sisi pegunungan ini sama persis. Sebagian lagi mungkin diakibatkan kebetulan semata. Apa pun penyebab perubahan genetiknya, pembiakan cenderung menyebarkan mereka *di dalam* masing-masing dari kedua populasi, tapi tidak *di antara* kedua populasi ini. Jadi, kedua populasi ini memisah secara genetik: mereka menjadi makin tidak menyerupai satu sama lain.

Mereka menjadi begitu tidak mirip sehingga, setelah beberapa saat, para penyelidik alam menganggap keduanya merupakan ‘ras-ras’ yang berbeda. Setelah lebih lama lagi, mereka akan memisah begitu jauh sehingga kita mesti menggolongkannya sebagai spesies yang berbeda. Nah, bayangkan bahwa iklim kemudian menghangat, sehingga perjalanan melewati pegunungan ini menjadi lebih mudah dan sebagian dari spesies baru ini mulai kembali ke tanah air nenek moyang mereka. Ketika mereka bertemu keturunan-keturunan dari sepupu-sepupu jauh mereka ini, ternyata mereka telah memisah begitu jauh sehingga komposisi genetiknya tidak lagi dapat bercampur. Kalaupun mereka akhirnya kawin silang, keturunannya sakit, atau mandul seperti bagul. Seleksi alam menghukum kegemaran kawin silang dengan spesies atau bahkan ras lain, pada individu-individu dari kedua pihak. Dengan begitu, seleksi alam menyelesaikan proses ‘isolasi reproduksi’ yang dimulai dengan intervensi pegunungan yang kebetulan tersebut. ‘Spesiasi’ pun paripurna. Sekarang ada dua spesies yang sebelumnya satu, dan kedua spesies ini hidup bersama-sama di wilayah yang sama tanpa saling kawin.

Sebetulnya, kedua spesies ini tidak akan hidup bersama di satu tempat untuk waktu yang sangat lama. Bukan karena mereka nanti akan kawin silang tetapi karena mereka akan bersaing. Sudah jadi prinsip ekologi yang luas diterima bahwa dua spesies dengan cara hidup yang sama tidak akan hidup bersama di satu tempat untuk waktu yang lama, karena mereka akan bersaing dan salah satunya akan terseret menuju kepunahan. Tentu saja dua populasi celurut kita mungkin tidak lagi memiliki cara hidup yang sama; misalnya, spesies baru, selama kurun waktu evolusi di sisi lain pegunungan itu, mungkin telah mengkhususkan diri untuk memburu serangga mangsa yang berbeda jenisnya. Tetapi jika terdapat persaingan yang ketat di antara kedua spesies, sebagian besar ahli ekologi akan memperkirakan salah satu spesies akan punah di area tempat mereka hidup bersama. Kalau kebetulan spesies leluhur asali itu yang punah, dapat dikata spesies tersebut digantikan oleh spesies pendatang yang baru.

Teori spesiasi yang diakibatkan keterpisahan geografis telah lama menjadi tumpuan neo-Darwinisme ortodoks arus utama, dan hingga kini masih diterima oleh semua pihak sebagai proses utama mengadanya spesies baru (sebagian orang berpikir ada proses-proses yang lain juga). Penggabungannya ke dalam Darwinisme modern sebagian besar dikarenakan pengaruh ahli zoologi ternama Ernst Mayr. Yang dilakukan kaum ‘keberselaan’, ketika pertama sekali mengajukan teori mereka, adalah bertanya: Kalau, seperti kebanyakan kaum neo-Darwinian, kita menerima teori ortodoks bahwa spesiasi dimulai dengan isolasi geografis, apa yang semestinya akan kita lihat di catatan fosil?

Kembali ke populasi celurut hipotetis kita, dengan spesies baru memisah di sisi jauh pegunungan, dan akhirnya kembali ke tanah air leluhur mereka, dan agaknya menyebabkan spesies leluhur itu sendiri punah. Misalkan celurut-celurut ini meninggalkan fosil; misalkan catatan fosil itu pun *sempurna*, tanpa celah-celah yang diakibatkan hilangnya tahap-tahap kunci perkembangan. Apa yang semestinya akan ditunjukkan fosil-fosil ini? Peralihan mulus dari spesies leluhur ke spesies anak? Tentu bukan, setidaknya kalau kita menggali di daratan utama tempat celurut-celurut leluhur asali itu hidup dan tempat kembalinya spesies yang baru. Coba bayangkan sejarah peristiwa yang betul-betul terjadi di daratan utama itu. Ada celurut-celurut leluhur yang hidup dan berkembang biak dengan damai, tanpa alasan kuat untuk berubah. Sepupu-sepupu mereka di sisi lain pegunungan itu memang sibuk berevolusi, tetapi fosil-fosil mereka semua ada di sisi lain gunung tersebut sehingga kita tidak menemukannya di daratan utama tempat kita menggali. Maka, tiba-tiba (tiba-tiba menurut standar geologi), spesies baru itu kembali, bersaing dengan spesies utama dan, mungkin, menggantikan spesies utama. Tiba-tiba fosil-fosil yang kita jumpai saat kita bergerak ke atas melalui lapisan-lapisan daratan utama itu berubah. Sebelumnya, semua fosil itu spesies leluhur. Sekarang, sekonyong-konyong, tanpa peralihan yang kasat mata, fosil-fosil spesies baru muncul, dan fosil-fosil spesies lama menghilang.

‘Celah-celah’ ini, jauh dari ketaksempurnaan yang menjengkelkan atau biang malu yang bikin canggung, ternyata justru merupakan hal yang *sudah semestinya*, kalau kita sungguh-sungguh dengan teori spesiasi neo-Darwinian ortodoks. ‘Peralihan’ dari spesies leluhur ke spesies keturunan tampak cepat dan tergesa-gesa karena, kalau kita lihat serangkaian fosil dari satu tempat, kita mungkin sama sekali tidak sedang melihat peristiwa *evolusi*: kita tengah menyaksikan peristiwa *migrasi*, kedatangan spesies baru dari wilayah geografis yang lain. Tentu ada peristiwa evolusi, dan satu spesies memang berevolusi, kemungkinan secara gradual, dari spesies lain. Tapi untuk melihat peralihan evolusioner yang terdokumentasikan pada fosil-fosil tersebut kita harus menggali di tempat lain – dalam hal ini sisi pegunungan yang satunya.

Maka dari itu, pokok yang diajukan Eldredge dan Gould mestinya dapat disajikan secara sederhana untuk membantu menyelamatkan Darwin dan para penerusnya dari hal yang bagi mereka tampak seperti kesulitan yang janggal. Dan memang, setidaknya secara sebagian, seperti itulah pokok tersebut *dulu* disajikan – awalnya. Kalangan Darwinian selalu terusik dengan celah-celah yang tampak mata pada catatan fosil, dan tampak terpaksa meminta pemakluman atas bukti yang tidak sempurna ini. Darwin sendiri menulis:

Catatan geologis amat sangat tidak sempurna dan fakta ini akan banyak menjelaskan mengapa kita tidak menjumpai varietas-varietas yang tak putus, yang menghubungkan semua bentuk-bentuk kehidupan yang telah punah dan yang masih ada dengan langkah-langkah bertahap yang paling lengkap. Orang yang menolak pandangan-pandangan mengenai sifat catatan geologis ini akan langsung menolak seluruh teori saya.

Eldredge dan Gould mestinya bisa menjadikan ini sebagai pesan utama mereka: Tak usah khawatir, Darwin. Andaipun catatan fosil *sempurna*, Anda jangan berharap melihat progresi bertahap yang rapi kalau hanya menggali di satu tempat, karena memang sebagian besar perubahan evolusioner itu terjadi di tempat lain! Mereka mestinya bisa berkata lebih jauh:

Darwin, waktu Anda bilang catatan fosil itu tidak sempurna, Anda mengecilkannya. Bukan sekadar tidak sempurna, tapi ada alasan kuat untuk menduga catatan fosil itu *semestinya* tidak sempurna persis ketika momennya mulai menarik, persis ketika perubahan evolusioner itu tengah terjadi; ini sebagian karena evolusi biasanya terjadi di tempat yang berbeda dari tempat kita menemukan sebagian besar fosil-fosil kita; dan sebagian lagi karena, sekalipun kita cukup beruntung karena menggali di salah satu dari wilayah-wilayah terpencil tempat sebagian besar perubahan evolusioner itu berlangsung, perubahan evolusioner tersebut (kendati masih bersifat gradual) melingkupi kurun waktu yang begitu singkat sehingga kita membutuhkan *sekian banyak* catatan fosil ekstra untuk melacakinya!

Tapi tidak. Khususnya di tulisan-tulisan yang mereka terbitkan belakangan, yang banyak diliput wartawan, mereka memilih untuk menjual gagasannya sebagai hal yang secara radikal *bertentangan* dengan gagasan Darwin dan bertentangan dengan sintesis neo-Darwinian. Mereka melakukannya dengan menekankan ‘gradualisme’ pandangan evolusi Darwinian sebagai lawan dari ‘paham keberselaan’ mereka yang mendadak, tersentak-sentak, dan sporadis. Mereka, khususnya Gould, bahkan melihat adanya analogi di antara diri mereka dengan mazhab lama ‘katastrofisme’ dan ‘saltasionisme’. Saltasionisme sudah kita bahas. Katastrofisme adalah upaya yang dilakukan pada abad ke-18 dan ke-19 untuk mendamaikan semacam kreasionisme dengan fakta-fakta mengusik yang dihadirkan catatan fosil. Kaum katastrofis percaya bahwa progresi yang tampak pada catatan fosil benar-benar mencerminkan serangkaian ciptaan diskret, yang masing-masing musnah karena kepunahan massal katastrofis. Katastrofe yang terjadi paling belakangan adalah air bah Nuh.

Perbandingan antara paham keberselaan modern di satu pihak, dan katastrofisme atau saltasionisme di pihak lain, memiliki efek yang murni puitis. Kalau boleh saya reka satu oksimoron, perbandingan itu seperti kedangkalan mendalam. Terdengar mengesankan secara cita rasa seni dan sastra, tapi tak menciptakan pemahaman yang serius sama sekali, dan bisa menjadi harapan semu dan angin segar bagi kaum kreasionis modern dalam keberhasilan perjuangan mereka untuk mensubversi pendidikan dan penerbitan buku ajar di Amerika, dan ini mencemaskan. Faktanya, dalam arti yang sepenuh-penuhnya dan sungguh-sungguhnya, Eldredge dan Gould itu sama gradualisnya dengan Darwin dan semua pengikutnya. Bedanya cuma mereka memampatkan seluruh perubahan gradual ke dalam letupan-letupan singkat, bukan dianggap terjadi sepanjang waktu; dan mereka menekankan bahwa sebagian besar perubahan gradual berlangsung di wilayah-wilayah geografis yang jauh dari wilayah-wilayah tempat sebagian besar fosil digali.

Jadi bukan *gradualisme* Darwin yang ditentang oleh kaum keberselaan ini: gradualisme berarti bahwa tiap generasi hanya berbeda sedikit dari generasi sebelumnya; penentang hal ini mestinya kaum saltasionis, dan Eldredge serta Gould bukan saltasionis. Melainkan, rupa-rupanya hal yang konon merupakan keyakinan Darwin atas ketetapan kecepatan evolusi itulah yang menjadi titik keberatan mereka dan kaum keberselaan lainnya. Mereka menentangnya karena berpikir bahwa evolusi (yang tetap merupakan evolusi gradualistis) terjadi dengan cepat selama letupan-letupan aktivitas yang relatif singkat (peristiwa-peristiwa spesiasi, yang memberikan semacam suasana krisis yang melemahkan hal yang konon resistansi normal terhadap perubahan evolusioner); dan bahwa evolusi terjadi secara sangat perlahan atau berhenti sama sekali selama kurun-kurun panjang stasis yang menyelanya. Tentu, yang kita maksud dengan ungkapan ‘relatif’ singkat adalah singkat dalam konteks skala waktu geologis secara umum. Sentakan-sentakan evolusioner kaum keberselaan ini pun, kendati terasa sekejap menurut standar geologis, tetap saja memiliki durasi yang diukur dalam puluhan atau ratusan ribu tahun.

Sebuah pemikiran dari evolusionis terkenal G. Ledyard Stebbins dari Amerika bisa membantu kita memahami hal ini. Ia tidak secara spesifik menyinggung evolusi yang tersentak-sentak, tetapi hanya mencoba mendramatisir kemungkinan kecepatan terjadinya perubahan evolusioner, ketika dilihat pada skala waktu masa geologis yang ada. Ia membayangkan satu spesies hewan, yang kira-kira seukuran tikus. Ia kemudian mengandaikan bahwa seleksi alam mulai memilih peningkatan ukuran tubuh, tapi hanya sedikit-sedikit saja. Mungkin tikus jantan dengan badan yang lebih besar sedikit lebih diuntungkan dalam persaingan mendapatkan tikus betina. Di generasi mana pun, tikus jantan dengan ukuran tubuh rata-rata sedikit tidak seberhasil tikus jantan yang sedikit lebih besar dari ukuran rata-rata. Stebbins menempatkan angka pasti pada keuntungan matematis yang dinikmati individu-individu tikus bertubuh lebih besar ini dalam contoh yang direkannya. Ia menetapkan nilai keuntungan itu teramat sangat kecil sehingga tidak bakal dapat diukur si manusia pengamat. Dan karenanya, laju perubahan evolusioner yang muncul begitu lambat sehingga tidak disadari selama masa hidup manusia biasa. Bagi ilmuwan yang mempelajari evolusi tikus tersebut, hewan-hewan ini tidak berevolusi sama sekali. Akan tetapi, mereka tetap berevolusi, sangat perlahan pada kecepatan yang dicanangkan asumsi matematis Stebbins, dan, pada kecepatan selambat ini sekalipun, hewan-hewan tersebut akhirnya akan mencapai ukuran sebesar gajah. Berapa lama waktu yang dibutuhkan? Pastinya lama sekali untuk standar manusia, tapi standar manusia tidak relevan di sini. Yang kita bicarakan adalah waktu geologis. Stebbins menghitung bahwa pada kecepatan evolusi teramat lambat yang diasumsikannya, akan butuh sekitar 12.000 generasi bagi hewan-hewan ini untuk berevolusi dari bobot rata-rata 40 gram (ukuran tikus) ke bobot rata-rata di atas 6.000.000 gram (ukuran gajah). Bila diasumsikan satu generasi baru muncul setiap 5 tahun, waktu yang lebih panjang untuk tikus tapi lebih pendek untuk gajah, 12.000 generasi akan tercapai dalam 60.000 tahun. 60.000 terlalu *pendek* untuk diukur dengan metode-metode geologis biasa untuk penanggalan catatan fosil. Seperti dikatakan Stebbins, ‘Munculnya seekor hewan jenis baru dalam 100.000 tahun atau kurang dianggap “mendadak” atau “seketika” oleh para ahli paleontologi.

Kaum keberselaan tidak bicara soal lompatan-lompatan dalam evolusi, mereka bicara soal episode-episode evolusi yang relatif cepat. Dan episode-episode ini pun tidak harus cepat menurut standar manusia, untuk tampak seketika menurut standar geologis. Seperti apa pun anggapan kita tentang teori kesetimbangan bersela itu sendiri, terlalu mudah untuk merancukan gradualisme (keyakinan, yang dipegang oleh kaum keberselaan modern dan Darwin, bahwa tidak ada lompatan-lompatan mendadak di antara satu generasi dan generasi berikutnya) dengan ‘speedisme evolusioner konstan’ (yang ditentang oleh kaum keberselaan dan yang seolah dianut

oleh Darwin, padahal tidak). Keduanya sama sekali berbeda. Cara tepat untuk mencirikan keyakinan kaum keberselaan ini adalah: ‘gradualistis, tapi dengan kurun waktu “stasis” (kemandekan evolusi) panjang yang menyela episode-episode perubahan gradual cepat’. Penekanannya kemudian dipusatkan pada kurun-kurun waktu *stasis* panjang sebagai fenomena yang sebelumnya terlewatkan dan benar-benar perlu dijelaskan. Penekanan pada stasis inilah kontribusi sejati kaum keberselaan, bukan oposisi yang mereka klaim terhadap gradualisme, karena mereka sebetulnya sama gradualisnya dengan yang lain.

Penekanan pada stasis ini bahkan dapat dijumpai, dalam bentuk yang tidak melewah, dalam teori spesiasi Mayr. Ia yakin bahwa, dari dua ras yang terpisah secara geografis ini, populasi besar leluhur asali lebih sedikit kemungkinannya untuk berubah jika dibandingkan dengan populasi ‘anak’ yang baru (di sisi gunung yang lain dalam kasus contoh celurut kita). Bukan hanya karena populasi anak itulah yang pindah ke padang baru, yang kondisi-kondisinya kemungkinan berbeda dan tekanan seleksi alamnya berubah. Tapi juga karena ada beberapa alasan teoretis (yang ditekankan Mayr tetapi yang arti pentingnya dapat diperdebatkan) untuk berpikir bahwa populasi-populasi besar yang berkembang biak memiliki kecenderungan inheren untuk *melawan* perubahan evolusioner. Analogi yang tepat untuk ini adalah kelembaman benda besar yang berat; sulit digeser. Populasi-populasi kecil yang terpencil, karena kecil, secara inheren lebih mungkin, sebagaimana didalilkan teori ini, untuk berubah, untuk berevolusi. Oleh karena itu, kendati saya mengatakan dua populasi atau ras celurut ini saling menyimpang, Mayr lebih memilih untuk menganggap populasi leluhur asali itu relatif jumud, dan populasi yang baru itulah yang memisah darinya. Cabang pohon evolusinya tidak membelah ke dua ranting yang setara: alih-alih, ada batang utama dengan ranting yang bertunas darinya.

Para pendukung kesetimbangan bersela menggunakan prasaran dari Mayr ini, dan membesarkannya ke dalam keyakinan kuat bahwa ‘stasis’, atau tiadanya perubahan evolusioner, merupakan norma bagi suatu spesies. Mereka percaya bahwa ada daya-daya genetik dalam populasi-populasi besar yang giat *melawan* perubahan evolusioner. Perubahan evolusioner, bagi mereka, adalah peristiwa langka, yang bertepatan dengan spesiasi. Bertepatan dengan spesiasi dalam arti, menurut mereka, kondisi-kondisi yang mendasari terbentuknya spesies baru – keterpisahan geografis dari sub-subpopulasi kecil dan terpencil – merupakan kondisi-kondisi yang mematilemaskan daya-daya yang biasanya melawan perubahan evolusi. Spesiasi adalah masa pergolakan, atau revolusi. Dan pada masa-masa pergolakan inilah perubahan evolusioner terkonsentrasi. Di hampir sepanjang riwayat suatu silsilah, perubahan tersebut mandek.

Tidak benar bahwa Darwin percaya bahwa evolusi berjalan dengan kecepatan konstan. Sudah pasti ia tidak meyakinkannya dalam artian ekstrem menggelikan yang saya satirkan dalam perumpamaan anak-cucu Israel, dan saya rasa ia tidak benar-benar meyakinkannya dalam artian penting apa pun. Bagi Gould, kutipan kalimat terkenal berikut dari edisi keempat (dan edisi-edisi selanjutnya) *The Origin of Species* sangat mengusik karena ia anggap tidak mewakili pemikiran umum Darwin:

Banyak spesies yang, begitu terbentuk, tidak mengalami perubahan lebih lanjut ...; dan kurun-kurun waktu terjadinya perubahan pada suatu spesies, kendati panjang jika diukur dengan tahun, mungkin pendek jika dibandingkan dengan kurun-kurun waktu saat bentuk mereka tetap.

Gould ingin mengelak dari kalimat ini dan kalimat lain sejenisnya, dengan berkata:

Anda tidak bisa menulis sejarah dengan memilih-milih kutipan dan mencari catatan kaki pembenaran. Substansi umum dan dampak historis adalah kriteria yang tepat. Apakah rekan sezaman dan penerusnya pernah membaca Darwin sebagai seorang saltasionis?

Gould tentu benar tentang substansi umum dan dampak historis, tetapi kalimat terakhir kutipan darinya ini merupakan *faux pas* (kecerobohan) yang gamblang. *Tentu saja*, tidak satu orang pun pernah membaca Darwin sebagai seorang saltasionis dan, tentu saja, Darwin kukuh melawan saltasionisme, tapi poin besar saltasionisme bukan soal ketika kita membahas kesetimbangan bersela. Seperti telah saya tekankan, teori kesetimbangan bersela, sebagaimana direpresentasikan oleh Eldredge dan Gould, bukanlah teori saltasionis. Lompatan-lompatan yang didalilkannya itu bukan lompatan-lompatan satu generasi sungguhan. Lompatan-lompatan itu menyebar ke sejumlah besar generasi sepanjang kurun waktu, seperti diperkirakan Gould sendiri, puluhan ribu tahun. Teori kesetimbangan bersela adalah teori gradualis, terlepas dari penekanannya pada kurun-kurun stasis panjang yang menyela di antara letupan-letupan evolusi gradualistis yang *relatif* pendek. Gould telah menyesatkan dirinya sendiri dengan penekanan retorisnya atas kemiripan yang murni puitis atau sastra antara paham keberselaan, di satu pihak, dan saltasionisme di pihak lain.

Saya rasa perkara ini akan jernih bila, di titik ini, saya rangkum aneka kemungkinan sudut pandang mengenai kecepatan evolusi. Di satu sudut terpendil, ada saltasionisme sejati, yang telah cukup saya bahas tadi. Saltasionis sejati tidak ada di antara kalangan ahli biologi modern. Setiap orang yang bukan saltasionis adalah gradualis, termasuk Eldredge dan Gould, seperti apa pun mereka memilih menggambarkan diri mereka sendiri. Di dalam gradualisme, kita dapat membedakan berbagai keyakinan mengenai kecepatan evolusi (gradual). Sebagian dari keyakinan-keyakinan ini, seperti sudah kita lihat, hanya secara dangkal ('sastrawi' atau 'puitis') saja mirip dengan saltasionisme antigradualis sejati, dan itu mengapa kadang orang merancukan keduanya.

Di titik lajat yang lain, ada semacam 'speedisme konstan' yang saya karikaturkan dalam perumpamaan Keluaran yang membuka bab ini. Penganut speedisme konstan garis keras percaya bahwa evolusi terus berjalan dengan mantap dan senantiasa tak terhentikan, terlepas dari berlangsung tidaknya pencabangan atau spesiasi. Ia percaya bahwa jumlah perubahan evolusioner itu pasti proporsional dengan waktu yang telah dilalui. Ironisnya, di kalangan ahli genetika molekuler, ada satu bentuk speedisme konstan yang kini sangat didukung. Ada dasar kuat untuk percaya bahwa perubahan evolusioner di level molekul-molekul protein memang benar-benar berjalan dengan kecepatan stabil persis seperti perumpamaan anak-cucu Israel tadi; dan ciri yang *sekalipun* kasat mata secara eksternal seperti lengan dan kaki ini pun berevolusi secara amat bersela. Topik ini sudah kita jumpai di Bab 5, dan saya akan menyebutkannya lagi nanti di bab berikutnya. Tapi kalau soal evolusi adaptif struktur dan pola perilaku skala besar, semua evolusionis akan menolak speedisme konstan, dan Darwin pun barang tentu akan menolaknya juga. Semua yang bukan penganut speedisme konstan adalah penganut speedisme bervariasi.

Dalam paham speedisme bervariasi ada dua jenis keyakinan, yang dinamai 'speedisme bervariasi diskret' dan 'speedisme bervariasi malar'. Penganut speedisme bervariasi diskret garis keras tidak hanya percaya bahwa evolusi itu bervariasi dalam hal kecepatan. Ia berpikir bahwa kecepatan itu lekas berubah dari satu level diskret ke level diskret lain, seperti persneling mobil. Ia mungkin percaya, misalnya, bahwa evolusi hanya punya dua kecepatan: sangat cepat dan berhenti (saya tak kuasa untuk tidak mengenang rasa malu melihat rapor sekolah pertama saya, yang ditulis Wali Kelas mengenai kinerja saya sebagai siswa usia tujuh tahun dalam melipat baju, mandi air dingin, dan rutinitas harian lain di kehidupan siswa sekolah asrama: 'Dawkins hanya punya tiga kecepatan: lambat, sangat lambat, dan berhenti'). Evolusi yang 'berhenti'

adalah ‘stasis’ yang dibayangkan kaum keberselaan untuk mencirikan populasi-populasi besar. Evolusi gigi tinggi adalah evolusi yang berlangsung selama spesiasi, dalam populasi-populasi terpencil kecil di sekitar tepi populasi-populasi besar yang statis secara evolusioner. Menurut pandangan ini, evolusi senantiasa berada di salah satu dari kedua persneling ini, tidak pernah berada di antaranya. Eldredge dan Gould cenderung ke arah diskretisme, dan dalam hal ini mereka memang radikal. Mereka dapat digolongkan ke kaum ‘speedisme bervariasi diskret’. Kebetulan, tidak ada alasan *tertentu* bagi seorang penganut speedisme bervariasi diskret untuk lantas menekankan bahwa spesiasi itu merupakan masa evolusi gigi tinggi. Akan tetapi, pada praktiknya, sebagian besar dari mereka memang begitu.

Penganut ‘speedisme bervariasi malar’, di lain pihak, percaya bahwa kecepatan evolusi naik turun secara malar dari sangat cepat ke sangat lambat ke berhenti, dengan semua titik antaranya. Mereka tidak melihat adanya alasan khusus untuk lebih menggarisbawahi kecepatan tertentu dibanding yang lain. Secara khusus, bagi mereka stasis hanyalah kasus ekstrem evolusi ultra-lambat. Bagi seorang penganut paham keberselaan, stasis itu sangat spesial. Stasis, baginya, bukan sekadar evolusi yang begitu lambat sehingga kecepatannya nol: stasis tidak hanya ketiadaan evolusi yang pasif karena tidak adanya daya dorong menuju perubahan. Melainkan, stasis merupakan indikasi adanya *perlawanan* terhadap perubahan evolusioner. Hampir seolah spesies itu dibayangkan giat untuk *tidak* berevolusi, *terlepas* dari ada tidaknya daya dorong menuju evolusi.

Jumlah ahli biologi yang sepakat bahwa stasis itu fenomena nyata lebih banyak dari ahli biologi yang bersepakat mengenai sebab-sebabnya. Contoh ekstrem: ikan raja laut, coelacanth (*Latimeria*). Coelacanth adalah sekelompok besar ‘ikan’ (sebetulnya, meski disebut ikan, mereka lebih dekat berkerabat dengan kita ketimbang ikan trout dan haring) yang berkembang lebih dari 250 juta tahun yang lalu dan diduga telah punah pada waktu yang kira-kira sama dengan dinosaurus. Saya sebut ‘diduga’ punah karena pada 1938, tanpa disangka-sangka, dunia zoologi dikejutkan dengan ditemukannya seekor ikan aneh, dengan panjang tubuh 1,37 meter dan sirip berbentuk ganjil seperti kaki, dalam jaring tangkapan kapal pancing perairan laut dalam di pesisir Afrika Selatan. Untung saja, walau hampir dimusnahkan sebelum dikenali sebagai hewan langka, bangkainya yang membusuk masih sempat dibawa ke seorang ahli zoologi Afrika Selatan. Hampir tak percaya dengan penglihatannya, ahli zoologi ini mengenalinya sebagai coelacanth hidup, dan menamainya *Latimeria*. Sejak itu, di wilayah yang sama beberapa spesimen lain berhasil ditangkap, dan kini spesies ini telah dikaji dan dideskripsikan dengan baik. Coelacanth adalah ‘fosil hidup’ dalam arti bahwa hewan ini hampir tidak berubah sama sekali sejak pendahulu fosilnya, ratusan juta tahun yang lalu.

Jadi, ada stasis. Mau kita apakan fakta ini? Bagaimana kita menjelaskannya? Sebagian kita mungkin berkata bahwa silsilah yang berujung pada *Latimeria* bergeming karena seleksi alam tidak menggerakkannya. Hewan-hewan ini seperti tidak ‘butuh’ evolusi karena telah menemukan cara hidup sukses jauh di dalam laut, yang kondisinya tidak banyak berubah. Mungkin mereka juga tidak pernah ikut serta dalam perlombaan senjata. Sepupu-sepupu mereka yang naik ke darat memang berevolusi karena seleksi alam, dalam aneka keadaan gawat termasuk perlombaan senjata, memaksa mereka berevolusi. Ahli biologi lain, termasuk sebagian dari orang-orang yang menyebut dirinya kaum keberselaan, mungkin berkata bahwa silsilah yang berujung pada *Latimeria* modern giat melawan perubahan, *terlepas* dari ada tidaknya tekanan seleksi alam untuk mereka. Siapa yang benar? Dalam perkara *Latimeria*, sulit menentukan siapa benar, tapi ada perkara lain yang, pada prinsipnya, memungkinkan kita untuk mencari tahu.

Supaya adil, kita sisihkan dulu *Latimeria*. Contoh ini memang gamblang tetapi sangat ekstrem, dan bukan contoh yang menjadi pokok perhatian kaum keberselaan. Mereka yakin bahwa contoh-contoh stasis yang lebih tidak ekstrem, dan lebih singkat kurunnya, itu lumrah terjadi; dan memang merupakan norma, karena spesies memiliki mekanisme-mekanisme genetik yang giat melawan perubahan, sekalipun ada daya seleksi alam yang mendesaknya. Nah, ini ada satu eksperimen sangat sederhana yang, paling tidak pada prinsipnya, bisa kita lakukan untuk menguji hipotesis ini. Ambil contoh populasi hewan liar, yang akan kita seleksi sendiri. Menurut hipotesis bahwa spesies giat melawan perubahan, kita semestinya mendapati bahwa, kalau mencoba membiakkan spesies tersebut untuk sifat tertentu, spesies ini akan pasang kuda-kuda kuat, dan menolak oleng, setidaknya untuk beberapa saat. Kalau kita mencoba menyeleksi pembiakan lembu untuk mendapatkan lembu dengan produksi susu tinggi, misalnya, kita semestinya gagal. Mekanisme-mekanisme genetik spesies ini akan mengerahkan kekuatan antievolusinya dan berjuang melawan tekanan untuk berubah. Kalau kita mencoba membuat ayam berevolusi agar bertelur lebih banyak, kita semestinya gagal. Kalau para matador, demi melanggengkan ‘olahraga’ rendahan mereka itu, mencoba menggenjot keberanian banteng-banteng mereka dengan pembiakan selektif, mereka semestinya gagal. Semua kegagalan ini, tentunya, bersifat sementara. Akhirnya, seperti bendungan yang pecah karena tekanan air, kekuatan antievolusi diduga ada tersebut akan teratasi, dan silsilah tersebut kemudian bisa bergerak cepat ke kesetimbangan yang baru. Tapi kita setidaknya mesti mengalami perlawanan ketika pertama sekali menginisiasi program baru pembiakan selektif.

Faktanya, tentu, kita tidak gagal ketika mencoba membentuk evolusi dengan secara selektif membiakkan hewan dan tumbuhan dalam penangkaran, dan tidak pula kita mengalami kesulitan di masa awal pembiakan selektif tersebut. Spesies hewan dan tumbuhan biasanya langsung *sreg* dengan pembiakan selektif, dan para pembiak tidak mendeteksi adanya kekuatan antievolusi yang intrinsik. Kalaupun ada, kesulitan yang dialami para pembiak selektif ini terjadi *setelah* beberapa generasi berhasil dibiakkan secara selektif. Hal ini karena setelah beberapa generasi pembiakan selektif, variasi genetik yang tersedia habis, dan kita terpaksa menunggu mutasi-mutasi baru. Dapat dibayangkan bahwa coelacanth berhenti berevolusi karena mereka berhenti bermutasi – mungkin karena terlindungi dari sinar-sinar kosmik di dasar laut! – tapi sepanjang pengetahuan saya belum ada satu orang pun yang dengan serius mengajukan ini, dan bagaimanapun juga bukan ini yang dimaksud kaum keberselaan ketika mereka mengatakan bahwa spesies memiliki perlawanan bawaan terhadap perubahan evolusioner.

Maksud mereka itu lebih dekat dengan pokok yang saya hadirkan di Bab 7 tentang gen-gen yang ‘bekerja sama’: gagasan bahwa kelompok-kelompok gen telah begitu baik beradaptasi satu sama lain sehingga mereka menolak invasi gen-gen mutan baru yang bukan anggota kelompoknya. Gagasan ini cukup rumit, dan bisa dibuat terdengar mungkin. Malah, itulah salah satu alat teoretis dari ide kelembaman Mayr, yang sudah kita bahas tadi. Akan tetapi, fakta bahwa, saat mencoba melakukan pembiakan selektif, kita tidak menjumpai adanya perlawanan awal, bagi saya berarti bahwa, kalau silsilah-silsilah berlanjut selama bergenerasi-generasi di alam liar tanpa berubah, ini bukan karena mereka menolak perubahan tetapi karena tidak ada tekanan seleksi alam yang mendukung perubahan. Mereka tidak berubah karena individu-individu yang tetap lebih mampu bertahan hidup daripada individu-individu yang berubah.

Maka itu, kaum keberselaan itu sama gradualisnya dengan Darwin atau semua kalangan Darwinian lainnya; mereka hanya menyisipkan kurun-kurun stasis panjang di antara semburan-semburan evolusi gradual. Seperti sudah saya katakan, satu-satunya segi yang membedakan kaum keberselaan dengan aliran Darwinisme lain terletak pada penekanan kuat mereka atas stasis sebagai hal yang bersifat positif: sebagai penolakan aktif melawan perubahan evolusioner, dan bukan cuma tiadanya perubahan evolusioner saja. Dan pada segi ini jugalah mereka kemungkinan keliru. Bagi saya teka-teki mengapa mereka *berpikir* bahwa mereka begitu jauh dari Darwin dan neo-Darwinisme perlu dipecahkan.

Jawabannya terletak pada kebingungan atas dua makna kata ‘gradual’, ditambah kerancuan, yang sudah susah-payah saya patahkan di sini tapi terlanjur melekat kuat di benak banyak kalangan, antara paham kesetimbangan bersela dan saltasionisme. Darwin merupakan antisaltasionis yang menggebu-gebu, dan hal ini membuatnya berkali-kali menekankan kegradualan ekstrem dari perubahan evolusioner yang dikemukakannya. Alasannya adalah karena saltasi, bagi Darwin, sama dengan hal yang saya sebut makromutasi Boeing 747 tadi. Saltasi berarti kemunculan mendadak, seperti Dewi Athena dari kepala Zeus, organ-organ kompleks yang sama sekali baru dengan sekali ayun tongkat sihir genetik. Saltasi berarti munculnya mata yang sempurna baik bentuk maupun gunanya dari selembar kulit telanjang, dalam sekali generasi saja. Alasan Darwin memahami saltasi sebagai semua hal itu adalah karena seperti itulah persis maknanya bagi beberapa dari penentangannya yang paling berpengaruh, dan mereka benar-benar percaya bahwa hal tersebut merupakan satu faktor besar dalam evolusi.

Adipati Argyll, misalnya, menerima bukti bahwa evolusi telah terjadi, tapi ingin menyeludupkan paham penciptaan ilahi lewat pintu belakang. Dan ia tidak sendiri. Alih-alih penciptaan sekali jadi di Taman Firdaus, banyak dari kalangan Victorian berpikir bahwa sang ilah telah berkali-kali turun tangan, pada titik-titik krusial evolusi. Organ-organ kompleks seperti mata, alih-alih berkembang dari organ-organ yang lebih sederhana secara perlahan-lahan seperti dinyatakan Darwin, dikira langsung mengada dalam sekejap. Orang-orang seperti ini memang menganggap bahwa ‘evolusi’ instan semacam itu, kalau terjadi, akan menyiratkan campur tangan ilahi: itulah keyakinan mereka. Alasannya adalah alasan statistis yang telah saya bahas, sehubungan dengan angin topan dan Boeing 747 tadi. Saltasionisme 747 itu hanyalah bentuk lebih encer dari kreasionisme. Kalau dilihat dari sudut lain, penciptaan ilahi adalah puncak dari saltasi. Lompatan pamungkas dari lempung mati ke manusia sempurna. Darwin pun beranggapan begitu. Ia menulis surat kepada Sir Charles Lyell, ahli geologi terkemuka di masanya:

Kalau saya yakin bahwa saya membutuhkan imbuhan-imbuhan seperti itu bagi teori seleksi alam, saya akan mencampakkannya ... Saya menolak teori seleksi Alam, kalau teori ini membutuhkan imbuhan ajaib pada tingkat keturunan yang mana pun.

