

A. J. Hartomo  
M. C. Widiatmoko

# TEKNOLOGI MEMBRAN PEMURNIAN AIR

DEIONISASI  
ELEKTRODIALISIS  
OSMOSIS - BALIK  
ULTRA FILTRASI  
DESALINASI

AIR MINUM PANGAN -  
PERTANIAN KIMIA •  
PROSES FARMASI -  
MEDIK J I K A

RPUSTAKAAN  
EARSIPAN  
JAWA TIMUR

*if i <*

ERBIT ANDI OFFSET YOGYAKARTA

A. J. Haftom<sup>O</sup> M. C.  
Widiatmoko

# TEKNOLOGI MEMBRAN

## PEMURNIAN AIR

DEIONISASI  
ELEKTRODIALISIS  
OSMOSIS - BALIK  
ULTRA FILTRASI  
DESALINASI

AIR MINUM  
PANGAN - RERTANIAN  
KIMIA «,PROSES' •• 5«  
FARMAS!,-MED4K  
ELEKTRONIKA

RESTOKAM  
BIDANG DPP

07 DEC "20)1

PENERBIT, .AN Di-OFFSET YOGVAKAGTA

Teknologi Membran Pemurnian Air dan Pembinaan PorpiMUKftf

Oleh: A.J. Hartomo

M.C. Widaiamoko

Jawa Timur  
T.A.

Hak Cipta © 1994 padapenulis,

Dilarang memperbanyak sebagian aiau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, tanpa izin tertulis daripenulis.

Edisi Pertama,

Cetakan Pertama, 1994

Penerbit-

ANDI OFFSET

Jl. Beo 38-40, Telp. (0274) 61881, 88282 Foes (0274) 88282  
Yogyakarta 55281

Percetakan:

ANDI OFFSET

Jl. Beo 38-40, Telp. (0274) 61881, 88282 Foes (0274) 88282  
Yogyakarta 55281

Pusat Penjualan:

— Unit Kanvas ANDI OFFSET

Jl. Beo 40, Telp. (0274) 61881, 88282 Foes (0274) 88282  
Yogyakarta 55281

— PT.ANDIPRATITA TRIKARSA MVLIA

Grieen.VilleBlokBGNo.28.

Telp. (021)5669228, 5669229 Foes (021)5669227 Jakarta  
Barat 11510

ISBN: 979-533-173-6

^Wa

M I L I K  
FERPL'STAKAAN  
DATAH iAWA



TINllm

z-moT t

1(<r \*\*h

,f

•J"

\  
III

Bingkisan maxvar mungil berirama salam santi, mengenang hidup-teladan bakti insani, almarhum Romo Sutopanitro, Kiswara dan Deinse, dan segenap guru masa lampauku, tanpa kecuali, persem lahan bagiayah-ibu dan saudara-saudari teriring peluk-kas % demi manfaat sepenuh, segenap dirijati: kaum mudafteffjnta-penggelut iptek-bahan, dalam rangka kejayaan nu&ttJoangsa-negara, danperadaban cintakasih umat nj^usia^ercikanchahaya Kemuliaan Pen- serneslm&aya....

^~y-~ ~j;ipta

\*\*

tnjto, i f\*A\*f»d

%t\

# PRAWACANA

Negara kita merupakan daerah tropis basah yang kaya air. Tetapi untuk penggunaan tertentu, yang diperlukan bukan sembarangan air, melainkan berprasyarat tertentu. Justru yang masih merupakan tantangan ialah sumberdaya manusia dan ipteknya.

Pembangunan industri dan dinamika kota serta desa mengintensifkan campur tangan manusia atas sumberdaya alam. Air bersih di alam dipergunakan bagi aneka keperluan. Sebagian kembali lagi ke alam, namun sudah terkotori dan tercemar. Tanpa pemrosesan yang memadai oleh manusia, air yang tercemar itu membebani bahkan melampaui kesanggupan alam untuk membersihkannya lagi.

Kota dan pemukiman terus berkembang. Sayang, acapkali sumberdaya airnya bermutu buruk, kurang sehat dan bersih. Sarana air minum PDAM (ledeng) lebih kerap tidak menyentuh sejumlah besar warga. Bila masuk pun, mutunya bervariasi, terkadang amat buruk. Air ledeng kita tidak layak minum langsung sebagaimana di negara lain. Sesuatu masih harus dilakukan untuk memperbaiki mutunya. Hal serupa berlaku bagi industri.

Pencemaran air sumur penduduk di berbagai kota oleh limbah industri juga merupakan masalah yang niscaya diselesaikan tuntas agar peracunan" warga tidakberlanjut.

samoaf h^iH^3" "" "" ^ air tanah ^ disedot oleh ind^ 2 h ' u  
arang SUnUfWa^ sekitar terkena daTMPak. Kalau  
^^ JSL? "1-1 pennaakaan dekat pesisir terkenal  
\*\*\_

Di daerah pedesaan pun terundung masalah air. Bila ada pun mutunya cenderung makin merosot. Pertanian yang makin intend menggunakan pupuk dan pestisida, bila tidak cfrmat di dalam menggunakannya maka akan memberikan residu bahan-bahan kimia berbahaya bag, kesehatan dan kehidupan warga. Belum lagi bila di t"npaZ^torUnCU ^^P^^S—^lontorkanl^bahnya

saw.r^t^86,,13^ bermasalah - Kemudian muncul trend baru dalam da-SZTH Y 3ir  
TM^T dalam kemasa n> Plastik botolan. Laba besar terjanj, dan air yang dijual mahal itu. Semula memang air pegunungan yang duoroses desinfektan memakai ozonisasi. Tetapi belalcangTn 3" pu^ masalah air dalam kemasan itu ka\_re na yang" tidak tejaminX^

T^JfX^Z ^ T merk hmdat di p35313"- TetaP' \*P» lacur? l7fl  
H^bersihan dan kesehatannya, sebagaimana diberitakan berba-  
f^otL r" H ^ P^H YUa ^P\* BATAN, tidak ^\_;" batLMelah Z T, ^SUS ^ JamUr ^^ ".\*.\*»»'  
k < \*oTM> mt ri^rt R ATT^K^ Saldt p^1\* oranS y,\*? & meTMnumnya. Menu-S  
TMrfJf^hahkanair\_3irbotolanitu ada yangmengandung^cah at radioaktif. Radium 226  
berbahaya! (Warta Komumen 220, Julf l\_9Sf Bila demilaan, untuk apa  
membuang uang beli air botolan (apalagi d -  
dTd^d^fse^aT mUtUnya ^ ^^ •" WaTM\* ^ W

n,,m, hf^emUd^an muncul, bisnis baTM TMenjual piranti filter ke ibu-ibu rumahtangga dengan merk-merk dan janji aduhai. Konsumen yang tidak kntis, mudah dijadikansasaran. Apakahbenar mutunya terjamin'Seiauh mana kontrolnya dari waktu ke waktu? Apakah dengan Xasi konTen sjonalsegalakontaminandapatmusna?

Itulah sebabnya penulis menyusun buku *Tekndogi Membran Pe-murnum Air* ini. Iptek membran semakin trendy dan piawai dalam mewu-

judkan pembersihan-pemurnian air. Warga masyarakat penting dan perlu mengetahuinya.

Iptek membran mampu menyajikan air dengan mutu bermacam-macam. Tekniknya dapat reverse osmosis (RO), ultrafiltrasi (UF) dan sebagainya. Biasanya unit/modul peralatan dirancang dan dipasang sesuai keadaan khas dan maksud penggunaan khususnya. Alat jadi mul-tiguna tidak 100% menjamin efektifnya pencapaian tujuan tertentu.

Khalayak masyarakat perlu mengetahui apa dan bagaimana air itu, apa saja kontaminannya, apa prasyarat air untuk penggunaan (rumah-tangga/industri) tertentu, baru dari situ memilih dan menggabungkan, merancang serta memasang sistem instalasi. Menggunakan sistem yang tak sesuai dengan kondisi dan tujuan berarti kesia-siaan. Hal-hal tersebut dipaparkan berurut dalam bab-bab buku tipis ini. Dengan demikian pilihan teknik, sistem, modul serta jenis dan keluasan membrannya, lengkap dengan cara operasi dan perawatan serta kontrol mutunya, merupakan satu kesatuan bulat. Iptek terapan membran selalu berham-piran menyeluruh demikian.

Penulis yang bertahun-tahun terlibat litbang dan terapan membran, termasuk pendalaman di mancanegara kawasan Pasifik, menyajikan buku ini juga berkat dorongan para sejawat. Terima kasih kepada para sahabat di berbagai PTN-PTS dari Sumatera sampai Irian. Bantuan juga banyak diperoleh dari teman-teman pakar membran di berbagai negara. Mereka pun patut menerima penghargaan tulus penulis. Kepada ayah, ibu, saudara, segenap keluarga, penulis memperoleh semangat dan pengorbanan tak terpen. Terima kasih pula kepada ANDI Offset yang berjasa memungkinkan simakan iptek membran untuk pemurnian air ini sampai kepada pembaca yangbudiman.

Terapan iptek membran untuk bidang lain misalnya pemisahan gas (pemisahan, pervaporasi, distilasi membran) walau kini di Amerika, Eropa dan Jepang meningkat 35% tiap tahun, tidak termasuk dalam paparan buku ini. Buku ini khusus untuk air.

Mutu air dan lingkungan air umumnya, patut memicu perhatian dan tindakan kita bersama. Teknologi pembersihan dan pemurnian air memerlukan makin banyak kalangan (muda utamanya) yang jeli, pandai, terlibat, terampil, berdedikasi, menggarapnya sepenuh hati demi kesejah-teraan masyarakat dan manusia. Pelibat mutu air tidak hanya me-mikirkan diri sendiri, tetapi juga orang lain. Pakar mutu air tidak hanya

mempersalahkan pengotor dan merusak mutu air, tetapi aktual mengam-bil tanggung jawab turut memperbaikinya pula.

Mutu air di masyarakat tidak dapat dibiarkan makin merosot dan merugikan kesejahteraan serta peradaban. Teknologi membran merupa-kan sarana ampuh mengatasinya.

Kita dapat menuntaskan permasalahan air, karena kita mampu bila mau. Sumberdaya alam air Indonesia amat kaya. Rahmat Tuhan tersebut mengandaikan partisipasi kita untuk mengolahnya secara fung-sional dan efektif, efisien, dan ekonomis. Kuncinya: iptek membran. Air payau, asin, gambut, air kotor, limbah, comberan sekalipun, dengan lakuan membran polimer dapat diubah menjadi air bersih, sehat, murni Kenapa tidak?

Tangerang, 28 Oktober 1992

CSW-AJH

## DAFTAR ISI

PRAWACANA	iii
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB I MUTU AIR DI ALAM DIG ARAP <sup>y</sup>	1
BAB II AIR BERSIH MURNI CARA TRADISIONAL v~	25
BAB III "MISTERI" PROSES MEMBRAN -	33
BAB IV OSMOSIS BALIK DAN DESALINASI	43
BABV ULTRANISASIDANNANOFILTRASI	69
BAB VI ELEKTRODIALISIS	87
BAB VII DEIONISASIKONTINYU	107
PUSTAKA RUJUKAN	113
LAMPIRAN 1. KIT ANALISIS AIR v	117
LAMPIRAN 2. ANEKA STANDAR AIR (DAN PERATURAN PEMERINTAH) N/	119
LAMPIRAN 3. STATE OF THE ART MEMBRAN SEDUNIA	131
LAMPIRAN 4. FORM AT DIKLAT MEMBRAN	139
LAMPIRAN 5. KUANTinKASI KONVENSIONAL MEMBRAN	143
LAMPIRAN 6. UBAH S ATUAN: TEKNIK INTERN ASIONAL	151
LAMPIRAN 7. BENCANA MELANDA DI TAHUN 2000	157

# DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Kimiawi Pembuatan Sirkuit Hektronik	23
Gambar 2. Perbandingan Aneka Teknologi Pemumian Air	24
Gambar 3. Penyaring Cepat dan Cochrane	27
Gambar 4. Bagan Tradisional Penjernihan Air	28
Gambar 5. Ciri Kebutuhan Khlor Air	29
Gambar 6. Khlor Residu dan Breakpoint	30
Gambar 7. Spektrum Salinitas Air	36
Gambar 8. Filter Cartridge Tipe Wiru	39
Gambar 9. Teori Osmosis Balik	46
Gambar 10. Struktur Molekul Poliamida Aromatik	49
Gambar 11. Julat Operasi pH Membran	49
Gambar 12. Cartridge Osmosis Balik Lilit-Spiral	51
Gambar 13. Konstruksi Permeator Hollow Fiber	51
Gambar 14. Konfigurasi Membran Tubular	52
Gambar 15. Osmosis Balik Plate and Frame	52
Gambar 16. Modul RO Tipe Paket Standar Kecil	53
Gambar 17. Bagan Alir Osmosis Balik Umum	53
Gambar 18. Produktivitas Permeator Seiring Waktu	55
Gambar 19. Contoh Sistem Tritahap 5-3-2	60
Gambar 20. Desalinasi dengan PTT lebih 35000 ppm	65
Gambar 21. Desain Membran Permeator Modul Paket	66
Gambar 22. Teknologi Membran, Ukuran Pori serta Berbagai Ranah Penerapannya	70

Gambar 23	SEM Membran UF Anisotrop	72
Gambar 24	Bagan Proses Ultrafiltrasi Recovery	72
Gambar 25	Membran Plat Datar Berkerangka	73
Gambar 26	Cartridge Membran UF-SW	73
Gambar 27	Fotomikrograf Membran HFF . Pori	74
Gambar 28	Membran UF (SEM)-Hitachi . Model	76
Gambar 29	(BULFIS) Membran NF . Bagan	76
Gambar 30	Sistem UF	77
Gambar 31	Ragam Operasi UF	78
Gambar 32	Kurva Kinerja Sistem HFF Laju Alir Tetap	79
Gambar 33	Bagan Alir Sistem Poles Terpusatnya pada Industri Farmasi	80
Gambar 34	Bagan Alir Sistem Poles Terpusatpada Industri FJelektronika	81
Gambar 35	Bagan Membran Kation dan Anion	88
Gambar 36	Pengaruh Potensial DC atas Larutan NaCl/H <sub>2</sub> O	89
Gambar 37	ED Sistem Stack	90
Gambar 38	Pasangan Sel pada ED	91
Gambar 39	Grafik Tahanan Pasangan Sel	92
Gambar 40	Gejala Kinefakpada Membran Anion	92
Gambar 41	Pola Pembiayaan ED Teoritis	97
Gambar 42	Pilihan Bagan Alir Proses	98
Gambar 43	Bagan Alir Proses Balikan ED	99
Gambar 44	Pencuci Elektroda	101
Gambar 45	Aliran Paralel-Seri	103
Gambar 46	Jalanan Kirchhoff Stack Elektrodialisis	104
Gambar 47	Proses Deionisasi	108
Gambar 48	Cara Kerja Deionisasi Kontinyu	110

## DAFTAR TABEL

Tabel 1-1 : Berbagai Kotoran dalam Air	2
Tabel 1-2: Parameter Fisik Air	13
Tabel 1-3: Parameter Kimia Air	13
Tabel 1-4: Parameter Bentuk Gas	16
Tabel 1-5: Isi Formulir Analisis Cuplikan Air	20
Tabel 1-6: Grade/Taraf Kemurnian Air	22
Tabel 3-1 Laju Alir Sebagai Fungsi Luas Filter, dan Aneka * Bidang Pemakaian	40
Tabel 4-1 Pengelompokan Sistem Osmosis Balik Umum	53
Tabel 4-2: Data Minimum Mutu Air untuk Desain Sistem RO	54
Tabel 4-3: Konsumsi Energi dan Perhitungan Biaya Osmosis Balik	63
Tabel 5-1 Perbandingan Antara RO, UF dan MF	71
Tabel 5-2 Membran Pemumian Air (UF)	75
Tabel 5-3: Perbandingan antar Ragam Operasi UF	78
Tabel 5-4: Rangkuman Cara Pemantauan Parameter Alat UF	83
Tabel 5-5: Lembar Log Sistem UF	84

## Bab I \_\_\_\_\_

# MUTU AIR DI ALAM DIGARAP

Air adalah sumber kehidupan. Air merupakan senyawa sederhana ( $H_2O$ ), tetapi sangat mahal harganya. Air bersih dan air murni merupakan bahan yang semakin penting, juga langka, dengan makin majunya iptek, masyarakat dan peradaban industri. Sebaliknya, berkat perkembangan iptek, mutu air pun dapat diperbaiki. Belum pernah di dalam sejarah manusia dapat memurnikan air seperti sekarang ini. Air murni amat penting bagi industri kimia, farmasi, pangan sampai elektronika. Air bersih makin menjadi tuntutan kehidupan sehari-hari.

Bila kita membersihkan, memberi lakuan tertentu, memurnikan air, sebenarnya yang kita tangani bukan airnya *per se*, tetapi *kotorannya*. Bagaimana memisahkan kotoran tersebut, itulah kiat iptek mutakhir.

### KOTORAN DI AIR

$\sqrt{J_{\leftarrow r} L^{\wedge} C}$

Kotoran tak dikehendaki ada dalam air. Ada banyak sekali kotoran. Lazimnya, kadar kotoran tersebut tidak besar. Air bersih di alam jarang mengandung *padatan total terlarut* (PTT) lebih daripada 500 ppm (bagian tiap juta) atau 0,05%. Bandingkan dengan bahan kimia biasa, yang PA (*pro-analisis*) sekalipun, semisal  $N_aOH$ , kotorannya bisa sampai 1%. Kotoran dalam air relatif sedikit, tentu saja kecuali air kotor, air limbah atau air laut (PTT dapat 50.000 ppm).

Tabel 1-1: Berbagai Kotoran dalam air (Alam) Mentah

Kelompok Kotoran (O- Organik \ 1 A - Anorganik I	Jenis dan sumbernya (O- Organik \ 1 A - Anorganik J	Pengaruh pada berbagai penggunaan			Tindakan		
		AIR MINUM (LANGSUNG)	PAM TAK-DIMINUM LANGSUNG	AIR PENDINGIN DAN PEMROSES	UMPAN BOILER	KEMBALI/BUANG KE DAUR ALAM	PROSES LAKUAN
		Sehat, Rasa, Bau Tanpa k-an, Kesadahan, Sifat Korosif (standar Lokal)	Rasa, bau, tampilan, kesadahan, lebih luwes/longgar	Berbagai pra-syarat	Kesadahan, PTT, partikel suspensi dan koloid, oksigen, sifat korosif dan kontrol aditif	Prasyarat BOD, partikel suspensi, sifat racun, sesuai asal/loka	
1. Terlarut Garam Anorganik	Bilasan mineral dan tangkapan CO <sub>2</sub> udara, se-hingga sadah, alkali, mineral.	Batas: PTTSO ppm kesadahan 200 ppm sulfat 100 ppm Fluorida 1 ppm pH 7-8	Yang penting sifat korosi yakni p serta khlorida.	Sifat korosi dan kerak penting. Zat-hara menyebabkan pertumbuhan mikrobadan lain-lain	Tekanan tinggi boiler memprasyaratkan kecilnya kandungan kesadahan, alkali, garam organik dan silika	Berbagai parameter p, suhu, [33 (beracun, logam berat), sulfat (korosi), harus minimum.	Oksidasi dan filtrasi F <sub>0</sub> /M <sub>0</sub> ,,, penghilangan kesadahan air, logam berat diendapkan. Khlorinasi sianida.

to

a o  
3.

m ^

	Sisa pupuk nitrat, fosfat, sulfat. Peningkatan garam dari limbah rumah tangga, natrium, khlorida dan fosfat. Buangan industri terutama logam. Salinitas (khlorida) dari laut dan intrusi ke air tanah. Penguraian N menjadi amonium dan nitrat	Batas ini sering dilampaui. Tidak boleh ada logam berat dan sianida beracun. Nitrat tidak boleh lebih daripada 10 ppm selaku N. Amonia mengganggu khlorinasi	Untuk irigasi, PTT tak boleh besar, apalagi di daerah kering. Unsur tertentu misalnya boron mengganggu tanaman tertentu.	Dalam sistem pendingin. F <sub>0</sub> , Mn menyebabkan bercak noda pada kain (tekstil). Industri kimia, farmasi dan elektronik menuntut kemurnian tinggi/mutlak.	Kondensat harus diberi lakuan ulang. Koreksi p sesuai dosis.	Zathara menyebabkan eutrofikasi danau. Amonia berbahaya bagi ikan. PPT juga tak boleh berlebihan. Faktor lingkungan hidup makin vital.	Pelunakan dengan penukar ion, juga deionisasi dan dealkalisasi. Osmosis balik Elektrodialisis. Distilasi. Amoniak dan nitrat diubah secara oksidasi dan biologis.
Bahan organik (larut)	Kotoran alamiah, hasil uraian bahan hewani dan nabati, menimbulkan warna serta asam humat (humus) dan fulvat. Limbah rumah tangga, bahan biologis, deterjen, sabun.	Warna, bau dan rasa sesuai keadaan lokal. Racun, pestisida, organologam, harus tak ada. Fenol berbahaya.	Tidak terlalu fatal, jangan berbau dan berbuih.	Prasyarat proses beraneka ragam. Zat organik sedang, tak berbahaya untuk pendingin.	Mengganggu (penyumbatan dan fouling) penukaran ion anorganik.	Perlu pengenceran atau lakuan kontrol oksigen (terse rap), bau, buih/busa, juga penghilangan racun. Lestarian lingkungan hidup sehat	Flokulasi diikuti sedimentasi, filtrasi, flotasi, RO (osmosis balik), ultrafiltrasi, karbon aktif, lakuan biologis, destruksi kimia (ozonisasi, khlorinasi, PK), Jebakan pertukaran ion.

Mutu > a.

	Limbah industri proses pangan, pertanian (intensif), pupuk, penyamakan kulit, pabrik kertas, bahan kimia organik, lemak minyak, pelarut. Residu pestisida	Zat organik banyak, pada pendinginan mengakibatkan pengendapan kesadahan menjadi kerak. Deterjen menimbulkan buih					
2. Suspensi Koloid (O dan A)	Lempung, oksidasi besi dan mangan. Makromolekul (polimer) dan partikel organik alamiah. Limbah industri keramik dan kertas Limbah padat.	Keruh! Air minum (PAM) sering tak baik mutunya! Kekeruhan 1 ppm mulai dapat dilihat.	Boleh ada sedikit koloid tersisa	Berlain-laianan prasyaratnya.	Penyaring ion dapat tersumbat dan fouling	Warna! Bahan organik mengganggu BOD. (kebutuhan oksigen biokimia).	Proses flokulasi lakukan pengurangan BOD. Ultrafiltrasi.

Anorganik(A)	Bahan alamiah misal pasir. Bahan industri cucian batubara, limbah pertambangan sludge, kapur, debu, bilasan, cerobong asap dan lain-lain. Partikel hewani dan nabati. produk industri dan rumah tangga	Harus dihilangkan!	Belum ada kandungan sedikit partikel amat halus	Prasyarat sesuai proses. Debu dapat mengganggu dalam pendinginan resin-kulasi.	Air boiler temperatur rendah boleh sedikit ada partikel.	Bahan organik mengganggu BOD. Pengendapan berakumulasi di dasar danau dan sungai membunuh organisme, telurikan. Ekologi dapat rusak.	Sedimentasi dan penyaringan.
Suspensi Organik (O)	Partikel organisme, hewani atau nabati. Produk dan limbah industri serta rumah tangga	Harus dihilangkan	Beberapa partikel dapat ditolerir	Prasyarat dihilangkan.	Harus dihilangkan.	Pengendapan di dasar danau menyebabkan penguraian (anaerobik)	Sedimentasi filtrasi. Lakukan biologi BOD.
3. Bendahidup							

mikroba	Ganggang, virus, bakteri, muba, protozoa, mikrofungi selau ada di air alam. Pasti ada bila cukup zathara, misalnya limbah rumalitannga.	Harus dibatasi bila untuk air minum. Dapat muncul lagi di pipa distribusi. Bentuk patogen dan E.coli harus hilang.	Prasyarat lebih lunak tetapi perlu klorinasi untuk mencegah pertumbuhan, apalagi pada aryang terkantaminasi.	Tak penting pada proses industri. Pemrosesan pangan menuntut mutu seperti air.	Tak penting pada proses industri. Pemrosesan pangan menuntut mutu seperti air.	Dikurangi dengan lakuan biologis. Mikrofiltrasi. Disinfeksi dengan kloror, ozondan biosida
	Cahaya mempercepat pertumbuhan ganggang. Bakteri besi dari sumur dan pipa besi. Bakteri belerang bila anaerobik.	Ganggang ang dan jamur mikro menyebarkan bau		Da pat menimbulkan lendir pada sistem pendingin resirkulasi.		Stenilisasi ultraviolet atau Saring.
Bentuk kehidupan tinggi/besar.	Ikan, cacing, jentikserangga, kutu airdll. Tanaman air terapan dan berakar.	Harus dihilangkan.	Organisme kecil terka dang tak berbahaya tetapi perlu dihilangkan.	Dihilangkan dari air pendingin secara penyaringan	Harus dihilangkan.	Buka masalah.

4. Gas	O <sub>2</sub> dan CO <sub>2</sub> selalu ada. Sumber banyak limbah banyak CO <sub>2</sub> , ada yang H <sub>2</sub> S. Gas NH <sub>3</sub> dapat berasal dari pembusukan biologis atau limbah industri. Pertumbuhan ganggang mengambil CO <sub>2</sub> dan menambah O <sub>2</sub> sampai lewat jenuh pada siang hari, dan sebaliknya pada malam hari.	Jarang penting. Amonia merusak bau dan rasa. CO <sub>2</sub> dan O <sub>2</sub> menambah kesegaran rasa
--------	---	---

60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 £ 5 > £ Eu!  
 Li  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 60 J<sup>^^</sup>.  
 ° 33 V  
 S. S S  
 S  
 ■ S-S  
 3  
 2 <  
 2 7.2  
 O J  
 31. ill }  
 2 <  
 2 7.2  
 O J

o

60  
c

<uTS.!=-o-a-o-a-2

III fill

to is! III

C "B c<sub>o</sub> .jn  
-C re

Air sumur dalam ialah air yang telah merembes melalui lapisan-lapisan mineral, bersama air sumber, masuk ke tanah. Selama perembesan, bahan-bahan organiknya hilang. Air sumur<sup>alam</sup> dapat diminum karena telah bebas bakteri. Sebaliknya, air sumur dangkal biasa (beberapa meter/belasan meter saja) tidak boleh diminum mentah.

Air sumur dalam selama perembesannya juga melarutkan dan membawa berbagai mineral, apalagi karena sifatnya asam (CO<sub>2</sub> terlarut). Air demikian memiliki FIT (Padatan Total Terlarut) tinggi, dan PTT itu sebagian besar adalah kalsium bikarbonat. Bila keasaman hilang, air akan bersifat sadah (sementara). Kesadahan cenderung membentuk kerak dalam pipa dan ketel, walau tak menimbulkan korosi. Air sumur dalam sering banyak mengandung besi dan mangan yang lina terkena udara maka lama-lama akan membentuk endapan kuning coklat. Air sumur dalam juga mengandung silika dari pelarutan pasir halus.—

Lapisan tanah itu tipis dan yang di bawahnya terdapat batuan kedap air, menghasilkan air yang khas pula. Air itu biasanya berwarna kekuningan, berbuih/busu. Air demikian, yang berasal dari daerah yang jauh dari kota (jadi bukan karena pencemar/limbah), lazim disebut *air tanah Moor* (bukan dari daerah berkapur).

Hujan yang jatuh ke tanah, airnya meresap, tertimbun di kolam atau "siti", lalu mengalir lagi. Karena dasar tanahnya batuan kedap air, hanya sedikit PTT-nya. Jadi kesadahnya pun lebih rendah daripada air sumur dalam. Keasaman airnya (p rendah) membuatnya korosif. Kandungan organiknya cukup besar, warnanya kekuningan. Bahan organik cenderung aktif permukaan, maka berbuih. Kotoran organik itu rJer-macam-macam jenisnya, dari yang berukuran molekul kecil sampai yang koloid. Juga banyak asam humat dan fulvatnya.

Air Moor tak harus di pegunungan. Yang penting batuan di bawahnya (lapisan tanah hanya tipis) bersifat kedap air, bukan kapur.

Air pegunungan, dari mata air, dari resapan ke batuan berkapur biasanya jernih, kebiruan oleh partikel terlarut di dalamnya. Akibat bilasan saat perembesan, air pegunungan amat tinggi alkalinitas dan kesadahnya. Terkadang kandungan organiknya juga tinggi. Air pegunungan <sup>uga</sup> berkandungan partikel batuan halus, berkadar silika tinggi, dapat difilter.

Air permukaan lain lagi. Ini misalnya air sungai, danau, kanal, bahkan teluk yang jauh sekali menjorok ke daratan. Air demikian

biasanya amat keruh, PTT-nya besar. Seringkali sudah tercemar oleh kotoran lain seperti limbah industri, kota dan rumahtangga, sabun dan deterjen, fosfat, residu pupuk dan pestisida, logam berat, amonia, nitrit, fenol bahkan bakteri berbahaya.

Bilasan dari daerah persawahan mengandung residu nitrat, fosfat, pupuk dan sebagainya, sehingga menurut standar WHO (PBB) tak layak diminum. Kandungan sulfat dan kalsiumnya juga tinggi, maka sebagai air industri tak memenuhi syarat pula. Air permukaan juga banyak mengandung organik dari limbah manusia, peternakan, pabrik pengolahan makanan dan lain-lain. Dari perkotaan juga masuk deterjen, limbah-limbah lain, sehingga kadar oksigen merosot sementara kadar amonianya naik. Nilai kalium permanganat dan BOD-nya meningkat drastis.

Air permukaan juga terkontaminasi kotoran-kotoran lain yang sukar dibersihkan dengan pengendapan saja. Deterjen mengganggu kerja resin penukar ion, juga asam humatnya. Mutu bakteriologisnya juga menguatirkan, perlu selalu disterilisasi. Limbah rumahtangga yang kaya garam serta fosfat memacu pertumbuhan ganggang dan sebagainya. Di masyarakat yang makin maju, limbah industri beracun berbahaya merupakan ancaman gawat bagi air permukaan. Peraturan dan pelak-sanaan pelestarian lingkungan hidup harus semakin diperketat bagi industri.

Air daerah kering biasanya berkandungan bahan anorganik (A) besar tetapi kandungan organiknya (O) kecil. Uji permanganat memang dapat memberikan hasil tinggi, tetapi bukan karena organiknya, melainkan karena adanya banyak reduktor anorganik. Air daerah kering dapat jernih, dapat pula keruh.

Air sumur daerah kering sering banyak mengandung H<sub>2</sub>S. Terkadang air itu hangat, bahkan panas. PTT-nya berlain-lainan. PTT dapat meningkat apabila terjadi intrusi air laut, walau gejala tersebut tak hanya berlaku untuk daerah kering. Di beberapa negara Afrika, misalnya Libya, intrusi air laut dapat sampai berpuluh kilometer menjorok ke daratan akibat penyedotan sumur bor. Kota seperti Jakarta pun terancam intrusi demikian.

PTT juga dapat mengakibatkan pembilasan mineral. Kadar kalsium (misalnya sebagai sulfat, di Iran) dapat sampai beribu-ribu ppm (bagian perjuta).

Kandungan oksigen kecil sering menyebabkan larutnya besi (Fe) dan mangan (Mn) pada sumur dalam. Di daerah kering tertentu, misalnya di Arab Saudi, didapati pula belerang dan H<sub>2</sub>S tinggi pada air sumur dalamnya. Airnya dapat panas, sampai 60°C. Begitu pula PTT akibat silika/pasir, apalagi di daerah kering padang pasir yang sering terumpa badai pasir. Di Iran, sungai-sungainya yang bersumber di gurun, juga berubah-ubah mutunya.

Air di daerah tropik basah, yang banyak turun hujan, misalnya di Afrika Barat dan Indonesia/Asia Tenggara, PTT-nya jarang amat tinggi. Akan tetapi air tanah atau air sumur dalamnya tidak terlalu terpengaruh oleh curah hujan.

Air permukaan tropik basah biasanya mengandung sangat banyak bahan-bahan erosi, PTT dapat tinggi, kandungan organiknya juga tinggi. Di daerah persawahan, atau bekas sawah yang dijadikan permukiman, kandungan organik-anorganiknya sangat besar, bahkan terkadang berbau dan keruh. Pada awal musim hujan, PTT meningkat drastis, dapat sampai berpuh ribu ppm. Tak pelak pula, kandungan mikroba dan bibit penyakit juga besar. Di kota-kota besar seperti Medan, Palembang, Jakarta, Semarang, Surabaya, Ujungpandang dan sebagainya, kandungan zat berbahaya akibat limbah industri harus juga dicurigai. Pengaturan industri dan limbahnya harus terus diperketat, pelaksanaannya harus terkontrol dan terbuka bagi masyarakat.

Di daerah tertentu di daerah tropik, misalnya di Sumatera dan Kalimantan yang banyak tanah gambutnya, keasaman air bersifat eks-trim. Hanya tanaman tertentu dapat tumbuh. Penjernihan sering menghasilkan kerak keras yang amat banyak. Di daerah Nusa Tenggara Timur, juga di bagian Jawa tertentu, kandungan PTT kapurnya amat tinggi pula.

Pada dasarnya air di daerah tropik (basah) sangat bervariasi mutunya. Itulah sebabnya macam lakuan atas airnya juga berbeda-beda, khas masing-masing. Penentunya selain faktor alam (jenis tanah, sumber air, curah hujan, dan lain-lain), juga faktor manusia (sawah, kota, industri). Yang pasti kontaminan organisme dan bakterinya tinggi.

Air payau di daerah pantai. Kota-kota padat penduduk di pesisir, dengan dinamika industrinya, semakin menuntut tersedianya fasilitas air bersih (selain listrik, telepon/komunikasi dan transportasi). Bila sumber air tawar tak memadai maka harus diupayakan dari sumber air payau. Hal ini terutama merupakan tanggung jawab pemerintah bagi warganya

yang telah membayar pajak, tanpa menutup kesempatan partisipasi pihak swasta apabila kemampuan pemerintah terbatas padahal kebutuhan rakyat tak mungkin ditunda-tunda. PTT air payau sangat tinggi sehingga diperlukan lakuan yang memadai agar dapat diperoleh air yang bermutu.

## PILIHAN LAKUAN AIR

Untuk menghasilkan air bersih (bahkan murni) dari sumber air alam, terdapat berbagai pilihan teknik lakuan. Masing-masing memiliki ciri khas, keunggulan dan keterbatasan sehingga terkadang perlu digabung. Metode lakuan itu ialah filtrasi, distilasi, penukaran ion, elektrodialisis, osmosis balik dan ultrafiltrasi, disinfeksi/sterilisasi.

Filtrasi atau penyaringan merupakan cara klasik untuk meng-hilangkan kotoran yang tidak larut. Filtrasi dapat digunakan sebagai cara pokok pembersihan air, disertai pralakuan semisal pengendapan dan sebagainya. Dapat pula filtrasi dijadikan kelengkapan tambahan cara pembersihan lain, misalnya sebelum atau sesudahnya. Cara pembersihan lain itu dilakukan untuk menghilangkan zat-zat terlarutnya.

Distilasi juga merupakan cara lama untuk memurnikan air. Distilasi dapat untuk menawarkan (desalinasi) air payau dan air laut, asalkan cukup tersedia energi murah untuk itu, karena untuk perubahan fasa (distilasi) diperlukan kalor tak sedikit. Untuk kaitan farmasi/medik, misalnya injeksi dan obat, diperlukan air a-pirogen (bebas mikroba berbahaya) yang dapat dipenuhi dengan distilasi. Akan tetapi perkembangan iptek mutakhir memungkinkan teknik lain yang lebih murah, yakni dengan membran osmosis balik dan sebagainya. Cara distilasi diper-gunakan bila kondisinya memadai, karena biayanya relatif mahal.

Penukaran ion merupakan cara ideal asalkan PPT tak terlalu besar, tak lebih dari 700 ppm. Sistem resin dan modul serta regenerasi (penyegar resin) semua harus tepat. Kotoran organik dapat juga dihilangkan. Air terhasil dapat amat murni, bebas ion.

Elektrodialisis dapat dipergunakan bagi air payau sampai belasan ribu ppm dan produknya adalah air minum dengan PPT sekitar 200 ppm. Elektrodialisis dapat digunakan selaku pralakuan bagi teknik penukaran ion.

Osmosis balik (RO) baik untuk lakuan air baku PPT 700 ppm ke atas, misalnya air payau sampai air laut. RO juga baik untuk PPT rendah, namun berkotoran organik banyak. PPT dapat dihilangkan sampai tinggal beberapa persen saja dan zat organiknya dihilangkan. *Ultrafiltrasi* (UF) dipakai sebagai poles akhir agar terhasil air murni.

Disinfeksi (sterilisasi) berperan untuk menghancurkan (mem-bunuh) mikroba dan bibit penyakit dalam air. Proses membran tidak membunuh organisme atau gulma air lainnya.

Pemurnian (penjernihan) air lazim dilakukan tidak hanya dengan satu teknik saja, melainkan menggunakan cara gabungan. Lakuan tertentu harus didahului pralakuan memadai tertentu. Apalagi untuk terapan kritis, misalnya untuk air yang diproses elektronis dan farmasi sampai bioteknologis yang airnya harus betul-betul murni, menuntut sederetan metode pemurnian. Walaupun kotorannya sedikit, air ruahnya banyak, agar produknya bermutu maka metode dan teknologinya harus benar-benar efektif dan efisien.

Biaya pemurnian air tergantung atas berbagai faktor. Pertama, biaya pengaliran melintasi segenap sistem dan komponennya. Kedua, biaya pemurniannya sendiri, yang ditentukan oleh bahan baku dan mutu produk yang dituju. Biaya bahan kimia dan energi perlu diperhitungkan. Demikian pula biaya bagi limbahnya.

Bila maksud utama pemurnian ialah penghilangan PTT (Padatan Total Terlarut), biayanya terutama pada proses pemurniannya sendiri. Ini misalnya termasuk untuk deionisasi, desalinisasi air laut dan semacam-nya. Bila produknya lebih murni, biayanya membesar. Dari 200 ppm ke 1 ppm dapat setara biaya dari 1 ppm ke 0,1 ppm. (Ultramurni). Makin mu-tlak kemurnian produk harus dicapai, biayanya pun makin meningkat. Setiap jenis air mempunyai biaya khas masing-masing.

## BERBAGAI TARAF MUTU

Untuk menggarap air alam, meningkatkan mutunya sesuai tujuan, pertama-tama harus diketahui dulu kotoran dan kontaminan di dalam-nya. Berbagai parameter mutu harus disimak dan dipantau. Parameter-parameter tersebut menentukan/mempengaruhi pemilihan proses lakuan, operasi dan biayanya. Parameter air yang penting ialah parameter fisik, kimia, biologis dan radiologis.

Pertama kita tinjau parameter fisik air (Tabel 1-2)

Parameter	Sifat dan pengaruh	keterangan
1. Bau&rasa	Menandalcan terjadinya peruba f-lan tertentu dalam air, tetapi tidak ada satuan pengukunya	Simakan secara inderawi pembau dan pencecap saja.
2. Warna	Mempengaruhi sikap orang yang meminumnya (estetik tak menarik).	Diuji dengan larutan baku tertentu di lab, misalnya Nessler.
3. Kekeruhan	Bahan tersuspensi tak larut pada airpermukaan.	Diukuron-Imf, aneka teknik
4. Koloid	Bahan tersuspensi, mirip larutan sejati karena dapat melintasi kertas saring.	Partikelberukuran 0,1 mikron sampai sepersejuta milimeter, memperlihatkan gejala Tyndall, luas permukaan amat besar, bergerakbila diberi jenjang potensial lislrilic

Parameter kimia merupakan kelompok parameter yang penting untuk memerikan mutu air. Dikenal ada *parameter nonspesifik* dan *parameter spesifik*. Parameter nonspesifik dalam praktek layak dan cukup memadai disimak secara on-line pada alat/modul pembersih air, agar otomatis selalu dapat dilihat dan diikuti dengan mudah. Sekaitan parameter spesifik sekarang sudah ada berbagai piranti dan zat kimia penguji cepat dan praktis. Operator pembersih/pemurni air harus dilatih sebaik-baiknya sehubungan praktek kimia praktis di dalam memantau mutu air (Tabel 1-3)

Parameter	Sifat dan pengaruh	Keterangan
1. Daya hantar elektrolit (PTT) 2. Konsentrasi ion hidrogen ( $p^H$ )	Ukuran zat terionisasi total dalam air, merupakan cara pemantauan dan pengendalian mutu. Mempengaruhi berbagai lakuan air dan mutu bagi aneka pen ggunaan airnya. Ukuran sifat asam/basa larutan, mempengaruhi proses dan penggunaan produk.	Diukur (on-line) secara konduktivitas. Monitor p selalu ada pada pemurni air yang baik.

