



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Profesor I Gede Wenten

TEKNOLOGI MEMBRAN:
PROSPEK DAN TANTANGANNYA DI INDONESIA

26 Februari 2016
Balai Pertemuan Ilmiah ITB

Hak cipta ada pada Penulis

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, atas segala karuniaNya yang telah dilimpahkan hingga saat ini sehingga orasi ilmiah ini dapat diselesaikan. Orasi ilmiah ini disampaikan sebagai tanggung jawab penulis kepada bangsa dan negara Indonesia karena mendapat kepercayaan diangkat dalam jabatan guru besar. Di dalamnya dipaparkan secara singkat mengenai teknologi membran, aplikasi strategisnya, perkembangan terkini, hingga aplikasi dan prospek teknologi membran Indonesia di masa depan. Ringkasan dan visi mengenai teknologi membran di masa depan tersebut diharapkan dapat menjadi rujukan dan inspirasi bagi khalayak pembaca.

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Rektor dan Pimpinan ITB, Dekan FTI, serta Pimpinan dan seluruh Anggota Forum Guru Besar ITB, atas kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk menyampaikan orasi ilmiah. Terima kasih yang besar kepada kolega dosen, peneliti, kalangan industri, dan mahasiswa yang sudah membantu penulis dalam menekuni bidang teknologi membran. Penulis juga mengucapkan banyak terima kasih kepada guru-guru dan dosen-dosen pengajar serta pembimbing sepanjang riwayat pendidikan penulis. Tak lupa, penulis juga menyampaikan terima kasih dan sayang kepada keluarga yang memberikan makna yang dalam pada semua pekerjaan.

Bandung, Februari 2016

I Gede Wenten

SINOPSIS

Pesatnya pengembangan teknologi membran dalam usianya yang relatif muda dan strategisnya aplikasi teknologi ini di Indonesia mendorong penulis untuk menulis naskah dengan tema “Teknologi Membran: Prospek dan Tantangannya di Indonesia”. Naskah ini disusun atas 5 bagian, yaitu: 1. Sekilas teknologi membran, 2. Peran strategis teknologi membran, 3. Perkembangan terkini di bidang teknologi membran, 4. Teknologi membran di Indonesia, dan 5. Penutup: Prospek Masa Depan.

Bagian 1 memberikan sekilas gambaran mengenai sejarah teknologi membran dan proses pemisahan berbasis membran. Peran strategis teknologi membran yang meliputi aplikasi dalam bidang medis, bioseparasi dan *biorefinery*, industri makanan dan minuman, pengolahan air dalam skala besar, reklamasi air dengan bioreaktor membran, pembangkitan energi, dan pemisahan gas, dijelaskan pada bagian 2. Selanjutnya, bagian 3 memaparkan mengenai perkembangan terkini di bidang teknologi membran, seperti: pembuatan dan fabrikasi membran, pengembangan proses-proses berbasis membran, dan lain-lain. Perkembangan teknologi membran dan aplikasinya di Indonesia akan dibahas pada bagian 4. Terakhir, beberapa aplikasi strategis teknologi membran Indonesia di masa depan, yang meliputi pengembangan membran superhidrofilik dan superhidrofobik berbasis polipropilen lokal, pengolahan gas alam, produksi *biofuel*, ekstraksi bahan alam, pengolahan sawit bebas limbah, produksi bersih industri tapioka, industri akuakultur bebas patogen, pengolahan air untuk percepatan pencapaian MDGs, dan *zero discharge seawater desalination*, akan dijelaskan pada bagian 5.

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	ii
SINOPSIS	iii
DAFTAR ISI.....	iv
1. SEKILAS TEKNOLOGI MEMBRAN	1
2. PERAN STRATEGIS TEKNOLOGI MEMBRAN.....	1
2.1. Aplikasi Medis	2
2.2. Bioseparasi dan <i>Biorefinery</i>	2
2.3. Terobosan dalam Industri Makanan dan Minuman.....	4
2.4. Proyek Mega dalam Pengolahan Air	7
2.5. Bioreaktor Membran untuk Reklamasi Air.....	8
2.6. Fuel Cell: Pembangkit Energi Masa Depan	9
2.7. Pemisahan Gas	9
3. PERKEMBANGAN TERKINI DI BIDANG TEKNOLOGI MEMBRAN	10
3.1. Perkembangan di bidang Pembuatan dan Fabrikasi Membran	11
3.2. Pengembangan Teknologi Membran untuk Pemisahan Gas	15
3.3. Pembangkitan Energi	16
3.4. Desalinasi Air Laut	18
3.5. Membran Distilasi dan Kristalisasi	19
3.6. Aplikasi Medis dan Rekayasa Jaringan	21
3.7. Pengembangan Proses Berbasis Membran	23
4. TEKNOLOGI MEMBRAN DI INDONESIA.....	26
4.1. Pengolahan Air.....	27
4.2. Pengolahan Limbah Industri.....	28
4.3. Industri Akuakultur	31
4.4. Industri Agro.....	32
4.5. Teknologi Membran Non-Modular	35
4.6. Membran Superhidrofobik.....	36
4.7. Lain-lain	38
5. PENUTUP: PROSPEK MASA DEPAN	40
REKAMAN KARYA	45
DAFTAR PUSTAKA	47

1. SEKILAS TEKNOLOGI MEMBRAN

Industri membran telah berkembang sejak tahun 1950-an, namun masih pada kapasitas produksi yang kecil (Lonsdale 1982). Sartorius Werke GmbH, sebuah perusahaan manufaktur di Jerman, memproduksi membran ultrafiltrasi dalam jumlah kecil dan beberapa membran *cellophane* untuk aplikasi dialisis skala laboratorium. Permeabilitas membran masih sangat kecil akibat dari membran yang tebal dan berstruktur simetris (seperti spons) sehingga tidak kompetitif untuk aplikasi skala besar. Terobosan monumental dalam pengembangan teknologi membran baru terjadi pada awal tahun 1960-an setelah Loeb & Sourirajan menemukan teknik pembuatan membran asimetris (Baker 2012). Penemuan ini merupakan titik awal perkembangan *reverse osmosis* (RO) yang saat ini telah banyak digunakan untuk proses desalinasi air laut dan aplikasi skala besar di berbagai sektor industri.

Secara definitif, membran dapat diartikan sebagai lapisan tipis semipermeabel yang berada di antara dua fasa dan berfungsi sebagai media pemisah yang selektif. Perpindahan massa melalui membran terjadi jika suatu gaya dorong (*driving force*) diberikan pada komponen dalam umpan. Proses-proses berbasis membran dapat diklasifikasikan berdasarkan gaya dorongnya. Proses mikrofiltrasi (MF), ultrafiltrasi (UF), nanofiltrasi (NF), dan *reverse osmosis* (RO) adalah contoh-contoh proses membran yang menggunakan perbedaan tekanan sebagai gaya dorongnya. Proses membran lainnya menggunakan gaya dorong perbedaan konsentrasi, seperti *gas separation* (GS), pervaporasi (PV), membran cair, & dialisis; perbedaan temperatur, seperti *membrane distillation* (MD) & termo-osmosis; dan perbedaan potensial listrik, seperti elektrodialisis (ED), elektrodeionisasi (EDI), & elektrolisis (Wenten 2002a).

2. PERAN STRATEGIS TEKNOLOGI MEMBRAN

Teknologi membran telah diaplikasikan untuk berbagai sektor industri sehingga dapat dikatakan bahwa teknologi membran memainkan peran strategis dalam pengembangan industri dan pembangunan yang berkelanjutan. Peran strategis membran meliputi aplikasi dalam bidang medis, bioseparasi, *biorefinery*, industri makanan dan minuman, pengolahan air dalam skala besar (*megaproject*

water treatment plant), reklamasi air dengan bioreaktor membran, pembangkitan energi, dan pemisahan gas.

2.1. Aplikasi Medis

Salah satu aplikasi teknologi membran dalam bidang medis adalah cuci darah atau hemodialisis, yang telah dinikmati oleh jutaan pasien gagal ginjal di seluruh dunia. Membran yang digunakan untuk proses cuci darah ini disebut *hemodialyzer* atau *dialyzer*. *Dialyzer* pertama dibuat oleh Kolf dan Berk di Belanda (Kolf 1944). *Dialyzer* berfungsi sebagai lapisan semipermeabel yang mengontrol transfer urea dan produk sisa metabolisme lainnya dari darah ke cairan dialisat. Ketika darah dipompakan melewati *hemodialyzer*, urea dan produk metabolit ringan lainnya berdifusi melewati membran akibat perbedaan konsentrasi. Untuk menghindari kehilangan potasium, kalsium, dan ion-ion lainnya, cairan dialisat yang digunakan untuk proses cuci darah harus memiliki konsentrasi ion-ion esensial tersebut sama dengan darah. *Dialyzer* yang umum digunakan pada masa kini adalah tipe *hollow fiber* dan bahan membrannya dari polimer sintetik (Baker 2012). Selain kemampuan permeabilitas hidraulik yang lebih tinggi dibandingkan dengan membran selulosa, membran polimer sintetik mampu menghilangkan beberapa metabolit berat molekul sedang (1.000 – 10.000 Da) dalam darah. *Dialyzer* terkini dirancang agar dapat menyerupai fungsi ginjal normal.

Selain untuk cuci darah, membran juga dapat digunakan sebagai oksigenator darah. Oksigenator darah digunakan dalam tindakan operasi jika paru-paru pasien tidak dapat berfungsi normal. Pelopor alat ini adalah J.H. Gibbon pada tahun 1930-1940an (Gibbon, 1954). Keunggulan oksigenator membran dibandingkan dengan mesin jantung-paru-paru Gibbon adalah kontak antara darah dan oksigen tidak langsung sehingga kerusakan darah dapat dicegah dan kebutuhan volume darah lebih rendah. Oksigenator membran pertama kali diperkenalkan pada tahun 1980, dan kini semua oksigenasi darah hanya menggunakan oksigenator membran (Baker 2012).