Ini bukan perkara kecil. Dalam pandangan Darwin, *hakikat* teori evolusi oleh seleksi alam adalah *tiadanya* mukjizat ilahi dalam keberadaan adaptasi-adaptasi kompleks. Dan itu pulalah hakikat dari buku ini. Bagi Darwin, setiap evolusi yang harus dibantu melompat oleh Tuhan bukan evolusi sama sekali. Hal itu mengingkari pokok inti dari evolusi. Mengingat hal ini, mudah bagi kita untuk mafhum mengapa Darwin terus-menerus mengulangi *kegradualan* evolusi. Mudah bagi kita untuk mafhum mengapa ia menulis kalimat yang dikutip pada Bab 4 buku ini:

Apabila dapat diperagakan bahwa ada organ kompleks yang mustahil terbentuk melalui sejumlah besar modifikasi halus beruntun, teori saya pasti runtuh.

Ada cara lain untuk melihat arti pentingnya kegradualan bagi Darwin. Rekan-rekan sezamannya, sama seperti banyak orang saat ini, kesulitan untuk percaya bahwa tubuh manusia dan entitas-entitas kompleks lain semacamnya dapat dibayangkan mengada lewat cara-cara evolusi. Kalau Anda bayangkan *Amoeba* bersel satu sebagai leluhur jauh kita – seperti lumrah dicontohkan hingga belakangan ini – banyak orang yang kesulitan mencerna garis yang memperantarai *Amoeba* dan manusia. Sulit bagi mereka untuk membayangkan bahwa dari awalan-awalan yang begitu sederhana suatu hal yang begitu kompleks dapat muncul. Darwin mengetengahkan gagasan rangkaian gradual berisi langkah-langkah kecil sebagai cara mengatasi kesangsian semacam ini. Anda mungkin sulit membayangkan *Amoeba* berubah menjadi manusia, bunyi argumen tersebut; tapi Anda tidak sulit membayangkan *Amoeba* berubah menjadi sejenis *Amoeba* lain yang sedikit berbeda. Dari situ, tidak sulit membayangkannya berubah menjadi sejenis lain yang sedikit berbeda dari sejenis lain yang sedikit berbeda dari..., dan seterusnya. Seperti kita lihat di Bab 3, argumen ini mengatasi kesangsian kita hanya jika kita tekankan bahwa tersedia langkah dengan jumlah yang luar biasa besar di sepanjang jalannya, dan hanya jika tiap-tiap langkah tersebut amat mungil. Darwin senantiasa memerangi sumber kesangsian ini, dan ia senantiasa menggunakan senjata yang sama: penekanan pada perubahan yang gradual, yang hampir tak terdeteksi, yang merentang panjang di atas generasi-generasi yang tak terhitung jumlahnya.

Kebetulan, patut dikutip di sini cara pikir nyentrik khas J. B. S. Haldane dalam memerangi sumber kesangsian yang sama. Hal yang mirip seperti peralihan dari *Amoeba* ke manusia, katanya, terjadi di rahim setiap ibu dalam sembilan bulan saja. Perkembangan memang proses yang amat berbeda dari evolusi tapi, biarpun begitu, setiap orang yang skeptis dengan *kemungkinan* peralihan dari makhluk bersel tunggal ke manusia cukup merenungkan asal-mula dirinya di rahim ibunya dan keraguannya pun sirnalah. Saya harap saya tidak dianggap pedantis kalau saya tekankan bahwa, omong-omong, *Amoeba* didaulat menjadi leluhur kehormatan itu sekadar untuk mengikuti tradisi aneh saja. Bakteri sebetulnya lebih tepat, tapi bakteri pun, sebagaimana kita ketahui, merupakan organisme modern.

Melanjutkan argumen tadi, Darwin memberi tekanan keras pada kegradualan evolusi karena pemahaman yang *dilawannya*: kesalahkaprahan tentang evolusi yang jamak terjadi di abad ke-19. *Makna* kata ‘gradual’, dalam konteks masa itu, adalah ‘lawan kata saltasi’. Eldredge dan Gould, di konteks abad 20 akhir, menggunakan kata ‘gradual’ dalam arti yang sangat berbeda. Mereka sebetulnya, meski tidak secara eksplisit, menggunakan kata ini dengan arti ‘pada kecepatan konstan’, dan mereka menentanginya dengan gagasan ‘keberselaan’ mereka sendiri. Mereka mengkritik gradualisme dalam arti ‘speedisme konstan’ ini. Pastinya mereka benar melakukan itu: dalam bentuk ekstremnya gradualisme yang mereka kecam sama absurdnya dengan perumpamaan Keluaran saya.

Tapi menyandingkan kritik yang dapat dibenarkan ini dengan kritik Darwin sama saja dengan merancukan dua makna kata ‘gradual’ yang cukup berbeda. Gradualisme dalam arti yang ditentang Eldredge dan Gould pasti akan pula ditentang Darwin sendiri. Gradual dalam arti Darwin seorang gradualis sejati, Eldredge dan Gould pun sama gradualisnya. Teori kesetimbangan bersela adalah penjelasan minor atas Darwinisme, yang kemungkinan besar disetujui Darwin sendiri kalau saja persoalan tersebut dibahas di masa hidupnya. Sebagai penjelasan minor, ia tidak pantas mendapatkan publisitas yang melewah. Alasan mengapa faktanya teori ini jadi berita besar, dan mengapa saya merasa wajib mencurahkan satu bab penuh dalam buku ini untuknya, adalah karena teori ini dijual – secara berlebihan oleh sebagian

wartawan – sebagai teori yang seolah-olah secara radikal menentang pandangan Darwin dan para penerusnya. Mengapa ini bisa terjadi?

Ada orang-orang di dunia ini yang ingin sekali untuk tidak harus percaya pada Darwinisme. Mereka tampaknya tergolong ke dalam tiga kelas. Pertama, ada yang, untuk alasan-alasan religius, ingin evolusi itu keliru. Kedua, ada yang tidak punya alasan untuk menyangkal bahwa evolusi telah terjadi tetapi yang, seringnya untuk alasan-alasan politis dan ideologis, merasa teori Darwin untuk *mekanisme* evolusi itu menjijikkan. Dari kelas yang kedua ini, sebagian merasa gagasan seleksi alam itu begitu ganas dan kejam; sebagian lagi menyangka seleksi alam itu sama dengan keacakan, dan karenanya ‘ketakberartian’, dan ini menyinggung martabat mereka; dan sebagian lagi merancukan Darwinisme dengan Darwinisme Sosial, yang punya nada-nada tambahan rasis dan tidak mengenakan. Ketiga, ada orang, termasuk mereka yang bekerja di bidang yang disebut ‘media’, yang suka saja melihat huru-hara, mungkin karena huru-hara laku jadi berita; dan Darwinisme sudah cukup mapan dan terhormat untuk bisa diganggu-gugat.

Apa pun motifnya, konsekuensinya adalah: kalau ada sarjana ternama cukup berani mengajukan perkara bisa dianggap sebagai kritik terhadap detail tertentu dari teori Darwinian terkini, fakta ini langsung ditangkap dan dibesar-besarkan. Begitu getolnya niat ini, seolah ia amplifier kuat, dengan mikrofon yang disetel khusus untuk secara selektif mendengarkan apa pun yang, sesayup apa pun, berbunyi seperti bantahan atas Darwinisme. Sangat disayangkan, karena argumen dan kritik serius merupakan bagian vital dari ilmu pengetahuan mana pun, dan tragis kalau ada sarjana yang merasa perlu ikut bersuara hanya karena ada mikrofon di depannya. Tak perlu dikatakan lagi, amplifier ini, walau kuat, bukan amplifier *hi-fi*: ada banyak sekali distorsi! Ilmuwan yang dengan hati-hati membisikkan rasa waswasnya tentang nuansa Darwinisme kiwari akan mendengar letupan dan gaung kata-katanya yang telah terdistorsi dan hampir tidak dapat dikenali melalui pelantang suara yang siap menunggu.

Eldredge dan Gould tidak berbisik, mereka memekik, dengan kefasihan dan kekuatan! Yang mereka teriakkan itu kerap cukup pelik, tetapi pesan yang sampai di seberang sana adalah ada yang salah dengan Darwinisme. Halleluya, ‘para ilmuwan’ sendiri mengatakannya! Editor *Biblical Creation* menulis:

Tak dapat disangkal, kredibilitas kedudukan religius dan ilmiah kita telah makin dikuatkan dengan anjloknya semangat neo-Darwinian baru-baru ini. Dan ini hal yang harus kita manfaatkan betul.

Eldredge dan Gould merupakan jawara perkara dalam pertarungan melawan kreasionisme fundamentalis. Mereka telah memekik protes karena kata-kata mereka disalahgunakan, tapi ternyata, untuk pekikan yang *itu*, mikrofonnya tiba-tiba bisu. Saya tahu rasanya, karena saya pun pernah mengalami hal yang sama dengan perangkat mikrofon lain, yang kali ini disetel secara politis, bukan religius.

Yang perlu lantang dan jelas dikatakan sekarang adalah kebenaran: bahwa teori kesetimbangan bersela kokoh berpijak pada sintesis neo-Darwinian. Senantiasa begitu. Butuh waktu untuk memperbaiki kerusakan akibat retorika yang dibesar-besarkan, tapi pasti akan baik kembali. Teori kesetimbangan bersela kelak akan dipandang pada proporsinya, sebagai kerut kecil yang menarik pada permukaan teori neo-Darwinian. Yang sudah pasti tidak menyebabkan ‘anjloknya semangat neo-Darwinian’, dan sama sekali bukan landasan bagi Gould untuk mengklaim bahwa teori sintesis (nama lain untuk neo-Darwinisme) ‘pada hakikatnya sudah mati’. Seolah dengan ditemukannya fakta bahwa bentuk Bumi ini tidak bulat sempurna tetapi bulat yang sedikit pipih diperlakukan kelewat istimewa lewat tajuk berita:

COPERNICUS BUBAR. TEORI BUMI DATAR TERBUKTI BENAR.

Tapi, harus diakui bahwa komentar Gould tadi tidak begitu diarahkan pada hal yang diduga sebagai ‘gradualisme’ sintesis Darwinian, tetapi pada salah satu dari klaim-klaimnya yang lain. Klaim ini, yang ditentang Eldredge dan Gould, berbunyi bahwa semua evolusi, sekalipun dalam skala waktu geologis terbesar, merupakan ekstrapolasi peristiwa yang terjadi di dalam populasi atau spesies. Mereka percaya bahwa ada bentuk seleksi yang lebih tinggi yang mereka sebut ‘seleksi spesies’. Saya geser pembahasan topik ini ke bab berikutnya. Bab berikutnya juga menjadi tempat kita berhadapan dengan ahli-ahli biologi dari aliran lain yang, atas dasar yang sama rapuhnya, telah beberapa kali disamakan sebagai anti-Darwinian: mereka yang disebut ‘kladistikawan ter-transformasi’. Ini masuk pada bidang umum taksonomi, ilmu klasifikasi.

BAB 10

Satu Pohon Kehidupan yang Sejati

Sebagian besar isi buku ini membahas evolusi sebagai solusi bagi masalah ‘rancangan’ kompleks; evolusi sebagai penjelasan yang benar atas fenomena yang Paley anggap sebagai bukti adanya pembuat arloji ilahi. Itulah mengapa saya terus membahas soal mata dan ekolokasi. Tapi teori evolusi juga menjelaskan satu ranah yang berisi hal-hal lain. Namanya fenomena keanekaragaman: pola berbagai jenis hewan dan tumbuhan yang tersebar ke seluruh dunia, dan persebaran berbagai karakteristik di antara mereka. Walaupun perhatian khusus saya curahkan untuk mata dan mesin-mesin kompleks lainnya, saya tak boleh mengabaikan aspek lain dari peran evolusi dalam membantu kita memahami alam. Karena itu, bab ini tentang taksonomi.

Taksonomi adalah ilmu klasifikasi. Bagi sebagian orang, taksonomi punya reputasi membosankan. Secara tak sadar orang mengaitkannya dengan museum-museum berdebu dan bau cairan pengawet. Orang hampir seperti tak bisa membedakan mana taksonomi mana taksidermi. Kenyataannya, taksonomi jauh dari membosankan. Saya tidak tahu betul mengapa, tapi taksonomi merupakan salah satu bidang dengan kontroversi paling sengit di seluruh ranah biologi. Ia juga menarik perhatian filsuf dan sejarawan. Ilmu ini berperan penting dalam setiap pembicaraan mengenai evolusi. Dan dari dalam kalangan ahli taksonomi telah muncul orang-orang paling lantang dari para ahli biologi modern yang berlagak anti-Darwinian.

Kendati ahli taksonomi biasanya mempelajari hewan atau tumbuhan, segala jenis hal lainnya tetap dapat ditaksonomikan: batu, kapal perang, buku di perpustakaan, bintang, bahasa. Klasifikasi yang rapi kerap dianggap sebagai ukuran kenyamanan, kebutuhan praktis, dan ini memang ada benarnya. Buku-buku di perpustakaan besar hampir tak berguna kalau tidak ditata dengan tertib sehingga buku-buku mengenai hal tertentu dapat ditemukan saat dicari. Ilmu, atau mungkin seni, kepustakawanan merupakan laku taksonomi terapan. Untuk itu pula, ahli biologi merasa hidup mereka jadi lebih mudah kalau hewan dan tumbuhan dapat dikelompokkan ke dalam kategori-kategori yang disepakati dengan nama-nama. Tapi kalau kita anggap inilah satu-satunya alasan untuk taksonomi hewan dan tumbuhan, anggapan kita meleset jauh. Bagi ahli biologi evolusioner, ada suatu hal yang sangat spesial dengan klasifikasi organisme hayati, hal yang tidak ditemukan pada taksonomi jenis lainnya. Hal ini berpangkal dari gagasan evolusi bahwa ada satu pohon keluarga bercabang yang tepat khas dari semua benda hidup, dan kita dapat mendasarkan taksonomi kita pada pohon ini. Selain keunikannya, taksonomi ini memiliki ciri pembeda yang akan saya sebut *sarungan sempurna*. Arti penting hal ini, dan mengapa penting, adalah tema utama dari bab ini.

Kita akan gunakan perpustakaan sebagai contoh taksonomi nonbiologi. Tidak ada solusi tunggal, unik, dan tepat untuk urusan cara mengklasifikasikan buku-buku di perpustakaan atau toko buku. Seorang pustakawan mungkin membagi koleksinya ke dalam kategori-kategori besar berikut: sains, sejarah, sastra, seni lainnya, buku berbahasa asing, dll. Masing-masing dari bagian utama perpustakaan ini akan dibagi lebih kecil lagi. Sayap buku-buku sains di perpustakaan mungkin dibagi lagi ke dalam biologi, geologi, kimia, fisika, dan seterusnya. Buku-buku di bagian biologi dari sayap sains mungkin dibagi lagi ke dalam rak-rak yang dikhususkan untuk fisiologi, anatomi, biokimia, entomologi, dan seterusnya. Akhirnya, di dalam tiap rak, buku-buku tersebut dapat disusun sesuai urutan abjad. Sayap-sayap besar lain dari perpustakaan ini (sejarah,

sastra, buku berbahasa asing, dan seterusnya) akan dibagi lagi dengan cara yang sama. Oleh karena itu, perpustakaan dibagi sedemikian hierarkis sehingga pembaca dapat menemukan buku yang diinginkannya. Klasifikasi hierarkis ini dirasa nyaman karena peminjam buku dapat dengan cepat menemukan buku yang dicari di antara semua koleksi buku yang ada. Untuk alasan yang sama, kata-kata di dalam kamus juga disusun menurut abjad.

Tapi tidak ada hierarki unik untuk menata buku-buku di perpustakaan. Pustakawan lain mungkin memilih untuk menata koleksi buku yang sama dengan cara yang lain, tapi tetap hierarkis. Misalnya, ia mungkin tidak memisahkan buku-buku berbahasa asing, tapi lebih suka mengelompokkan buku, terlepas dari bahasanya, sesuai bidang-bidangnya saja: buku biologi berbahasa Jerman di bagian biologi, buku sejarah berbahasa Jerman di bagian sejarah, dan seterusnya. Pustakawan ketiga mungkin menerapkan kebijakan radikal dengan mengelompokkan semua buku, apa pun bidangnya, dalam tata kronologi penerbitannya, dan mengandalkan indeks-indeks kartu (atau program komputer padanannya) untuk menemukan buku dengan topik yang diinginkan.

Tiga tata susun perpustakaan ini agak berbeda satu sama lain, tapi ketiganya mungkin cukup memadai dan dirasa dapat diterima oleh banyak pembaca, walau kebetulan tidak oleh seorang anggota klub baca London yang rewel, yang pernah saya dengar di radio tengah mencaci maki panitia klubnya karena mempekerjakan seorang pustakawan. Perpustakaan itu baik-baik saja selama seratus tahun tanpa penataan, dan ia tidak melihat perlu adanya penataan sekarang. Penyiar dengan halus bertanya seperti apa menurutnya buku-buku perlu ditata. ‘Yang paling tinggi di kiri, paling pendek di kanan!’, sahutnya lantang tanpa ragu. Toko-toko buku populer mengklasifikasikan buku-buku mereka ke dalam bagian-bagian utama yang mencerminkan permintaan pasar. Alih-alih sains, sejarah, sastra, geografi, dan seterusnya, bagian-bagian utama mereka adalah berkebun, boga, ‘judul-judul TV’, okultisme, dan saya pernah melihat satu rak dengan label mencolok ‘AGAMA DAN UFO’.

Jadi, tidak ada satu solusi *tepat* untuk urusan cara mengklasifikasikan buku. Pustakawan bisa saja dengan wajar saling tidak bersepakat soal kebijakan klasifikasi yang diterapkan rekan seprofesinya, tetapi kriteria menang atau kalah dalam adu pendapat ini tidak mencakup ‘kebenaran’ atau ‘ketepatan’ dari satu sistem klasifikasi dibanding yang lain. Agaknya, kriteria yang mereka persengketakan adalah ‘kenyamanan pengguna perpustakaan’, ‘kecepatan menemukan buku’, dan seterusnya. Artinya, taksonomi buku di perpustakaan bisa dibilang bersifat manasuka. Bukan berarti merancang sistem klasifikasi yang baik itu tidak penting; sama sekali bukan. Maksud saya, tidak ada satu sistem klasifikasi yang, dalam dunia informasi sempurna, akan secara universal disepakati sebagai satu-satunya klasifikasi yang tepat. Di lain pihak, taksonomi makhluk hidup, seperti kita lihat nanti, memiliki ciri kuat yang tidak dimiliki taksonomi buku; setidaknya begitu kalau kita pakai sudut pandang evolusi.

Tentu, kita bisa saja merancang berapa pun sistem untuk mengklasifikasikan makhluk hidup, tapi saya akan tunjukkan bahwa semua kecuali satu dari sistem-sistem ini sama manasukanya dengan taksonomi pustakawan mana pun. Kalau cuma kenyamanan yang dicari, seorang kurator museum bisa saja mengklasifikasikan semua spesimennya menurut ukuran dan kondisi penyimpanan: spesimen besar dengan isian; spesimen kecil yang dikeringkan dan dipajang di papan tusuk di atas bidang nampan; spesimen yang diawetkan di dalam botol; spesimen mikroskopis di atas salindia, dan seterusnya. Pengelompokan berdasarkan kenyamanan itu biasa

dipakai di kebun binatang. Di Kebun Binatang London, badak ditempatkan di 'Kandang Gajah' hanya karena mereka membutuhkan kandang yang dibentengi kuat seperti kandang gajah. Ahli biologi terapan mungkin mengklasifikasikan hewan ke dalam kelompok berbahaya (yang dibagi lagi ke dalam hama medis, hama pertanian, dan hewan penggigit dan penyengat), kelompok bermanfaat (yang dibagi lagi dengan cara yang mirip), dan kelompok netral. Seorang ahli gizi mungkin mengklasifikasikan hewan menurut nilai pangan dari daging mereka bagi manusia, dan dengan pembagian terperinci ke kategori-kategori lebih kecil. Nenek saya pernah menyulam buku kain tentang hewan untuk anak-anak, yang mengklasifikasikan hewan menurut kakinya. Ahli antropologi telah mendokumentasikan berbagai sistem rumit taksonomi hewan yang digunakan suku-suku bangsa di seluruh dunia.

Tetapi dari semua klasifikasi yang dapat dibayangkan ini, ada satu sistem yang unik, unik dalam arti kata-kata seperti 'tepat' dan 'keliru', 'benar' dan 'salah' dapat diterapkan pada sistem ini dengan kesepakatan sempurna atas dasar informasi sempurna. Sistem khas ini adalah sistem yang berdasar pada hubungan-hubungan evolusioner. Agar tidak bingung, saya akan menamai sistem ini sesuai nama yang diberikan para ahli biologi dalam bentuknya yang paling saklek: taksonomi kladistik.

Dalam taksonomi kladistik, kriteria puncak pengelompokan organisme adalah kedekatan kesepupuan atau, dengan kata lain, kebaruan relatif leluhur bersama. Burung, misalnya, dibedakan dari nonburung oleh fakta bahwa mereka semua turun dari satu leluhur bersama, yang bukan leluhur hewan nonburung mana pun. Semua mamalia turun dari satu leluhur bersama, yang bukan leluhur dari hewan nonmamalia mana pun. Burung dan mamalia memiliki satu leluhur jauh bersama jauh, yang juga merupakan leluhur bagi banyak hewan lainnya seperti ular dan kadal dan tuatara. Hewan-hewan yang turun dari leluhur bersama ini disebut amniota. Jadi, burung dan mamalia adalah amniota. 'Reptilia' bukan istilah taksonomis tulen, menurut kaum kladistika, karena istilah ini didefinisikan dengan pengecualian: semua amniota kecuali burung dan mamalia. Dengan kata lain, leluhur bersama terbaru dari semua 'reptilia' (ular, kura-kura, dll.) juga merupakan leluhur dari beberapa non'reptilia', yaitu burung dan mamalia.

Di dalam mamalia, tikus dan mencit memiliki satu leluhur bersama yang baru; macan tutul dan singa memiliki satu leluhur bersama yang baru; begitu juga dengan simpanse dan manusia. Hewan-hewan yang berkerabat dekat adalah hewan-hewan yang memiliki satu leluhur bersama yang baru. Hewan-hewan yang berkerabat jauh memiliki satu leluhur bersama yang lebih dini. Hewan-hewan yang berkerabat sangat jauh, seperti manusia dan siput, memiliki satu leluhur bersama yang sangat dini. Pertalian kekerabatan di antara semua organisme tidak akan dapat diputus, karena hampir pasti bahwa kehidupan yang kita kenal ini bermula sekali saja di bumi.

Taksonomi kladistik sejati bersifat hierarkis ketat, ungkapan yang akan saya gunakan untuk maksud bahwa ia dapat direpresentasikan sebagai pohon yang cabang-cabangnya selalu membelah dan tidak pernah menyatu lagi. Dalam pandangan saya (yang tidak disepakati beberapa aliran ahli taksonomi yang akan kita bahas nanti), sifatnya hierarkis ketat *bukan* karena klasifikasi hierarkis itu nyaman, seperti klasifikasi pustakawan, bukan pula karena segala sesuatu di dunia ini secara alami masuk ke dalam sebuah pola hierarkis, tetapi karena pola garis keturunan evolusioner itu bersifat hierarkis. Begitu pohon kehidupan telah mencabang melampaui jarak minimum tertentu (yang pada dasarnya berarti memisah menjadi spesies berbeda), cabang-cabang tersebut tidak akan pernah menyatu lagi (mungkin ada pengecualian yang sangat langka, seperti asal-mula sel eukariotik yang telah disebut di Bab 7). Burung dan mamalia turun dari satu leluhur bersama, tetapi keduanya kini merupakan cabang tersendiri

dalam pohon evolusi, dan keduanya tidak akan menyatu kembali: tidak akan pernah ada blasteran burung dan mamalia. Sekelompok organisme yang berciri turun dari satu leluhur bersama, yang bukan leluhur bagi nonanggota kelompok itu, disebut *clade*, kata bahasa Yunani untuk cabang pohon.

Cara lain untuk merepresentasikan gagasan hierarki ketat ini adalah dengan konsep ‘sarangan sempurna’. Kita tulis nama-nama sekelompok hewan di atas selembar besar kertas dan kita gambar lingkaran di sekeliling hewan-hewan yang berkerabat. Contohnya, tikus dan mencit dapat disatukan ke dalam lingkaran kecil, yang menandakan bahwa keduanya merupakan sepupu dekat, dengan satu leluhur bersama yang baru. Marmot dan kapibara dapat disatukan ke dalam lingkaran kecil yang lain. Lingkaran tikus/mencit dan lingkaran marmot/kapibara (dan berang-berang dan landak dan tupai dan banyak hewan lainnya) kemudian dapat disatukan ke dalam lingkaran yang lebih besar dengan namanya sendiri, hewan pengerat. Lingkaran-lingkaran dalam ‘disarankan’ di lingkaran-lingkaran luar yang lebih besar. Di tempat lain di kertas tersebut, singa dan harimau dapat disatukan ke dalam lingkaran kecil yang lain. Lingkaran ini akan disertakan bersama yang lainnya ke dalam satu lingkaran berlabel kucing. Kucing, anjing, musang, beruang, dll. semuanya akan disatukan, dalam serangkaian lingkaran di dalam lingkaran, ke dalam satu lingkaran besar berlabel karnivora. Lingkaran pengerat dan lingkaran karnivora kemudian dapat disertakan ke dalam rangkaian lingkaran di dalam lingkaran yang lebih global pada satu lingkaran yang amat besar berlabel mamalia.

Ciri penting dari sistem lingkaran di dalam lingkaran ini adalah ia *disarankan sempurna*. Tidak sekali pun lingkaran-lingkaran yang kita gambar akan saling bersilangan. Kalau ada dua lingkaran yang tumpang-tindih, sudah pasti lingkaran yang satu sepenuhnya berada di dalam lingkaran yang lain. Area yang masuk ke dalam lingkup lingkaran dalam selalu tercakup sepenuhnya di dalam lingkup lingkaran luar: tidak ada yang tumpang-tindih sebagian. Ciri sarangan taksonomis sempurna ini tidak ada pada klasifikasi buku, bahasa, jenis tanah, atau aliran pemikiran dalam filsafat. Kalau seorang pustakawan menggambar satu lingkaran di sekeliling buku-buku biologi dan lingkaran lain di sekeliling buku-buku teologi, kedua lingkaran ini akan tumpang-tindih. Zona tumpang-tindih tersebut berisi buku dengan judul seperti ‘Biologi dan Iman Kekristenan’.

Kita mungkin mengira bahwa klasifikasi bahasa akan menunjukkan ciri sarangan sempurna juga. Bahasa, seperti kita lihat di Bab 8, berevolusi dengan cara yang mirip evolusi hewan. Bahasa-bahasa yang lebih belakangan memisah dari satu leluhur bersama, seperti Swedia, Norwegia, dan Denmark, jauh lebih mirip satu sama lain, daripada dengan bahasa-bahasa yang telah memisah jauh sebelumnya, seperti bahasa Islandia. Dan bahasa tidak hanya memisah, tapi juga menyatu. Bahasa Inggris Modern merupakan campuran bahasa-bahasa Jermanik dan Roman yang telah memisah jauh lebih dini, dan karena itu bahasa Inggris tidak muat pas ke dalam diagram sarangan hierarkis apa pun. Lingkaran-lingkaran yang melingkupi bahasa Inggris akan bersilangan, tumpang-tindih sebagian. Lingkaran-lingkaran klasifikasi biologis tidak pernah bersilangan seperti ini, karena evolusi biologis di atas level spesies selalu memisah.

Kembali ke contoh perpustakaan, tidak satu pun pustakawan bisa sepenuhnya menghindari masalah perantara atau tumpang-tindih. Tidak ada gunanya menempatkan bagian buku biologi di sebelah buku teologi dan menaruh buku-buku perantaranya di lorong di tengah-tengah kedua bagian tersebut; karena kemudian bagaimana dengan buku-buku perantara biologi dan kimia, fisika dan teologi, sejarah dan teologi, sejarah dan biologi? Rasanya benar kalau saya bilang masalah perantara ini merupakan bagian tak terelakkan, bagian inheren, dari semua sistem taksonomi selain taksonomi biologi evolusioner. Saya pribadi hampir selalu pusing saat mencoba

mengerjakan tugas-tugas pemberkasan sederhana dalam kehidupan profesional saya: menata buku-buku saya sendiri dan salinan cetak makalah ilmiah yang dikirim (dengan niat baik) oleh kolega ke dalam rak-rak; memberkaskan dokumen-dokumen administratif; surat-surat lama, dan seterusnya. Apa pun kategori yang dipakai untuk sistem pemberkasan, ada saja hal-hal ganjil yang tidak pas, dan kebingungan yang bikin risi ini, sayangnya, membuat saya terpaksa menaruh kertas-kertas ganjil itu di atas meja, kadang sampai bertahun-tahun hingga aman dibuang. Orang sering terpaksa pasrah dan menggunakan kategori 'lain-lain' untuk berkas-berkas ganjil. Kategori ini, begitu dimulai, punya kecenderungan jahat untuk tumbuh, seperti bisul. Saya kadang bertanya-tanya apakah pustakawan, dan kurator semua museum kecuali museum biologi, memang rentan terkena bisul.

Dalam taksonomi makhluk hidup, masalah-masalah pemberkasan ini tidak muncul. Tidak ada hewan 'lain-lain'. Selama kita tetap berada di atas level spesies, dan selama kita mempelajari hewan-hewan modern saja (atau hewan-hewan pada satu irisan waktu tertentu: lihat di bawah), perantara ganjil itu tidak ada. Kalau ada hewan ganjil yang tampak seperti perantara ganjil, katakanlah tampak persis seperti perantara di tengah-tengah mamalia dan burung, seorang evolusionis bisa yakin bahwa hewan tersebut, kalau bukan yang mamalia, *sudah pasti* burung. Kenampakan perantara ini pastilah ilusi. Pustakawan malang tadi tidak bisa seyakini ini. Sangat mungkin bahwa sebuah buku memang masuk ke kategori sejarah DAN biologi. Ahli biologi yang condong ke kladistika tak pernah terjebak perdebatan ala pustakawan soal 'nyaman' tidaknya mengklasifikasikan paus sebagai mamalia atau sebagai ikan, atau sebagai perantara mamalia dan ikan. Satu-satunya argumen yang ada ialah argumen soal fakta. Dalam hal ini, kebetulan, fakta-fakta yang ada membuat semua ahli biologi modern menarik kesimpulan yang sama. Paus itu mamalia, bukan ikan. Dan paus sama sekali bukan hewan perantara. Paus tidak lebih dekat ke ikan dibanding manusia, atau platipus paruh-bebek, atau semua mamalia lainnya.

Malah, penting dipahami bahwa semua mamalia – manusia, paus, platipus paruh-bebek, dan semua lainnya – *sama persis* dekatnya dengan ikan, karena semua mamalia terhubung dengan ikan melalui satu leluhur bersama. Mitos bahwa mamalia, misalnya, tersusun seperti tangga atau 'skala', dan yang 'lebih rendah' itu lebih dekat ke ikan dibanding yang 'lebih tinggi', merupakan kepongahan yang tak ada urusannya dengan evolusi. Pandangan itu merupakan gagasan kuno pra-evolusi yang kadang diistilahkan 'rantai besar makhluk hidup', yang mestinya sudah ditumpas habis evolusi tapi, anehnya, terserap ke cara pikir orang banyak tentang evolusi.

Di titik ini saya tak bisa tak mengetengahkan ironi dalam tantangan yang gemar dilontarkan kaum kreasionis kepada kaum evolusionis: 'Mana hewan-hewan perantaramu? Kalau evolusi itu benar, mestinya ada hewan yang setengah jalan dari kucing ke anjing, atau dari katak ke gajah. Tapi apa pernah kita lihat kajah?' Saya pernah dikirim pamflet kreasionis yang mencoba mengolok-olok evolusi dengan gambar-gambar khimaera aneh, hewan setengah kuda setengah anjing, misalnya. Pembuat pamflet tampak membayangkan bahwa kaum evolusionis pasti menganggap hewan-hewan perantara semacam itu ada. Bukan hanya meleset, bayangan ini justru antitesis dari pokok pikiran evolusi. Salah satu anggapan terkuat yang diberikan teori evolusi kepada kita adalah bahwa hewan-hewan perantara semacam ini memang mestinya *tidak* ada. Inilah tujuan saya membandingkan hewan dengan buku perpustakaan.

Taksonomi makhluk hidup yang berevolusi, karenanya, memiliki ciri istimewa menghadirkan kesepakatan sempurna di dunia informasi sempurna. Itu maksud saya saat menulis bahwa kata-kata seperti 'benar' dan 'salah' bisa diterapkan pada klaim-klaim taksonomi kladistik, tetapi tidak pada klaim-klaim taksonomi pustakawan. Tapi ada dua hal yang membuat pernyataan ini

tidak absolut. Pertama, di dunia nyata, tidak ada informasi sempurna. Para ahli biologi bisa saja saling tidak bersepakat mengenai fakta-fakta garis keturunan, dan perselisihan ini mungkin sulit didamaikan karena informasi yang tidak sempurna – fosilnya kurang, misalnya. Saya akan kembali ke soal ini nanti. Kedua, masalah lain muncul kalau fosil yang kita punya terlalu *banyak*. Pembedaan klasifikasi yang tegas dan jelas rentan pudar jika kita mencoba menyertakan semua hewan yang pernah hidup, bukan hewan modern saja. Ini karena, seberapa jauh pun kekerabatan dua hewan modern – katakanlah burung dan mamalia – keduanya, dahulu kala, memang memiliki satu leluhur bersama. Kalau kita mencoba memasukkan si leluhur itu ke dalam klasifikasi modern, mungkin ada masalah.

Begitu hewan-hewan yang sudah punah kita ikutkan ke dalam hitungan, tidak lagi benar bahwa tidak ada hewan perantara. Sebaliknya, kita kini terpaksa menghadapi serangkaian hewan perantara yang mungkin berkesinambungan. Pembedaan antara burung modern dan hewan nonburung modern seperti mamalia itu jelas tegas hanya karena semua perantara yang menyatu-balik ke leluhur bersama tadi sudah mati. Untuk menguatkan poin ini, coba ingat lagi contoh alam yang ‘baik hati’, yang memberikan kita catatan fosil yang lengkap; genap dengan fosil setiap hewan yang pernah hidup. Saat saya kemukakan fantasi ini di bab sebelumnya, saya berkata bahwa bisa juga kita menganggap alam sebetulnya tidak sedang berbaik hati. Saya kemudian membayangkan kerja keras yang mesti dilakukan untuk mempelajari dan mendeskripsikan semua fosil ini. Namun, kali ini kita berhadapan dengan segi lain dari ketakramahan alam yang paradoksal ini. Catatan fosil yang lengkap akan sangat menyulitkan kerja klasifikasi hewan ke dalam kelompok-kelompok diskret yang dapat dinamai. Kalau catatan fosil kita lengkap, kita harus meninggalkan nama-nama diskret dan terpaksa menggunakan notasi matematis atau grafis dari skala-skala berjenjang. Akal manusia jauh lebih menyukai nama-nama diskret, jadi dalam arti tertentu tidak masalah bahwa catatan fosil kurang lengkap.

Kalau kita menyertakan semua hewan yang pernah hidup alih-alih hewan modern saja, kata-kata seperti ‘manusia’ dan ‘burung’ menjadi sama kabur dan samar batas maknanya seperti ‘tinggi’ dan ‘gemuk’. Ahli zoologi bisa terjebak debat kusir soal apakah fosil tertentu itu burung atau bukan burung. Memang mereka kerap memperdebatkan pertanyaan ini untuk fosil terkenal *Archaeopteryx*. Ternyata pembedaan ‘burung/nonburung’ itu lebih jelas ketimbang ‘tinggi/pendek’ hanya karena dalam perkara ‘burung/nonburung’ semua perantara ganjilnya sudah mati. Kalau dunia ini dilanda wabah aneh yang secara selektif membunuh semua orang dengan tinggi badan rata-rata, makna ‘tinggi’ dan ‘pendek’ akan sama uniknya dengan ‘burung’ atau ‘mamalia’.