3. Kesadahan	Akibat adanya garam larut kalsium dan magnesium mempengaruhi pemanfaatan di lingkungan industri maupun rumah tangga. Menyebabkan endapan serta kerak. Ukuran banyaknya pengaruh ion atas mutu air, tidak peduli jenis ion alkalinya. Kontaminasi air permukaan akibat limbah industri atau pertambangan. Mempengaruhi pipa, boiler dan lain-lain, menimbulkan korosi.	Diukur di lab. dan on-line. Dapat dipantau on-line. p meter sebagai indikator dan kontrol.
4. Alkalinitas		
5. Keasaman mineral		

Parameter (spesifik)	Sifat dan pengaruh	Keterangan
6. Besi (Fe)	Mempengaruhi rasa air dan membentuk kerak. Biasanya berbentuk besi karbonat. Air semula jernih tetapi lama-lama karena terkena udara kemudian muncul partikel merah kecoklatan akibat terjadinya ferri oksida/hidroksida. Bila ada zat organik dalam air, dapat tetap melayang-layang tak mengendap, beberapa di antaranya merupakan suspensi koloidal.	Dihilangkan dengan koagulasi dan filtrasi, dapat dengan oksidasi bila ada bersama dengan karbon dioksida dalam air. Dapat dikontrol dengan penukar ion pula.
7. Mangan (Mn)	Seperti besi	
8. Tembaga (Cu)	Menimbulkan rasa, ganas terhadap pipa logam.	
9. Seng (Zn)	Mirip tembaga.	
10. Kalsium (Ca)	Penyebab kesadahan air, membentuk kerak. Harus dihilangkan dari air yang sedang diproses, dapat dilakukan dengan cara penukaran ion.	Dapat dijaga tetap dalam larutan dengan pengkompleksan, memakai EDTA atau NTA. Sebaiknya dikurangi bila untuk air rumah tangga.
11. Magnesium (Mg)	Seperti kalsium, tetapi lebih mengubah rasa air.	
12. Natrium (Na)	Dapat amat korosif bagi turbin. Mudah lolos dari penukar ion.	

13. Silika	Membentuk kerak pada turbin dan mesin.	Dimonitor on-line, layak dihilangkan dari air yang sedang diproses. Bila perlu dianalisis lab.
14. Logam beracun	Arsen, kadmium, timbel, khrom, barium, selenium sering terdapat. Kontrol pada sumber pencemar harus ketat (limbah/lingkungan hidup).	
15. Klorida (Cl)	Mempengaruhi rasa air. Amat korosif, dapat menembus lapisan pelindung konstruksi besi baja.	Penukar ion efisien lebih berfungsi atas ion bervalensi banyak daripada atas ion valensi tunggal seperti klorida. Ini lazim disebut <i>gelincir resin</i> .
16. Fluorida (F)	Untuk air minum, dikontrol agarsekitar 1 ppm saja. Bila lebih besar maka akan amat korosif, menimbulkan sakit gigi <i>caries</i> atau <i>gigitis</i> .	
17. Nitrat	Berbahaya bagi kesehatan, apa-lagi bayi (bayi biru). Standar WHO menetapkan maksimum 50 ppm. Penyebabnya adalah adanya nitrat dari residu pupuk. Ini merupakan pertanda khas berlangsungnya pencemaran.	Secara terbatas dapat diatasi dengan penukar ion.
18. Amonia (dan aminaatsir)	Ada dua bentuk: ionik sebagai amonium ( $p^H$ dibawah 7,2) atau tak-ionik/NH <sub>3</sub> ( $p^H$ di atas 10,5). Di antara kedua $p^H$ itu ada dalam dua bentuk. Bentuk tak-ionik membunuh ikan. Bila air mengandung amonia, jangan diklorinasi, sebab dapat terbentuk khloramin yang amat beracun. Amonia bersifat korosif serta memacu pertumbuhan bakteri. Dalam jumlah sedikit memang menopang kehidupan.	Amonia terdapat pada air tempat terjadinya penguraian biologis zat organik bernitrogen, terutama dari sumber limbah rumah tangga dan pertanian. Amonia atsir, misalnya hidrazin, sengaja dimasukkan ke air beroksigen agar korosi turbin mesin pabrik tercegah dari korosi.
19. Fosfat	Tetapi bila terlalu banyak akan menyebabkan pertumbuhan ganggang menjadi liar dan terjadilah eutrofikasi. Fosfat ada dalam berbagai bentuk, yaitu orthofosfat, fosfat kondensasi, fosfat organik	Residu pupuk dapat mencemari air permukaan.

20. Senyawaan fenolik	Mempengaruhi air minum. Bau dan rasanya sangat mengganggu. Standar air minum WHO batas maksimumnya 0,001 mg/1 (seperseribu ppm). Tak terlalu beracun tetapi buih/busanya mengganggu. Mengganggu flokulasi oleh koagulan. Mengganggu bahkan mengusir oksigen dari air. Jenis dan BM-nya beragam. Mempengaruhi pipa saluran air. Mempengaruhi teknologi penukaran ion dan pralakuan. Sulit diatasi dengan penukar ion.	Uji laboratorium.
21 Deterjen (Surfaktan anionik)		Contohnya ABS. Dapat disimak di lab Deterjen anionik mengganggu kerja resin penukar ion.
22. Asam humat (humus)		Pengukuran dengan serapan oksigen atau ditrasi dengan kalium permanganat. Dapat pula dengan spektrofometri UV. Penentuan spektrofotometri.
23. Asam ligninsulfonat		

Gas terlarut. Air di alam mengandung sejumlah tertentu gas-gas yang terdapat di atmosfer. Terkadang dijumpai juga amonia bebas, hidrogen sulfida atau metana, terutama bila keadaannya anaerobik dan bakteri telah bekerja. Biasanya perlu dilakukan oksigenisasi. Adanya gas oksigen dan karbon dioksida adalah yang paling diperhatikan

Parameter (Tabel 1-4).

	Sifat dan Pengaruh	Keterangan
24. Oksigen	Korosif terhadap logam, tetapi bila tidak ada akan menyebabkan terbentuknya gas berbahaya seperti metana, hidrogen sulfida dan lain-lain, yang juga sangat mengganggu bau dan rasa. Oksigen penting bagi kehidupan tinggi dalam air.	
25. Karbondioksida	Selalu ada dalam jumlah sedikit sampai banyak dalam air tanah. Terkadang air tanah sampai mengeluarkan gelembung-gelembung.	Bisa dikurangi dengan peng-asaman dan <i>degassing</i> . Dapat pula dengan penukar ion. Kontrol p on-line.

Pencemar organik dan biologis dapat ditunjukkan oleh berbagai parameter. Faktor pengaruhnya dapat alamiah maupun akibat ulah manusia. Kandungan kotoran organik dapat berubah-ubah jumlah dan berat dampaknya. Adanya zat organik dapat dipastikan dengan simakan kebutuhan oksigennya.

Parameter CCE atau ekstrak karbon khloroform. Karbon aktif digunakan untuk menyerap zat organik dari sejumlah air. Parameter CCE ini tidak menyatakan jumlah kandungan organik totalnya, namun menunjukkan beban pencemaran yang ada.

Parameter BOD atau kebutuhan oksigen biokimia. Uji ini untuk menentukan beban biologis air, yakni dari jumlah oksigen yang diserap oleh sejumlah air.

Parameter COD atau kebutuhan oksigen kimia, merupakan parameter penting untuk menentukan derajat pencemaran, yakni memberikan ekuivalen oksigen bahan organik yang dapat dioksidasi oleh oksidator kimia kuat.

Parameter bakteriologis. Bakteri adalah tanaman mikroskopik. Tiga jenis utamanya adalah *Bacilli* (bentuk silindris), *Spirillum* (spiral) dan *Cocci* (bulat/sferik). Organisme yang kerap dijadikan petunjuk pencemaran tinja atau limbah ialah *Escherichiacoli* dan kelompok koliform lainnya. Koliform (*Coli-aerogen*) ialah mikroba berbentuk silinder atau batang, mampu meragikan asam penghasil glukosa dan laktosa. Ini ber-beda dari bakteri serupa ' namun inilah yang menyebabkan tipus, paratipus, disentri, dan sebagainya.

Organisme lain yang dijadikan petunjuk ialah *Strajtococcus faecalis* dan *Clostridium Welchii*. Banyak percontoh serta mutu standar yang disyaratkan tergantung pada maksud penggunaan airnya. Analisis dilakukan di laboratorium.

Adanya bakteri di air alam yang akan dijadikan air bersih, air minum dan sebagainya tidak hanya mempunyai masalah bagaimana membunuh dan menghilangkannya dalam proses tertentu. Akan tetapi juga hasil penguraian mikroba/bakteri itu, disebut *pirogen*, dapat tetap ada di air bersihnya. Adanya pirogen berbahaya bila airnya dijadikan pengencer larutan injeksi karena dapat mengakibatkan peningkatan suhu badan manusia/hewan yang diinjeksi.

Parameter Radiologis. Di masyarakat yang makin maju, bahan radioaktif layak makin diwaspadai. Pencemaran zat radioaktif dalam badan air semakinberpeluangterjadi.

**Informasi perihal mutu air dinyatakan dalam satuan besaran ter-tentu.**

**Konduktivitas atau dayahantar merupakan ukuran** kemampuan mengalirkan arus listrik, menandakan banyaknya ion. Ia dapat dijadikan **ukuran** padatan total terlarut (FIT), menyatakan jumlah garam di dalam-nya. Tentu saja pencemar organik yang relatif kurang mengion, tak dapat dipantau dengan baik. Senyawa anorganik pun berlainan sumbangannya pada dayahantar, tergantung faktor derajat ionisasi, muatan listrik ion-nya, serta mobilitasnya. Dayahantar juga bersesuaian dengan suhu, biasanya untuk 25°C.

Resistivitas atau tahanan jenis, dinyatakan dalam satuan Ohm dikalikan satuan panjang. Dalam hal air, makin murni air itu, makin besar **tahanannya**.

**Resistivitas ialah** kebalikan konduktivitas. Satuan resistivitas umumnya mega ohm-centimeter, sedangkan konduktivitas mikrosiemen tiap centimeter ( $M \Omega \text{ cm}$  dan  $1S/\text{cm}$ ).

**PTT atau TDS** dipakai bagi padatan total terlarut, merupakan **ukuran jumlah total zat** anorganik dan organik terlarut dalam air. **Semen-tara keasaman diukur dengan  $p^H$ .**

### PENGELOMPOKAN AIR

Terkadang petunjuk atas mutu dan ciri air tidak dinyatakan dalam bentuk satuan, namun dengan istilah tertentu. Misalnya: Air laut, PTT-nya 6.000-50.000 ppm (rata-rata 35.000). Air payau PTT 1.500-6.000 ppm. Air agak payau atau asin PTT 800-1.500 ppm (sumur asin, intrusi ke daratan, muara sungai). Air tawar (*fresh*) kurang daripada 800 ppm PTT-nya, yakni dari sumur dalam (bor), danau dan sebagainya.

Sementara itu, sehubungan kesadahan (totalnya): Air lunak sampai 60 ppm. Agak sadah 61-120 ppm. Air sadah 121-180 ppm. Sedangkan air sangat sadah di atas 180 ppm.

Air minum, PTT-nyaagak di atas 500 ppm. Tentu saja harus bebas dari organisme dan bahan kimia yang berbahaya bagi kesehatan. Juga rasa dan baunya enak/nyaman/segar, tidak keruh dan tidak berwarna.

Air mineral alam, kandungan padatan total terlarut (PTT) kurang daripada 2.500 ppm.

Kesadahan air sangat penting sehubungan dengan berbagai peng-gunaan air, karena cenderung membentuk kerak. Walaupun sedikit dipengaruhi kandungan besi dan mangan, kesadahan terutama disebabkan oleh ion kalsium dan magnesium. Air yang kesadahannya amat rendah, dengan sedikit sabun saja telah berbuih banyak. Dalam praktek industri, kesadahan air harus optimum, karena apabila terlalu tinggi akan menimbulkan kerak, dan bila terlalu rendah menyebabkan korosi (pelarut baik) pada suhu tinggi.

Kalsium dan magnesium dalam air dapat berbentuk garam-garam yang berbeda, biasanya bikarbonat, karbonat, sulfat atau khlorida. Bila dididihkan, garam bikarbonat berubah menjadi karbonat yang kecil nilai kelarutannya. Itulah sebabnya bila kesadahan air terutama oleh bikar-bonat/karbonat, ia dapat dihilangkan (dijadikan endapan) dengan pemanasan. Kesadahan demikian disebut kesadahan'sementar^, atau juga dinamai kesadahan karbonat. Garam-garam lain, misalnya sulfat dan khlorida, tak terpengaruh oleh pendidihan. Ini disebut kesadahan tetap atau kesadahan non-karbonat.

Derajat kesadahan ada dalam berbagai sistem satuan. Ada derajat Prancis, ada derajat Jerman. Definisi kesadahan memakai gram per gallon (1 grain = 64,8 mg, 1 gallon = 3,785 liter; lihat buku AJH: "MENGENAL ELEKTROPLATTNGVANDI Offset, ISBN 979-533-0977, Yogya, 1992, juga bagian Lampiran/Tip buku ini). Gallon Inggris (imperial) berbeda pula dengan gallon Amerika. Pengelompokan oleh Kantor Survey Geologis AS diterima di kalangan teknologi air: 4 taraf mutu (lunak, agak, sadah, dan sangat), dinyatakan dalam ppm serta kalsium karbonat.

Julat satuan tersebut mudah dipahami dan diterima secara internasional.

Mutu air, secara tradisional (entah sejak kapan), diacukan pada air bersih atau air minum. Tetapi rujukan demikian agak kabur. Air minum bukan berarti air murni. Air ber kandungan ion-ion mineral, tidak sekadar layak-minum, melainkan justru menyehatkan. Air minum memang bersih. Tetapi air minum tidak selalu memadai untuk keperluan ilmiah, industri dan medis. Air minum kerap harus lebih dimurnikan untuk itu.

Tidak sedikit upaya berpuluh badan/lembaga berbagai negara maupun organisasi internasional untuk menetapkan petunjuk dan peraturan perihal mutu air untuk penggunaan tertentu. WHO menetapkan standar air minum. Spesifikasi Pharmacopoeia tidak sekadar menyajikan uji dan analisis produk air namun juga menilai cara proses dan lakuannya. Standar ACS, ASTM, BEWA dan banyak lagi ada pula.

Tabel 1-5: *hi Formulir Arudisis Cuplikan Air*

Parameter	Satuan
Warna _____	_____ ska la Hazen
Kekeruhan _____	_____ skala NTU
Dayahantar _____	_____ <i>H S</i> / cm (pada 25°C)
pH _____	
PPT-----	----- ppm (pada 18°C)
Kesadahan total	
Kalsium	
Magnesium	
Natrium	
Kalium	
Keasaman mineral ekivalen	
Alkalinitas total	> CaCO <sub>3</sub>
Alkalinitas PP	
Bikarbonat	
Karbonat	
Hidroksida	. ppm (bagian /
Sulfat	tiapjuta)
Khlorida	
Nitrat	
Karbon dioksida bebas	
Silika	SiO <sub>2</sub>
Besi total	Fe
Besilarutan	Fe
Tembaga	Cu
Aluminium	Al Cl <sub>2</sub>
Khl or bebas	O <sub>2</sub>
Oksigen terserap (4 jam 27°C)	

Beragam-macam dan tidak boleh diambil-alih begitu saja tanpa menyimak penggunaan khususnya. Profesional di Indonesia harus jeli dan konsisten, sekaligus sadar bahwa masih banyak peraturan di negara kita yang sudah usang ditinjau dari segi perkembangan iptek mutakhir. Adalah juga tanggung jawab Menristek, dan lain- lain untuk turut serta menanganinya dengan serius dan piawai. Standar antarinstansi perlu di-serasikan satu sama lain. Aneka statuta, petunjuk, spesifikasi, peraturan, niscaya makin kongruen serta menzaman.

Seberapa jauh air dimurnikan? Sesuai bahan baku, penggunaan produk serta sistem yang dipakai, berbagai parameter air harus direkayasa. Prosesnya acapkali merupakan kombinasi. Sistem pemurnian yang memadai dapat mencapai produk mendekati H<sub>2</sub>O teoritis. Jadi, pemurnian air itu seperti "pengilangan". Makin murni, makin mahal pemilihan proses untuk maksud tertentu perlu mempertimbangkan segi teknis dan ekonomisnya. Air minum misalnya, tak perlu air murni.

Kohlrausch (1894) telah membuat air murni, dengan 26 kali dis-tilasi berurut dalam bejana kuarsa. Jasa karya klasik Kohlrausch tersebut ialah:

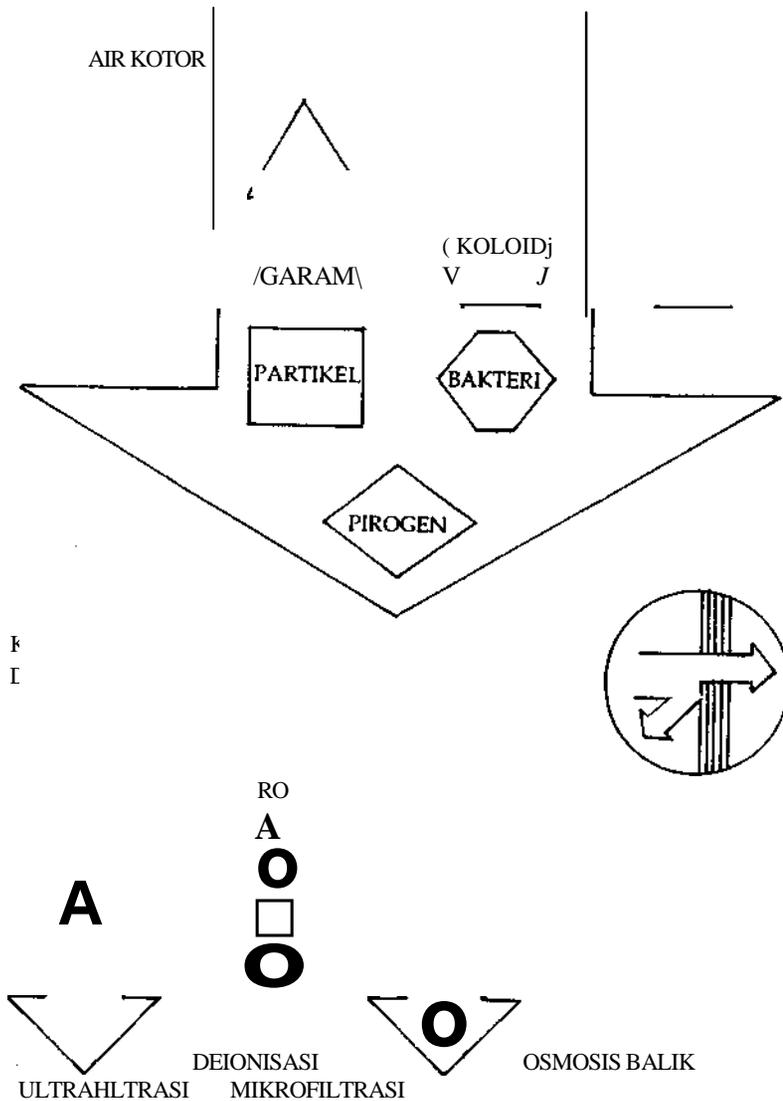
1. Pengukuran hantaran listrik diterima sebagai sarana uji mutu air.
2. Mutu air mutlak murni disebut air konduktivitas.
3. Tersingkapnya kekeliruan kesimpulan banyak pakar bahwa dayahantar merupakan petunjuk tak ada segenap kotoran tersuspensi dan ter-larut.

Pengukuran dayahantar hanya menunjukkan ada tidaknya terlarut ionik, bukan kotoran organik atau biologis. Itulah sebabnya kini makin / dianut empat spesifikasi prasyarat air murni berikut: Sistem Lorch. Dikenal juga ada sistem-sistem lain, tetapi sistem ini yang jelas terkuan-tifikasi, tidak berbasis manasuka, serta dihasilkan dari air (bermutu) minum. Cirinya: (1) Dibuat dengan sistem pemurnian yang beredar luas, (2) Sesuai untuk aneka terapan khas ilmiah, kedokteran dan industri, (3) Satuannya intemasional/SI, (4) Dapat diukur dengan piranti danpraktek analisis lazimnya.

**Tabel 1-6: Grade/Taraf Kemurnian Air (Lorch).**

	Grade 1	Grade 2	Grade 3	Grade 4
Satuan	Airmurni kimia/biologis	Air murni kimia, ada sedikit organik	Air murni dengan sedikit padatan dan gas terlarut	Air murni dengan sedikit padatan terlarut Si, dan CO <sub>2</sub> dalam umpan
Dayahantar (i S/cm)	0,055	0,055	2-1 0,5-1	5-2 0,2 - 0,5
Resistivitas 25°C (MQ/cm)	18	18 <0,1	N/A	N/A
Organik terlarut, oksigen terserap (ppm)	limit deteksi	limit deteksi 6,5-7 <6	< 0,05 5,8 - 8,5	<0,05 4-8,5
Padatan suspensi (ppm)	7 nol	< 0,005	N/A	N/A
Julat p <sup>H</sup>	< 0,002	< 0,005	<0,05	seperti air umpan <0,05
Cacah bakteri (koloni tiap 100 ml)	< 0,002	< 0,005	<0,05	seperti air umpan seperti air umpan
Silika SiO <sub>2</sub> (ppm)	limit deteksi	seperti air umpan	<0,05	seperti air umpan
Logam reriik terlarut (ppm)	limit deteksi	limit deteksi dayahantar, p <sup>H</sup> , Si & TOD	seperti air umpan	dayahantar, P .
Koloid	dayahantar, p <sup>H</sup> , Si & TOD		1,0 dayahantar, p <sup>H</sup> , & Si	
CO <sub>2</sub> (ppm)				
Kajian mutu				

Untuk mencapai taraf air murni mutlak, berbagai karya bersama antara ahli kimia, ahli fisika dan insinyur/teknisi telah berbuah, pengerjaan dapat cepat, efisien, aman dan ekonomis. Sekaitan dengan hal itu peranan iptek membran paling mutlak. Selain berpuluh bidang lain yang memetik manfaat, bidang pemurnian dan pembersihan air berkembang lantaran majunya ilmu dan teknologi membran, yang menderu dalam beberapa dasawarsa terakhir ini (prestasi generasi muda "baby boom").



Gambar 2: Perbandingan aneka teknologi pemurnian air sekaitan ciri penghilangan kotoran/kontaminan. Biasanya perlu penggabungan agar efektif dan ekonomis. (Teknologi membran mutakhir)

## Bab II

# AIR BERSIH MURNI CARA TRADISIONAL

Apa itu air bersih/murni? Seberapa bersih/murni? Tentu saja hal ini ber-wajah rangkap:

- Perihal mutu airnya *per se*,
- Menunjuk pada cara/teknik pemurniannya.

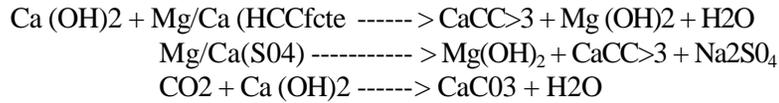
Pada bab terdahulu telah dipaparkan garis besar masalah mutu air *per se*. Perihal teknik pemurnian air antara lain terurai dalam buku *Air untuk Industri Pangan* (F.G. Winarno, Gramedia, 1986). Cara-cara pemberisihan/pemurnian serta analisis mutu air yang termuat dalam buku itulah yang dimaksudkan konvensional-tradisional. Jadi yang dimaksudkan tradisional bukan harus apa yang dilakukan di desa terpencil belaka.

## PELUNAKAN AIR S ADAH

Kesadahan air disebabkan oleh garam-garam kalsium dan atau magnesium, bikarbonat, sulfat, khlorida. Penghilangan kesadahan secara tradisional dilakukan dengan proses kapur/soda abu, proses zeolit, proses resim organik/polimer. Semua ini proses kimia penukaran ion. Pada proses soda abu, garam dijadikan bentuk yang mengendap. Pada proses zeolit, ion kalsium/magnesium diganti dengan natrium dari zeolit Na-nya. Dengan

resin, ion-ion garam juga ditukar.

Pada proses soda abu terkadang ditambahkan CO<sub>2</sub> (dapat juga dari atmosfer). Reaksinya:



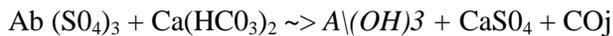
Terkadang ditambah pula zat penggumpal (koagulan) seperti tawas/fil-ter alum, ferrosulfat, natrium aluminat dan sebagainya. Proses demikian tidak boleh digabungkan sembarangan dengan proses teknologi membran mutakhir, sebab dapat merusak modul permeator/membrannya.

Proses penukaran ion dapat dengan zeolit-Na (produknya lalu mengandung natrium), atau resin penukar ion (kation/anion). Proses-proses tradisional begird hanya baik untuk keperluan kecil-kecilan. Untuk industri, pelunakan air sadah dengan cara tradisional seperti itu tidak dapat diterima lagi, apalagi untuk industri kimia, pangan, obat dan elektronika. Cara tradisional tidak dapat menghilangkan kontaminan secara sempurna.

Teknik resin memang terus dikembangkan dan disempurnakan, dijadikan kontinyu, otomatis, ditopang kontrol berkomputer.

**PENJERNIHAN AIR** ^

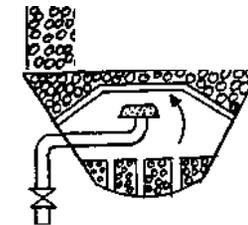
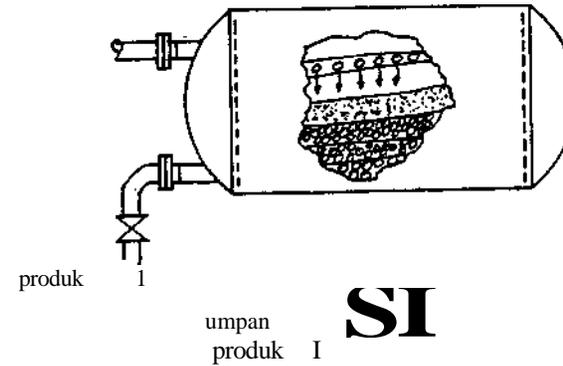
Di dasawarsa 1950-1960-an dulu, menjernihkan air sumur misal-nya, ditempuh dengan cara sederhana, yakni melewati air ke beberapa bak. Bak pertama, penambahan tawas/aluminium sulfat. Pada air sadah berkapur, prosesnya efektif (p<sup>H</sup> tinggi). Pertama, pada kesadahan terjadi reaksi:



Dengan cara itu maka kandungan besi akan berubah menjadi ferro (valensi 2) yang bersifat koloid, yang kemudian mengendap berwarna kuning-coklat. Koloid lain pun turut menggumpal dan mengendap.

Air kemudian dialirkan ke bak kedua. Bak ini berisi batu, kerikil, ijuk, pasir. Penyaring pasir itu disusun baik, sehingga produknya sungguh jernih, bersih, dan tak menimbulkan kerak pada alat dapur dan sebagainya. Itulah inovasi ala dulu.

Perbaikan teknis penyaringan pasir ialah dalam rupa penyaring pasir cepat, dengan tekanan. Filter bertekanan itu dipakai pada industri-industri konvensional. Bentuk bejana penyaringnya (tahan tekanan tinggi) dapat berupa tanki tegak, tanki terguling, *penyaring Cochrane* dan sebagainya, dengan berbagai modifikasinya.

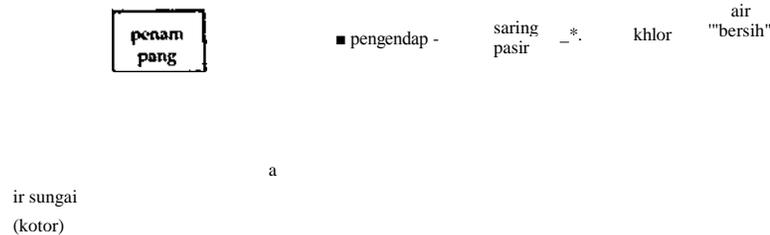


Gambar 3: *Penyaring cepat Cochrane, konvensional-tradisional.* tipe tanki terguling dan

Pada dasarnya, PDAM (Perusahaan Daerah Air Minum) di Indonesia, yang biasanya berbahan baku air sungai (permukaan), prosesnya juga tradisional demikian. Teknologi lama dan terlalu repot mengurus penambahan zat-zat kimia penunjangnya. Karena jaringan distnbusinya juga sudah banyak yang tua (berdasawarsa), maka agar tidak terlalu parah akibat kontaminasinya di perjalanan, kerapkah penambahan lakukan khlorinasi (sucihamanya) terlalu diperbesar sehingga ketika sam-pai di rumahtangga konsumen baunya masih menyengat. Mutu kekeruh-an, kandungan kimia/biologisnya, juga acapkali sangat parah. bama

sekali tidak boleh diminum langsung. (Bandingkan hal ini dengan air di negara lainnya, air ledeng yang ada di jalan dan taman boleh diminum langsung karena sehat). Di Indonesia, hal demikian, kurang jelas mengapa dan sampai kapan disempurnakan/diperbaiki. Memelihara instalasi yang ada pun kita masih terengah-engah. Soal kuantitas dan kualitas air bersih bagi warga negara Republik Indonesia sampai detik ini masih kurang bila dibandingkan dengan rekan-rekan dan tetangga lain.

Pengolahan air minum di Indonesia yang mestinya tersedia baik (kualitas/kuantitas) bagi hampir 200 juta warga negara dan bangsa Indonesia, dewasa ini masih sangat tradisional. Sementara iptek sudah sampai taraf PDAM ozon dan membran dan setarafnya, di Indonesia masih dengan dasar pengendapan, ditambah sedikit sentuhan kimia belaka. Kaum muda layak prihatin, sebab di negara tropik basah yang sebagian besar wilayahnya adalah air tetapi fasilitas air bersihnya masih terbatas; air botolan dijual lebih mahal daripada BBM dan itu pun tidak selalu terjamin mutunya. Catatan: Tentu saja tantangan pertama ditujukan kepada para ahli/insinyur teknik lingkungan (penyehatan) serta ahli/dokter kesehatan masyarakat. Karya nyata diminta oleh bangsa yang telah mendidik mereka.



Gambar i: *Bagaimana proses tradisional penjernihan air (PDAM).*

### KHLORINASI

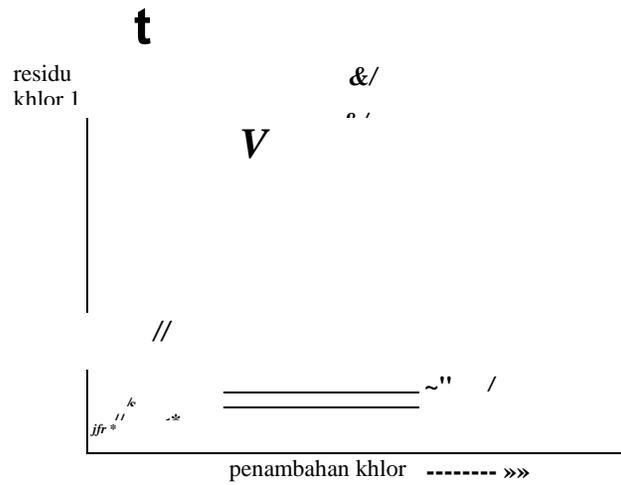
Lagi-lagi secara tradisional, air jernih dan bersih tersebut masih harus disucihamakan, di Indonesia lazimnya dengan khlorinasi. Meskipun memakai unit proses mahal atau murah, manual atau elektronik, tetap saja metode khlorinasi adalah metode tua, tradisional. Cara penyucihamaan (sterilisasi) dengan khlorinasi sering tidak dapat digabungkan (tidak cocok lagi) dengan iptek membran mutakhir yang semakin populer. Hati-hati, jangan langsung menggunakan air PDAM (ledeng) sebagai umpan masuk ke piranti/sistem membran. Membrannya bisa rusak! Catatan: Menjelang

Abad 21, era iptek, makin mendesak untuk berpikir ulang perihal sistem penyediaan air bersih/air minum di

i ~,v. \*rr.mnlikasi akibat tidak memadainya

modern (silakan kaji).

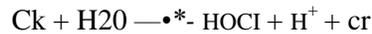
Khlorinasi air minum/bereih bertujuan sudhama/desinfeksi Se-  
,, ■ SeZSkan F G Winamo, khlorinasi lepat un.uk keperluan  
Sraltdnt^perii campin& Krhuru. ^-> '\*?£



Gambar 5: Ciri kebutuhan khlor air.

SSS^S^I^-SuHidadanrnik-roba pun hilang.

Bila memakai gas khlor (Cb):



HOCl itulah bentuk aktif sucihamanya, maka p diatur. HOCl dalam air mengurai:

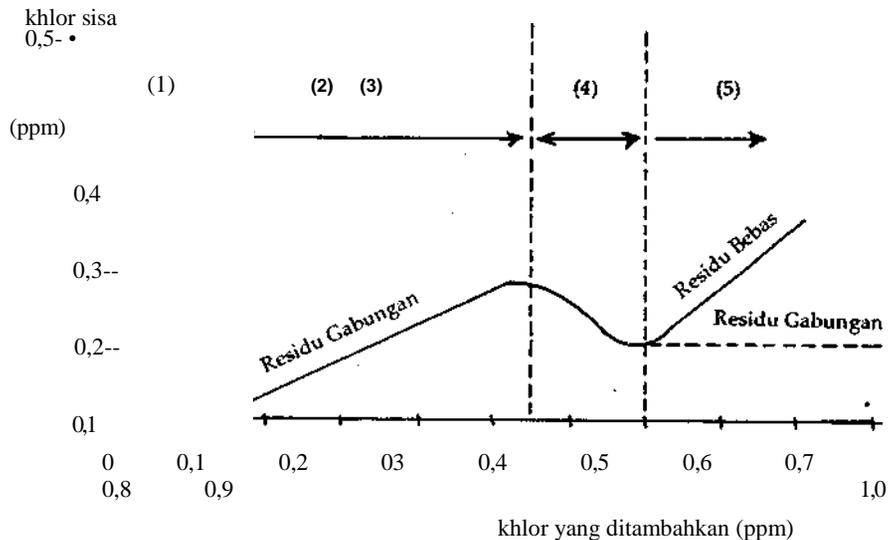


Disosiasi sukar terjadi bila  $\text{pH} \leq 6$ .

Khlor dengan amonia bereaksi membentuk khloramina (mono/di/tri):



Khlor (hipokhlorit) juga bereaksi dengan zat organik, protein dan sebagainya. Khlor dalam air yang bergabung dengan senyawaan nitrogen disebut khlor-terikat (*combined*).



Pada khlorinasi, terjadi urutan tahapan reaksi:

- (1). Penguraian khlor oleh reduktor, belum nampak ada residu khlor, tiada daya sucihamanya.
- (2). Terbentuk kompleks organik, daya sucihama kecil.
- (3). Terjadi reaksi dengan amonia/senyawaan bemitrogen, membentuk khloroamina.
- (4). Penguraian khloroamina /khloroorganik.
- (5). Terbentuk khlor bebas dan kompleks khloroorganik sesudah breakpoint (titik terendah penurunan residu karena reaksi tahap 4).

Berbagai alat khlorinator dapat dibuat untuk meneteskan/me-ngalirkan khlor ke dalam air, katakan sejumlah ppm (bagian Hap juta) saja.

Asal dicamkan: untuk umpan sistem membran, air yang dikhlorinasi dapat merusak, maka perlu dihilangkan lagi sisa khlornya. Perlu ada modifikasi bila teknik tradisional hendak diijodohkan dengan cara iptek mutakhir.

Modifikasi desinfeksi non-khlor juga dapat dilakukan, tetapi juga tetap harus cermat simakan dan analisis paramaterynya.

Hal-hal rinci perihal lakuan tradisional teknologi penjemihan/pembersihan (bukan pemurnian) air dapat ditanyakan ke PDAM setempat. Bab-bab berikut ini menyajikan uraian sekaitan membran saja. Teknik baru lain, namun bukan membran, misalnya oksidasi, ultraviolet, ozonisasi, dan lain-lain, tidak terialu penting dan penad disinggung pada buku ini.

Gambar 6: *KlorResidu dan klorinasi breakpoint*

## **Bab III I**

---

# **" MISTERI PROSES MEMBRAN**

Manusia berilmu karena meniru alam. Juga dalam hal membran. Membran alamiah di tubuh kita saja banyak dan vital, seperti membran sekeliling inti sel, organel dalam sel, juga syaraf, dan lain-lain. Yang paling jelas ialah kulit yang sedemikian luas itu. Kulit manusia sekitar 2 meter persegi, beratnya 2 kilogram. Fungsinya mengatur suhu badan dengan pendinginan penguapan, tempat sintesis katalitik vitamin D, pelindung terhadap infeksi, dan lain-lain, sifat permeabilitas kulit juga amat piawai. Kulit berstruktur kompleks; ada kelenjar peluh, folikel rambut, saluran lemak, dan lain-lain; berlapis-lapis lokanya.

Kulit mudah terkena gangguan dari luar. Keelakaan, terbakar bukanlah hal yang mustahil. Dapatkah manusia membuat gantinya? Upaya membuat selimut pelindung yang biokompatibel dan bersifat serupa sudah lama digencarkan. Ada yang memprosesnya dari kolagen, di antaranya disusun ulang Prof. Terumo (Jepang). Juga grup Massachusetts (kolagen/turunan kondroitin), Dow Corning (poliglikolat) Unitaka (Jepang/khirin) dan lain-lain. Belum satu pun yang sungguh memuaskan. Itulah kulit yang hebat, membran asli alam kita. Belum lagi membran di usus, ginjal, paru-paru, mata dan sebagainya. Membran sungguh merupakan misteri yang menantang!

Semua bangsa terpicat iptek membran sintetis, yang dimulai di Kroa, dan sejak 1950-an dijayakan lagi di Amerika. Rekan-rekan pakar Australia juga gencar menghidupkan iptek membran sejak 17 tahun lalu. Dan corah! Grup penulis dan grup di ITB merintisnya di Indonesia, sejak dasawarsa lalu, dan akan terus selalu di situ.

## MEMBRAN DAN AIR BERMUTU

Prof. Ernie del Rosario (Filipina) membudidayakan membran untuk mengolah kelapa dan ikan. Dr. Suwandi (Malaysia), juga sejawat-se-jawat ASEAN lain, semua turut berkiprah menerapkan iptek membran ke bidang yang diminati: pangan, kedokteran, dan lain-lain. Untuk pemrosesan, pembersihan, pemurnian air pun, membran tak kurang ri&faat-nya. Ejawantahnya dalam berbagai teknik dan hampiran: filtrasi mikro, osmosis balik, ultrafiltrasi, dialisis-listrik, deionisasi/demineralisasi kon-tinyu, desalinasi dan banyak lagi. Lakukan atas limbah pabrik dan rumah-tangga, penyediaan air minum, air murni, air ultramurni, semua dilakukan dengan membran bila hendak mutakhir piawai.

Teknologi membran makin canggih, efisien, efektif, selektif. Biaya kapital, operasi dan pemeliharaan sistem terus makin ditekan, murah, kompetitif dibanding cara-cara tradisional-konvensional yang setara.

## PUN^AKTEKNQLQGt

Prestasi dan gebyar iptek membran masa kini tidak lepas dari peluh, darah, dan airmata penelitinya, yang terlibat, baik di perguruan tinggi, lembaga riset sampai industri.

Osmosis balik diawali tahun 1748 saat fisikawan Prancis (Nollet) menemukan gejala osmosis pada membran kantung kemih babi, yang dilanjutkan oleh kimiawan Jerman (Tzambe) pada 1867 dengan serentetan percobaan atas membran sintetis. Baru tahun 1950-an grup Reid-Breton (U. Florida) dan Loeb-Sourirajan (UCLA) menemukan cara pembuatan membran CA asimetrik yang efisien-efektif. Sejak 1970-an perkembangan membran pesat sekali. Bahan-bahan dengan sifat baru' modul-modul yang piawai kinerja dan keawetannya, peningkatan kontrol mutu dengan bantuan komputer, modul dan sistem makin besar bertekanan kecil dan seterusnya. Sampai sekarang litbang terus gencar di berbagai negara dan harus diikuti cermat dan tekun bila tak hendak kehnggalan (lihat lampiran). Perkembangan RO bersaing ketat dengan ED dan UF.