2.2. Bioseparasi dan Biorefinery

Bioteknologi didefinisikan sebagai teknologi yang mengeksploitasi atau memanipulasi sistem biologi untuk produksi yang bermanfaat secara ekonomis. Teknologi membran sangat cocok untuk pemrosesan molekul biologis karena dapat dioperasikan pada temperatur dan tekanan relatif rendah, serta tidak melibatkan

perubahan fasa sehingga meminimalisasi tingkat denaturasi, deaktivasi, atau degradasi produk-produk biologis. Teknologi membran dapat berperan sebagai unit operasi pemisahan pada berbagai jenis substrat dengan tujuan produk akhir yang berbeda-beda. Membran juga dapat berperan sebagai sistem reaksi terutama pada produk-produk biokimia (Abels dkk. 2013). Penggunaan MF, UF atau NF memungkinkan proses fermentasi berlangsung lebih cepat. Proses membran satu tahap secara sederhana memungkinkan sel untuk dipekatkan dan didaur ulang sehingga dapat memisahkan produk secara simultan. Hal ini mengurangi pengaruh inhibisi produk dan dapat meningkatkan efektivitas proses melalui pengayaan biomassa. Hal tersebut berguna pada tahap fermentasi, isolasi produk serta pada perlakuan biologis air limbah. Klarifikasi dari seluruh kaldu fermentasi oleh MF dan UF dapat menggantikan *rotary vacuum filtration* atau sentrifugasi. Pada beberapa kasus, UF dapat menggantikan *solvent extraction* dan presipitasi. Jika produk harus dipekatkan, RO dapat memekatkan aliran produk terlarut pada temperatur rendah (hingga 5°C untuk mendapatkan yield produk > 99% dengan kebutuhan energi yang rendah) (Scott 1999).

Salah satu aplikasi awal dari UF adalah pemisahan sel dari produk ekstraseluler seperti antibiotik sefamisin C yang merupakan produk metabolis sekunder dari *Nocardia sp.* Secara menyeluruh, UF dilihat sangat superior dibandingkan *rotary drum vacuum filtration* pada aplikasi ini karena beberapa alasan seperti: perolehan kembali sebesar 98%, biaya material sistem UF (termasuk penggantian membran) bernilai sebesar seperempat dari *precoat* filtrasi, membutuhkan sepertiga tenaga kerja untuk beroperasi, biaya investasi 20% lebih rendah dari *drum vacuum filtration*, dan biaya pembuangan massa sel lebih rendah karena tidak adanya penyaring tambahan (Scott 1999).

Mikrofiltrasi telah banyak dipelajari juga untuk pemisahan sel mikrobial. Baik MF maupun UF sangat menarik karena kemampuannya memekatkan sel dengan konsentrasi rendah, seperti konsentrasi mendekati kaldu fermentasi pada sel ragi *oleaginous*. Pemisah sentrifugal memiliki produktivitas volumetrik yang rendah pada aplikasi ini. Walaupun aplikasi MF sangat kompetitif dibandingkan dengan sentrifugasi, reliabilitas yang lebih tinggi dari sentrifugasi serta masalah terkait *fouling* membran membuat sentrifugasi lebih diminati (Scott 1999). Ultrafiltrasi banyak digunakan untuk pemisahan dan pemekatan enzim dan protein yang

diproduksi dari kaldu fermentasi. Kebutuhan untuk memekatkan protein dapat timbul dari beberapa faktor, antara lain: pasca klarifikasi, ketika konsentrasi protein rendah, pasca purifikasi dari berbagai proses yang melarutkan protein seperti kromatografi kolom, dan sebagai langkah pemekatan akhir sebelum isolasi dan formulasi produk.

Daya tarik UF dalam pemekatan protein terletak pada efisiensi energi dari pemekatan kaldu fermentasi dan pemisahan pada temperatur ruang yang meminimalkan denaturasi protein atau hilangnya aktivitas protein. Oleh karena itu, UF telah digunakan pada industri bioseparasi selama beberapa tahun, terutama untuk pemekatan enzim seperti *glucose oxidase*, *amyglycosidase*, trypsin, rennin dan *pectinase*. Enzim biasanya diproduksi dari fermentasi dimana enzim disekresikan dari sel ke kaldu fermenter. Enzim diperoleh dari kaldu sebagai larutan terlarut, mengandung 0,5-2% berat protein melalui tahap klarifikasi. Saat ini UF banyak diadopsi untuk prapemekatan larutan enzim sebelum pengeringan akhir. Efisiensi retensi enzim lebih dari 99% dan perolehan enzim lebih dari 95% dapat dicapai dengan UF, lebih baik dibandingkan teknik evaporasi vakum dengan persen perolehan hanya 60-90% (Scott 1999).

2.3. Terobosan dalam Industri Makanan dan Minuman

Industri makanan dan minuman merupakan bidang strategis lainnya yang telah banyak menggunakan teknologi membran. Dalam industri susu, teknologi membran menghasilkan proses-proses yang lebih efisien dibandingkan teknologi konvensional dan memunculkan peluang baru untuk menghasilkan produk-produk yang lebih berkualitas. Menurut Pouliot (Pouliot 2008), aplikasi proses-proses berbasis membran di industri susu dapat dikelompokkan menjadi tiga kategori, yaitu: (i) sebagai alternatif pengganti unit-unit operasi seperti sentrifugasi, evaporasi, penyisihan bakteri, dan demineralisasi, (ii) sebagai unit pemisah seperti pada proses penyisihan lemak dari *whey*, pemisahan dan pemulihan protein, fraksionasi, resirkulasi larutan dan penyisihan spora, dan (iii) sebagai alat untuk menghasilkan produk-produk baru seperti *UF cheeses* (keju rendah lemak dari susu yang difilter menggunakan membran UF), susu ESL (*extended shelf life*), minuman berbasis *whey* dan produk-produk susu bertekstur.

Aplikasi membran di industri susu memungkinkan peningkatan kualitas produk susu, pengembangan produk baru, serta meningkatkan efisiensi dan

profitabilitas proses (Rosenberg 1995). Sebagai contoh, pada proses penyisihan bakteri, membran MF dapat mencapai derajat penyisihan hingga lebih dari 99%. MF dioperasikan pada temperatur rendah, sehingga sifat fisik dan kimia komponen utama susu tidak mengalami perubahan selama proses. Namun untuk menjamin penyisihan secara menyeluruh, MF dapat dikombinasikan dengan proses pengolahan temperatur tinggi (130°C selama 4 detik atau disebut sebagai *high-temperature treatment*, HTT) (Rosenberg 1995). Dalam proses standarisasi protein dan kandungan total padatan di dalam susu yang digunakan di dalam manufaktur atau produk susu terfermentasi, penggunaan membran UF dapat menghasilkan produk dengan kualitas dan karakteristik yang jauh lebih baik dibanding hasil dari proses lain. Penggunaan membran pada pengolahan susu juga memungkinkan produsen yoghurt untuk menghasilkan produk-produk yoghurt yang memiliki karakteristik berbeda seperti yoghurt rendah laktosa (Özer dan Tamime 2013). Pengembangan teknologi membran dan aplikasinya pada proses pengolahan susu memungkinkan industri berbasis susu untuk mengembangkan produk-produk susu dan turunannya dengan memberikan nilai tambah terhadap kualitas produk yang dihasilkan.

Selain industri susu, teknologi membran juga telah banyak digunakan dalam pemrosesan jus buah. Ada tiga klasifikasi utama aplikasi membran di industri pemrosesan jus buah, yaitu: (1) klarifikasi jus untuk mendapatkan jus yang jernih menggunakan membran MF atau UF, (2) pemekatan jus buah menggunakan membran RO untuk mendapatkan konsentrat jus lebih dari 42°Brix, dan (3) deasidifikasi, contohnya deasidifikasi jus jeruk menggunakan proses ED (Cheryan dan Alvarez 1995). Klarifikasi jus menggunakan membran MF dan UF memiliki beberapa keunggulan dibanding proses-proses konvensional, antara lain: dapat mengurangi konsumsi enzim, eliminasi *fining agent*, dan proses lebih sederhana (Echavarría dkk. 2011). Pada proses pemekatan jus, teknologi membran dapat mengatasi kelemahan yang terjadi pada metode konvensional. Pemekatan jus menggunakan membran RO dioperasikan pada temperatur relatif rendah sehingga kualitas organoleptis dari jus buah dapat dipertahankan dan konsumsi energi termal dapat dikurangi. Keunggulan tersebut menjadikan teknologi membran sebagai proses pemekatan jus yang lebih menarik daripada teknologi lainnya seperti evaporasi termal baik secara ekonomi maupun konsumsi energi (Ilame dan

V. Singh 2015; Jiao dkk. 2004). Salah satu sistem membran terintegrasi komersial pada proses pemekatan jus buah adalah proses *FreshNote* yang telah dikembangkan oleh SeparaSystem (Du Pont dan Food Machinery Corporation) (Cheryan dan Alvarez 1995). Namun pemekatan jus menggunakan membran RO juga memiliki beberapa kelemahan, diantaranya: terjadi peristiwa *fouling*, memerlukan tekanan tinggi, memerlukan deaktivasi enzim terlebih dahulu, hanya mampu mencapai konsentrasi jus tertentu, kehilangan senyawa aroma, kesulitan pada pemekatan larutan dengan kandungan padatan tersuspensi tinggi, dan biaya penggantian membran serta biaya operasi masih relatif mahal (Jiao dkk. 2004).

Industri bir merupakan salah satu industri minuman yang telah lama mengaplikasikan teknologi membran. Peran membran dalam proses produksi bir diantaranya pada pengambilan bir dari cairan bagian bawah tangki, klarifikasi bir, dan dealkoholisasi bir (Lipnizki 2010). Setelah fermentasi, ragi akan mengendap di bawah tangki fermentasi. Untuk pemisahan bir dan pemurnian ragi hingga 20% DM, proses kontinyu menggunakan membran telah dikembangkan. Proses ini memisahkan bir dari ragi menggunakan MF *cross-flow* dengan modul *plate-and-frame* atau *tubular*. Biaya investasi dan operasi dari proses perolehan kembali bir dibayar oleh bir yang dipisahkan dari ragi. Untuk tempat pembuatan bir dengan produksi tahunan 2 juta hl, bir yang didapat sebanyak 24000 hl atau sekitar 1% dari produksi tahunan (Lipnizki 2005). Terlebih lagi, ragi yang didapatkan lebih kering sehingga membantu pemrosesan selanjutnya.

Pada proses pembuatan bir tradisional, klarifikasi bir setelah fermentasi dan maturasi seringkali dilakukan dengan separator dilanjutkan dengan filtrasi Kieselguhr. Proses tersebut terkait dengan penanganan dan pembuangan bubuk serta efluen dalam jumlah besar. Untuk menangani masalah ini, *cross-flow* MF dengan kaset *plate-and-frame* telah diadopsi untuk menghilangkan ragi, mikroorganisme, dan kabut tanpa mempengaruhi rasa dari bir. Salah satu terobosan di industri bir adalah ditemukannya teknik "*backshock*" oleh penulis untuk mengatasi *fouling* pada proses filtrasi bir. Teknik *Backshock* yang dikembangkan dapat mencegah membran dari penyumbatan dan memungkinkan filtrasi dengan fluks yang sangat stabil sehingga permasalahan *fouling* pada proses klarifikasi bir dapat diatasi (Wenten dkk. 1996). Selain itu, melalui proses membran

tersebut, mutu protein bir terjaga dan limbah produksi pabrik bir tak lagi mencemari lingkungan.