Bukan hanya klasifikasi zoologis saja yang selamat dari ketaksaan ganjil hanya karena fakta bahwa sebagian besar perantaranya kini sudah punah. Demikian pula dengan etika dan hukum manusia. Tata hukum dan moral kita begitu kuat bertumpu pada diskriminasi spesies. Direktur sebuah kebun binatang secara hukum sah ‘menidurkan’ seekor simpanse yang merupakan surplus dari jumlah yang dibutuhkan, sementara prasaran bahwa ia boleh ‘menidurkan’ pawang atau penjual tiket yang mubazir akan disambut dengan pekik entak kemarahan. Simpanse adalah properti kebun binatang. Dewasa ini, manusia tidak boleh dianggap properti siapa pun, tapi dasar untuk membedakan manusia dari simpanse seperti ini jarang dipaparkan, dan saya sangsi apakah memang ada dasar pembedaan yang bisa dipertahankan. Begitu mencengangkan spesiesisme sikap yang diilhami paham kekristenan kita ini, sampai-sampai pengguguran satu zigot manusia (yang kebanyakan memang bernasib langsung gugur) dapat memicu lebih banyak keprihatinan moral dan kegeraman yang dianggap pantas ketimbang pembedaan untuk alasan penelitian

(*vivisection*) simpanse cerdas dewasa sebanyak apa pun! Saya pernah mendengar ilmuwan-ilmuwan santun dan liberal, yang tidak punya niat memotong-motong simpanse hidup, tetapi tegas membela *hak* mereka untuk melakukannya kalau dirasa perlu, tanpa campur tangan hukum. Orang-orang semacam ini sering menjadi pihak pertama yang meradang melihat pelanggaran hak-hak *manusia*, sekecil apa pun. Satu-satunya alasan kita bisa nyaman dengan standar ganda seperti ini adalah karena semua hewan perantara manusia dan simpanse sudah mati.

Leluhur bersama terakhir manusia dan simpanse mungkin hidup baru lima juta tahun yang lalu, jelas lebih baru dari leluhur bersama simpanse dan orang utan, dan mungkin 30 juta tahun lebih baru dari leluhur bersama simpanse dan monyet. Gen-gen simpanse dan kita 99 persen sama. Kalau, di pulau-pulau terlupakan di seluruh dunia ini, para penyintas dari semua hewan perantara hingga ke leluhur bersama simpanse/manusia ditemukan, siapa yang bisa meragukan pengaruh besar hal ini terhadap konvensi hukum dan moral kita, khususnya karena ada kemungkinan kawin-silang di sepanjang spektrum tersebut? Dampaknya: seluruh spektrum akan diberi hak asasi manusia yang sama rata (Hak Pilih untuk Simpanse) atau akan ada sistem hukum diskriminatif rumit mirip apartheid, lengkap dengan pengadilan yang memutuskan apakah individu tertentu itu secara hukum ‘simpanse’ atau ‘manusia’; dan orang akan resah karena anak perempuannya mungkin ingin menikah dengan salah satu dari ‘mereka’. Saya kira dunia ini sudah terlalu purna dijelajahi sehingga kita tidak usah berharap fantasi ini terwujud. Tapi barang siapa mengira bahwa ‘hak asasi’ manusia itu memang jernih dan terbukti jelas, ia perlu merenungkan bahwa kita cuma beruntung karena makhluk-makhluk perantara yang memalukan ini kebetulan tidak bertahan hidup. Atau, mungkin kalau simpanse tidak ditemukan hingga kini, merekalah yang akan dipandang sebagai makhluk perantara yang memalukan itu.

Pembaca bab sebelumnya mungkin berkomentar bahwa seluruh argumen ini – kategori-kategori menjadi kabur kalau kita sertakan hewan-hewan yang sudah punah – berasumsi bahwa evolusi berlangsung dengan kecepatan konstan, dan bukan bersela. Makin kita memandang evolusi mendekati titik ekstrem perubahan mulus terus-menerus, makin kita pesimis dengan kemungkinan penerapan kata-kata seperti burung atau nonburung, manusia atau nonmanusia, ke semua hewan yang pernah hidup. Seorang saltasionis garis keras bisa percaya bahwa manusia pertama itu benar-benar ada, manusia yang otak mutannya dua kali lebih besar dari otak ayahnya dan dari otak saudara mirip simpansenya.

Para pendukung kesetimbangan bersela sebagian besar, seperti sudah kita lihat, bukan saltasionis sejati. Akan tetapi, bagi mereka masalah ketaksaan nama-nama ini pasti tidak separah ketaksaan yang ditimbulkan pandangan yang bersifat lebih berkelanjutan. Masalah penamaan, bagi kaum keberselaan sekali pun, akan timbul jika setiap hewan yang pernah hidup terawetkan sebagai fosil, karena kalau kita periksa sampai ke detailnya, mereka ini sebetulnya juga gradualis. Tapi, karena mereka berasumsi bahwa kecil kemungkinan untuk menemukan fosil-fosil yang mendokumentasikan kurun-kurun singkat peralihan cepat, dan secara khusus lebih mungkin menemukan fosil-fosil yang mendokumentasikan kurun-kurun panjang stasis, ‘masalah penamaan’ dalam pandangan evolusi bersela tidak separah pandangan nonbersela.

Untuk alasan inilah kaum keberselaan, khususnya Niles Eldredge, menegaskan perlunya memperlakukan ‘spesies’ sebagai ‘entitas’ nyata. Bagi orang nonkeberselaan, ‘spesies’ dapat didefinisikan hanya karena para perantara ganjilnya sudah mati. Orang antikeberselaan garis keras, dengan rentang pandang keseluruhan riwayat evolusi yang panjang, sama sekali tidak dapat melihat ‘spesies’ sebagai entitas diskret. Yang dapat dilihatnya hanyalah malaran yang lumur saja. Dalam pandangannya spesies tidak pernah memiliki awal pasti, dan hanya sesekali

saja memiliki akhir yang pasti (kepunahan); seringkali, suatu spesies tidak berakhir tuntas, tapi secara bertahap (gradual) menjadi spesies baru. Di lain pihak, seorang penganut paham keberselaan melihat spesies itu mewujud pada satu titik waktu tertentu (pasti ada kurun peralihan dalam durasi puluhan ribu tahun, tapi durasi ini pendek menurut standar geologi). Selain itu, ia melihat spesies itu memiliki akhir yang pasti, atau setidaknya tercapai dengan cepat, bukan pemudaran gradual ke spesies baru. Dalam pandangan paham keberselaan, karena sebagian besar hidup suatu spesies itu berlalu dalam masa stasis (tidak berubah), dan karena spesies memiliki awal dan akhir yang diskret, suatu spesies bisa dibilang memiliki 'rentang hidup' yang pasti dan dapat diukur. Pihak yang nonkeberselaan tidak menganggap spesies itu punya 'rentang hidup' seperti satu organisme. Kaum keberselaan ekstrem melihat 'spesies' sebagai entitas diskret yang memang pantas mendapatkan namanya sendiri. Kaum antikeberselaan ekstrem melihat 'spesies' sebagai kepanjangan manasuka dari sungai yang terus mengalir, yang tidak perlu ditarik garis batas awal dan akhirnya.

Dalam buku yang ditulis penganut keberselaan tentang sejarah satu kelompok hewan, katakanlah kuda selama 30 juta tahun terakhir, tokoh-tokoh dalam drama tersebut mungkin semuanya spesies dan bukan organisme-organisme individu, karena penulis penganut keberselaan ini berpikir spesies itu 'benda' nyata, dengan jati diri diskretnya sendiri. Spesies akan tiba-tiba masuk ke latar adegan, dan tiba-tiba juga hilangnya, digantikan spesies penerus. Ceritanya akan menjadi sejarah suksesi, dengan satu spesies diganti-teruskan oleh spesies lain. Tapi kalau seorang antikeberselaan menulis sejarah yang sama, ia akan menggunakan nama-nama spesies untuk kemudahan yang samar saja. Ketika ia melihat garis waktu secara membujur, ia berhenti melihat spesies sebagai entitas diskret. Aktor-aktor asli dalam dramanya adalah organisme-organisme individu dalam populasi-populasi yang berubah. Dalam bukunya, hewan-hewan individulah yang memberi jalan ke hewan-hewan individu keturunannya, bukan spesies ke spesies. Karena itu, tidak mengejutkan kalau kaum keberselaan cenderung percaya pada jenis seleksi alam pada level spesies, yang mereka anggap analog dengan seleksi Darwinian pada level individu biasa. Di lain pihak, kaum nonkeberselaan lebih condong melihat seleksi alam berfungsi pada level yang tidak lebih tinggi dari individu organisme. Gagasan 'seleksi spesies' kurang menarik bagi mereka, karena mereka tidak menganggap spesies sebagai entitas dengan keberadaan diskret di sepanjang waktu geologis.

Ini saat yang tepat untuk menjajaki hipotesis seleksi spesies, yang agaknya belum tuntas dibahas di bab sebelumnya. Saya tidak akan terlalu lama membahasnya karena di buku *The Extended Phenotype* telah panjang lebar saya paparkan keraguan saya mengenai arti penting hipotesis ini dalam evolusi. Benar bahwa mayoritas besar spesies yang pernah hidup sudah punah. Benar juga bahwa kecepatan kemunculan spesies baru setidaknya seimbang dengan kecepatan kepunahan, sehingga ada semacam 'kolam spesies' yang komposisinya senantiasa berubah. Perekrutan nonacak ke dalam kolam spesies dan penghapusan nonacak sebuah spesies darinya, secara teoretis, memang boleh jadi merupakan sejenis seleksi alam di level yang lebih tinggi. Mungkin bahwa karakteristik tertentu dari spesies dapat membiaskan probabilitas kepunahannya, atau kemungkinannya melahirkan spesies baru. Spesies-spesies yang sekarang ini kita lihat di dunia cenderung memiliki segala yang dibutuhkan untuk mengada – untuk 'terspesiasikan' – dan segala yang dibutuhkan untuk tidak punah. Anda bisa sebut itu bentuk seleksi alam kalau mau, walau saya duga itu lebih dekat dengan seleksi selangkah ketimbang seleksi kumulatif. Saya skeptis dengan prasaran bahwa jenis seleksi ini signifikan artinya dalam menjelaskan evolusi.

Mungkin ini hanya mencerminkan bias pandangan saya mengenai apa yang penting. Seperti saya katakan di awal bab ini, yang saya kehendaki dari teori evolusi adalah menjelaskan mekanisme-mekanisme kompleks terancang baik seperti jantung, tangan, mata, dan ekolokasi. Tak satu orang pun, bahkan pendukung seleksi spesies paling heboh sekali pun, berpikir bahwa seleksi spesies dapat melakukannya. Ada orang yang memang berpikir bahwa seleksi spesies dapat menjelaskan tren-tren jangka panjang tertentu dalam catatan fosil, seperti tren, yang lumayan lazim diamati, membesarnya ukuran tubuh seiring berjalannya waktu. Kuda-kuda modern, seperti telah kita lihat, lebih besar dari leluhur mereka 30 juta tahun yang lalu. Penganut seleksi spesies menolak gagasan bahwa hal ini terjadi melalui keuntungan individu yang konsisten: mereka menganggap tren fosil tidak mengindikasikan bahwa kuda-kuda itu secara konsisten lebih berhasil dari kuda-kuda kecil dalam spesies mereka. Seperti ini mereka pikir kejadiannya. Ada banyak spesies, sebuah kolam spesies. Pada sebagian dari spesies-spesies ini, ukuran tubuh rata-ratanya besar, pada sebagian lain kecil (mungkin karena pada beberapa spesies individu-individu besar paling berhasil, dan di spesies-spesies lain individu-individu kecil paling berhasil). Spesies-spesies dengan ukuran tubuh besar lebih kecil kemungkinannya untuk punah (atau lebih besar kemungkinannya untuk bertunas ke spesies-spesies baru seperti mereka) dibandingkan spesies-spesies berukuran tubuh kecil. Apa pun yang berlangsung di dalam spesies-spesies tersebut, menurut penganut seleksi spesies, tren fosil ke arah ukuran tubuh yang lebih besar terjadi karena adanya suksesi *spesies* dengan ukuran tubuh rata-rata yang membesar. Bahkan, kendati dalam mayoritas spesies tersebut individu-individu yang *lebih kecil* itu dipilih, tren fosilnya tetap bisa mengarah ke ukuran tubuh yang lebih besar. Dengan kata lain, seleksi *spesies* dapat memilih kelompok minoritas spesies di mana individu-individu berukuran lebih besarnya dipilih. Poin ini diajukan, sebagai hasutan memang, oleh teoretikus besar neo-Darwinian George C. Williams, jauh sebelum seleksionisme spesies modern tampil ke permukaan.

Bisa dibilang, yang ada di sini, dan mungkin di semua hal yang diduga sebagai contoh seleksi spesies, bukanlah tren evolusi, tetapi lebih ke tren *suksesi*, seperti tren ke arah tumbuhan yang makin besar saat sebidang lahan tidur dihuni secara beruntun oleh rumput liar kecil, herba yang lebih besar, semak belukar, dan akhirnya, pohon hutan ‘puncak’ yang dewasa. Apa pun Anda menyebutnya, tren suksesi atau tren evolusi, penganut seleksionisme spesies sah untuk meyakini bahwa tren jenis inilah yang kerap mereka hadapi, sebagai ahli paleontologi, dalam strata beruntun catatan fosil. Tapi, seperti saya bilang tadi, tak satu orang pun menganggap seleksi spesies sebagai penjelasan penting atas adaptasi kompleks. Ini alasannya.

Adaptasi kompleks seringkali bukan merupakan ciri spesies, melainkan ciri individu. Spesies tidak punya mata dan jantung; individu di dalam spesies itulah yang punya. Kalau ada spesies yang punah karena penglihatan buruk, mungkin ini berarti setiap individu di dalam spesies tersebut mati karena penglihatan buruk. Mutu penglihatan merupakan ciri hewan-hewan individu. Ciri seperti apa yang bisa dibilang dimiliki *spesies*? Jawabannya pasti ciri-ciri yang memengaruhi ketahanan hidup dan reproduksi spesies tersebut, yang tidak dapat direduksi ke nilai efek-efeknya terhadap ketahanan hidup dan reproduksi individunya. Pada contoh kuda tadi, saya mengemukakan bahwa minoritas spesies di mana individu-individu lebih besarnya dipilih lebih berpeluang untuk tidak punah dibanding mayoritas spesies di mana individu-individu lebih kecilnya dipilih. Tapi ini kurang meyakinkan. Sulit membayangkan mengapa daya ketahanan hidup spesies mesti terpisah dari semua daya ketahanan hidup anggota-anggota individu spesies tersebut.

Contoh hipotetis berikut ini adalah contoh yang lebih baik untuk ciri tingkat spesies. Misalkan di satu spesies cara hidup semua individunya sama. Semua koala, contohnya, hidup di pohon-pohon eukaliptus dan hanya makan daun eukaliptus. Spesies seperti ini bisa dibilang seragam. Spesies lain mungkin memiliki beraneka-ragam individu yang berbeda-beda cara hidupnya. Tiap individu bisa saja sama spesialisnya dengan satu individu koala, tapi spesies tersebut, secara keseluruhan, memiliki pola makan yang beragam. Sebagian anggota spesies itu hanya makan daun eukaliptus; sebagian lain hanya gandum; sebagian lain hanya ubi rambat; sebagian lagi hanya kulit limau, dan seterusnya. Sebutlah jenis spesies kedua ini spesies beragam. Nah, saya rasa mudah membayangkan keadaan yang membuat spesies seragam itu lebih berpotensi punah dibandingkan spesies beragam. Koala-koala yang sepenuhnya bergantung pada ketersediaan eukaliptus akan tumpas kalau tumbuhan eukaliptus dilanda wabah yang sepadan dengan penyakit pohon elm Belanda. Di lain pihak, pada spesies beragam, *sebagian* anggota spesies tersebut akan bertahan menghadapi wabah tumbuhan makanan tertentu, dan spesies itu dapat terus ada. Mudah pula untuk percaya bahwa spesies beragam lebih berpotensi menurunkan spesies anak yang baru dibandingkan spesies seragam. Mungkin inilah contoh seleksi tingkat spesies yang sebenarnya. Tidak seperti rabun dekat atau kaki panjang, ‘keseragaman’ dan ‘keberagaman’ merupakan ciri tingkat spesies sejati. Masalahnya, contoh-contoh ciri tingkat spesies semacam itu sedikit dan jarang.

Ada satu teori menarik dari evolusionis asal Amerika Egbert Leigh, yang dapat ditafsirkan sebagai kandidat contoh seleksi tingkat spesies sejati, walau dikemukakan sebelum frasa ‘seleksi spesies’ populer. Leigh tertarik dengan satu masalah abadi: evolusi perilaku ‘altruistik’ pada individu-individu. Dengan tepat ia mengenali bahwa jika kepentingan individu berkonflik dengan kepentingan spesies, kepentingan individu – kepentingan jangka pendek – itulah yang menang. Tampaknya, tak ada yang mampu mencegah derap langkah gen-gen egois. Tapi Leigh mengemukakan hal menarik berikut ini. Pasti ada beberapa kelompok atau spesies yang, ternyata, hal terbaik bagi individunya bertepatan dengan hal terbaik bagi spesiesnya. Dan pasti ada pula spesies-spesies lain yang kepentingan individunya kebetulan berseberangan jauh dari kepentingan spesiesnya. Kalau hal-hal lainnya sama, tipe spesies yang kedua lebih besar kemungkinan punahnya. Karena itu, sebetulnya seleksi spesies bisa memilih, bukan spesies yang individu-individunya mengorbankan diri, tapi spesies yang individu-individunya tidak *diminta* mengorbankan kesejahteraan mereka sendiri. Kita kemudian dapat melihat perilaku individual yang ternyata tidak egois tengah berevolusi, karena seleksi spesies telah memilih spesies-spesies yang kepentingan diri individunya terpenuhi karena hal yang tampak sebagai altruismenya sendiri.

Mungkin contoh paling dramatis dari ciri tingkat spesies sejati itu berkenaan dengan cara reproduksi, seksual versus aseksual. Untuk alasan yang tidak cukup dibahas di sini, adanya reproduksi seksual telah menghadirkan teka-teki teoretis besar bagi kaum Darwinian. Bertahun-tahun yang lalu, R. A. Fisher, yang biasanya garang terhadap gagasan seleksi di tingkat yang lebih tinggi dari organisme individual, siap membuat pengecualian untuk kasus khusus seksualitas. Spesies yang bereproduksi secara seksual, ungkapnya, untuk alasan-alasan yang, sekali lagi, tidak akan saya bahas (karena tidak segamblang yang kita sangka), mampu berevolusi lebih cepat dari spesies yang bereproduksi secara aseksual. Berevolusi itu hal yang dilakukan spesies, bukan hal yang dilakukan organisme individual: Anda tak dapat menyebut organisme itu berevolusi. Fisher mengemukakan bahwa seleksi tingkat spesies sebagian bertanggung jawab atas fakta bahwa reproduksi seksual begitu lumrah terjadi di antara hewan-

hewan modern. Tapi kalau begitu, kita berhadapan dengan kasus seleksi selangkah, bukan seleksi kumulatif.

Menurut argumen ini, spesies aseksual, ketika muncul, cenderung punah karena tidak cukup cepat berevolusi untuk mampu mengejar perubahan lingkungan. Spesies seksual cenderung tidak punah karena mereka dapat berevolusi cukup cepat untuk tidak tertinggal. Karena itulah yang kita lihat ada di sekeliling kita kebanyakan spesies seksual. Tapi 'evolusi' yang kecepatannya berbeda di antara dua sistem ini, tentunya, merupakan evolusi Darwinian biasa dengan seleksi kumulatif di tingkat individunya. Seleksi spesies, seperti hal ini, merupakan seleksi selangkah sederhana, yang memilih antara dua ciri saja, aseksualitas versus seksualitas, evolusi lambat versus evolusi cepat. Mesin-mesin seksualitas, organ-organ seks, perilaku seksual, permesinan seluler pembelahan sel seksual, semua ini pastilah dibentuk oleh seleksi kumulatif Darwinian standar di tingkat rendah, *bukan* oleh seleksi spesies. Bagaimanapun juga, kesepakatan modern ternyata menentang teori lama bahwa seksualitas itu dipertahankan oleh semacam seleksi di tingkat kelompok atau spesies.

Untuk menyimpulkan pembahasan ini, seleksi spesies dapat menjelaskan pola spesies yang ada di dunia pada titik waktu mana pun. Dari situ, seleksi spesies juga dapat menjelaskan pola-pola spesies yang berubah seiring berjalannya waktu geologis, yang berarti juga bagi pola yang berubah-ubah di dalam catatan fosil. Tapi seleksi spesies bukan daya signifikan dalam evolusi permesinan kompleks kehidupan. Paling jauh yang bisa dilakukannya adalah memilih dari antara berbagai permesinan kompleks, asalkan permesinan kompleks tersebut sudah dibentuk oleh seleksi Darwinian sejati. Seperti telah saya ketengahkan tadi, seleksi spesies bisa saja terjadi tapi tampaknya tidak *berbuat* banyak! Sekarang saya akan kembali ke pokok bahasan taksonomi dan metode-metodenya.

Saya tadi mengatakan bahwa taksonomi kladistik itu lebih dari taksonomi tipe pustakawan karena memiliki satu pola sarangan hierarkis yang benar dan unik, yang menunggu untuk ditemukan. Kita tinggal menyusun metode untuk menemukannya. Sayangnya, ada beberapa kesulitan praktis. Momok paling menarik bagi seorang ahli taksonomi adalah konvergensi evolusioner. Begitu pentingnya fenomena ini sampai saya mencurahkan setengah bab untuk membahasnya. Di Bab 4 kita telah melihat seperti apa, berkali-kali, hewan-hewan tampak menyerupai hewan-hewan bukan kerabatnya di bagian-bagian lain dunia, karena cara hidupnya serupa. Semut tentara Dunia Baru menyerupai semut siafu Dunia Lama. Kemiripan luar biasa telah berkembang di antara ikan listrik Afrika dan Amerika Selatan yang sangat tidak berkerabat; dan di antara serigala sejati dan 'serigala' marsupialia *Thylacinus* dari Tasmania. Dalam semua kasus ini, saya menyatakan, tanpa justifikasi, bahwa semua kemiripan ini bersifat konvergen: bahwa kemiripan tersebut berevolusi secara terpisah pada hewan-hewan yang tidak berkerabat. Tapi bagaimana kita tahu bahwa hewan-hewan tersebut memang tidak berkerabat? Kalau ahli taksonomi menggunakan kemiripan untuk mengukur kedekatan kesepupuan, mengapa mereka tidak terkecoh dengan kemiripan yang luar biasa dekat yang tampak bisa menyatukan pasangan-pasangan hewan ini? Atau, kalau pertanyaan ini kita utarakan dengan cara yang lebih mengkhawatirkan, ketika ahli taksonomi memberi tahu kita bahwa dua hewan itu *benar-benar* berkerabat dekat – contohnya kelinci dan terwel – bagaimana kita bisa yakin bahwa mereka tidak terkecoh konvergensi masif di antara kedua hewan itu?

Pertanyaan ini benar-benar mengkhawatirkan, karena sejarah taksonomi sarat dengan kasus-kasus di mana ahli taksonomi dari era belakangan menyatakan bahwa para pendahulu mereka keliru justru karena alasan ini. Di Bab 4 kita melihat seorang ahli taksonomi dari Argentina

menyatakan bahwa litopterna merupakan leluhur kuda sejati, padahal kini litopterna dianggap konvergen dengan kuda sejati. Landak Afrika sudah lama diyakini berkerabat dekat dengan landak Amerika, tapi kedua kelompok hewan ini sekarang dianggap mengembangkan tameng tubuhnya yang mencuat tajam itu secara sendiri-sendiri. Mungkin duri-duri itu memang digunakan untuk tujuan yang serupa di kedua benua. Siapa yang berani menjamin bahwa ahli taksonomi generasi masa depan tidak akan berubah pikiran lagi? Keyakinan seperti apa yang bisa kita berikan pada taksonomi, kalau evolusi konvergen ternyata merupakan biang kemiripan menipu yang sangat kuat? Saya pribadi merasa optimis terutama setelah munculnya teknik-teknik baru dan kuat yang didasarkan pada biologi molekuler.

Saya sarikan dari bab-bab sebelumnya: semua hewan dan tumbuhan dan bakteri, seberapa pun tampak berbedanya satu sama lain, ternyata tetap seragam kalau kita tilik hingga ke dasar-dasar molekulernya. Hal ini terlihat paling dramatis dalam kode genetik itu sendiri. Kamus genetik memiliki 64 kata DNA yang masing-masing terdiri dari tiga huruf. Tiap-tiap kata ini memiliki terjemahan persisnya dalam bahasa protein (asam amino tertentu atau tanda baca). Sifat bahasa ini tampak manasuka dalam arti yang sama dengan sifat bahasa manusia yang manasuka (dalam kata 'rumah', misalnya, tak ada hal intrinsik yang mewakili makna tempat tinggal). Dengan demikian, merupakan fakta yang luar biasa signifikan bahwa setiap benda hidup, tidak peduli seberapa berbeda apa pun perawakan luarnya satu sama lain, 'berbicara' dengan bahasa yang hampir sama persis di level gen-gen. Kode genetik itu universal. Saya anggap ini sebagai bukti hampir-mutlak bahwa semua organisme turun dari satu leluhur bersama. Peluang bahwa kamus 'makna-makna' manasuka yang sama ini bisa muncul dua kali hampir tak terbayangkan kecilnya. Seperti telah kita lihat di Bab 6, mungkin pernah ada organisme-organisme lain yang menggunakan bahasa genetik yang berbeda, tapi mereka sudah tiada. Semua organisme yang bertahan hidup turun dari satu leluhur yang mewariskan kepada mereka sebuah kamus genetik yang hampir identik, walaupun manasuka; identik di hampir setiap kata dari 64 kata DNA yang ada.

Coba bayangkan dampak dari fakta ini pada taksonomi. Sebelum era biologi molekuler, ahli zoologi hanya bisa yakin pada kesepupuan hewan-hewan yang memiliki sejumlah besar fitur anatomis yang sama saja. Biologi molekuler tiba-tiba membuka peti harta karun berisi kemiripan-kemiripan baru untuk ditambahkan ke dalam daftar kerdil yang ditawarkan anatomi dan embriologi. 64 identitas (kemiripan kata yang terlalu lunak) dari kamus genetik yang sama-sama dimiliki ini hanya titik awalnya saja. Taksonomi telah bertransformasi. Yang dahulu hanya berupa terkaan samar mengenai kesepupuan kini menjadi kehampirpastian statistis.

Universalitas kata-per-kata yang hampir lengkap dari kamus genetik ini, bagi ahli taksonomi, merupakan hal yang terlalu bagus. Begitu taksonomi memberi tahu kita bahwa semua benda hidup itu bersepupu, ia tak bisa memberi tahu kita pasangan mana yang merupakan sepupu yang lebih dekat dari yang lain. Tapi informasi molekuler lain bisa, karena di sini kita menemukan berbagai derajat kemiripan, bukan identitas utuhnya. Ingat, produk dari mesin-mesin penerjemah genetik adalah molekul-molekul protein. Tiap molekul protein merupakan sebuah kalimat, seutas rantai kata-kata asam amino dari kamus itu. Kita dapat membaca kalimat-kalimat ini, dalam bentuk protein terjemahannya atau dalam bentuk DNA aslinya. Walau semua benda hidup memiliki kamus yang sama, mereka tidak membuat kalimat-kalimat yang sama dari kamus tersebut. Ini menjadi peluang kita untuk menentukan berbagai derajat kesepupuan. Kalimat-kalimat protein, walau berbeda dalam hal perinciannya, sering serupa dalam pola umumnya. Untuk satu pasangan organisme mana pun, kita selalu bisa menemukan kalimat-kalimat yang cukup mirip, yang tampak jelas seperti versi-versi yang sedikit 'campur aduk' dari kalimat purba

yang sama. Kita telah melihat hal ini dalam contoh perbedaan minor antara rangkaian histon sapi dan kacang polong.

Ahli taksonomi kini dapat membandingkan kalimat-kalimat molekuler hingga persis seperti membandingkan tulang tengkorak atau kaki. Kalimat-kalimat protein atau DNA yang amat mirip dapat diasumsikan berasal dari sepupu dekat; kalimat yang lebih berbeda berasal dari sepupu jauh. Semua kalimat ini dibangun dari kamus universal yang berisi tidak lebih dari 64 kata. Keindahan biologi molekuler modern adalah bahwa kita bisa mengukur perbedaan antara dua hewan dengan tepat, karena jumlah pasti kata-kata yang digunakan dalam versi-versi dari satu kalimat tertentu itu pun berbeda. Dalam kerangka hiper-ruang genetik di Bab 3, kita dapat mengukur dengan tepat berapa langkah jauhnya satu hewan dari hewan lain, setidaknya dalam konteks molekul protein tertentu.

Satu keuntungan lain menggunakan rangkaian molekuler dalam taksonomi adalah bahwa, menurut satu aliran ahli genetika berpengaruh, 'kaum netralis' (yang akan kita jumpai kembali di bab selanjutnya), sebagian besar perubahan evolusioner yang berlangsung di level molekuler itu bersifat *netral*. Ini berarti perubahan tersebut tidak terjadi karena seleksi alam, tetapi sifatnya acak, dan karena itu, kecuali akibat kesialan yang sesekali datang, momok konvergensi tidak ada untuk menyesatkan ahli taksonomi. Fakta terkait lainnya adalah, seperti telah kita lihat, molekul jenis mana pun tampak berevolusi pada kecepatan yang kira-kira konstan di kelompok hewan yang cukup berbeda. Ini berarti bahwa jumlah perbedaan antara molekul-molekul yang dapat dibandingkan pada dua hewan, katakanlah antara sitokrom manusia dan sitokrom warthog, merupakan ukuran yang tepat untuk waktu yang telah berlalu sejak leluhur bersama keduanya masih hidup. Ada 'jam molekuler' yang cukup akurat di sini. Jam molekuler ini memungkinkan kita untuk memperkirakan, bukan hanya pasangan hewan mana yang leluhur bersamanya paling baru, tapi juga kira-kira *kapan* leluhur bersama itu hidup.

Di titik ini, pembaca mungkin bingung dengan inkonsistensi yang tampak muncul. Seisi buku ini kuat menekankan arti penting seleksi alam. Lalu kok bisa sekarang kita menekankan keacakan perubahan evolusioner di level molekuler? Sebagai awalan dini untuk Bab 11, tidak ada silang-sengketa mengenai evolusi adaptasi, yang merupakan pokok bahasan utama buku ini. Kaum netralis paling gencar sekali pun tidak berpikir bahwa organ-organ kompleks seperti mata dan tangan berevolusi lewat pergeseran acak. Setiap ahli biologi yang waras sepakat bahwa organ-organ kompleks seperti itu hanya dapat berevolusi lewat seleksi alam. Hanya saja, kaum netralis berpikir – menurut saya, benar – bahwa adaptasi seperti itu merupakan puncak dari gunung es: mungkin sebagian besar perubahan evolusioner, ketika dilihat pada level molekuler, itu bersifat nonfungsional.

Selama jam molekuler itu merupakan fakta – dan tampaknya benar bahwa tiap jenis molekul berubah pada kecepatan khasnya sendiri per juta tahun – kita dapat menggunakannya untuk menanggapi titik-titik cabang dalam pohon evolusi. Dan kalau memang benar bahwa sebagian besar perubahan evolusi, pada level molekuler, itu netral, ini menjadi karunia luar biasa bagi ahli taksonomi. Ini berarti masalah konvergensi dibabat habis oleh sabit statistika. Setiap hewan memiliki volume-volume besar teks genetik tertulis di dalam sel-selnya, teks yang sebagian besar, menurut teori netralis, tidak ada kaitannya dengan cara hidup uniknya; teks yang sebagian besar tidak terjamah seleksi dan sebagian besar tidak kena evolusi konvergen kecuali akibat kebetulan semata. Peluang dua potong besar teks yang netral secara selektif bisa mirip satu dengan yang lain akibat kebetulan itu dapat dihitung, dan peluangnya memang sangat kecil.

Hebatnya lagi, kecepatan konstan evolusi molekuler sebetulnya memungkinkan kita untuk *menangali* titik-titik cabang dalam sejarah evolusioner.

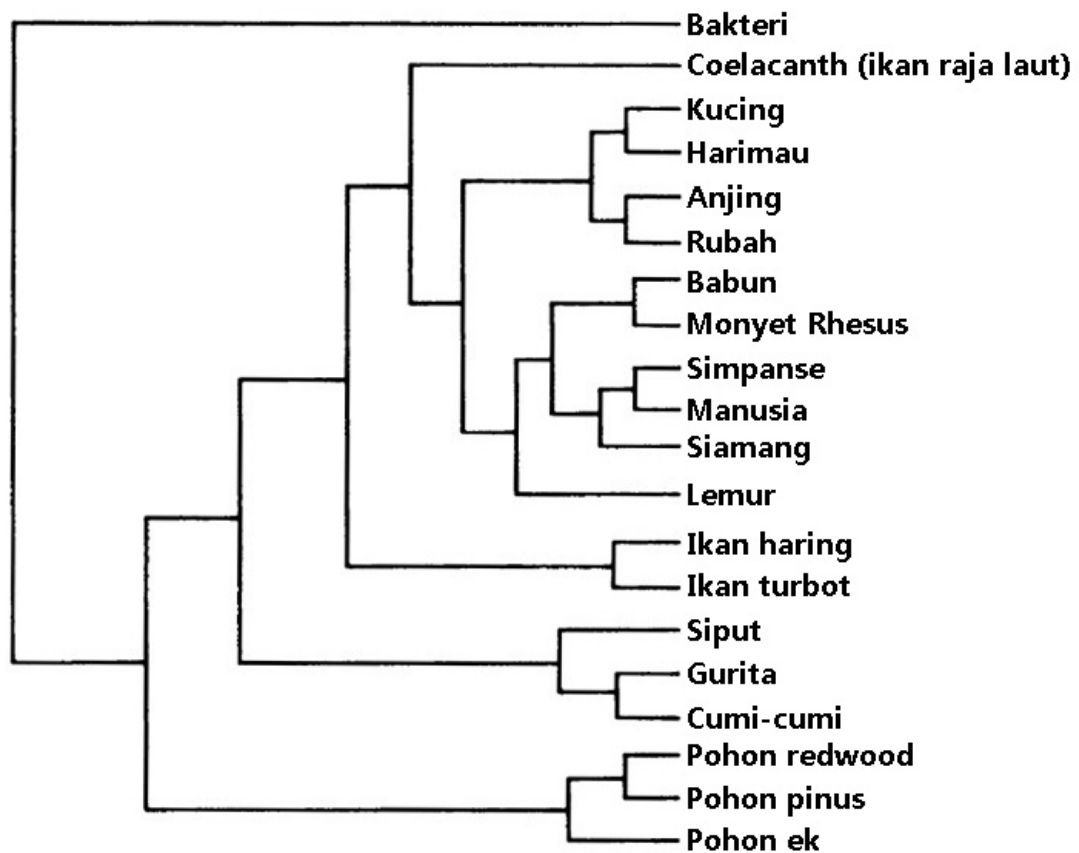
Sulit membesar-besarkan kekuatan ekstra yang ditambahkan teknik-teknik membaca rangkaian molekuler baru ke dalam gudang senjata ahli taksonomi. Tentu, belum semua kalimat molekuler teruraikan, tapi kita sudah bisa masuk ke dalam perpustakaan dan mencari susunan kata-per-kata, huruf-per-huruf dari, katakanlah, kalimat-kalimat hemoglobin α seekor anjing, kanguru, pemakan semut, ayam, ular beludak, kadal air, ikan gurami, dan manusia. Tidak semua hewan memiliki hemoglobin, tetapi ada protein-protein lain, misalnya histon, yang satu versinya ada di setiap hewan dan tumbuhan, dan lagi-lagi banyak dari protein-protein ini sudah bisa dicari di perpustakaan tersebut. Semua ini bukanlah ukuran-ukuran samar yang, seperti panjang kaki atau lebar tengkorak, bisa berbeda-beda tergantung usia dan kondisi spesimennya, atau bahkan tergantung penglihatan orang yang mengukurnya. Mereka merupakan versi-versi alternatif dalam kata-kata dari kalimat yang sama dalam bahasa yang sama, yang dapat disandingkan dan dibandingkan seterperinci dan sepersis cara perfeksionis sarjana bahasa Yunani saat membandingkan dua versi perkamen dari Injil yang sama. Rangkaian-rangkaian DNA adalah dokumen-dokumen injil dari semua kehidupan, dan kita sudah tahu cara menguraikannya.