Nanofiltrasi adalah modifikasi membran RO untuk lakukan air PTT rendah, pertama kali oleh Basic Technology (1976). Ia tak sekedar jngr ngurangi kesadahan, tetapi juga menghilangkan bakteri. dan virus. JjaIt lean zat organik berwarna sampai h^rnt-arhnn terj^hloririasi (pencemar ganas). Tahun 1977, UOP-FS (California) membuat membran CDA

- khusus (disebut ROGA 8150) dengan recorong bagus. Membran RO dihidrolisis in-situ dengan lakukan kaustik terkontrol

Elektrodialisis (ED) dengan membran selektif ion dan berkompar-temen banyak dirintis oleh Meyer dan Strauss (1940). Dilanjutkan oleh Ionics (19~48), penemuan membran transfer ion, yang mendasari ED klasik dan mulai komersial pada tahun 1954. Teknik EDR (reversal/balikan) berrmila sejak awal dasawarsa 1970-an.

Ultrafiltrasi (UF) dengan berbagai ukuran pori mulai dikem-bangkan pada tahun 1930-an. Alan Michaels (MIT) mencetak membran UF dari campuran polianion dan polikation serta polisulfon. Pori membran baru itu lebih besar daripada RO, dapat mpisahkan protein mikroba kecil dan ^oloidjrrMyuajitan dan satu sama Jain lewat p^nisaJTanjnakromojeKu. Tahun 1962 Michaels mendirikan perusahaan khusus membuat UF.

- Proses-proses membran memang beraneka jenis.

Osmosis balik^RO) merupakan grjoses yang didorong tekanan. mpnahan semua ion, mglepaskan/ meloloskan air^ Pemompaan ber- \tekanan melebihi tekanan osmosis larutan garam terhadap membran semipermeabel. Proses yang lebih tepat disebut pkioosmosis'ira juga grakr tis untuk menghilangkan zat organik. Kontaminan,yang lain pun, s^rnisaj b,alcteji^pirQgen dan koloid, tertahan oleh struktur pori yang berfungsi sebagai penyaring (sieve) molekul BM nominal 200. Kinerja Cartridge RO aktual ditentukan oleh variabel semisal konstruksi membran, konsentrasi kontaminan dalam umpan, tekanan, suhu dan p umpan. Yang tidak ter-difasi melintasi membran disebut aliran rejeksi dan dipergunakan untuk mencuci padatan yang menempel pada permukaan membran. Yield (hasil) sistem ialah jumlah air yang melewati membran dibandingkan dengan jumlah yang dipompa. Sistem poles akhir dapat mempunyai laju recovery sampai 90% sedangkan sistem ubahan air laut hanya dapat 3-10%.

Elektrodialisis (ED) ialah projses.dengan ion-ion berpindah melewati

arus searah (DC). Aliran air menyusuri membran (tangensial) sedangkan aliran ionnya tegak lurus membran (menembus). Elektrodialisis balikan (EDR/reversal) ialah ED dengan kutub-kutub elektrodanya dibalik secara mendaur, berulang dalam jangka waktu tertentu, sehingga membalikkan arah gerak ionnya pada stack membran.

Ultrafiltrasi (UF) juga merupakan proses bertekanan untuk memisahkan (atau memekatkan) larutan yang mengandung koloid dan bahan berberat molekul tinggi. UF menahan zat tak-ionik tetapi meloloskan zat ionik tergantung BM batas (*cut off*) membrannya. Cut off membran itu spesifik membran yang menggambarkan rejeksi terlarut tertentu atau menentukan spesi yang tertahan bila BM-nya lebih besar daripadanya. Batas BM itu tidak tajam sekali tetapi tergantung pula pada ukuran, bentuk dan muatan partikel. Penyaring (*sieve*) molekul terlarut demikian sanggup menghilangkan z<sup>+</sup> yang lebih kecil daripada filter membran mikropori biasa.

Ultrafilter merupakan membran permeabel liat, tipis, selektif. Koloid, mikroba dan pirogen terutama dihilangkan, sedangkan kon-taminasi logam. Berbagai jenis batas eksklusi (tolakan) ukuran dapat diperoleh. UF, acap kali dipakai sebagai bagian sistem air terpusat dan pemolesan akhir setempat. UF meningkatkan kinerja sistem RO dan bed resin DI (Deionisasi, lihat Bab 7) dengan drastis mengurangi zat penyebab fouling dalam air.

AIR GARAM PEKAT	SALINITAS	300.000
AIR LAUT		30.000
<u>AIR PA.YAIL</u>		3.000
<u>AIR DAPAT MINUM</u>		300
<u>AIR PROSES INDUSTRI</u>		30
AIRPEIPNISASI		3
<u>AIR ULTRAMURNI INDUSTRI PROSES »)</u>		0,3
<u>AIR ULTRAMURNI INDUSTRI F.I.FXTRONIK A</u>		0,03

Ket. \*) = umpan boiler tekanan tinggi.

Gambar 7: Spektrum salinitas air (dalam mg/L atau ppm).

Nanofiltrasi (NF) atau pelunakan membran merupakan teknologi muda. *Nano* berarti sepermiliar, menunjuk ukuran porinya. Nanofilter ialah membran bertekanan sangat rendah, hanya melewatkan partikel di bawah 1 nanometer ( $10^{-3}$  mikron), berciri membran UF dan RO.

Membran NF bekerja pada julat cut off. BM lebih tinggi daripada RO klasik dan merejeksi kuat ion-ion dwivalen (kalsium/magnesium), sedangkan rejeksi ion ekavalen jauh lebih lambat.

Mikrofiltrasi merupakan pemisahan partikel berukuran mikron atau submikron, dijelaskan lebih lanjut pada sub-bab berikut.

Dialisis memanfaatkan beda konsentrasi ion pada tiap sisi membran untuk mencampakkan ion tertentu. Dialisis menahan ke-banyakan bahan terlarut tetapi meloloskan terlarut-mikro (BM kecil) dan air. Dialisis terutama digunakan dalam bidang kedokteran.

Membran transport-tergabung (CTM), yang saat ini belum mudah diperoleh secara komersial, memisahkan satu jenis ion atau molekul terlarut dari yang lain lewat adanya suatu pembawa kimia yang tertaut dalam membran. Membran begini sangat cerah untuk industri pengambilan logam, maupun limbah ganas berlogam dan sebagainya.

Walaupun deionisasi (resin) tidak termasuk teknologi membran (padahal juga berbasis polimer), namun juga dibahas di Bab 7. Hal itu karena akhir-akhir ini temuan kreatif-inovatif manusia telah menghadirkan teknologi deionisasi-kontinyu, yang serupa namun tak sama dengan ED.

## MIKROFILTRASI

Bentuknya lazim berupa cartridge, gunanya untuk menghilangkan partikel dari air bersih (telah diberi prakalangan) yang berukuran 0,04 sampai 100 mikron, asalkan kandungan PTT (padatan total terlarut) tidak melebihi 100 ppm. Air minum/PAM dapat dialirkan melalunya agar lebih bersih. Media jiton<sup>®</sup> sudah telah tersur<sup>®</sup> alibuntu). Filtrasi cartridge merupakan filtrasi mutlak. Ar<sup>®</sup>-tir<sup>®</sup> Tr<sup>®</sup> nk<sup>®</sup> ptda Taka<sup>®</sup> tertahan. Terkadang cartridge yang berbentuk silinder itu dapat dibersihkan. Cartridge tersebut diletakkan di dalam wadah tertentu (disebut rumah, *housing*). Bahan cartridge beraneka. katun, wool, rayon, selulosa, fiberglass, PP, akrilik, mlon, asbes, ester-ester selulosa, juga polimer hidrokarbon terfluorasi.

Jenis-jenis cartridge dikelompokkan:

- (1). Cartridge lilitan,
- (2). Cartridge rajut-lekatan-terjurai, • •
- (3). Cartridge lembar-berpori (kertas saring khusus, media nirpintal, membran, berkarbon dan sebagainya).

Cartridge lilitan memakai benang yang disikat sehingga serat-seratnya berjurai, lalu dililitkan pada inti logam berlubang-lubang. Pola pelilitan, tegangan, panjang serat, ciri serat dan jumlahnya menentukan kemampuan penghilangan kotoran. Tipe lilitan dapat memfilter sampai 10 mikron, tetapi seratnya sendiri terkadang lepas (migrasi media). Padatan yang tersaring juga dapat lepas lagi apabila operasi dihentikan dan diawali lagi.

Cartridge rajut-lekat-jurai, berbentuk matriks kontinyu sekitar inti, terkadang rapat seratnya berjenjang dari bagian luar (pinggir) ke dalam (tengah). Ini memperpanjang umur filter dan partikel terjebak sesuai ukurannya di tempat-tempat tertentu. Jenis cartridge demikian ada yang absolut, yakni filterprofil. Filtrasi dalam dicapai dengan mengatur rapat-nya. Filter begini terkadang terlalu rendah rapatannya atau terlalu mampat bagian dalamnya (sehingga lekas buntu). Filter profil baru mengubah-ubah diameter serat dan ukuran porinya. Pori tetap yang di bagian dalam membuat filtrasi sempurna, sampai 0,5 - 90 mikron.

Cartridge berlembaran berpori ada beberapa tipe. Pertama, kertas saring berlipat (wiru), sampai 5-30 mikron. Biasa untuk filtrasi minuman (gin, whiskey, air minum, industri minuman), air pendingin industri, kolam renang. Kedua, media tak dipintal (poliester, polipropilena, dan sebagainya) dengan daya saring 1 sampai 40 mikron, untuk kolam renang modern dan lain-lain.

Ketiga, cartridge membran, biasanya di bawah 2 mikron. Bahannya ester selulosa, nilon, polisulfon, akrilik, poliviniliden fluorida, dan lain-lain (dapat sampai 0,2 mikron: lihat gambar). Digunakan di pabrik farmasi dan makanan. Cartridge filter membran nilon baru dapat sampai 0,04 mikron kelasnya.

Keempat, cartridge yang berisi karbon aktif. Biasanya untuk menghilangkan rasa, bau serta klor (sisa sucihama).

Wadah filter lazim dari baja karbon, baja stainless, dilapisi plastik tertentu. Pola aliran biasanya dari luar/pinggir ke tengah, agar permukaan penyaringan maksimum.

Sealing dapat dilakukan dengan beberapa cara:

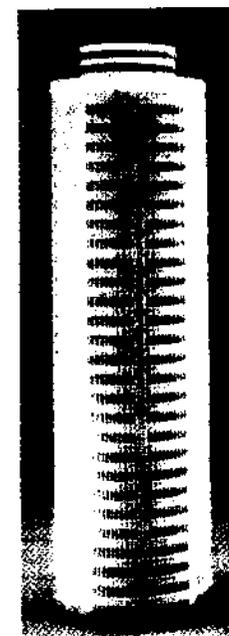
- (a). Seal cincin-O (dari silikon, dan sebagainya) ditempatkan di bagian diameter luar leher cartridge atau pada fitting laki di ujungnya. Seal ini biasanya untuk tipe membran sehingga tetap kencang walau baru disterilisasi uap.

- (b). Seal kompresi (kempa), disertai pegas, biasanya untuk cartridge tipe lilit dan jurai.
- (c). Cartridge dua lubang dipasang pada batang penyangga, diberi gasket, disekrup kencang, tetap terkunci di tempat. Ini biasanya untuk cartridge tipe pori mampat.

Ada pula jenis cartridge khusus, misalnya berbentuk lempeng-lem-peng cakram filter membran, disusun dalam bejana bertekanan, sampai sekitar 20 plat, dengan berbagai kapasitas aliran. Millipore membuat 12 kelompok membran berdasar ukuran porinya.

Memilih filter niscaya mempertimbangkan maksud pemakaian, bahan, kemampuan penyaringan/pemisahan, ukuran luas filter dan sebagainya. Usia filter yang lebih awet dapat diperoleh dengan hampiran desain:

- 1). Filter-dalam, misalnya tipe lilit dan jurai untuk pralakuan. 2). Luas lebih besar, pada filter wiru (lipatan) untuk poles akhir.



Gambar 8: Filter cartridge terdiri atas inti PP, tutup plastik, filter wiru ester selulosa, penguatan poliester, seal cincin-O silikon (millipore). Kemampuan sampai 0,2 mikron.

Dalam hal ini bila harus memilih maka lebih baik memilih yang tipe wiru, karena lebih luwes terhadap kontaminan dan bebas migrasi media serta bocor/lepasnya kotoran.

Tabel 3-1: *Laju  $cd.it$  sebagai fungsi luas filter, dan aneka bidang pemakaian.*

Penerapan	Laju (fluks)
Air pendingin industri Air pencuci farmasi Airpencuci semikonduktor Airumpan boiler	0,3-0,81/(menit.m <sup>3</sup> ) 0,15 - 0,22 0,15-0,22 0,15-0,45

Dalam memilih dan memasang filter, lebih baik kapasitas filternya yang terlalu besar, agar awet. Juga perlu diperhmbangkan soal bebas korosi, tahan khlor, usia serta jaminan layanan perusahaannya (yang membuat/menjual).

Filter cartridge dioperasikan mula-mula dengan tekanan 0,1 bar dan maksimal 3 bar. Bila selisih (drop) tekanan mencapai 2 bar, berarti sekitar 90% kemampuan filter telah digunakan. Filter 50 sampai 100 mikron mampu menahan berat kotoran sampai 50 gram. Bila lebih maka berarti membuka peluang ada yang lolos.

Filter cartridge digunakan pada air yang telah diberi pralakuan. Beberapa contohnya:

- 1). penghilangan khlor dari air, dilewatkan karbon aktif, filter 5-25 mikron.
- 2). Besi dan mangan dapat mengendap, juga produk korosi pipa, maka perlu difilter.
- 3). Kolam renang, filternya 25-50 mikron.
- 4). Air unruk minuman berkarbonat, agar bening dan kandungan karbon dioksida awet setelah dibuka tutupnya. Bila ada padatan terlarut maka begitu dibuka akan *ngejoss*. Oleh sebab itu perlu difilter baik-baik.
- 5). Sebagai pendukung sistem pemurnian air canggih (lihat bab-bab berikut).

Tabel 3-2:

**PANCAGATRA SISTEM PEMURNIAN AIR  
LAYANAN JASA (IPTEK MEMBRAN) BASIS POLIMER**

- **ANALISIS SASARAN**  
Analisis mutakhir atas kontaminan dan ciri air baku.  
Teropong kotoran penting sekaitan terapan dan standar khas.
  - Uji-uji lapangan piawai sesuai spek industri konsisten.
  - Laporan dan evaluasi rinci menyeluruh.
- **DESAIN DAN REKAYASA**  
Proposal dan proyeksi biaya kapital/operasi.  
Rekomendasi desain sistem handal, efisien, efektif.
  - Keunggulan kompetitif sistem dan biaya terhadap pesaing.
- **KONSTRUKSI DAN REKESI/INSTALASI**  
Pembuatan dan penyiapan piranti prarakitan.  
Ereksi plant di lapangan.  
Start uap dan trial production.
- **OPERASI DAN ANALISIS MUTU**  
Pelatihan operator dan penunjangnya.  
Optimasi proses-produk, pralakuan, pascalakuan.  
Trouble shooting expertise dan analisis mutu.  
Support chemicals.
- **PEMELIHARAAN DAN PERBAIKAN**  
Pemeliharaan, pembersihan permeator.  
Perbaikan, penggantian modul dan kontrol.  
Upgrading dan upscaling kapasitas sistem.  
Antisipasi kebutuhan baru pada saatnya.

### Bab IV

# OSMOSIS BALIK DAN DESALINASI

Osmosis balik atau *reverse osmosis* (RO), yang akhir-akhir ini makin terkenal bagi lakuan air, dilaksanakan dengan memberikan tekanan (lebih tinggi daripada tekanan osmosis) atas larutan, sehingga air murni mengalir melintasi membran semipermiabel ke sisi yang encer. Ini merupakan proses fisis yang memisahkan zat terlarut dari pelarutnya. Membran hanya dilalui pelarut, sedangkan terlarutnya, baik elektrolit maupun organik, akan ditolak (rejeksi).

Teknologinya, air baku dimasukkan ke piranti bejana yang berisi membran semi permeabel. Hanya air, disebut permeat, melintasi membran, sedangkan kotoran direjeksi ke konsentrat (pekatan). RO dioperasikan secara kontinyu.

Osmosis balik (RO) dapat mengurangi PPT<sub>jur</sub> baku sampai 99%. lazimnya rejeksi 95% japat dicapai. Rejeksi bakteri, virus dan pirogen oleh membran dapat 100%, kecuali ada bocoran pada seal mekanisnya atau membran rusak. Air laut FIT 50.000 ppm pun, setelah pralakuan memadai, dapat diubah menghasilkan air yang dapat diminum. Air berkotoran organik maupun mineral dapat diolah dengan RO.

Osmosis balik memurnikan air FIT di atas 200 ppm. Bagi penggunaan air dengan prasyarat murni biologis (bebas organisme),

misalnya di bidang farmasi, kedokteran dan elektronika, RO dapat mengganti kedudukan distilasi, dengan biaya jauh lebih murah dan lebih cepat operasinya. RO merupakan cara paling murah untuk menawarkan air laut, termasuk di kapal, rig-rig pengeboran minyak lepas pantai, hotel dan villa di pesisir indah permai. Energi bagi RO praktis hanya energi untuk pemompaan, tak ada perubahan fasa. Biaya operasi hanya untuk bahan kimia dan proses pralakuan.

#### POLIMER, RIWAYAT MUDULU <^

RO masa kini dipakai untuk bergudang pemanfaatan, dari penawaran air laut, pembuatan air ultramurni untuk industri obat, biotek dan elektronika, untuk mengambil kandungan berharga limbah pabrik, membuat pekatan juice buah, air proses industri sampai air boiler dan ratusan lainnya. Osmosis balik adalah kaisar pemurnian era iptek. RO membanjiri dunia.

Tiada kemajuan yang gratis. Sukses osmosis balik berbuah dari perjalanan panjang, dari semangat ingin tahu di laboratorium ke produk dan terapan komersial.

Kisahanya berawal pada pertengahan Abad 18, dua abad lalu: Abbe Nollet, cedekia yang mempelajari difusi lewat membran binatang. Seratus tahun kemudian ahli biologi Jerman, Moritz Traube, melakukan kajian serupa, menggunakan membran sintesis. Kemudian tahun 1870 Pfeffer membuat pengukuran kuantitatif pertama atas gejala osmosis. Membran-nya dibuat dengan mengendapkan ferrosianida pada batu. Data yang diperoleh amat menakjubkan untuk ukuran alat sederhananya. Berbagai larutan organik (karbohidrat dan protein) dan elektrolit. Teori menyeluruh tentang larutan encer dan sifat-sifatnya dikembangkan oleh ilmuwan Belanda, Van't Hoff, pemenang Nobel kimia pertama. Setelah itu perkembangannya datar. Kalangan termodinamika terus menyimak hakikat tekanan/gejala osmosis. Para pakar lalu hanyut ke pesona penelitian bidang-bidang lain.

Sementara itu selama dan sesudah Perang Dunia II, kimia polimer maju pesat. Pengukuran tekanan osmosis merupakan sarana penyidikan polimer-polimer baru. Orang pun kembali ingat untuk membuat membran sintesis semipermeabel yang menjanjikan ledakan sukses komersial. Sejak itulah, di dasawarsa 1950-an, lajptaran dorongan iptek polimer^di berbagai laboratorium kelas wahid, dilakukan riset-riset serius atas berbagai proses membran: osmosis balik, ultrafiltrasi, elektrodialisis, peng-

uraian air, peningkatan reaksi oleh enzima diemban membran, pemisahan gas sampai pervaporasi. Semua kajian mendasar itulah pangkal-tolak segala sukses empirik berikutnya.

Osmosis balik mulai bergerak ke terapan praktis diawali E.J. Breton/C.E. Reid (1958) yang memperlihatkan rejeksi garam dan fluks membran CA (Selulosa Asetat) dengan tekanan umpan cukup tinggi. Hal itu didorong lagi oleh penemuan pembuatan unit proses membran piawai. S. Loeb/S. Sourirajan (1960) membuat membran CA asimetrik dengan fluks tinggi. Pada membran berstruktur pori terbuka selaku pe-ngemban dilapiskan kulit tipis membran rapat di satu sisinya. Hebat hasilnya, yaitu rejeksi garam besar, fluks baik, stabil. Amat praktis. Awal 1960-an dibuat membran film datar dengan konsep modul plat dan kerangka (UCLA). Tahun 1964 ditemukan teknik dan piranti bentuk tabung.

Pabrik percobaan pertama dibuat UCLA tahun 1965. Minat atas iptek membran meluas. Dari kalangan ilmuwan (kimia/fisika) ke para in-sinyur/teknisi dan wiraswastawan.

Teknik dan piranti baru, lilit spiral, dikembangkan oleh Gulf GA dan Du Pont (1966-1967). Kemudian Du Pont juga merintis HFF (*hollow fine fiber*). Dipakai membran Aramid.

Pabrik RO komersial pertama tahun 1968 di San Diego oleh Havens Industries, sistemnya tabung/pipa, pompa tekanan tinggi dan segenap instrumentasi penunjangnya.

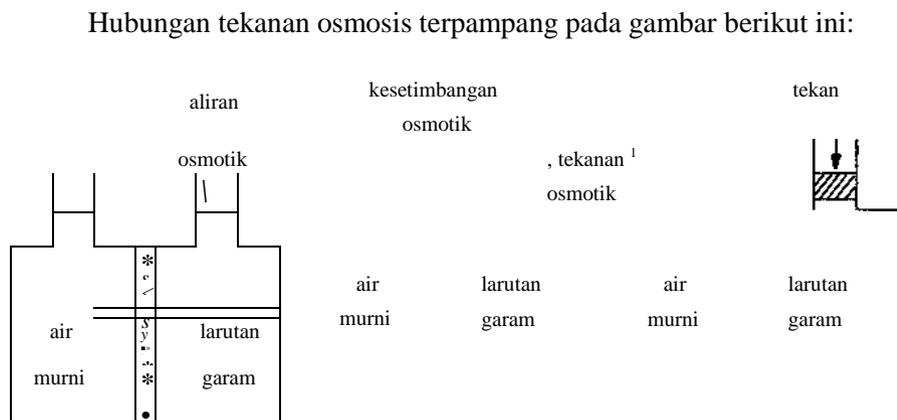
Sejak itu berkembang perusahaan-perusahaan membran seperti DDS, Dow, Filmtec, Millipore, Nitto, Osmonics, Toray, Toyobo, UOP dan sebagainya. Pustaka dan jurnal ilmiah meningkat pesat. Kegiatan ilmiah dan industri berlipat ganda.

#### KONSEP DASAR

Besarnya tekanan osmosis larutan:

$$\pi = (1,12 (t + 273) \text{ Imi})$$

dengan  $n$  tekanan osmosis (psi),  $t$  suhu ( $^{\circ}\text{C}$ ) dan  $2$  mi jumlah molalitas segenap kandungan ionik/nonionik di larutan. Tekanan osmosis meningkat sesuai konsentrasi. Dalam hal air alam (dalam natrium khlorida), setiap kenaikan mg/liter (ppm) akan meningkatkan tekanan osmosis sekitar 0,01 psi (0,07 kPa).



Gambar 9: Teori Osmosis Balik

Sebenarnya istilah osmosis balik atau *reverse osmosis* merupakan salah kaprah, karena pemberian tekanan untuk mengimbangi tekanan osmosis tersebut hanya mengakibatkan aliran pelarut (air tersebut), bukan zat terlarutnya. Istilah yang tepat ialah *piezoosmosis*.

Analisis teoritis osmosis balik biasanya diungkapkan secara termodinamika proses tak-reversibel tetapi gaya dorong persamaan fluksnya (beda potensial, dan lain-lain) dinyatakan dalam termodinamika keadaan setimbang. Lihat lampiran di bagian belakang buku ini. Juga harus diterapkan termodinamika setimbang sekaitan kesetimbangan lokalnya. Atas rejeksi garam pada sistem membran akibat jentangan tekanan, ada setidaknya tiga pola uraian:

- (a). U. Mertens dkk (MIT), cf. lampiran juga (1966)
- (b). R.J. Raridon, L. Dresser, K.A. Krauss (1966) (c).
- K.S. Spiegler dan O. Kedem (1966).

Bila disederhanakan, persamaannya menjadi:

$$F_w = P_w - (A_p - A) \quad (7C)$$

dengan  $F_w$  fluksi air,  $P_w$  koefisien permeabilitas membran bagi air,  $A$  luas membran,  $t$  tebal membran.

Begitupun untuk garam, namun alirannya difusif, dan itu sebanding dengan beda konsentrasi melintasi membran. Jadi menambah

tekanan akan mempercepat aliran air tetapi aliran garamnya tetap dan mutu produknya meningkat. Kesebandingan dengan luas membran, dan terbalik terhadap tebal, menunjukkan pentingnya bagi desain dan konstruksi membran yang efektif. Sebaliknya, fluks air merosot bila salinitas umpan bertambah, karena tekanan osmosisnya lebih besar.

Berbagai mekanisme aliran proses osmosis balik telah diajukan orang. Dari Sourirajan, Gregor/Gregor, Lonsdale, Krazen/Eisenmann, Kanizarwa, dan lain-lain. Sampai sekarang masih terus dinamis diskusi perihal mekanisme khas aneka proses itu. Model-model terus diperinci, dan belum ada yang final memuaskan. Para sejawat Amerika, Eropa, dan Jepang, semua memeras otak dan tenaga. Teoretisi Indonesia, kapan?

Persentasi rejeksi garam menentukan mutu produk.

$$\text{Rejeksi garam} = 100 - \frac{C_{\text{umpan}} - C_{\text{produk}}}{C_{\text{umpan}}} \times 100$$

Laju rejeksi ialah nisbah konsentrasi terlarut dalam umpan terhadap konsentrasi terlarut dalam produk. Rejeksi terlarut besarnya terganung membran, recovery, konsentrasi umpan, valensi ion-ion dalam terlarut (yang kecil lebih tak direjeksi) dan banyak lagi.

Biasanya makin besar laju recovery, makin banyak air produk dari umpan tertentu. Faktornya antara lain mutu air dan persentase kejenuhan foulan membran kritisnya (misalnya kalsium sulfat, strontium sulfat, barium sulfat) pada konsentrasinya.

Banyaknya air umpan untuk laju air produk tertentu (disebut kapasitas pabrik nominal) serta recoverynya diperoleh dari:

$$\text{Jumlah air diperlukan} = \frac{\text{kapasitas pabrik nominal}}{\text{persentase recovery}}$$

Catatan: Contoh persoalan (latihan).

- 1). Air umpan ke sistem RO mengandung 2500 ppm FIT. Air produk berkonsentrasi PTT 85 mg/liter. Berapa persen rejeksi garam? Berapa lewatan garam?

- 2). Mutu air sumber sistem RO memprasyaratkan pengaliran umpan 800 m<sup>3</sup>/hari untuk memperoleh 600 m<sup>3</sup>/hari produk. Berapa laju recovery?
- 3). Sistem RO air payau bekerja pada laju recovery 70%. Agar terhasil 2000 m<sup>3</sup>/hari, berapa keperluan air sumbernya?

Bila membrannya berporositas lebih kecil, makin banyak zat/kotoran organik dalam air yang dapat dihilangkan. Batas lewatan itu disebut MWC atau *Molecular Weight Cut-off* (batas berat molekul). Zat yang BM-nya di atas MWC akan tercampak, tak dapat melewati (per-measi) membran. Begitu pula sehubungan bahan kimia sintesis organik atau SOC (*Synthetic Organic Chemicals*) yang merupakan pencemar ber-bahaya akibat industri yang ada di air alam, terlebih-lebih air permukaan. Kantor Lingkungan Hidup AS memprasyaratkan udak ada SOC dalam air minum. Itulah sebabnya teknologi membran lazim menetapkan MWC 100. Artinya SOC yang BM-nya di atas 100 tidak ikut masuk ke air minum. Makin lama batas MWC mi cenderung diperkecil.

### MEMBRAN OSMOSIS BALIK

Membran RO dibuat dari berbagai bahan seperti CA, CDA, CTA, PA (poliamida), poliamida aromatis, polieteramida, polieteramina, polieterurea, polifenilene oksida, polifenilen bibenzimidazol, dan sebagai-nya. Membran komposit film tipis terbuat dari berbagai bahan polimer untuk substratnya ditambah polimer lapisan fungsional di atasnya. Pemilihan polimernya, baik komopolimer, kopolimer, polimer-blok, polimer-graft, modifikasi, blend dan sebagainya, sangat banyak (ribuan) jenisnya, dan itu pun masih harus dilihat pula cara pembuatan, distribusi berat molekul, pralakuan bahan dan lain-lain yang mempengaruhi sifat akhir produk membrannya. Dalam kajian penulis di Australia, para sejawat litbang membran di sana tampak jeli mengubah sifat membran, bahkan dengan lakuan surfaktan, walau bahan dasarnya sederhana. Hasilnya tampak efektif. Kita di Indonesia perlu lebih inovatif.

Dulu C.E. Reid (Florida), lalu Loeb/Sourirajan (1962) membuat membran CA asimetrik, terus diikuti kalangan Du Pont dengan kriteria membran RO-nya:

Rejeksigaram baik, fluks (aliran) air baik.

Tipis namun kuat (struktur asimetrik).

Fabrikasi bernisbah luas/volum besar (HFF, film tipis).

Ranah operasi luas: kandungan ion air, tekanan, suhu. Awetberoperasi.

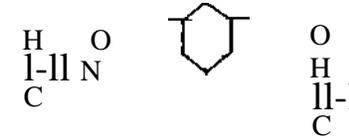
Tahan serangan kimia dan biologis.

Luwes untuk aneka kebutuhan dan kondisi.

Semurah mungkin.

Jenis-jenis polimer permeator yang dikenal dikelompokkan menjadi berbagai macam, seperti polimer sintesis, organik, tertaut-nitrogen, aromatik, linier, polimer kondensasi termasuk polihidrida aromatik, poliamida aromatik. Jumlah dan jenis gugusnya (meta/para), kedudukan gugus ionik dan lain-lain "dimainkan" untuk meraut sifat akhir.

i6r



atau

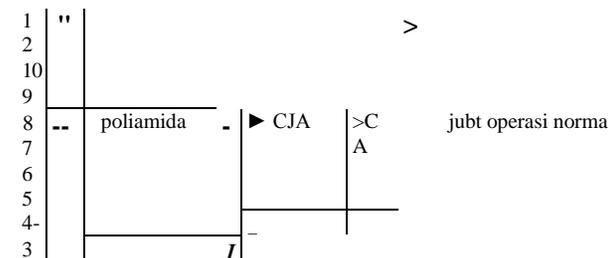
atau



R ionik

Gambar 10: Struktur molekul poliamida aromatik.

Kimia membran CA makin banyak asetilnya, makin besar rejeksi garam dan lebih rendah fluks airnya. Membran selulosis lebih murah dan tahan khlor (kurang 1 ppm) tetapi mudah terserang biologis, terhidrolisis, atau CA menjadi selulosa dan asam asetat karena air, apalagi bila pektim (tinggi/rendah), dan airnya agak panas. Maka perlu pralakuan asam atas airnya.



2  
1-

**Gambar 11:** Julat operasi  $p^{*d}$  (maks/min) aneka membran.

Hal serupa juga untuk menerangkan daerah kerja membran PA, TFC, dan sebagainya. Persoalan ketahanan biologis/kimia merupakan hal utama.

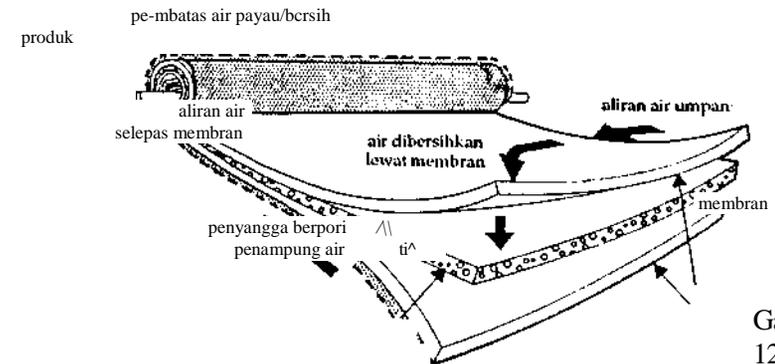
Membran mengalami perubahan karena memampat dan *fouling* (sumbat). Pemampatan atau *fluks-merosot* itu serupa dengan "perayapan" plastik/logam bila terkena beban tegangan kompresi. Makin besar tekanan dan suhu, biasanya tak reversibel pada satu tahun pertama, makin mampatlah membrannya. Normalnya, membran bekerja pada julat 21 sampai 35°C (di atas itu fluks meningkat drastis).

Fouling membran itu diakibatkan oleh zat-zat dalam air baku, misalnya kerak, pengendapan koloid, silt, oksida logam, organik, silika dan sebagainya. Agar tak lekas fouling, perlu pralakuan air. Operasi piranti membran mengandaikan operator yang piawai. Membran yang mengalami fouling ditandai oleh merosotnya produktivitas, peningkatan Ap modulnya, atau lolosnya garam. Semua itu perlu analisis dan pember-sihan secara berkala dan jitu. Pemasangan membran harus diikuti perawatan/pemeliharaan yang setimpal, agar membran produktif serta awet. Kandungan oksidator dan khlor dalam air baku juga terus dikontrol.

Ada empat konfigurasi membran, yaitu lilit spiral (SW), serat ber-lekuk (HFF), tabung/pipa serta plat-kerangka. Yang kini lazim untuk lakuan air minum ialah SW dan HFF. Mengenai pembuatan dan mor-fologi membrannya secara rinci dapat disimak di berbagai jurnal ilmiah. Berbagai kiat diperlukan untuk menghasilkan membran film asimetrik, serat berlekuk asimetrik, membran graft, sampai yang komposit dan yang dinamis. Dari segi kemampuan (luas/volume), urutannya:

modulplat	_____	Ca 165 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	3
modulpipa	_____	335 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	
modul lilit spiral	_____	1000 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	
modul HFF	_____	16500 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	

Membran lilit spiral (SW) terdiri atas dua lembasan membran yang terpisah oleh penyangga berpori yang direkatkan pada ketiga sisinya (membentuk sampul), sedangkan sisi keempat ditautkan dengan perekat ke pipa plastik berlekuk yang mengumpulkan air produknya. Beberapa amplop direkatkan, dikumparkan/lilitkan pada pipa, membentuk spiral. Banyak modul spiral dihubungkan secara seri dalam tabung ber-fiberglass.

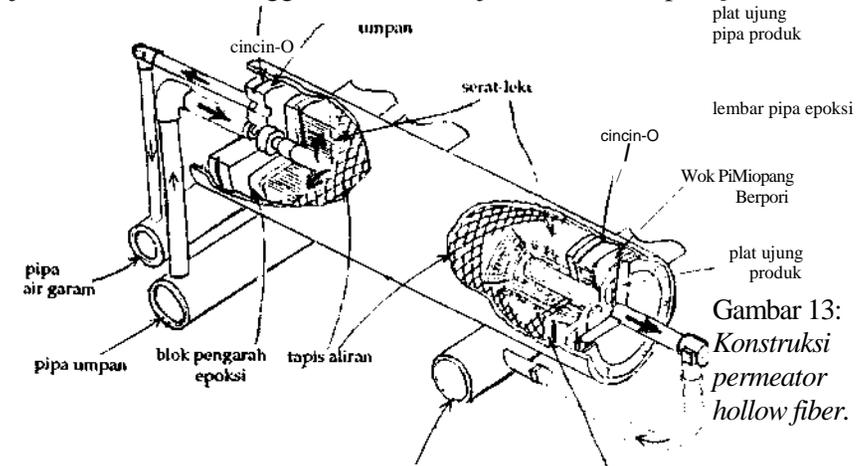


Cartridge Osmosis Balik Lilit-Spiral.

Gambar 12:

Perintis teknologi ini ialah ROGA/UOP, OWRT, dan sebagainya. Modul begini penerapannya terutama pada desalinasi (penawaran) air payau dan air laut, dijadikan air industri dan air minum.

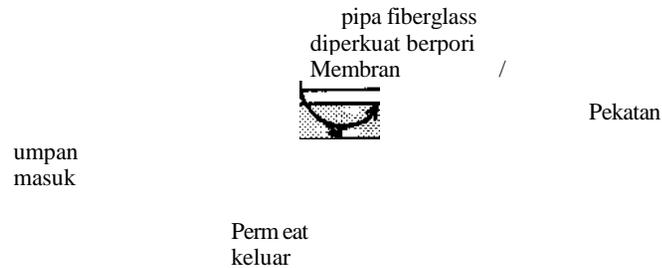
Modul serat berlekuk (HFF) merupakan bundel mampat ribuan serat tipis menyejajar mengitari inti distribusi air umpan. Tiap serabut serat diletakkan dalam bentuk U dan ujung-ujungnya dibungkus wadah pipa resin epoksi. Lalu bundel dibungkus kain dan kasa, diletakkan dalam bejana tahan tekanan tinggi terbuat dari baja stainless terlapis epoksi.



Gambar 13:  
Konstruksi permeator hollow fiber.

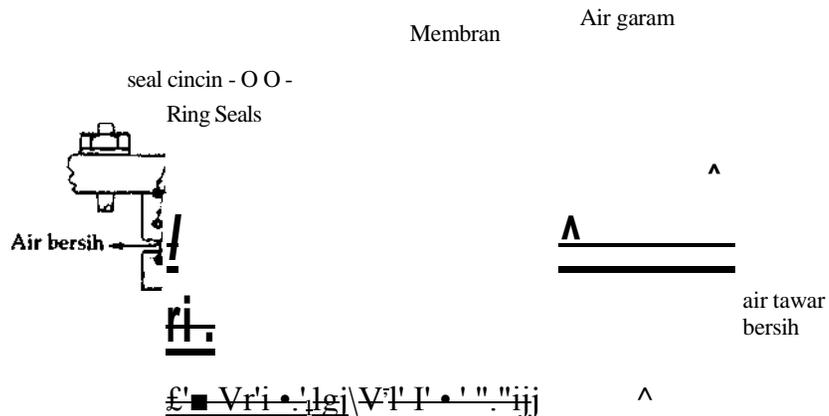
Serat berlekuk tersebut setipis rambut, dapat dari poliamida aromatik (Du Pont), selulosa asetat (Dow) dan sebagainya. Untuk penawaran air laut, yang bertekanan besar, dindingnya lebih tebal. Satu permeator tunggal hanya merupakan komponen kecil dari keseluruhan modul lengkap.

Membran bentuk pipa (tubular) ialah membran yang dipasang di bagian dalam pipa. Air umpan masuk di bagian dalam. Membran begini tidak ekonomis bagi pengolahan air minum, tetapi banyak digunakan dalam industri, terutama untuk lakuan limbah, pengambilan bahan kimia berharga dari aliran proses, pemekatan whey keju dan sebagainya. Walau relatif mahal, tetapi sifat kurang fouling dan mudah dicuci amat menarik. Perusahaan yang membuatnya adalah, misalnya, PCI (Portals Group). Lihat lampiran *State of the Art* (belakang) Inggris.



Gambar 14: Konfigurasi membran tabular.

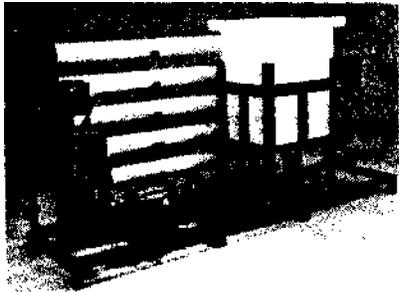
Membran plat berkerangka berstruktur Sandwich antarplat bentuk persegi atau bulat. Modulnya serupa filter press. Walau jarang untuk pemurnian air, tetapi membran begini memiliki beberapa keunggulan: luwes pilihan dan cara operasinya, tak terlalu peka terhadap kondisi larutan umpan, tak terlalu tergantung pada ekonomi proses terhadap usia (awet).



.,]'' ■ • ' i ' ' t ' ' -I r4 plat berpori ~J

## DESAIN TEKNOLOGI

Pengelompokan sistem RO terlihat pada tabel berikut dan bagan alir umum sistemnya tampak pada gambar berikutnya.

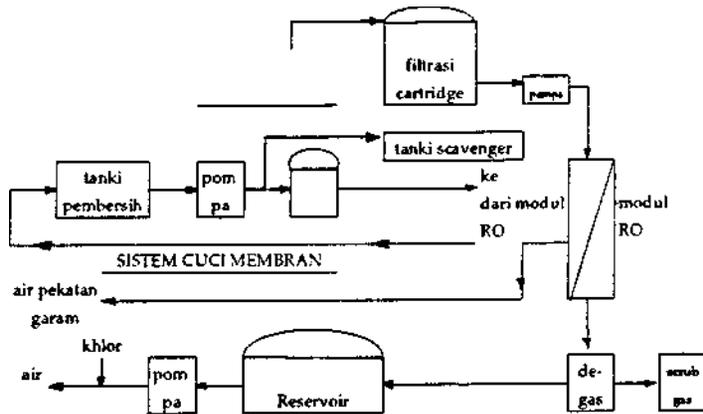


Gambar 16: Modul RO tipe paket standar kecil.

Tabel 4-1: Pengelompokan sistem osmosis balik umum.