2.4. Proyek Mega dalam Pengolahan Air

Proses-proses berbasis membran telah menjadi alat yang sangat penting dalam pengelolaan air dan rekayasa lingkungan terkait air karena keunggulannya dari sudut pandang teknis, ekonomi, dan ekologi (Peters 2010). Salah satu aplikasi membran pertama adalah konversi air laut menjadi air tawar dengan membran RO. Saat ini, *plant* desalinasi berbasis membran RO sekitar 60% dari total jumlah *plant* desalinasi di seluruh dunia (Voith 2010). Contoh *plant* SWRO terbesar saat ini adalah *Sorek Desalination Plant* yang telah dioperasikan pada tahun 2013, di Israel dengan kapasitas 624,000 m³/hari yang memakai lahan seluas 100,000 m² sebagaimana dilaporkan oleh IDE-technologies (IDE-Technologies 2014). *Plant* tersebut diharapkan mampu menghasilkan air minum dengan kandungan boron di bawah 0.3 mg/L dan konsumsi energi sekitar 4 kWh/m³. Contoh *plant* SWRO terbesar lainnya adalah Ashkelon Plant, di Israel dengan kapasitas 325.000 m³/hari.

Selain RO, nanofiltrasi juga merupakan teknologi membran yang banyak diaplikasikan pada pengolahan air dalam skala besar terutama pada pengolahan air permukaan. *Plant* nanofiltrasi dengan kapasitas terbesar yang berjalan saat ini berada di Boca Raton, Florida dengan kapasitas 40 mgd (150.000 m³/hari). Perancangan *plant* ini dimulai pada Mei 1999 untuk menambah kapasitas proses *lime softening* konvensional yang telah ada di Glades Road Water Treatment Plant. Penambahan kapasitas tersebut juga bertujuan untuk memperbaiki warna serta kandungan disinfektan dan produk samping disinfektan dari pengolahan yang sudah ada. Proses membran pada pabrik ini menggunakan 12 train modul membran dengan train 1-10 berkapasitas masing-masing 3,676 mgd dan train 11-12 masing-masing 1,62 mgd.

Ultrafiltrasi merupakan teknologi membran bertekanan rendah yang juga banyak digunakan dalam pengolahan air dalam skala besar. *Plant* ultrafiltrasi terbesar di dunia berada di Chesnut Avenue Water Works, Chesnut Avenue, Singapura dengan kapasitas 72 MGD atau sekitar 272.000 m³/hari. *Plant* ini dirancang untuk menggantikan proses *sand filtration* konvensional yang telah ada yang sulit menjaga kualitas air produknya. Pembangunan *plant* tahap berikutnya

direncanakan untuk mencapai kapasitas total hingga 126 MGD (476.900 m³/hari) (www.gewater.com 2011).

Air demin dengan kualitas tinggi atau air ultra murni banyak dibutuhkan oleh industri, seperti: industri farmasi, mikroelektronika, semikonduktor, air analisa laboratorium, boiler tekanan tinggi, dan lain-lain. Saat ini deionisasi berbasis membran, yaitu elektrodeionisasi (EDI), telah banyak digunakan untuk menggantikan proses deionisasi konvensional (resin penukar ion) karena keunggulan-keunggulan yang dimilikinya, seperti: tidak memerlukan regenerasi kimiawi, dapat beroperasi secara kontinyu, menghasilkan kualitas produk yang konstan, ramah lingkungan, dan relatif lebih murah. *Plant* EDI terbesar di dunia saat ini berada di Con Edison, New York, USA dengan kapasitas 6.730 gpm (1.500 m³/jam) untuk memproduksi air *makeup* boiler pembangkit listrik Con Edison yang akan meningkatkan kapasitas produksi steam dari 2,7 ke 5,7 juta pon/jam dan kapasitas listrik dari 300 ke 660 MW. *Plant* tersebut menggunakan proses RO dan EDI untuk menyediakan air demin dengan kualitas tinggi.

2.5. Bioreaktor Membran untuk Reklamasi Air

Bioreaktor membran (*membrane bioreactor*, MBR) merupakan salah satu teknologi membran yang telah banyak digunakan dalam pengolahan air limbah. Sistem MBR pada dasarnya terdiri atas kombinasi unit membran yang berperan dalam pemisahan fisik, dan sistem reaktor biologi yang berperan dalam degradasi komponen limbah. MBR dapat menggantikan proses konvensional seperti sistem lumpur aktif dan klarifier. Sistem MBR memanfaatkan membran MF atau UF untuk menyisihkan flok-flok bakteri dan padatan terlarut. MBR banyak digunakan pada pengolahan air limbah dimana reaksi biologis mendegradasi polutan organik, sedangkan membran berfungsi memisahkan mikroorganisme dari air limbah yang telah diolah (Marrot dkk. 2004). Keunggulan MBR pada pengolahan air limbah diantaranya: dapat menghasilkan air dengan kualitas yang lebih baik dengan mengeliminasi padatan maupun koloid, pengoperasian proses lebih fleksibel karena waktu tinggal *sludge* dapat dikendalikan secara independen dari waktu tinggal hidrolis, ukuran *plant* lebih kompak, laju dekomposisi tinggi, laju produksi *sludge* lebih rendah, dan juga memiliki fungsi disinfeksi dan penghilangan bau (Visvanathan dkk. 2000). Namun jika dibandingkan dengan proses biologis lainnya, MBR memiliki beberapa kekurangan, diantaranya (Judd 2008): (i) kompleksitas

proses lebih tinggi terutama berhubungan dengan prosedur pengoperasian dan pemeliharaan membran dan (ii) memerlukan biaya operasi dan investasi yang lebih besar. Keunggulan-keunggulan yang dimiliki MBR telah mendorong teknologi tersebut sebagai teknologi yang semakin banyak digunakan pada proses pengolahan limbah dan reklamasi air pada skala besar. Salah satu contoh plant MBR skala besar adalah Plant MBR di Transverse city, Michigan yang memiliki kapasitas 64.000 m³/hari (www.gewater.com).

2.6. Fuel Cell: Pembangkit Energi Masa Depan

Teknologi membran menunjukkan potensi yang menjanjikan dalam bidang energi, yaitu untuk menghasilkan energi terbarukan yang bersih. Di antara beberapa alternatif pembangkit energi bersih yang menjanjikan adalah *fuel cell*. *Fuel cell* memungkinkan konversi secara langsung dari energi kimia menjadi energi listrik, panas, dan air dengan perolehan yang tinggi karena tidak dibatasi oleh batasan siklus karnot (Couture dkk. 2011). Ada lima kategori *fuel cell* yang banyak diteliti yaitu: *polymer electrolyte membrane fuel cell* atau sering disebut *proton exchange membrane fuel cell*, *solid oxides fuel cell*, *alkaline fuel cells*, *phosphoric acid fuel cells*, dan *molten carbonate fuel cells* (Wang dkk. 2011). *Proton exchange membrane fuel cell* (PEMFC) dan *alkaline fuel cells* (AFC) adalah contoh-contoh jenis *fuel cell* yang menggunakan membran. PEMFC disusun dari membran elektrolit polimer seperti Nafion sebagai konduktor proton dan material platina sebagai katalis. Keunggulan PEMFC antara lain temperatur operasi relatif rendah, densitas power tinggi, dan mudah di-*scale up* (Wang dkk. 2011). Melalui pengembangan preparasi membran *proton exchange* yang murah dan memiliki kualitas yang baik, *fuel cell* merupakan salah satu alternatif sumber energi yang patut diperhitungkan. Salah satu *plant* PEMFC skala besar yang memiliki kapasitas 1 MW berada di SolVin Plant di Lillo, Antwerp, Belgia (www.solvay.com).

2.7. Pemisahan Gas

Teknologi membran banyak berperan juga dalam industri kimia, yaitu pada proses pemisahan campuran gas, karena beberapa keunggulan yang ditawarkan, antara lain: penggunaan alat yang lebih ringan, intensitas pekerja yang rendah, desain modular sehingga memudahkan ekspansi dan operasi dalam kapasitas parsial, *maintenance* yang rendah, konsumsi energi yang rendah, dan biaya yang rendah. Membran yang terbuat dari polimer dan kopolimer dalam bentuk *flat film*

atau *hollow fiber* banyak digunakan untuk pemisahan gas. Proses permeasi gas adalah proses yang relatif sederhana dan telah digunakan secara komersial mulai tahun 1979. Sejak saat itu, setidaknya 20 perusahaan telah masuk ke pasar pemrosesan gas dengan teknologi membran. Aplikasi membran dalam pemisahan gas antara lain pada gas murni atau yang telah diperkaya seperti H_2 , N_2 , dan O_2 dari udara, pemisahan gas asam seperti CO_2 dan H_2S , pemulihan H_2 dan berbagai aplikasi lainnya (Scott 1999). Hidrogen adalah pilihan atraktif sebagai bahan bakar alternatif namun sebagian besar hadir di alam sebagai senyawa sehingga harus diisolasi atau dibangkitkan sebelum digunakan. Proses ini mengkonsumsi banyak energi sehingga produksi hidrogen sendiri merupakan tantangan besar untuk keekonomian hidrogen. Saat ini, hidrogen diproduksi di industri dengan reformasi kukus metana (SMR). Hidrogen biasanya diperoleh dari aliran gas di kilang minyak (dari *hydrocracker*), pabrik petrokimia (pengaturan rasio *syngas*, dehidrogenasi), dan dari aliran lain dimana hidrogen hadir, seperti di pabrik ammonia. Selain H_2 dan CO , *syngas* juga mengandung pengotor seperti N_2 , CO_2 , CH_4 , dan air. Variasi rasio stoikiometri dari H_2/CO dapat terjadi untuk jalur sintesis berbeda, dan pengaturan rasio *syngas* harus dilakukan dengan proses pemisahan yang energi intensif seperti *pressure swing adsorption* (PSA) dan sistem kriogenik, yang saat ini banyak digunakan pada aplikasi perolehan hidrogen dalam kondisi operasi yang beragam. Namun teknologi ini belum dapat memproduksi hidrogen yang memiliki kemurnian yang tinggi untuk digunakan sebagai aplikasi lainnya seperti *fuel cell*. Oleh karena itu, proses berbasis membran disadari menjadi teknologi yang paling menjanjikan untuk memproduksi hidrogen berkadar tinggi (Zornoza dkk. 2013). Salah satu *plant* membran untuk pemisahan gas terbesar adalah *plant* untuk pemisahan gas CO_2 dari gas alam yang berada di Pakistan dengan kapasitas 265 MMSCFD pada tahun 1995 dan meningkat menjadi 600 MMSCFD pada tahun 2008 (Bernardo dan Clarizia 2013).