Asumsi dasar ahli taksonomi adalah bahwa sepupu-sepupu dekat akan memiliki versi-versi kalimat molekuler tertentu yang lebih mirip dari sepupu-sepupu jauh. Ini disebut ‘prinsip parsimoni’. Parsimoni adalah nama lain untuk pelit kikir. Bila ada sekelompok hewan yang kalimat-kalimatnya diketahui, katakanlah delapan hewan yang disebut di paragraf sebelumnya, tugas kita adalah menemukan yang mana dari semua diagram pohon ini yang mungkin menautkan kedelapan hewan ini yang paling parsimonis. Pohon yang paling parsimonis adalah pohon yang paling ‘kikir’ dengan asumsi-asumsinya, dalam arti pohon ini mengasumsikan jumlah minimum perubahan kata dalam evolusi, dan jumlah konvergensi minimum. Kita berhak mengasumsikan jumlah minimum konvergensi atas dasar kemuskilan semata. Kecil kemungkinan bahwa, khususnya bila sebagian besar evolusi molekuler itu netral, dua hewan yang tidak berhubungan bisa mengenai rangkaian yang sama persis, kata per kata, huruf per huruf.

Ada kesulitan komputasi saat mencoba melihat semua kemungkinan pohon yang ada. Bila hanya ada tiga hewan yang hendak diklasifikasikan, jumlah kemungkinan pohonnya hanya tiga: A dengan B tanpa C; A dengan C tanpa B; dan B dengan C tanpa A. Lakukan kalkulasi yang sama untuk jumlah hewan yang lebih besar yang hendak diklasifikasikan, dan jumlah kemungkinan pohonnya pun melonjak drastis. Bila hanya ada empat hewan, jumlah kemungkinan pohon kesepupuan masih bisa ditangani: 15 saja. Komputer tidak butuh waktu lama untuk mencari mana dari 15 pohon ini yang paling parsimonis. Tapi bila ada 20 hewan, saya hitung ada 8.200.794.532.637.891.559.375 pohon (lihat Gambar 9). Sudah diperkirakan bahwa komputer paling cepat saat ini butuh 10.000 juta tahun, kira-kira sama dengan usia alam semesta, untuk menemukan pohon yang paling parsimonis untuk 20 hewan saja. Padahal ahli taksonomi sering ingin menyusun pohon untuk lebih dari 20 hewan.

Walaupun ahli taksonomi molekuler merupakan pihak pertama yang merasakan dampaknya, masalah ledakan jumlah besar ini sebetulnya selalu mengintai taksonomi nonmolekuler juga. Ahli taksonomi nonmolekuler mengelak dari masalah ini dengan membuat tebakan intuitif saja. Dari semua pohon keluarga yang mungkin dicoba, sejumlah sangat besar pohon dapat cepat dieliminir – misalnya, berjuta-juta pohon yang menempatkan manusia lebih dekat dengan cacing tanah ketimbang dengan simpanse. Ahli taksonomi bahkan tak perlu repot menimbang pohon-

pohon kesepupuan yang jelas-jelas absurd. Mereka cukup berfokus pada pohon-pohon yang relatif sedikit yang tidak terlalu drastis melanggar prakonsepsi mereka. Cara ini cukup wajar, kendati selalu ada bahaya kalau-kalau pohon yang paling parsimonis ternyata salah satu dari pohon-pohon yang tak dianggap itu. Komputer pun bisa diprogram untuk mengambil jalan pintas, dan masalah ledakan jumlah besar dapat dipangkas.



Gambar 9 Pohon keluarga ini tepat. Ada 8200794532637891559374 cara lain untuk mengklasifikasikan 20 organisme, dan semuanya salah.

Informasi molekuler itu begitu kaya sehingga kita dapat mengerjakan taksonomi untuk protein-protein yang lain secara terpisah, berkali-kali. Kemudian kita dapat menggunakan kesimpulan-kesimpulan kita, yang ditarik dari pengkajian satu molekul, sebagai pembandingan untuk kesimpulan-kesimpulan dari pengkajian molekul lain. Kalau kita khawatir cerita yang dikisahkan satu molekul protein itu betul-betul dikacaukan oleh konvergensi, kita bisa langsung memeriksanya dengan melihat molekul protein yang lain. Evolusi konvergen sungguh merupakan kebetulan yang istimewa. Pokok penting dari kebetulan adalah, kalau pun pernah terjadi sekali, jauh lebih kecil kemungkinannya untuk terjadi dua kali. Dan jauh lebih kecil lagi kemungkinannya untuk terjadi tiga kali. Dengan mengkaji makin banyak molekul protein yang berbeda, kita bisa hampir mengeliminir kebetulan ini.

Misalnya, dalam sebuah studi yang dilakukan sekelompok ahli biologi dari Selandia Baru, 11 hewan diklasifikasikan, bukan sekali tetapi lima kali, secara terpisah, menggunakan lima molekul protein yang berbeda-beda. 11 hewan ini adalah domba, monyet rhesus, kuda, kanguru, tikus, kelinci, anjing, babi, manusia, sapi, dan simpanse. Rencana kerjanya: pertama, dengan satu protein, sebuah pohon kekerabatan di antara 11 hewan ini disusun. Kemudian, lihat apakah

pohon kekerabatan yang *sama* akan muncul jika menggunakan protein kedua. Lalu, lakukan prosedur yang sama untuk protein ketiga, keempat, dan kelima. Secara teoretis, kalau evolusi itu tidak benar misalnya, masing-masing dari lima protein ini boleh jadi memunculkan pohon 'kekerabatan' yang sama sekali berbeda.

Kelima rangkaian protein ini bisa dicari di perpustakaan, untuk kesebelas hewan tersebut. Untuk 11 hewan, ada 654.729.075 kemungkinan pohon kekerabatan yang perlu dijajaki, dan metode-metode jalan pintas yang biasa harus diterapkan. Untuk masing-masing dari lima molekul protein ini, komputer mencetak pohon kekerabatan yang paling parsimonis. Muncullah lima tebakan terbaik sebagai pohon kekerabatan sejati di antara 11 hewan ini. Hasil terbaik yang bisa diharapkan adalah kelima pohon perkiraan ini ternyata identik. Probabilitas untuk memperoleh hasil tersebut secara kebetulan semata sangatlah kecil: bilangannya punya 31 nol di belakang koma. Kita tidak perlu terkejut kalau gagal memperoleh keserupaan sesempurna ini: sejumlah tertentu evolusi konvergen dan kebetulan sudah pasti ada. Tapi kita patut khawatir kalau tidak terdapat keserupaan yang cukup substansial di antara pohon-pohon tersebut. Hasil aktual studinya: kelima pohon itu ternyata tidak identik, tapi sangat mirip. Kelima molekul sama-sama menempatkan manusia, simpanse, dan monyet berdekatan satu dengan yang lain, tetapi ada perbedaan mengenai hewan mana yang terdekat berikutnya ke gugus ini: hemoglobin B bilang anjing; fibrinopeptida B bilang tikus; fibrinopeptida A bilang gugus yang terdiri dari tikus dan kelinci; hemoglobin A bilang gugus yang terdiri dari tikus, kelinci, dan anjing.

Kita punya leluhur bersama dengan anjing, dan leluhur bersama yang lain dengan tikus. Kedua leluhur ini benar-benar ada, di satu titik waktu dalam sejarah. Salah satunya pasti lebih baru dari yang lain, jadi salah satu dari hemoglobin B dan fibrinopeptida B pasti salah dalam perkiraan kekerabatan evolusionernya. Seperti saya katakan tadi, perbedaan kecil seperti ini tidak perlu menggusarkan kita. Karena memang pasti ada sejumlah tertentu konvergensi dan kebetulan. Kalau kita benar-benar lebih dekat ke anjing, ini berarti bahwa kita dan tikus telah saling berkonvergensi dari segi fibrinopeptida B. Kalau kita benar-benar lebih dekat ke tikus, ini berarti bahwa kita dan anjing telah saling berkonvergensi dari segi hemoglobin B. Kita bisa mencari tahu yang mana dari keduanya ini yang lebih mungkin terjadi, dengan melihat molekul-molekul lain. Tapi pembahasannya tidak saya perpanjang: poinnya sudah jelas.

Saya tadi berkata bahwa taksonomi itu salah satu bidang biologi yang paling lekas naik darah. Stephen Gould cukup jeli mencirikan hal ini dengan frasa 'nama dan keberatan'. Ahli taksonomi tampak merasa begitu berhasrat dengan paham/mazhabnya, seperti biasa tampak pada ilmu politik dan ekonomika, tapi biasanya tidak pada sains akademis. Tampak jelas bahwa para anggota paham tertentu taksonomi menganggap diri mereka sebagai kelompok persaudaraan yang dikepeng, seperti umat Kristen mula-mula. Saya pertama sekali menyadari hal ini ketika seorang kenalan saya yang ahli taksonomi menyampaikan, dengan wajah cemas pucat pasi, 'kabar' bahwa si anu (namanya tidak perlu disebut di sini) '*hijrah* ke kaum kladistika'.

Catatan singkat tentang mazhab-mazhab taksonomi berikut ini mungkin akan mengusik sebagian anggota mazhab tersebut, tapi karena mereka memang sudah biasa saling usik, saya tidak begitu merasa bersalah. Dalam hal filsafat fundamentalnya, ahli taksonomi terbagi ke dalam dua kubu utama. Satu pihak berisi orang-orang yang blak-blakan bahwa taksonomi mereka memang untuk tujuan menemukan hubungan-hubungan evolusioner. Bagi mereka (dan bagi saya), pohon taksonomi yang baik itu *memang* pohon keluarga hubungan-hubungan evolusioner. Saat Anda mengerjakan taksonomi, Anda menggunakan semua metode yang tersedia untuk memunculkan dugaan terbaik yang bisa dimunculkan mengenai kedekatan

kesepupuan hewan-hewan satu sama lain. Sulit mencari nama untuk ahli-ahli taksonomi di pihak ini karena nama yang sepatutnya mereka sandang, ‘ahli taksonomi evolusioner’, sudah dirampas oleh satu sub-mazhab yang lain. Kadang mereka disebut ‘filetikawan’ (*phyleticist*). Sejauh ini, bab ini saya tulis dari sudut pandang seorang filetikawan.

Tapi ada banyak ahli taksonomi yang mengambil jalur yang lain, dan alasannya cukup masuk akal. Kendati mereka kemungkinan sepakat bahwa tujuan puncak taksonomi adalah menemukan hubungan-hubungan evolusioner, mereka bersikukuh memisahkan *praktik* taksonomi dari teori – agaknya teori evolusioner – tentang hal yang berujung pada pola kemiripan. Ahli-ahli taksonomi ini mempelajari pola-pola kemiripan terpisah dari hal-hal lainnya. Mereka tidak menilai dari awal soal apakah pola kemiripan itu disebabkan sejarah evolusioner atau apakah kemiripan lekat itu karena kesepupuan dekat. Mereka lebih suka membangun taksonominya menggunakan pola kemiripan semata.

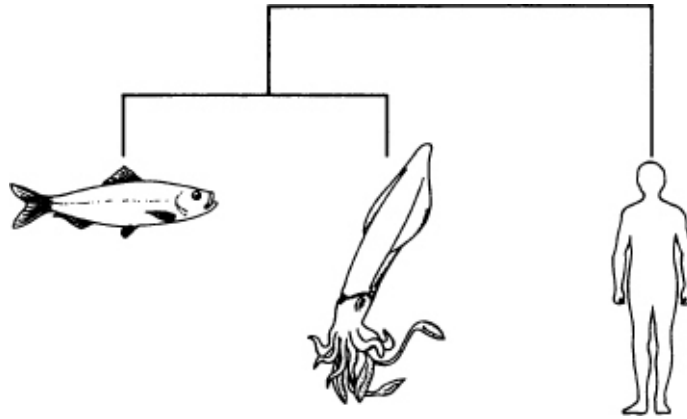
Keuntungannya: kalau ragu dengan kebenaran evolusi, Anda bisa menggunakan pola kemiripan tersebut untuk mengujinya. Kalau evolusi benar, kemiripan di antara hewan-hewan seharusnya mengikuti pola-pola tertentu yang dapat diprediksi, khususnya pola sarangan hierarkis. Kalau evolusi salah, entah *apa* pola yang akan diharapkan, tapi tidak ada alasan jelas untuk memperkirakan pola sarangan hierarkis. Kalau *kerja* taksonomi Anda dilandaskan pada asumsi evolusi, tegas aliran ini, Anda tidak bisa menggunakan hasil-hasil kerja taksonomi untuk mendukung kebenaran evolusi: argumennya jadi berputar-putar saja. Argumen ini akan kuat kalau ada orang yang sungguh meragukan kebenaran evolusi. Sekali lagi, sulit menemukan nama yang tepat untuk mazhab taksonomi kedua ini. Saya sebut saja ‘para pengukur kemiripan murni’.

Filetikawan, ahli taksonomi yang blak-blakan mencoba menemukan hubungan-hubungan evolusioner, terbelah lagi ke dalam dua aliran pemikiran. Mereka adalah kladistikawan, yang mengikuti prinsip-prinsip tertera pada buku terkenal karya Willi Hennig *Phylogenetic Systematics*; dan ahli taksonomi evolusioner ‘tradisional’. Kladistikawan terobsesi dengan cabang-cabang. Bagi mereka, tujuan taksonomi adalah menemukan susunan terbelahnya berbagai silsilah dalam waktu evolusi. Mereka tidak peduli seberapa besar, atau kecil, silsilah-silsilah tersebut telah berubah sejak titik pencabangannya. Ahli taksonomi evolusioner ‘tradisional’ (*jangan* bayangkan kata ini dalam makna peyoratifnya) berbeda dari kladistikawan terutama karena mereka tidak hanya mempertimbangkan jenis evolusi yang bercabang. Mereka juga menimbang jumlah total perubahan yang terjadi selama evolusi, bukan pencabangannya saja.

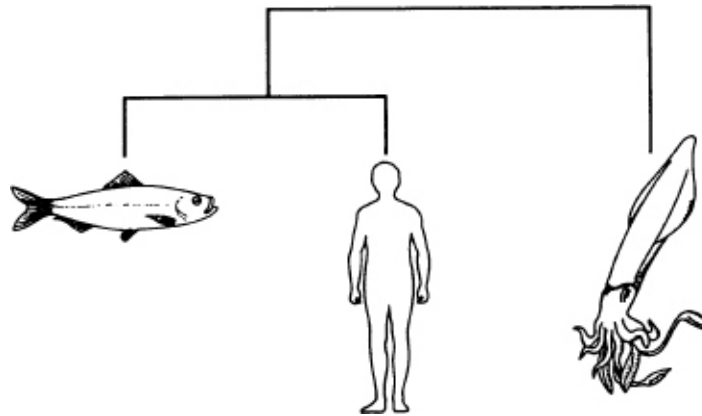
Kladistikawan berpikir dalam kerangka pohon-pohon mencabang, sedari awal kerja mereka. Mereka idealnya mulai dengan menuliskan semua kemungkinan pohon bercabang untuk hewan-hewan yang dikerjakan (pohon-pohon yang mencabang dua saja, karena kesabaran setiap orang ada batasnya!). Seperti kita lihat saat tengah membahas taksonomi molekuler tadi, kesulitan timbul ketika kita mencoba mengklasifikasikan banyak hewan, karena jumlah kemungkinan pohonnya menjadi teramat sangat besar. Tapi seperti juga telah kita lihat, untungnya ada jalan-jalan pintas dan perkiraan-perkiraan yang berguna, yang berarti bahwa taksonomi jenis ini, pada praktiknya, bisa dilakukan.

Kalau, untuk menyambung diskusi, kita mencoba mengklasifikasikan tiga hewan saja (cumi-cumi, ikan haring, dan manusia), tiga pohon cabang-dua yang mungkin timbul adalah sebagai berikut:

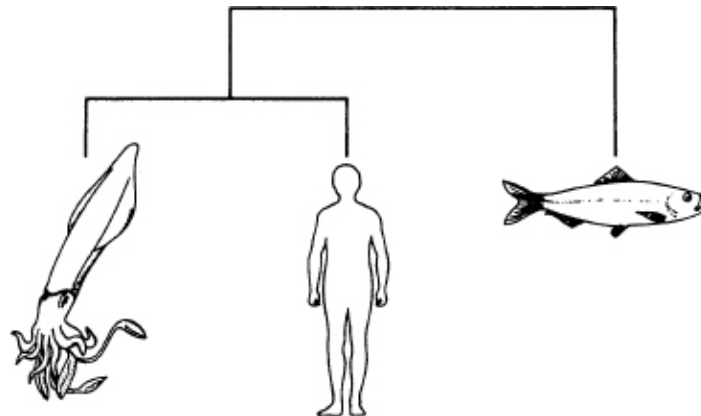
1. Cumi-cumi dan ikan haring saling berdekatan, manusia tergolong ‘kelompok luar’.



2. Manusia dan ikan haring saling berdekatan, cumi-cumi tergolong kelompok luar.



3. Cumi-cumi dan manusia saling berdekatan, ikan haring tergolong kelompok luar.



Kladistikawan akan melihat masing-masing dari ketiga pohon ini, kemudian memilih pohon terbaik. Bagaimana cara mengenali pohon terbaik? Pada dasarnya, pohon terbaik adalah pohon yang menyatukan hewan-hewan yang memiliki paling banyak fitur bersama. Hewan yang paling sedikit fitur bersamanya dengan kedua hewan lainnya kita labeli 'kelompok luar'. Dari daftar pohon-pohon di atas, pohon kedua lebih dipilih, karena manusia dan ikan haring memiliki jumlah fitur bersama yang lebih dari cumi-cumi dan ikan haring atau dari cumi-cumi dan manusia. Cumi-cumi adalah kelompok luar karena tidak memiliki banyak fitur yang sama dengan manusia ataupun ikan haring.

Tapi sebetulnya tidak sesederhana menghitung fitur bersama, karena beberapa jenis fitur itu sengaja diabaikan. Kladistikawan memberi penekanan khusus pada fitur-fitur yang baru-baru ini berevolusi. Fitur-fitur kuno yang diwarisi semua mamalia dari mamalia pertama, misalnya, tidak ada gunanya untuk klasifikasi di dalam kelompok mamalia. Metode-metode yang mereka pakai untuk menentukan fitur-fitur mana yang kuno ini menarik, tapi topik tersebut berada di luar cakupan buku ini. Hal utama yang perlu diingat di titik ini adalah, setidaknya pada prinsipnya, kladistikawan memikirkan semua pohon bercabang yang mungkin *dapat* menyatukan sekelompok hewan yang dihadapinya, dan mencoba memilih satu pohon yang tepat. Dan kladistikawan sejati tidak kepalang tanggung dengan fakta bahwa ia anggap pohon-pohon mencabang atau 'kladogram' ini pohon-pohon keluarga, pohon kedekatan kesepupuan evolusioner.

Kalau didorong ke titik ekstremnya, obsesi terhadap pencabangan ini sendiri bisa memberi hasil yang aneh. Adalah mungkin secara teoretis suatu spesies itu *identik* sampai ke detail terkecil dengan sepupu jauhnya, tapi sangat berbeda dengan sepupu dekatnya. Misalnya, andaikan dua spesies ikan yang amat mirip, yang kita sebut Yakub dan Esau, hidup 300 juta tahun yang lalu. Kedua spesies ini beranak-pinak, keturunannya ada hingga sekarang. Keturunan Esau stagnan. Mereka terus hidup di laut dalam tapi tidak berevolusi. Akibatnya keturunan modern Esau pada hakikatnya sama seperti Esau, dan karenanya sangat serupa dengan Yakub. Keturunan Yakub berevolusi dan berkembang biak. Mereka pada akhirnya memunculkan semua mamalia modern. Tapi ada satu silsilah keturunan Yakub yang juga stagnan di laut dalam, dan yang keturunannya pun masih ada hingga sekarang. Keturunan modernnya ini berupa ikan yang begitu mirip dengan keturunan modern Esau, sampai-sampai sulit dibedakan.

Nah, bagaimana kita mengklasifikasikan hewan-hewan ini? Ahli taksonomi evolusioner tradisional akan mengenali kemiripan luar biasa di antara keturunan-keturunan primitif Yakub dan Esau yang hidup di laut dalam itu, dan mengklasifikasikannya ke dalam satu kelompok. Kladistikawan yang taat tidak bisa berbuat begitu. Keturunan laut dalam Yakub, kendati tampak mirip persis keturunan laut dalam Esau, tetap saja merupakan sepupu lebih dekatnya mamalia. Leluhur bersama mereka dengan mamalia hidup lebih belakangan, sekalipun sedikit saja lebih belakangan, dari leluhur bersama mereka dengan keturunan Esau. Oleh karena itu, mereka harus diklasifikasikan bersama mamalia. Mungkin tampak janggal, tapi saya pribadi bisa menerimanya dengan lapang dada. Paling tidak kesimpulannya sangat logis dan jernih. Kladisme dan taksonomi evolusioner tradisional memiliki kelebihannya sendiri, dan saya tidak begitu ambil pusing dengan cara orang mengklasifikasikan hewan, asalkan mereka dengan jelas memberitahu saya cara mereka melakukannya.

Sekarang beralih ke mazhab besar yang satunya, para pengukur kemiripan murni. Mereka ini terbagi lagi menjadi dua sub-aliran. Keduanya sepakat untuk mencabut evolusi dari benak mereka sehari-hari saat melakukan taksonomi. Tapi mereka tidak bersepakat dalam hal cara mempraktikkan taksonomi rutin mereka. Salah satu sub-aliran di antara ahli taksonomi ini kadang disebut 'fenetikawan' dan kadang disebut 'ahli taksonomi numeris'. Saya sebut saja 'para pengukur jarak purata'. Aliran pengukur kemiripan yang lain menyebut diri mereka 'kladistikawan tertransformasi' (*transformed cladists*) Ini nama yang *ngawur* karena orang-orang ini *bukan* kladistikawan sama sekali! Ketika Julian Huxley menciptakan istilah *clade*, ia mendefinisikannya, secara jelas dan pasti, dalam kerangka pencabangan evolusioner dan garis keturunan evolusioner. *Clade* adalah sekelompok organisme yang turun dari satu leluhur tertentu. Karena agenda utama 'kladistikawan tertransformasi' ini adalah menghindari semua

gagasan evolusi dan keturunan, tidak masuk akal kalau mereka menyebut dirinya kladistikawan. Alasan penamaan ini cuma alasan sejarah saja: mereka berawal dari kladistikawan sejati, dan tetap menggunakan sebagian metode kladistikawan sembari meninggalkan filsafat dan dasar nalarnya. Saya rasa saya tak punya pilihan selain menyebut mereka kladistikawan tertransformasi, walaupun sebenarnya sungkan.

Para pengukur jarak purata tidak hanya menolak menggunakan evolusi dalam taksonomi (meskipun mereka semua percaya dengan evolusi). Mereka konsisten dengan sikap tidak berasumsi bahwa pola kemiripan itu sudah pasti merupakan hierarki bercabang saja. Mereka mencoba menerapkan metode-metode yang akan menguak pola hierarkis kalau memang ada, tapi tidak kalau memang tidak ada. Mereka mencoba meminta Alam sendiri yang memberitahu mereka apakah ia benar-benar tertata secara hierarkis. Ini bukan tugas gampang, dan mungkin tidak berlebihan kalau kita bilang metode-metode untuk mencapai tujuan ini belum lagi tersedia. Akan tetapi, tujuannya sendiri bagi saya sepadan dengan niat terhormat untuk menghindari purbasangka. Metode-metode mereka kerap agak pelik dan matematis, dan cocok baik untuk klasifikasi benda-benda nonhidup, misalnya batu atau reliq arkeologis, maupun klasifikasi organisme hidup.

Biasanya mereka mulai dengan mengukur segala hal yang bisa diukur dari hewan-hewannya. Cara menafsirkan ukuran-ukuran ini agak rumit, dan saya tidak akan membahasnya di sini. Hasil akhirnya adalah semua ukuran itu digabungkan untuk menghasilkan sebuah indeks kemiripan (atau, kebalikannya, indeks perbedaan) antara tiap hewan dengan hewan lainnya. Kalau mau, Anda bisa membayangkan hewan-hewan tersebut seperti awan titik-titik di dalam sebuah ruang. Tikus, mencit, hamster, dll. semuanya berada di satu bagian dari ruang tersebut. Jauh di bagian ruang yang lain ada awan kecil yang lain, berisi dari singa, harimau, macan tutul, citah, dll. Jarak di antara kedua titik di dalam ruang ini adalah ukuran seberapa dekat kemiripan kedua hewan tersebut satu dengan yang lain, ketika sejumlah besar atribut mereka digabungkan. Jarak antara singa dan harimau dekat. Begitu pula jarak antara tikus dan mencit. Tapi jarak antara tikus dan harimau, atau mencit dan singa, jauh. Penggabungan atribut-atribut ini biasanya dilakukan dengan bantuan komputer. Ruang tempat bermukim hewan-hewan ini agak mirip Negeri Biomorf, tapi 'jarak'-nya mencerminkan kemiripan badani, bukan kemiripan genetik.

Setelah menghitung indeks kemiripan (jarak) rata-rata antara tiap hewan dengan hewan lainnya, komputer kemudian diprogram untuk memindai kelompok jarak/kemiripan itu dan mencoba memuatnya ke dalam pola penggugusan hierarkis. Sayangnya ada banyak kontroversi mengenai metode kalkulasi mana persisnya yang mesti dipakai untuk mencari gugusan tersebut. Tidak ada satu metode tepat yang pasti, dan metode-metode yang ada tidak memberikan jawaban yang sama. Parahnya lagi, beberapa dari metode-metode komputer ini malah mungkin terlalu 'getol' untuk 'melihat adanya' gugus di dalam gugus yang tersusun hierarkis, sekalipun sebetulnya tidak ada. Aliran pengukur jarak, atau 'ahli taksonomi numeris' agak meredup sinarnya belakangan ini. Tapi di mata saya, keredupan ini hanya sementara, dan 'taksonomi numeris' ini sama sekali tidak mudah dicoret dari arena. Saya menantikan kebangkitannya.

Aliran pengukur pola murni lainnya adalah kalangan yang menyebut diri mereka kladistikawan tertransformasi, nama yang dimunculkan untuk alasan sejarah yang telah kita lihat. Terutama dari dalam kelompok inilah 'kebejatan' itu memancar. Saya tidak akan menelusuri riwayat munculnya kelompok ini dari dalam kalangan kladistikawan sejati, seperti biasa orang

lakukan. Dalam dasar filsafatnya, yang disebut kladistikawan tertransformasi ini punya lebih banyak kesamaan dengan aliran pengukur pola murni lainnya, yang sering disebut ‘fenetikawan’ atau ‘ahli taksonomi numeris’, yang saya bahas di bawah tajuk pengukur jarak purata tadi. Yang sama-sama mereka anut adalah sikap enggan membawa-bawa evolusi ke dalam praktik taksonomi, walaupun ini tidak *lantas* berarti menentang gagasan evolusi itu sendiri.

Yang sama dari kladistikawan tertransformasi dan kladistikawan sejati adalah metode-metode yang mereka terapkan dalam praktiknya. Keduanya, sedari awal, berpikir dalam kerangka pohon-pohon bercabang. Dan keduanya memilih jenis karakteristik tertentu sebagai penting secara taksonomis, dan jenis karakteristik lain sebagai tak berarti secara taksonomis. Perbedaannya terletak pada dasar pikir yang diberikan pada diskriminasi ini. Seperti pengukur jarak purata, kladistikawan tertransformasi tidak berupaya menemukan pohon-pohon keluarga. Mereka mencari pohon-pohon kemiripan murni. Mereka sepakat dengan para pengukur jarak purata untuk tidak menjawab pertanyaan apakah pola kemiripan itu mencerminkan sejarah evolusioner atau tidak. Tapi tidak seperti para pengukur jarak, yang, setidaknya secara teori, siap untuk membiarkan Alam memberi tahu mereka apakah ia memang tertata secara hierarkis atau tidak, kladistikawan tertransformasi *berasumsi* bahwa alam memang begitu. Sudah jadi aksioma, dasar iman bagi mereka, bahwa segala sesuatu memang diklasifikasikan ke dalam hierarki bercabang (atau, padanannya, ke dalam sarang-sarang yang disarangkan). Karena tidak ada kaitannya dengan evolusi, pohon yang mencabang ini tidak harus diterapkan untuk benda-benda hidup saja. Metode-metode kladistika tertransformasi, menurut para pendukungnya, dapat dipakai untuk mengklasifikasikan tidak hanya hewan dan tumbuhan tetapi juga batu, planet, buku perpustakaan, pundi-pundi Zaman Perunggu. Dengan kata lain, mereka tidak akan sepakat dengan poin yang saya ajukan lewat perbandingan perpustakaan tadi, bahwa evolusi merupakan satu-satunya dasar yang masuk akal bagi klasifikasi hierarkis yang unik.

Para pengukur jarak purata, seperti telah kita lihat, mengukur seberapa jauh jarak tiap hewan dari tiap hewan lainnya, dan ‘jauh’ di sini berarti ‘tidak mirip’ sementara ‘dekat’ berarti ‘mirip’. Setelah menghitung hasil indeks kemiripan rata-rata, barulah mereka mulai mencoba menafsirkan hasil-hasil mereka dalam kerangka pencabangan, hierarki gugus-dalam-gugus, atau diagram ‘pohon’. Akan tetapi, kladistikawan tertransformasi, seperti kladistikawan sejati, menggunakan cara pikir bergugus dan bercabang sedari awal. Seperti kladistikawan sejati, mereka mulai, setidaknya pada prinsipnya, dengan menuliskan semua pohon mencabang yang mungkin ada, lalu memilih yang terbaik.

Tapi apa yang sebetulnya mereka bicarakan saat menimbang tiap ‘pohon’ yang mungkin ada, dan apa yang mereka maksud dengan ‘pohon’ yang terbaik? Keadaan hipotetis dunia macam apa yang berkaitan dengan tiap pohon tersebut? Bagi seorang kladistikawan sejati, pengikut W. Hennig, jawabannya jelas sekali. Masing-masing dari 15 pohon yang menyatukan empat hewan tersebut mewakili satu pohon keluarga. Dari kelima belas pohon keluarga yang dapat dibayangkan menyatukan empat hewan itu, hanya satu saja yang tepat. Sejarah leluhur hewan-hewan tersebut benar-benar terjadi, di dunia ini. Ada 15 kemungkinan sejarah, kalau kita berasumsi bahwa semua pencabangan itu bersifat cabang-dua. Empat belas dari semua kemungkinan sejarah itu pasti keliru. Hanya satu saja yang benar; yang sejalan dengan sejarah yang benar-benar terjadi. Dari 135.135 kemungkinan pohon keluarga untuk 8 hewan, 135.134 pasti salah. Hanya satu yang mewakili kebenaran historisnya. Mungkin tidak mudah memastikan *mana* yang benar, tapi kladistikawan sejati setidaknya bisa yakin *bahwa* yang benar itu tidak lebih dari satu.

Tapi di dunia nonevolusioner kladistikawan tertransformasi, pada apa 15 (atau 135.135, atau berapa pun) kemungkinan pohon, dan satu pohon yang benar, itu terkait? Jawabannya, seperti ditunjukkan kolega dan mantan mahasiswa saya Mark Ridley dalam bukunya *Evolution and Classification*, tak ada. Kladistikawan tertransformasi tidak mengizinkan konsep *garis keturunan* masuk ke dalam pertimbangannya. Baginya, 'leluhur', itu kata yang najis. Tapi di lain pihak ia bersikeras bahwa klasifikasi tersebut harus berupa hierarki bercabang. Jadi, kalau 15 (atau 135.135) pohon hierarkis yang mungkin ada itu bukan pohon-pohon sejarah kekeluhuran, terus apa? Tidak lebih dari sekadar mengikuti filsafat kuno tentang gagasan samar idealistis bahwa dunia ini memang tertata secara hierarkis; gagasan bahwa segala sesuatu di dunia ini memiliki 'lawannya', ying atau yang gaibnya. Tidak pernah lebih konkret dari itu. Dalam dunia nonevolusioner para kladistikawan tertransformasi, sudah pasti tidak mungkin kita membuat pernyataan yang kuat dan jelas seperti 'hanya satu dari 945 pohon yang menyatukan 6 hewan itu saja yang benar; sisanya pasti salah'.

Mengapa leluhur jadi kata najis bagi kladistikawan? (Semoga) bukan karena mereka berpikir bahwa leluhur itu tidak pernah ada. Tapi lebih karena mereka memutuskan bahwa leluhur tidak punya tempat di dalam taksonomi. Ini sikap yang dapat dibela sepanjang kaitannya dengan *praktik* taksonomi sehari-hari. Tidak satu pun kladistikawan yang benar-benar menggambarkan leluhur darah-daging di pohon-pohon keluarga, kendati ahli taksonomi tradisional evolusioner kadang melakukannya. Kladistikawan, dari kalangan mana pun, memperlakukan semua hubungan di antara hewan-hewan sungguhan yang dapat diamati sebagai *kesepupuan*, karena kebiasaan. Ini masuk akal. Yang tidak masuk akal adalah meluaskan ini menjadi pantangan terhadap *konsep* leluhur, terhadap penggunaan bahasa leluhur dalam menyediakan justifikasi mendasar bagi penggunaan pohon yang mencabang secara hierarkis sebagai dasar bagi taksonominya.

Aspek paling ganjil dari aliran taksonomi kladisme tertransformasi sengaja saya bahas di akhir. Tidak puas dengan keyakinan wajar bahwa ada benarnya kalau asumsi-asumsi evolusi dan leluhur itu tidak disertakan ke dalam *praktik* taksonomi, keyakinan yang mereka agih bersama 'pengukur jarak' fenetikis, beberapa kladistikawan tertransformasi sudah kelewatan dan menyimpulkan bahwa pasti ada yang salah dengan evolusi itu sendiri! Fakta yang hampir terlalu ganjil untuk dikemukakan, tetapi sebagian dari 'kladistikawan tertransformasi' terkemuka telah mengaku menentang gagasan evolusi itu sendiri, khususnya teori evolusi Darwinian. Dua di antaranya, G. Nelson dan N. Platnick dari *American Museum of Natural History* di New York, sampai berani menulis bahwa 'Darwinisme ... itu, singkatnya, teori yang sudah diuji dan disimpulkan salah'. Saya ingin sekali mengetahui 'uji' apa yang dimaksud di sini dan, selain itu, ingin sekali mengetahui dengan teori alternatif apa Nelson dan Platnick akan menjelaskan fenomena yang dijelaskan Darwinisme, khususnya kompleksitas adaptif.

Bukan berarti saya beranggapan bahwa kladistikawan tertransformasi ini sebetulnya kreasionis fundamentalis. Tapi saya menduga mereka takabur dengan arti penting taksonomi dalam biologi. Mereka memutuskan, mungkin sudah pada tempatnya, bahwa mereka dapat mengerjakan taksonomi lebih baik kalau melupakan evolusi, dan khususnya kalau tidak menggunakan konsep leluhur sebagai kerangka pikir taksonomi. Dengan demikian, seorang peneliti, katakanlah, sel saraf, boleh yakin bahwa pekerjaannya tidak terbantu dengan pertimbangan evolusi. Ahli saraf sepakat bahwa sel-sel sarafnya merupakan produk evolusi, tetapi ia tidak perlu menggunakan fakta ini dalam risetnya. Ia perlu tahu banyak tentang fisika dan kimia, tetapi ia yakin Darwinisme tidak relevan dengan riset denyut saraf yang dilakukannya sehari-hari. Ini sikap

yang pantas. Tapi tidak wajar namanya kalau, karena Anda merasa tidak perlu memakai satu teori tertentu dalam praktik cabang ilmu pengetahuan Anda sehari-hari, lantas teori tersebut Anda anggap *salah*. Satu-satunya alasan Anda mengatakan hal ini adalah karena muluk dan jemawanya perasaan Anda tentang arti penting cabang ilmu pengetahuan Anda sendiri.

Kalaupun begitu, tetap tidak logis. Seorang fisikawan tentu tidak butuh Darwinisme untuk mengerjakan fisika. Ia mungkin berpikir biologi itu pokok yang sepele kalau dibandingkan dengan fisika. Dari situ, menurutnya, Darwinisme pun tidak begitu penting artinya bagi sains. Tapi kalau cuma karena itu, dia tetap tidak dapat menyimpulkan bahwa teori tersebut *salah*! Tapi itulah yang tampaknya dilakukan oleh sebagian tokoh kladistika tertransformasi. Patut dicatat, ‘salah’ adalah kata yang digunakan Nelson dan Platnick. Tidak mengagetkan, kata-kata mereka langsung disambut oleh mikrofon sensitif yang saya sebut di bab sebelumnya tadi, dan akibatnya pun sama: publisitas besar. Mereka memperoleh tempat terhormat di dalam literatur kreasionis fundamentalis. Waktu seorang tokoh terkemuka kladistika ter-transformasi menjadi dosen tamu di universitas saya baru-baru ini, yang menghadiri kuliahnya lebih banyak dari hadirin dosen-dosen tamu lain di tahun itu! Tidak sulit memahami kenapa begitu.