Sistem	Tekanan transmbran (psi)	Tekanan transmbran (kPa)	Salinitas PTT (mg/L)	Laju recovery (%)
Air laut	800-1500	5000-10000	10000-50000	15-15

Gambar 15: Osmosis Balik Plate and Frame



Tekanan standar	400-650	3000-4500	3500-10000	50-85
Tekanan rendah	200-300	1000-2000	500-3500	50-85
Nenofiltrasi	45-150	310-1000	sampai 500	75-90

anti  
asam kerak

/ Sumber J  
V^\_~

PRALAKUAN

bersih

PASCA LAKUAN

Gambar 17: Bagan Alir Osmosis Balik Umum.

Perihal pasokan air umpannya, yang paling disukai ialah air tanah karena punya sifat kimia yang stabil. Adanya korosi dan produk yang dapat mengakibatkan fouling, maka bahan baja stainless, PVC dan fiberglass dipakai pada sistem pasokannya. Pompa harus kedap udara.

Kecermatan cuplikan dan analisis mutu air amat vital, minimal ketiganya terpisah satu sama lain. Parameter-parameter kritis desain sistem membran harus diuji cermat.

Tabel 4-2: *Data Minimum Mutu Air Untuk Desain Sistem RO*

Kalsium	karbondioksida
Magnesium	Bikarbonat
Kalium	sulfat
Mangan	Khlorida
Natrium	Fluorida
Besi	Nitrat
Barium	Amonia
Strontium	Fosfat
Hidroksida	Silika (larut)
$p^H$	Silika (taklarut)
Konduktans jenis	Hidogen Sulfida
Suhu	SDI (angka rapatan silt)
Residukhlor	Padatan tersuspensi
Warna	Turbiditas/kekeruhan (NTU)
PTT (Padatan Total Terlarut)	Kesadahan total (sebagai CaCO <sub>3</sub> )
Bakteriologis/cacah plat heterotrof	Alkalinitas total (sebagai CaCO <sub>3</sub> )

Air permukaan menuntut simakan lebih cermat karena variasi akibat musim, masukan dari limbah kota, industri dan sebagainya. Pemantauan mutu harus terus-menerus. Kontaminasi banyak. Perpipaian, pompa, wadah tampungan, semua tak boleh terkena korosi.

Pralakuan air harus disesuaikan dengan membran RO yang dipakai. PA harus diklorina'si. CA harus diatur  $p^H$  agar tak terhidrolisis. Membran juga jangan terkena fouling. Penyumbatan ini merupakan keterkaitan aneka gejala, maka cukup rumit mekanismenya, baik biologis, kimia maupun fisik.

Fouling menyangkut terperangkap/terjebakanya bahan-bahan ter-tentu dalam piranti RO atau di permukaan membrannya. Setidaknya ada lima persoalan potensial sekaitan fouling:

Kerak pada membran.  
Pengendapan oksida logam.  
Piranti buntu/macet.  
Fouling koloid.  
Pertumbuhan biologis dalam alat.

u > 1

si

waktu

aliran normal, tanpa fouling, pralakuan baik . aliran nyata, pralakuan terbatas, pencucian berkala aliran nyata, kurang pralakuan dan pembersihan

Gambar 18. *Produktivitas Permeator Seiring Waktu.*

Dari gambar tampak betapa fluks yang normalnya berbentuk logaritmik dalam kenyataan sangat dipengaruhi oleh mutu pralakuan dan keteraturan pencucian (*flushing*).

Membran berkerak karena pengendapan garam terlarut dalam air umpan. Karena konsentrasi umpan cukup pekat, batas kelarutan dapat terlampaui. Bila laju alir rejeksi tidak di atas minimum, jelas dapat terjadi kelebihan kepekatan di bagian tertentu alatnya. Kerak berupa kalsium karbonat atau sulfat, juga dapat silika, stronsium /barium sulfat atau kalsium flourida.

Untuk mengontrol agar tak terjadi kerak, dilakukan pralakuan (lampiran desain): kontrol ubahan agar kelarutan tak terlampaui, peng-hilangan ion pembentuk kerak, atau mencegah pertumbuhan kristal zat keraknya.

Bila ubahannya besar, cara pelunakan kesadahan (ion) air umpan merupakan hampiran yang baik. Kalsium dihilangkan dengan penukar ion daur natrium.

Pelunakan dapat mahal dan limbahnya tak dikehendaki sehingga pengerakan kalsium dicegah dengan penambahan asam tertentu, kar-bonat diubah menjadi bikarbonat atau karbon dioksida. Karbon dioksida melintasi membran dengan mudah, dan pasca lakuan dapat dihilangkan (*degassing*) baik dengan penukaran ion poles maupun pembesaran p .

Penambahan asam tadi (sekaitan dengan kesadahan karbonat) bagi air payau sampai angka jenuhan Langlier negatif pada pekatannya atau angka Stiff-Davis negatif pada pekatan air laut. Pengontrol p secara tepat sangat diperlukan. Bila terjadi penyimpangan, kenaikan  $p^H$ , segera peralatan terhenti agar membran tidak rusak/berkerak. Penambahan kimia tadi dilakukan sebelum prafiliter cartridge dilengkapi mixer khusus. Berhentinya peralatan tak boleh lama, harus segera diikuti *flush* (bilasan) otomatis, disertai sedikit biosida. Seperti mesin mobil mesti dipanasi tiap hari, membran juga perlu dioperasikan (walau dalam masa istirahat) setidaknya setengah jam tiap harinya.

Pengendapan sulfat lebih sukar dikontrol daripada karbonat. Batas kelarutannya harus dihitung. Dulu zat kimia SHMP merupakan sekuestran pencegah pengendapan sulfat, sampai dua kali lipat batas jenuh pada pekatan. Barium dan stronsium lebih tak larut lagi. Bahan pengontrol jangan sampai terhidrolisis dalam air. Jadi harus selalu baru. Kini dikenal berbagai zat antikerak dan polimer tertentu pengganti SHMP. Antikerak dimasukkan ke umpan, angka jenuhan langlier dapat mencapai + 1,9. Ini mengurangi asam, berlaku bagi membran PA dengan rejeksi baik pada p netral. Membran CA tetap memerlukan penambahan asam. Zat sekuestran hanya khas cocok untuk air umpan tertentu, maka perlu percobaan sebelum diterapkan bagi sistem tertentu.

Pengendapan karbonat dan sulfat dapat berlangsung serentak (kopresipitasi). Jadi keduanya perlu diperhitungkan. Berdasarkan analisis ion, p dan suhu air umpan, dapat dipilih dan laksanakan pralakuan mencegah pengendapan. Bila kerak disebabkan oleh kegagalan alat, hal itu harus terpantau sedini mungkin, sehingga dengan cara kimia tertentu kerusakan membran dan modul dapat dihindari. Pencudan membran tidak boleh sembarangan, nafnun layak dilandasi pemahaman yang ma-tang kimianya, dan tidak boleh terlambat dilakukan.

Pengendapan oksida logam. Spesi-spesi terlarut dalam umpan dapat teroksidasi, membentuk endapan, menyumbat permeator. Besi dan mangan, terutama besi, menunjukkan gejala paling parah. Fouling akibat ion ferro menjadi ferri dan hidrosidanya mengendap. Penanggulangan-

nya adalah dengan penghilangan besi dari pasokan umpan atau pen-cegahan oksidasi tersebut.

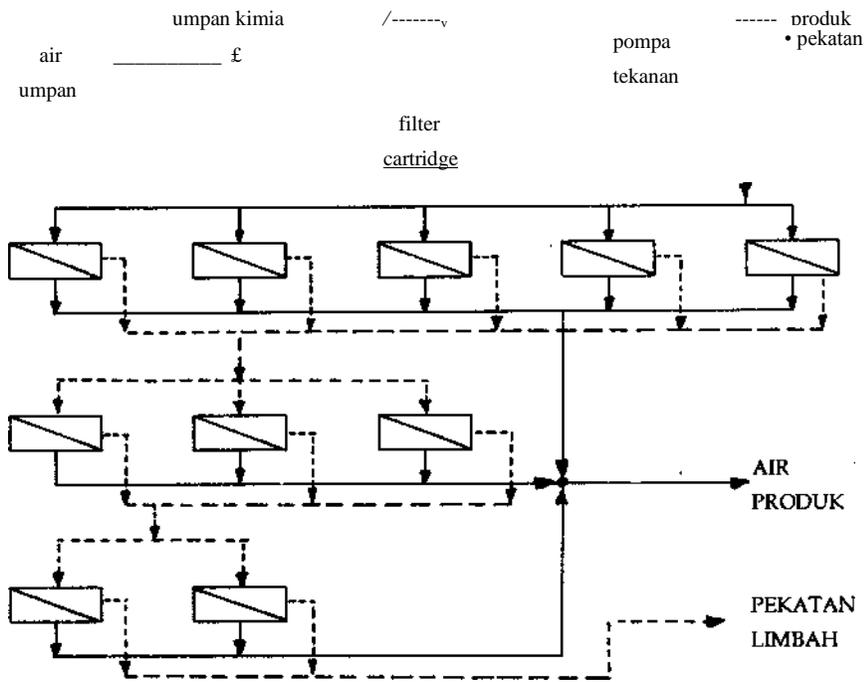
Air tanah biasanya banyak mengandung unsur besi. Penghilangan-nya dilakukan dengan filtrasi. Dapat juga dengan penukar ion, asalkan dijaga agar tak teroksidasi sehingga malah membuat fouling pada resin-nya sendiri. Analisis besi total, oksigen terlarut dan p diperlukan untuk memilih dan mendesain sistemnya dari kaca mata kimia dan teknis. Besi sampai 4 ppm tak menjadi masalah sejauh oksigen yang terlarut masih di bawah 0,1 ppm. Bila ada oksigen, katakan 5 ppm, besinya harus di bawah 0,05 ppm. Penurunan p menjaga agar oksidasi tak berlangsung, tetapi tak sanggup mengembalikan yang sudah terlanjur teroksidasi kembali ke ferro. Permeator pun dapat secara teratur dibersihkan dari fouling besi dengan menggunakan campuran khusus zat-zat kimia, yang juga efektif bagi oksida-oksida logam lainnya. Pralakuan memang sangat penting demi efektif dan amannya fungsi sistem membran. Teknologi membran tidaklah sesederhana teknik filtrasi yang kini banyak ditawarkan dalam bentuk modul cartridge itu.

Penyumbatan (buntu/macet). Pada prafiltrasi, lolosnya partikel-partikel besar sangat fatal akibatnya bagi sistem RO di belakangnya, apalagi yang HFF jenisnya. Ukuran partikel tak boleh melebihi seperlima saluran minimum. Bila prafilturnya berukuran 5 mikron, sudah cukup aman. Bila pengoperasiannya baik maka bencana penyumbatan partikel jarang dijumpai. Walau demikian, tetap perlu waspada. Filter cartridge perlu diganti bila drop tekanan sudah 15 psi (103 kPa) atau lebih. Perawatan pralakuan filter perlu dilakukan dengan baik. Yang lebih lazim, fouling akibat zat lebih kecil, yaitu koloid.

Fouling koloid disebabkan oleh koagulasi koloid, sehingga ter-jebak pada membran RO. Koloid dalam air itu dapat kelompok aluminium silikat (Clay/lempung), juga koloid besi dari korosi pada pipa dan pompa, filter dan sebagainya. Aluminium hidroksida juga dapat ada bila semula diberi lakuan tawas (alum), padahal mestinya aluminium sulfat (juga polimer anionik) tak boleh digunakan. Ion aluminium lebih daripada 0,1 ppm sudah amat berbahaya bagi sistem RO. Semua koloid tersebut berukuran 0,3 sampai 10 mikron. Koloid-koloid itu tersuspensi karena muatan dan tebal lapisan rangkap listriknnya. Selama proses RO, saat konsentrasi meningkat (konsentrat), lapis rangkap merosot, terjadi koagulasi dan fouling. Parameter pencatunya ialah konsentrasi serta stabilitas koloid.



hatikan kesesuaian parameternya. Air umpan yang dipompa lewat membran terpisah menjadi air murni (permeat) dan yang direjek-si/pekatan (konsentrat). Nisbah antara permeat dan konsentrat (dalam %) disebut konversi (ubahan), yang ada tabel khususnya dari tiap pem-buat membran. Konversi dapat antara 10 sampai 90%. Mutu permeat (produk akhir) dinyatakan dalam PTT (padatan total terlarut), ion ppm atau mg/L. Dayahantar dapat untuk menyidik mutu produknya. Laju alir permeat dinyatakan dalam m<sup>3</sup>/jam, liter/menit, galon/hari dan sebagainya.



Gambar 19: Contoh sistem trilahap 5-3-2

Kinerja, dalam hal ini fluks membran diungkapkan dalam aliran air bagi luas membran tertentu dengan kondisi standar. Fluks untuk membandingkan kapasitas membran polimer yang berbeda, tetapi tidak dapat untuk membandingkan kapasitas modul alat keseluruhan satu sama lain. Rejeksi garam dinyatakan dalam % garam yang tertahan membran, sedangkan lewatan/lolosan garam ialah % garam dalam permeat atau air produknya.

Dalam mendesain sistem RO, kapasitas harus disesuaikan dengan kondisi kerjanya. Bagi permeator HFF (serat berlekuk):

$$F_{wa} = P_{wa} (A_p - 7C)$$

dengan  $F_{wa}$  aliran air awal lewat membran,  $P_{wa}$  koefisien permeabilitas air awal  $A_p$  tekanan umpan dikurangi produk (rata-rata),  $A_{ft}$  beda tekanan osmosis. Besarnya  $A_p$ :

$$A_p = P_{ga} - P_p$$

dengan  $P_{ga}$  tekanan umpan garam awal dan  $P_p$  tekanan produk. Tekanan umpan garam rata-rata:

$$P_{ga} = \frac{P_u + P_{or}}{2} + \frac{F_{wa}}{2} \frac{A_p}{K^a}$$

dengan  $P_{ga}$  = tekanan garam umpan rata-rata (bar),  $P_u$  tekanan umpan  $P_{or}$  = tekanan (rejeksi) garam (bar), sedangkan  $\frac{A_p}{2}$  separoh drop tekanan bundel HFF (bar).

Bila  $F_{wa}$  sama dengan 1 (satu) pada kondisi standar salinitas umpan, tekanan umpan, konversi dan suhu, maka dapat dihitung koefisien permeabilitas membrannya, yang kemudian dapat untuk men-cari faktor koreksi operasi pada kondisi lain (bukan standar).

Jadi jelaslah:

$$F_{wa} = \frac{P_{wa}}{A_p - A_{ft}}$$

Nilai  $F_{wa}$  diambil satu. Sedangkan dengan anggapan permeator air payau bertekanan umpan standar 28 bar dan tekanan atmosfer pada produk, maka  $A_p = 27$  bar. Sementara  $A_{ft}$  diambil 2,9 bar yakni tekanan osmosis konsentrasi umpan garam rata-rata, dengan umpan 1500 ppm NaCl dan 75% recovery. Dianggap tekanan osmosis sisi produknya nol, yang beralasan karena rejeksi garam membran pada kondisi itu lebih daripada 90%.

Konsentrasi garam umpan rata-rata dapat dihitung:

$$C_{gr} = \frac{C_u - C_p}{R}$$

$$C_{gr} = \frac{C_u}{R} - 1 \quad (\text{anggap konsentrasi produk} = 0)$$

dengan  $C_{ga}$  konsentrasi garam umpan rata-rata (mg/L),  $C_u$  konsentrasi umpan (mg/L),  $C_{gr}$  konsentrasi garam atau konsentrat/pekatan (mg/L), sedangkan  $Y$  konversi/recovery/ubahan (sebagai desimal).

Kemudian dapat ditentukan nilai  $P_{wa}$ -nya bagi kondisi standar. Begitu tetapan-tetapan diketahui, dapat dihitung faktor koreksi produktivitasnya (FKP) untuk berbagai konversi dan konsentrasi umpan, menggunakan persamaan:

$$FKP = P_{wa}(A_p - JI_{ga})$$

dengan  $7t_{ga}$  ialah tekanan osmosis pada alur garam umpan.

Selama masa/usia kerjanya, pada permeator, koefisien retensi fluks membran akan berubah dan merupakan fungsi log (gambar di depan). Dalam pemakaian RO, fouling membran acapkali sukar dibedakan daripada pemampatan membran.

Kapasitas permeator juga dipengaruhi oleh suhu umpan. Faktor koreksi suhu (FKS):

$$FKS = \frac{F_w - 25}{F_w - 25} j_{03}(T-25)$$

dengan  $F_w - 25$  aliran air pada 25°C,  $F_{ws}$  aliran pada suhu  $T$ , sedangkan  $T$  itu suhu kerjanya (celcius). Besarnya koreksi sekitar 3% tiap derajat Celcius.

Kebanyakan permeator komersial sesuai untuk lakuan air 200 sam-pai 9000 ppm FTT dan biasanya mempunyai ciri lewatan garam kurang daripada 10%, artinya rejeksi lebih 90% pada keadaan standar. Rejeksi permeator air laut malah lebih besar daripada 98,5%. Modul air laut dapat menggarap FTT antara 9000 sampai 60.000 ppm.

Perihal lewatan garam, produsen membran/permeator biasanya menyertakan faktor koreksi dan bagan interpolasi/ekstrapolasinya. Berbagai rumusan/persamaan faktor koreksi lewatan garam (FKLG) dapat dibaca pada berbagai jurnal membran/polimer mutakhir. Biasanya nilai FKLK menurun bila tekanan umpan meningkat.

Usia ekonomis membran penawar air laut ialah sekitar 5 tahun. Bila lewatan terlarutnya sudah dua kali semula dan aliran produknya di bawah minimum (katakanlah 40%), membran tersebut dikatakan mati. Bila lakuan operasi, perawatan, defouling sampai pralakuan semuanya baik, membran permeator dapat mencapai usia 8 tahun, bahkan lebih lama.

Energi proses osmosis balik sebenarnya praktis untuk pemompaan umpan melalui permeatornya. Pemurnian air laut memerlukan energi lebih besar daripada air payau atau air tanah.

Tabel 4-3: *Konsumsi Energi dan Perhitungan Biaya Osmosis Balik*

$$\begin{aligned} \text{RHP rhrake horse oowert} & - \text{ahnm umpan (gpm) x tekanan (psig) BHP} \\ \text{(brake horse power)} & \quad \quad \quad \text{m}^3 \times \text{efisiensi (P}_{\text{ompa \& motor}}) \\ & = \text{kW}/0,746 \end{aligned}$$

$$\text{kW x 24 jam/hari} = \text{kwh} ; \text{m}^3 \text{pK)duk}$$

$$\begin{aligned} \text{m}^3 \text{ produk/hari} & \text{Rupiah} / \text{kWh x kWh} / \text{m}^3 = \text{Rupiah} \\ & / \text{meter kubik.} \end{aligned}$$

Tentu saja harus ditambah penggantian membran, kimia pralakuan, dan perawatan, selain biaya energi, menjadi biaya total. Desalinasi air laut dengan cara osmosis balik bersaing ketat, bahkan lebih murah daripada distilasi, karena tidak perlu energi pengubahan fasa (cair-uap). Biaya kapital dan biaya operasi permeator membran amat menarik secara ekonomis, apalagi teknologinya makin efisien.

Osmosis balik selain untuk mengubah air alam ke air layak minum, juga dapat untuk menggarap spesifikasi ketat air ultramumi bagi bidang penelitian, industri dan kedokteran. Kebutuhan air bagi umpan boiler, pabrik obat, elektronika sampai rumah sakit makin meningkat muru dan jumlahnya. Produksi air untuk pangan, minuman dan semacamnya juga terus melejit. Dulu kebutuhan itu dipenuhi dengan distilasi (berulang-ulang), resim penukar ion, tetapi kini makin bergeser ke ranah iptek membran yang lebih piawai. Deionisasi resin terasa makin mahal dan tak memadai (repot). Setidaknya, osmosis balik dapat dijadikan pratahap untuk deionisasi total yang cermat.

Jadi dari kacamata ekonomi osmosis balik berciri sebagai berikut:

- (a). Untuk umpan PPT di bawah 400 ppm, osmosis balik merupakan pralakuan murah sekali sebelum deionisasi.
- (b). Untuk umpan PTT di atas 400 ppm, dengan penurunan PTT 10% semula, RO sangat menguntungkan dibandingkan deionisasi.
- (c). Untuk umpan berapapun konsentrasi PTT-nya, disertai kandungan organik lebih daripada 15 g/liter, RO sangat baik untuk pralakuan deionisasi.

- (d). RO lebih sedikit berurusan dengan penanganan dan penyimpanan bahan kimia yang merepotkan operator itu.
- (e). Air injeksi dan sebagainya, sesuai perundang-undangan yang ber-laku, tidak harus dibuat dengan distilasi, melainkan dapat secara osmosis balik mutakhir.

Pendek kata, iptek membran yang pesat berkembang pada dasawarsa terakhir ini sungguh-sungguh merupakan kiat dan strategi masa depan. Dalam hal pemumian air pun RO akan merupakan andalan Abad 21.

**OSMOSIS BALIK SKALA BESAR**

Di seluruh dunia makin banyak plant osmosis balik, yang dapat dikelompokkan menjadi:

- (a). Pemumian air tawar/minum
  - Boiler nuklir dan BBM, sebagai pendingin dan air proses,
  - Industri, sebagai air proses dan pembilas/pencuci,
  - Produksi obat dan elektronika/komputer, sebagai air pencuci dan pengencer.
- (b). Desalinasi (penawaran)
  - Air sumur/tanah yang asin (1000 - 2500 ppm).
  - Air payau (2000 - 9000 ppm).
  - Air laut sampai lebih 50000 ppm.

Pada pemumian air tawar hasil akhinya air ultramurni (< ' [i S/cm), RO selaku pralakuan sebelum penukaran ion/deionisasi mutlak. Pada desalinasi, produk akhinya air minum. Harap diingat, PTT air laut tidak sama. Normal 35000 ppm, di Laut Merah 42000 ppm, di sekitar Semenanjung Arab lebih 50000 ppm. Itu pun tergantung musim dan ada/tidaknya pencemar dari kota, rumah tangga dan industri di sekitar-nya. Tiap sistem itu khas!

Pada skala besar, sistem bertahap dapat diwujudkan dengan pentahapan rejeksi dan/atau pentahapan produk. Desainnya sesuai jenis/kapasitas membran serta kondisi lapangan penanganan air umpan menjadi produk. Berbagai pompa, perpipaan dan kontrol. Beda tekanan pada permeator selain untuk kontrol produktivitas juga memantau bilamana permeator harus dicuci, dirawat atau diganti. Kontrol-kontrol ini otomatis, bahkan dibantu komputer. Penempatan kontrol dan bacaan perlu optimasi.

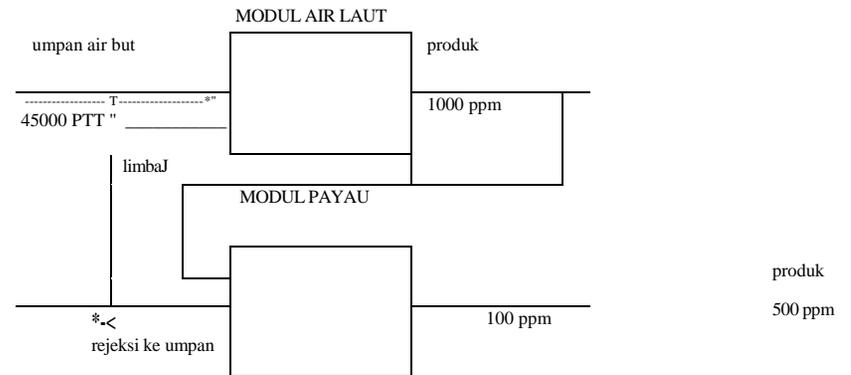
Instrumentasi fail-safe, otomatis berhenti bila ada masalah (*trouble*), misalnya tekanan terlalu tinggi atau rendah, p umpan ekstrim, laju alir umpan tak normal, air keruh, dayahantar umpan terlalu tinggi, aliran produk terlalu besar/kecil, dayahantar produk tak normal, kadar anti kerak meningkat/merosot drastis dan sebagainya. Bila tidak ada kontrol ketat, membran dapat rusak tanpa dapat dibersihkan/diperbaiki lagi.

Sistem RO yang baik dibuat bertipe tumbuh. Artinya, manakala keadaan telah menuntut peningkatan kapasitas, penambahan modul permeator dapat dilaksanakan dengan mudah.

Pentahapan rejeksi perlu mempertimbangkan drop tekanannya, dengan menyertakan perpipaan penyeimbang. *Back-pressure* juga perlu diatur agar tidak merusak membrannya. Pentahapan rejeksi, selain memungkinkan operasi dengan konversi tinggi, juga baik karena tidak semua membran terancam oleh kerak (hanya mengancam permeator paling belakang bila limit kelarutan dilampaui). Pentahapan produk untuk pencapaian mutu mutlak tinggi scmisal untuk hal air elektronik. Sistem begini sebenarnya dua atau lebih subsistem terpisah dan dapat diberi pompa pemberi tekanan ulang.

Pascalakuan *degassing* untuk menghilangkan karbon dioksida dan hidrogen sulfida. Karbon dioksida berkurang, meningkatkan p , maka stabil air produknya. Hidrogen sulfida menyebabkan bau. Agar tidak mencemari lingkungan, perlu memakai scrubber. Kemudian didisinfeksi (sedikit karena air produk tak lagi berorganik).

Pralakuan, misalnya dengan asam, memerlukan unit pompa khusus yang disesuaikan dengan sistem pompa air umpan dan segenap kontrol lainnya.

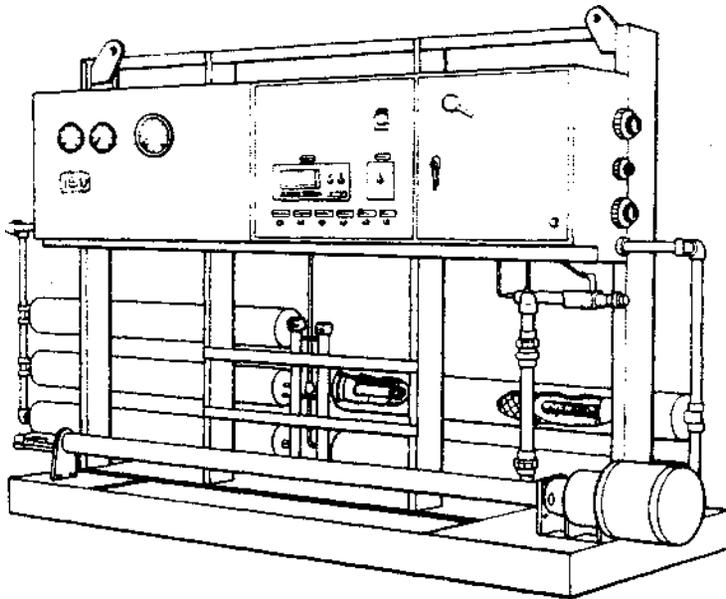


Gambar 20: Desalinasi dengan PTT lebih 35000 ppm (bagan prototipe).

Contoh plant RO raksasa yang berhasil misalnya di Ghar-Lapsi (Malta, 30000 m<sup>3</sup>/hari), Ras Abu Jarjur (Bahrain, oleh Sasakura) dan sebagainya.

Pengiritan energi sistem RO untuk penawaran air laut terus diupayakan. Untuk pembangkitan tekanan tinggi dipakai turbin khusus (Pelton, dan sebagainya), juga pada sistem tekanan rendah dengan pompa baja stainless celup dengan motor arah berlawanan, sistem pompa turbo sistem flushing otomatis, kontrol hidraulik disederhanakan (satu katup tiap train) dan sebagainya.

Sistem pembersihan, peremajaan membran, kondisi sistem, harus sungguh dikuasai oleh operator. Isyarat-isyaratnya antara lain adalah lewatan garam melebihi 15%, drop tekanan modul meningkat lebih 20%, keperluan tekanan umpan bertambah 20%, aliran produk merosot/meningkat 5%, aliran pekatan garam berubah 5%, semua tanda fouling dan terjadi kerak. Fouling kimia/biologis diatasi dengan bantuan zat kimia tertentu.



Gambar 21: Desain membran permeator modul paket.

Menjalankan dan merawat sistem RO harus dengan memeriksa rutin parameter-parameter airnya (kimia/biologis) direkam-printer. Apa-lagi sumber air umpannya air permukaan: harus sempurna pralakuan-nya, pengendapan, filtrasi. Sistem injeksi asam, pompa dan semua meter selalu diperiksa pula.

#### SISTEM PAKET

Bagi berbagai keperluan, misalnya air umpan boiler, pabrik far-masi/biotek, rumah sakit, pabrik elektronika, tersedia berbagai unit paket. Yang untuk keperluan laboratorium riset, ada juga yang lebih kecil. Desainnya, termasuk unit pembersih, diatur sehingga memper-mudah penanganan, perawatan dan penggantian.

Perangkat piranti membran osmosis balik telah banyak dimanfaatkan di dunia. Sistem RO juga dapat untuk menghilangkan air yang mengandung kotoran organik/sintetis. Membran dengan *molecular weight cut off* tertentu diperlukan. Makin kecil MWC, makin tinggi rejeksi or-ganiknya (lazim MWC: 100). Demikian pula kontaminan lain seperti bak-teri, virus, logam berat dan garam-garam lain. Di tengah situasi buruknya air di lingkungan (kota/desa) masa kini, agaknya lebih baik daripada air botolan yang tak bebas kuman penyakit (lihat prawacana), sistem teknologi membran RO dapat melayani kebutuhan kita secara memuaskan.

Osmosis balik adalah teknologi harapan dan piawai bagi kita, sam-pai menjejaki Abad 21 mendatang.

## *Bab V*

# ULTRANISASI DAN NANOFILTRASI

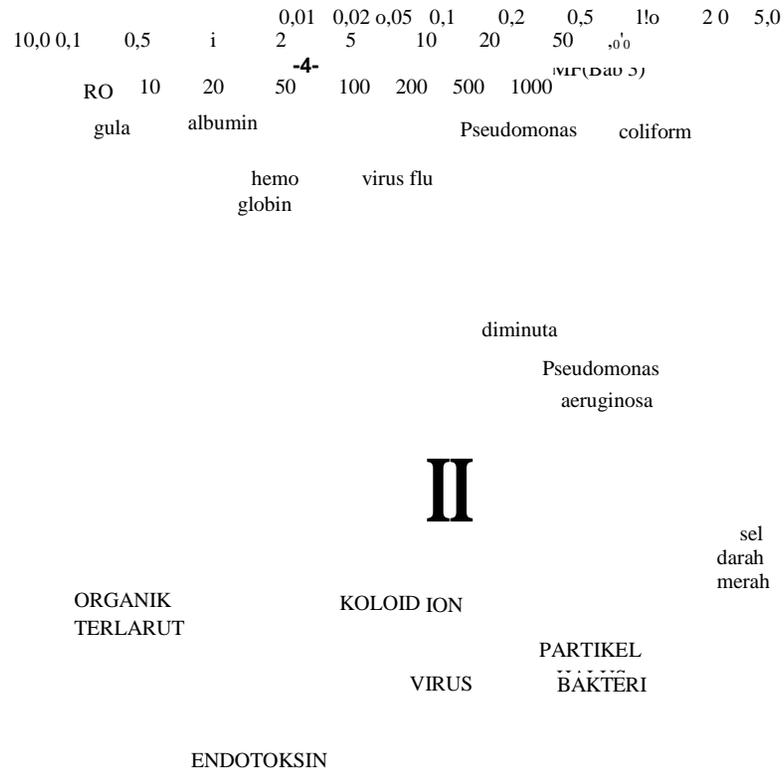
Apa pula *ultrafiltrasi* (UF) itu? Teknik ini tidak lain ialah proses pemisahan (menggunakan) membran untuk menghilangkan berbagai zat terlarut BM (berat molekul) tinggi, aneka koloid, mikroba sampai padatan tersuspensi dari air/cairan. Membran semipermeabel dipakai untuk memisahkan makromolekul dari larutan. Ukuran dan bentuk molekul terlarut merupakan faktor pening retensinya.

Struktur pori membran UF jauh lebih longgar daripada membran RO yang tak memiliki "pori-sejati" namun sekedar rongga-rongga antar serat polimer yang dapat dilewati molekul air yang kecil.

Derajat ejeksi terlarut ditentukan oleh cut-off berat molekul membrannya (MWC) serta BM terlarutnya sendiri (juga ukuran/bentuk).

### CIRI MEMBRAN

Membran UF dibuat dari berbagai bahan polimer dan anor-ganik/mineral berukuran 10-2000 Angstrom.



Gambar 22: Teknologi membran, ukuran pori serta berbagai ranah penerapannya.

Terlihat jelas daerah operasi ketiga proses membran penting itu: osmosis balik (RO), ultrafiltrasi (UF), dan mikrofiltrasi (MF, diuraikan di Bab 3), beserta ukuran-ukuran partikel kontaminan dalam air.

Cut-off BM biasanya antara 1000 sampai 50000 atau 60000. Pemeriksaan memakai dekstran atau PE glikol dengan fraksi BM tertentu. Ada pula membran dengan MWC 500 dan berciri rejeksi garam 35-40% pada saluran dan umpan air (minum) permukaan/tanah. Sebenarnya membran ber-MWC 500 atau kurang bukanlah membran UF, namun membran NANOFILTRASI (NF). Membran UF biasa tidak merejeksi garam terlarut.

Polarisasi konsentrasi menyebabkan gejala terlarut berkumpul pada permukaan membran, membentuk lapisan gel. Lapisan itu makin menebal

sehingga tahanan hidrauliknya mengurangi fluks. Polarisasi konsentrasi ditekan dengan menambah turbulensi (golakan) serta shear (geseran) aliran dekat permukaan, mengurangi tekanan, mengurangi kadar makro terlarut (BM tinggi), mempertinggi suhu, dan memperbesar kelarutan makromolekul tadi.

Lapisan gel makromolekul tersebut serentak membentuk gel-membran dinamis, sehingga cut-off agak merosot dalam praktik.

Dalam teknologi lakuan air, membran UF dengan MWC 1000-20000 lazim untuk poles akhir dan penghilangan pirogen, sedangkan MWC 80000-100000 untuk pemakaian pralakuan serta penghilangan koloid. Terkadang pirogen (BM 10000-20000) dapat dihilangkan oleh membran 80000 karena adanya membran dinamis tadi.

Tekanan sistem UF biasanya rendah, 10-100 psi (70-700 kPa), maka dapat menggunakan pompa sentrifugal biasa. Kebutuhan energinya sesuai desain sistem.

Tabel 5-1: Perbandingan antara RO, UF dan MF (lihat juga uraian Bab 3 tentang MF)

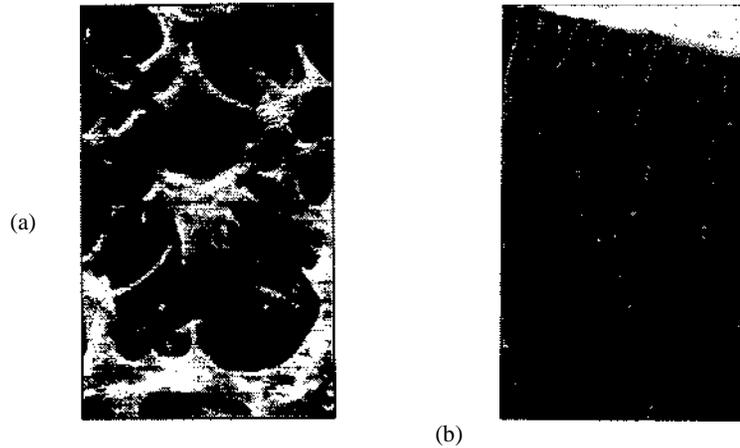
RO	UF	MF
Perlu pralakuan koloid	Beroperasi pada air berkoloid yang sulil.	Cepat fouling oleh koloid (biaya penggantian mahal)
Tekanan tinggi (10-30 bar)	Tekanan rendah (2-6 bar)	Tekanan rendah (2-6 bar)
Energi tinggi	Konsumsi energi rendah	Energi rendah
Recovery rendah (50%-80%)	Recovery sampai 95%	Recovery 100%
Toleransi pH 2-11	Toleransi pH 1-13	Toleransi pH 1-13
Suhu operasi max. 40 C	Suhu sampai 80°C	Suhu tinggi bisa
Tahanan oksidator terbatas	Sangat tahan oksidator	Amat tahan oksidator
Tak dapat sterilisasi uap	Dapat sterilisasi uap	Dapat sterilisasi uap
Desain modul higienis sukar	Desain higienis dapat	Desain higienis mudah

Membran UF sekaitan permumian air dipergunakan untuk meng-hilangkan koloid (penyebab fouling) dan penghilangan mikroba, pirogen dan partikel dengan modul higienis.

Membran UF dibuat dengan mencetak polimer selulosa asetat (CA) sebagai lembaran tipis. Fluks maksimum bila membrannya anisotropik, ada kulit tipis rapat dan pengembangan berpori (lihat gambar). Membran CA mempunyai sifat pemisahan yang bagus namun sayangnya dapat dirusak oleh bakteri dan zat kimia, rentan pH.

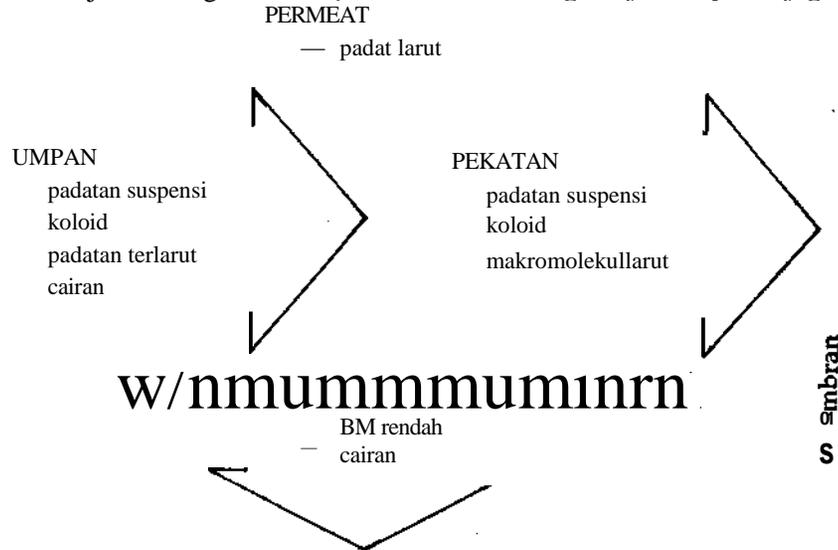
Ada pula membran dari polimer polisulfon, akrilik, juga polikar-bonat, PVC, poliamida, piliviniliden fluorida, kopolimer AN-VC, poliase-tal, poliakrilat, kompleks polielektrolit, PVA ikatsilang. Juga dapat dibuat

membran dari kceramik, aluminium oksida, zirkonium oksida dan sebagainya.



Gambar 23: SEM membran UF anisotrop/asimetrik (a) permukaan, (b) penampang lintang.

Membran UF berciri aliran lintang (*cross flow*) di permukaan membran, jadi tak tegaklurus seperti filtrasi biasa, agar laju alirnya ter-jaga.

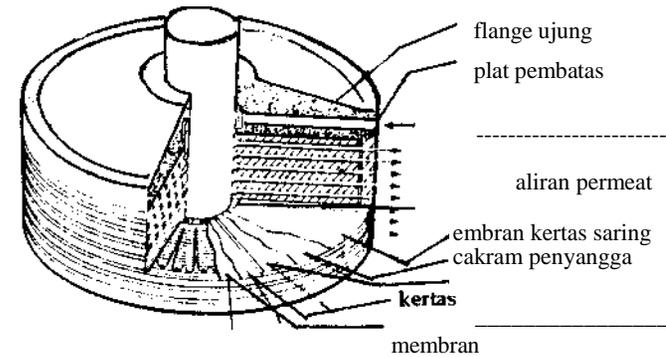


Gambar 24: Bagan Proses Ultrafiltrasi Recovery = (permeat/umpan) x 100%

Konfigurasi/konstruksi membran UF serupa sekali dengan membran RO (Bab 4): tubulator, plat & frame, lilit spiral, serta HFF (serat halus berlekuk).

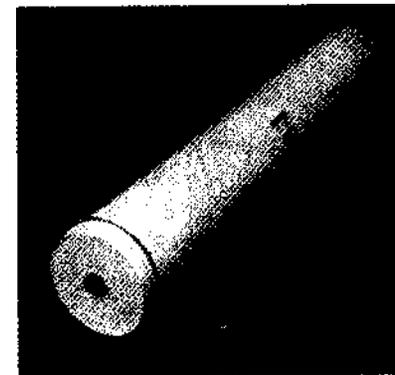
Membran pipa (tubular) lazim untuk terapan dengan fouling berat di industri, tidak untuk air minum publik karena biaya kapitalnya besar, rapat tatanannya rendah, dan keperluan energinya tinggi. Ia dicetak ke pengemban berpori seperti kain tanpa rajutan atau plastik diperkuat gelas.