3. PERKEMBANGAN TERKINI DI BIDANG TEKNOLOGI MEMBRAN

Saat ini teknologi membran telah banyak mengalami perkembangan. Perkembangan tersebut meliputi pembuatan dan fabrikasi membran, pemisahan gas, energi, desalinasi air laut, membran distilasi dan kristalisasi, medis dan rekayasa jaringan, serta proses-proses di bidang membran. Sementara itu, di

Indonesia perkembangan mutakhir tercatat dengan dipatenkan dan dikomersialkannya teknologi membran non-modular dan membran superhidrofobik yang akan di bahas di bagian 4 buku ini.

3.1. Perkembangan di bidang Pembuatan dan Fabrikasi Membran

Salah satu pengembangan material dan fabrikasi membran saat ini adalah pengembangan membran aquaporin. Aquaporin adalah protein yang tertanam dalam membran sel yang mengatur aliran air. Aquaporin adalah protein membran integral dari kelompok besar *major intrinsic proteins* (MIP) yang membentuk pori di membran sel biologi. Aquaporin ditemukan oleh Peter Agre dari Johns Hopkins University (Knepper dan Nielsen 2004). Karena penemuannya tersebut, pada tahun 2003, Peter Agre memperoleh hadiah Nobel bersama dengan Roderick MacKinnon yang mempelajari struktur dan mekanisme kanal ion (www.nobelprize.org 2003). Setelah itu, banyak percobaan yang dilakukan untuk mengilustrasikan bagaimana cara menanamkan protein yang mentransfer air di dalam membran untuk purifikasi air.

Penggunaan material nano saat ini banyak dikembangkan untuk menghasilkan membran dengan kualitas yang lebih baik. *Carbon nanotubes* bersama dengan C60, adalah bentuk kristalin ketiga dari karbon. Pada dasarnya *carbon nanotube* adalah tabung yang terbuat dari karbon yang terikat heksagonal. *Carbon nanotube* memiliki kekuatan tinggi dan sifat elektrik yang unik, dan merupakan konduktor termal yang efisien. Oleh karena itu, *carbon nanotube* potensial pada banyak aplikasi. *Nanotube* dapat menyisihkan bakteri, anion, kontaminan organik, dan logam berat. Kecepatan transport air yang tinggi melalui *carbon nanotubes* diprediksi sebagai akibat dari ikatan hidrogen yang kuat antar molekul air dan tarikan lemah antara air dan lembaran grafit yang menyusun dinding CNT sehingga menghasilkan aliran yang hampir bebas gesekan (Hinds 2004).

Menggunakan *carbon nanotube* sebagai serat penguat pada material komposit merupakan bidang yang berkembang dari perspektif teoritis dan eksperimental. Perolehan membran yang berfungsi pada ukuran nano adalah tren terbaru untuk meningkatkan performa proses membran. Nechifor dkk. (Nechifor dkk. 2009) mensintesis material komposit polimer-*nanotube* baru yang berbasiskan polisulfonat dengan berbagai tipe *nanotube*, *single wall* (SWNT) dan *double wall* (DWNT), untuk aplikasi di bidang medis dalam pemisahan logam berat dari darah

atau cairan fisiologis lainnya. Polisulfonat memiliki sifat fisik yang baik seperti larut dalam berbagai solven serta ketahanan termal, kimia, dan mekanik yang baik. Di sisi lain, *carbon nanotube* memiliki sifat biokompatibel yang membuatnya cocok untuk aplikasi medis (Nechifor dkk. 2009).

Biofouling, atau akumulasi pertumbuhan organik yang tidak diinginkan di permukaan yang kontak dengan air, seringkali merupakan hasil dari pembentukan biofilm. Fenomena ini merugikan industri seperti makanan dan medis. Perkembangan nanoteknologi dewasa ini memperkenalkan material baru dengan sifat antimikrobia yang dapat digunakan sebagai agen antifouling pada membran. Fullerene adalah molekul yang tersusun atas karbon saja dalam bentuk bola, elips, atau tabung. Fullerene, C₆₀, memiliki sifat antibakteri pada suspensi *aqueous*, dalam suspensi air fullerene (FWS) yang dinamakan nC₆₀, berpotensi sebagai agen antibakteri karena potensinya, luasnya spectrum aktivitas, dan kemampuan untuk membunuh bakteri pada kondisi terang, gelap, aerobik, maupun anerobik. nC₆₀ tidak cocok untuk aplikasi medis karena interaksi negatifnya dengan sel mamalia namun dapat digunakan pada sistem pengolahan air, membran filtrasi, atau aplikasi anti *biofouling* (Lyon dan Delina 2008).

Penggunaan material mutakhir seperti piezoelektrik saat ini menarik para peneliti untuk mengembangkan membran yang memiliki sifat anti-*fouling*. Keberadaan *fouling* menyebabkan membran harus dicuci secara periodik untuk menghilangkan komponen penyebab *fouling* dari permukaan maupun struktur membran. Frekuensi pencucian merupakan faktor ekonomi penting karena memberikan pengaruh terhadap usia membran dan biaya operasi. Metode penggetaran membran atau modul membran merupakan salah satu metode yang efektif untuk mengendalikan *fouling*. Saat ini, beberapa penelitian mengenai penggunaan material maju piezoelektrik untuk menghasilkan getaran pada membran juga telah dilaporkan. Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan membran piezoelektrik, permasalahan *fouling* pada membran dapat dikurangi (Coster dkk. 2011). Membran piezoelektrik juga menunjukkan nilai fluks yang lebih tinggi dari pada membran biasa (Darestani dkk. 2013).

Penggabungan gugus amino ke dalam membran komposit merupakan salah satu pengembangan material membran. Membran komposit film tipis (*thin film composite*, TFC) terdiri dari tiga lapisan, yaitu: jaringan poliester yang berperan sebagai

penyangga struktur (120–150 μm), lapisan *interlayer* mikropori (40 μm), dan lapisan pembatas ultra-tipis pada permukaan atas membran (0,2 μm) (Lee dkk. 2011). Lapisan *interlayer* umumnya menggunakan polimer polisulfon sebagai penyangga lapisan pembatas yang selektif agar dapat bertahan pada tekanan tinggi karena lapisan penyangga poliester tidak dapat menyangga secara langsung (struktur poliester sangat tidak teratur dan terlalu berpori). Lapisan pembatas selektif memiliki ketebalan yang sangat tipis untuk memperoleh hambatan transfer massa sekecil mungkin. Lapisan pembatas yang selektif tersebut biasanya berupa senyawa poliamida. Membran poliamida terdiri atas kelompok asam amino sebagai monomer. Poliamida memiliki kestabilan struktur yang baik, ketahanan kimiawi yang baik, serta lebih mudah untuk dibersihkan (*cleaning*) (Lee dkk. 2011).

Saat ini telah dikembangkan membran yang disebut sebagai membran *mixed matrix* (MMM) atau dikenal juga sebagai membran hibrid, yaitu kombinasi material polimer (organik) dan anorganik. Tujuannya adalah untuk mengurangi biaya produksi dengan tetap menjaga permeabilitas dan selektivitas membran yang baik. MMM dapat mengatasi kelemahan yang dimiliki oleh membran polimer, yaitu mengeliminasi keterbalikan antara permeabilitas dan selektivitas (Peng dkk. 2005). Membran MMM terdiri dari partikel padat (*filler*) yang terdispersi dalam matriks kontinyu polimer. Dalam MMM, performa minimum membran ditentukan oleh matriks polimer dan partikel anorganik yang akan menentukan selektivitas (tanpa keberadaan cacat membran). Material polimer yang umum digunakan dalam pembuatan membran MMM adalah tipe polimer gelas (*glassy polymer*) dan polimer *rubber*, karena selektivitasnya yang tinggi. Filler dalam MMM dapat berupa partikel berpori atau tidak berpori. Namun yang umum digunakan adalah partikel berpori. Partikel yang paling banyak digunakan adalah zeolit, silika, *carbon molecular sieve* (CMS), *carbon nanotubes*, dan metal. Hambatan yang sering dijumpai dalam pembuatan MMM adalah tidak bercampurnya (*incompatible*) larutan membran polimer dan partikel anorganik sehingga menyebabkan penggumpalan-penggumpalan partikel dalam matriks membran (aglomerasi) dan berdampak pada performa membran (Anson dkk. 2004). Oleh karena itu, pemilihan material polimer dan partikel yang akan didispersikan merupakan parameter penting dalam pembuatan membran *mixed matrix*. Lemahnya interaksi antara permukaan komponen polimer dan partikel anorganik dapat menyebabkan cacat membran

berupa pembentukan lubang (*void*) besar diantara permukaan kedua komponen tersebut. Selain jenis material, parameter penting lainnya adalah pemilihan ukuran pori dan bentuk partikel anorganik yang sesuai dengan komponen yang akan dipisahkan.

Polieterketon (PEK) dan polietereterketon (PEEK) adalah polimer dengan derajat kristalinitas tinggi dan memiliki stabilitas termal yang sangat tinggi juga ketahanan mekanis dan kimia tinggi serta memiliki beberapa aplikasi teknologi dan industri. Karena tidak larut dalam air dan dalam banyak solven organik, PEK dan PEEK tidak dapat membentuk membran dengan teknik inversi fasa. Di sisi lain, membran menunjukkan aplikasi baru dari hari ke hari dan ada permintaan tinggi akan polimer baru yang dapat membentuk membran dengan sifat khusus untuk kegunaan tertentu. Ketidaklarutan PEEK diatasi dengan mensintesis PEEK-WC untuk mengurangi kristalinitasnya sehingga membuatnya larut dalam solven klorohidrokarbon dan DMF. Karenanya, membran PEEK-WC dapat dibuat.

Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) merupakan teknologi membran yang berperan penting dalam menghasilkan energi listrik. PEMFC dibuat menggunakan membran elektrolit polimer (Nafion) sebagai konduktor proton dan material berbasis Platinum (Pt) sebagai katalis. Fitur dari PEMFC seperti temperatur kerja yang rendah, densitas energi yang tinggi, dan kemudahan untuk *scale-up* membuat *fuel cell* PEM sebagai pembangkit energi generasi selanjutnya. Beberapa aplikasi yang dikembangkan untuk PEMFC antara lain *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC) untuk menghilangkan pemroses bahan bakar eksternal, *Nano Structured Thin Film Catalyst* (NSTFC) untuk meningkatkan luas permukaan katalis, dan *Carbon Nanotube Singlewall* sebagai material penyangga yang memiliki performa tinggi.