Barang tentu, komentar-komentar seperti ‘Darwinisme ... itu teori yang sudah diuji dan disimpulkan salah’, yang datang dari ahli biologi ternama yang merupakan pengurus sebuah museum nasional terhormat, akan menjadi bekal bagi para kreasionis dan pihak-pihak lain yang giat berbuat kepalsuan. Inilah mengapa saya membuat pembaca repot membaca topik kladisme tertransformasi. Seperti dikatakan Mark Ridley, dengan nada lebih halus, dalam sebuah ulasan atas buku tempat Nelson dan Platnick membuat komentar bahwa Darwinisme itu salah, Siapa yang tahu kalau yang sebetulnya mereka *maksud* adalah bahwa spesies-spesies leluhur itu rumit direpresentasikan dalam klasifikasi kladistik? Tentu saja sulit menentukan siapa persisnya leluhur-leluhur tersebut, dan ada alasan kuat untuk tidak mencoba melakukannya. Tapi membuat pernyataan yang memancing orang lain untuk menarik kesimpulan bahwa leluhur itu *tidak pernah ada* sama dengan melacurkan bahasa dan mengingkari kebenaran.

Sudah, saya mau keluar dan cabut rumput di kebun. (Atau apa *kek*!)

BAB 11

Rival Bernasib Nahas

Tidak satu pun ahli biologi serius yang meragukan fakta bahwa evolusi telah terjadi dan bahwa semua makhluk hidup itu bersempu satu dengan yang lain. Akan tetapi, sebagian ahli biologi memang meragukan teori tertentu Darwin mengenai *seperti apa* evolusi terjadi. Kadang hal ini ternyata hanya berupa perbantahan soal kata-kata. Teori evolusi bersela, misalnya, bisa direpresentasikan sebagai teori anti-Darwinian. Akan tetapi, seperti saya ajukan di Bab 9, teori itu hanyalah variasi kecil Darwinisme, dan tidak patut mendapat tempat di bab mengenai teori-teori rival. Tapi ada teori-teori yang sudah pasti *bukan* merupakan versi Darwinisme, teori-teori yang gamblang melawan semangat dasar Darwinisme. Teori-teori rival inilah pokok bahasan kita di bab ini. Termasuk di dalamnya berbagai versi Lamarckisme; juga sudut-sudut pandang lain seperti ‘netralisme’, ‘mutasionisme’, dan kreasionisme yang dari waktu ke waktu dimajukan sebagai alternatif bagi seleksi Darwinian.

Cara gamblang untuk memilih mana teori yang pantas menjadi rival adalah dengan menelaah buktinya. Tipe-tipe teori Lamarckian, misalnya, biasanya – dan sudah sepatasnya – ditolak karena bukti kuatnya belum ditemukan hingga kini (kendati upaya keras sudah dilakukan, dan untuk beberapa kasus, oleh orang fanatik yang tidak ragu pun malu memalsukan bukti). Di bab ini saya akan menjalankan taktik lain, karena sudah ada begitu banyak buku yang menelaah bukti dan kesimpulannya berat ke Darwinisme. Alih-alih menelaah bukti yang mendukung atau menentang teori-teori rival, saya akan memakai pendekatan yang lebih teoretis. Argumen saya: Darwinisme adalah satu-satunya teori yang diketahui yang pada prinsipnya *mampu* menjelaskan aspek-aspek tertentu kehidupan. Jika saya benar, ini berarti bahwa, sekalipun tidak terdapat bukti nyata yang mendukung teori Darwinian (yang tentunya, ada), kita masih bisa dibenarkan bila lebih memilih teori ini ketimbang semua teori rivalnya.

Poin ini bisa didramatisir dengan prediksi. Saya prediksi bahwa, jika sebetuk kehidupan ditemukan di bagian lain alam semesta, seberapa asing dan ganjil anehnya pun bentuk kehidupan tersebut dalam detailnya, satu segi darinya yang mirip dengan kehidupan di Bumi adalah evolusi melalui sejenis seleksi alam Darwinian. Sayangnya, prediksi ini, dalam segala kemungkinannya, tidak akan dapat kita uji di masa hidup kita, tapi ia tetap menjadi cara mendramatisir kebenaran penting tentang kehidupan di planet kita sendiri. Teori Darwinian, pada prinsipnya, mampu menjelaskan kehidupan. Tidak ada satu teori lain pun yang pernah diajukan yang, pada prinsipnya, mampu menjelaskan kehidupan. Saya akan peragakan ini dengan membahas semua teori rival yang diketahui, bukan bukti pendukung atau penentangannya, tapi kecukupannya, secara prinsip, sebagai penjelasan atas kehidupan.

Pertama, saya harus tentukan secara spesifik apa maksud ‘menjelaskan’ kehidupan. Tentu, ada banyak sifat benda hidup yang bisa kita susun daftarnya, dan sebagian di antaranya bisa diterangkan oleh teori-teori rival. Banyak fakta mengenai distribusi molekul-molekul protein, seperti telah kita lihat, mungkin terjadi akibat mutasi genetik netral, bukan seleksi Darwinian. Akan tetapi, ada satu ciri khusus benda hidup yang saya patok *hanya* dapat dijelaskan oleh seleksi Darwinian saja. Ciri ini sudah muncul berulang kali sebagai topik di buku ini:

kompleksitas adaptif. Bekal yang dimiliki organisme hidup untuk mampu bertahan dan bereproduksi di lingkungannya terlalu banyak dan muskil secara statistis untuk dihasilkan lewat sepukul kebetulan saja. Seperti Paley, saya pun menggunakan mata sebagai contoh. Dua atau tiga dari fitur-fitur ‘terancang’ baik sebuah mata dapat dibayangkan muncul dalam sekali kebetulan mujur. Begitu banyaknya bagian yang saling berkaitan, yang saling padu-padan dan teradaptasikan dengan baik untuk melihat, itulah yang menuntut penjelasan khusus yang melampaui kebetulan semata. Tentunya, kebetulan juga hadir dalam penjelasan Darwinian, dalam bentuk mutasi. Tapi kebetulan ini disaring secara kumulatif oleh seleksi, langkah demi langkah, selama bergenerasi-generasi. Bab-bab lain telah menunjukkan bahwa teori ini mampu memberikan penjelasan yang memuaskan atas kompleksitas adaptif. Di bab ini saya berargumen bahwa semua teori lain *tidak* mampu melakukannya.

Pertama, kita lihat rival historis Darwinisme paling menonjol: Lamarckisme. Ketika pertama sekali diajukan di awal abad kesembilan belas, Lamarckisme bukan rival Darwinisme, karena Darwinisme belum lagi terpikirkan. Chevalier de Lamarck adalah sosok yang mendahului zamannya. Ia salah satu dari cendekiawan abad ke-18 yang mendukung evolusi. Dalam hal itu ia benar, dan pantas dihormati untuk alasan itu saja, bersama Erasmus, kakek dari Charles Darwin, dan lainnya. Lamarck juga mengajukan teori terbaik untuk mekanisme evolusi yang dapat dimunculkan di masa itu, tapi tidak beralasan kalau kita membayangkan, jika teori mekanisme Darwinian sudah ada kala itu, Lamarck akan menolaknya. Kala itu belum ada, dan nahas bagi Lamarck, setidaknya di dunia berbahasa Inggris, namanya lebih dikenal untuk kesalahannya – teorinya untuk *mekanisme* evolusi – bukan keyakinan benarnya pada *fakta* bahwa evolusi benar terjadi. Ini bukan buku sejarah, dan saya tidak akan berupaya membedah secara cendekia kata-kata Lamarck sendiri. Ada setakar mistisisme dalam kata-kata asli Lamarck – misalnya, ia sangat meyakini adanya tangga kehidupan (hingga kini pun masih banyak orang punya keyakinan yang sama); dan ia membahas perjuangan hidup hewan seolah hewan itu secara sadar *ingin* berevolusi. Saya akan menjaring keluar unsur-unsur nonmistis Lamarckisme yang, setidaknya sekilas, tampak berpeluang besar untuk menjadi alternatif sejati bagi Darwinisme. Hanya unsur-unsur ini yang diadopsi oleh kalangan ‘neo-Lamarckian’ modern, dan pada dasarnya ada dua: pewarisan ciri-ciri diperoleh dan prinsip guna dan tak-guna.

Prinsip guna dan tak-guna menyatakan bahwa bagian-bagian tubuh organisme yang digunakan akan tumbuh membesar. Bagian-bagian yang tidak digunakan cenderung melayu. Kita bisa mengamati fakta bahwa kalau dilatih, otot membesar; kalau tidak pernah digunakan, otot menciut. Dengan melihat tubuh manusia, kita bisa tahu otot mana yang digunakan, mana yang tidak. Kita bahkan bisa menebak profesi atau hobinya. Para penggemar ‘binaraga’ menggunakan prinsip guna dan tak-guna untuk ‘membina’ tubuh mereka, hampir seperti memahat patung, ke bentuk-bentuk tak alami sesuai tuntutan fesyen di budaya minoritas yang aneh ini. Otot bukan satu-satunya bagian tubuh yang merespons penggunaan dengan cara ini. Sering-sering berjalan dengan kaki telanjang, dan tapak kaki Anda akan kapalan. Mudah membedakan seorang petani dari pegawai bank dengan melihat tangannya saja. Tangan petani kasar, ditempa kerja berat dalam waktu lama. Kalaupun ada bagian kasar dalam tangan pegawai bank, paling-paling hanya sedikit kapalan di jari yang digunakannya untuk menulis.

Prinsip guna dan tak-guna membuat hewan lebih mampu bertahan hidup di dunia mereka, makin baik dari waktu ke waktu dalam masa hidupnya, karena tinggal di dunia tersebut. Manusia, karena terpajan (kurang terpajan) langsung sinar matahari membentuk warna kulit yang membuat mereka lebih mampu bertahan di kondisi lingkungan setempat. Terlalu banyak sinar

matahari itu berbahaya. Orang yang kulitnya pucat tapi gemar berjemur rentan terkena kanker kulit. Di lain pihak, kurang sinar matahari berakibat kurang vitamin D dan penyakit rakitis, kadang tampak pada anak-anak keturunan kulit hitam yang tinggal di Skandinavia. Pigmen cokelat melanin, yang proses sintesisnya dipengaruhi sinar matahari, membentuk lapisan yang melindungi jaringan kulit di bawahnya dari efek-efek berbahaya sinar matahari. Kalau orang berkulit sawo matang pindah ke daerah dengan sinar matahari yang lebih sedikit, melaninnya hilang, dan tubuh mampu memanfaatkan sinar matahari yang sedikit di daerah tersebut. Ini dapat direpresentasikan sebagai contoh prinsip guna dan tak-guna: kulit jadi cokelat ketika 'digunakan', dan memudar pucat ketika tidak 'digunakan'. Tentunya beberapa ras tropis mewarisi lapisan melanin yang tebal, terlepas dari terpajan tidaknya mereka dengan sinar matahari.

Nah, sekarang beralih ke prinsip utama Lamarckian yang lain, gagasan bahwa ciri-ciri diperoleh tersebut diwarisi generasi berikutnya. Semua bukti menunjukkan gagasan ini mutlak keliru, tapi di hampir sepanjang sejarah dipercaya benar. Lamarck bukan penemu gagasan ini. Ia hanya menggunakan kearifan masyarakat di masanya. Di beberapa kalangan gagasan itu masih diyakini. Ibu saya punya seekor anjing yang kadang pincang. Satu kaki belakangnya diangkat, dan ia tertatih berjalan dengan tiga kaki sisanya. Seorang tetangga punya anjing yang lebih tua, yang kehilangan satu kaki belakangnya karena kecelakaan mobil. Ia yakin anjingnya pasti bapak anjing ibu saya; dan buktinya: anjing ibu saya pasti mewarisi kepincangan anjingnya. Legenda rakyat dan dongeng sarat dengan cerita-cerita serupa. Banyak orang yang percaya, atau ingin percaya, pada pewarisan ciri-ciri diperoleh. Hingga abad ini, gagasan ini juga menjadi teori hereditas yang dominan di antara ahli-ahli biologi penting. Darwin sendiri juga begitu, tapi teori ini bukan bagian dari teori evolusinya sehingga namanya tidak terngiang di telinga kita untuk urusan ini.

Kalau ciri-ciri diperoleh dan prinsip guna dan tak-guna digabung, hasilnya tampak seperti resep yang baik untuk perkembangan evolusioner. Resep inilah yang biasanya dicap sebagai teori evolusi Lamarckian. Jika generasi-generasi beruntun memperkeras kakinya dengan berjalan tanpa alas di atas tanah kasar, maka, menurut teori ini, tiap generasi akan berkulit yang sedikit lebih tebal dari generasi sebelumnya. Tiap generasi memperoleh keuntungan lebih dibanding pendahulunya. Akhirnya, lahirlah bayi-bayi dengan kaki yang sudah kuat (dan memang ini terjadi, meski karena alasan lain yang akan kita lihat nanti). Jika runtunan generasi berbaring santai di bawah sinar mentari tropis, kulit mereka makin cokelat karena, menurut teori Lamarckian, tiap generasi akan mewarisi kulit coklat generasi sebelumnya. Lambat laun, mereka terlahir berkulit hitam (lagi-lagi, memang itu yang terjadi, tapi bukan karena alasan Lamarckian).

Contoh legendarisnya adalah lengan pandai besi dan leher jerapah. Di desa-desa tempat pandai besi mewarisi keterampilannya dari ayah, kakek, dan kakek buyutnya, ia disangka mewarisi otot-otot terlatih ini dari para leluhurnya juga. Bukan hanya mewarisi saja, tapi memperkuatnya lagi lewat kerja kerasnya sehari-hari, dan kemudian meneruskan peningkatan ini ke putranya. Jerapah-jerapah purba berleher pendek mau tak mau harus menjangkau daun-daun tinggi di atas pohon. Mereka mengerahkan segala daya dan upaya untuk meraih dedaunan itu, dan karenanya otot dan tulang leher mereka merenggang. Tiap generasi akhirnya memiliki leher yang sedikit lebih panjang dari pendahulunya, dan generasi ini meneruskan leher yang sedikit lebih panjang tersebut ke generasi berikutnya. Semua perkembangan evolusioner, menurut teori Lamarckian murni, mengikuti pola ini. Hewan berjuang mendapatkan kebutuhannya. Akibatnya, bagian-bagian tubuh yang digunakan dalam upaya tersebut tumbuh lebih besar, atau berubah ke arah

yang lebih pas dengan tujuan itu. Perubahan ini diwarisi oleh generasi berikutnya, dan seterusnya. Teori ini punya nilai positif: sifat kumulatif, yang, seperti telah kita lihat, merupakan bahan pokok bagi teori evolusi mana pun kalau hendak memenuhi perannya dalam cara pandang kita.

Teori Lamarckian agaknya punya daya tarik emosional yang kuat, untuk jenis cendekiawan atau orang awam tertentu. Saya pernah didatangi seorang kolega, seorang sejarawan Marxis terkemuka, terpelajar dan berpengetahuan luas. Dia bilang, dia tahu semua fakta tampaknya bertentangan dengan teori Lamarckian, tapi apakah teori ini memang benar-benar tak ada harapan untuk benar? Saya katakan, menurut saya tak ada, dan dia menerimanya meski dengan hati enggan, karena, untuk alasan ideologis, dia ingin Lamarckisme itu benar. Paham ini tampak memberikan harapan positif untuk pemajuan umat manusia. George Bernard Shaw mencurahkan Kata Pengantar panjangnya (dalam karya *Back to Methuselah*) untuk mendukung pewarisan ciri-ciri terperoleh. Ihwal yang diajukannya tidak berdasarkan pengetahuan biologis, yang dengan senang hati ia akui tidak ia miliki. Dasarnya adalah kesumat emosionalnya pada implikasi-implikasi Darwinisme, 'bab kebetulan' itu:

tampak sederhana, karena pertama Anda tidak menyadari semua yang terlibat di dalamnya. Tapi begitu arti utuhnya Anda pahami, hati Anda kecut nyali Anda ciut. Ada fatalisme mengerikan di dalamnya, yang meruyaki keindahan dan kecerdasan, kekuatan dan tujuan, kemuliaan dan cita-cita.

Arthur Koestler salah satu sastrawan terhormat lain yang tidak bisa terima dengan hal yang dianggapnya implikasi Darwinisme. Seperti dikatakan Stephen Gould dengan sengit tapi tepat, keenam buku terakhir yang ditulis Koestler merupakan 'kampanye melawan kesalahpahamannya sendiri atas Darwinisme'. Ia berlindung di bawah naungan alternatif yang tidak kunjung bisa sepenuhnya saya pahami, tapi yang dapat ditafsirkan sebagai versi buram Lamarckisme.

Koestler dan Shaw merupakan individualis yang berpikir untuk dirinya sendiri. Pandangan eksentrik keduanya tentang evolusi mungkin tidak besar pengaruhnya walau saya merasa malu saat mengingat pemahaman saya sendiri atas Darwinisme waktu masih remaja dulu sempat tertahan setidaknya selama setahun karena retorika Shaw yang menyihir saya di *Back to Methuselah*. Sikap emosional memilih Lamarckisme, dan sikap emosional memusuhi Darwinisme yang menyertainya, pernah berkali-kali memicu timbulnya dampak yang lebih seram, lewat cengkeraman ideologi yang dipakai sebagai gantinya akal sehat. T. D. Lysenko adalah seorang pembudi-daya tanaman tani kelas dua yang tak punya gengsi, selain di bidang politik. Fanatisme anti-Mendel, dan keyakinan dogmatisnya yang bukan-kepalang atas pewarisan ciri-ciri terperoleh, pasti dianggap angin lalu di sebagian besar negara beradab. Sayangnya kebetulan dia tinggal di negara yang menganggap ideologi lebih penting dari kebenaran ilmiah. Pada 1940, dia ditunjuk menjadi direktur Institut Genetika Uni Soviet, dan menjadi sangat berpengaruh. Pandangan-pandangan jahilnya mengenai genetika menjadi satu-satunya yang boleh diajarkan di sekolah-sekolah Soviet selama satu generasi. Tidak terhitung kerusakan yang disebabkan hal ini pada pertanian Soviet. Banyak ahli genetika terhormat Soviet dibuang, diasingkan atau dipenjara. Contohnya, N. I. Vavilov, seorang ahli genetika yang diakui di seluruh dunia, meninggal karena kurang gizi di sel penjara tanpa jendela setelah sekian lama diadili atas dakwaan yang rekayasa dengan menggelikan: 'menjadi mata-mata Inggris'.

Bahwa ciri-ciri terperoleh itu tidak pernah diwariskan tidak mungkin dibuktikan. Untuk alasan yang sama, kita tidak akan pernah bisa membuktikan bahwa peri itu tidak ada. Yang bisa kita katakan: belum pernah ada orang yang melihat peri, dan foto-foto yang diduga foto peri itu

terbukti palsu. Begitu juga dengan jejak kaki yang diduga jejak kaki manusia di petelasan dinosaurus Texas. Setiap kali saya membuat pernyataan kategoris bahwa peri itu tidak ada, selalu ada kemungkinan bahwa, suatu hari, saya mungkin melihat manusia mungil bersayap tipis di bagian pelosok kebun saya. Status teori pewarisan ciri-ciri terperoleh itu serupa. Hampir semua upaya mendemonstrasikan efeknya gagal total. Dari upaya yang tampak berhasil, sebagian ternyata palsu; misalnya, kasus penyuntikan tinta India ke balik kulit kodok bidan yang terkenal, yang diceritakan oleh Arthur Koestler dalam bukunya dengan judul yang sama. Sisanya gagal direplikasi oleh para pekerja lainnya. Begitupun, seperti mungkin suatu saat ada orang melihat peri di pelosok kebun, dalam keadaan sadar dan sedang pegang kamera, mungkin suatu saat ada orang yang akan membuktikan bahwa ciri-ciri terperoleh itu bisa diwariskan.

Tapi ada sedikit lagi yang dapat dikatakan. Beberapa hal yang belum pernah terbukti terlihat, bagaimana pun juga, tetap bisa dipercaya sejauh tidak menggugat seluruh pengetahuan kita yang lain. Saya belum lagi lihat bukti kuat untuk teori bahwa plesiosaurus saat ini hidup di Danau Ness, tapi pandangan saya tidak akan jungkir balik sekalipun ternyata hewan itu ditemukan di sana. Paling-paling saya terkejut (dan gembira), karena selama 60 juta tahun terakhir ini belum ada ditemukan fosil plesiosaurus, dan itu kurun waktu yang sangat panjang bagi sebuah populasi relik kecil untuk bertahan. Tapi tak ada prinsip-prinsip ilmiah besar yang jadi goyah karenanya. Itu sekadar fakta saja. Di lain pihak, sains telah menghimpun pemahaman yang baik mengenai cara kerja alam semesta, sebuah pemahaman yang selaras dengan sejumlah besar fenomena, dan dugaan-dugaan tertentu akan berlawanan, atau setidaknya sulit sekali diakurkan, dengan pemahaman ini. Contohnya, dugaan yang kadang dibuat dengan dasar-dasar alkitabiah palsu, bahwa alam semesta ini diciptakan baru 6.000 tahun yang lalu. Teori ini bukan saja tidak terbukti. Tapi berlawanan, bukan hanya dengan ilmu biologi dan geologi ortodoks, tapi dengan teori fisika mengenai radioaktivitas dan dengan kosmologi (benda-benda langit yang berjarak lebih dari 6.000 tahun cahaya mestinya tidak terlihat kalau tidak ada hal lain yang berusia lebih dari 6.000 tahun; Bima Sakti mestinya tidak terdeteksi, begitu juga dengan 100.000 juta galaksi lain yang keberadaannya diketahui kosmologi modern).

Ada kalanya dalam sejarah sains, segenap bangunan sains ortodoks runtuh, dan sudah sepantasnya, akibat satu fakta janggal saja. Congkak namanya kalau kita bilang peristiwa seperti itu tidak bakal terjadi lagi. Tapi sudah selazim dan sepantasnya pula sebelum menerima sebuah fakta yang akan membalikkan bangunan ilmiah besar dan kokoh, kita menuntut standar autentikasi yang lebih tinggi dari syarat untuk menerima sebuah fakta yang, sekalipun mengejutkan, sudah siap ditampung oleh sains yang ada. Untuk plesiosaurus di Danau Ness, saya akan menerimanya sebagai fakta kalau saya lihat sendiri. Kalau saya melihat orang melayang, sebelum menolak semua hukum fisika saya akan curiga dahulu bahwa mungkin saya korban trik halusinasi atau gaib. Ada malaran, dari teori-teori yang mungkin tidak benar tapi boleh jadi benar, ke teori-teori yang kebenarannya akan menggulingkan bangunan-bangunan besar sains ortodoks yang kokoh.

Nah, di mana Lamarckisme berdiri di sepanjang malaran ini? Biasanya sedikit setelah titik ‘tidak benar tapi boleh jadi benar’. Saya ingin mengajukan bahwa, kendati tidak berada di kelas yang sama dengan melayang lewat kuasa rapalan mantra, Lamarckisme, atau lebih khusus lagi pewarisan ciri-ciri terperoleh, lebih dekat dengan titik ‘orang melayang’ daripada titik ‘monster Danau Ness’. Pewarisan ciri-ciri terperoleh bukanlah salah satu hal yang boleh jadi benar tapi mungkin tidak. Saya akan paparkan bahwa hal ini bisa benar hanya jika salah satu dari prinsip-prinsip embriologi yang paling dijunjung dan kokoh digulingkan. Karena itu, Lamarckisme perlu

dijajaki dengan kadar skeptisisme yang lebih dari perkara ‘monster Danau Ness’. Lalu apa prinsip embriologis, yang sukses dan luas diterima, yang harus runtuh dahulu sebelum Lamarckisme bisa diterima? Penjelasannya agak panjang. Penjelasan ini akan tampak seperti pembahasan sampingan, tapi nanti akan jelas apa relevansinya. Dan ingat bahwa kita lakukan sebelum memulai argumen bahwa Lamarckisme, *andaipun* benar, masih tetap tidak mampu menjelaskan evolusi kompleksitas adaptif.

Embriologi adalah diskursus yang kita bahas sekarang. Dari dahulu, sikap dalam memandang cara sel-sel tunggal berubah menjadi makhluk dewasa terbelah dua. Nama resminya adalah praformisme dan epigenesis, tapi dalam bentuk modernnya saya akan menggunakan istilah teori cetak biru dan teori resepsi. Kaum praformis awal percaya bahwa tubuh dewasa *terpraformasikan* di dalam satu sel benih. Salah seorang di antara mereka membayangkan ia bisa melihat dengan mikroskopnya sesosok manusia mini – ‘homunculus’ – meringkuk di dalam sel sperma (bukan sel telur!). Perkembangan embrionik, baginya, hanyalah proses pertumbuhan. Semua bagian tubuh yang dewasa sudah ada di sana, terbentuk terlebih dahulu. Agaknya tiap homunculus laki-laki memiliki sperma ultramininya sendiri, tempat anak-anaknya bergelung, dan tiap anak ini pun mengandung gelungan cucu-cucu ... Selain masalah regresi tak berhingga ini, praformisme naif mengabaikan fakta, yang hampir sama saja jelasnya dari abad ke-17 hingga sekarang, bahwa anak mewarisi atribut-atribut dari ibu dan juga ayahnya. Namun, ada kaum praformis lain yang disebut ovis, yang jumlahnya lumayan lebih banyak dari kalangan ‘spermis’, yang percaya bahwa insan dewasa dipraformasikan di dalam sel telur, bukan sperma. Tapi ovisme menghadapi dua masalah yang sama dengan spermisme.

Praformisme modern tidak menghadapi kedua masalah tersebut, tapi tetap saja masih salah. Praformisme modern – teori cetak biru – menyatakan bahwa DNA di dalam sel telur yang telah dibuahi itu sepadan dengan cetak biru tubuh dewasa. Cetak biru adalah miniatur dengan skala diperkecil dari hal yang sebenarnya. Hal yang sebenarnya – rumah, mobil, atau apa pun itu – adalah benda tiga dimensi, sementara cetak birunya dua dimensi. Anda bisa merepresentasikan benda tiga dimensi seperti bangunan dengan irisan-irisan dua dimensi: denah untuk setiap lantai, beragam tampilan tampak depan, atas, samping, dan seterusnya. Pereduksian dimensi ini hanya untuk kemudahan. Arsitek bisa saja memberikan kepada kontraktor bangunan maket bangunan tiga dimensi dari batang korek api dan kayu balsa, tapi model-model dua dimensi di atas kertas – cetak biru – lebih mudah dibawa-bawa di dalam koper, lebih mudah diubah, dan lebih mudah dikembangkan.

Cetak biru ini perlu direduksi lagi ke *satu* dimensi jika hendak disimpan dalam bentuk kode denyut komputer untuk kemudian, misalnya, dikirimkan lewat saluran telepon ke tempat lain. Pereduksian ini dapat dengan mudah dilakukan melalui proses pengkodean ulang tiap cetak biru dua dimensi menjadi ‘pindaian’ satu dimensi. Gambar-gambar televisi dikodekan dengan cara itu untuk ditransmisikan melalui gelombang udara. Sekali lagi, pemampatan dimensi ini pada hakikatnya merupakan perangkat pengkodean yang sepele. Poin pentingnya adalah tetap ada sambung-rapat satu-lawan-satu antara cetak biru dan bangunan. Tiap keping cetak biru serasi dengan keping pasangannya di bangunan itu. Bisa dibayangkan cetak biru ini seperti bangunan mini ‘terpraformasikan’, meski miniaturnya dapat dikodekan ulang ke dimensi yang lebih rendah dari dimensi bangunan tersebut.

Saya menyebut perihal reduksi cetak biru ke satu dimensi, tentu, karena DNA itu sendiri adalah kode satu dimensi. Persis seperti maket sebuah bangunan yang secara teoretis mungkin ditransmisikan via saluran telepon satu dimensi – seperangkat cetak biru terdigitisasi – maka

secara teoretis pun mungkin bagi kita untuk mentransmisikan tubuh dengan skala yang diperkecil via kode DNA digital satu dimensi. Hal tersebut tidak terjadi, tapi kalau pun terjadi, cukup adil kalau kita katakan biologi molekuler modern telah membenarkan teori kuno praformisme. Nah, sekarang coba tengok teori besar embriologi yang lain, yaitu epigenesis, teori resep atau teori ‘buku masak’.

Sebuah resep di buku masak, bagaimanapun juga, bukanlah sebuah cetak biru sebuah kue yang nanti akan muncul di dalam alat pemanggang. Bukan karena resep merupakan untaian kata-kata satu dimensi, sementara kue itu benda tiga dimensi. Seperti telah kita lihat, sangat mungkin bagi kita, lewat prosedur pemindaian, untuk mengubah maket ke dalam kode satu dimensi. Tapi resep bukanlah maket, bukanlah deskripsi dari kue yang jadi, bukan representasi satu-lawan-satu sama sekali. Resep adalah daftar *petunjuk* yang, jika diikuti sesuai urutannya, akan menjadi kue. Cetak biru yang dikodekan secara satu dimensi dari sebuah kue terdiri dari serangkaian pindaian kue, seolah kue tersebut ditusuk-tusuk, berkali-kali, dalam urutan yang teratur secara mendatar dan menurun. Pada interval bersatuan milimeter, bidang sekitar dari titik tusuk tersebut akan direkam ke dalam kode; misalnya, koordinat persis setiap kismis dan remah akan dapat ditarik dari data serial. Akan ada pemetaan ketat satu-lawan-satu di antara tiap potong kecil kue tersebut dan potongan padanannya di cetak biru. Tentu saja resep tidak seperti itu. Tidak ada pemetaan satu-lawan-satu di antara ‘potongan-potongan kecil’ kue dan kata-kata atau huruf-huruf di dalam resep. Kalaupun kata-kata di dalam resep itu memetakan sesuatu, yang dirujuknya bukanlah tiap potongan kecil kue yang jadi tetapi tiap langkah di dalam tata cara membuat kue.

Nah, kita belum paham betul, atau bahkan hampir tidak paham sama sekali, tentang cara hewan berkembang dari sel telur yang dibuahi. Akan tetapi, terdapat indikasi-indikasi yang sangat kuat bahwa gen-gen itu lebih mirip resep ketimbang cetak biru. Dan analogi resep ini memang analogi yang cukup jitu, sementara analogi cetak biru, walau kerap dipakai dalam buku-buku ajar tingkat dasar tanpa ba-bi-bu, khususnya buku-buku ajar dewasa ini, keliru dalam hampir setiap perinciannya. Perkembangan embriologi itu sebuah proses. Proses yang terdiri dari rangkaian peristiwa tertata rapi, seperti prosedur membuat kue, kecuali dalam perkembangan embriologi, jumlah langkah yang ada jutaan kali lebih banyak dan berbagai langkah dijalankan secara serentak di berbagai bagian ‘hidangan’nya. Sebagian besar langkah-langkah tersebut meliputi multiplikasi sel, yang menghasilkan sejumlah sangat besar sel, yang sebagian di antaranya mati, sementara yang lain bergabung satu dengan yang lain untuk membentuk organ, jaringan, dan struktur-struktur bersel banyak lainnya. Seperti kita lihat di satu bab sebelumnya, cara satu sel *tertentu* berperilaku tidak bergantung pada gen-gen yang dikandungnya – karena semua sel di dalam tubuh mengandung paket gen yang sama – tapi pada subpaket gen yang mana yang dihidupkan pada sel tersebut. Pada setiap tempat di dalam tubuh yang tengah berkembang, pada setiap waktu selama perkembangan, hanya sedikit saja gen-gen yang akan dinyalakan. Di bagian-bagian lain embrio, dan pada waktu-waktu lain selama perkembangan, paket-paket gen yang lain akan dihidupkan. Mana persisnya gen yang dinyalakan pada satu sel di satu waktu tergantung pada kondisi kimiawi di dalam sel itu. Kondisi kimiawi tersebut kemudian bergantung pada kondisi-kondisi lampau di dalam bagian embrio tersebut.

Selain itu, efek yang dimiliki sebuah gen ketika ia *ternyata* dihidupkan bergantung pada apa yang tersedia, di bagian lokal embrio itu, untuk dikenai efek. Sebuah gen yang dihidupkan di dalam sel-sel pada dasar tulang belakang di minggu ketiga perkembangan akan memiliki efek yang sama sekali lain dengan gen sama yang dihidupkan di dalam sel-sel pada bahu di minggu keenam belas perkembangan. Jadi efek yang dimiliki sebuah gen, kalau pun ada, *bukan*

merupakan sifat dari gen itu sendiri, tetapi merupakan sifat dari gen dalam interaksinya dengan riwayat terkini dari lingkungan lokal di dalam embrio. Dengan demikian, tidak masuk akal kalau gen disebut sebagai cetak biru sebuah tubuh. Demikian pula halnya dengan biomorf-biomorf komputer kita.

Karena itu, tidak ada penggambaran satu-lawan-satu antara gen dan potongan tubuh, seperti halnya antara kata-kata di dalam resep dan remah kue. Rangkaian gen dapat dianggap sebagai seperangkat petunjuk untuk menjalankan suatu proses, seperti rangkaian kata-kata di dalam resep yang merupakan seperangkat petunjuk untuk menjalankan suatu proses. Pembaca mungkin jadi bertanya-tanya, seperti apa sebetulnya kerja ahli genetika sehari-hari? Bagaimana mungkin gen ‘untuk’ mata biru, atau gen ‘untuk’ buta warna bisa dibicarakan, apalagi diteliti? Bukankah fakta bahwa ahli genetika dapat mempelajari efek-efek tiap gen mengesankan bahwa memang benar *ada* semacam pemetaan satu-gen/satu-potong-tubuh? Bukankah itu menyangkal semua hal yang saya katakan tentang peran gen-gen sebagai resep bagi perkembangan tubuh? Tidak, sama sekali tidak, dan kita perlu memahami alasannya.

Mungkin cara terbaik untuk memahaminya adalah dengan menilik kembali analogi resep tadi. Anda pasti sepakat bahwa kita tidak bisa mengurai kue ke dalam remah-remah komponennya dan berkata ‘Remah yang ini padanan kata pertama dalam resep, remah yang itu padanan kata kedua dalam resep’, dst. Dalam arti, Anda pasti sepakat bahwa resep utuh menggambarkan kue utuh. Tapi coba kalau kita ganti satu kata di dalam resep tersebut; misalnya, kata ‘pengembang’ dihapus atau diganti menjadi ‘ragi’. Kita panggang 100 kue menurut resep versi baru ini, dan 100 kue menurut versi lama. Ada perbedaan pokok antara kedua kelompok yang masing-masing berisi 100 kue ini, dan *perbedaan* ini timbul karena kedua resep berbeda satu kata. Walaupun tidak ada penggambaran satu-lawan-satu dari kata ke remah kue, *ada* penggambaran satu-lawan-satu dari *perbedaan* kata ke *perbedaan* kue utuhnya. ‘Pengembang’ tidak berkaitan langsung dengan bagian tertentu mana pun dari kue: efeknyalah yang memengaruhi pengembangan, dan karenanya bentuk akhir, kue utuhnya. Kalau ‘pengembang’ dihapus, atau diganti dengan ‘tepung’, kuenya tidak akan mengembang. Kalau diganti dengan ‘ragi’, kuenya mengembang tapi rasanya lebih mirip roti. Akan ada perbedaan yang kuat dan dapat dikenali antara kue yang dipanggang sesuai versi resep asli dan versi-versi yang sudah ‘termutasi’, sekalipun tidak ada ‘potongan’ kue yang berkaitan dengan kata-kata yang berbeda itu. Ini analogi yang tepat untuk melukiskan hal yang terjadi bila sebuah gen bermutasi.