Membran datar (*plate and frame*) untuk aliran lambat di industri. Mahal, tidak cocok untuk penyediaan air bersih biasa.



Gambar 25: Membran plat aatar berkerangka.

Membran lilit spiral (3W) cocok untuk pemurnian air karena fluks besar dan tekanan rendah. Energi kecil, tidak makan tempat pula. Ukuran standarnya 15 cm, 20 cm diameter bejana.

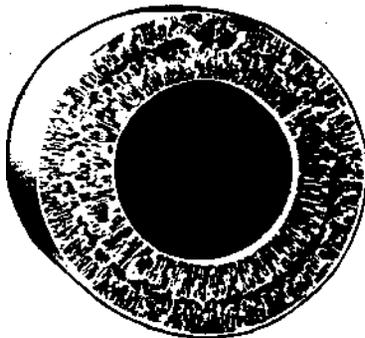


Gambar 26: Cartridge membran UF-SW (lonpure-Millipore).

Cartridgenya dapat disucihamakan dengan khlor, asam perasetat, hidrogen peroksida. Laju fluks bagus,  $p^H$  stabil, mudah dicuci (juga dengan shock khlor), awet. Yang lazim dipakai adalah polisulfon.

Membran HFF (serat berlekuk) untuk UF berbeda daripada yang RO. Pada UF, aliran umpan masuk lewat inn' (tengah) dan keluar lewat dinding. Elemen dan modulnya dewasa ini rata-rata berukuran kecil, tidak seperti RO yang sampai besar-besar (maka jarang untuk pem-rosesan air bersih besar-besaran). Ada pula desain membran yang kulit-nya di kedua sisi. Desain modul HFF amat higienis yang penting untuk produksi air ultramurni (pabrik farmasi).

Dalam memilih sistem membran harus memperhitungkan untung ruginya sekaitan mutu umpan dan produk, biaya, kemudahan operasi dan perawatan, skala kapasitas dan lain-lain.



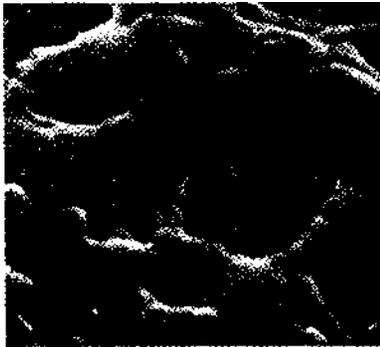
Gambar 27: Fotomikrograf membran HFF (serat berlekuk) jenis lapisan luar-dalam (2 sisi).

STRUKTUR HALUS PERMUKAAN

Penulis beberapa waktu silam, dalam kunjungan ke Memtech, di antara berbagai topik kajian para sahabat, yang disimak Kyu-Jin Kim (Korea - Aussie) tekun bertahun-tahun perihal fouling membran cukup menarik. Akhir-akhir ini, dengan FESEM Hitachi (S-900) dikajinya mikorstruktur membran UF pada permukaannya. Ciri pori permukaan menentukan sifat intrinsik permeasinya. Teknik SEM adalah salah satu di antara teknik penentuan morfologi dan ciri pori lain: titik gelembung, in-trusi raksa, permeabilitas pelarut dan lain-lain. Hanya SEM dapat mem-berikan info rinci bentuk, ukuran dan pola topografis pori.

Tabel 5-2: Membran Pemurniah Air (UF)

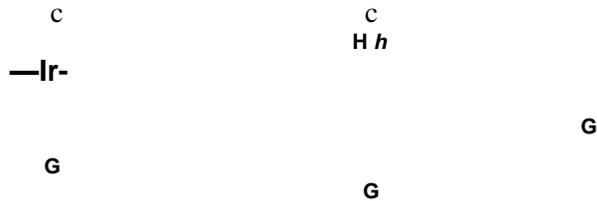
Konstruksi	Keunggulan	Kelemahan
<b>Plate &amp; frame (PF)</b>	Toleran kandungan pada tan <b>tinggi</b>  mudah dicuci Dapat dilepas-lepas Desain higienis	Mahal (biaya kapital)  Mahal (biaya enft-gi) Instalasi besar Tak dapat gelontor balik (back-flush)
<b>Lilit spiral (SW)</b>	Biaya kapital rendah  Biaya energi rendah Peralatan kompak Konstruksi kuat	Tak dapat gelontor balik  Tak mudah dicuci Taksehigienis lipe lain
Pipa polimer (TP)	Toleran kadarpadatan amat tinggi  Mudah dicuci Pembersihan dapat secara loam- ball (gelembungan)	Biaya kapilal mahal  Hiava energi sangat mahal InsUlj.si besar Tak dapat bak flush
<b>Pipa anorganik/mineral (TM)</b>	Dapat back flush  Toleransi kimia amat kuat Operasi suhu amat tinggi Konstruksi kokoh Usia membran awet mudah dicuci Toleransi kandungan padatan tinggi mudah dicuci	Biaya kapital mahal  Biaya ganti membran mahal
<b>1 Serat berlekuk (HFF)</b>	Dapat gelontor balik Biaya kapital murah Biaya energi murah Toleran kandungan koloid linggi Disain higienis Dapat operasi suhu tinggi Peralatan kompak Biaya ganti membran murah	Peka kejutan tekanan



Gambar 28: Pori membran UF (SEM) - Hitachi.

Penampilan dapat relatif seragam, aglomerat nodul, jalinan trimatra, dan lain-lain dengan MWD khas, sesuai parameter preparatifnya.

Hans Coster dan kawan-kawannya mengembangkan teknik baru spektometri impedansi dayapisah atomik (lazim bidang biofisika) untuk penyidikan membran UF (juga MF, NF dan RO) sehingga dapat disingkap mekanisme adsorpsi, fouling, rejeksi dan sebagainya. Impedansi lis-trik membran NF dimodelkan dengan sirkit khas. Lapisan porositas kecil, matriks pengemban dan larutan luar antara permukaan membran dengan bidang berelektroda pengukur potensialnya, dengan elemen-elemen kapasitor dan konduktans.



Gambar 29: Model (BULFIS) membran NF.

KOMPONEN DAN DESADM SISTEM UF V

Komponen sistem dan pola aliran UF sebenarnya mirip dengan RO yang telah dijelaskan pada bab terdahulu.

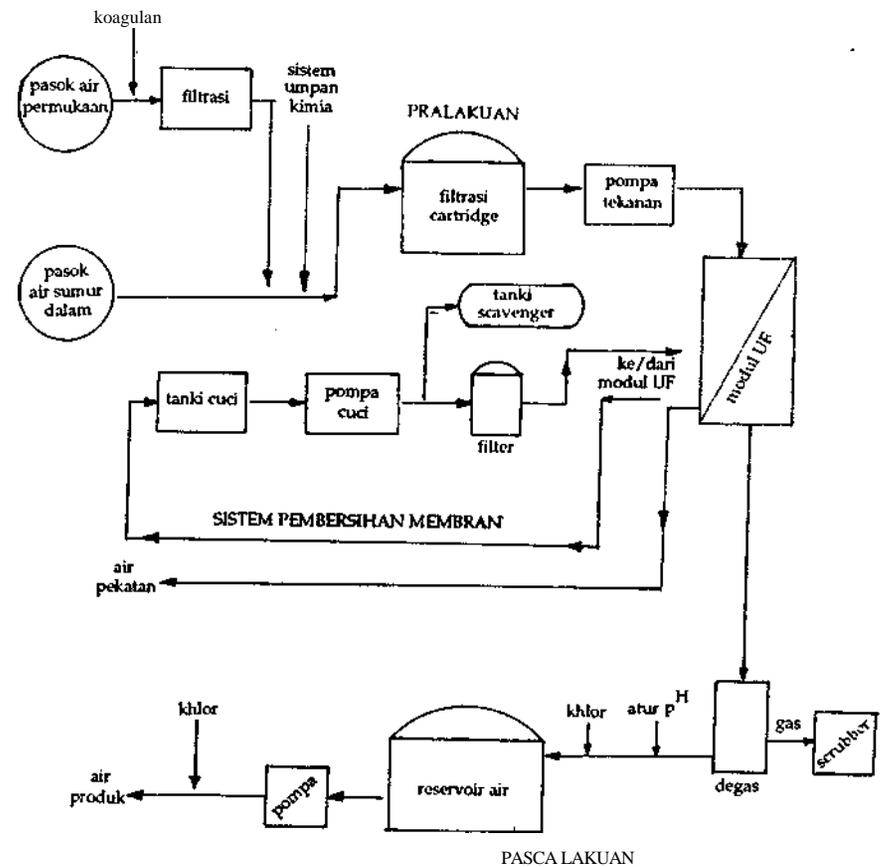
Pralakuan filtrasi cartridge, filtrasi konvensional, asam, antikerak, biosida, mix-statik, dan lain-lain di mana perlu sesuai keadaan. Peralatan pompa UF lebih murah dan mudah daripada RO.

Sistem UF pemurnian air skala besar ditata paralel, modul SW fluks tinggi. Pascalakuan seperti diperlukan. Kontrol sistem meliputi

meter, indikator dan perekam aliran, tekanan, suhu, kekeruhan, dan cacah partikel. Panel pengontrolnya terpusat atau setempat (blok alat). Pola operasi fail-safe serupa RO.

Sistem UF dapat digunakan sebagai:

- a). Pralakuan penghilangan koloid. Bila bebannya berat maka perlu pelindung filter media dan penjebak organik. Ini untuk terapan air minum.
- b). Poles akhir, untuk menghilangkan mikroba, partikel dan pirogen. Tidak perlu flush sebab air sudah bersih. Untuk penggunaan industri (farmasi, elektronik).

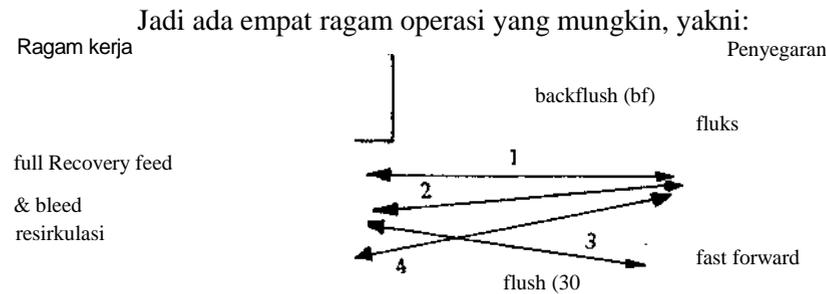


Gambar 30: Bagan sistem UF

Sehubungan dofouling sistem UF, dua proses dikenal:

- (1). Flusing (penggelontoran) dilakukan otomatis, dapat berarah balik atau maju cepat, tanpa zat kimia (tak perlu dicabut lama dari aliran operasinya).
- (2). Pembersihan kimia ditempat (*clean in place/CiP*) berjangka 2-4 jam.

Ini untuk mencegah kerusakan tak reversibel pada fluks membran-nya selain flushing berkala.

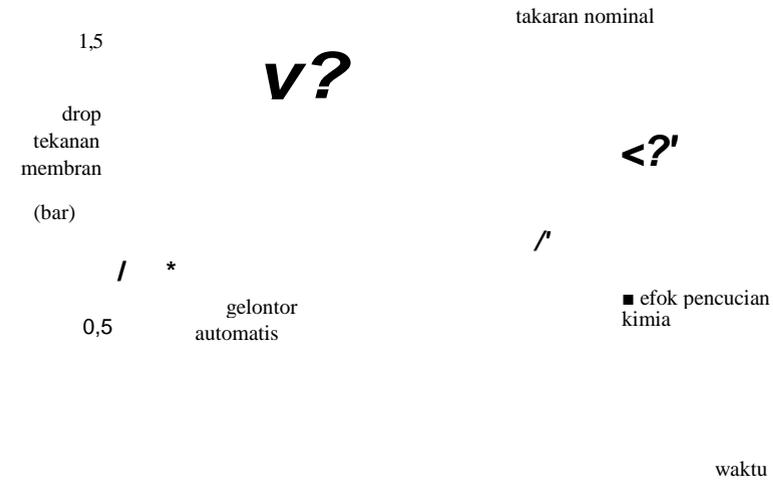


Gambar 31: Ragam Operasi UF Tabel 5-3:

Perbandingan antar ragam operasi UF

Ragam	Keunggulan	Kelemahan
1. Single pass	Desain sederhana Penyegaran fluks baik Energi rendah Recovery tinggi	Perlu peralatan back-flush
2. Feed dan bleed dengan back flush	Desain sederhana Penyegaran fluks baik Biaya energi rendah	Recovery rendah Perlu piranti back flush
3. Feed dan bleed dengan fff	Peralatan bf tak perlu Desain sederhana	Recovery rendah Perlu aliran 3-f Penyegaran fluks tidak baik bila mutu air umpan jelek.
4. Resirkulasi	Recovery tinggi Fluks terjaga baik Toleran kadar padatan amat besar	Biaya energi mahal Desain rumit

Kapasitas fluks serta frekuensi pembersihan kimia ditentukan pula oleh mutu air umpannya. Pada sistem HFF petunjuk tekanan diferensial membrannya pen ting sekaitan pencucian tersebut.

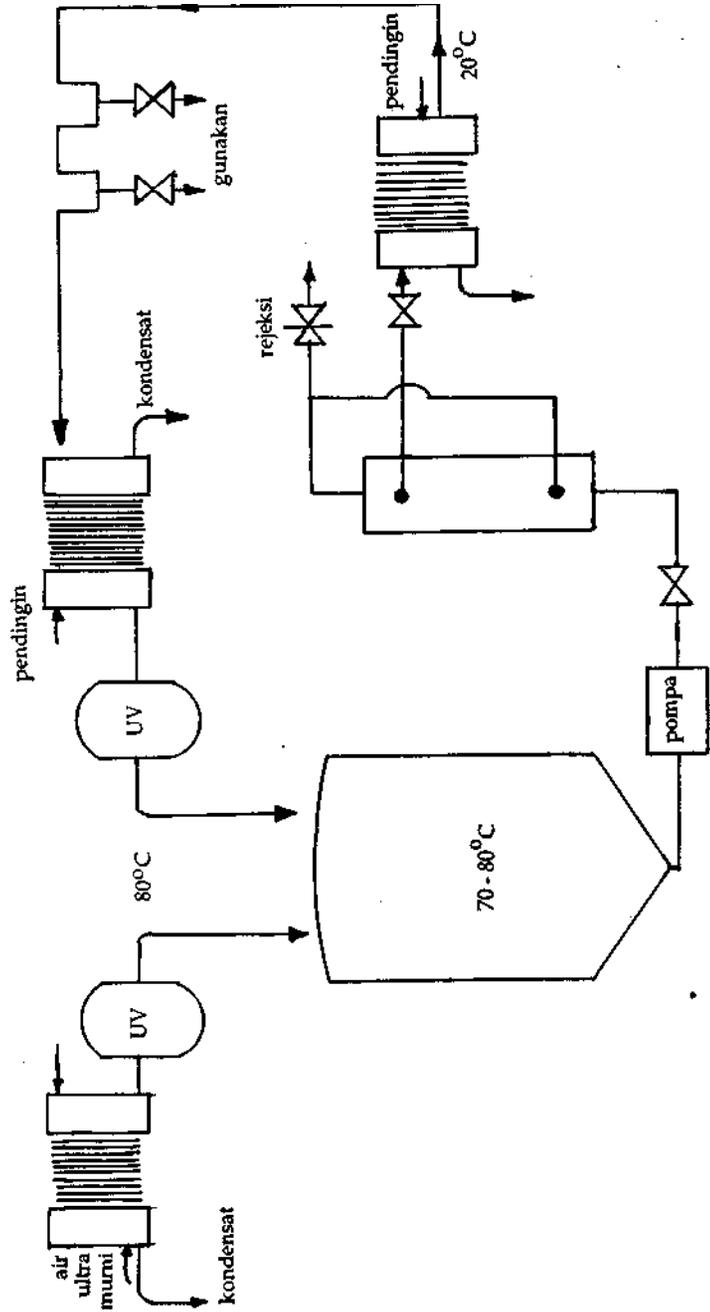


Gambar 32: Kurva kinerja sistem HFF luju alir tetap

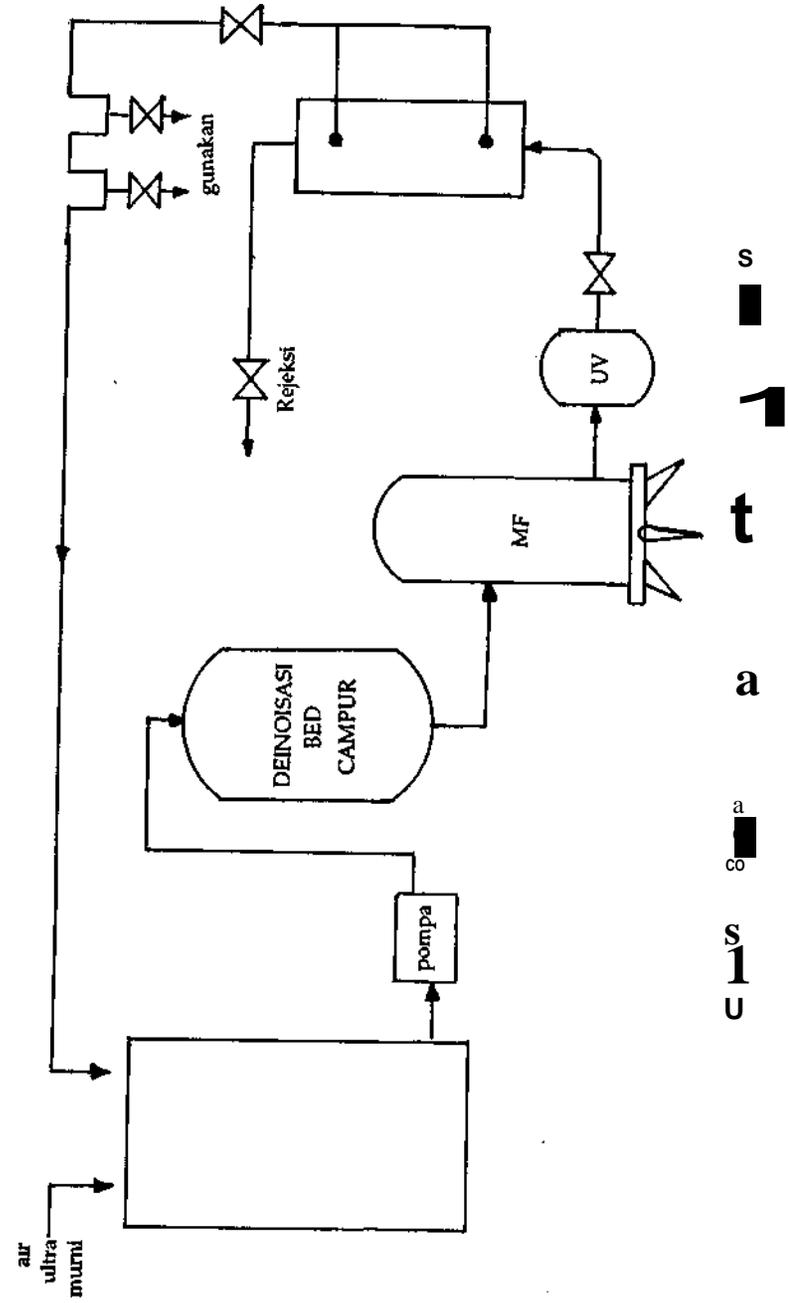
Membran SW tidak dapat digc-lontor balik seperti membran HFF. Penjagaan fluks dilakukan dengan membatasi pcrubahan tiap elemennya dan mengoperasikan dalam *ragam feed and bleed*. Bila umpannya parah, harus ditempuh resirkulasi dan pencucian kimia. Semua harus terkontrol baik, operator bekerja sesuai manual pembuat sistem.

Parameter operasi rutin sistem UF, meski mirip RO, tetapi tak ter-lalu repot pra/pascalakuan, perawatan tidak rumit, tekanan rendah, mutu air umpan kurang agresif dibandingkan RO (payau dan air laut).

Peranan plant sistem UF akhir-akhir ini makin penting sekaitan dengan penghalang akhir (bagi kontaminan) pada sistem air ultramurni. Poles akhir ini penting bagi industri elektronika (kontrol partakel/koloid) dan farmasi (kontrol mikroba/pirogen). Walau tak perlu flushing, pembersihan kimia terkadang perlu selaku upaya preventif. Walau sistem poles akhir serupa pralakuan, tetapi rinciannya berlainan.



Gambar 33: Bagan alir sistem poles terpusatnya pada industri farmasi.



U S a S

Bila keperluan akan air yang ultramurni sekali, namun volumenya tak terlalu banyak, sistem yang tepat dan jitu ialah poles UF di tempat. Air produksinya bermutu mutlak prima. Peralatan diletakkan di fasilitas ruangan suprabersih laboratorium canggih mutakhir. Walau peralatan kecil, upaya perawatan niscaya cermat dan disiplin agar mutu air konsis-ten.

Di laboratorium, model UF lazim selaku poles akhir untuk meng-hilangkan koloid, mikroba dan pirogen setelah proses deionisasi. Ini pen-ting bagi kerja cermat HPLC (khromatografi cair kinerja tinggi), mikrobiologi, imunologi, serologi, biakan jaringan dan penelitian bioteknologis/biomedik lain. Lab-lab di Indonesia semakin banyak menggunakan alat-alat mutakhir piawai mahal, dan menuntut air ultramurni. Tetapi bila orang/pelaksananya tidak becus, mutu air hasil UF tak dapat dipertanggungjawabkan, tak ada gunanya alias sia-sialah instrumen-instrumen canggih tersebut. Pemeliharaan yang baik dan ketat adalah strateginya.

#### KONTROL DAN PERAWATAN

Agar membran (bahan permeator/modulnya) awet, tidak rusak, harus dihindari tekanan terlalu tinggi (maksimum 5 bar), drop tekanan besar (maksimum sekitar 2 bar), kejutan tekanan (pukul air), serta muaiian diferensial (pemanasan/pendinginan cepat). Ultrafiltrasi HFF ada peng-atur tekanan otomatisnya. Pompa berlimit tekanan di bawah maksimum tekanan operasi sistem. Katup airnya yang tipe lamban, ada selang waktu sampai operasi penuh (sekitar setengah menit). Jangan ada jentangan suhu.

Membran SW lebih kokoh daripada HFF, maka kurang peka/ren-tan terhadap tekanan dan pukul air. Akan tetapi jenis SW dapat fouling tak reversibel, maka tekanan jangan berlebihan.

Sistem UF sedang biasanya berkontrol semiotomatis. Pada saat beroperasi, ia otomatis, tetapi langkah pencucian kimia (CIP) tidak demikian. Operator harus mengatur bahan kimia serta alirannya. Sistem skala besar ada yang otomatis penuh.

Perawatan sistem UF akan konsisten, demikian pula operasi alat-nya berjalan prima, bila disusun program pemantauan dan pemeriksaan berkala yang teratur. Tentu saja parameter-parameternya khas tiap alat.

Tabel 5-4: Rangkuman Cara Pemantauan Parameter Alat UF

Jenis Sistem	Parameter terukur	Peringkat	Tindakan
Pralakuan (tekanan dan laju alir)	Drop membran	20-35 psiH/serat	Pencucian kimia
	Angka fouling Alat tersumbat, MF	50 psi S/lilit Umpan cepat terpermeasi	Periksa sepintas Ganti membran Periksa sepintas Ganti membran
Poles - farmasi	Drop tekanan dan laju alir Mikroba	20-35 psi H/serat 50 psi S/lilit >10CFU/100ml	Cuci kimia dan periksa proses sebelumnya Periksa sepintas Sucihamakan Sucihama Ganti membran
	Endotoksin	>25EU/ml	Sucihama Ganti membran
Poles elektronika	Drop tekanan dan laju alir	20-35 psi H/serat 50 S/lilit	Cuci kimia dan periksa proses teTdahulu
	Partikel > 1 mikron > 0,5 mikron	0 1000	Cuci/sucihama Periksa sepintas Ganti membran

Bila beberapa kali sucihama tak memperbaiki kinerja membran, berarti membran sudah rusak. Perlu diperiksa atau diganti.

Pembersihan/pencucian kimia di tempat (CIP) penting untuk men-jaga kapasitas sistem pralakuan dan mencegah kontaminasi sistem poles akhir. Prosedur ketat dan cermat serta teratur/berkala perlu dibuat dan dilaksanakan sesuai kondisi dan penerapan sistemnya.

Apabila sedang tidak dipergunakan, peralatan sistem UF harus dicegah dari berbiaknya mikroba. Prosedur bakunya perlu diikuti. Bila terjadi penyimpangan, jangan ditunda, lekas hubungi konsultan/ahli.

Komponen-komponen piranti sistem UF juga perlu rutin teratur diperiksa/dirawat. Ini meliputi pengatur tekanan (buntu, perlu cuci, setting tepat, operasi baik), katup-katup pengontrol (operasi baik, periksa kedudukan batas), pompa (operasi baik, bocor/tidak, letak shaft rotor, pemanasan motor), knop/saklar tekanan (kedudukan tepat), membran (integritas, uji titik gelembung, uji coba bakteri/endotoxin/angka fouling), umum (kebocoran, fungsi kontrol, urutan CIP otomatis).



## **Bab VI**

# **ELEKTRODIALISIS**

Elektrodialisis (selanjutnya disingkat ED) ialah proses pemisahan elektrokimia dengan ion-ion berpindah melintasi membran selektif anion dan kation dari larutan encer ke yang lebih pekat akibat aliran arus searah (DC). Jadi jelas, ED adalah gabungan antara elektrokimia dan penukaran ion. Sementara itu ED-Balikan atau ED-Reversal (selanjutnya disingkat EDR) ialah juga proses ED namun kutub/polaritas elektroda-elektrodanya dibalik dengan daur waktu tertentu, sehingga membalik pula arah gerak ion dalam jejeran membrannya. Sistem ini digunakan unruk mengubah air payau menjadi air minum atau untuk memekatkan buangan (limbah) agar dapat dipakai ulang atau juga sebagai pralakuan atas umpan air FIT tinggi sebelum masuk ke sistem penukaran ion.

Prosesnya melibatkan membran selektif ion. Air tetap tinggal namun ion dapat lewat. Ion natrium (+) bergerak ke elektroda negatif, sedangkan khlorida (-) ke elektroda positif. Jelas bahwa air pada kompar-temen yang satu berkurang garamnya (diluut/enceran), dan pada kom-partemen lain bertambah ionnya (konsentrat/pekatan) sehingga terhasil diluat (produk) dan konsenrrat (limbah). Diluat dialirkan ke penampung-an, terpisah dari konsentrat.

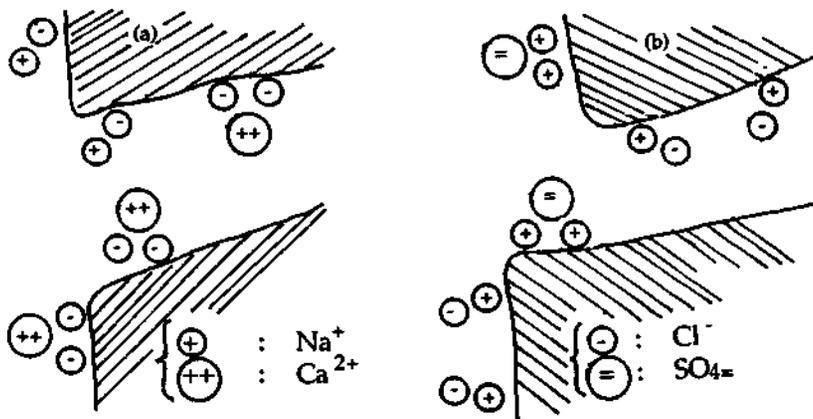
ED secara ekonomis menurunkan PTT air payau menjadi 200 ppm, tanpa menghilangkan kontaminan non-ionik, ion besar yang diam serta

koloid PTT sampai 12000 ppm dapat digarap, tetapi dari segi ekonomi, PTT umpan optimum tidak lebih 2500 ppm. Energi diperlukan untuk menggerakkan ion di larutan. ED tak lagi ekonomis dibandingkan RO atau distilasi flash bila dipergunakan untuk menawarkan air laut yang sangat tinggi PTT-nya sehingga menyedot listrik banyak sekali.

Riwayatnya dulu, ED dirintis untuk mengolah air setelah PD II usai, di tahun 1946. Saat itu para ahli gagal menancapkan akar. Baru setelah 1970-an, proses ED diangkat lagi dan memikat banyak perhatian. Penawaran air payau (agak asin) menjadi basisnya. Bila konsentrasi terlalu tinggi (air laut), keperluan energi arus listriknya meningkat drastis. Walau relatif kurang parah dibandingkan RO, ED pun mengalami fouling.

**KONFIGURASITUKAR-ION SEL**

Membran ED sebenarnya tak lain resin yang dibentuk sebagai lembaran, yang dapat selektif anion atau kation. Membran kation (menukar kation) ialah jalinan pori molekuler sehingga air pun tak terlalu banyak yang dapat melintas, dan porinya diberi muatan negatif ke matriksnya, dengan gugus sulfonat (bandihgkan resin kuat).

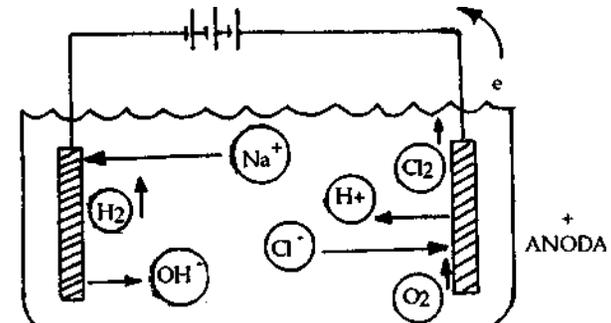


Gambar 35: Bagan membran kation (a) dan anion (b) dengan netralitas listrik.

Pada membran berionisasi netralitas listrik karena adanya ion pasangan sesuai muatannya. Gerak ion mudah dari satu gugus tetap ke gugus tetap (melekat) lainnya. gugus tetap menarik ion bermuatan lawan

sedangkan yang bermuatan sama ditolak. Memang membrannya tidak sempurna, ada juga sejumlah kecil ion bergerak pada arah keliru, namun lazimnya selektivitas itu di atas 98% (kecuali bila larutan di luar terlalu kuat).

Gejala perpindahan ion pada ED berdasar pengaruh potensial arus searah (DC) atas larutan ionik.



KATODA

Gambar 36: Pengaruh potensial DC atas larutan NaCl/H<sub>2</sub>O

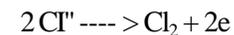
Kation (Na<sup>+</sup>) tertarik ke katoda dan anion (Cl<sup>-</sup>) tertarik ke elektroda positif. Reaksi penguraian air pada katoda:



Pada anoda terjadi reaksi oksidasi hidroksida dari air



Dapat pula terbentuk gas klor pada anoda:



Jadi sungguh-sungguh berciri resin penukar ion lembaran.

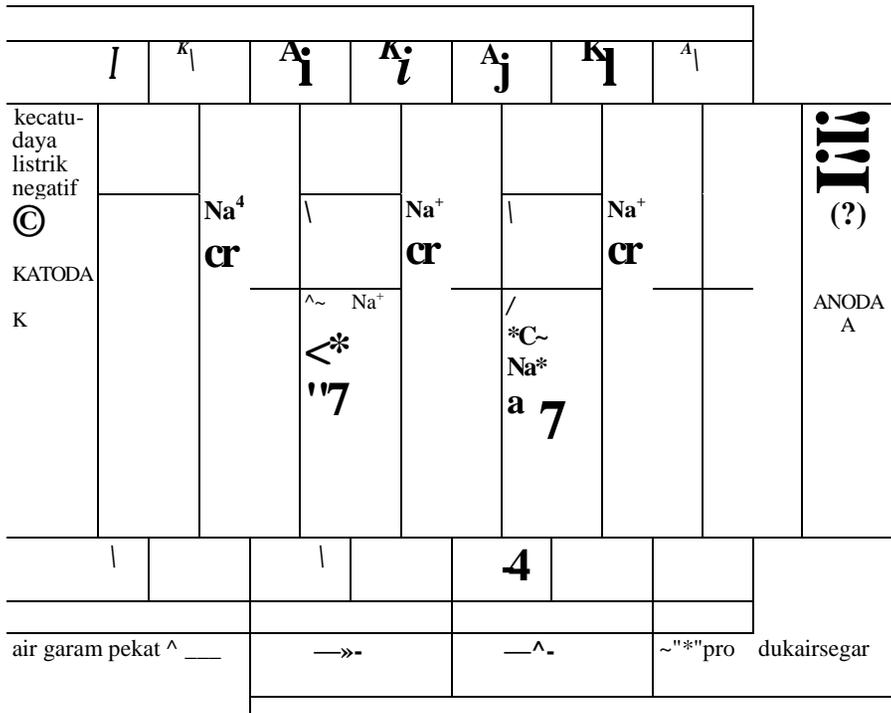
Pada jejeran (stack) ED, ion-ion terlarut, membran selektif kation/anion serta medan listrik DC bergabung menghasilkan demineralisasi atau deionisasi air serta pemekatan ion-ion yang terpisah dalam saluran garam pekatnya. Air yang mengandung ion terlarut dipompa antara membran kation dan anion, mengalir lewat pembatas polietilena.

Jejak air terjadi antar membran, bukan melintasi membran semipermeabel (pada RO). Ion negatif melintasi membran anion, ion positif ditolak (rejeksi). Sebaliknya ion positif melewati membran kation, ion negatifnya direjeksi. Ion-ion yang melewati membran anion/kation dikumpulkan di bagian pekatan, menyatu dalam larutan garam.

Membran-membran ED ini penghantar listrik dan tidak tembus air pada tekanan. Bila diberi medan DC, semua kation bergerak ke kutub negatif. Bila membran yang dijumpai pertama oleh kation itu membran kation, ia melintas, masuk ke kompartemen air berikat dan sel di belakangnya mengalami pengenceran (deionisasi). Bila yang ditemui kation tadi membran anion, ia tidak dapat lewat, tetap terjebak di kompartemen semula (sel pemekat). Begitu pula ion negatif (anion) mengalami gejala serupa saat bergerak ke kutub positif.

Hasil akhirnya, gerak ion yang terimbas DC terkontrol membran ini ialah ada kompartemen berair yang terencerkan, ada pula yang memekat. Aliran pada ED itu satu arah sesuai kation/anionnya.

air payau masuk \_\_\_\_\_.



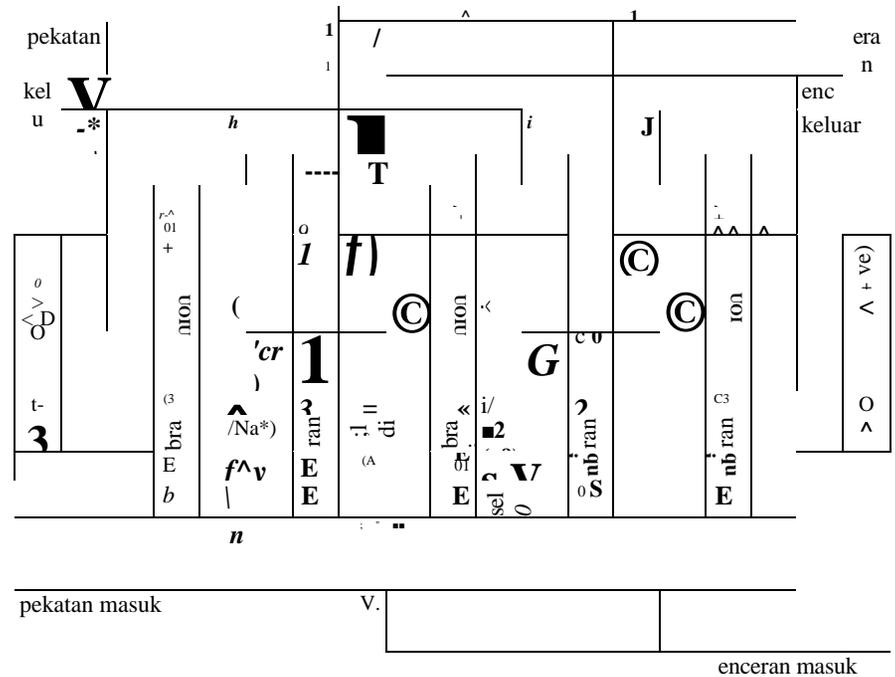
Gambar 37: ED sistem stack

cuci katoda

pasangan sel sebanyak N

cuci

anoda



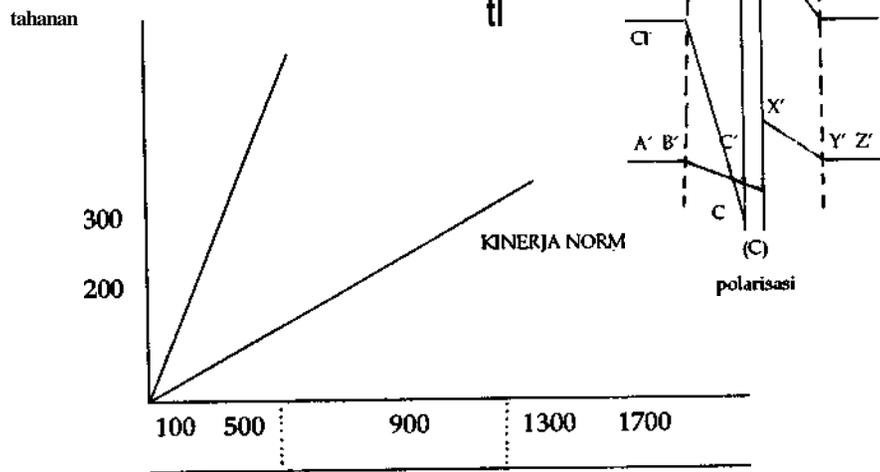
Gambar 38: Pasangan sel pada ED

Stack terdiri atas pasangan-pasangan sel, berjumlah 100 sampai 600 pasang (N). Sel pekatan (konsentrat) lazim merupakan bagian daur ulang, untuk mengurangi (volum) limbah dan meningkatkan dayahantar-nya. Ini menurunkan tahanan listrik sel pekatan sehingga cukup rendah (tidak boros energi). Pada sel enceran (diluut), tahanan makin meningkat. Pada ED pemurnian terhenti sampai PTT air (encer) setara sekitar 500 ppm  $NaCl$  atau 1000 U S/cm. Ini sesuai untuk air minum standar WHO. Teknik ED dapat untuk pralakuan sebelum poles penukar ion agar hemat bahan kimia. Sebelum penukar ion, PTT dapat sampai 50 ppm saja.

POLARISASI DAN FOULING

Agar dapat memahami apa yang dialami ion saat bergerak masuk dan keluar (melintasi) membran, diandaikan penyederhanaan tertentu. Pada permukaan terdapat zalir diam, sedangkan zalir (fluida) ruah ter-campur sempurna. Perubahan kadar dan suhu pada ruah segera disetim-

bangkan. Tebal film tergantung hidrodinamikanya (angka Reynold) peralatan.



pasangan sel (O/an)

500 FOULING BERAT

400

5000 1000 500

Gambar 39: Grafik tahanan pasangan sel

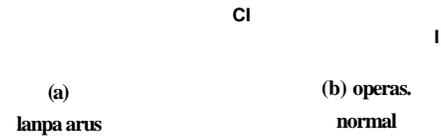
100 perpotongan

tahanan jenis (a/sell)

Konsentrasi ion  $Cl^-$  di kedua sisi membran anion dalam larutan  $N_aCl$  berbagai kondisi tampak pada gamban

x r z

a



Gambar 40: Gejala kinetik pada membran anion titik A, B, C, X, Y, Z menyatakan konsentrasi  $OH^-$

Pada gambar (a) itu, tanpa arus, konsentrasi  $\text{Cl}^-$  di kedua sisi membran dan film diamnya sama. Diberi gaya gerak listrik, ion serentak bergerak (tahanan membran kecil) melintas bebas. Daerah C menelan  $\text{Cl}^-$  dari cairan di dekatnya. Beda konsentrasi mendorong ion  $\text{Cl}^-$  ke arah membran (difusi).

Pada gambar (b) terlihat sistem telah tunak (*steady*) lagi. Penurunan konsentrasi  $\text{Cl}^-$  di sisi kiri membran memberikan jenjangan pada film antara B dan C, ion  $\text{Cl}^-$  mengalir. Ion  $\text{Cl}^-$  melintasi membran, diimbangi aliran  $\text{Na}^+$  positif sebaliknya, begitu seterusnya makin banyak. Film diam bertindak sebagai "jalur tancap gas" (ibarat balap Formula 1) dan ion  $\text{Cl}^-$  melipat-duakan kecepatannya.

Di sisi membran yang lain, kejadiannya adalah kebalikannya. Ion-ion  $\text{Cl}^-$  mendesak terus. Film tebal tertentu, perlu jenjangan konsentrasi lebih besar untuk memasok aliran ion yang melintasinya.