Saat ini plant SWRO menempati kapasitas terbesar dalam proses desalinasi menggantikan teknologi berbasis termal. Untuk memenuhi kebutuhan akan air yang semakin besar, *plant-plant* yang dibangun juga semakin besar. Permasalahan yang muncul dari *plant-plant* skala besar adalah kompleksitas dari sistem yang berhubungan dengan jumlah komponen, seperti: elemen RO, *pressure vessel*, koneksi, hingga luas area yang diperlukan. Untuk mengatasi masalah tersebut fabrikasi membran telah mempelajari pendekatan yang efisien untuk mengembangkan sistem SWRO yang memerlukan luas area yang lebih sempit

khususnya untuk plant-plant SWRO skala besar. Salah satu alternatifnya adalah dengan mengembangkan elemen yang berukuran besar. Selain itu, para fabrikasi membran juga telah mempertimbangkan konstruksi elemen yang efektif dan kemudahan dalam prosedur *loading* dan *unloading* element dari *pressure vessel*. Salah satu yang telah dikembangkan saat ini adalah elemen membran SWRO dengan diameter 18 inchi dimana rasio luas areanya mencapai 5 kali lipat dibanding modul komersial RO yang ada saat ini yang berdiameter 8 inchi (Antrim dkk. 2005). Salah satu contoh elemen membran SWRO berdiameter besar yang telah dikomersialkan adalah Megamagnum yang diperkenalkan oleh Koch Membrane System yang memiliki diameter 18 inchi (von Gottberg 2004). Studi modul RO berdiameter lebih besar menunjukkan pengurangan yang cukup signifikan terhadap harga produksi air. Karena luas area yang dimiliki lebih besar, pengurangan jumlah perpipaan, luas area, serta kemudahan operasi dan pemeliharaan sistem RO dapat dicapai. Selain itu, permasalahan teknis pada saat prosedur *loading* dan *unloading* dapat diatasi (Moss dan Skelton 2009).

3.2. Pengembangan Teknologi Membran untuk Pemisahan Gas

Dalam pemisahan udara, membran merupakan teknologi baru yang kini penggunaannya sangat diperhitungkan. *Oxygen Ion Transport Membranes* (OTMs) adalah keramik padat yang mengandung vakansi ion oksigen pada tingkat molekuler. *Driving force* dibalik perpindahan oksigen adalah perbedaan tekanan parsial di sepanjang membran. Kebanyakan material membran hanya konduktif pada oksigen di atas 700°C (975 K). Di atas temperatur ini, fluks proporsional terhadap temperatur sehingga reaksi eksotermik yang mengkonsumsi oksigen pada sisi permeal dapat memberikan fluks yang tinggi. Ada tiga tipe keramik dengan kapabilitas seperti ini, yaitu: perovskite, fluorite, dan campurannya. Proses ini dikombinasikan dengan *oxy-fuel combustion* yaitu pembakaran dengan menggunakan oksigen murni. Proses ini dapat mengurangi konsumsi bahan bakar serta temperatur api yang lebih tinggi. Selain itu proses ini memproduksi gas cerobong lebih sedikit dibandingkan pembakaran dengan udara (Foy 2007).

Tidak hanya dalam pemisahan gas, saat ini teknologi membran juga diaplikasikan pada reaktor Syngas. Syngas (*synthesis gas*) adalah campuran gas yang mengandung hidrogen dan karbon monoksida sebagai komponen utama dan sedikit karbon dioksida. Syngas mudah terbakar dan seringkali digunakan sebagai

bahan bakar dalam mesin pembakaran internal atau sebagai produk antara dari produksi senyawa lainnya. Syngas umumnya dibuat dengan gasifikasi berbagai umpan hidrokarbon seperti biomassa atau gas alam. Seringkali, karbon monoksida dan karbon dioksida yang terdapat dalam syngas merupakan racun atau penghambat bagi katalis yang digunakan sehingga diperlukan proses pemurnian hidrogen setelah gasifikasi (Brunetti 2010). Membran Pd-Ag yang ditempatkan dalam reaktor menunjukkan selektifitas hidrogen yang tinggi sehingga memungkinkan pemisahan selektif dari produk reaksi dan memberikan beberapa manfaat dibandingkan operasi tradisional, seperti: meningkatkan waktu tinggal reaktan, meningkatkan kesetimbangan dari reaktor tradisional, dan efek positif dari tekanan umpan dalam konversi CO.

3.3. Pembangkitan Energi

Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, teknologi membran memiliki peran strategis dalam menghadapi tantangan di bidang energi, salah satunya dalam menghasilkan blue energy (pembangkitan listrik dari air). Teknologi membran memberikan peluang pemanfaatan gradien salinitas untuk membangkitkan energi yang terbarukan dan berkelanjutan melalui *pressure retarded osmosis* (PRO) dan *reverse electrodialysis* (RED) (Długolecki dkk. 2008). Pada PRO, air dari larutan umpan bersalinitas rendah (seperti air tawar) bergerak melewati membran semipermeabel ke dalam larutan *brine* bersalinitas tinggi (contohnya air laut). Energi didapatkan dari pengurangan tekanan air yang melewati membran dengan bantuan *hydroturbine*. Jika PRO menggunakan membran semipermeabel dalam prosesnya, RED menggunakan membran penukar kation dan anion untuk memisahkan aliran air yang memiliki perbedaan salinitas (Post dkk. 2009). Selain itu, RED merupakan proses elektrokimia yang mengonversi langsung fluks ion menjadi arus listrik (Ramon dkk. 2011). Kelebihan yang ditawarkan dari proses RED adalah kesederhanaan dalam proses, yakni tidak membutuhkan tekanan tinggi, *pressure exchanger*, ataupun turbin (Post dkk. 2010). Pada RED, dua larutan garam yang berbeda konsentrasi dipisahkan dengan menggunakan bantuan membran anion dan kation yang diletakkan secara berselang-seling sehingga hanya ion yang dapat bermigrasi dari satu larutan ke larutan yang lain (Długolecki dkk. 2008). Perbedaan potensial kimia kedua larutan adalah *driving force* dari proses ini yang dapat membangkitkan perbedaan voltase pada masing-masing membran. Jumlah

voltase yang dapat dibangkitkan oleh membran adalah akumulasi dari jumlah perbedaan voltase dari sejumlah membran yang digunakan pada proses RED. Terkait densitas energi, Vermaas (Vermaas dkk. 2012) menyatakan bahwa dengan teknologi yang ada saat ini, densitas energi maksimum yang dapat dicapai adalah sebesar $2,7 \text{ W/m}^2$ dengan jarak antar membran sebesar $52 \mu\text{m}$ dan waktu tinggal 2,4 s. Namun simulasi yang dilakukan oleh Tedesco (Tedesco dkk. 2012) menunjukkan kemungkinan untuk mendapatkan densitas energi sebesar $8,5 \text{ W/m}^2$ jika ukuran dari *spacer* bisa dibuat menjadi sekitar $20 \mu\text{m}$ serta nilai permselektivitas dari membran penukar anion dan kation masing-masing sebesar 0,85 dan 0,9.

Tidak seperti proses yang dioperasikan dengan tekanan dimana tekanan hidraulik digunakan untuk menciptakan aliran pelarut (air) melalui membran semi permeabel, *forward osmosis* (FO) menggunakan *draw solution* terkonsentrasi dan larutan umpan encer untuk menghasilkan aliran pelarut yang digerakkan oleh perbedaan tekanan osmotik di sepanjang membran semipermeabel. Keunggulan utama dari FO dibandingkan RO adalah tidak dibutuhkannya tekanan hidraulik, yang membuat FO lebih hemat biaya. Telah diketahui pula bahwa FO memiliki kecenderungan *fouling* yang lebih rendah kemungkinan dikarenakan minimnya tekanan hidraulik. Kekurangan utama dari FO adalah fluks air yang lebih rendah dibandingkan harapan berlandaskan perbedaan tekanan osmotik dan permeabilitas membran (Cath dkk. 2006). Pada FO, larutan umpan disirkulasi kembali pada sisi umpan dan larutan draw disirkulasi kembali pada sisi permeat. Untuk proses FO dengan mode kontinyu, membran lembaran datar dapat digunakan dalam konfigurasi *plate-and-frame* atau dalam konfigurasi unik *spiral-wound*. Aplikasi modern dari FO adalah pemekatan lindi dari *landfill* juga desalinasi air laut dengan proses ammonia-karbon dioksida (Cath dkk. 2006). Teknologi FO pada dasarnya memiliki prinsip kerja yang serupa dengan PRO. Hanya saja membran FO pada umumnya diaplikasikan untuk tekanan yang sangat rendah. Sehingga dengan pengembangan material membran FO yang memiliki kekuatan mekanik yang cukup dapat digunakan pada proses pembangkitan energi listrik atau yang disebut sebagai *osmotic energy*.

Pengurangan konsumsi energi merupakan salah satu pengembangan teknologi membran dalam bidang energi, khususnya untuk proses desalinasi air laut berbasis membran RO. Konsumsi energi utama adalah energi yang dibutuhkan untuk

memompa umpan dengan tekanan tinggi ke dalam unit SWRO. *Reversible pumps, pelton turbine, turbo exchanger, pressure exchanger*, dan *hydraulic pressure booster* adalah contoh-contoh *energy recovery device* yang telah digunakan untuk mengutip kembali energi dari retentat SWRO (Greenlee dkk. 2009). Dengan menggunakan alat-alat tersebut, penurunan konsumsi energi secara dramatis dapat dicapai sehingga penurunan biaya produksi air secara keseluruhan dapat diperoleh.

3.4. Desalinasi Air Laut

Saat ini, teknologi membran telah mendominasi proses-proses desalinasi karena keunggulan-keunggulan yang ditawarkannya. Meskipun demikian, desalinasi berbasis membran juga menghadapi berbagai tantangan seperti peningkatan perolehan air secara keseluruhan, *fouling*, penyisihan boron, dan pengelolaan limbah garam (*brine*) yang dihasilkan. Saat ini telah banyak dilakukan studi mengenai penanganan limbah garam karena dampak lingkungan yang ditimbulkannya. Salah satu alternatif yang menjanjikan dalam pengelolaan limbah *brine* adalah sistem desalinasi terintegrasi. Salah satu contoh desalinasi berbasis membran terintegrasi adalah MF/NF/RO/MCr (Drioli dkk. 2006). Penggunaan *pre-treatment* berbasis membran dapat mengurangi konsumsi bahan kimia, memerlukan luas area yang lebih kecil, menghasilkan kualitas produk yang lebih konsisten, dan mudah untuk di *scale-up*. Dengan menerapkan NF sebagai *pre-treatment* membran RO, kecenderungan pembentukan *scaling* di permukaan membran RO dapat dikurangi karena ion-ion bivalen telah direjeksi oleh membran NF. Selain itu, karena sebagian garam-garam monovalen juga tertahan oleh membran NF, maka total perolehan air oleh membran RO dapat ditingkatkan. MCr dapat digunakan untuk memperoleh garam-garam baik dari retentat RO maupun retentat NF. Sehingga integrasi membran desalinasi tersebut dapat ditujukan untuk dua tujuan sekaligus, yaitu produksi air bersih dan produksi garam. Hasil studi sistem terintegrasi tersebut menunjukkan bahwa garam-garam berharga yang diperoleh dapat mengurangi biaya produksi air secara keseluruhan. Di samping itu, total perolehan air secara keseluruhan juga meningkat.