Ada analogi yang lebih tepat lagi: perubahan dari ‘350 derajat’ ke ‘450 derajat’. Lebih tepat karena gen mengarahkan efek-efek kuantitatif dan mutasi mengubah besaran kuantitatif efek-efek tersebut. Kue yang dipanggang menurut versi resep ‘termutasi’ dan bersuhu lebih tinggi akan berbeda, bukan hanya di satu bagiannya saja tetapi di seluruh substansinya, dari kue yang dipanggang sesuai versi temperatur awal yang lebih rendah. Tapi analogi ini masih terlalu sederhana. Untuk menyimulasikan proses ‘memanggang’ bayi, kita mesti membayangkan bukan satu proses di dalam satu oven saja, tetapi serentang sabuk penghantar, yang melewati berbagai bagian hidangan melalui 10 juta oven mini, secara berangkai dan sejajar, masing-masing menghasilkan kombinasi rasa yang berbeda dari 10.000 bahan dasar. Poin dari analogi masak-memasak ini, bahwa gen-gen bukan merupakan cetak biru melainkan resep untuk sebuah proses, lebih kuat terasa pada versi kompleks dari analogi tersebut dibanding versi sederhananya.

Tiba waktunya untuk menerapkan pelajaran ini pada soal pewarisan ciri-ciri terperoleh. Pokok dari ihwal membangun sesuatu dari cetak biru, bukan dari resep, adalah bahwa prosesnya *dapat dibalik*. Kalau Anda punya rumah, mudah merekonstruksi cetak birunya. Ukur saja semua

dimensi rumah dan turunkan skalanya. Jelas, kalau rumah itu akan ‘memperoleh’ ciri-ciri apa pun – misalnya, dinding dalamnya diruntuhkan agar ruang menjadi lebih terbuka – ‘cetak biru balik’nya akan merekam utuh perubahan ini. Begitu juga kalau gen-gen merupakan deskripsi tubuh dewasa. Kalau gen-gen itu cetak biru, mudah membayangkan ciri-ciri apa pun yang diperoleh tubuh selama masa hidupnya itu ditranskripsikan utuh kembali ke dalam kode genetik, dan karenanya diteruskan ke generasi berikutnya. Anak laki-laki si pandai besi benar-benar dapat mewarisi semua konsekuensi kerja ayahnya. Karena gen bukan cetak biru, melainkan resep, lah hal ini tidak mungkin terjadi. Kita tidak dapat membayangkan bahwa ciri-ciri terperoleh itu diwariskan, sama seperti kita tidak dapat membayangkan hal berikut. Kue kehilangan sepotong bagiannya. Deskripsi perubahan ini kemudian diumpam balik ke dalam resep, dan resepnya berubah sedemikian rupa sehingga kue berikutnya yang dibuat menurut resep yang sudah berubah ini keluar dari oven dengan keadaan hilang sepotong.

Kaum Lamarckian biasanya gemar dengan contoh kulit kapalan. Mari kita pakai contoh itu. Pegawai bank di dalam contoh kita tadi tangannya halus dan lembut, kecuali di sebagian kulit jari tengah tangan kanannya, tangan yang dipakainya untuk menulis. Kalau generasi-generasi keturunannya banyak menulis, kaum Lamarckian beranggapan bahwa gen-gen yang mengontrol perkembangan kulit di bagian tersebut akan diubah sedemikian rupa sehingga bayi-bayi keturunannya lahir dengan kulit kapalan di jari yang sama. Kalau gen itu cetak biru, mudah saja. Akan ada satu gen ‘untuk’ tiap milimeter persegi (atau satuan ukur kecil serupa) kulit. Seluruh permukaan kulit pegawai bank dewasa akan ‘dipindai’, kekerasan tiap milimeter persegi akan direkam teliti dan diumpamkan kembali ke dalam gen-gen ‘untuk’ milimeter persegi tersebut, dalam gen-gen tertentu yang sesuai di sel-sel spermanya.

Tapi gen bukan cetak biru. Tidak ada istilahnya gen ‘untuk’ tiap milimeter persegi. Tidak ada istilahnya tubuh dewasa bisa dipindai dan deskripsinya diumpamkan kembali ke gen. Titik-titik ‘koordinat’ kulit kapalan itu tidak dapat ‘dicari’ di dalam rekam genetik dan gen-gen ‘sesuai’ yang berubah. Perkembangan embrionik itu sebuah proses, dan di dalamnya seluruh gen aktif berpartisipasi; proses yang, kalau diikuti dengan tepat ke depan, akan menghasilkan tubuh dewasa; tetapi proses ini secara inheren, secara kodrati, bersifat tidak dapat dibalik. Pewarisan ciri-ciri terperoleh tidak hanya *tidak* terjadi: ia *tidak bisa* terjadi dalam rupa kehidupan mana pun yang perkembangan embrioniknya bersifat epigenetik, bukan praformistis. Ahli biologi mana pun yang mendukung Lamarckisme, kendati mungkin ia akan kaget mendengarnya, secara implisit mendukung embriologi yang bersifat atomis, determinis, reduksionis. Saya tidak ingin membebani khalayak pembaca dengan untaian pendek kata-kata jargon yang pretensius tersebut: Saya hanya tak sanggup menolak ironinya, karena ahli-ahli biologi yang condong bersimpati dengan Lamarckisme saat ini juga kebetulan gemar sekali memakai kosakata jargonis saat mengkritik pihak lain.

Tidak berarti bahwa, di suatu tempat di alam semesta, tidak boleh ada sistem kehidupan asing di mana embriologinya memang praformistis; rupa kehidupan yang benar-benar memiliki ‘genetika cetak biru’, dan yang benar-benar bisa, karenanya, mewariskan ciri-ciri terperoleh. Yang saya paparkan sejauh ini adalah bahwa Lamarckisme tidak sebangun dengan embriologi yang kita kenal. Klaim saya di awal bab ini lebih keras: bahwa, sekalipun ciri-ciri terperoleh itu *bisa* diwariskan, teori Lamarckian tetap tidak mampu menjelaskan evolusi adaptif. Klaim ini begitu keras dan dimaksudkan untuk berlaku bagi semua rupa kehidupan, di mana pun di alam semesta ini. Dasarnya adalah dua garis penalaran, yang satu berkenaan dengan masalah dalam

prinsip guna dan tak-guna, yang satu lagi berkenaan dengan masalah lanjutan pewarisan ciri-ciri terperoleh. Saya akan bahas dari yang terakhir.

Pada dasarnya, masalah yang terkandung dalam gagasan ciri-ciri terperoleh adalah yang berikut ini. Mewarisi ciri-ciri terperoleh itu boleh-boleh saja, tapi tidak semua ciri-ciri terperoleh itu merupakan peningkatan ke arah yang lebih baik. Malah, mayoritas besarnya berupa cedera. Tentunya evolusi tidak akan berlanjut secara umum ke arah peningkatan adaptif jika ciri-ciri terperoleh diwariskan tanpa pandang bulu: bekas luka akibat patah kaki atau cacar air diteruskan ke generasi-generasi selanjutnya sama seperti kulit tapak kaki yang mengeras dan kulit sawo matang akibat terbakar sinar matahari. Sebagian besar ciri-ciri yang diperoleh mesin seiring waktu cenderung berupa kerusakan karena pemakaian: mesinnya aus. Kalau keausan ini dikumpulkan oleh semacam proses pemindaian dan pengumpan-balikan ke cetak biru untuk generasi berikutnya, generasi-generasi penerus tersebut akan makin reyot. Alih-alih mulai dari nol dengan cetak biru yang baru, tiap generasi baru memulai kehidupannya dengan beban dan bekas luka dari akumulasi keausan dan cedera dari generasi-generasi pendahulunya.

Masalah ini tidak lantas tak dapat diatasi. Tidak bisa disangkal bahwa beberapa ciri terperoleh itu berupa peningkatan, dan secara teoretis bisa dibayangkan bahwa mekanisme pewarisannya mungkin bisa membedakan peningkatan dari kemunduran. Tapi saat merenungkan seperti apa cara kerja proses pembedaan ini, kita jadi bertanya mengapa pula ciri-ciri terperoleh itu kadang *memang berupa* peningkatan. Mengapa, misalnya, bagian kulit yang dipakai, seperti tapak kaki pelari tanpa sepatu, menebal dan mengeras? Kalau dipikir-pikir, tampaknya lebih cocok kalau kulitnya justru menipis: di kebanyakan mesin, onderdil yang rentan aus memang menipis, karena jelas keausan itu menghilangkan, bukan menambah, partikel.

Orang Darwinian, barang tentu, siap menjawab pertanyaan ini. Kulit yang rentan aus menebal karena seleksi alam yang terjadi di masa purba telah memilih individu-individu yang kulitnya kebetulan merespons keausan dengan cara yang demikian menguntungkan. Begitu pula, seleksi alam memilih anggota-anggota generasi purba yang kebetulan merespons sinar matahari dengan membuat warna kulit menjadi cokelat. Kaum Darwinian berpendapat bahwa satu-satunya alasan mengapa sekelompok kecil ciri-ciri terperoleh itu bersifat peningkatan adalah karena adanya seleksi Darwinian di masa lalu yang melandasinya. Dengan kata lain, teori Lamarckian tidak dapat menjelaskan peningkatan adaptif dalam evolusi kalau tidak menunggangi punggung teori Darwinian. Dengan adanya seleksi Darwinian sebagai latar, yang memastikan bahwa beberapa ciri terperoleh itu bersifat menguntungkan, dan menyediakan mekanisme untuk memilah pemerolehan yang menguntungkan dari yang merugikan, pewarisan ciri-ciri terperoleh dapat dibayangkan berujung pada peningkatan evolusioner. Tetapi *peningkatan* tersebut, seperti adanya, terjadi hanya karena landasan Darwinian semata. Kita dipaksa kembali ke Darwinisme saat hendak menjelaskan aspek adaptif dari evolusi.

Hal yang sama juga berlaku pada kelas peningkatan terperoleh yang agak lebih penting, semua segi yang dibungkus dalam istilah pembelajaran. Selama masa hidupnya, seekor hewan menjadi lebih terampil dalam mencari makan. Hewan tersebut belajar mana yang baik baginya, mana yang tidak. Otaknya menyimpan perpustakaan besar memori tentang dunianya, dan tentang tindakan mana yang berujung pada hasil yang diinginkan, mana yang berujung pada hasil yang tidak diinginkan. Oleh karena itu, sebagian besar dari perilaku hewan menjadi ciri-ciri terperoleh, dan sebagian besar jenis pemerolehan ('pembelajaran') ini memang pantas dilabeli peningkatan. Jika induk dapat mentranskripsikan kearifan pengalaman sepanjang hayatnya ke dalam gen-gennya, sehingga keturunan mereka terlahir dengan perpustakaan pengalaman

representatif bawaan dan siap digunakan, keturunannya itu mampu memulai kehidupannya selangkah lebih maju. Kemajuan evolusioner mungkin memang makin cepat, karena keterampilan dan kearifan yang dipelajari dengan sendirinya dipadukan ke dalam gen-gennya.

Tapi semua ini mengandaikan bahwa perubahan perilaku yang kita sebut pembelajaran itu memang bersifat peningkatan. Mengapa pula *mesti* peningkatan? Kenyataannya hewan memang belajar melakukan hal yang menguntungkan, bukan yang merugikan, tapi mengapa? Hewan cenderung menghindari tindakan yang, di masa lalu, telah menyebabkan rasa sakit. Tapi rasa sakit itu bukan zat. Rasa sakit itu hanyalah hal yang diperlakukan otak sebagai rasa sakit. Untung saja kejadian-kejadian yang diperlakukan sebagai rasa sakit itu, misalnya permukaan tubuh yang tertusuk ganas, juga kebetulan merupakan kejadian-kejadian yang cenderung membahayakan ketahanan hidup si hewan. Tapi kita dengan mudah dapat membayangkan suatu ras hewan yang *menikmati* luka dan kejadian-kejadian lain yang membahayakan ketahanan hidup mereka; suatu ras hewan yang otaknya terbangun sedemikian rupa sehingga cedera dianggap nikmat, dan semua rangsangan yang berindikasi positif terhadap ketahanan hidup mereka, seperti rasa makanan bergizi, dianggap sebagai rasa sakit. Mengapa kita ternyata tidak melihat hewan-hewan masokhis seperti itu di dunia? Alasannya Darwinian: para hewan leluhur masokhis jelas-jelas tidak akan bertahan hidup untuk menghasilkan keturunan yang mewarisi masokhisme mereka. Mungkin kita bisa, lewat seleksi buatan di dalam kandang-kandang kokoh, dengan kondisi-kondisi terkendali di mana ketahanan hidup dijamin oleh tim berisi dokter hewan dan penjaga, mengembangkan ras masokhis turun-temurun. Tapi di alam, hewan-hewan masokhis seperti itu tidak akan bertahan, dan inilah alasan fundamental mengapa perubahan yang kita sebut pembelajaran itu cenderung menjadi peningkatan, bukan sebaliknya. Lagi-lagi kita tiba pada kesimpulan bahwa harus ada landasan Darwinian untuk memastikan ciri-ciri diperoleh ini menguntungkan.

Sekarang kita beralih ke prinsip guna dan tak-guna. Prinsip ini tampak bekerja dengan baik pada beberapa aspek peningkatan diperoleh. Ia merupakan kaidah umum yang tidak tergantung pada detail-detail spesifik. Kaidah itu berbunyi, 'Setiap bagian tubuh yang kerap dipakai mesti membesar; bagian tubuh mana pun yang tidak dipakai mesti mengecil atau bahkan hilang sekaligus'. Karena kita bisa menganggap bahwa bagian-bagian tubuh yang berguna (dan karenanya mungkin dipakai) secara umum diuntungkan bila membesar, sementara bagian-bagian yang tidak berguna (dan karenanya mungkin tidak dipakai) lebih baik sekalian tidak usah ada, kaidah ini tampak cukup patut dipercaya. Akan tetapi, ada masalah besar di balik prinsip guna dan tak-guna: Sekalipun tidak ada keberatan lain atasnya, prinsip ini alat yang terlalu mentah untuk membedah perkara adaptasi yang begitu elok kerumitannya seperti tampak pada hewan dan tumbuhan.

Mata sudah jadi contoh yang baik, jadi kita pakai lagi saja sebagai contoh. Bayangkan semua bagian aktif yang saling bekerja sama dengan rumitnya: lensa dengan transparansi jernihnya, koreksi warnanya dan koreksi distorsi sferisnya; otot-otot yang mampu memfokuskan lensa dengan seketika pada titik tumpu dengan rentang dari beberapa inci hingga tak terhingga; diafragma iris atau mekanisme membatasi jumlah cahaya, yang terus-menerus menyempurnakan setelan bukaan mata, seperti kamera dengan pengukur cahaya bawaan dan komputer khusus yang cepat; retina dengan 125 juta fotosel penentu kode warna; jaringan halus pembuluh-pembuluh darah yang memasok bahan bakar setiap bagian dari mesin tersebut; jaringan saraf yang lebih halus lagi – sepadan dengan kabel-kabel penghubung dan cip-cip elektronik. Ingat-ingat semua

kompleksitas terpahat sempurna ini di benak Anda, dan coba renungkan apakah bisa semua itu disatukan dengan prinsip guna dan tak-guna. Bagi saya, jawabannya sudah pasti ‘tidak’.

Lensa itu tembus pandang dan dikoreksi mengikuti aberasi sferis dan kromatik. Bisakah ini muncul lewat *penggunaan* semata? Bisakah lensa dicuci bersih dengan sejumlah foton yang tertuang melaluinya? Apakah lensa makin baik karena digunakan, karena cahaya melewatinya? Tentu tidak. Mengapa pula mesti begitu? Akankah sel-sel retina menyortir dirinya sendiri ke dalam tiga kelas peka-warna, hanya karena mereka dihujani cahaya aneka warna? Lagi-lagi, mengapa pula mesti begitu? Begitu otot-otot pemfokusan itu ada, memang benar bahwa penggunaannya akan membuat otot tersebut membesar dan menguat; tapi ini saja tidak akan membuat citra menjadi lebih tajam. Sebenarnya, prinsip guna dan tak-guna tidak mampu membentuk apa pun kecuali adaptasi paling mentah dan paling tak mengesankan.

Di lain pihak, seleksi Darwinian tidak kesulitan menjelaskan setiap detail kecil. Penglihatan mata yang baik, akurat dan jeli hingga ke detail-detail kecilnya, dapat menentukan hidup-mati seekor hewan. Lensa, yang difokuskan dengan benar dan dikoreksi sesuai aberasi, bagi burung yang terbang lincah seperti walet, dapat menjadi faktor penentu: berhasil menangkap lalat mangsa atau menubruk tebing. Diafragma iris yang termodulasi dengan baik, memicing cepat saat sinar matahari menerpa, dapat menjadi faktor penentu: mampu kabur karena jeli melihat pemangsa atau silau sesaat yang berarti akhirat. Setiap peningkatan keefektifan sebuah mata, tidak peduli seberapa halus dan seberapa dalam ia terbenam di dalam jaringan-jaringan internal, dapat berkontribusi terhadap ketahanan hidup dan keberhasilan reproduksi seekor hewan, dan karenanya penyebaran gen-gen yang membuat peningkatan tersebut. Oleh karena itu, seleksi Darwinian dapat menjelaskan evolusi peningkatan. Teori Darwinian menjelaskan evolusi perangkat penunjang ketahanan hidup, sebagai konsekuensi langsung dari keberhasilannya. Kaitan antara penjelasan dan yang dijelaskan ini bersifat langsung dan terperinci.

Di sisi lain, teori Lamarckian bersandar pada kaitan yang longgar dan mentah: kaidah bahwa segala sesuatu yang kerap digunakan akan menjadi lebih baik kalau membesar. Kaitan ini berdasar pada korelasi antara ukuran sebuah organ dengan keefektifannya. Kalau korelasi semacam itu ada, sudah pasti amat lemah. Teori Darwinian nyatanya bersandar pada korelasi antara *keefektifan* sebuah organ dan keefektifannya: korelasi yang sempurna! Kelemahan teori Lamarckian tidak bergantung pada fakta-fakta mendetail mengenai rupa-rupa kehidupan tertentu yang kita lihat di planet ini. Kelemahan ini bersifat umum, berlaku pada kompleksitas adaptif jenis apa pun, dan saya rasa wajib pula berlaku pada kehidupan di mana pun di alam semesta, tak peduli betapa asing dan aneh detail-detail kehidupan itu.

Karena itu, sanggahan kita atas Lamarckisme bersifat porak-poranda. Pertama, asumsi pokoknya, yaitu asumsi pewarisan ciri-ciri terperoleh, tampak keliru dalam semua rupa kehidupan yang telah kita kaji. Kedua, tidak hanya keliru tapi juga *sudah pasti* keliru dalam rupa kehidupan mana pun yang berlandaskan pada embriologi epigenetik (‘resep’) ketimbang embriologi praformistis (‘cetak biru’), dan termasuk di dalamnya semua rupa kehidupan yang telah kita kaji. Ketiga, andai kata asumsi-asumsi teori Lamarckian itu benar, teori ini pada prinsipnya, untuk dua alasan yang cukup berbeda, tidak mampu menjelaskan evolusi kompleksitas adaptif yang serius, bukan hanya di bumi ini tetapi juga di mana pun di alam semesta. Jadi, Lamarckisme bukan rival teori Darwinian yang kebetulan salah. Lamarckisme sama sekali bukan rival Darwinisme. Lamarckisme bahkan bukan *kandidat* kuat untuk penjelasan evolusi kompleksitas adaptif. Sebagai rival potensial Darwinisme, sedari awal ia sudah bertakdir naas.

Ada beberapa teori lain yang pernah, dan bahkan kadang masih, dimajukan sebagai alternatif bagi seleksi Darwinian. Sekali lagi, saya akan tunjukkan bahwa teori-teori tersebut bukan alternatif yang kuat sama sekali. Saya akan tunjukkan (karena memang jelas gamblang) bahwa ‘alternatif-alternatif’ ini – ‘netralisme’, ‘mutasionisme’, dan seterusnya – boleh jadi atau boleh jadi tidak mampu menjelaskan sebagian perubahan evolusioner yang teramati, tetapi kesemuanya tidak dapat menjelaskan perubahan evolusioner *adaptif*, yakni perubahan menuju pembentukan perangkat-perangkat yang disempurnakan untuk ketahanan hidup seperti mata, telinga, sendi siku, dan perangkat pengisar gema. Tentu, sejumlah besar perubahan evolusioner itu mungkin bersifat nonadaptif, dan di titik itu teori-teori alternatif ini bisa jadi penting perannya dalam bagian-bagian evolusi, tapi cuma di bagian-bagian membosankan dari evolusi saja, bukan bagian-bagian yang berkenaan dengan pembeda istimewa antara kehidupan dan nonkehidupan. Hal ini secara khusus tampak jelas dalam kasus teori evolusi netralis. Sejarahnya panjang, tapi lebih mudah untuk mencerapnya dalam bentuk molekuler modernnya, yang dominan dipromosikan oleh ahli genetika besar asal Jepang Motoo Kimura, yang gaya prosa bahasa Inggrisnya, kebetulan, akan membikin banyak penutur asli tertunduk malu.

Sejenak kita sudah berjumpa dengan teori netralis. Anda pasti ingat, intinya adalah bahwa berbagai versi dari molekul yang sama, misalnya versi-versi molekul hemoglobin yang berbeda dalam rangkaian asam-aminonya, itu sama persis baiknya. Ini berarti mutasi dari satu versi alternatif hemoglobin ke versi yang lain bersifat *netral* dalam konteks seleksi alam. Kalangan netralis percaya bahwa mayoritas besar perubahan evolusioner, pada level genetika molekuler, bersifat netral – *acak* dalam kaitannya dengan seleksi alam. Aliran ahli genetika alternatifnya, yang disebut kaum seleksionis, percaya bahwa seleksi alam merupakan daya yang ampuh, pada level detail di setiap titik di sepanjang rantai molekuler sekalipun.

Penting di sini untuk membedakan dua pertanyaan terpisah. Pertama, pertanyaan yang relevan dengan bab ini, apakah netralisme merupakan alternatif bagi seleksi alam sebagai penjelasan untuk evolusi adaptif. Kedua, dan cukup berbeda, pertanyaan apakah sebagian besar perubahan evolusi yang benar-benar terjadi memang bersifat adaptif. Kalau kita membahas perubahan evolusioner dari satu bentuk molekul ke bentuk lainnya, seberapa besar kemungkinan perubahan itu terjadi melalui seleksi alam, dan seberapa besar kemungkinan perubahan itu bersifat netral yang terjadi melalui pergeseran acak? Untuk pertanyaan kedua ini, marak terjadi serang-menyerang di antara ahli genetika molekuler; yang satu pertama menang, untuk kemudian ditumbangkan yang lain. Tapi kalau kebetulan kita memusatkan perhatian pada adaptasi – pertanyaan pertama – pertengkarnya bagai itik berebut tembolok. Kalau urusannya soal kita manusia, mutasi netral mungkin tidak ada karena kita maupun seleksi alam tidak bisa melihatnya. Kalau berkenaan dengan kaki dan lengan dan sayap dan mata dan perilaku, mutasi netral itu *bukan* mutasi sama sekali! Dalam analogi resep tadi, rasa hidanganannya sama saja sekalipun beberapa kata dari resep tersebut telah ‘bermutasi’ ke jenis huruf cetak yang lain. Untuk kita yang memedulikan hidangan akhirnya, resepnya tetap sama, mau itu kata-katanya dicetak seperti ini atau *seperti ini* atau **seperti ini**. Ahli genetika molekuler itu seperti tukang cetak yang rewel. Mereka ambil pusing dengan bentuk aktual kata-kata yang dituliskan untuk resep-resep. Seleksi alam tidak ambil pusing, kita pun mestinya tidak kalau membahas evolusi adaptasi. Bila yang kita bahas itu aspek-aspek lain evolusi, misalnya kecepatan evolusi di berbagai silsilah, mutasi netral menjadi pokok yang teramat penting.

Orang netralis yang paling getol sekalipun dengan cukup senang hati sepakat bahwa seleksi alam memang bertanggung jawab atas semua adaptasi. Yang ia tekankan itu cuma bahwa

sebagian besar perubahan evolusi bukan adaptasi. Ia boleh jadi benar, kendati ada satu aliran ahli genetika yang tidak sepakat dengannya. Bagi orang yang di luar lingkaran pertikaian seperti saya, saya berharap kaum netralis yang menang, karena ini akan sangat mempermudah kita untuk mencari tahu hubungan-hubungan evolusioner dan kecepatan evolusi. Semua orang di kedua pihak setuju bahwa evolusi netral tidak bisa menghasilkan peningkatan adaptif. Alasannya sederhana: evolusi netral, secara definisi, acak; dan peningkatan adaptif, secara definisi, nonacak. Sekali lagi, kita gagal menemukan alternatif bagi seleksi Darwinian, sebagai penjelasan untuk fitur kehidupan yang membedakannya dari nonkehidupan, yaitu kompleksitas adaptif.

Sekarang kita beralih ke rival historis bagi Darwinisme – teori ‘mutasionisme’. Sulit bagi kita memahami alasannya sekarang tapi, di tahun-tahun awal abad ini ketika fenomena mutasi pertama kali dinamai, ia dianggap bukan sebagai bagian penting teori Darwinian, tetapi sebagai teori *alternatif* bagi evolusi! Ada satu aliran ahli genetika yang disebut mutasionis, yang meliputi nama-nama besar seperti Hugo de Vries dan William Bateson di antara para penemu-ulang prinsip-prinsip hereditas Mendel, Wilhelm Johannsen pencipta kata *gene*, dan Thomas Hunt Morgan, bapak teori hereditas kromosom. de Vries paling terkesan dengan besaran perubahan yang dapat didatangkan mutasi, dan ia berpikir bahwa spesies baru selalu berasal-mula dari mutasi-mutasi tunggal yang besar. Ia dan Johannsen percaya bahwa sebagian besar variasi *di dalam* spesies itu bersifat nongenetik. Seisi kalangan mutasionis percaya bahwa peran yang dimainkan seleksi dalam evolusi itu paling-paling hanya peran pencabut gulma semata. Daya kreatif yang sesungguhnya adalah mutasi itu sendiri. Genetika Mendelian dibayangkan bukan sebagai tonggak tengah Darwinisme seperti sekarang ini, tetapi sebagai antitesis Darwinisme.

Sulit sekali untuk akal orang modern menanggapi gagasan ini dengan hal selain gelak tawa, tapi jangan sampai kita mengulang nada menggurui dari Bateson sendiri: ‘Kita jenguk Darwin untuk mengamati kumpulan faktanya yang tak tertandingi [tapi...] bagi kita wacana yang dikemukakannya sudah tidak lagi punya wibawa filosofis. Kita membaca skema Evolusi Darwin seperti kita membaca skema Lucretius atau Lamarck.’ Dan lagi, ‘alihrupa kumpulan populasi lewat langkah-langkah yang begitu kecil dan halus, dipandu seleksi, seperti kebanyakan kita lihat sekarang, sungguh tak bisa diterapkan sampai-sampai kita hanya bisa heran melihat kurangnya pemahaman yang diperagakan para pendukung gagasan semacam itu, dan kecakapan forensik yang dipakai untuk membuatnya tampak dapat diterima pun untuk sekali saja.’ Dan R. A. Fisher lah yang memutarbalikkan keadaan, yang menunjukkan bahwa, sama sekali bukan antitesis Darwinisme, hereditas partikulat Mendelian justru esensial baginya.

Mutasi itu niscaya bagi evolusi, tapi bagaimana mungkin orang bisa berpikir bahwa mutasi saja cukup? Perubahan evolusioner itu, sampai tataran yang jauh lebih besar dari yang bisa dibayangkan kebetulan semata, merupakan *peningkatan*. Masalah dalam gagasan mutasi sebagai daya tunggal evolusi sederhana: *kok* bisa mutasi itu ‘*tahu*’ apa yang baik bagi hewan dan apa yang tidak? Dari semua kemungkinan perubahan yang dapat terjadi pada suatu mekanisme kompleks seperti organ, mayoritas besar merupakan perubahan ke arah yang lebih buruk. Hanya secuil perubahan kecil saja yang membuatnya lebih baik. Barang siapa yang ingin mengetengahkan bahwa mutasi, tanpa seleksi, adalah daya penggerak evolusi, harus menjelaskan bagaimana bisa mutasi condong ke arah yang lebih baik. Dengan kearifan bawaan misterius apa tubuh memilih untuk bermutasi ke arah makin baik, dan bukan makin buruk? Anda perhatikan bahwa ini sebetulnya pertanyaan yang sama, dengan bentuk berbeda, seperti yang kita ajukan untuk Lamarckisme. Kaum mutasionis, tak perlu dibilang lagi, tak kunjung menjawabnya. Yang aneh lagi, pertanyaan ini hampir seperti tak pernah melintas di benak mereka.

Sekarang, semua hal ini tampak makin absurd bagi kita karena kita dibesarkan untuk percaya bahwa mutasi itu ‘acak’. Kalau mutasi itu acak, maka, secara definisi, mutasi tidak dapat dibiarkan menuju peningkatan. Tapi aliran mutasionis tentunya tidak menganggap mutasi acak. Mereka berpikir bahwa tubuh memiliki kecenderungan bawaan untuk berubah ke arah tertentu dibanding arah lainnya, kendati mereka membiarkan tak terjawab pertanyaan bagaimana bisa tubuh ‘tahu’ perubahan apa yang baik baginya di masa depan. Sembari mengesampingkan gagasan ini sebagai takhayul, kita perlu memahami dengan jernih apa maksud mutasi itu acak. Ada keacakan, ada pula keacakan, dan banyak orang merancukan makna-makna kata tersebut. Sebenarnya mutasi itu tidak acak dalam banyak hal. Yang saya tegaskan di sini adalah bahwa hal-hal ini *tidak* mencakup apa pun yang sepadan dengan antisipasi hal yang membuat hidup hewan jadi lebih baik. Dan hal yang sepadan dengan antisipasi tersebut memang dibutuhkan kalau mutasi, tanpa seleksi, hendak digunakan untuk menjelaskan evolusi. Patut kita melihat sedikit lebih dalam di konteks mana mutasi itu acak, dan di konteks mana tidak.

Konteks pertama bahwa mutasi itu tidak acak adalah ini. Mutasi disebabkan oleh peristiwa-peristiwa fisik yang pasti: mutasi tidak terjadi secara spontan. Mutasi dipengaruhi hal yang disebut ‘mutagen’ (berbahaya karena sering memicu timbulnya kanker): sinar-X, sinar kosmik, zat-zat radioaktif, berbagai zat kimia, dan bahkan gen-gen lain yang disebut ‘gen-gen mutator’. Kedua, tidak semua gen, di spesies mana pun, sama-sama berpotensi bermutasi. Setiap lokus pada kromosom memiliki *kecepatan mutasi* khasnya sendiri. Misalnya, kecepatan mutasi dalam membuat gen untuk penyakit Huntington (mirip dengan penyakit ayan Tarian St. Vitus), yang membunuh banyak orang di awal abad pertengahan, itu sekitar 1 dari 200.000. Kecepatan untuk akondroplasia (sindrom kerdil yang akrab dengan kita, ciri anjing *basset* dan tekel; lengan dan kaki yang terlalu pendek untuk tubuh) kira-kira 10 kali lebih tinggi. Kecepatan ini diukur dalam kondisi-kondisi normal. Kalau mutagen seperti sinar-X ada, semua kecepatan mutasi yang normal akan melesat. Pada kromosom, ada beberapa bagian yang disebut ‘titik panas’ (*‘hot spot’*) dengan perputaran gen yang sangat tinggi, kecepatan mutasi yang sangat tinggi secara lokal.

Ketiga, di tiap lokus pada kromosom, titik panas atau bukan, mutasi ke arah-arah tertentu lebih mungkin terjadi ketimbang mutasi mundur. Inilah yang memunculkan gejala yang dikenal dengan istilah ‘tekanan mutasi’ yang dapat berkonsekuensi bagi perubahan evolusioner. Sekalipun, misalnya, dua bentuk molekul hemoglobin, Bentuk 1 dan Bentuk 2, itu netral secara selektif (yang berarti keduanya sama-sama baik dalam membawa oksigen di dalam darah), mutasi dari 1 ke 2 tetap lebih lazim terjadi ketimbang mutasi mundur dari 2 ke 1. Dalam hal ini, tekanan mutasi akan cenderung membuat Bentuk 2 lebih lazim dari Bentuk 1. Tekanan mutasi disebut nol pada satu lokus kromosom, kalau kecepatan mutasi maju di lokus ituimbang dengan kecepatan mutasi mundurnya.

Sekarang kita paham bahwa pertanyaan apakah mutasi itu benar-benar acak bukanlah pertanyaan sepele. Jawabannya tergantung pada seperti apa acak itu kita pahami. Kalau Anda anggap ‘mutasi acak’ itu bermakna bahwa mutasi tidak dipengaruhi peristiwa-peristiwa luar, maka sinar-X menyangkal kesimpulan bahwa mutasi itu acak. Kalau Anda berpikir ‘mutasi acak’ itu menyiratkan bahwa semua gen memiliki kemungkinan yang sama untuk bermutasi, maka titik panas menunjukkan bahwa mutasi itu tidak acak. Kalau Anda berpikir ‘mutasi acak’ itu menyiratkan bahwa di semua lokus kromosom tekanan mutasi itu nol, maka sekali lagi mutasi itu tidak acak. Mutasi itu acak hanya kalau Anda mendefinisikan ‘acak’ untuk makna ‘tidak punya bias umum menuju peningkatan ragawi’. Ketiga jenis nonkeacakan sejati yang telah kita timbang

tadi tak berdaya menggerakkan evolusi ke arah peningkatan adaptif dibanding arah ‘acak’ (secara fungsional) lainnya. Ada jenis nonkeacakan keempat, dan hal yang sama juga berlaku bagi jenis keempat ini, walaupun tidak sejelas contoh sebelumnya. Kita perlu meluangkan sedikit waktu untuk membahasnya karena hal ini masih saja merusuhi beberapa ahli biologi modern sekalipun.

Ada orang yang memahami ‘acak’ dengan makna berikut ini, dan menurut saya makna tersebut agak ganjil. Saya kutip dari dua penantang (P. Saunders dan M-W. Ho) Darwinisme, mengenai konsepsi mereka atas hal yang diyakini kaum Darwinian sebagai ‘mutasi acak’. ‘Konsep variasi acak neo-Darwinian mengandung kekeliruan besar: bahwa setiap hal yang dapat dibayangkan itu mungkin terjadi’. ‘*Semua* perubahan itu dianggap mungkin dan *sama-sama mungkin*’ (penekanan dari saya). Jangankan percaya, terbayang pun tidak di benak saya bahwa keyakinan semacam ini ada *artinya*!. Apa gerakan yang dimaksud dengan menganggap ‘semua’ perubahan sama-sama mungkin? *Semua* perubahan? Agar dua hal atau lebih itu ‘sama-sama mungkin’, hal-hal tersebut mesti dapat ditentukan sebagai peristiwa-peristiwa diskret. Misalnya, kita bisa bilang ‘Kepala dan Ekor sama-sama mungkin’, karena Kepala dan Ekor merupakan dua peristiwa diskret. Tapi ‘semua’ perubahan ‘yang mungkin’ dalam tubuh hewan itu bukan peristiwa diskret semacam ini. Coba bandingkan dua peristiwa yang mungkin ini: ‘Ekor sapi memanjang satu inci’; dan ‘Ekor sapi memanjang dua inci’. Apakah keduanya peristiwa terpisah, dan karenanya ‘sama-sama mungkin’? Atau keduanya cuma varian kuantitatif dari peristiwa yang sama?

Tampak jelas bahwa karikatur seorang Darwinian telah direka di sini, yang pemahamannya atas keacakan itu, walaupun bukan benar-benar tak ada artinya, teramat sangat ekstrem. Agak lama baru saya bisa memahami karikatur ini, karena begitu asing dari cara pikir Darwinian yang saya ketahui. Tapi saya rasa sekarang saya paham, dan saya akan mencoba menjelaskannya, karena saya pikir ini bisa membantu kita memahami apa yang ada di balik banyak hal yang konon merupakan penolakan atas Darwinisme ini.