Ion  $\text{OH}^-$  dalam larutan garam netral jumlahnya sedikit tetapi manakala konsentrasi  $\text{Cl}^-$  telah amat kecil, adanya  $\text{OH}^-$  tak dapat lagi diabaikan. Perbedaan antara ion  $\text{Cl}^-$  dan  $\text{OH}^-$  ialah bahwa  $\text{Cl}^-$  ke membran oleh difusi melintasi film, sedangkan  $\text{OH}^-$  terjadi dari penguraian air setempat. Bila pasokan  $\text{Cl}^-$  kurang memadai, membran mengalirkan  $\text{OH}^-$ , sehingga tetapan disosiasi air membentuk ( $\text{OH}^-$ ) lebih banyak. Film pada C bersifat asam, sedangkan X bersifat basa/alkali.

Pada polarisasi, zaliir (fluida) di permukaan membran kehilangan elektrolit, tahanan meningkat drastis terhadap rapat arus. Arus melintasi membran, dibawa oleh hidroksida ke sisi pekatan, p meningkat dan dapat menyebabkan pengendapan kalsium karbonat dari air payau sadahnya. Polarisasi menyebabkan efisiensi arus merosot, konsumsi energi meningkat, perpindahan ion yang dikehendaki menurun (di daerah polarisasi itu). Rapat arus batas atau titik kritis itu khas sesuai sistemnya.

Bila rapat arus ditingkatkan melampaui titik kritis tersebut (saat membran kehabisan  $\text{Cl}^-$ ), dapat terjadi kurva volt/ampere selnya meningkat drastis dan enceran asam/pekatan basa tersebut di atas. Perubahan  $\text{p}^{\text{H}}$  dapat fatal, menghasilkan kerak.

Gambar (c) memperlihatkan membran anion saat kritis. Peringkat rapat batas (arus saat kritis) ditentukan oleh faktor-faktor: tebal film (anggap laju difusi ion sebanding jenjangan konsentrasi/lereng konsentrasi film B ke C) dan konsentrasi B cairan ruahnya. (Catatan: tentu

juga suhu. Rapat arus kerja maksimum desain ED komersial sebaiknya 70% rapat arus batas agar aman). Yang jelas, rapat arus batas lebih rendah untuk larutan encer dan tebal film harus diupayakan setipis mungkin.

Andaikan suatu stack ED ideal, diberi V volt, terhasil arus I, meng-hilangkan G kilogram garam tiap jam. Andaikan pula tahanan pasangan sel tetap, yakni R ohm tiap pasangannya. Karena tiap pasangan sel melakukan sejumlah kerja yang sama besar, maka:

$$G = I \text{ atau } I = \frac{G}{N}$$

Daya terkonsumsi oleh stack:

$$\text{Daya} = VI \text{ Jadi: } \text{Daya} = \frac{G}{N} V$$

dengan  $V/N$  ialah tegangan tiap pasangan sel.

$$\text{Jelaslah: } V = IRN$$

Jadi daya terkonsumsi stack menyeluruh = GIR, atau daya terkonsumsi tiap kilogram garam = IR, sementara terlihat pula itu tadi =  $V/N$  (lihat di atas).

Pendek kata, dalam menyusun instalasi ED, harus diingat bahwa daya terkonsumsi untuk penghilangan garam tertentu sebanding dengan luas membran totalnya. Dan kondisi arus batas terjadi pada tegangan listrik tiap sel (serupa walau konsentrasi amat berbeda).

Pada resin anion acapkali terjadi fouling (penyumbatan). Biasanya hal itu karena anion organik besar (asam humat/humus, deterjen, dan lain-lain yang bergugus asam beberapa di tiap partikel), yang terjebak pada resin dan sukar diregenerasi. Fouling membran anion serupa pula, bahkan lebih cepat dan tak reversibel. Akibatnya parah. Fouling di sini merupakan gejala permukaan dan erat kaitannya dengan polarisasi.

Bila ED dioperasikan dengan air yang mengandung ion penyebab fouling (asam humat, atau air tereemar deterjen dan lain-lain) maka ion-ion itu bergerak ke membran, tinggal di loka elektropositifnya. Karena melekat, ia merusak dayahantar setempat.

Fouling juga dapat berbiang koloid yang bermuatan permukaan (jadi turut bergerak ke membran), membentuk "lendir". Besi koloid paling sering mengganggu membran kation, membentuk film inert pada membran; sukar terdifusi, merusak jenjangan konsentrasi.

Bila bahan foulingnya polielektrolit (beberapa gugus bermuatan tiap partikelnya), sebagian muatan tertaut ke membran, lainnya tetap bebas. Akibatnya lebih parah karena gugus-gugus elektronegatif itu justru membentuk lapisan selektif kation di depan membran selektif anion, dengan akibat lebih sulit untuk terjadi difusi.

Polarisasi mengganggu transport ion. Bila konsentrasi garam besar, selisih konsentrasi dalam sel dekat membran juga besar, mempermudah transport. Tahanan oleh fouling mudah teratasi. Pada air laut, fouling bukanlah masalah yang serius karena tahanan jenis encernya rendah sekali. Akibat yang parah akan terjadi bila konsentrasi garamnya rendah.

Bagaimana memperkecil polarisasi sistem ED? Pertama, tebal film diam dikurangi dengan memperbesar angka Reynold, memasukkan peningkatan turbulensi (golakan) atau membesarkan kecepatan cairan. Sayang bahwa hal itu mempertinggi hilangan tekanan. Sel diusahakan setipis mungkin, agar tahanannya mengecil, tetapi hal itu akan me-ngurangi angka Reynold dan mempertinggi hilangan tekanan pula. Jadi mendesain ED harus mengoptimisasi hal-hal tersebut. Bila fouling merupakan penyebab polarisasi, mengutak-atik kondisi hidrolis sistem tidak akan menyelesaikan masalah.

Cara lainnya adalah meningkatkan suhu. Ini memerosotkan vis-kositas air, meningkatkan golakan, membesarkan laju difusi. Hal-hal itu efektif bagi fouling. Hambatannya ialah soal praktis dan ekonomisnya. Yang terbaik, zat penyebab fouling organik dihilangkan dulu sebelum memasuki sistem ED.

Jelaslah bahwa polarisasi pada ED diakibatkan oleh habisnya ion di permukaan membran, yang membatasi tegangan tiap pasangan sel, ditanggulangi secara hidrodinamik. (Catatan: Pada sistem RO justru polarisasi menyebabkan konsentrasi pada permukaan membran meningkat). Fouling memperparah polarisasi, diatasi dengan pemanasan atau pralakuan atas kontaminan airnya.

Membran ED komersial berupa lembaran plastik buram diperkuat kain berserat, permukaannya seragam dan halus, ukurannya bermacam-macam. Tebalnya sekitar 0,5 mm. Untuk terapan dengan pentahapan hidrolis pada stack tertentu, tebalnya 1 mm.

Membran anion keputih-putihan, dengan muatan positif gugus-gugus ion amonium kuarterner, memungkinkan anion lewat. Membran kation bermacam-macam warna dari coklat sampai putih, diterai stempel kata KATION. Gugus sulfonat memberikan muatan negatif. Membran kation dan anion komersial tak permeabel air, tahan fouling, awet, tahan p 1 sampai 10, lentur, tahanan lisrik kecil, dapat beroperasi sampai suhu 46°C, tahan pembengkakan osmotik.

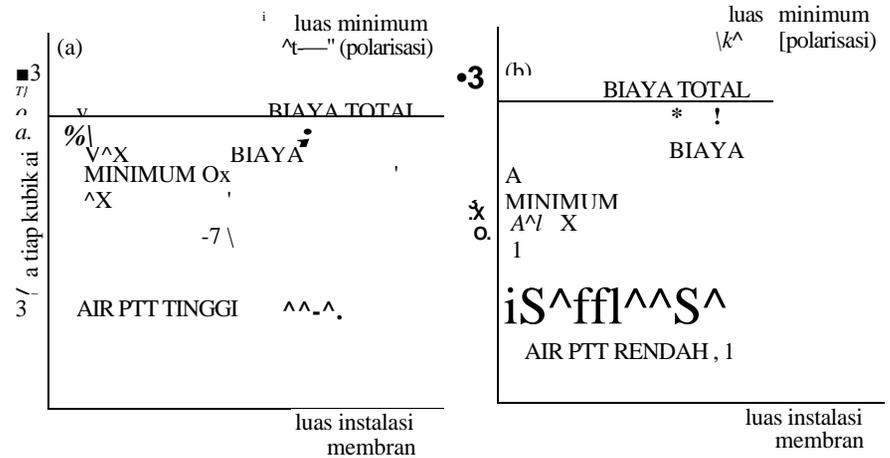
Sistem ED-nya memiliki ciri khas. Nisbah konsentrasi ion harus dijaga di bawah 150:1, bahkan 200:1. Bila sistemnya ED dengan pem-balikan arus (EDR), tanpa penambahan kimia, aliran pekatan jangan mencapai 200% jenuhan kalsium sulfat. Bila dengan penambahan kimia, dapat sampai 350%. Angka jenuhan Langlier harus di bawah +2,2. Te-gangan jangan melebihi 80% kapasitas agar tak ada kebocoran arus. Tegangan batas ialah tegangan saat arus listrik berlebihan bergerak dari elektroda lateral melintasi membran dekat manifold pekatan, meng-hasilkan panas, dapat merusak alat.

DESAIN SISTEM S

Resin penukar ion berciri mekanis khas; mekar dan mengerut sesuai perubahan konsentrasi, suhu dan bentuk ion. Membran itu kuat, ukurannya sampai 2 meter atau lebih, dan biasanya diperkuat struktur rajutan benang.

Kita harus hati-hati membaca brosur dari produsen membran karena sering menyesatkan atau tak relevan. Misalnya, tahanan listrik yang tercantum diukur dengan arus AC frekuensi Hnggi dalam larutan kuat. Tentu saja cara uji (spek) demikian mengaburkan masalah transport akibat polarisasi terlalu dini. Juga, tahanan ohmik membran udaklah penting bagi masalah pengubahan air lazimnya. Membeli membran harus jeli-jeli menilai dan memilihnya. Membran komersial biasanya cukup baik, selektivitas air payaunya di atas 90%. Hilangan selektivitas biasanya karena ada kebocoran mekanis. Akan tetapi membaca spek produk saja tidak cukup. Pengalaman dan know - how penting untuk memahami sifat membran pada fouling, kinerja setelah berulang kali dilepas dan dipasang kembali.

Catudaya yang diperlukan bagi plant ED berbanding terbalik dengan luas membran yang tersedia untuk transport ion. Pilihan desain dari luas membran kecil dan biaya operasi tinggi sampai luas besar biaya operasi rendah. Sampai di situ tentu tak sukar membuat perhirungan op-timisasi matematik ekonominya. Dalam praktek, akibat batasan polarisasi, tak semudah itu. Dalam hal pemurnian air payau, pertimbangan luas membran yang diperlukan dapat lebih penting.

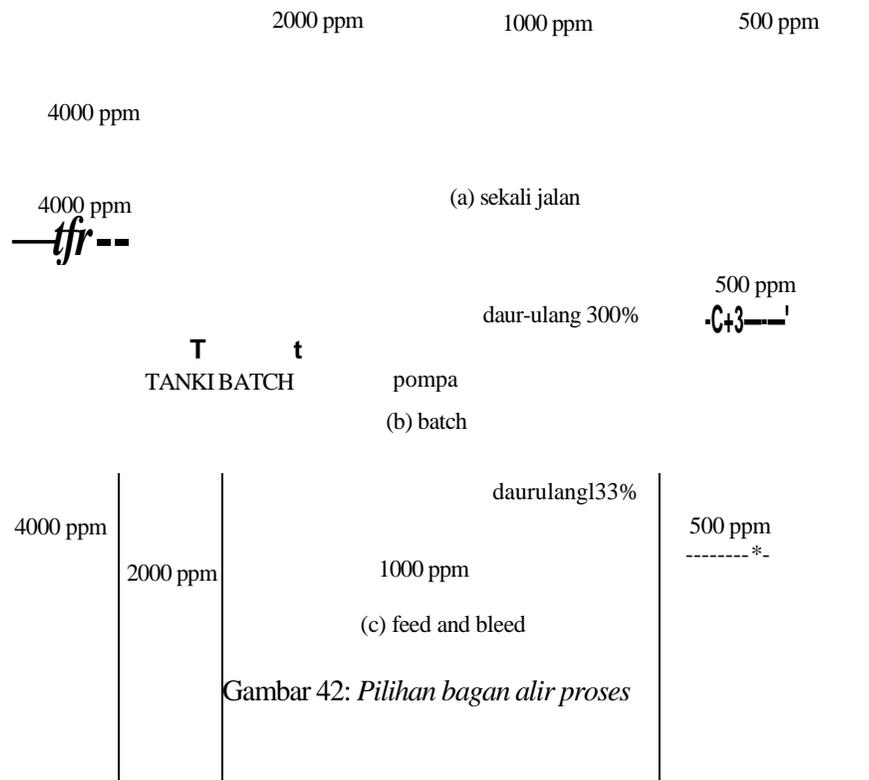


Gambar 41: Pola pembiayaan ED, teoritis. Pada (a) PTT Hnggi luas membran minimum di bawah optimum ekonomi, pada (b) harus diinstalasi lebih luas membrannya daripada perhirungan ekonomi belaka.

Bila desain volt tinggi untuk tiap sel, agar biaya kapital minimum, bisa terjadi sedikit fouling sudah membuat plant sebentar saja rusak produktivitasnya. Jadi operasi pabrik sukses bukan sekedar lantaran op-timisasi matematisnya beres. Ahli membran/ED harus tegas dalam hal ini.

Arus batas berubah sesuai konsentrasi garam pada enceran. Arus batas itu turun bila air telah berkurang garamnya. Dalam praktik, ini berarti air harus melewati panjang lintasan sel minimum agar terjadi reduksi garam tertentu. Perhirungan kasar, agar salinitas berkurang separoh, perlu panjang sel 1000-2000 mm. Misalnya mau mengurangi PTT dari 4000 ppm menjadi 500 ppm, berarti delapan satu. Bila desain sel berpanjang jejak 1500 mm, hal itu berarti dapat batch resirkulasi tiga kali atau disusun tiga panjang sel seri. Dapat pula dua serf dan mendaur ulang sebagian encerannya (feed and bleed).

Pilihan itu tidaklah sederhana. Bila alirannya sekali jalan (*once-through*) lewat tiga lintasan, tampaknya sederhana, tetapi tak ekonomis bila alirannya kecil dan timbul masalah hilangnya tekanan pada sistem. Pendaurlangan batch terlihat mudah dikontrol dan luwes, tetapi berarti perlu pompa besar dan bila arusnya tetap maka akan terjadi *kurva daya gergaji* (lihat Bab RO dan UF) dengan puncak di tiap awal batch. Artinya diperlukan generator dan penyearah arus yang dapat memberikan puncak arus tinggi. Cara *feed and bleed* kurang efisien karena alat harus menghilangkan seluruh garam pada tahanan jenis tinggi, bahkan merusak dayahantar tinggi umpannya sebelum memasuki sistem ED-nya sendiri.



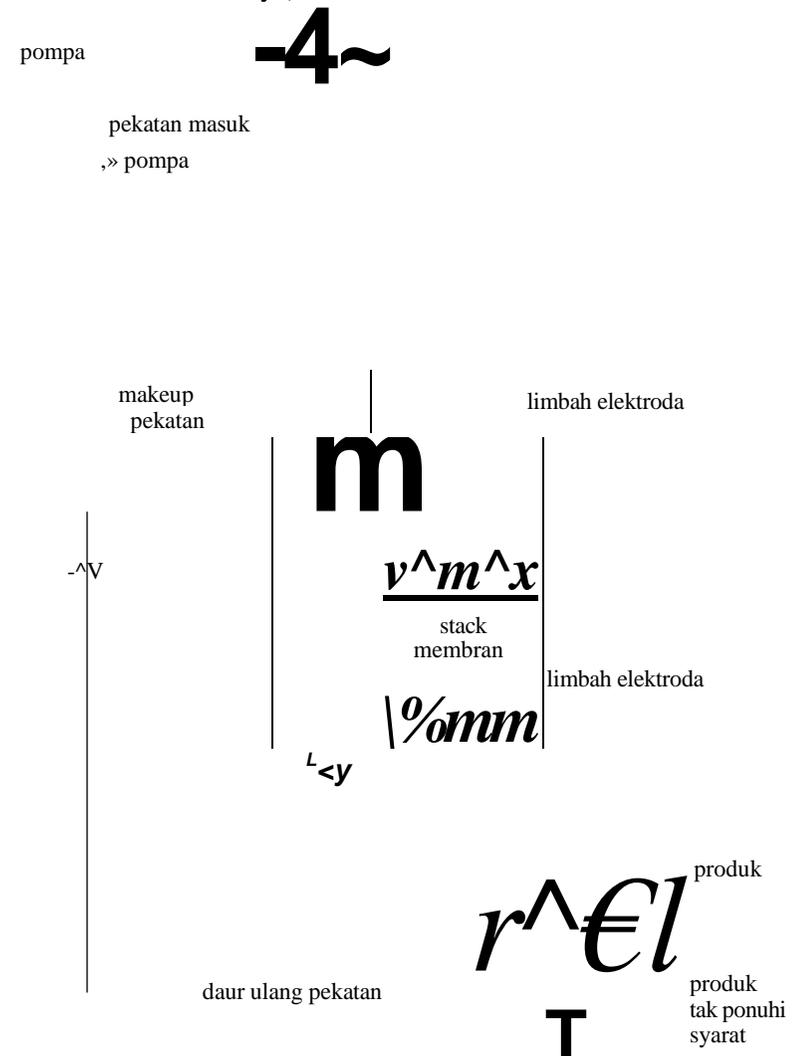
Gambar 42: Pilihan bagan alir proses

Dalam hal ini dapat saja prasyarat produk akhir ED agak dilonggarkan, diikuti pascalakuan yang sesuai. Jadi dapat didesain sistem sekali jalan berproduksi enceran 1000 ppm, lalu pascalakuan. Boleh jadi kiat begitu memperkecil ukuran plant, operasinya lebih murah dan mudah.

Pada gambar sistem ED terpampang, air umpan lewat pompa 2 sampai 40 psi (10-300 kPa) diperkuat menjadi 70 sampai 90 psi, melintasi filter cartridge (10 mikron). Tidak seperti RO/UF, air produk ED tak menembus membran, maka dijaga peluang kontaminasi koloid/organik.

Bila kandungan khlor melebihi 0,5 mg/L, besi di atas 0,3 mg/L, hidrogen sulfida melebihi 0,3 mg/L, turbiditas/kekeruhan di atas 2,0 NTU, atau mangan melampaui 0,1 mg/L, harus diberi pralakuan.

Pompa pekatan bertekanan rendah dipakai untuk meningkatkan recovery sebagian keluaran membran. Piranti lisriknya adalah catudaya DC dan modul pengontrol/instrumentasi. Katup-katupnya motor otomans bagi umpan, saklar aliran (pembalikan enceran/pekatan pada EDR), pemisahan produk, pengaturan tekanan dan kontrol aliran elektroda. Aliran elektroda ini sistem hidrolis terpisah. ED/EDR didesain khusus sesuai keperluan. Faktor desain ialah kuantitas air produk (menentukan ukuran ED, pompa, perpipaian dan stack) serta kualitas produk (jumlah garam yang dipisahkan, menentukan tatanan stacknya). UMPAN



buang pekatan Gambar 43: *Bagan*

*alir proses balikan ED*

Cara puataan stack menentukan pentahapannya. Pentahapan diperlukan untuk memperoleh luas membran dan waktu retensi mcmndai lugi jumlah garam yang digarap. Pentahapan dapat hidrolis atau listrik.

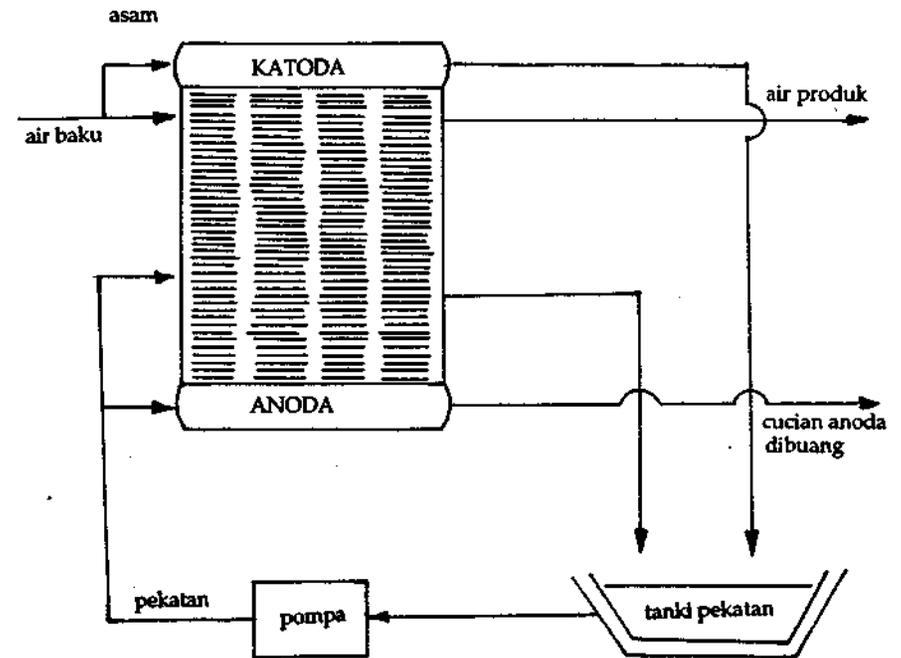
Pentahapan hidrolis dengan lintasan berulang antara elektroda sis-tern liD agar demineralisasi lebih tinggi (lazim penghilangan garam 40-50 % tiap tahap). Pentahapan listrik dengan penambahan pasangan elektroda ke stack membran untuk optimisasi sistem DC- nya. Biasanya dengan penggabungan keduanya akan membuat luwes sistemnya dan laju penghilangan garam maksimum akan membatasi masalah polarisasi dan tekanan hidrolisnya.

Berbagai desain sel dan stack /jejeran dapat diperoleh di pasaran. Sel tipis tertaut membran lentur luwes terjaga bentuknya berkat pembatas yang juga berperan untuk memberi golakan aliran yang memadai dan memperpanjang jejak aliran untuk ukuran tertentu. Ada dua pola aliran: berliku atau berlapis. Yang pertama lazim didesain bujur sangkar, yang kedua berbentuk empat persegi panjang. Kemajuan model dan desain akhir-akhir ini amat pesat.

Stack (atau jejeran membran ED), modulnya mirip filter press. Karena lingkungan korosif, bahannya terbuat dari komponen plastik atau karet. Ini stabil terhadap gangguan mekanis, panas, kimia, dan listrik. Lubang keluar masuknya harus kuat, bentuknya pun didesain untuk tak mudah tersumbat.

Elektrodalah yang paling banyak dikenai keadaan ganas. Katoda menghasilkan gas hidrogen dan soda kaustik. Jadi harus pada sistem aliran terpisah (diberi asam). Air pencuci harus lunak. Anoda menghasilkan gas khlor. Antara kedua elektroda harus tersekat baik agar tak ada bahaya ledakan.

Katoda harus dari logam mulia. Bila sistem EDR, semua elektro-danya dari logam mulia. Biasanya terbuat dari tantalum, niobium atau titanium, dilapis platina. Ada juga yang dilapis rutenium atau iridium dioksida. Elektroda amat mahal. Bila operasi baik dapat tahan 7 tahun atau lebih. Penting sekali kerja pompa pembilas dan sebagainya terkon-trol ketat. Aliran gas dan cairan tak boleh terganggu. Asam cucian dapat sekaligus. Untuk mengasamkan pekatan agar tak terjadi kerak (*metode bknv-doum*).



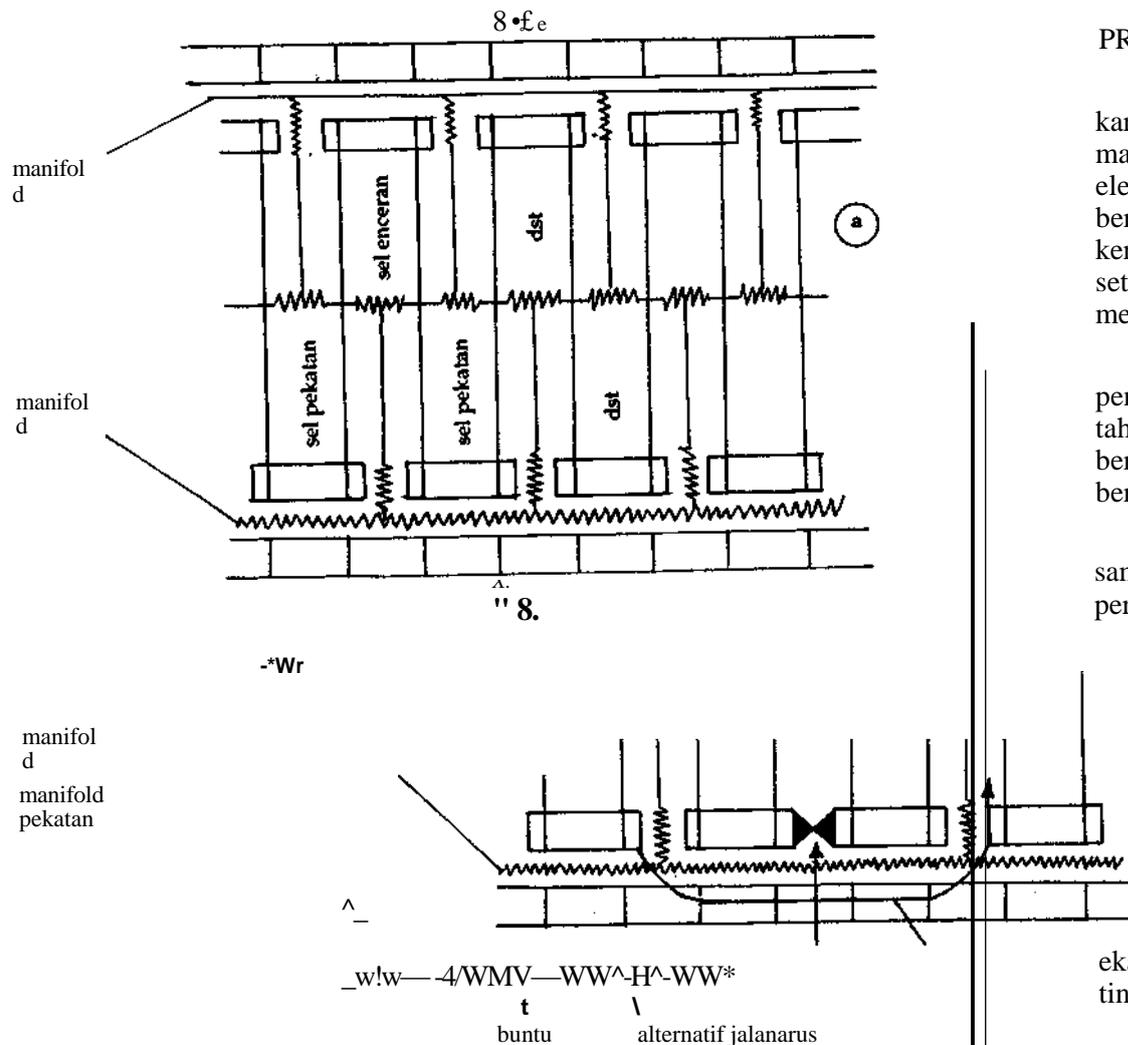
Gambar 44: Pencuci Elektroda

### BALIKAN KUTUB DAN LISTRIK

Penting ditekankan di sini mengenai sistem ED dengan pem-balikan polaritas: EDR (reversal). Desain stack komersial lazim serupa untuk sel enceran maupun pekatannya. Selain menunjang EDR, juga mudah dibuat dan dipasang.

Pembalikan kutub, seperti telah dikemukakan, bertujuan meng-hilangkan endapan. Endapan yang terbentuk pada sel pekatan akan larut kembali bila fungsinya dibalik. Juga fouling dienyahkan. Yang jelas man-faatnya juga terpetik bagi ruang elektrodanya. Pada katoda, ion hidrok-sida dapat membentuk endapan putih dengan ion magnesium dalam air. Bila fungsi dibalik, katoda menjadi anoda, di situ terbentuk gas khlor. Gas itu larut, membentuk asam hipokhlorit, membantu melarutkan hidrok-sida.





Gambar 46: Kirchoff stack elektrodialisis. Hanya ditunjukkan port dan manifold. Satu untuk enceran dan satu untuk pekatan (agar sederhana) ia operasi normal, (b) satu sel enceran buntu.

PRAXIS TEKNIS DAN EKONOMI

Dalam kenyataan praktek lakuan air, banyak kegagalan terjumpai karena tidak memadainya penanganan pralakuan. Hal itu dapat karena ikut masuknya benda asing, kacaunya dosis asam, kerusakan pencucian elektroda dan sebagainya. Hal seperti itu bila sekali terjadi maka akan berentetan akibatnya. Perubahan p karena polarisasi dapat meng-hasilkan kerak atau pemanasan di bagian tertentu atau malah rusak. Begitu seterusnya. Kerusakan menular. Pemompaan yang kacau juga dapat menjadi penyebab.

Korosi juga merupakan masalah kritis. Begitu pula adanya penyumbatan yang akan memicu demineralisasi, dayahantar merosot, tahanan sel meningkat. Arus melewati sel yang lain, pemanasan ber-lebihan, merusak alat. Masih banyak lagi biang penyebab tidak berfungsi alat secara optimumnya, bahkan juga terjadinya kerusakan.

Jitunya pemilihan sistem, kecermatan pengoperasian dan perawatan, sampai efisien dan efektifnya penggunaan, semua itulah wajah dari pokok permasalahan setiap upaya, yakni faktor dan pertim-bangan ekonomi.

Elektrodialisis hanya sesuai untuk mengubah air payau menjadi air minum. Untuk air laut ia tak ekonomis. Pesaingnya ialah RO. ED paling baik untuk mengubah PTT 2000 ppm menjadi 1000 ppm, yang lalu dicampur air distilasi menghasilkan air minum. ED dan RO terkena fouling. Fouling ED terutama oleh makromolekul organik dan ion.

Membran anion melewatkan  $Cl^-$  lebih mudah daripada sulfat dan air yang mengandung banyak sulfat mengganggu ED. Sebaliknya membran RO retensi  $Cl^-$  buruk, tetapi baik atas sulfat. ED memilih ekavalen daripada dwivalen sedangkan RO tidak. Jadi kandungan  $N_2O$  tinggi cocok dengan ED,  $CaSO_4$  banyak sesuai RO.

ED cenderung memboros lebih sedikit air daripada RO. Bila air baku sedikit, atau limbah sulit dibuang, ED unggul.

ED hanya menghilangkan ion logam, sedangkan koloid, organik dan lain-lain tak teratasi olehnya.

Proses ED lebih rumit dan memerlukan pengawasan serta pemeliharaan terlatih/piawai. Bila lingkungan kerja buruk, lebih baik distilasi saja.

ED bersih, dan cukup dengan listrik maka tak usah memakai boiler atau bahan bakar. Jadi setaraf RO. Pendeknya ED merupakan proses unggul asalkan supervisinya bagus. Paket ED, sebagaimana distilasi, deionisasi atau osmosis balik, tersedia. Elektrodialisis, dalam bentuk paket, ada beraneka ragam.

Bila masalahnya adalah untuk meningkatkan mutu air payau agar dapat memenuhi syarat, ED-lah jawabannya. Belum terlalu banyak kemajuan ED untuk menggarap air laut dibandingkan RO misalnya. Akan tetapi terapan baru ED ialah pralakuan air PTT (padatan total terlarut) tinggi sebelum masuk pengolah penukaran ion. Apalagi harga bahan-bahan kimia penunjang proses pralakuan lain juga terus meningkat. Padahal ED hanya bermodal listrik saja. ED juga berkembang pesat di luar bidang desalinasi, misalnya pada lakuan proses serta *de-ashing* (penghilangan mineral pada pangan tertentu) juga recovery lim-bah. ED menunjang pembangunan industri berwawasan lingkungan serta ekonomis.

## *Bab VII*

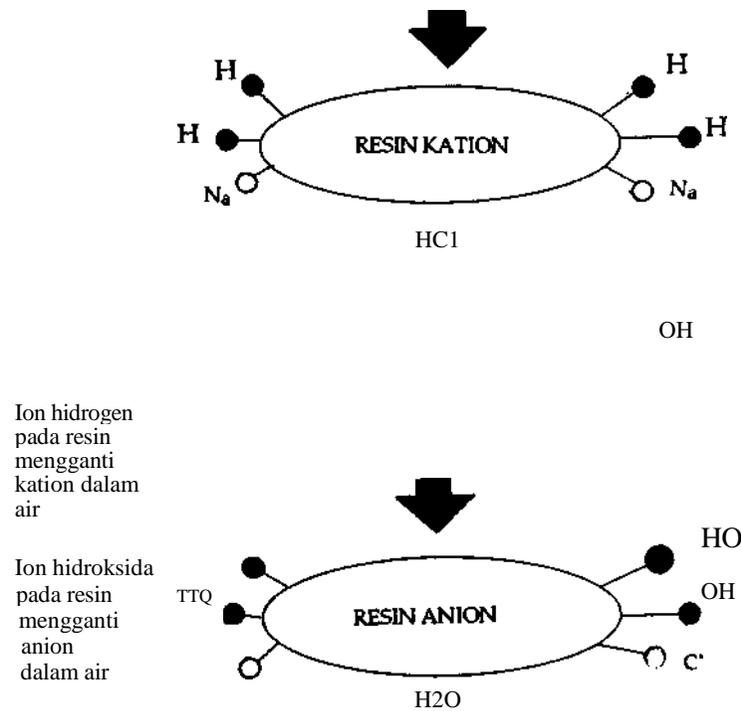
# DEIONISASI KONTINYU

Secara konvensional deionisasi dilakukan dengan resin, bukan membran. Deionisasi berbasis resin merupakan cara efektif dan ekonomis untuk menghilangkan mineral (ion) terlarut dari air. *Bed resin deionisasi* (DI), bed mengandung dua macam *bed*, yaitu jenis kation yang dijenuhkan oleh ion hidrogen bermuatan positif serta jenis anion yang jenuh ion hidrok-sida (OH) bermuatan negatif.

Begitu air melintasi bed, anion-anion dalam air (misalnya khlorida dan silika) bertukar tempat dengan hidroksida pada bed gel. Kation-kation dalam air (misalnya natrium dan kalsium) bertukar tempat pula dengan kation hidrogen. Kation yang tertinggal di air (hidrogen) dan anionnya (hidroksida) bergabung membentuk air murni.

Pada sistem bed terpisah, resin-resin kation dan anionnya terpisah dalam unit masing-masing, menghasilkan air murni-sedang, yaitu sampai 2,0 mego hm-cm (25°C).

Bed tercampur, mengandung resin kation dan anion pada tanki sama, mampu menghasilkan air murni dengan batas teoritis 18,25 megohm-cm. Akan tetapi sistem ini memerlukan pralakuan khusus agar dapat beroperasi secara ekonomis.

Gambar 47: Proses *Deionisasi*

Resin yang tercampak dapat dikembalikan ke kemampuan semula dengan menggunakan teknik regenerasi kimia. Pralakuan meliputi pra-filtrasi, karbon aktif dan lain-lain, sedangkan poles akhir dengan filter 0,2 mikron, sehingga air pun bebas parukel koloid, bubuk halus resin, mikroba, serta padatan tersuspensi lainnya.

Skala DI dari yang berdesain besar sampai yang otomatis kecil praktis, tanpa repot regenerasi kritis berkepanjangan.

#### DEIONISASI KONTINYU

Teknologi deionisasi kontinyu atau *continuous deionization* (CDI) dikembangkan/patent oleh IP-EE, memang mirip dengan DI tetapi caranya berbeda. Teknologi CDI ini gabungan dari:

Resin penukar ion,  
Membran penukar ion,  
Listrik,

dengan membran penukar ion dan listrik yang sebenarnya merupakan komponen teknologi ED (Bab 6) sehingga ion-ion secara terus-menerus tergelontor dari sistem begitu terhilangkan dari air umpannya.

Air umpan mengalir lewat resin penukar ion tercampur yang dilapis oleh membran penukar kation dan anion. Arus DC menyebabkan air terurai. Ion hidrogen dan hidroksida bebas mengganti kation dan anion yang tertahan. Begitu ion-ion itu lepas dari permukaan resin, arus listrik mendorongnya lewat membran ke saluran limbah.

CDI menghilangkan ion terlarut sampai 99,9% sesuai parameter operasinya. CDI juga mampu menghilangkan 90% organik polar terlarut dengan UV. Karena tidak memanfaatkan barier membran, parukel, pirogen atau bakteri tidak hilang, tetapi prosesnya menghambat pertumbuhan bakteri dalam modul. CDI sanggup menghasilkan air sangat murni secara konsisten tanpa bantuan bahan kimia. Limbahnya netral, sesuai ion-ion yang ada dalam umpan.

#### KEUNGGULAN DAN TERAPAN

Dibandingkan deionisasi tradisional, CDI jelas memiliki berbagai keunggulan kompetitif.

Tanpa bahan kimia berbahaya, limbahnya tak perlu dinetralisasi. Operator tidak perlu repot-repot karena alatnya meregenerasi sendiri secara otomatis.

Air produk konsisten murni. CDI tidak habis, maka mutu air produknya tetap terjaga berbulan-bulan, tanpa perubahan atau perbaikan atau macet. Padahal sistem resin kuno, bila sudah diregenerasi, resinnya tidak 100% kembali ke kapasitas semula.

Biaya operasi minimum. Tidak menggunakan bahan kimia sama sekali, juga tanpa perawatan mahal. Untuk menghasilkan 5000 liter air (1 megohm-cm) tidak melebihi 1 Kw-jam saja.

Kontrol bakteri dan pirogen. Sistem deionisasi kontinyu dapat memenuhi prasyarat farmakopia XXII (Amerika) air injeksi, bebas bakteri/pirogen, dengan sanitasi teratur.

Disain alat dibuat kompak, praktis, hemat tempat.

Penerapan. Teknologi CDI secara serentak dapat menggantikan deionisasi otomatis, osmosis, juga lebih irit dan berhasilguna daripada ED. Dapat juga pemakaiannya digabung, saling melengkapi dan meng-

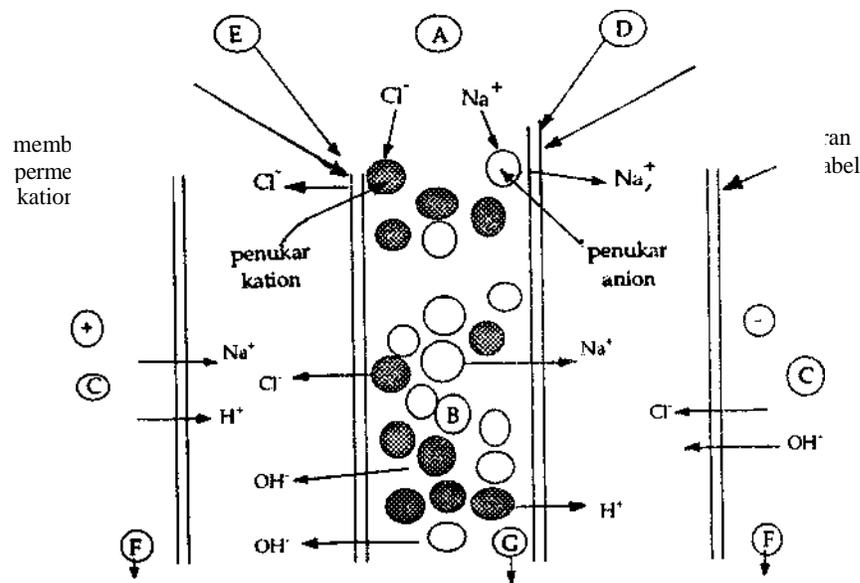
untungkan. Misalnya, untuk memoles akhir air produk RO. Sistem deionisasi kontinyu ideal dalam menghilangkan garam secara konsisten dan ekonomis.

Teknologi CDI tidak menghasilkan limbah berbahaya, tidak perlu lakukan limbah, alat penunjang, ventilasi, penanganan kimia dan sama-camnya. Biaya operasi dan pemeliharaan sangat rendah.

Berbagai industri menggunakan cara deionisasi kontinyu, seperti farmasi, elektronika, pabrik kimia, elektrocoating/elektroplating, lakukan air boiler, industri pangan-minuman, laboratorium, pembangkit energi, gelas optik, pabrik kosmetika dan jamu, dan banyak lagi. Sistem dan pemilihan/desainnya harus dilaksanakan dengan cermat. Kemajuan iptek, pengalaman dan simakan layanan, menjamin mutu kerja sekaitan membran.