Penyisihan boron merupakan tantangan tersendiri bagi *plant* SWRO. Menurut WHO maksimum konsentrasi boron di dalam air minum yang diijinkan adalah 0.5 mg/L (Park dkk. 2012). Sayangnya, untuk mencapai penyisihan di atas 90% sangatlah sulit dicapai membran RO (Kezia dkk. 2013). Pengembangan

perancangan sistem merupakan salah satu alternatif yang dapat dilakukan seperti peningkatan pH (Oo dan Song 2009). Selain peningkatan pH, penyisihan boron juga dapat ditingkatkan melalui konfigurasi sistem RO yang sesuai. Desain post-treatment yang sesuai juga dapat meningkatkan penyisihan boron seperti penggunaan *ion-exchnage* konvensional atau elektrodialisis (Tu dkk. 2010). Saat ini, membran RO dengan tingkat penyisihan boron hingga 91-96% pada pH normal air laut telah tersedia di pasar.

Pemerintah Korea telah memilih teknologi desalinasi air laut berbasis membran RO (SWRO) sebagai salah satu dari 5 teknologi terdepan yang dianggap dapat meningkatkan perekonomian Korea pada tahun 2006 (Kim dkk. 2011). *Center for seawater desalination plant* (CSDP) yang didanai oleh pemerintah Korea kemudian meluncurkan program *SEAHERO research and development* (R&D). *Seawater engineering and architecture of high efficiency reverse osmosis* (SEAHERO) ditujukan untuk menghasilkan teknologi *plant* SWRO tingkat dunia. SEAHERO terdiri dari empat teknologi inti (*core technology*), yaitu: *platform technology* untuk konstruksi *plant* SWRO, pengembangan membran SWRO dan manufaktur komponen pompa tekanan tinggi dan teknologi optimalisasi sistem (*plant units localization and system optimization*), pengembangan teknologi konstruksi dan perancangan *plant* SWRO skala besar (*engineering-procurement-construction*), dan pengembangan teknologi operasi dan pemeliharaan (O&M) (Kim dkk. 2011). Ada 3 strategi teknis yang diterapkan oleh SEAHERO, yang disebut sebagai 3L, yaitu merancang dan membangun *train* SWRO terbesar di dunia, menurunkan *fouling* pada membran, dan menurunkan konsumsi energi sistem SWRO hingga <4 kWh/m³. Strategi tersebut diharapkan menghasilkan *plant* SWRO yang handal dan ekonomis.

3.5. Membran Distilasi dan Kristalisasi

Distilasi membran (*membrane distillation*, MD) merupakan teknologi yang menggabungkan proses distilasi dan filtrasi membran. MD adalah proses pemisahan yang berbasis termal dimana molekul uap dapat melewati membran berpori yang bersifat hidrofobik (Alkhudhiri dkk. 2012). MD telah diaplikasikan pada produksi air bersih dan air murni, pengolahan air limbah, proses pemekatan di industri makanan, dan proses pemekatan atau kristalisasi larutan organik dan biologi (Curcio dan Drioli 2005). Proses MD sangat kompetitif untuk desalinasi air payau dan air laut (Banat dan Simandl 1999). MD merupakan proses yang efektif

pada penyisihan senyawa organik dan logam-logam berat dari larutan encer (García-Payo dkk. 2000) dan air limbah (Zolotarev dkk. 1994). MD juga telah diaplikasikan pada pengolahan limbah radioaktif sehingga produknya dapat dibuang secara aman ke lingkungan (Zakrzewska-Trznadel dkk. 1999).

Distilasi membran osmotik (OMD) adalah salah satu varian distilasi membran (MD), yang dioperasikan pada temperatur rendah. OMD aplikatif untuk pemisahan berbagai larutan dan merupakan proses membran yang relatif baru. Dalam pemrosesan jus buah, pemekatan memberikan beberapa keuntungan, antara lain: mereduksi transportasi, pengemasan, biaya penyimpanan, konsentrat yang dihasilkan bersifat stabil dan memiliki ketahanan yang lebih terhadap mikroba, serta menjaga kualitas, jumlah, dan harga buah antara musim panen (Alves dan Coelho 2006). Metode konvensional berbasis termal pada umumnya digunakan untuk memekatkan jus buah. Akan tetapi, karena pengaruh temperatur, beberapa komponen sensitif terhadap termal menjadi rusak sehingga rasa dan aroma buah segar asli menjadi hilang. OMD adalah proses potensial yang dapat digunakan untuk memekatkan jus buah karena dioperasikan pada temperatur rendah. Pada proses OMD, komponen-komponen *volatile* dapat dipertahankan dan menghasilkan konsentrat dengan kandungan padatan terlarut yang tinggi, contoh: pemekatan jus buah kiwi, *total solubls solids* hingga 66.6°Brix (Cassano dan Drioli 2007).

Proses MBR dapat memproduksi efluen berkualitas cukup untuk memenuhi standard buangan dan reklamasi. Namun, proses MBR dan pengolahan air konvensional memiliki beberapa kelemahan yang berhubungan dengan selektivitas MF atau UF yang digunakannya. MDBR adalah teknologi baru yang menggabungkan bioreaktor untuk pengolahan air dengan distilasi membran (MD). MDBR adalah proses MD yang digerakkan oleh termal yang menggunakan membran hidrofobik mikropori seperti membran polypropylene (PP), polyvinylidene fluoride (PVDF) atau polytetrafluoroethylene (PTFE). MDBR cocok untuk kebutuhan produk air berkualitas tinggi.

Dalam kristalisasi membran, dua larutan yang berbeda dikontakkan oleh membran mikropori hidrofobik. Sifat hidrofobik dari membran (pada tekanan operasi yang digunakan) mencegah lewatnya larutan pada fasa fluida namun memungkinkan terjadinya antarmuka cair/uap ganda di mulut tiap pori pada

kedua sisi membran. Gradien dari potensi kimia dari kedua antarmuka ini menjadi *driving force* untuk mekanisme evaporasi-migrasi-kondensasi larutan, yang menginduksi supersaturasi pada larutan kristalin. Perubahan laju solven dengan membran yang sesuai dapat meningkatkan selektivitas kristalisasi ke arah salah satu polimorf (Di Profio dkk. 2007). Kristalizer membran dapat diintegrasikan dengan proses-proses membran lainnya seperti pada sistem desalinasi air laut, SWRO. NF digunakan sebagai *pretreatment* RO dalam desalinasi. Membran NF mampu menghilangkan turbiditas, mikroorganisme, dan kesadahan serta sebagian garam terlarut. Teknologi ini juga menggunakan tekanan operasi yang lebih rendah dan memberikan proses yang lebih energi efisien. Kristalizer membran (MCr) digunakan sebagai *post treatment* RO. MCr terdiri dari dua tahap penting dalam proses kristalisasi yaitu evaporasi solven dan kristalisasi. Dalam sistem ini membran tidak hanya berperan sebagai penyangga evaporasi solven namun juga sebagai permukaan berpori dan hidrofobik yang dapat mengaktifasi nukleasi heterogen dimulai dari super saturasi yang rendah dan meningkatkan kinetika kristalisasi, bahkan untuk molekul besar seperti protein. Karena kelebihan ini, kristal dengan morfologi dan struktur yang terkontrol dapat diproduksi (Gianluca dan Efrem 2009). MCr dapat digunakan sebagai tahap kristalisasi retentat NF untuk mendapatkan kristal dari garam-garam bivalen seperti CaCO_3 dan $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ serta sebagian kecil NaCl .

3.6. Aplikasi Medis dan Rekayasa Jaringan

Saat ini, teknologi membran telah banyak diaplikasikan untuk membuat alat mirip organ manusia. Alat ini berfungsi menggantikan organ manusia yang mengalami kerusakan. Organ yang telah dapat dibuat dengan teknologi membran antara lain ginjal, paru-paru, dan pankreas. Membran dialisis (ginjal buatan) mengandung pori yang melewatkan molekul kecil seperti air, urea, kreatinin, dan glukosa untuk melewati membran namun sel darah putih, sel darah merah, platelet dan sebagian besar protein plasma tertahan. Berkenaan dengan perlakuan tersebut, tiga mode yang biasa digunakan antara lain (Karkar 2013), yaitu hemodialisis: penghilangan zat terlarut yang dilakukan hanya dengan difusi, hemofiltrasi: penghilangan zat terlarut yang dilakukan hanya dengan konveksi, dan hemodiafiltrasi: penghilangan zat terlarut yang dilakukan dengan difusi dan konveksi. Oksigenator membran (paru-paru buatan) merepresentasikan terobosan

baru dalam pengembangan oksigenasi darah. Tidak ada kontak langsung antara darah dan udara sehingga meminimalkan resiko emboli udara. Alat ini tidak memerlukan sistem penghilangan gas (Baker 2012). Dalam pankreas buatan, membran (*flat sheet* atau *hollow fiber*) memisahkan sel dari aliran darah dan permeabel bagi glukosa dan insulin dan tidak permeabel bagi immunoglobulin dan limfosit. Alat ini dapat diletakkan secara: (i) ekstrasvaskuler dimana sel-sel diintegrasikan ke dalam membran dan ditanamkan pada situs ekstrasvaskuler, (ii) intravasvaskuler yaitu ketika sel-sel diintegrasikan ke dalam membran dan menggunakan aliran darah dari pasien, dan (iii) mikroenkapsulasi ketika sel-sel dienkapsulasi oleh membran polimer yang mencegah kontak dengan sistem kekebalan tubuh pasien dan memungkinkan transplantasi tanpa terapi imunosupresif (Mhaske dan Kadam 2010).