Variasi dan seleksi bekerja sama untuk menghasilkan evolusi. Orang Darwinian berkata bahwa variasi itu acak dalam arti bahwa ia tidak diarahkan menuju peningkatan, dan bahwa kecenderungan menuju peningkatan dalam evolusi itu timbul karena seleksi. Kita bisa membayangkan semacam malaran doktrin evolusi, dengan Darwinisme di ujung yang satu dan Mutasionisme di ujung satunya. Orang mutasionis ekstrem percaya bahwa seleksi tidak berperan dalam evolusi. Arah evolusi ditentukan oleh arah mutasi yang ditawarkan. Misal kita contohkan pembesaran otak manusia yang terjadi selama beberapa juta tahun terakhir dalam evolusi kita. Orang Darwinian berkata bahwa variasi yang ditawarkan oleh mutasi untuk seleksi meliputi beberapa individu dengan otak lebih kecil dan beberapa individu dengan otak lebih besar; seleksi memilih yang kedua. Orang mutasionis berkata bahwa ada bias dalam memilih otak yang lebih besar pada variasi yang ditawarkan oleh mutasi; tidak ada seleksi (atau tidak perlu) setelah variasi ditawarkan; otak membesar karena perubahan mutasional dibiaskan ke arah otak yang lebih besar. Untuk merangkum poin ini: dalam evolusi terdapat bias ke arah otak yang lebih besar; bias ini bisa timbul dari seleksi saja (pandangan Darwinian) atau dari mutasi saja (pandangan mutasionis); kita bisa membayangkan serentang malaran di antara dua sudut pandang ini, hampir seperti peralihan antara dua sumber bias evolusi yang mungkin ada. Pandangan moderatnya adalah bahwa terdapat *semacam* bias dalam mutasi menuju pembesaran otak, dan seleksi memperkuat bias tersebut dalam populasi yang bertahan hidup.

Watak karikturnya tampak dalam penggambaran hal yang menjadi maksud seorang Darwinian ketika ia berkata tidak ada bias dalam variasi mutasional yang ditawarkan untuk seleksi. Bagi saya, sebagai Darwinian nyata, hal ini hanya berarti bahwa mutasi tidak secara sistematis dibiaskan ke arah peningkatan adaptif. Tapi bagi karikatur Darwinian yang lebay, hal ini berarti bahwa semua perubahan yang dapat dibayangkan itu ‘sama-sama mungkin’. Dengan mengesampingkan kemustahilan logis dari keyakinan semacam itu, seperti sudah kita tegaskan, karikatur seorang Darwinian dibayangkan percaya bahwa tubuh adalah tanah liat lunak yang siap dibentuk oleh seleksi mahakuasa ke dalam bentuk apa pun yang mungkin dipilihnya. Kita perlu memahami beda antara Darwinian yang nyata dan karikturnya. Kita akan mencermatinya lewat satu contoh, beda antara teknik terbang kelelawar dan malaikat.

Malaikat selalu dilukiskan memiliki sayap yang mengembang dari punggung mereka, sehingga kedua lengannya tidak diselimuti bulu. Di lain pihak, kelelawar, bersama burung dan pterodactyl, tidak memiliki lengan yang bebas. Lengan-lengan purba mereka telah menjadi sayap, dan tidak dapat digunakan, atau hanya dapat digunakan dengan sangat kikuk, untuk tujuan lain seperti memungut makanan. Sekarang kita dengarkan percakapan antara Darwinian nyata dan karikatur ekstrem seorang Darwinian.

<i>Nyata.</i>	Kira-kira kenapa ya kelelawar tidak berevolusi hingga sayapnya seperti malaikat? Sepertinya sepasang lengan bebas akan berguna. Mencit selalu menggunakan lengan mereka untuk memungut makanan dan menggigitnya, dan kelelawar tampak kikuk sekali di atas tanah tanpa lengan. Kurasa jawabannya mungkin karena mutasi memang tidak memberi jalan untuk variasi yang diperlukan. Memang tidak pernah ada kelelawar purba mutan yang tunas sayapnya tumbuh keluar dari tengah-tengah punggung.
<i>Karikatur.</i>	<i>Ngawur!</i> Seleksi itu segalanya. Kalau kelelawar tidak punya sayap seperti malaikat, itu artinya seleksi tidak memilih sayap seperti malaikat. Sudah pasti ada kelelawar mutan dengan tunas sayap menyembul dari tengah punggungnya, tapi seleksi memang tidak memilihnya saja.
<i>Nyata.</i>	Aku <i>sih</i> sepakat kalau seleksi mungkin tidak memilih mereka kalau pun <i>memang</i> tunas sayap itu tumbuh. Contohnya saja, sayap seperti itu pasti akan menaikkan bobot si hewan itu, dan kelebihan beban sama sekali harus dihindari semua hewan penerbang. Tapi tentu kamu tidak berpikir bahwa, <i>apa pun</i> yang pada prinsipnya dapat dipilih seleksi, mutasi akan selalu memunculkan variasi yang perlu, kan?
<i>Karikatur.</i>	Oh, memang begitu. Seleksi itu segalanya. Mutasi itu acak.
<i>Nyata.</i>	Iya, benar, mutasi itu acak, tapi itu cuma berarti bahwa mutasi tidak dapat meramal masa depan dan merencanakan hal yang baik bagi hewan. Tidak berarti bahwa <i>semua-muanya</i> itu mungkin. Menurutmu kenapa, misalnya, tidak ada hewan yang menyemburkan api dari lubang hidungnya seperti naga? Padahal kan itu berguna untuk menangkap dan memanggang mangsa?
<i>Karikatur.</i>	Oh, mudah saja. Seleksi itu segalanya. Hewan tidak menyemburkan api karena memang tidak ada gunanya. Mutan penyembur api dieliminir seleksi alam, mungkin karena fitur itu terlalu menguras tenaga.
<i>Nyata.</i>	Mana mungkin pernah ada mutan penyembur api?! Dan kalau pun ada, agaknya mereka akan celaka karena terbakar sendiri!
<i>Karikatur.</i>	<i>Ngawur!</i> Kalau cuma itu masalahnya, seleksi pasti akan memilih evolusi lubang hidung berdingding asbes.

Nyata.	Mana mungkin mutasi menghasilkan lubang hidung berdinding asbes?! Mana mungkin hewan mutan bisa menyekresikan asbes, mana mungkin ada sapi mutan yang bisa melompat ke bulan?!
Karikatur.	Sapi mutan yang bisa melompat ke bulan akan langsung dieliminir seleksi alam. Di atas sana itu tak ada oksigen, tahu!
Nyata.	Kenapa tidak sekalian saja kamu bilang ada sapi mutan dengan baju astronaut dan masker oksigen yang ditentukan secara genetik?
Karikatur.	Oh, benar juga! Ya, sepertinya memang cuma karena melompat ke bulan itu tidak ada gunanya untuk sapi. Dan jangan lupa juga soal besarnya tenaga yang dibutuhkan untuk mencapai kecepatan setinggi itu.
Nyata.	Sepertinya kamu yang ngawur.
Karikatur.	Kamu jelas bukan Darwinian sejati. Siapa kamu ini, deviasionis krypto-mutasionis?
Nyata.	Kalau memang begitu pikirmu, tunggu saja sampai kamu bertemu mutasionis sejati.
Mutasionis.	Ini perdebatan orang Darwinian, ya? Boleh gabung? Kalian ini terlalu mementingkan seleksi. Seleksi itu cuma bisa menyingkirkan hewan yang cacat bentuk dan ganjil. Sama sekali tidak bisa menghasilkan evolusi konstruktif. Coba tengok contoh kasus sayap kelelawar tadi. Kejadian sebenarnya itu begini: dulu ada populasi kuno hewan darat; terus, mutasi mulai memunculkan jari-jari yang memanjang dan selaput kulit di antaranya. Seiring berjalannya generasi, mutasi-mutasi ini menjadi makin kerap hingga, pada akhirnya, seluruh populasi pun bersayap. Tak ada urusannya dengan seleksi. Yang ada itu kecenderungan bawaan pada konstitusi kelelawar purba untuk mengevolusikan sayap.
Nyata & Karikatur (serentak).	Dasar mistis! Balik sana ke duniamu di abad lalu.

Saya harap saya tidak sedang berprasangka kalau saya anggap simpati pembaca tidak pada Mutasionis maupun karikatur seorang Darwinian. Saya anggap pembaca sepakat dengan Darwinian nyata, sebagaimana, tentunya, saya. Si karikatur itu tidak benar-benar ada. Sayangnya ada orang yang *berpikir* dia ada, dan berpikir bahwa, karena mereka tidak bersepakat dengannya, mereka tidak bersepakat dengan Darwinisme itu sendiri. Ada satu aliran ahli biologi yang sampai melontarkan kata-kata seperti ini. Darwinisme bermasalah karena mengabaikan batas-batas yang dibebankan embriologi. Kaum Darwinian (dan di titik ini karikturnya muncul) berpikir bahwa, kalau seleksi memilih perubahan evolusioner yang dapat dibayangkan, maka variasi mutasional yang dibutuhkan pasti akan tersedia. Perubahan mutasional ke arah mana pun sama-sama mungkin: seleksi memberikan satu-satunya bias.

Tapi Darwinian nyata mana pun akan mengakui bahwa, kendati gen pada kromosom dapat bermutasi sewaktu-waktu, konsekuensi-konsekuensi mutasi pada *tubuh* sangat ketat dibatasi oleh proses embriologi. Kalau saya pernah meragukan ini (dan tidak, saya tidak pernah), keraguan saya akan buyar karena simulasi komputer biomorf saya. Anda tidak bisa seenaknya mendalilkan mutasi ‘untuk’ sayap yang tumbuh di bagian tengah punggung. Sayap, atau apa pun itu, hanya dapat berevolusi kalau proses perkembangan mengizinkannya. Tidak ada yang ‘bertumbuh’ secara ajaib. Harus terjadi melalui proses perkembangan embrionik. Hanya sedikit saja hal, yang dapat dibayangkan mampu berevolusi, yang betul-betul diizinkan oleh *status quo* proses-proses perkembangan yang sudah ada. Karena cara lengan berkembang, mutasi mungkin dapat meningkatkan panjang jari dan menyebabkan selaput kulit tumbuh di sela-selanya. Tapi mungkin

tidak ada suatu hal pun dalam embriologi punggung yang menjadi dasar ‘tumbuhnya’ sayap malaikat. Gen-gen boleh bermutasi sampai mampus, tapi takkan ada satu mamalia pun yang bersayap malaikat kecuali proses-proses embriologis mamalia itu rentan terhadap perubahan semacam ini.

Nah, selama kita tidak tahu seluk-beluk berkembangnya embrio, selalu ada ruang untuk perdebatan mengenai seberapa mungkin mutasi-mutasi tertentu yang dapat dibayangkan itu telah atau belum pernah terjadi. Boleh jadi, misalnya, ternyata tak ada satu hal pun dalam embriologi mamalia yang menghalangi tumbuhnya sayap malaikat, dan bahwa Darwinian karikatur itu benar, di kasus yang *satu* ini, saat berkata tunas sayap malaikat itu pernah tumbuh tapi tidak dipilih oleh seleksi. Atau, boleh jadi ternyata ketika kita sudah lebih tahu soal embriologi kita akan melihat bahwa sayap malaikat itu memang tidak pernah bermula, dan karenanya seleksi tak berkesempatan memilihnya. Ada kemungkinan ketiga, yang perlu kita sertakan agar lengkap: embriologi tidak pernah mengizinkan kemungkinan tumbuhnya sayap malaikat dan seleksi tidak akan pernah memilihnya sekalipun embriologi mengizinkannya. Tapi yang harus kita tekankan adalah bahwa batas-batas yang dibebankan embriologi pada evolusi tidak bisa diabaikan. Semua Darwinian serius akan sepakat dengan ini, tetapi sebagian orang melukiskan kalangan Darwinian sebagai pihak yang menyangkalnya. Ternyata orang-orang yang meributkan ‘batas-batas perkembangan’ yang konon merupakan kekuatan anti-Darwinian itu merancukan Darwinisme dengan karikatur Darwinisme yang saya parodikan di atas.

Semua ini berpangkal dari pembahasan tentang apa maksud kalimat mutasi itu ‘acak’. Saya kemukakan di sini tiga konteks yang menunjukkan mutasi itu tidak acak: mutasi dipicu oleh sinar-X, dll.; kecepatan mutasi tidak sama untuk tiap gen; dan kecepatan mutasi maju tidak sama dengan kecepatan mutasi mundur. Ke dalamnya juga telah kita tambahkan konteks keempat yang menunjukkan mutasi itu tidak acak. Mutasi itu nonacak dalam arti ia hanya dapat mengubah proses-proses perkembangan embrionik yang *sudah ada*. Ia tidak dapat tiba-tiba memunculkan perubahan terbayang apa pun yang mungkin dipilih seleksi. Variasi yang tersedia bagi seleksi dibatasi proses-proses embriologi, karena proses itu memang ada.

Ada konteks kelima yang menunjukkan *kemungkinan* bahwa mutasi itu nonacak. Kita dapat membayangkan satu (saja) bentuk mutasi yang secara sistematis dibiaskan ke arah peningkatan kualitas adaptasi hewan dengan kehidupannya. Tapi walau kita dapat membayangkannya, tidak ada satu orang pun yang mengajukan cara-cara munculnya bias tersebut. Dalam konteks kelima ini sajalah, konteks ‘mutasionis’, seorang Darwinian nyata yang sejati bersikeras bahwa mutasi itu acak. Mutasi tidak secara sistematis dibiaskan ke arah peningkatan adaptif, dan belum ada mekanisme yang diketahui (untuk tidak mengatakan tidak ada) yang dapat memandu mutasi ke arah-arahan yang nonacak dalam arti yang kelima ini. Mutasi itu acak dalam kaitannya dengan keuntungan adaptif, kendati nonacak untuk semua jenis konteks lainnya. Seleksi, dan hanya seleksi, lah yang mengarahkan evolusi ke arah yang nonacak dalam kaitannya dengan keuntungan. Mutasionisme bukan saja keliru dalam faktanya. Ia tidak pernah bisa benar. Pada prinsipnya ia tidak mampu menjelaskan evolusi peningkatan. Mutasionisme segolongan dengan Lamarckisme: bukan rival Darwinisme yang terbukti salah, tapi bukan rival sama sekali.

Begitu pula dengan terduga rival seleksi Darwinisme berikutnya, yang digadag-gadangkan ahli genetika Cambridge Gabriel Dover dengan tajuk aneh ‘dorongan molekuler’ (karena segala sesuatu terbuat dari molekul, tidak jelas mengapa proses hipotetis Dover lebih pantas menyandang nama dorongan *molekuler* dibanding proses-proses evolusioner lainnya; saya jadi teringat seorang pria kenalan saya yang mengeluh perutnya kembung, dan membereskan masalah

itu dengan otak batinnya). Motoo Kimura dan para pendukung teori evolusi netralis lainnya, seperti telah kita lihat, tidak membuat klaim-klaim palsu untuk teori mereka. Mereka tidak berilusi bahwa perubahan acak itu rival bagi seleksi alam sebagai penjelasan untuk evolusi adaptif. Mereka mengakui bahwa hanya seleksi alam yang dapat mendorong evolusi ke arah adaptif. Mereka cuma mengklaim bahwa banyak perubahan evolusioner (dalam kaca mata ahli genetika molekuler) tidak bersifat adaptif. Klaim Dover untuk teorinya tidak serendah hati itu. Dover berpikir ia mampu menjelaskan *semua* evolusi tanpa seleksi alam, kendati ia pun berbaik hati mengakui bahwa seleksi alam itu juga *ada benarnya!*

Sejauh ini, sumber pertolongan pertama kita saat menimbang perkara seperti itu adalah contoh mata, kendati tentunya mata hanyalah perwakilan dari seperangkat besar organ-organ yang terlalu kompleks dan terancang baik untuk dimunculkan oleh kebetulan semata. Hanya seleksi alam, berkali-kali saya tekankan, yang cenderung mampu menawarkan penjelasan masuk akal bagi mata manusia dan organ-organ lain yang setara kesempurnaan dan kompleksitas peliknya. Untungnya, Dover dengan terbuka menerima tantangan ini, dan menawarkan penjelasannya sendiri atas evolusi mata. Anggaplah, katanya, bahwa 1.000 langkah evolusi dibutuhkan untuk mengembangkan mata dari tiada. Ini berarti satu rangkaian berisi 1.000 perubahan genetik dibutuhkan untuk mengalihpupuskan selambar kulit telanjang menjadi mata. Bagi saya, sebagai bahan diskusi, asumsi ini bisa diterima. Dalam konteks Negeri Biomorf, ini berarti bahwa hewan berkulit telanjang ini berjarak 1.000 langkah genetik dari hewan bermata.

Nah, bagaimana kita menjelaskan fakta bahwa hanya 1.000 langkah saja yang diambil untuk memunculkan mata yang kita kenal? Penjelasan seleksi alam untuk hal ini sudah diketahui luas. Bunyi penjelasan paling ringkasnya, pada masing-masing dari 1.000 langkah ini, mutasi menawarkan sejumlah alternatif, dan hanya satu di antaranya yang dipilih karena membantu ketahanan hidup. 1.000 langkah evolusi ini mewakili 1.000 titik pilihan beruntun, yang pada masing-masing langkah tersebut sebagian besar alternatif itu berujung pada kematian. Kompleksitas adaptif mata modern merupakan produk akhir dari 1.000 ‘pilihan’ tak-sadar yang berhasil. Spesies tersebut telah melewati lajur tertentu melalui labirin semua kemungkinan. Ada 1.000 titik cabang di sepanjang lajur itu, dan tiap-tiap penyintas merupakan individu-individu yang kebetulan berbelok ke lajur yang meningkatkan kualitas penglihatan. Jasad-jasad mati bergelimpangan di lajur-lajur yang lain – mereka yang gagal, yang salah belok di masing-masing dari 1.000 titik pilihan suksesif itu. Mata yang kita kenal kini adalah produk akhir dari rangkaian berisi 1.000 ‘pilihan’ selektif yang berhasil.

Itulah (salah satu cara ungkap) penjelasan seleksi alam atas evolusi mata dalam 1.000 langkah. Nah, sekarang, seperti apa penjelasan Dover? Pada dasarnya, ia mengemukakan bahwa tidak peduli pilihan mana yang diambil silsilah itu pada tiap langkahnya: individu-individu dalam silsilah tersebut secara retrospektif telah menemukan guna dari organ yang dihasilkan. Tiap langkah yang diambil silsilah tersebut, menurutnya, merupakan langkah acak. Di Langkah 1, contohnya, mutasi acak menyebar di seluruh spesies tersebut. Karena acak secara fungsi, ciri yang baru saja dievolusikan ini tidak membantu ketahanan hidup hewan-hewan tersebut. Maka spesies itu mencari tempat baru atau cara hidup baru yang memungkinkan mereka menggunakan fitur acak baru yang telah dibebankan pada tubuh-tubuh mereka. Setelah menemukan lingkungan yang cocok dengan bagian acak dari tubuh-tubuh mereka, mereka hidup di sana untuk beberapa waktu, hingga mutasi acak yang baru muncul dan menyebar ke seluruh spesies tersebut. Kemudian spesies itu harus melanglang buana lagi, mencari tempat baru atau cara hidup baru di dunia yang membuat mereka dapat hidup dengan potongan acak yang baru. Ketika mereka telah

menemukannya, Langkah 2 selesai. Lalu mutasi acak Langkah 3 menyebar ke seluruh spesies ini, begitu seterusnya sampai langkah ke-1.000, titik akhir terbentuknya mata yang kita kenal sekarang ini. Dover menunjukkan bahwa mata manusia ternyata menggunakan hal yang disebut cahaya ‘yang dapat dilihat’, bukan inframerah. Tapi jika proses-proses acak ini kebetulan membebaskan mata yang peka terhadap inframerah pada tubuh kita, sudah pasti kita akan memaksimalkan pemanfaatannya, dan menemukan cara hidup yang mengeksplorasi sinar inframerah sepenuh-penuhnya.

Sekilas pandang, ide ini tampak menggoda kemungkinannya, tapi cuma sekilas saja. Kemenggodaan itu timbul dari cara simetris yang rapi dalam memutarbalikkan seleksi alam. Seleksi alam, dalam bentuknya yang paling sederhana, mengasumsikan bahwa lingkungan itu dibebankan pada spesies, dan varian-varian genetik yang paling sesuai dengan lingkungan tersebut mampu bertahan hidup. Lingkungannya dibebankan, dan spesiesnya berevolusi untuk menyesuaikan diri dengannya. Teori Dover memutarbalikkan hal ini. Yang ‘dibebani’ itu justru spesies, dalam hal ini oleh perubahan-perubahan mutasi, dan kekuatan-kekuatan genetik internal lain yang menjadi perhatian khusus Dover. Spesies kemudian mencari anggota dari semua lingkungan yang paling pas dengan sifat yang dibebankan padanya.

Tapi kemenggodaan dari simetri ini sebetulnya dangkal saja. Paham pinjam-sarang ajaib dari gagasan Dover ini tersaji dengan semua kemegahannya saat kita mulai berpikir dalam kerangka angka. Hakikat dari skema yang diajukannya adalah bahwa, di masing-masing dari 1.000 langkah itu, ke mana spesies berbelok tidak jadi soal. Tiap inovasi baru yang dimunculkan spesies tersebut bersifat acak secara fungsi, dan spesies itu kemudian menemukan lingkungan yang pas dengannya. Implikasinya, spesies itu *pasti akan menemukan* lingkungan yang cocok, terlepas dari cabang mana pun yang dilaluinya. Nah, coba pikir berapa banyak kemungkinan lingkungan yang kemudian boleh kita dalilkan. Ada 1.000 titik cabang. Jika tiap titik itu bercabang dua (bukan bercabang tiga atau delapan belas, asumsi konservatifnya), jumlah total lingkungan layak huni yang pada prinsipnya harus ada, supaya skema Dover dapat berfungsi, adalah 2 pangkat 1.000 (cabang pertama membuka dua lajur; kemudian masing-masing dari dua cabang tersebut membelah lagi jadi dua, sehingga kini total ada empat; lalu masing-masing dari empat cabang itu menjadi 8; lalu 16, 32, 64, ... terus sampai $2^{1.000}$). Jumlah ini dapat ditulis dengan angka 1 dan 301 nol di belakangnya. Sangat jauh lebih besar dari jumlah total atom di seluruh alam semesta.

Rival bagi seleksi alam yang diajukan Dover tidak akan pernah berlaku, tidak hanya dalam sejuta tahun tapi dalam sejuta kali lebih lama dari keberadaan alam semesta, tidak juga pada sejuta semesta yang masing-masing langgeng sejuta kali lebih lama. Perhatikan bahwa kesimpulan ini tidak terpengaruhi secara material sekalipun kita mengubah asumsi awal Dover: butuh 1.000 langkah untuk membuat mata. Kalau kita kurangi menjadi 100 langkah saja – perkiraan yang mungkin terlalu rendah – kesimpulannya tetap: jumlah lingkungan layak huni yang harus siap mengurus langkah-langkah acak apa pun yang mungkin diambil silsilah tersebut lebih dari sejuta juta juta juta. Lebih kecil dari jumlah sebelumnya, tapi tetap berarti bahwa mayoritas besar ‘lingkungan’ yang mesti disiapkan Dover itu masing-masing terbuat kurang dari satu atom.

Patut dijelaskan mengapa teori seleksi alam tidak rentan terhadap serangan simetris lewat salah satu versi ‘argumen bilangan besar’. Di Bab 3 semua hewan, baik yang sungguhan maupun yang terbayang, ditempatkan dalam satu hiper-ruang raksasa. Di sini juga sama, tapi lebih sederhana karena titik-titik cabang evolusi membelah dua, bukan 18. Jadi himpunan seluruh

hewan yang mungkin telah berevolusi dalam 1.000 langkah evolusioner itu ditenggerkan pada satu pohon raksasa, yang terus mencabang hingga jumlah total rantingnya 1 dengan 301 nol di belakangnya. Setiap riwayat evolusioner aktual dapat direpresentasikan sebagai suatu lajur melalui pohon khayali ini. Dari semua lajur evolusioner terbayang, hanya sedikit saja yang benar-benar telah terjadi. Sebagian besar ‘pohon seluruh mamalia’ ini dapat kita bayangkan diselimuti kegelapan ketiadaan. Di sana-sini, beberapa lintasan di sepanjang pohon yang tertutup gelap itu disinari. Itulah lajur-lajur evolusioner yang benar-benar terjadi, dan, kendati cabang-cabang tersinari ini banyak, jumlahnya tetap kecil ananta di hadapan jumlah semua cabang yang ada. Seleksi alam adalah sebuah proses yang mampu memilih jalannya melalui pohon seluruh hewan terbayang, dan menemukan sejumlah kecil lajur yang tetap bertahan. Teori seleksi alam tidak dapat diserang dengan jenis argumen bilangan besar yang saya pakai untuk menyerang teori Dover, karena hakikat teori ini adalah bahwa seleksi alam terus-menerus memangkas sebagian besar cabang pohon tersebut. Seperti itulah tepatnya perbuatan seleksi alam. Ia memilih jalannya, langkah demi langkah, melalui pohon semua hewan terbayang, menghindari mayoritas cabang-cabang steril yang jumlahnya hampir tak berhingga – hewan-hewan dengan mata di tapak kakinya, dll. – yang wajib diakui teori Dover, karena sifat logika terbaliknya yang ganjil itu.

Sudah kita urus hampir semua hal yang konon merupakan alternatif dari teori seleksi alam. Tinggal satu, yang paling tua: teori bahwa kehidupan itu diciptakan, atau evolusinya didalangi, oleh perancang berkesadaran. Terlalu mudah untuk meruntuhkan versi tertentu dari teori ini, seperti satu (atau dua) yang dipaparkan di kitab Kejadian. Hampir semua bangsa memiliki mitos penciptaannya sendiri, dan kisah Kejadian hanyalah satu di antaranya, yang kebetulan dianut satu suku bangsa penggembala di Timur Tengah. Statusnya tidak lebih istimewa dari keyakinan salah satu suku bangsa di Afrika Barat, yang mengisahkan bahwa dunia ini tercipta dari tahi semut. Semua mitos ini sama-sama bertumpu pada wacana niat sengaja sesosok entitas supernatural.

Sekilas perlu dibuat pembedaan penting antara ‘penciptaan semerta’ dan ‘evolusi terpimpin’. Ahli-ahli teologi modern, apa pun kadar kecendekiannya, telah meninggalkan kepercayaan terhadap penciptaan semerta. Bukti adanya evolusi telah begitu melimpah. Tapi banyak ahli teologi yang menyebut dirinya evolusionis, misalnya Uskup Birmingham yang dikutip di Bab 2, menyelundupkan Tuhan lewat pintu belakang: mereka menambahkan semacam peran pengawasan atas jalan yang telah diambil evolusi, dengan ikut campur tangan di momen-momen kunci dalam sejarah evolusi, (khususnya sejarah evolusi *manusia*), atau bahkan turun tangan dalam peristiwa hari-ke-hari yang berujung pada perubahan evolusioner.

Kita tidak dapat membuktikan bahwa keyakinan seperti ini salah, apalagi kalau diasumsikan bahwa Tuhan memastikan campur tangannya senantiasa serupa dengan hal yang dianggap terjadi karena evolusi oleh seleksi alam. Yang dapat kita katakan adalah, pertama, keyakinan semacam itu berlebihan dan, kedua, *mengasumsikan* adanya hal utama yang ingin kita *jelaskan*, yaitu kompleksitas tertata. Satu hal yang membuat evolusi itu teori yang rapi adalah karena ia menjelaskan seperti apa kompleksitas tertata dapat muncul dari kesederhanaan purba.

Jika ingin mendalilkan ilah yang mampu merekayasa semua kompleksitas tertata di dunia ini, secara semerta atau lewat evolusi terpandu, ilah tersebut pastilah amat sangat kompleks. Orang kreasionis, baik itu umat fanatik yang naif atau uskup terpelajar, *mendalilkan* entitas luar biasa cerdas dan kompleks yang sudah ada. Kalau memang hendak mendalilkan kompleksitas tertata tanpa penjelasan, lebih baik kita dalilkan keberadaan kehidupan sebagaimana kita mengetahuinya saja! Singkatnya, penciptaan ilahi, baik yang bersifat semerta atau dalam rupa

evolusi terpandu, telah tergabung bersama teori-teori lain yang telah kita timbang di bab ini. Di kulit luarnya, semua tampak seperti alternatif bagi Darwinisme, yang kepantasannya dapat diuji dengan melihat bukti. Setelah ditilik lebih dalam, ternyata semuanya bukan rival Darwinisme sama sekali. Teori evolusi oleh seleksi alam kumulatif merupakan satu-satunya teori yang kita kenal yang pada prinsipnya *mampu* menjelaskan keberadaan kompleksitas tertata. Sekalipun bukti yang ada tidak menguatkannya, teori ini *tetaplah* teori terbaik yang tersedia! Dan faktanya, bukti yang ada memang menguatkan teori ini. Tapi itu cerita yang lain lagi.

Sekarang mari kita simpulkan seluruh perkara ini. Hakikat kehidupan adalah kemuskilan statistis pada skala kolosal. Oleh karena itu, kehidupan tidak dapat dijelaskan dengan wacana kebetulan. Penjelasan sejati atas adanya kehidupan wajib merupakan antitesis kebetulan. Antitesis kebetulan adalah ketahanan hidup nonacak, yang dipahami dengan benar. Ketahanan hidup nonacak, yang dipahami secara keliru, bukanlah antitesis kebetulan, melainkan kebetulan itu sendiri. Terdapat malaran yang menghubungkan kedua titik lajat ini, yaitu malaran dari seleksi selangkah ke seleksi kumulatif. Seleksi selangkah hanyalah istilah lain untuk kebetulan murni. Inilah yang saya maksud dengan ketahanan hidup nonacak yang dipahami secara keliru. *Seleksi kumulatif*, yang perlahan dan bertahap, adalah penjelasannya, satu-satunya penjelasan efektif yang pernah diajukan untuk keberadaan rancangan kompleks kehidupan.

Seisi buku ini didominasi oleh gagasan kebetulan, oleh angka pembanding yang bukan main panjangnya melawan peluang kemunculan tatanan, kompleksitas, dan desain nyata secara semerta. Kita telah mencari cara menjinakkan kebetulan, mengikir gigi saing tajamnya. ‘Kebetulan yang tidak terjinakkan’, kebetulan yang murni dan gamblang, berarti rancangan tertata yang mencuat ada dari tiada, dalam satu lompatan saja. Bila awalnya mata tidak ada, lalu, tiba-tiba, dalam sekedipan generasi, muncul mata dalam bentuknya yang sempurna, lengkap, dan genap, itulah kebetulan yang tidak terjinakkan. Hal ini memang mungkin terjadi, tapi peluangnya lebih tipis dari kulit ari: satu berbanding bilangan yang jumlah nol di belakangnya terlalu panjang untuk cukup dituliskan hingga ujung waktu. Hal yang sama juga berlaku untuk tipisnya peluang kemunculan spontan entitas-entitas yang sempurna, lengkap, dan genap, termasuk – tak bisa saya elakkan – entitas-entitas ilahi.

‘Menjinakkan’ kebetulan berarti mengurai kemuskilan menjadi komponen-komponen kecil yang lebih mungkin, yang tersusun dalam rangkaian. Tidak peduli betapa muskil X bisa muncul dari Y dalam selangkah, kita selalu dapat membayangkan serangkaian titik-titik berjenjang yang luar biasa kecil di antara keduanya. Seberapa pun muskilnya perubahan skala besar itu, perubahan-perubahan kecil tetap lebih mungkin terjadi. Dan asalkan kita mendalilkan serangkaian perantara berjenjang yang cukup halus dan tersusun cukup panjang, kita akan mampu menurunkan apa pun dari apa pun, tanpa perlu menghadirkan kemuskilan yang dramatis besarnya. Kita boleh melakukannya hanya jika ada cukup waktu untuk menempatkan semua perantara itu ke dalam rangkaiannya. Dan juga hanya jika ada mekanisme yang memandu tiap langkah ke suatu arah tertentu. Kalau tidak, deretan langkah tersebut akan kabur dalam kembara acak tak berkesudahan.

Pandangan Darwinian berpendapat tegas bahwa kedua prasyarat ini dipenuhi, dan bahwa seleksi alam yang perlahan, gradual, dan kumulatif adalah penjelasan purna bagi keberadaan kita. Jika ada versi-versi teori evolusi yang menyangkal gradualisme perlahan, dan menyangkal peran sentral seleksi alam, versi-versi tersebut boleh jadi benar untuk perkara-perkara tertentu saja. Tapi bukan kebenaran yang seutuhnya, karena versi-versi semacam itu menyangkal inti sari

teori evolusi, yang memampukannya untuk mengurai kemuskilan bukan kepalang dan menjelaskan keajaiban dari hal yang tampak seperti mukjizat.

Lampiran (1991)

Program Komputer dan ‘Evolusi Evolvabilitas’

Program komputer biomorf yang digambarkan di Bab 3 kini tersedia untuk Apple Macintosh, RM Nimbus, dan komputer-komputer yang kompatibel dengan IBM (lihat iklan di hal. 341). Ketiga program ini memiliki sembilan ‘gen’ dasar yang diperlukan untuk memproduksi biomorf-biomorf yang diilustrasikan di Bab 3 dan triliunan biomorf lain yang serupa – atau tidak begitu mirip – dengannya. Program versi Macintosh juga memiliki aneka gen tambahan, yang menghasilkan biomorf-biomorf ‘bersegmen’ (dengan ‘gradien-gradien’ segmentasi) dan citra-citra biomorfis yang direfleksikan di berbagai bidang simetri. Peningkatan-peningkatan kromosom biomorfis ini, bersama versi berwarna program yang kini sedang dalam pengembangan untuk Macintosh II dan belum lagi dirilis, membuat saya merenungkan ‘evolusi evolvabilitas’. Cetak ulang *The Blind Watchmaker* ini memberi saya kesempatan untuk berbagi cerita mengenai buah-buah pemikiran ini.

Seleksi alam dapat berlaku hanya pada kisaran variasi yang dilontarkan mutasi. Mutasi digambarkan ‘acak’ tetapi ini hanya berarti bahwa mutasi tidak diarahkan secara sistematis menuju peningkatan. Mutasi adalah bagian nonacak dari semua variasi yang dapat kita bayangkan. Mutasi berlaku hanya dengan cara mengubah proses-proses embriologi yang sudah ada. Anda tidak dapat membuat gajah lewat mutasi jika embriologi yang ada embriologi gurita. Cukup jelas, saya rasa. Yang kurang jelas bagi saya sampai saya mulai bermain dengan program *Blind Watchmaker* yang telah diperluas adalah bahwa tidak semua embriologi itu sama-sama ‘subur’ dalam mendorong perkembangan evolusi ke depannya.

Bayangkan tiba-tiba muncul sebuah ruang yang terbuka lebar bagi terjadinya evolusi – misalnya benua kosong yang tiba-tiba ada karena bencana alam. Jenis-jenis hewan macam apa yang akan mengisi kekosongan evolusioner ini? Hewan-hewan ini mestilah keturunan individu-individu yang pintar bertahan hidup dalam kondisi-kondisi pascabencana. Tapi menariknya lagi, beberapa jenis embriologi itu mungkin tidak cuma secara khusus pandai dalam bertahan hidup, tetapi juga dalam *berevolusi*. Mungkin mamalia mengambil alih daratan setelah kepunahan dinosaurus itu bukan hanya karena mamalia pandai *bertahan hidup* di dunia pascadinosaurus. Boleh jadi cara mamalia menumbuhkan tubuh baru itu juga ‘pandai’ dalam memunculkan keanekaragaman jenis – karnivora, herbivora, pemakan semut, pemanjat pohon, penggali liang, perenang, dan seterusnya – dan karenanya mamalia boleh dibilang pandai *berevolusi*.

Apa kaitannya ini dengan biomorf-biomorf komputer? Tidak lama setelah mengembangkan program *Blind Watchmaker*, saya bereksperimen dengan program-program komputer lain yang sama kecuali dalam hal embriologi dasarnya – kaidah penggambar-tubuh dasar yang berbeda yang melandasi kerja mutasi dan seleksi. Program-program lain ini, walau dari kulit luarnya tampak serupa dengan *Blind Watchmaker*, ternyata miskin kemungkinan evolusi. Evolusi terus-menerus terbentur jalur-jalur buta yang steril. Degenerasi tampak menjadi hasil yang paling lazim terjadi dalam evolusi yang dipandu paling teliti sekalipun. Sebaliknya, embriologi pohon mencabang yang menjadi tumpuan program *Blind Watchmaker* tampak selalu sarat akan sumber

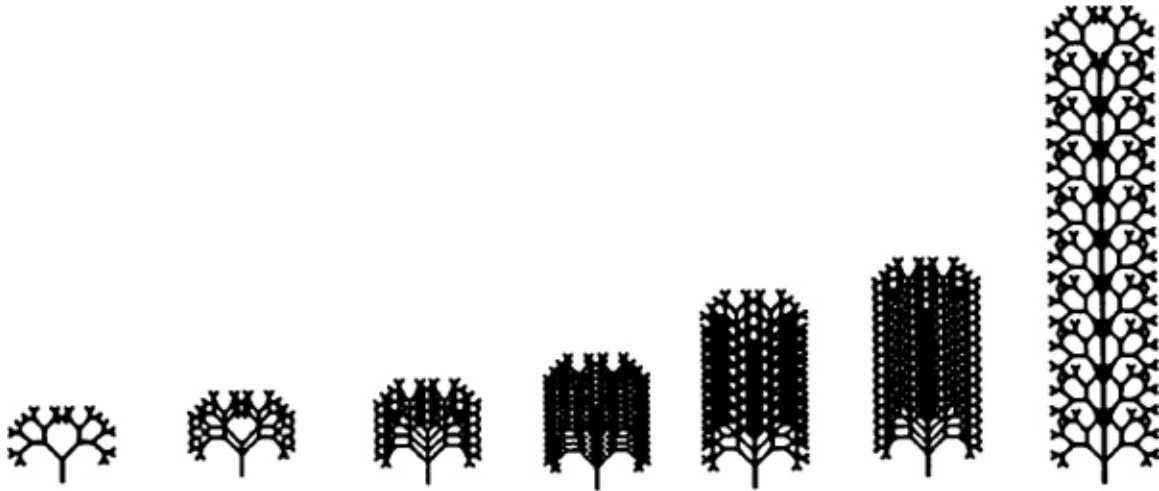
daya evolusioner terbaru; tidak ada kecenderungan menuju degenerasi otomatis saat evolusi bergerak maju – kekayaan, keserbagunaan, bahkan keindahan tampak selalu diperbarui dari generasi ke generasi.