#### CARAKERJANYA

A. Air umpan memasuki sistem dan mengalir di dalam kompartemen resin/membran. Sebagian aliran umpan bergerak sepanjang bagian luar membran untuk mencuci/membilas ion-ion yang tak dikehendaki.



Gambar 48 : Cara kerja deionisasi kontinyu

- B. Resin menangkap ion-ion terlarut.
- C. Arus listrik mendorong kation yang tertangkap lewat membran kation, sedangkan anion lewat membran anion.
- D. Membran permeabel kation memindahkan kation keluar dari kompartemen resin tetapi menghalangi anion agar tetap di aliran limbah.
- E. Membran permeabel anion memindahkan anion keluar dari kompartemen resin tetapi kation tetap di aliran limbah, tak dapat masuk.
- F. Aliran limbah menggelontor ion-ion pekat dari sistem.
- G. Air produk keluar dari sistem.

Jelaslah bahwa kompartemen resin makin encer (tanpa ion) sedangkan limbah berisi ion-ion pekatan.

#### AKHIRULKATA

Masalah air bersih/murni untuk berbagai keperluan domestik dan industri, akan semakin pelik dan ketat persyaratannya.

Teknologi membran, baik RO, UF, MF, NF, ED, DI, masing-masing berkeunggulan khas dan agar efektif maka perlu konfigurasi kombinasi sesuai kondisi dan tujuannya.

Layanan iptek, profesional rekayasa membran merupakan inter-grasi berbagai *know-how* dan pengalaman (lihat Tabel Pancagatra Sistem, akhir Bab 2).

Sistem lingkungan yang perlu mendapat perhatian:

1. Air dan Air Limbah  
Pemantauan lapangan dan analisis laboratorium (organik/logam) meliputi pH, BOD /COD, kandungan padatan, uji nitrogen, analisis logam, uji koliform dan lain-lain. Organik, pestisida, pelarut.
2. Limbah B3 (Bahan Beracun Berbahaya)  
Penyidikan termasuk ignitabilitas, korosif dan reaktivitas, dan lain-lain. Programnya adalah pengumpulan dan penanganan cuplikan, analisis lab, petunjuk penanganan/pembuangan teknis.
3. Pangan dan Produk Susu  
Prosedur kontrol mutu rutin sampai metodologi analisis kompleks konfirmasi ranah masalah. Segala peringkat analisis mikrobiologis termasuk cacah plat, analisis koliform, isolasi dan penghitungan patogen pangan, uji antibiotik, identifikasi genera/spesies. Analisis kimia ter-

hadap pengukuran lemak dan protein, analisis gizi, uji komponen or-ganik/anorganik, pantauan  $p^H$ , analisis logam/logam berat, uji kolorimetri, aneka cara ekstraksi.

#### 4. Bioassay - Pantauan Racun

Industri/kantor memerlukan identifikasi sumber limbah/pence-mar/racun dan pemantauan mutu sesuai standart pemerintah. Penilaian lapangan aliran limbah, analisis lab paripurna. Analisis in-formasi bioassay. Bioassay dapat berupa uji statik (screen limbah racun potensial), bioassay lanjut, bioassay lengkap.

#### 5. Operasi

Manajemen operasi, penggunaan awal fasilitas, pelatihan personalia, pemeliharaan/perawatan/perbaikan, program cuplik - uji, tinjauan proses menyeluruh, survei industri, kontak instansi, manual O dan M, rekayasa nilai.

#### 6. Manajemen Proyek Iptek - Konstruksi dan Operasi

Manajemen proyek meliputi tinjauan proyek, optimasi proses lakuan, perencanaan, spesifikasi, prakiraan budget. Manajemen konstruksi mencakup pemilihan peralatan dan penilaian, procurement, pemlai-an/pemilihan subkontraktor, koordinasi dan ekspedisi jejak/tahap kritis, laporan perkembangan inspeksi rutin. Operasi meliputi start-up fasilitas, operasi fasilitas secara optimum, manajemen pencatatan, pemeliharaan (perbaikan preventif dan kecil, perbaikan besar, trouble shooting dan keadaan darurat. Kekeliruan pemilihan sistem merusak komponen dan sebaliknya.

## PUSTAKARUJUKAN

*AIChE, Annual Meeting*, 1-6 November, Miami Beach - FL., 1992

*AIChE* (American Institute of Chemical engineers), *ACS* (American Chemical Society), *ACerS* (American Ceramic Society), berbagai dokumen perkembangan dan temu iptek.

*AIChE, Continuing Education (for the 1990's and beyond)*, 345E47SNY, William Eykamp etal.

*AIChE, Spring National Meeting*, 29 Mar - 2 April (New Orleans, LA), 1992

Aimar, P., et al/eds, *Engineering of Membrane Processes*, Garmisch - Par-tenkirchen/Bavaria (13-15 May) Conf., 1992

AJ.Hartomo (1992), berbagai buku perihal polimer, terbitan Andi Offset, Yogyakarta (produk & proses).

AJ.Hartomo (draft), *Kamus Mutakhir Istilah Kfmz'a*/Jakarta

AJ.Hartomo, komunikasi iptek pribadi para pakar polimer Jepang, Korea, Italia, Jerman, Perancis, Swiss, Belanda, Inggris, Kanada, Swedia, Spanyol, Turki, India, dll.

AJ.Hartomo (1984-1992), mengajar/kuliah termasuk polimer, Kalab Mak-romolekul & Kristalokimia, aneka penelitian berbagai makalah iptek polimer/membran temu-temu ilmiah di ASEAN, Jepang, Australia sampai amerika Serikat.

- ASTM, *Materials Research and Standards*, vol. 1101-1102, 1983
- Barnes, C, *The Skin Alternative*, ABP, Perth, 6-9 Feb., 1989
- Berbagai Abstracts: Chemical Abstracts, Chem.Eng. Abstracts, Current Contents, Engineered Materials Abstracts, Engineering Index, Polymer Contents dll (Koleksi Pribadi).
- Cabe, Mc & Smith, *Unit Operations of Chemical Engineering*, ed. 2, McGraw-Hill, NY., 1967
- Chem, Asahi, *Manual for Processing Ultrapure Water*, Tokyo -100, 1985
- Chen, Vicki, *Surfactant Structure to Memtech*, CMST, Kensington, 1989
- Chris Fell pir, *Membrane News* 2-2 (1989), 2-1 (1990) (Australia)
- Eykamp, W., Sabbatical Leave & Workshops, Australia.
- Elsevier Science Publishers, berbagai jurnal sehubungan polimer, kom-posit, material/bahan, mutakhir s/d 1992.
- F.G.Feasey (ICI/UK), F.G.Helfferich (Pen State), W.Eykamp (UC-Ber-beley), J.L.Humphrey, T.A.Hatton(MIT), R.G.Griskey (Steven Tech), L.G.-Rublo (U.South Florida), C.D.Denson (Delaware), dll. *kumunikasi pribadi global*.
- Gregor, H.P., *Scientific American*, July, pp. 112-128, 1978
- Hach SA/NV (Belgique) > *Trousses d'Analyse et Laboratoires Portables*, 1992
- Harrison Group, Blagdon Pumps/Beauer, etc, Washington T&W, UK.
- Hartomo, A.J., *IMTEC*, UNSW - Sydney (Prof. Fane etal), 1987
- Hartomo, A.J., *Bimbingan Skripsi Para Mahasiswa ITS*, kerja sama riset de-ngan Dr. M. Mochtar, 1989-1991
- Hartomo, A.J., *Konsep Masukan Pengembangan Program Studi Iptek Bahan*, fakultas berbagai PTS, 1992
- Hartomo, A.J., *International Conference on Frontiers of Polymers and Advanced Materials*, SUNY - buffalo Joint, Jakarta, 8-15 Januari, 1993
- Hartomo, A.J., (organizing), *Chemindo - CPM - 1991*, Indonesia Chemical Society/Indonesian Polymer Network (ASEAN CUPS), bersama Prof. N.M. Surdia, dll.
- Ionpure, *Products & Systems for Process Water*, Lowell-MA, 1990

- Lacey, R.E., *Chem. Eng.*, Sept. 4, pp. 56-74, 1972
- , *Industrial Processing With Membranes*, Wiley-Interscience, NY., 1972
- Martin, D.F., *Marine Chemistry*, vol. 2, Marcel Dekker, NY., 1970
- Merck, *Rapid Test Handbook*, Darmsfadt D-6100 (Germany), 1987
- Merten, U., (ed), *Desalination by Reverse Osmosis*, MIT Pres, 1966.
- Millipore, *Alpha-Q* (Reagent Grade Water Purification System), Bedford -MA., 1987
- , *Continental Water Systems*, El Paso - TX, 1982
- Perry, R.H., *Chemical Engineers' Handbook*, ed.s, McGraw-Hill Kagakusha, Tokyo, 1973
- Peters, R.W., T.K. Chang, *Waste Water Treatment: Physical & Chemical Methods*, J.WPCF, June, pp. 599-608, 1983
- Prof. N. M. Surdia, Dr. Sugandi Ratulangie dkk, *sejawat-sejawat di Jalinan/Himpunan Polimer Indonesia*, serta Prof. A. Amiruddin dkk (*Himpunan Kimia Indonesia*), komunikasi.
- Rosario, Ernie del, *Coconut Proseccsing*, U. Philippines, Los Banos, 1990
- SK Menkes No. 173/Menkes/Per./VIII/1977, Per.Men. No. 01/Birhuk-mas/1/1985
- Sourirajan, S., *Reverse Osmosis*, AP, NY., 1970
- , *RO and Synthetic Membranes*, NRC Canada, 1977
- SPSJ, SCJ dll. (Japan), *ESMST*, FS dll (Europa) berbagai dokumen dan komunikasi ilmiah.
- The British Effluent & Water Assoc, *Water Quality Classification*, DS, 02, 1986
- U. Merten (dd), *Desalination by Reserve Osmosis*, MIT Press, 1966.
- Wallace. G.G., et al, Klauber, C, et al, *Reactive Polymers*, 18/1, August 1992.
- Winamo, F.G., *Air Untuk Industri Pangan*, Gramedia, Jakarta, 1986
- W. J. Cordon (Florida), G. Solt, H. W. Pohland, W. Lorch, B. J. Weissman, P. Jourdain, P. Foster dll., *kumunikasi pribadi global*

## Lamp. 1

# KIT ANALISIS AIR

Dahulu untuk menganalisis aneka parameter air, dari yang fisik (kekeruhan, dan lain-lain), kimia, biologis sampai radioaktif, sangat merepotkan dan harus selalu dilakukan di laboratorium. Atas jasa pakar kimia, kini hal itu tidak lagi menjadi masalah rumit. Analisis dapat dilakukan di lapangan setempat, cepat, cermat, jitu, bahkan dapat dilakukan langsung on-line pada alat-alat proses.

Adapun yang sering membutuhkan analisis air antara lain adalah:

- a). Limbah pertambangan.
- b). Pertanian (termasuk analisis kesuburan tanah).
- c). Akuakultur.
- d). Industri: air boiler dan pendingin (parameter tunggal/jamak).
- e). Kolom, bak kamar mandi.
- 0- Finishing/elektroplatingpermukaan (logam).
- g). Air limbah apapun.
- h). Pengkondisian air.
- i). Ekologi air, limnologi.
- j). Mutu air, berbagai bidang.

bahkan juga piranti monitor parameter air on-line praktis dan teran-dalkan, untuk industri, laboratorium, dan survei lapangan.

Lamp. 2]

# **ANEKA STANDAR AIR (DAN PERATURAN PEMERINTAH)**

## **AIR FARMASI/BIOTEKNOLOGI**

Di zaman iptek mutakhir ini, obat-obat baru terus dibuat, demi menopang kesehatan dan kesejahteraan manusia. Untuk memproses dan membuat obat-obat tersebut diperlukan sejumlah besar air yang amat sangat murni, tanpa kontaminan betapa pun sedikitnya. Peraturan di Far-makopia, standar yang kini lazim masih dianut kalangan Departemen Kesehatan, semua cepat ketinggalan zaman. Standar adanya bakteri dan pirogen makin ketat, bila perlu nol!

Zaman bioteknologi kian hadir. Prasyarat mutu air yang digunakan kian ketat. Kemurnian organik dan anorganiknya mutlak, tak dapat ditawar, untuk pembiakan jaringan sampai peragian (fermentasi) mutakhir. Berbagai karya penelitian dan pengembangan skala pilot di lab-lab biotek dilakukan dengan air ultramurni. Kotoran yang diizinkan tidak sekedar ppm (bagian tiap juta, mg/Liter) namun ppb (bagian tiap milyar) bahkan ppt (bagian tiap trilyun), misalnya logam beratnya. Jelas, cara-cara lama seperti filtrasi, penukar ion atau distilasi saja tidak lagi memadai.

Tabel: *Standar Farmakopia Amerika Bagi Air Murni \**

Komponen	Air Murni	Air Injeksi
HP	5,0-7,0	5,0-7,0
khlorida (mg/L)	0,5	0,5
sulfat(mg/L)	1,0	1,0
amoniam(mg/L)	0,1	0,1
kalsium (mg/L)	1,0	1,0
karbon dioksida (mg/L)	5,0	5,0
logam berat (mg/L)	0,1 (sebagai Cu)	0,1 (sebagai Cu)
zat teroksidasi	lolos uji penguangan	USP
PTT (padatan total terlarut, mg/L)	10,0	10,0
bakteri(cfu/ml)	100	50,0
batas aksi FDA (cfu / ml)	100	10
pirogen (Eu/mL dengan LALJ)	-	0,25

\*) dari USP edisi XXII Tafsir Ionpure, terus makin diperketat (Depkes RI niscaya lebih sigap mengikuti perkembangan iptek dunia).

Untuk mencapai mutu yang makin piawai, dan jelas lolos per-syaratannya, dalam mendesain sistem pemurniannya, dilakukan analisis kimia dan mikrobiologis suprateliti, baik di lapangan maupun di laboratorium, memakai ICP (plasma), AA-C (serapan atom/grafit), HPLC dan sebagainya.

Iptek membran, dalam hal ini osmosis balik (RO) dan ultrafiltrasi (UF) adalah kunci jawabannya. *State-of the art* bentuk modul-modul cartridge permeator amat dinamis dan piawai.

Pralakuan utama ialah filter multimedia, filter karbon (sterilisasi uap panas), sistem RO dengan piranti dan material kelas satu, bekerja terprogram komputer. Modul RO bertindak sebagai filter bakteri. Lebih 99% partikel, koloid, bakteri pirogen dan zat organik air dihilangkan, lebih 95% ion terlarut dicampakkan. Membran polisulfon tak terlalu peka sanitasi memakai khlor.

Deionisasi kontinyu air RO dan membuatnya menjadi bertahanan jenis listrik tinggi ( 10 M.Ohm-cm). Deionisasi kontinyu tidak memakai zat kimia namun listrik untuk regenerasi kontinyu, aman lingkungan, ekonomis, tak memerlukan perawatan berlebihan. Perpipaian semua bebas penyakit dan tahan korosi.

## AIRHEMODIALISIS

Osmosis balik telah diakui oleh Asosiasi Pengembangan In-strumentasi Medis/AAMI (Amerika) selaku cara lakuan air untuk air dialisis karena piawai menghilangkan aneka kotoran air. Protokol sanitasi bagi sistem RO harus dipatuhi secara ketat dan selalu dicatat selama operasi. Dari analisis air umpan dan produknya dapat didesain sistem yang efisien dan efektif.

Karena air dialisis amat kritis, berbagai kontaminan harus bersih alias hilang dari air produknya. Demikian pula pralakuan harus sempurna. Sanitasi memakai khlor terkadang memberi sisa khlor serta produk samping khloramin yang sangat berbahaya bila terbawa melintasi RO. Itulah sebabnya, sebagaimana standar AAMI-1990, filtrasi karbonnya harus beberapa kali seri dengan pantauan teratur. Juga diperlukan deionisasi agar kandungan fluorida, nitrat dan aluminium memenuhi syarat.

Tabel: *Standar Mutu Air AAMI \**

Kontaminan	Kadar maksimum (mg/L)
Kalsium	2 (0,1 m Eq/L)
Magnesium	4 (0,3 m Eq/L)
Natrium	70 (3,0 m Eq/L)
Kalium	8 (0,2 m Eq/L)
Fluorida	0,2
Khlorida	0,5
Khloramin	0,1
Nitrat (N)	2
Sulfat	100
Tembaga, Barium Seng	0,1 masing-masing
Arsen, Timbel, Perak	0,005 masing-masing
Khrom	0,014
Kadmium	0,001
Selenium	0,09
Aluminium	0,01
Raksa/merkuri	0,0002
Bakteri	200cfu/mL

\*) Sudah ditetapkan Lembaga Standar Nasional Amerika sejak 1980. Siap terus disempurnakan. Standar Indonesia perlu juga terus direvisi.

## AIR ELEKTRONIKA

Pabrik-pabrik semikonduktor, komputer, mikroelektronika, in-dustri-industri material canggih, juga memerlukan air. Air untuk itu berprasyarat mutu paling ketat, keras, dibandingkan industri lainnya. Yang harus dihilangkan semutlak mungkin tidak sekedar kontaminan anorganik dan zat organik total (TOC) melainkan juga kotoran partikel dan bakteri sampai ukuran sekecil angstrom (sepersepuluh pangkat sepuluh meter).

Dilakukan pengolahan awal penyaringan multimedia (partikel), karbon (organik/khlor), pelunak (Ca, Mg, F<sub>c</sub>), sehingga membran film tipis RO terlindung dari kerak. Membran paling efektif melenyapkan silika, optimum rejeksi ionnya, memadai kompatibilitas p<sup>H</sup>-nya, yang dipergunakan.

Deionisasi kontinyu meningkatkan tahanan jenis, menjaga mutu deionizer bed-campur, serta mutu air produk konsisten. Pensteril uV mutlak perlu. Airnya sampai 18 mega ohm-cm (25°C), dengan silika dan TOC rendah sekali. Masih pula diberi filter mikropori dan aliran tangen-sial menjelang dipergunakan. Air selalu beredar agar tak terjadi kolonisasi bakteri. Pemipaan dari material inert.

Di antara berbagai prasyarat dan standar, dicantumkan di sini dua petunjuk himpunan/lembaga ilmiah sekaitan (Amerika). Negara-negara maju lain berprasyarat setara dan terus disempumakan. Bila bangsa Indonesia sungguh hendak menggarap elektronika secara benar (termasuk hardware), peraturan yang sudah usang dan pelaksanaan yang asal-asalan niscaya diperbaiki total. Tidak boleh ditunda-tunda penggarapan-nya.

## AIR INDUSTRI

Zaman industri kini tengah gencar menerpa Indonesia, beriring era iptek dan informasi. Perkembangan industri mutakhir amat laju, makin canggih. Untuk pemrosesah menghasilkan produk piawai, diperlukan sejumlah besar air dengan mutu prima.

Beberapa contoh keperluan misalnya sekaitan elektrocoat, manu-faktur kimia, umpan boiler, pangan dan minuman, pembuatan gelas, koo-metika, pakan streril (hewan), air pendingin, pembangkit listrik, pencucian dan banyak lagi lainnya.

Tabel: *Petunjuk Air Murni SEMI -1989*

Parameter Uji	Dapat dicapai	Dapat diterima	Waspada	Awas Bahaya
residu, ppm	0,1	0,3	03	03
organik total/TOC, ppm	0,02	0,05	0,1	0,4
Cacah parttkel/liter	500	1000	2500	5000
Cacahbakteri/100mL	0	6	10	50
Silika larut (SiO <sub>2</sub> ) ppb	3	5	10	40
Resisti vitas, Megobim-cm	18,3	17,0	17,5	17
KAT!ON(ppb)				
Aluminium	0,2	2,0	5,0	*
Amonium (NH <sub>4</sub> )	0,3	0,3	0,5	*
Khrom (Cr)	0,02	0,1	0,5	*
Tembaga (Cu)	0,002	0,1	0,5	*
besi (Fe)	0,02 v	0,1	0,2 <sup>^</sup>	»
mangan (Mn)	0,05	0,5	1,0	»
Kaliumflc	0,1	0,3	1,0	4,0
natrium (Na)	0,05	0,2	1,0	5,0
Seng (Zu)	0,02	0,1	0,5	*
ANION (ppb)				
bromida (Br)	0,1	0,1	03	*
khlorida (Cl)	0,05	0,2	0,8	*
nitrit(NO <sub>2</sub> )	0,05	0,1	03	»
nitrat (NO <sub>3</sub> )	0,1	0,1	0,5	*
fosfat (PO <sub>4</sub> )	0,2	0,2	03	*
sulfaKSCU)	0,05	0,3	1,0	*

\*) Nilai-nilainya belum disepakati semua pihak.

Sementara itu *American Society of Testing and Materials (ASTM)* juga memiliki prasyarat/standar tersendiri yang ketat:

Tabel: *Petunjuk Air Mutu Elektronika ASTM*

Assay	Grade			
	E-I	E-II		
Resistivitas (Megohm - an)	1 <sup>st</sup>			
Silika(mikrogram/Liter)	*	15	2	0,5
partikel (lmikron/mL)	2	5	100	500
mikroba(uaprnD)			^	100
TOC(m.krogram/U)	»»	*	50	500
tembaga(mikrogram/U)	1		^	^
khlorida(mikrogram/L)	2		^	^
kalium(mikrogram/L)	Z		200	1000
natriuin(mikrogram/L)			en	500
padatanresidu(mikrogram/L)	10	50	2000	^
seng(mikrogram/U)	5		^	^

### AIRINDUSTRI

Air tak boleh mengandung kontaminan, karena menyebabkan kerak dan sumbatan, mengganaskan korosi dan sebagainya. Air bernuhi tingi, sesuai maksud penggunaan, makin dituntut. Ada prasyarat-pra-syarat minimum khas yang harus dipenuhi.

Sekali lagi iptek membran menjawabnya.

Salah satunya dengan deionisasi kontinyu, memakai umpan air baku dari air kran/ledengbiasa.

Filter multimedia dan karbon menghilangkan silt dan partikel, juga khlor dan zat organik agar tak menimbulkan fouling. Pelunak menghilangkan kesadahan berbiang besi, kalsium dan magnesium. Kesadahan air industri hanya boleh sekitar/di bawah 1 ppm agar tak ada masalan proses dan terjaga segala alat industri yang mahal itu. Lalu filter peng-hilang partikel sampai ukuran.5 mikron.

Baru kemudian dilakukan deionisasi kontinyu.

Industri kini dan nanti perlu semakin efisien, efektif, bersih, tera-wat alat-alat mahal canggihnya. Air industri tak lagi boleh sembarangan, misalnya air sumur dalam, apalagi air ledeng yang kurang terjamin mutunya.

Berbagai kelompok penggunaan air itu makin mengandaikan pem-rosesan paripurna dengan alat dan teknik piawai. Lazimnya piranti canggih bersistem prarakitan (*preassembled*) sehingga praktis, desain sem-purna (ditunjang CAD/komputer) dan terjamin mutu serta keawetannya. Pembuat membran biasanya melayani jasa-jasa penunjang pula.

### PERATURAN PEMERINTAH RI

Sekaitan pengawasan pencemaran air, Menteri Keschatan (SK Men. No. 173/Men.Kes./Per./VIII/1977) mengelompokkan badan-badan air selaku media buangan industri/tambang/rumah tangga, yang tak boleh begitu saja dibuang tanpa pengolahan.

Badan air kelas A, airnya digunakan untuk air baku, dapat diolah menjadi air minum (koagulasi, sedimentasi, disinfeksi). Badan air kelas B, airnya untuk pemandian dan pertanian yang hasilnya dimakan tanpa dimasak dulu. Badan air kelas C, airnya untuk perikanan darat, olahraga (kecuali renang, Ski dan selancar air), pesiar dan keindahan.

Peraturan pemerintah yang ditandatangani oleh menteri Prof. G. A. Siwabessy tersebut sudah barang tentu sangat berfaedah. Sesuai perkembangan iptek, pelestarian lingkungan dan taraf kemajuan masyarakat, perinciannya perlu lebih diperketat dan pengelompokan untuk penggunaan/pemanfaatan air khusus harus pula disempurnakan. Dan yang paling utama: pelaksanaan oleh aparat harus lebih konsisten. Pemerintah selaku pelayan masyarakat harus lebih bertanggungjawab. Pengambilan contoh dan pemeriksaan air minum, yang oleh pemerintah sendiri telah ditetapkan, harus dijalankan secara konsekuen tanpa mem-bebani masyarakat lebih lanjut. Masyarakat semakin maju, pemerintah tidak selayaknya tertinggal di belakang. Peraturan saja tidaklah cukup.

Tabel: Syarat mutunya (dari F.G. Winamo/1986).

Parameter	Kelas A		Kelas B		Kelas C	
	Diperbolehkan		Diperbolehkan		Diperbolehkan	
	minim- um	maksim- um	minim- um	maksim- um	minim- um	maksim- um
I FISIKA						
Suhu (°C)		suhu udara		uhu udara		uhu udara
II KIMIA						
BOD(mg/L)		3		3		3
Oksigen terlarut (mg/L)	6		4		6	
p <sup>H</sup>	63	83	63	83	6	9
zat terlarut		1000		1000		1000
III MIKROBIOLOGIS						
Golongan coliform (tiap 100 mL)		10000		1000		20000
Golongan coliform tinja (tiap 100 mL)		2000		400		4000

Catatan: Perhatikan dan bandingkan pula Peraturan Departemen Perindustrian (SII0071-75 dan seterusnya).

I

Tabel: Kewajiban Pemeriksaan Air Minum oleh Pemerintah bagi warga.

Parameter (satuan mg/L kecuali disebut khusus)	minimum diperbolehkan	maksimum		keterangan
		dianjurkan	diperbolehkan	

I KIMIA		nol	0,05	CR(6)
Anorganik		nol	0,05	CR(3)
Arsen		nol	1,00	
Barium		nol	1,0	
Besi total		nol	0,05	
Boron		nol	03	
Khrom				

	Kadmium	nol	0,01	
	Kabalt	nol	1,0	
	Mangan	nol	0,5	
	Nikel	nol	0,1	
	Perak	nol	0,05	
	Raksa	nol	0,005	
	Selenium	nol	0,01	
	Seng	nol	1,0	
	Tembaga	nol	1,0	
	Timbel	nol	0,05	
	Amonia	0,01	03	
	Khlorida	25	600	
	Khlorbebas	nol	nol	
	Flourida	nol	13	
	Kesadahan (OD)	IP	-	
	Sulfat	50	400	sebagai ion
	Sulfida	nol	nol	ion
	Wianil	nol	5	ion (uranil)
	Nitrat/Nitrit	nol	10	
Organik				
	Khloroform / C (ekstrak)	0,04	03	
	Herbisida	nol	0,1	
	Minyak/lemak	nol	nol	
	Fenol	nol	0,002	
	Pestisida:			
	bermacam	nol	0,001/0,056	
	Sianida	nol	0,1	ion
	Zat bereaksi metil		03	
II	RADIOAKTIVITAS			
	Gross - beta (PCi/L)	100	1000	
	Radium -226	1	3	
	Strontium - 90	2	10	

Sedangkan mengenai mutu air minum melalui Peraturan Men.Kes. No. OI/Birhukmas/1/1975, syarat-syaratnya:

Parameter (satuan mg/L kecuali di-sebut khusus)	Syarat-syarat			Keterangan
	minimum diperbolehkan	maksimum		
		dianjurkan	diperbolehkan	
I FISIK suhu (°C) warna Bau Rasa		5	suhu udara 50	pt-Co tak rasa tak bertau
II KIMIA Kekeruhan		5	25	silika
Derajat keasaman (p )	6,5	500	9,2	
Padatan total terlarut			1500	
Organik (sebagai KMn O4)			10	
Karbon dioksida ganans (CO2)			0,0	
Kesadahan total (OD)	5	75	10	
Kalsium			200	
Magnesium		30	150	
Besi total		0,1	1,0	
Mangan		0,05	03 13	
Tembaga		0,05	15	
Seng		1,00	600	
Khorida		200		
Sulfat		200	400	
Sulfida			0,0	
Fluorida	1,0		2,0	
Amonia			0,0	
Nitrat			20,0	
Nitrit			0,0	racun
Fenolik		0,001	0,002	racun
Arsen			0,05	racun
Timbel			0,10	racun
Selenium			0,01	racun racun
Khrom			0,05	(r/6)
Sianida			0,05	racun
Kadmium			0,01	racun
Raksa			0,001	
III RADIOAKTIVITAS:				
SinarAlfa(Jic/mL)			10 <sup>9</sup>	
SinarBeta(<Xc/mL)			10*	

<b>rv</b>	MIKROBIOLOGI: Kuman parasitik Kuman patogenik Golongan coli (tiap 100 mL)			0,0	
				0,0	
				0,0	

### Kewajiban Pemerintah Air Minum oleh Pemerintah bagi Warga

Jumlah penduduk yang dilayani	Jumlah contoh air minum yang harus diambil/diperiksa pemerintah	Selang waktu pengambilan
Sampai 20000 jiwa	Tiap 5000 penduduk satu contoh air untuk 1 bulan	1 bulan
20000-50000 jiwa	Tiap 5000 penduduk satu contoh air untuk 1 bulan	2minggu
50000-100000 jiwa	Tiap 10000 penduduk satu contoh air untuk 1 bulan	1 minggu
lebihdaripadaOOOOO	Tiap 10000 penduduk satu contoh air untuk 1 bulan	tiap hari

Catatan: Dalam hal pemerintah tidak/belum mampu menyediakan air bersih bagi warga negara yang telah membayar pajak, harus dicari jalan keluar. Fasilitas publik merupakan tugas dan kewajiban pemerintah. Itu adalah hak warga negara yang mendasar. Sebagaimana transportasi, listrik, pendidikan, telekomunikasi, maka soal sarana air bersih bila perlu dapat di-wastakan, ditangani masyarakat sendiri. Pemerintah bijaksana memperhatikan hak-hak warga negaranya. Fasilitas publik yang baik adalah ukuran kemajuan pembangunan menyeluruh sampai ke pelosok daerah, tanpa kecuali.

### Lamp. 3

## **STATE OF THE ART MEMBRAN SEDUNIA**

Iptek membran melaju dengan cepat. Berbagai negara di dunia saling ber-lomba. Di Indonesia, iptek membran sebenarnya sudah menancap sejak awal 1980-an. Tim ITB dalam rangka proyek (kimia) kerjasama ASEAN (Prof. Oei, Dr. Susanto, Drs. Hadi, et al), juga Dr. Ir. Susi Praptowidodo et al, dalam sisi engineeringnya, bergumul di situ. Penulis, juga Dr. Mochtar (Pasuruan) pada medio kedua 80-an mengumpukan soal gula dengan membran. Acara/kunjungan iptek membran (penulis et al) langsung ke Australia, Jepang, dan sebagainya. Di sisi bisnis industri, akhir 1980-an mulai menggejala di Indonesia. Penulis dan kalangan PTS lain terus turut memacunya.

#### EROPA1992

Tokoh-tokoh iptek membran Eropa: Pierre Aimar (Toulouse -Perancis), John A. Howell (Bath-UK), Enrico Drioli (Italia), M.H.V. Mulder (Twente, Ned.), Heiner Strathman (Stuttgart - G), G. Jonsson (Denmark), dan lain-lain, selain guru besar, juga praktisi riset mutakhir membran. Di Eropa, fokus pemacuan iptek membran meliputi hidrodinamika (kinerja tinggi, aliran pulsatif, aliran Sekunder), desain dan dinamika (modul, adsorpsi, fouling, dan lain-lain), transport

(membran rapat, berpori, efek hidrodinamik/hstrik), pemisahan (membran cair, fraksionasi protein), reaktor  $TM^m * TM^h / TM^h$  terapan lingkungan hidup. flrnal-jurnal ilmiah membran banyak diterbit-kan di Eropa.

Di bidang hidrodinamika, H. Futselaar, dan kawan-kawan (Twente) mengkaji modul membran serat cekung (hollow fiber/HFF) bcrumpan transversal Counter Current. Mikrofiltrasi arus silang (*Cross Flow*) untuk optimisasi tekanan dan kecepatan aliran transmembran dikembangkan X-flow BV- Ned. Filtrasi geser rotasi biosuspensi! disimak Balitbang Biotek Jerman (K.H. Kroner, dan kawan-kawan). Di Perancis, P. Pauleer, dan kawan-kawan (URA-CNRS) memacu teknik filtrasi: aliran pulsatif membran mineral. Mekanisme filtrasi cake dikaji di Inggris.

J. Lenoir, dan kawan-kawan (LAGEP - Perancis) mengembangkan aliran tak tunak (pulsatif) membran tubular  $Wff^{***}$  serupa juga dikerjakan oleh H.B. Winzeler (Swiss). Sedangkan R.W. Field, dan kawan-kawan (UK) menerapkannya untuk pembiakan sel kapang.

Di bidang pervaporasi dan distilasi membran, W<sup>h</sup> Versteeg dan kawan-kawan (Ned.) membuat terobosan baru dalam dehidrasi<sup>h</sup>darut organik. Desain dan optimisasi pabrik dikembangkan oleh W.R Schneider, dan kawan-kawan (DC GmbH). Desain modul kaskade ekS pelarut didorong oleh Hoechst. Pervaporasi dengan kempaan uap VOC (zat organik atsir) disimak R.D. Behling, dan kawan-kawan. Tahanan antarmuka pada permeasi membran rapat  $J^h iF^h$ ; shule Coburg (Jerman). Distilasi membran va<sup>h</sup>um dikembangkan oleh H H Nijhuis, dan kawan-kawan (Puslit Agrotekmk Nederland).

Fraksionasi membran digeluti oleh J.T.M. Sluijs (Ned J, • Se-e-tara masalah-masalah fouling dikaitkan dengan berbagai gejala. transmisi, pemerosotan fluks serta adsorpsi.

Sekaitan transmisi banyak karya digencarkan oleh G; T<sup>h</sup>, dan kawan-kawan (Swedia), P.L. Johansen (Denmark<sup>h</sup> dan lain-lain. Menurunnya fluksi pada fouling dikaji antara lain oleh kalangar, P. Airl (U/Paul Sabatier) yang membandingkan  $P \ll J^h$  amatan empiris, G. Arroyo/C. Fonade yang mencegah fouling UFCross flow dengan jet intermUen, G. Daufin, dan kawan-kawan sekaitan rru-krofiltrasi whey.

Fouling sehubungan adsorpsi digumuli juga. Mikrofiltrasi larutan protein (R. Bowen, Swansea/UK), agregat protein dan sebagainya.

Membran cair (G. Brunner/Hannover) lipida diemban HFF dipakai untuk memperoleh penisilin dan sintesis enzimatis asam G - aminopeni-lilinat. Pemisahan asam laktat dan L-leusin dibandingkan memakai membran cair (I. Rothova, Slovak/Tsekoslovakia), dan banyak lagi.

Bidang pemisahan gas merupakan terapan subur iptek membran. R. Hughes, dan kawan-kawan (Salford/UK) mengkaji pemisahan dalam permeator tahapan internal. Kaskade pemisahan gas didisain di daerah aliran Knudsen oleh D.A. Waite et al (UK). Sel uji membran dengan dengan transfer massa seragam, untuk karakterisasi membran perusahaan gas, digarap oleh J.W. Van Heuven, dan kawan-kawan (Kantor Riset Lingkungan & Energi, Nederland).

Reaktor membran untuk membuat bahan kimia secara elektrokimia dipacu oleh K. Scott (Teeside UK). Osmosis balik (RO) untuk pemisahan larutan reaksi berkatalis homogen digencarkan di Rusia (CIS) oleh K.I. Zamaraev, dan kawan-kawan. Sedangkan K. Van't Riet et al (Wageningen/Univ. Pertanian Ned.), memajukan pemisahan produk samping khas dalam reaktor membran.

Di bidang lingkungan hidup, iptek membran juga berjaya. Di Eropa antara lain digalakkan di Universitas Twente (M. Mulder, dan kawan-kawan). Lembaga Riset Peternakan Nederland (H.C. Van der Horst dan kawan-kawan) memakai nonofiltrasi untuk memekatkan dan menghilangkan mineral pada produk susu. Daur ulang limbah industri menggunakan mikrofiltrasi membran diajukan oleh J.M. Chiapello, G. Pierrard, dan kawan-kawan (Perancis). Air limbah, dengan denitrifikasi biologis membran UF, dapat dijadikan air minum sehat lagi (A. Beaubien/CIRSEE, Perancis).

Proses-proses membran pun dikembangkan dengan menggunakan bantuan tenaga listrik khas. Para sejawat pakar membran di Finlandia (T. Uusluoto, J. Nuortila - Jokinen, dan lain-lain mengembangkan UF Elektro bagi industri pulp dan kertas yang amat maju di sana. Pemisahan mak-romolekul diperbaiki dengan cara gabungan UF dan elektroforsis Q.L. Orozco, Perancis).

Elektrodialisis juga merupakan panggung iptek semarak. Modul ED lilit-spiral disempurnakan oleh G.S. Solt (Cranfield/UK). Huls AG (Jerman) menggencarkan pengambilan kembali limbah asam sulfat secara ED/dialisis. Pabrik khlor-alkali teknik membran direkayasa canggih oleh W.McRae (Swiss).

Eropa cukup gegap gempita iptek membrannya (terutama berba-han polimer, ada yang keramik/komposit). Himpunan Iptek Membran Eropa (ESMS), apalagi ditopang berbagai pustaka ilmiah/jurnal (J. Membrane Sci, Membrane Technol, Filtration & Separation, Desalination, dan masih banyak lagi) bermarkas di Eropa, sangat mendukung. Suasana ilmiah perguruan tinggi, dan profesi industri, semua amat mendukung. Selayaknya hal itu merupakan cermin bagi PTN/PTS kita yang masih semrawut karyanya, ditunjang kalangan praktisi lain. Pengolahan kreasi-inovasi produktif patut segera dipacu, terlebih-lebih di kalangan swasta. Swasta itu pelaku kemajuan iptek di mana-mana, birokrasi mendukung. Para sejawat dan calon pakar membran Indonesia pun layak terus mengikuti jurnal-jurnal lain sejagad, Chem. EngJ., J. Appl. Polym-Sd, JACS, Macromolecules, J. AcerS, dan sebagainya.

Membran berpori merupakan bidang dinamis. Kajian-kajian di situ di antaranya adalah reaksi oksidatif sistem sel bahan bakar bermembran elektrolit oksida padat (Institut Katalisis CIS), bioreaktor membran reaksi enzimatis lipase (Wageningen), film adsorpsi surfaktan (Tseko-Austna) pembersihan fouling protein pada membran (K.J. Kim), segala zahrfasionasi protein (UK), membran nanofiltrasi amfolit baru (Nederland/TNO), disain baru sistem elektrodialisis (Perancis), filtrasi cepat bersuspensi dengan medan listrik (GBF - Jerman), modul HFF baru (TU-Wiena), pemisahan protein dan penirgerakan enzima (KH-Jerman), pemisahan membran hidrogel (W. Yuxien), pemerian struktur dengan konsep teori informasi (PI - Rusia), partikel lateks berpendar mengukur selektivitas membran (ENSIC - Perancis), fouling membran oksida logam bagi larutan pektin (TU Szczecin/Polandia), pemisahan emulsi air dalam minyak W/O (ICP - CIS), fluks permeat dan rejeksi (Lappeenranta/Finlandia), ciri-ciri ultrafiltrasi laminar (IHMT- CIS), sifat hidrodinamik dan pemisahan membran PAN (IPC - Jerman), optimisasi konfigurasi modul seri (CNRS-URA 192, Perancis), membran polimer tunggal dan blend (S. Sahastrabudhie), alihan massa dan momentum turbulen pada saluran UF tegak lurus (Lund-Swedida) dan sebagainya.

Pada penerapan pangan dan air, perhatian cukup besar pula. Penekanan susu skim secara RO (Oviedo-Spanyol), UF dwi tahap atas hidrolisat kasein (Y. Pnliot), Yoghurt dari konsentrat susu skim secara UF/RO (Spanyol), menghambat pembasahan membran akibat adsorpsi protein (Wageningen), lakuan air limbah secara gabungan UF/gludge aktif (TU Silesian - Polandia), penghilangan Fe dan Mn (TU Bourgas - Bulgaria), RO air limbah (TU Hamburg), transport garam-garam sulfat lewat

membran komposit (Malaga-Spanyol, TU- Denmark), membran rapat kompleks polielektrolit (IPC - Jerman), amonia dari air limbah (Xu Shi-Chang) dan sebagainya.

Khusus masalah membran rapat, kinetika Donnan dan dialisis netralisasi (Pusat Komputasi Riset - CIS), membran RO baru selulosa asetat/batubara (U. Prishtina - Yugoslavia), termodinamika membran Zr (IV) PAA (Szczecin TU, Polandia), membran gelatin baru dan dinamikanya (ICWC - CIS), pengembangan polisulfon membran komposit (U. Malaga/Valladolid, Spanyol), poliimida bersegmen polifenilensulfida (TU Berlin), analisis non- idealitas pemisahan gas memakai membran (Salford U), membran PVA baru untuk pervaporasi (Zhang Yuzhong), pengambilan piridin dari larutan berair (U. Calabria/RIMCR, Italia), pengaruh sifat substrat membran pervaporasi (A. Fane), pemisahan strontium (I. Eroglu/Turki), dan lain-lain, terus digencarkan.