Teknologi membran juga memungkinkan sistem biohibrid menggunakan hepatosit. Karena hepatosit terisolasi dapat melakukan biotransformasi in-vivo dan fungsi hati tertentu, hepatosit dapat digunakan secara in-vitro sebagai sistem model untuk studi metabolik. Sifat hidrofobik/hidrofilik membran, seperti parameter energi bebas permukaan, mempengaruhi adhesi sel, morfologi sel dan fungsi metabolik spesifik dari hepatosit. Membran untuk rekonstruksi hati manusia disiapkan dari campuran polimer dari polietereterketon termodifikasi (PEEK-WC) dan poliuretan (PU) dengan teknik inversi fasa menggunakan metode presipitasi terendam. Membran ini dapat membantu adhesi dan diferensiasi sel dalam sistem biohibrid yang merepresentasikan hepatosit manusia dan membran PEEK-WC-PU selama lebih dari 1 bulan (Bartolo dan Bader 2013).

Tidak hanya dalam pembentukan organ buatan, teknologi membran juga telah diaplikasikan pada rekayasa jaringan. Rekayasa jaringan berasal dari operasi rekonstruktif dimana transplantasi langsung dari jaringan donor dipraktekan untuk memperbaiki fungsi dari jaringan yang rusak. Salah satu riset dalam bidang ini adalah fabrikasi *Scaffold*. *Scaffold* adalah konstruksi 3D yang berperan sebagai penyangga sementara dari sel yang diisolasi untuk tumbuh menjadi jaringan baru sebelum ditransplantasikan kembali ke jaringan pasien. Material *scaffold* harus biokompatibel dan terdegradasi seiring dengan regenerasi jaringan dan mengikuti model matriks ekstraseluler. Terlebih lagi, permukaannya harus menunjang

proliferasi dan pemasangan sel. Scaffold yang optimum harus memiliki vaskularisasi yang baik untuk dapat terintegrasi secara efisien dengan pasien.

3.7. Pengembangan Proses Berbasis Membran

Selain material dan fabrikasi membran, proses-proses berbasis membran juga terus dikembangkan, seperti reaktor membran enzimatik (*enzymatic membrane reactor*, EMR). EMR adalah proses reaktor kontinu dimana enzim dipisahkan dari produk akhir dengan bantuan membran selektif. Apapun konfigurasi EMRnya, tujuan utamanya adalah untuk memastikan rejeksi total dari enzim dan menjaga aktivitas enzim di dalam reaksi. Tergantung dari kasusnya, molekul enzim dapat tersirkulasi secara bebas pada sisi retentat, ditempatkan di dalam permukaan membran, atau di dalam struktur porinya (Rios dkk. 2004). Karena banyak enzim yang memiliki berat molekul antara 10 dan 80 kD, membran ultrafiltrasi dengan MWCO antara 1 dan 100 kD paling sering digunakan. Fouling membran dan kerusakan aktivitas enzim merupakan faktor-faktor yang dapat membatasi kinerja EMR. Manfaat utama dari penempatan enzim pada material membran adalah untuk meningkatkan stabilitas dan resistansinya terhadap solven organik.

Teknologi membran juga dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi pengontakkan dalam proses-proses kimia untuk menggantikan teknologi kontaktor konvensional. Di dalam membran kontaktor, proses separasi terintegrasi dengan operasi ekstraksi atau adsorpsi dengan tujuan untuk memanfaatkan kelebihan kedua teknologi tersebut secara penuh. Sistem dan aplikasi membran kontaktor dapat dibagi menjadi 3, yaitu: gas-gas, gas-cair, dan cair-cair (Drioli dkk. 2005). Aplikasi membran kontaktor yang telah dikembangkan meliputi pengolahan gas dan air. Membran kontaktor diantaranya telah digunakan untuk memproduksi air ultra murni dan ozonasi air bersih pada industri manufaktur semikonduktor. Di dalam industri semikonduktor diperlukan air murni dengan kontaminasi gas sangat kecil (Gabelman dan Hwang 1999). Misalnya, konsentrasi oksigen harus dikurangi hingga tingkat ppb (bagian permilyar) untuk mencegah pertumbuhan oksida silika. Berbeda dengan proses deoksigenasi konvensional seperti *nitrogen bubbling* atau degasifikasi vakum, membran kontaktor memiliki dispersi air yang lebih seragam dan lebih mudah dan tidak sensitif terhadap perubahan laju alir. Membran kontaktor juga telah digunakan untuk menambahkan gas CO₂ ke dalam air untuk meningkatkan efektivitas tahap pencucian (Dax 1996).

Emulsi adalah dispersi koloid dari dua atau lebih fasa tak larut dimana salah satu fasa (fasa terdispersi atau internal) didispersikan sebagai tetesan atau partikel dalam fasa lainnya (fasa kontinyu atau pendispersi). Emulsifikasi membran adalah teknologi yang tepat untuk produksi emulsi dan suspensi. Emulsifikasi membran memiliki beberapa keunggulan antara lain: kontrol yang baik terhadap distribusi tetesan, konsumsi energi dan material yang rendah, modular, dan mudah untuk *scale-up*. Aplikasi emulsifikasi membran, seperti biomedis, makanan, kosmetik, plastic, kimia, dan beberapa aplikasinya kini tengah dikembangkan pada level komersial. Emulsifikasi membran adalah teknologi baru dimana membran tidak digunakan sebagai penghalang selektif untuk memisahkan zat namun sebagai struktur mikro untuk membentuk tetesan dengan ukuran teratur dan seragam atau distribusi ukuran tetesan yang terkontrol (Candéa 2013). Ada dua mekanisme emulsifikasi membran yaitu: emulsifikasi membran langsung dimana fasa terdispersi diumpankan langsung ke pori membran untuk mendapatkan tetesan dan emulsifikasi membran premix, yaitu emulsi premix kasar ditekan melalui pori membran untuk mengurangi dan mengontrol ukuran tetesannya.

Reaktor membran (*membrane reactor*, MR) merupakan proses berbasis membran yang menggabungkan filtrasi membran dengan proses reaksi (Mulder 1996). Pada tahap awal pengembangan pemisahan reaktif berbasis membran, fungsi reaksi dan pemisahan dapat diintegrasikan dengan mudah melalui rangkaian unit reaktor dengan unit membran. Seiring dengan perkembangannya, dua unit yang berbeda tersebut digabungkan menjadi satu unit tunggal yang memerankan dua fungsi sekaligus membentuk proses hibrida. Peran membran pada proses MR antara lain (Sirkar dkk. 1999): memisahkan produk dari campuran reaksi, memisahkan reaktan dari campuran umpan masuk reaktor, mengendalikan penambahan reaktan, fasa pengontakan non-dispersif, memisahkan katalis, imobilisasi katalis di dalam membran, sebagai katalis, sebagai reaktor, dll. Dari berbagai macam fungsi yang dapat diperankan oleh membran di dalam proses MR, maka MR dapat dibedakan menjadi tiga konsep utama yaitu: (i) membran sebagai ekstraktor yang berfungsi untuk memisahkan produk dari reaksi, (ii) membran sebagai distributor yang berfungsi mengendalikan penambahan reaktan ke dalam reaksi, dan (iii) membran sebagai kontaktor yang berfungsi untuk mengintensifkan kontak antara reaktan dan katalis (Westermann dan Melin 2009). Selain dapat diklasifikasikan berdasarkan

peranan membran dalam transport, MR juga dapat diklasifikasikan berdasarkan material yang digunakan (organik, anorganik), peran membran di dalam proses katalisis (katalis, inert), dan sifat dari katalis (biologis, buatan) (Fontananova dan Drioli 2014).

Penginderaan kimia adalah bagian dari proses pengambilan informasi dan wawasan tentang komposisi kimia dari dalam sistem secara *real-time*. Sensor merupakan salah satu pendekatan sederhana dari analisis kimia, memungkinkan uji langsung dari sampel gas atau cairan tanpa preparasi atau pemurnian sampel. Membran sebagai sensor memiliki beberapa keuntungan antara lain tidak berefek atau bereaksi dengan zat yang diuji, hampir portabel, cocok untuk menentukan konsentrasi secara langsung atau untuk sensor titrasi (secara *real time*). Sensor membran ada 6 jenis yaitu *glass membrane*, *kristaline membran*, *fluoride selective membrane*, *ion-exchange resin membrane*, *valinomycin membrane*, dan *liquid membrane* (Vadgama 1990).

Nanofiltrasi solven organik (*organic solvent NF*, OSN) yang juga dikenal sebagai NF organofilik (*organophilic NF*, ONF) atau NF tahan solven (*Solvent resistant NF*, SRNF) merupakan teknologi pemisahan berbasis membran yang dapat digunakan pada proses pemisahan dan pemurnian di dalam solven organik. Meskipun teknologi tersebut masih relatif baru, tetapi kemampuan pemisahan solven organik memberikan peluang baru dalam industri kimia dan pengilangan (*refining industries*). Aplikasi pertama teknologi tersebut dalam skala besar adalah untuk pemulihan solven dari operasi *dewaxing* pada pemrosesan minyak pelumas (White 2006). OSN juga telah berhasil diaplikasikan untuk pemisahan bahan aktif farmasi (*active pharmaceutical ingredients*, API) meskipun masih pada skala laboratorium (Mohammad dkk. 2015). Potensi aplikasi OSN diantaranya adalah sebagai berikut (Vandezande dkk. 2008): (i) makanan: pemrosesan minyak nabati, sintesis asam amino dan turunannya, dan pemekatan serta pemurnian senyawa bioaktif, (ii) aplikasi katalitis: *enlarged catalyst*, kompleks logam transisi, nanopartikel katalitis, dan aplikasi biokatalitik, (iii) aplikasi petrokimia: pemulihan solven dalam proses *dewaxing* minyak pelumas, aplikasi pada aliran yang mengandung senyawa aromatis dalam proses pengilangan, desulfurisasi bensin, deasidifikasi minyak mentah, dan (iv) aplikasi farmasi: isolasi dan pemekatan bahan-bahan farmasi, pemurnian mikrofluidis, pertukaran solven, pemisahan senyawa kiral, ekstraksi

solven, pemekatan bahan-bahan farmasi dan pemulihan solven pada penyiapan HPLC.