Akan tetapi, terlepas dari produktif dan beragamnya fauna biomorfis yang dihasilkan program *Blind Watchmaker* yang asli, saya tetap saja membentur dinding yang menghalangi evolusi lebih lanjut. Kalau embriologi *Blind Watchmaker* begitu unggul secara evolusioner dibandingkan program-program alternatif tersebut, tidakkah ada modifikasi, ekstensi untuk kaidah penggambaran embriologis yang dapat membuat *Blind Watchmaker* itu sendiri makin subur dengan keberagaman evolusioner? Atau – dengan kata lain – bisakah kromosom dasar dari sembilan gen itu diperluas ke arah yang lebih membuahkan hasil?

Dalam merancang program *Blind Watchmaker* yang asli, saya sengaja mencoba untuk tidak menggunakan pengetahuan biologi saya. Tujuan saya adalah memeragakan daya seleksi nonacak dari variasi acak. Saya ingin agar biologinya, rancangannya, keindahannya, *muncul* karena seleksi. Saya tidak mau kelak menuduh diri sendiri telah dari awal menanamkannya saat menulis program itu. Embriologi pohon mencabang dari *Blind Watchmaker* adalah embriologi pertama yang saya cobakan. Dan saya beruntung karena embriologi alternatif yang saya coba setelahnya ternyata mengecewakan. Setiap kali saya memikirkan cara meluaskan ‘kromosom’ dasar, saya memang membiarkan diri menggunakan sebagian pengetahuan biologi dan intuisi saya. Di antara kelompok-kelompok hewan yang berhasil secara evolusioner ada hewan-hewan yang memiliki skema tubuh *bersegmen*. Dan di antara fitur-fitur paling fundamental dari skema-skema tubuh hewan ini adalah skema-skema *simetri* mereka. Dengan demikian, gen-gen baru yang saya tambahkan ke kromosom biomorfis tersebut mengendalikan segmentasi dan simetri dari berbagai variasi hewan.

Kita, dan semua hewan vertebrata lainnya, bersegmen. Ini tampak jelas dalam tulang-tulang rusuk dan kolom-kolom vertebral kita, yang sifat repetitifnya terlihat bukan hanya pada tulang-tulang itu sendiri tetapi pada otot, saraf, dan pembuluh darah yang terkait dengannya. Bahkan kepala kita juga tersegmentasi secara fundamental, tetapi pada kepala orang dewasa struktur segmental ini tersamarkan di mata semua orang kecuali di mata orang-orang profesional yang belajar anatomi embrionik. Ikan lebih jelas segmentasinya dari kita (ingat lagi susunan otot di sepanjang tulang belakang ikan haring asap). Pada krustasea, serangga, lipan, dan luing, segmentasinya bahkan tampak kentara di bagian luar tubuh. Dalam hal ini, perbedaan antara lipan dan lobster berkenaan dengan homogenitas. Lipan seperti kereta barang yang semua gerbongnya hampir identik satu dengan yang lain. Lobster seperti kereta dengan aneka ragam gerbong dan gerobak, yang pada dasarnya sama dan dengan anggota tubuh bersendi yang sama, yang mencuat keluar dari tiap-tiapnya. Tapi dalam beberapa kasus, gerbong-gerbongnya digabungkan ke dalam kelompok-kelompok dan bagian-bagian mencuatnya menjadi kaki atau penjepit besar. Di area ekor, gerbong-gerbongnya lebih kecil dan lebih seragam, dan perkakas samping bercakarnya menjadi ‘kaki-kaki renang’ kecil berbulu.

Agar biomorf jadi bersegmen, cara saya sudah jelas: Saya menciptakan satu gen baru yang mengendalikan ‘Jumlah Segmen’ dan satu gen baru lainnya yang mengendalikan ‘Jarak Antarsegmen’. Satu biomorf lengkap gaya lama menjadi satu segmen dari biomorf gaya baru.



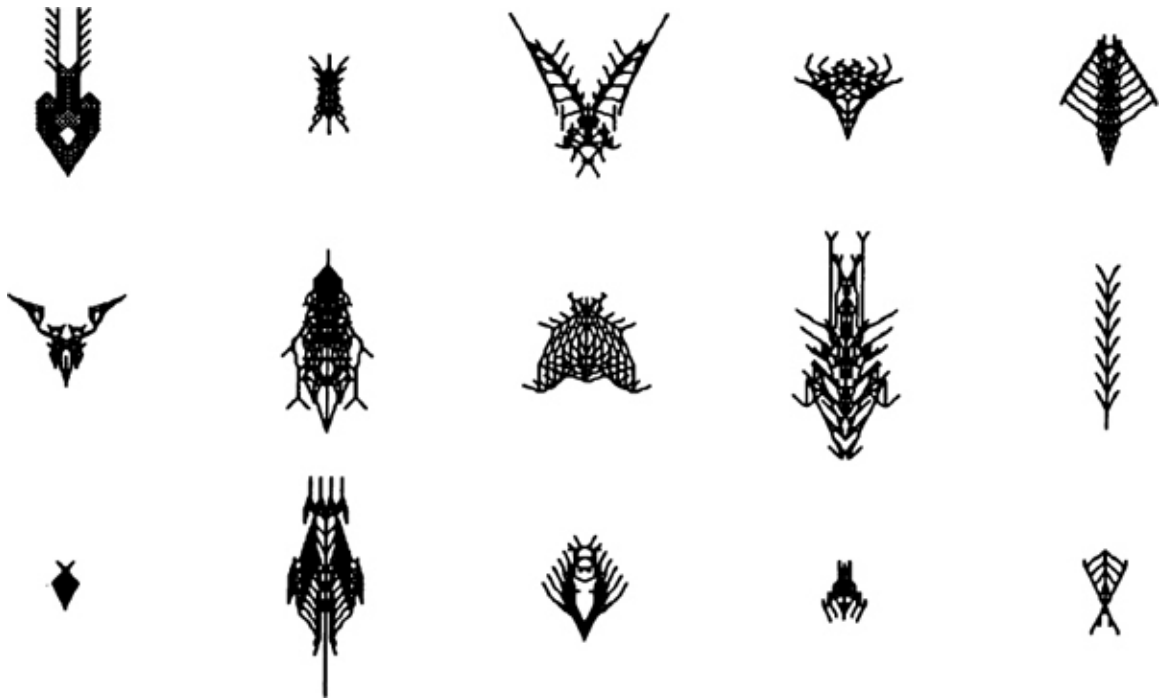
Gambar di atas adalah tujuh biomorf yang berbeda hanya dalam hal gen ‘Jumlah Segmen’ atau gen ‘Jarak Antarsegmen’ mereka. Biomorf paling kiri adalah pohon mencabang lama yang biasa dan biomorf lainnya hanyalah gerbong-gerbong berulang yang disusun secara berseri dari pohon dasar yang sama. Pohon yang sederhana, seperti semua biomorf *Blind Watchmaker* yang asli, adalah kasus khusus ‘hewan bersegmen satu’.

Sejauh ini, saya hanya membahas tentang segmentasi seragam bak-lipan. Segmen-segmen lobster berbeda satu sama lain dengan cara yang rumit. Cara peragaman segmen yang lebih sederhana adalah lewat ‘gradien’. Segmen-segmen kutu kayu lebih mirip satu sama lain ketimbang segmen-segmen lobster, tapi tidak seseragam segmen-segmen luing tipikal (sebetulnya beberapa hewan yang tampak seperti ‘kutu kayu’ atau ‘armadillidiidae’ itu secara teknis tergolong luing). Tubuh kutu kayu lancip di bagian depan dan belakang, dan melar di tengah. Bila kita susuri keretanya dari depan ke belakang, segmen-segmennya memiliki *gradien* ukuran yang memuncak di tengah. Hewan-hewan bersegmen lainnya, seperti trilobit yang sudah punah, paling lebar justru di bagian depan dan melancip ke belakang. Gradien ukuran mereka lebih sederhana, memuncak di salah satu ujung tubuhnya. Gradien yang lebih sederhana seperti inilah yang coba saya tiru dalam biomorf-biomorf bersegmen saya. Saya melakukannya dengan menambahkan satu bilangan konstanta (yang bisa jadi bilangan negatif) ke *nilai* terungkap dari satu gen tertentu dari depan ke belakang. Dari tiga biomorf berikut ini, yang kiri tidak memiliki gradien, yang tengah memiliki gradien di Gen 1, dan yang kanan di Gen 4.

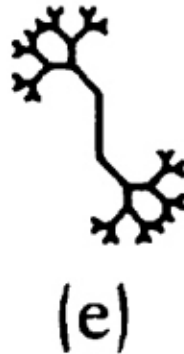
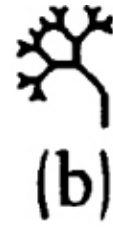
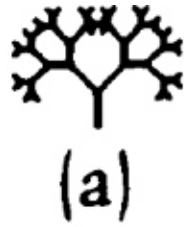


Setelah meluaskan kromosom biomorfis dasar dengan dua gen dan gen-gen gradien yang terkait, saya siap melepas embriologi biomorfis gaya baru ke dalam komputer untuk melihat apa

yang bisa dilakukannya dengan evolusi. Bandingkan gambar berikut ini dengan Gambar 5 Bab 3, yang semua biomorfnya tanpa segmentasi.

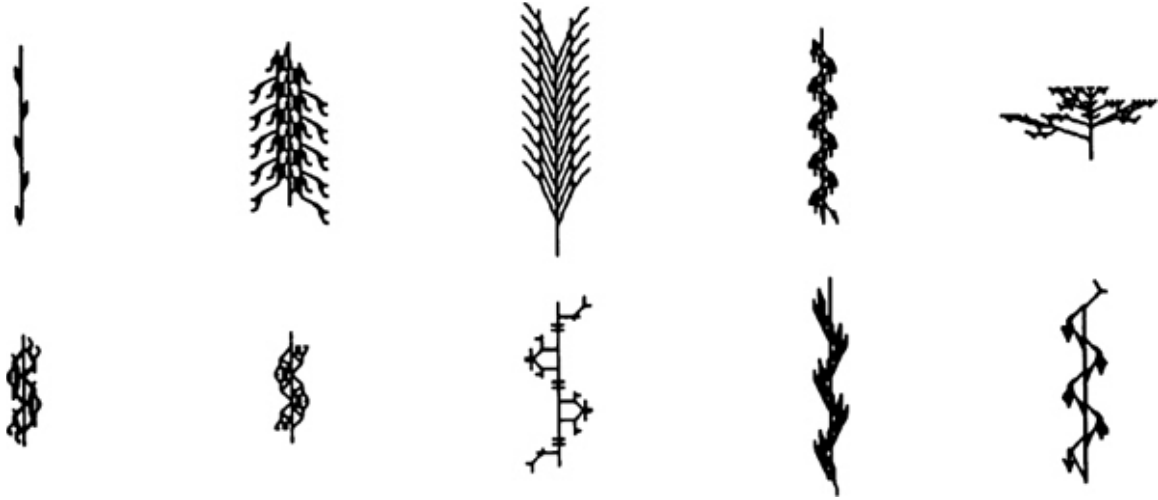


Saya rasa Anda sepakat bahwa kini ada rentang keserbagunaan evolusioner yang lebih ‘menarik secara biologi’. ‘Penciptaan’ segmentasi, sebagai terobosan dalam embriologi, telah membuka pintu air potensi evolusioner di negeri biomorf komputer. Dugaan saya, hal semacam itu terjadi dalam asal-usul vertebrata, dan dalam asal-usul leluhur bersegmen dari serangga, lobster, dan luing. Penciptaan segmentasi adalah momen bersejarah dalam evolusi.

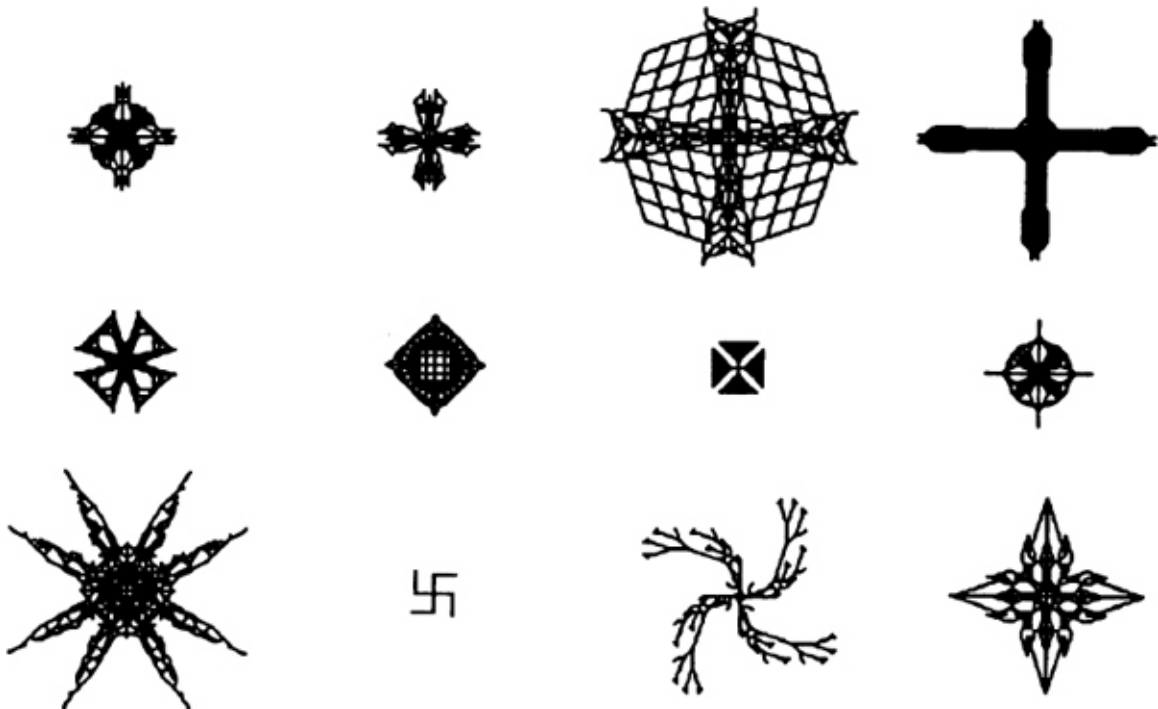


Simetri adalah hal lain yang jelas-jelas merupakan inovasi. Semua biomorf *Blind Watchmaker* yang asli terbentuk simetris di sumbu tengahnya. Saya hadirkan gen baru untuk menjadikan hal ini opsional, bukan wajib. Gen baru ini menentukan apakah biomorf dengan sembilan nilai gen awal yang disematkan ke pohon dasar tersebut tampak seperti (a) atau seperti (b). Gen-gen lain menentukan apakah ada refleksi simetris di bidang atas-ke-bawah, (c), atau simetri empat-arah, (d). Gen-gen baru ini dapat bervariasi dalam semua kombinasi yang ada, seperti pada (e) dan (f). Ketika hewan-hewan bersegmen itu asimetris di bidang sumbu tengah, saya hadirkan batasan

yang diilhami ilmu botani: segmen-segmen selang-seling mesti asimetris di arah yang berlawanan, seperti pada (g). Berbekal gen-gen lanjutan ini, kembali saya mencanangkan program pembiakan yang gencar, untuk melihat apakah embriologi baru tersebut dapat mendorong perkembangan evolusi yang lebih riang dari yang lama. Berikut ini portofolio biomorf-biomorf bersegmen dengan asimetri di sumbu tengahnya:

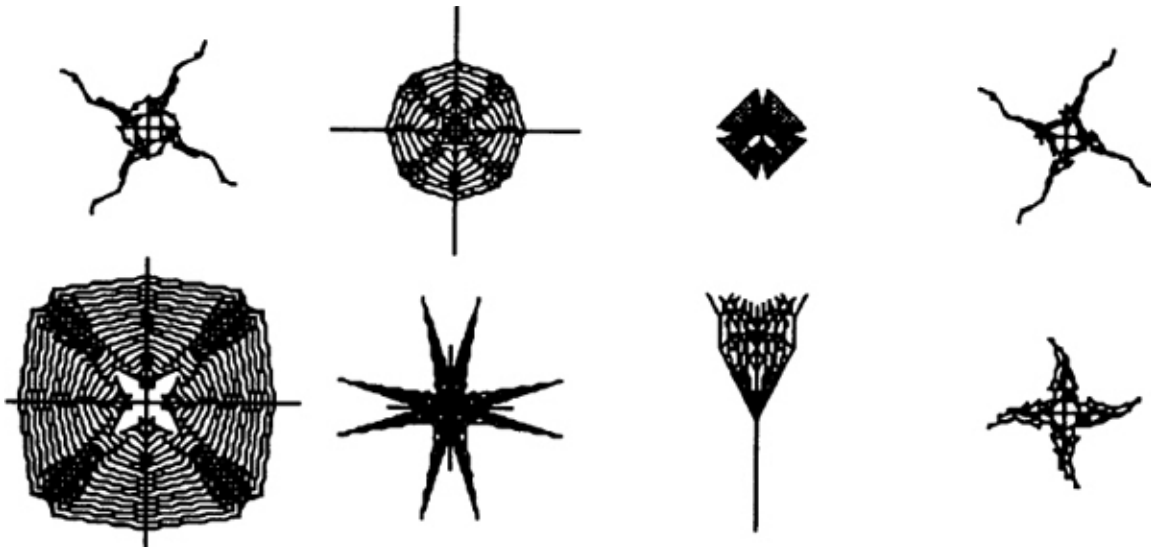


Dan ini beberapa biomorf yang simetris secara radial, yang segmentasinya, kalau ada, mungkin sama samarnya dengan kepala manusia dewasa:



Gen untuk simetri radial penuh menggiring selektor untuk membiakkan rancangan-rancangan abstrak yang sedap dipandang, bukan yang realistis secara biologis, seperti tujuan awal saya. Hal yang sama makin kentara terasa di program versi berwarna yang saat ini tengah saya kembangkan.

Satu kelompok hewan, echinodermata (meliputi bintang laut, landak laut, bintang ular, dan lili laut), punya bentuk simetris lima-sisi yang ganjil. Saya yakin, tidak peduli seberapa keras saya atau orang lain berusaha, kita tidak akan pernah mendapati simetri lima-sisi ini muncul lewat mutasi acak dari embriologi yang sudah ada. Butuh inovasi ‘bersejarah’ yang baru dalam embriologi biomorf, dan saya belum lagi mengupayakannya. Tapi bintang laut dan landak laut aneh dengan empat atau enam lengan, bukan lima seperti biasanya, kadang muncul di alam. Dan dalam menjelajahi negeri biomorf saya telah menjumpai bentuk-bentuk yang lambat-lambat mirip bintang laut atau landak laut, yang telah membuat saya menyeleksi mereka agar kemiripannya makin kentara. Berikut ini kumpulan biomorf mirip echinodermata, walau tidak satu pun dari mereka memiliki lima lengan syaratnya:



Untuk ujian akhir atas keserbagunaan embriologi biomorfis baru saya ini, saya menugasi diri untuk membiakkan abjad biomorfis yang cukup terang untuk mengeja nama saya. Setiap kali saya menjumpai satu biomorf yang mirip, setipis apa pun, sebuah huruf dalam abjad, saya terus membiakkannya agar makin mirip. Kualitas hasil akhir dari upaya ambisius ini setidaknya dapat dikatakan tidak sama rata. ‘I’ dan ‘N’ hampir-hampir sempurna. ‘A’ dan ‘H’ cukup jelas walaupun sedikit canggung. ‘D’ cukup buruk. Sementara itu, membiakkan ‘K’ yang benar, rasanya, mustahil – saya terpaksa sedikit curang dengan meminjam garis tegak ‘W’. Sepertinya perlu ditambahkan gen lain agar evolusi menuju ‘K’ yang jelas dapat terjadi.

RICHARD DAWKINS

Setelah mencoba mengeja nama sendiri seperti orang yang baru belajar menulis, saya lebih mujur ketika mengembangkan huruf-huruf yang diilhami nama alat yang saya pakai untuk mengerjakan semua ini:

MACINTOSH

Saya menangkap kesan kuat yang terbukti, semoga, lewat semua ilustrasi di sini bahwa beberapa perubahan radikal dalam embriologi fundamental dari biomorf-biomorf tersebut telah membuka pemandangan baru kemungkinan evolusi yang tidak ada pada program asli yang dideskripsikan di Bab 3. Dan, seperti saya katakan tadi, saya yakin hal yang serupa terjadi di berbagai persimpangan dalam evolusi kelompok-kelompok hewan dan tumbuhan utama. Penemuan segmentasi oleh leluhur kita sendiri, dan, secara terpisah, oleh leluhur serangga dan krustasea, kemungkinan hanyalah salah satu dari beberapa contoh peristiwa ‘bersejarah’ dalam riwayat evolusi kita. Peristiwa-peristiwa bersejarah ini, setidaknya bila dilihat dengan pemahaman setelah kejadian, berbeda jenisnya dari perubahan-perubahan evolusioner yang biasa. Leluhur-leluhur bersegmen kita yang pertama, dan leluhur-leluhur bersegmen cacing tanah dan serangga yang pertama, mungkin tidak istimewa pandainya dalam bertahan hidup sebagai individu – walau jelas-jelas mereka *memang bisa* bertahan hidup sebagai individu. Kalau tidak, kita, keturunannya, tidak akan ada di sini. Poin saya sekarang adalah bahwa penemuan segmentasi tubuh oleh para leluhur ini lebih berarti dibanding teknik baru untuk bertahan hidup, seperti gigi atau mata yang lebih tajam. Ketika segmentasi ditambahkan ke dalam prosedur-prosedur embrionik leluhur kita, terlepas dari apakah hewan-hewan individunya makin pandai dalam bertahan hidup atau tidak, silsilah tempat mereka tergolongkan tiba-tiba menjadi *lebih pandai berevolusi*.

Hewan-hewan modern, kita vertebrata dan semua teman seperjalanan kita di planet ini, mewarisi gen-gen dari sebuah garis tak putus dari leluhur-leluhur yang pandai bertahan hidup sebagai individu. Itu semua coba saya jelaskan dalam buku *Pembuat Arloji yang Buta*. Tapi kita juga mewarisi prosedur-prosedur embriologis silsilah leluhur yang pandai *berevolusi*. Telah terjadi semacam seleksi tingkat tinggi di antara silsilah-silsilah, bukan untuk kemampuan mereka bertahan hidup, melainkan untuk kemampuan jangka panjang mereka untuk berevolusi. Kita kini menyandang peningkatan terkumpul dari sejumlah peristiwa bersejarah, dan segmentasi hanyalah salah satu contoh di antaranya. Bukan hanya tubuh dan perilaku saja yang telah berevolusi ke arah yang kian baik. Kita bahkan boleh bilang bahwa evolusi itu sendiri telah berevolusi. Telah terjadi evolusi evolabilitas yang progresif.

Versi Macintosh program Blind Watchmaker memiliki opsi untuk menyalakan atau mematikan tiap kategori utama mutasi. Dengan mematikan semua jenis mutasi baru, kita balik ke versi lebih awal program ini (atau versi IBM terkini). Biakkan biomorf-biomorfnya untuk beberapa lama dalam kondisi ini, dan Anda akan dapat merasakan luasnya keanekaan fauna yang dapat dihasilkan program yang lama, tapi ada juga batasnya. Kalau kemudian Anda nyalakan, katakanlah, mutasi segmentasi, atau mutasi simetri (atau kalau Anda beralih dari IBM ke Macintosh!), Anda bisa mengalami suka cita rasa kebebasan yang mungkin telah memicu terjadinya peristiwa-peristiwa hebat dan bersejarah evolusi.

Referensi Dawkins, R. (1989) The evolution of evolvability. In C. Langton (ed.) *Artificial Life*. New York: Addison-Wesley.

Daftar Pustaka

1. Alberts, B., Bray, D., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K. & Watson, J. D. (1983) *Molecular Biology of the Cell*. New York: Garland.
2. Anderson, D. M. (1981) Role of interfacial water and water in thin films in the origin of life. Dalam J. Billingham (ed.) *Life in the Universe*. Cambridge, Mass: MIT Press.
3. Andersson, M. (1982) Female choice selects for extreme tail length in a widow bird. *Nature*, 299: 818–20.
4. Arnold, S. J. (1983) Sexual selection: the interface of theory and empiricism. Dalam P. P. G. Bateson (ed.), *Mate Choice*, hal. 67–107. Cambridge: Cambridge University Press.
5. Asimov, I. (1957) *Only a Trillion*. London: Abelard-Schuman.
6. Asimov, I. (1980) *Extraterrestrial Civilizations*. London: Pan.
7. Asimov, I. (1981) *In the Beginning*. London: New English Library.
8. Atkins, P. W. (1981) *The Creation*. Oxford: W. H. Freeman.
9. Attenborough, D. (1980) *Life on Earth*. London: Reader's Digest, Collins & BBC.
10. Barker, E. (1985) Let there be light: scientific creationism in the twentieth century. Dalam J. R. Durant (ed.) *Darwinism and Divinity*, hal. 189–204. Oxford: Basil Blackwell.
11. Bowler, P. J. (1984) *Evolution: the history of an idea*. Berkeley: University of California Press.
12. Bowles, K. L. (1977) *Problem-Solving using Pascal*. Berlin: Springer-Verlag.
13. Cairns-Smith, A. G. (1982) *Genetic Takeover*. Cambridge: Cambridge University Press.
14. Cairns-Smith, A. G. (1985) *Seven Clues to the Origin of Life*. Cambridge: Cambridge University Press.
15. Cavalli-Sforza, L. & Feldman, M. (1981) *Cultural Transmission and Evolution*. Princeton, N. J.: Princeton University Press.
16. Cott, H. B. (1940) *Adaptive Coloration in Animals*. London: Methuen.
17. Crick, F. (1981) *Life Itself*. London: Macdonald.
18. Darwin, C. (1859) *The Origin of Species*. Dicetak ulang. London: Penguin.
19. Dawkins, M. S. (1986) *Unravelling Animal Behaviour*. London: Longman.
20. Dawkins, R. (1976) *The Selfish Gene*. Oxford: Oxford University Press.
21. Dawkins, R. (1982) *The Extended Phenotype*. Oxford: Oxford University Press.
22. Dawkins, R. (1982) Universal Darwinism. Dalam D. S. Bendall (ed.) *Evolution from Molecules to Men*, hal. 403–25. Cambridge: Cambridge University Press.
23. Dawkins, R. & Krebs, J. R. (1979) Arms races between and within species. *Proceedings of the Royal Society of London*, B, 205: 489–511.
24. Douglas, A. M. (1986) Tigers in Western Australia. *New Scientist*, 110 (1505): 44–7.
25. Dover, G. A. (1984) Improbable adaptations and Maynard Smith's dilemma. Unpublished manuscript, and two public lectures, Oxford, 1984.
26. Dyson, F. (1985) *Origins of Life*. Cambridge: Cambridge University Press.
27. Eigen, M., Gardiner, W., Schuster, P., & Winkler-Oswatitsch. (1981) The origin of genetic information. *Scientific American*, 244 (4): 88–118.

28. Eisner, T. (1982) Spray aiming in bombardier beetles: jet deflection by the Coander Effect. *Science*, 215: 83-5.
29. Eldredge, N. (1985) *Time Frames: the rethinking of Darwinian evolution and the theory of punctuated equilibria*. New York: Simon & Schuster (termasuk pencetakan ulang makalah asli Eldredge & Gould).
30. Eldredge, N. (1985) *Unfinished Synthesis: biological hierarchies and modern evolutionary thought*. New York: Oxford University Press.
31. Fisher, R. A. (1930) *The Genetical Theory of Natural Selection*. Oxford: Clarendon Press. edisi ke-2 paperback. New York: Dover Publications.
32. Gillespie, N. C. (1979) *Charles Darwin and the Problem of Creation*. Chicago: University of Chicago Press.
33. Goldschmidt, R. B. (1945) Mimetic polymorphism, a controversial chapter of Darwinism. *Quarterly Review of Biology*, 20: 147-64 dan 205-30.
34. Gould, S. J. (1980) *The Panda's Thumb*. New York: W. W. Norton.
35. Gould, S. J. (1980) Is a new and general theory of evolution emerging? *Paleobiology*, 6: 119-30.
36. Gould, S. J. (1982) The meaning of punctuated equilibrium, and its role in validating a hierarchical approach to macroevolution. Dalam R. Milkman (ed.) *Perspectives on Evolution*, hal. 83-104. Sunderland, Mass: Sinauer.
37. Gribbin, J. & Cherfas, J. (1982) *The Monkey Puzzle*. London: Bodley Head.
38. Griffin, D. R. (1958) *Listening in the Dark*. New Haven: Yale University Press.
39. Hallam, A. (1973) *A Revolution in the Earth Sciences*. Oxford: Oxford University Press.
40. Hamilton, W. D. & Zuk, M. (1982) Heritable true fitness and bright birds: a role for parasites? *Science*, 218: 384-7.
41. Hitching, F. (1982) *The Neck of the Giraffe, or Where Darwin Went Wrong*. London: Pan.
42. Ho, M-W. & Saunders, P. (1984) *Beyond Neo-Darwinism*. London: Academic Press.
43. Hoyle, F. & Wickramasinghe, N. C. (1981) *Evolution from Space*. London: J. M. Dent.
44. Hull, D. L. (1973) *Darwin and his Critics*. Chicago: Chicago University Press.
45. Jacob, F. (1982) *The Possible and the Actual*. New York: Pantheon.
46. Jerison, H. J. (1985) Issues in brain evolution. Dalam R. Dawkins & M. Ridley (eds) *Oxford Surveys in Evolutionary Biology*, 2: 102-34.
47. Kimura, M. (1982) *The Neutral Theory of Molecular Evolution*. Cambridge: Cambridge University Press.
48. Kitcher, P. (1983) *Abusing Science: the case against creationism*. Milton Keynes: Open University Press.
49. Land, M. F. (1980) Optics and vision in invertebrates. Dalam H. Autrum (ed.) *Handbook of Sensory Physiology*, hal. 471-592. Berlin: Springer.
50. Lande, R. (1980) Sexual dimorphism, sexual selection, and adaptation in polygenic characters. *Evolution*, 34: 292-305.
51. Lande, R. (1981) Models of speciation by sexual selection of polygenic traits. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 78: 3721-5.
52. Leigh, E. G. (1977) How does selection reconcile individual advantage with the good of the group? *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 74: 4542-6.
53. Lewontin, R. C. & Levins, R. (1976) The Problem of Lysenkoism. In H. & S. Rose (ed.) *The Radicalization of Science*. London: Macmillan.
54. Mackie, J. L. (1982) *The Miracle of Theism*. Oxford: Clarendon Press.
55. Margulis, L. (1981) *Symbiosis in Cell Evolution*. San Francisco: W. H. Freeman.
56. Maynard Smith, J. (1983) Current controversies in evolutionary biology. Dalam M. Grene (ed.) *Dimensions of Darwinism*, hal. 273-86. Cambridge: Cambridge University Press.
57. Maynard Smith, J. (1986) *The Problems of Biology*. Oxford: Oxford University Press.

58. Maynard Smith, J. dkk.. (1985) Developmental constraints and evolution. *Quarterly Review of Biology*, 60: 265-87.
59. Mayr, E. (1963) *Animal Species and Evolution*. Cambridge, Mass: Harvard University Press.
60. Mayr, E. (1969) *Principles of Systematic Zoology*. New York: McGraw-Hill.
61. Mayr, E. (1982) *The Growth of Biological Thought*. Cambridge, Mass: Harvard University Press.
62. Monod, J. (1972) *Chance and Necessity*. London: Fontana.
63. Montefiore, H. (1985) *The Probability of God*. London: SCM Press.
64. Morrison, P., Morrison, P., Eames, C. & Eames, R. (1982) *Powers of Ten*. New York: Scientific American.
65. Nagel, T. (1974) What is it like to be a bat? *Philosophical Review*, dicetak ulang di D. R. Hofstadter & D. C. Dennett (ed). *The Mind's I*, hal. 391–403, Brighton: Harvester Press.
66. Nelkin, D. (1976) The science textbook controversies. *Scientific American* 234 (4): 33-9.
67. Nelson, G. & Platnick, N. I. (1984) Systematics and evolution. Dalam M–W Ho & P. Saunders (ed), *Beyond Neo-Darwinism*. London: Academic Press.
68. O'Donald, P. (1983) Sexual selection by female choice. Dalam P. P. G. Bateson (ed.) *Mate Choice*, hal. 53–66. Cambridge: Cambridge University Press.

69. Orgel, L. E. (1973) *The Origins of Life*. New York: Wiley.
70. Orgel, L. E. (1979) Selection in vitro. *Proceedings of the Royal Society of London*, B, 205: 435-42.
71. Paley, W. (1828) *Natural Theology*, edisi ke-2. Oxford: J. Vincent.
72. Penney, D., Foulds, L. R. & Hendy, M. D. (1982) Testing the theory of evolution by comparing phylogenetic trees constructed from five different protein sequences. *Nature*, 297: 197-200.
73. Ridley, M. (1982) Coadaptation and the inadequacy of natural selection. *British Journal for the History of Science*, 15: 45-68.
74. Ridley, M. (1986) *The Problems of Evolution*. Oxford: Oxford University Press.
75. Ridley, M. (1986) *Evolution and Classification: the reformation of cladism*. London: Longman.
76. Ruse, M. (1982) *Darwinism Defended*. London: Addison-Wesley.
77. Sales, G. & Pye, D. (1974) *Ultrasonic Communication by Animals*. London: Chapman & Hall.
78. Simpson, G. G. (1980) *Splendid Isolation*. New Haven: Yale University Press.
79. Singer, P. (1976) *Animal Liberation*. London: Cape.
80. Smith, J. L. B. (1956) *Old Fourlegs: the story of the Coelacanth*. London: Longmans, Green.
81. Sneath, P. H. A. & Sokal, R. R. (1973) *Numerical Taxonomy*. San Francisco: W. H. Freeman.
82. Spiegelman, S. (1967) An *in vitro* analysis of a replicating molecule. *American Scientist*, 55: 63-8.
83. Stebbins, G. L. (1982) *Darwin to DNA, Molecules to Humanity*. San Francisco: W. H. Freeman.
84. Thompson, S. P. (1910) *Calculus Made Easy*. London: Macmillan.
85. Trivers, R. L. (1985) *Social Evolution*. Menlo Park: Benjamin-Cummings.
86. Turner, J. R. G. (1983) 'The hypothesis that explains mimetic resemblance explains evolution': the gradualist-saltationist schism. Dalam M. Grene (ed.) *Dimensions of Darwinism*, hal. 129-69. Cambridge: Cambridge University Press.
87. Van Valen, L. (1973) A new evolutionary law. *Evolutionary Theory*, 1: 1-30.
88. Watson, J. D. (1976) *Molecular Biology of the Gene*. Menlo Park: Benjamin-Cummings.
89. Williams, G. C. (1966) *Adaptation and Natural Selection*. New Jersey: Princeton University Press.

90. Wilson, E. O. (1971) *The Insect Societies*. Cambridge, Mass: Harvard University Press.
91. Wilson, E. O. (1984) *Biophilia*. Cambridge, Mass: Harvard University Press
92. Young, J. Z. (1950) *The Life of Vertebrates*. Oxford: Clarendon Press.