Komunikasi antar sejawat pakar membran polimer (dan keramik) terus dijalin.

## DIAMERIKA

Amerika masih tetap merupakan pemuka dalam iptek membran. Hampir seluruh perguruan tinggi dan lembaga riset sekaitan menggen-carkannya. Perusahaan membran terbesar dunia masih ada di sana.

Dalam agenda ilmiah dan komunikasi tercatat para pakar aktif menonjol, antara lain Jimmy L. Humphrey (Austin - TX), V. Van Brunt (USC - Columbia), K.R. Amarnath (Palo Alto - CA), Satya Chauhan (Columbus - OH), Richard D. Noble (UC - Boulder), Norman Li (Des Plaines - IL), G. Belfort (Troy-Ny), V.K. Venkataraman (DOE-WV), W.J. Koros (Austin - TX), Ian Roman (Newport - DE), R. Prasad (Tonawanda - NY), J.T. Hzu (Bethlehem - PA), E. Pirouztale (Spring House - PA), R.M. Counce (Knoxville - TN), M.R. Ladisch (West Lafayette - IN) Paul Liu (Pittsburgh - PA), R. Godind (Cincinnati), Daniel Hammer (Ithaca - NY), Jer-rey Chalmers (OSU), K.K. Sirkar (Newark - NJ), D. Bhatta Charyya (Lexington - KY), J.W. Hammond (Wetchester - PA), dan banyak lagi, bergerak pada litbang rekayasa. Kajian fundamental struktural lab juga masih di bawah panji Amerika.

Sasaran kajian iptek mutakhir diarahkan pada material dan proses polimernya, rekayasa mendasar dan terapannya, bukan bahan canggih-cerdas, teknologi sistem dan komputasi, bioteknologi, energi dan lingkungan hidup, pangan dan obat. Karena banyaknya, tidak mungkin

mencantumkan topik-topik tersebut dalam lampiran ini. Berbagai himpunan ilmiah dunia (juga di AS utamanya) melibau persoalan iptek membran, karena amat cerah masa depannya juga sekaitan teknologi air.

### JEPANG DAN POLIMER

Beberapa himpunan profesi ilmiah Jepang menaruh perhatian besar atas iptek membran termasuk para pakar polimernya. Mereka juga meneliti, mengembangkan, berkomunikasi sedunia/global, terutama di kawasan Pasifik.

Selain bidang rekayasa terapan membran, di Jepang dasawarsa 1990-an ini teramati dinamika besar bidang membran biopolimer (biomembran), misalnya untuk sensor bioteknologis.

Membran enzim nirgerak/syarafi (A. Higuchi dan kawan-kawan, Meiji Daigaku), membran fibroin sutera (M. Demura, dan kawan-kawan -Tokyo), pembuatan film tipis LB (T. Kunitake - JRDC), pengembangan elektrokimia film kompleks polilon (S. Kunugi Kyoto DK), Stalisis porfirin pada membran polipeptida (M. Satoh dan kawan-kawan TIT), transfer elektron membran keratin (K. Yamasita dan kawan-kawan, Nagoya), bakutindak polipeptida amfifilik dengan membran dwilapis folipida (T. Takagishi, Osaka PU), pembuatan dan fungsi dwilapis tanggap rangsangan (H. Yoshimizu Nagoya), transfer efektif komponen membran sel (J. Sunamoto, Kyoto D), membran dwilapis ber-gugus viologen (T. Miyashita, Tohoku D), dan banyak lagi. lamnya, terus dikembangkan kini.

Membran Nilon-6/POE graft (T. Shimidzu, Kyoto D) untuk per-vaporasi, berbagai membran blend dan IPN polimer, semua juga dikaji tanpa henti.

Berbagai perusahaan membran Jepang seperti Kurita, juga dengan alih teknologi (Millipore - USA), terus makin menyempurnakan produk dan prosesnya.

### AUSTRALIA BAGAIMANA?

Di negara tetangga terdekat Pasifik kita, Australia, kiat iptek membrannya juga menggebu. Tokoh-tokohnya antara lain para sejawat yakni Chris Fell, Tony Fane, V. Chen, Kevin Marshall, Tony Franken, Mel Dickson, Peter Farrell, Druce Balstone, Hans Coster, Kyu-Jin Kim, Greg Leslie, Richard Gibson dan kawan-kawan.

Dengan upaya ilmiah - sistematis - profesional, dalam beberapa tahun saja iptek membran di negeri kanguru itu telah kokoh. Pusat teknologi membran dan pemisahannya, secara swadaya mandiri, dan bergaul bakutindak global, cepat maju, dikenal dan dihormati sampai Eropa. Bermula dari upaya lab kecil, menukik ke terapan praktis (pabrik gula, pemisahan mikroemulsi dan niisel/pangan, kulit buatan, desalinasi air padang gurun clan laut, dan sebagainya). Kerjasama dengan industri, sesama swasta, direSaskan Para pakar dari Eropa, Amerika sampai Jepang bahkan ASEAN diundang berpartisipasi.

Kini sumbangan ilmiah dan kehadiran temu ilmiah global sejawat-sejawat Australia tak diragukan lagi.

Catatan: Di Indonesia, walau telah sedasawarsa, kalangan penelitiannya masih mencari bentuk dan berusaha bertahan tekun. Hasil lit-bang belum jdas terapannya. Agaknya pemerintah tak dapat sendiri. Dunia swasta rdscaya mengambil prakarsa dan langkah nyata.

Lamp. 4

## **FORMAT DIKLAT MEMBRAN**

Di Indonesia pendidikan formal iptek membran belum dimasukkan dalam struktur kurikulum PTN/PTS. Baru penulis (saat di Surabaya) dan grup membran ITB (Bandung) meretaskannya ke dalam tugas akhir (skripsi) mahasiswa S-1. Padahal perusahaan, industri dan bisnis membran flakarta telah bergerak dalam sedasawarsa terakhir, makin gencar. Industri pengolahan pangan, air, kimia, farmasi/medik, elektronik, mulai dimasuki.

Penulis dan kawan-kawan, selain via perkuliahan, terus berkamu-nikasi sejawat global. Penulis berprakarsa, sudah saatnya diadakan pengencaran dan pemopuleran ke masyarakat. Terutama bersasaran teknisi rekayasa:

pangan,  
airbersih/mumi,  
proses kimia (boiler, dan lain-lain),  
farmasi /medik (ginjal buatan, obat),  
elektronika (proses semikonduktor, IC, dan lain-lain),

diadakan kursus singkat, dan juga pengadaan buku-buku sumber. Langkah-langkah *joint-research semusim* selama ini terbukti tidak terlalu lebatbuahnya.

Dalam kerangka rekayasa dan teknologi pemisahan, kedudukan iptek membran amat jelas:

Distilasi,  
Ekstraksi,  
Adsorpsi,  
Membran,  
(ef. G.E. Keller II, J.L. Humpheey).

Pemisahan membran sendiri (ef. Dick Baker, Bill Eykamp) meliputi tujuh bidang cakupan utama:

Osmosis Balik (RO),  
Ultrafiltrasi (UF),  
Mikrofiltrasi (MF),  
Elektrodialisis (ED),  
Pemisahan Gas (GS),  
Pervaporasi (PV),  
Transport tergabung/dukung (FCT).

Adapun materi pokok tinjauan mencakupi:

Pengembangan historis,  
Pembuatan membran,  
Pemasukan ke modul, • , . . . i  
u

Isu-isu proses membran (selektivitas, biaya/produktivitas, kenandalan operasi = fouling dan stabilitas).

Seminar, kursus dan pustaka (buku, jurnal) juga patent, digalakkan Him-punan Kimia, Polimer, Fisika, bersama PTN/PTS dan industri/bisras dapat melaksanakannya. Para pakar memperkenalkan din dan karya mutakhirnya, membagikan pengetahuan dan pengalamannya. Kreanvitas dan inovasi produktif dijabarkan dan digencarkan. Yayasan pengembang iptek (YMT1, dan lain-lain) dapat bersumbangsih. Kiprah dan ranah swas-ta menjadi jaminan sukses berkelanjutan. Menciptakan momentum sederap awal memang paling pelik, juga mempertahankannya. Dunia in-dustri mulai tampak memperhatikan dan melakukan litbang. Im arah jitu! Dalam kaitan pemahaman mendasar, dua hampiran dapat ditem-puh:

Teoritis (fisika, kimia, komputasi),  
Orientasi pragmatis (proses),

Yang kedua (ef. T.A. Hatton, R.P. Cahn) dilingkupkan pada skema kerangka:

Pemahaman umum proses (pemisahan baru).  
Proses-proses membran.  
Pemisahan berbasis - kimia.  
Fraksionasi Aliran - Medan.  
Ekstraksi pelarut.  
Proses-proses adsorpsi baru.  
Ekstraksi superkritis.  
Proses-proses baru lain (HIGEE, dan lain-lain).

Yang sesuai bagi segmen industri proses/teknik kimia.

Bila tinjauan menekankan segi rekayasa mutu air bagi industri (ef. P. Krenkel, W.W. Eckenfelder), pengkondisian air industri (ef. C.C. Nathan, A.S. Krisher, J.O. Robinson), maupun lakuan air limbah canggih (ibid mutu air), dapat disimak dengan alternatif:

Mutu air: Sebab-akibat, penyidikan limbah, pengaruh ke air alam, kontrol dan daur penggunaan, lakuan dan peraturan.

Pengkondisian: Air dan pengotor, lakuan eksternal, lakuan air boiler internal, air pendingin dan lakuannya.

Air Limbah: Kriteria mutu, lakuan biologis, bagan-bagan alir proses, koagulasi dan sedimentasi, filtrasi, penukaran ion, proses membran, penghilangan nitrogen, disinfeksi (penghilangan kuman), adsorpsi, penanganan gludge, penghilangan fosfor, penggunaan ulang dan segi ekonominya.

Kerangka dapat diperluas ke lingkungan hidup dan energi.

Konsep (format) ini layak dan harus ditempuh apabila Indonesia hendak sungguh meraih era iptek, tinggal landas dan globalisasi, selaku ejawantah Kebangkitan Nasional Kedua secara efektif, khususnya sekaitan membran polimer. Cara-cara terserpih (ITB - ASEAN, AJH/ITS, dan sebagainya) yang lampau patut diperbaiki terus-menerus. Dan secara menyeluruh, kajian-kajian terapan tersebut perlu diimbangi kajian mendasar (fisika, kimia, komputasi) baik sekaitan struktur, energetika dan mekanistika material, maupun pemodelan konseptualnya (teori fraktal, dan lain-lain). Teknologi harus didasari ilmu dasar yang kokoh. Iptek material industri termasuk membran, dihampiri dari segi rekayasa; i maupun fisik dasar (MIPA). Pengelompokan orientasi pcnelitian/pe-ngembangan (PT, Lembaga, Industri) layak diperjelas ulang agar tidak

**tumpang tindih.** Segi-segi terapan praktis diserahkan kepada mekanisme terbuka/pasar, sedangkan pemerintah melakukan kajian mendasar saja yang mendukung. Lembaga seperti LIPI dan semacamnya kembali proporsional ke penelitian dan bukan pseudo-bisnis. Masyarakat dan swastalah yang bertanggungjawab atas inovasi teknologi komersial. Peneliti takbisa setengah hati.

Hanya dengan proporsionalisasi demikian, maka pengembangan kultur ilmiah dan profesi di tanah air dapat dipersegar dan efisien - efektif - produktif menyeluruh. Peneliti dan mahaguru memberi contoh kembali ke lab, bekerja mandiri otak tangan hati (*head - hands - heart*) penuh komitmen dan dedikasi. Kita bercermin pada pengalaman nyata bangsa-bangsa lain dalam menciptakan peradaban ilmiah dan profesi, kunci pokok menyongsong Abad 21.

Iptek membran dan penggelut-penggelutnya turut menjadi saksi. Tanda-tanda zaman niscaya dibaca jeli.

### Lamp. 5

## KUANTIFIKASI KONVENSIONAL MEMBRAN

Sifat pemerian laju transport membran ialah permeabilitasnya. Proses per-measi lewat membran polimer merupakan tritahap, yaitu pelarutan molekul ke permukaan datang, difusi melintasi membran, desorpsi pada permukaan-pergi. Hukum Henry ( $C = H^p$ ) dianggap berlaku, dengan C konsentrasi, H tetapan Henry (koefisien keterlarutan), p tekanan.

Molekul permeat berdifusi mengikuti Hukum Fick Pertama:

$$N = -D_f \frac{dc}{dx}$$

dengan N laju permeasi, D koefisien difusi, X jarak permeasi/film.

Bila D takgayut konsentrasi:

$$N = \frac{D}{L}(c_1 - c_2)$$

dengan L tebal membran, untukcairan. Bagi Gas:

$$N = \frac{D}{L}(H_1P_1 - H_2P_2)$$

dengan subskrip 1 di permukaan datang, 2 dipermukaan pergi.

Bila  $H$  dianggap fungsi suhu saja dan kedua permukaan membran sama suhunya, maka:

$$N = \frac{D(P_1 - P_2)}{H}$$

dengan  $P = DH =$  permeabilitas.

Bagi permeasi keadaan taktunak, jumlah permeat yang tertahan tiap satuan volume film sama dengan laju perubahan konsentrasi terhadap waktu:

$$\frac{dN}{dX} \sim \frac{dC}{dt}$$

Jelaslah dapat diturunkan:

$$\frac{dC}{dx} = -\frac{d}{dx} \left( \frac{dC}{dt} \right) x$$

yang tak lain merupakan Hukum Fick Kedua.

Untuk padatan hingga berkoefisien difusi tetap, dapat dicari jumlah total  $Q$  permeat yang melintasi film dari saat  $t = 0$  sampai  $t = t$ .

$$Q = \int_0^t \frac{dN}{dt} dt$$

Jadi  $Q$  meningkat linier terhadap  $t$ . Bagian linier diekstrapolasi ke sumbu  $t$ , pada  $t = X$  besarnya  $Q = 0$  dan

$$D = \frac{X^2}{6t}$$

dengan  $X$  senjang (tunda) waktu; cara empiris eksperimen mencari nilai  $D$ .

Pada permeasi cairan, difusivitas sangat gayut konsentrasi pelarut pada film plastik. Ada hubungan:

$$D = D_0 e^{aC}$$

dengan  $D_0$  (difusivitas pada konsentrasi pelarut nol) dan  $a$  tetapan (suhu tertentu) sedangkan  $a$  tetapan pemlastikan pelarut atas film.

Laju permeasi komponen tunggal:

$$N = \frac{D_0 (P_1 - P_2)}{H} e^{-aC}$$

Pengaruh suhu atas tetapan permeasi, koefisien difusi dan koefisien keterlarutan dinyatakan oleh persamaan Arrhenius bagi proses bersangkutan.

Bagaimana pengaruh morfologi polimer dan permeat, serta sifatnya? Permeabilitas berkaitan dengan suatu parameter khas (molekul penembus (permakhor). Koefisien keterlarutan berkaitan dengan tetapan gaya Lennard - Jones bagi gas terlarut. Kalor pelarutan (gas) dalam polimer juga terkait dengan tetapan tersebut. Koefisien difusi dan energi pengaktifan difusi berkaitan dengan diameter molekul (Michael - Bixler).

Berbagai konsep desain sistem telah dikembangkan di berbagai negara, khas bernuansa teknologi kimia.

Faktor pemisahan dirumuskan:

$$\frac{(C_A/C_B)P}{(C_A/C_B)R}$$

dengan  $a$  faktor pemisahan, sedangkan subskrip-subskrip  $A, B, P, R$  ialah senyawa permeat, senyawa acuan, permeat serta rafinat.

Norman Li (AIChE, dalam Perry) juga membahas proses dialisis dari pangkal tolak Hukum Fick. Bagi dialisis batch dengan transfer massa taktunak, persamaan lajunya:

$$kt = m \log \frac{C_0 - C}{C_0 - C_0}$$

dengan  $k$  tetapan laju dialisis,  $t$  waktu,  $m$  nisbah volume umpan terhadap difusat,  $C_0$  konsentrasi umpan,  $C$  konsentrasi dialisat.

Faktor seretan  $F$ :

$$F = 1 - 2,104 \left( \frac{S}{d_p} \right)^{-1} + 2,09 \left( \frac{S}{d_p} \right)^{-2} - 0,95 \left( \frac{S}{d_p} \right)^{-3}$$

dengan  $s$  diameter partikel difusi,  $S$  diameter purata pori membran.

Membran dialisis biasanya berpori. Selektivitas membran berkaitan dengan ukuran pori:

$$A = a_0 \left( \frac{r_p}{a} \right)^{-k}$$

dengan  $A$  luas difusi yang tersedia,  $A_0$  luas penampang lintang pori,  $r_p$  (r) jejari molekul,  $a$  jejari pori.

Berbagai desain dialisator dikembangkan. Sementara itu, gabungan antara dialisis dan elektrokimia, jadi dialisis dilakukan dalam medan (listrik), disebut elektrodialisis, juga berkembang.

#### Osmosis balik(RO)

Teori osmosis balik dapat bermodel kelarutan dan difusi. Bagi membran difusif homogen, laju permeasi tunak pelarut:

$$N_w = P_w \frac{A_p - A_{rt}}{L}$$

dengan  $N_w$  laju permeasi tunak pelarut melintasi membran,  $P_w$  per-meabilitas jenis:

$$P_w = \frac{C_w P_w V_w}{RT}$$

$C_w$  konsentrasi purata pelarut dalam membran,  $D_w$  difusivitas purata pelarut dalam membran dan  $V_w$  volume molar pelarutnya:

$$A_{rt} = \frac{RT}{V_m} \ln \frac{a_i}{a_{oi}}$$

dengan  $a_w$  keaktifan pelarut. Subskrip 1 dan 2 menyatakan sisi (per-mukaan) datang dan pergi membrannya. Bila larutan encer bertekanan tinggi atau terlarut BM tinggi, koreksi osmosis tidak penting dan per-samaan di atas tereduksi menjadi persamaan:

L

di depan.

Transfer terlarut lewat membran disebabkan oleh gabungan difusi molekul dan seretan pelarut.

$$N_s = -D_s \frac{dC_s}{dx} + k_s C_w$$

dengan  $N_s$  fluks terlarut lewat membran,  $D_s$  koefisien difusi terlarut lokal,  $C_s$  konsentrasi terlarut lokal pada membran,  $K_s$  koefisien kopling (gabungan) antara nol dan satu.

Koefisien rejeksi terlarut:

$$R_s = 1 - \frac{C_{s2}}{C_{s1}}$$

Sekaitan mekanisme penyaringan (penjaringan), bagi matriks mikropori isotropis acak, fluks pelarut tunaknya ialah:

$$J_w = \frac{K_w A_p}{T_w L}$$

dengan  $K_w$  permeabilitas hidraulic,

$$K_w =$$

$$\frac{\epsilon R^2}{20}$$

dengan  $T_w$  ketebalan pelarut,  $R$  jejari pori purata hidraulic,  $\epsilon$  porositas membrannya. Angka 20 adalah empiris sesuai anomali dan ketak-seragaman pori.

Terlarut berpindah oleh konveksi bersama pelarut lewat pon membran yang cukup memadai bagi terlarutnya.

$$N_s = K_w (1 - \langle \lambda \rangle) C_{s1}$$

dengan  $C_{s1}$  konsentrasi terlarut di larutan datang,  $\langle \lambda \rangle$  fraksi fluks pelarut murni yang melewati pori yang lebih kecil daripada terlarutnya.

Fluks nyata sering lebih kecil daripada prakiraan akibat polansasi kosentrasi. Artinya, misalnya pada desalinasi, bilamana air melewati membran, garam yang tertinggal memekat di dekat membrannya. Oleh karenanya, efisiensi membran merosot pelan-pelan seiring menebalnya lapisan garam itu. Serentak dengan penebalan/pemekatan itu, terjadi peningkatan tekanan osmosis larutan antarmuka yang memperhalu daya dorong atas air agar melintasi membrannya. Polarisasi kosentrasi juga dapat merusak permukaan membran yang peka.

Lapisan garam pada antarmuka dapat mencapai tebal tetap tertentu, akibat faktor berlawanan: transport konvektif garam ke membran oleh gerak air, serta difusi balik garam menjauhi membran akibat jen-jang/gradien dekat batas fasa.

$$F^* - C_{w1} (D_s + E) \frac{dC_s}{dy} = 0$$

dengan  $F$  fluks pelarut pada batas fasa,  $C_{w1}$  kosentrasi terlarut dalam larutan,  $E$  koefisien difusi Eddy,  $Y$  jarak tegak lurus ke batas fasa- Bagi aliran turbulen:

$$C_{sD} = \frac{C_{w1} \exp(-\frac{Y}{2F N_i})}{C_{w1} U_b f}$$

Tabel: Tekanan Osmotik Larutan NaCl (K)

mNaa	25°C	40°C	60°C	100°C
0,001	0,05	0,05	0,05	0,06
0,1	0,47	0,49	0,52	0,57
0,05	2,31	2,42	2,53	2,75
0,10	4,56	4,76	5,00	5,42
0,20	9,04	9,44	9,93	10,74
0,40	18,0	18,84	19,83	21,45
0,60	27,12	28,40	29,92	32,35
0,80	36,37	38,14	40,22	43,48
1,00	45,80	48,08	50,76	54,87
2,00	96,2	101,3	107^	115,9
3,00	153,2	161,6	171,0	184,2
4,00	218,9	230,5	243^	260,8
5,00	295,2	309,4	325,2	346,5
6,00	3841,1	400,2	418,0	442,2

dengan  $C_{sp}$  konsentrasi terlarut pada batas fasa,  $N_{sc}$  bilangan Schimidt,  $U_6$  kecepatan zalir ruah/bulik dan  $\gamma$  faktor gesekan Fanning.

Bagi aliran laminar antarmembran lembaran, difusi garam diperikan oleh persamaan:

$$\left( vC - \gamma \frac{\partial C}{\partial R} \right) = 0$$

dengan  $X = x/h$  yakni jarak menyumbu ninnatra (tanpa dimensi),  $x$  jarak menyumbu dari lubang masuk saluran,  $h$  separoh lebar saluran dwimatra,  $U = u / u(o)$  yakni kecepatan menyumbu mrmatra,  $u$  kom-ponen kecepatan pada arah  $x$ ,  $u(o)$  kecepatan zalir rata-rata pada masukan saluran,  $C = c/o^* 6 = v/u(o)$ ,  $v$  kecepatan tank lewat membran,  $R = y/h$  yakni kedudukan transversal nirmatra,  $V = vy/v$  kecepatan nir-matra tegak lurus membran,  $v_y$  komponen kecepatan pada arah  $y$ ,  $Y = Ds/vh$ .

Penyelesaian persamaan tersebut:

$$C(X,R) = X P_n Y_n(R) (1 - 5X)^{n-1}$$

dengan  $(3n$  dan  $Y_n(R)$  nilai^eigen polarisasi konsentrasi dinyatakan sebagai  $X$  dengan  $X = (C_{sp} - C)/C$

Jadi  $X = (1 - 8X) C(X,1) 1$

Demikian pula telah dihitung besarnya polarisasi konsentrasi aliran turbulen dan linier pada saluran-saluran silinder dan plat sejajar.

Berbagai desain membran dan modul membran telah dilakukan para pelibat iptek membran aneka bangsa. Penggunaan teknik membran yang makin sempurna dan makin besar kapasitas dan fluks alirannya, memungkinkan penurunan biaya-biaya (amortisasi pabrik, penggantian membran, energi, operasi/perawatan). Penyempurnaan hampiran kom-putasi dan pemodelan lebih cermat juga semakin memantapkan terapan membran di berbagai bidang rekayasa.

Lamp. 6

## UBAH SATUAN: TEKNIK INTERNASIONAL

Bagi para penggelut iptek, sangat penting informasi praktis pengubahan berbagai satuan ke satuan internasional (SI)/metrik. Berikut ini tercantum faktor ubahan lengkap bagi pembaca buku ini. Angka dalam kurung menyatakan pangkat 10. Jadi (+07) artinya kali 10 pangkat 7, sedangkan (-02) artinya kali 10 pangkat -2. Semoga bermanfaat.

DARI (REKAYASA)	KALIKAN DENGAN	KE (SI)
ab ampere	1,00 (+01)	ampere
ab coulomb	1,00 (+01)	coulomb
ab farad	1,00 (+09)	farad
ab henry	1,00 (-09)	henry
abmho	1,00 (+09)	mho
abohm	1,00 (-09)	ohm
ab volt	1,00 (-08)	volt
acre	4,046856 (+03)	meter <sup>2</sup>
ampere (int. 1948)	9,99835 (-01)	ampere
angstrom	1,00 (-10)	meter
are	1,00 (+02)	meter
satuan astronomi	1,495978 (+11)	meter

atmosfir	1,01325 (+05)	new ton/meter
bar	1,00 (+ 05)	newton/meter
barn	1,00 (- 28)	meter
barrel (minyak, 42 gallon)	1,589873 (-01)	meter
barye	1,00 (-01)	newton/meter
BTU(ISO/TC12)	1,05506 (+ 03)	joule
BTU (Tabel Uap International)	1,05504 (+ 03)	joule
BTU(purata)	1,05587 (+ 03)	joule
BTU (termokimia)	1,054350 (+03)	joule
BTU (39°F)	1,05967 (+ 03)	joule
BTU (60°F)	1,05468 (+ 03)	joule
bushel (AS)	3323907 (-02)	meter
Cable	2,19456(+02)	meter
Caliber	2,54 (- 04)	meter
kalori (Tabel Uap International)	4,1868 (+00)	joule
kalori (purata)	4,19002 (+00)	joule
kalori (termokimia)	4,184 (+00)	joule
kalori (15°C)	4,18580 (+00)	joule
kalori (20°C)	4,18190 (+00)	joule
kilogram kalori (TUI)	4,1868 (+03)	joule
kilogram kalori (purata)	4,19002 (+03)	joule
kilogram kalori (termokimia)	4,184 (+03)	joule
karat (matrik)	2,00 (- 04)	kilogram
Celcius (suhu)	$K = C + 273,15$	Kelvin
Centimeter Raksa / Hg (0°C)	1,3322 (+03)	newton/meter
Centimeter air (4°C)	9,80638 (+01)	newton/meter
Chain (insinyur/Ramden)	3,048 (+01)	meter
Chain (surveyor/gunter)	2,01168 (+01)	meter
Circular mil	5,067074 (-10)	meter
Cord	3,624556 (+ 00)	meter
Coulomb (internart. 1948)	9,99835 (-01)	Coulomb
Cubit	4p72 (-01)	meter
Cup	2,365882 (-04)	meter
Curie	3,70 (+10)	dis/detik
hari (surva, purata)	8,64 (+ 04)	detik (surya, purata)
hari (sideral)	8,616409 (+04)	detik (surya, purata)
derajat (sudut)	1,745329 (-02)	radian
denier (international)	1,00 (- 07)	kilogram/meter
dram (avoirdupois)	1,771845 (-03)	kilogram
dram(troy/apotik)	3,887934 (- 03)	kilogram
dram (cairan AS)	3,696691 (-06)	meter
dyne	1,00 (- 05)	newton
elektronvolt	1,60210 (-19)	joule

erg	1,00 (- 07)	joule
Fahrenheit (suhu)	$K = (5/9) (F + 459,67)$	kelvin
Fahrenheit	$C = (5/9)(F-32)$	celcius
farad (internat.1948)	9,99505 (~ 01)	farad
faraday (basis C-12)	9,64870 (+ 04)	Coulomb
faraday (kimia)	9,64957 (+04)	Coulomb
faraday (fisika)	9,65219 (+ 04)	Coulomb
fathom	1,8288 (+ 00)	meter
fermi (femtometer)	1,00 (-15)	meter
ounce cairan (AS)	2,957352 (- 05)	meter
kaki	3,048 (-01)	meter
kaki (survey, AS)	3,048006 (- 01)	meter
kaki air (39,2°F)	2,98898 (+ 03)	newton/meter
kaki-lilin (candle)	1,076391 (+01)	lumen /meter
kaki-lambert	3,426259 (+ 00)	kandela/meter
furlong	2,01168 (+ 02)	meter
gal (galileo)	1,00 (- 02)	meter/detilc
gallon (cavir Inggris)	4,546087 (-03)	meter <sup>3</sup>
gallon (kering AS)	4,404883 (-03)	meter
gallon (Cair AS)	3,785411 (-03)	meter
gamma	1,00 (- 09)	tesla
gauss	1,00(04)	tesla
gilbert	7,957747 (-01)	ampere-turn
gill (Inggris)	1,420652 (- 04)	meter
gill (Amerika)	1,182941 (- 04)	meter
grad	9,00 (-01)	derajat (sudut)
grad	1,570796 (- 02)	radian
grain	6,479891 (- 05)	kilogram
gram	1,00 (-03)	kilogram
hand (tangan)	1,016 (-01)	meter
hektar	1,00 (+ 04)	2
henry (intermat.1948)	1,000495 (+ 00)	meter henry
hogshead (AS)	2,384809 (-01)	meter
HP, daya kuda, paardekrachl (500 foot lbf/detik)	7,456998 (+ 02)	watt
HP (boiler)	9,80950 (+ 03)	watt
HP (listrik)	7,46 (+02)	watt
HP (metrik)	7^5499 (+ 02)	watt
HP (Inggris)	7,457 (+ 02)	watt
HP (air)	7,46043 (+ 02)	watt
jam (sidereal)	3,590170 (+03)	detik (surya, purata)
jam (surya, purata)	3,60 (+ 03)	detik (surya, purata)
inch	2,54 (-02)	meter
inch raksa (32°F)	3386389 (+ 03)	newton/meter

inch raksa (60°F)	3,37685 (+ 03)	newton /meter
inc air (60°F)	2,49082 (+ 02)	newton/meter <sup>2</sup>
inc air (60°F)	2,4884 (+ 02)	newton/meter <sup>2</sup>
joule (internat.1 948)	1,00165 (+ 00)	joule
kayser	1,00 (+ 02)	1/meter
kilokalori (Tabel Uap Int)	4,18674 (4 03)	joule
kilokalori (purata)	4,19002 (+03)	joule
kilokalori (termokimia)	4,184 (+03)	joule
kilogram massa	1,00 (+00)	kilogram
kilogram gaya (kg f)	9,80665 (+ 00)	newton
kilopond gaya	9,80665 (+ 00)	newton
kip	4,448221 (+ 03)	newton
knot (international)	5,144444 (-01)	meter/ detik
lambert	1/JT(+04)	kandela/meter
lambert	3,183098 (+03)	kandela/meter
langley	4,184 (+04)	joule/meter'
lbf (pount gaya, avoirdupois)	4,448221 (+00)	newton
lbm (pound massa, avoirdupois)	4,535923 (-01)	kilogram
league (Inggris, nautikal)	5,559552 (+ 03)	meter
league (internat, nautikal)	5,556 (+ 03)	meter
tahun cahaya	9,46055 (+15)	meter
link (insinyur/ramden)	3,048 (-01)	meter
link (surveyor/gun ter)	2,01168 (- 01)	meter
liter	1,00 (- 03)	meter
lux	1,00 (+ 00)	lumen /meter <sup>2</sup>
maxwell	1,00 (- 08)	weber
meter	1,650763 (+ 06)	panjang gelombang Kr.86
mikron	1,00 (- 06)	meter
mil (milli inch)	2,54 (- 05)	meter
mile (AS, statuta)	1,609344 (+ 03)	meter
mile (Inggris, nautikal)	1,853184 (+ 03)	meter
mile (internat, nautikal)	1,852 (+ 03)	meter
mile (AS, nautikal)	1,852 (+ 03)	meter
millibar	1,00 (+ 02)	newton/meter
millimeter raksa (0°C)	1,333224 (+ 02)	newton/meter <sup>2</sup>
menit (sudut)	2,908882 (- 04)	radian
menit (surya, purata)	6,00 (+01)	detik (surya, purata)
menit (sidereal)	5,983617 (+01)	detik (surya, purata)
bulan (kalender, purata)	2,628 (+ 06)	detik (surya, purata)
oerdtedt	7,957747 (+01)	ampere/meter
ohm (internat.,1948)	1,000495 (+ 00)	ohm
ounce gaya (avoirdupois)	2,780138 (-01)	newton
ounce massa (avoirdupois)	2334952 (- 02)	kilogram

ounce massa (troy/apotek)	3,110347 (-02)	kilogram
ounce (cair, AS)	2,957352 (- 05)	meter
pace	7,62 (-01)	meter
parset	3,08374 (+ 16)	meter
pascal	1,00 (+00)	newton/meter
peck (AS)	8,809767 (-03)	meter
penny berat	1,555173 (- 03)	kilogram
perch	5,0292 (+ 00)	meter
phot	1,00 (+04)	lumer/ meter
pica (cetak)	4,217517 (-03)	meter
pint fleering, AS)	5,506104 (-04)	meter
pint (cairan, AS)	4,731764 (- 04)	meter
point (cetak)	3,514598 (- 04)	meter
poise	1,00 (-01)	newton detik/meter
pole	5,0292 (+ 00)	meter
pound gaya Obf avoirdupois)	4,448221 (+ 00)	newton
poundal	1,382549 (-01)	nweton
quart (AS, kering)	1,101220 (-03)	meter
quart (cair, AS)	9,463529 (-04)	meter
rad (dosis radiasi terserap)	1,00 (- 02)	joule/kilogram
Rankine (suhu)	K = (5/9) R	kelvin
Rayleigh Oaju pancar foton)	1,00 (+ 10)	1 /detik meter
rhe	1,00 (+ 01)	meter/newton detik
rod	5,0292 (+ 00)	meter
roentgen	2,57976 (- 04)	coulomb /kilogram
rutherford	1,00 (+06)	disintegrasi/detik
detik (sudut)	4,848136 (- 06)	radian
detik (efemeris)	1,000000 (+ 00)	detik
detik (sidereal)	9,972695 (-01)	detik (surya, purata)
section	2,589988 (+ 06)	meter
scruple (apotik)	1,295978 (-03)	kilogram
shake	1,00 (-08)	detik
skein	1,09728 (+ 02)	meter
slug	1,459390 (+01)	kilogram
span	2,286 (- 01)	meter
stat ampere	3335640 (-10)	ampere
stat coulomb	3,335640 (-1-)	coulomb
stat farad	1,112650 (-12)	farad
stat henry	8,987554 (+11)	henry
stat mho	1,112650 (-12)	mho
stat ohm	8,987554 (+11)	ohm
stat volt	2,997925 (+ 02)	volt
stere	1,00 (+00)	meter

stilb	1,00 (+ 04)	kendela/meter
stoke	1,00 (- 04)	meter /detik
sendok makan	1,478676 (-05)	meter
sendok teh	4,928921 (- 06)	meter
Ion (assay)	2,916666 (- 02)	kilogram
ton (long)	1,016046 (+ 03)	kilogram
ton (metrik)	1,00 (+ 03)	kilogram
ton (ekivalen nuklir TNT)	4,20 (+ 09)	joule
ton (short, 2000 pound)	9,071847 (+ 02)	kilogram
tonne	1,00 (+ 03)	kilogram
ton (Register)	2831684 (+00)	3
torr (0°C)	1,33322 (+ 02)	newton/ meter
township	9,323957 (+07)	meter
unit pole (kutub satuan)	1,256637 (- 07)	weber
volt (internat., 1948)	1,000330 (+ 00)	volt
yard	9,144 (-01)	meter
watt (internat. 1948)	1,000165 (+00)	watt
tahun (kalender)	3,1536 (+07)	detik (surya, purata)
tahun (sidereal)	3,155815 (+07)	detik (surya, purata)
tahun (tropik)	3,155692 (+ 07)	detik (surya, purata)

### Lamp. 7

## BENCANA MELAND A DI TAHUN 2000

Pada temu ilmiah akbar pelestarian dan pengawasan pencemaran air/manajemen-teknologi mutu air internasional 4.9 October 1993 di Jakarta, dibahas terancamnya 7 (tujuh) propinsi di Indonesia (DKI Jakarta, Jabar, Jateng, Dr\*', Jatim, Bali dan NTB) pada tahun 2000 sekaitan sumberdaya airnya, baik kuantitas maupun kualitas. Pencemaran air, penyedotan air tanah dan intrusi air laut merupakan masalah-masalah besar. Parameter mutu air (bakteri coli, deterjen, organik terlarut, amo-niak, fenol sampai nitrat) sudah buruk sekali. Sumur-sumur pantau lit-bang pangairan PU teramati parah mutu airnya, begitu laporan Kompas 5 Oktober1993.

Kita sungguh makin kehausan ahli iptek membran pemurnian air. Air itu pangkal kehidupan di muka bumi.

TABEL NERACA AIR TAHUN 200 (RATA-RATA)

(dalam juta.meter kubik)

PROPINSI	KETERSEDIAAN		KEBUTUHAN		KIRCHAU KETERSEDIAAN NISBAH KEBUTUHAN					
	TIAP TAHUN	KEMARAU TIAP BULAN	TIAP TAHUN	KEMARAU TIAP BULAN	TIAP TAHUN	KEMARAU TIAP BULAN				
DI ACEH	87024	725	2863	238	30,4	3,0				
SUMUT	105558	880	5482	457	19,3	1,91				
SUMBAR	93643	780	2876	240	32,6	3,31				
RAIAU	128953	1075	1550	129	83,2	8,3				
JAMBI	76385	637	1105	92	69,1	6,9				
SUMSEL	149087	1242	3036	253	49,1	4,9				
BENGGULU	51150	426	907	76	56,4	5,6				
LAMPUNG	46238	385	2475	206	18,7	1,9				
DKI JAKARTA *	440	4	886	74	0,5	0,05*				
JABAR *	81413	678	17079	1423	4,8	0,48*				
JATENG *	56188	468	14277	1190	3,9	0,39*				
DI YOGYAKARTA *	2903	24	1093	91	2,7	0,26*				
JATTM*	46277	*/	386	J	16669	-J	1389	u	2,8	0,28 *
BALI *	5454	45	1640	137	3,3	0,33*				
NTB*	12774	106	2627	219	4,9	0,40*				
NTT 240	28798		1236	103	23,3	2,31				

TIMTIM	12907	108	250	21	51,6	5,1
KALBAR	326083	2717	2337	195	139,5	13,9
KALTENG	307826	2565	2296	191	134,1	13,4
KALSEL	48766	406	1771	147	27,5	2,8
KALTIM	325380	2712	1095	91	297	29,7
SULUT	38630	322	943	79	41	4,1
SULTENG	81907	683	1722	143	47,6	4,8
SULSEL	89005	742	5830	486	15,3	1,5
SULTRA	37240	310	661	-	56,3	5,6
MALUKU	104660	872	602	50	174	1,7
IRJA	876309	7303	4020	-	218	21,8

Anton. J. Hartomo

Pendidik dan ahli kimia material ini kelahiran Semarang. Semenjak tamat ITB ia banyak berkiprah di iptek kimia, meneliti dan mengabdikan ilmu/profesinya. Perintis kimia ITS ini (1984-1992) kini memacu pengembangan iptek mutakhir, material, termasuk polimer (bahan membran) di Jakarta/Bandung. Pelibat polimer sejak medio 1970-an ini saat itu pun telah mulai mengkaji lingkungan air berbagai daerah (Sumsel, Surabaya, dan sebagainya) bersama PSLH - ITB dan Biologi ITB (Prof. Suriaatmadja - kini di KLH/Jakarta). Pengurus Pusat Himpunan Kimia Indonesia (Divisi Material Industri) yang juga anggota berbagai organisasi iptek se-dunia dan kerap melanglang ke berbagai negara dengan berpuluh-puluh paper ilmiahnya. Produktif menyebarkan iptek kimia, juga lewat ratusan karya tulis ilmiah populernya di berbagai media massa nasional. Jalanan komunkasi dan alih teknologinya dengan para ahli bersifat global, termasuk bidang teknik membran yang dilibatininya sejak 1987.

Christine S. Widiatmoko

Insinyur profesi teknologi kimia alumnus UNDIP, Semarang, kota kelahirannya, ini bertahun-tahun berkiprah di dunia industri pangan di Jakarta. Buku terdahulunya, *Pangan Instant*, juga diterbitkan oleh ANDI OFFSET Yogyakarta. Karena masalah mutu air sangat vital, juga bagi industri, tuangan gagasannya pada buku ini dimaksudkan pula sebagai sumbangsih ilmiah dan profesinya. Simakan atas kemajuan iptek global dan lokal terus dilakukannya.

----- ~ - ----",  
" \*\*S&F  
Proyek Pembirwuui 4b(PMMMB  
I T.A. 1996/1991  
! ! ! - .....