Pemisahan campuran cairan yang bersifat azeotropik, memiliki titik didih relatif sama, dan isomeric atau cairan yang sensitif terhadap panas menggunakan proses pervaporasi telah banyak dilaporkan di dalam literatur. Pervaporasi dianggap sebagai proses alternatif yang menjanjikan karena lebih ekonomis, aman, dan ramah lingkungan sehingga dapat disebut sebagai teknologi bersih (Smitha dkk. 2004). Keunggulan-keunggulan yang ditawarkan oleh teknologi pervaporasi diharapkan dapat menggantikan proses-proses konvensional yang membutuhkan konsumsi energi cukup besar (*energy intensive*) seperti distilasi ekstraktif atau azeotropis. Pada proses distilasi, volatilitas relatif merupakan indikator bagi kemudahan pemisahan campuran. Sementara pada proses pervaporasi, fluks dan selektivitas komponen terpermeasi bergantung pada karakteristik serapan (*sorption*) dan difusi dari membran (Dutta dan Sikdar 1991). Pervaporasi banyak digunakan untuk pemisahan campuran air dan etanol. Pemisahan campuran metanol dan Methyl-tert-butyl ether (MTBE) merupakan contoh pemisahan campuran azeotrop yang menantang di industri kimia. Banyak studi yang membuktikan kelayakan secara teknis aplikasi pervaporasi untuk pemisahan campuran tersebut (Sridhar dkk. 2005). Bahan perasa ampuh dapat dibuat dengan mengkonsentrasikan senyawa perasa di atas konsentrasi alaminya pada makanan. Pervaporasi adalah salah satu teknik untuk memekatkan senyawa perasa. Pada teknik ini, senyawa perasa yang hidrofobik dapat dilewatkan secara selektif melalui membran non-pori hidrofobik atau organofilik seperti PEBA dan PDMS. Permeat terevaporasi ketika melewati membran karena sisi hilir dari membran dijaga vakum. Agar teruapkan, senyawa permeat harus memiliki beberapa derajat volatilitas, artinya pada suatu sistem tertentu, pervaporasi melewati campuran yang mengandung air dan komponen perasa (dan komponen volatil yang tidak berperan dalam rasa, seperti hidrokarbon) (Mujiburohman 2008).

4. TEKNOLOGI MEMBRAN DI INDONESIA

Aplikasi membran di Indonesia telah merambah ke hampir semua bidang industri. Dalam aplikasinya, membran dapat menggantikan proses konvensional yang sudah ada ataupun berperan sebagai tahap *polishing*. Aplikasi membran

tersebut di antaranya: pengolahan air, pengolahan limbah, industri akuakultur, industri agro, pengolahan minyak nabati, pemurnian gas, dan aplikasi dalam bidang medis. Di samping itu, di Indonesia juga telah dikembangkan berbagai konfigurasi proses berbasis membran serta fabrikasinya. Aplikasi-aplikasi teknologi membran serta pengembangan teknologi membran lebih lanjut dibahas pada sub bab-sub bab berikut.

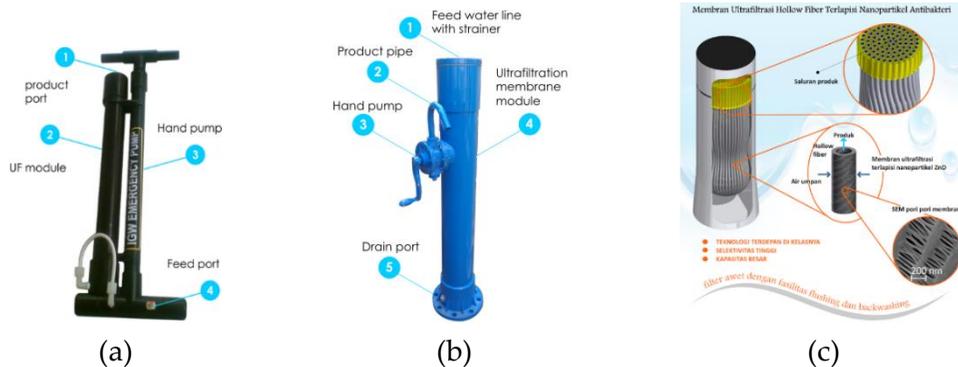
4.1. Pengolahan Air

Aplikasi teknologi membran untuk pengolahan air merupakan salah satu aplikasi utama yang telah dikembangkan di Indonesia. Berbagai kelebihan yang dimiliki oleh teknologi membran memungkinkan pengaplikasian teknologi ini pada berbagai kondisi. Khusus untuk kondisi bencana, teknologi membran dapat diaplikasikan untuk penyediaan air bersih hingga kualitas air minum. Dibandingkan dengan teknologi konvensional yang ada, teknologi ini memiliki kelebihan yaitu tahapan yang lebih sederhana serta tidak memerlukan bahan kimia, tambahan konsumsi energi dapat diminimumkan bahkan unit-unit filtrasi dapat dioperasikan tanpa listrik sekalipun. Salah satu produk yang telah diaplikasikan dalam penanganan bencana alam yaitu bencana tsunami dan gempa bumi Aceh dan Sumut adalah unit IGW green UF. Unit ini dibuat dalam beberapa konfigurasi, satu diantaranya adalah konfigurasi yang memungkinkan unit ini digunakan tanpa listrik seperti ditunjukkan pada Gambar 1 (a) dan (b).

Selain cocok untuk kondisi darurat bencana, teknologi membran juga dapat didesain dalam unit yang kompak dan sederhana sehingga memungkinkan aplikasinya dalam skala rumah tangga baik untuk penyediaan air minum ataupun air bersih untuk keperluan sehari-hari seperti memasak dan mencuci makanan. Luas permukaan membran dan permeasi yang sangat besar memungkinkan filtrasi tanpa pompa. Ditambah dengan fasilitas sederhana backwashing dan flushing menjadikan filter berbasis membran sangat awet sehingga biaya investasi per volume air yang diproduksi menjadi sangat murah. Di samping itu, membran juga dapat didesain dengan konsep minimum intervensi sehingga memberikan kenyamanan bagi pengguna karena tidak memerlukan prosedur pemeliharaan dan perbaikan yang rumit (Gambar 1c).

Tidak hanya untuk skala rumah tangga, teknologi membran dalam unit yang kecil tetapi berkapasitas besar juga dapat digunakan untuk depot air minum isi

ulang. Filter membran dapat dikombinasikan dengan karbon aktif dan biokeramik (dapat juga dilapisi dengan nanopartikel antibakteri) dalam satu unit yang padu. Karbon aktif dapat menyisihkan bau, klorin, logam berat, dan bahan beracun lainnya. Biokeramik berperan dalam mengembalikan kesegaran dan mineral penting dalam air. Sedangkan lapisan nanopartikel anti bakteri berfungsi membunuh kuman dalam air.



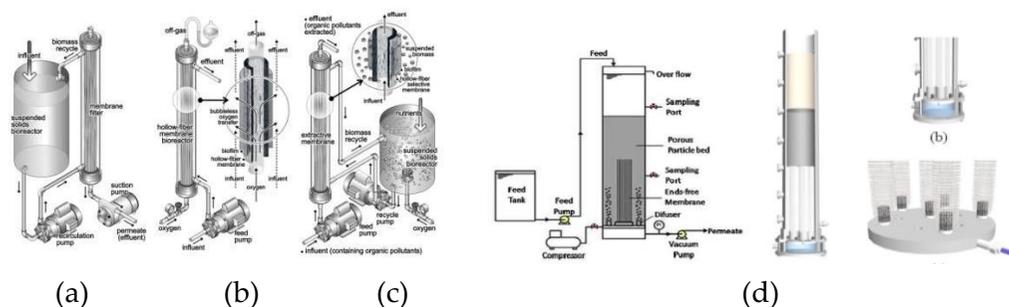
Gambar 1. Unit ultrafiltrasi untuk keperluan emergency: (a) UF emergency, (b) Green Ultrafilter, dan (c) semi industrial UF untuk aplikasi rumah tangga

4.2. Pengolahan Limbah Industri

Salah satu contoh aplikasi teknologi membran di bidang pengolahan limbah industri adalah teknologi membran bioreaktor (MBR). Bioreaktor membran dapat dikelompokkan menjadi tiga (Gambar 2a-c), yaitu bioreaktor membran untuk pemisahan biomassa, bioreaktor membran aerasi, dan bioreaktor membran ekstraktif (Stephenson dkk. 2000). Ketiga jenis bioreaktor membran ini memiliki fungsi masing-masing yang disesuaikan dengan jenis limbah. MBR untuk pemisahan biomassa merupakan bioreaktor membran yang aplikasinya paling luas dibandingkan dua tipe lainnya. Konfigurasi bioreaktor membran untuk pemisahan biomassa pada awalnya berupa bioreaktor dan modul membran yang terpisah, belakangan kemudian muncul konfigurasi dimana modul membran direndam langsung ke dalam bioreaktor. Namun demikian masalah yang sama-sama dihadapi kedua konfigurasi ini adalah *fouling* yang dapat menurunkan kinerja membran. Beberapa metode telah dikembangkan untuk mengendalikan masalah *fouling* pada bioreaktor membran, beberapa diantaranya adalah pengendalian turbulensi, pengoperasian pada fluks sub-kritis, dan/atau pemilihan material

membran yang tahan *fouling* (Gander dkk. 2000). Salah satu perkembangan terbaru yang berkaitan dengan pengendalian *fouling* adalah modifikasi konfigurasi MBR yang memunculkan sistem MBR tertanam yang diajukan oleh penulis (Wenten 2009). Konfigurasi ini memungkinkan kontak yang minimum antara umpan dengan membran sehingga tendensi *fouling* dapat diminimumkan (Gambar 2 d). Untuk konfigurasi baru tersebut, membran ultrafiltrasi *hollow fiber* dengan ujung yang bebas bergerak (*ends-free*) terendam di dalam bioreaktor dan dilengkapi dengan suatu unggun partikel porous. Pengembangan desain MBR tersebut dapat meningkatkan kinerja pengolahan limbah menggunakan teknologi membran.

Selain MBR, teknologi membran yang telah diaplikasikan pada pengolahan limbah adalah kombinasi UF-RO untuk pengolahan limbah *electroplating* (Irianto dan Wenten 2005). Kombinasi UF-RO dapat digunakan untuk memulihkan komponen logam dan guna ulang air limbah. Dengan teknologi membran, logam-logam yang terbawa oleh air limbah dapat dimanfaatkan kembali untuk proses *plating* berikutnya sedangkan air yang telah diolah dapat dimanfaatkan kembali untuk proses.



Gambar 2. Tipe bioreaktor membran: (a) MBR pemisahan biomassa, (b) MBR aerasi, (c) MBR ekstraktif, dan (d) MBR *implanted ends-free* (Wenten 2009)

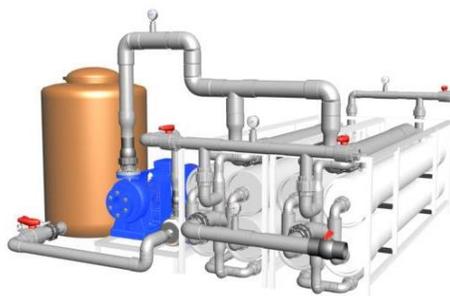
Pengolahan limbah merupakan salah satu aplikasi teknologi membran yang sangat menjanjikan. Teknologi membran tidak hanya memungkinkan pengolahan limbah sehingga dapat memenuhi standar buangan, tetapi juga memberikan peluang untuk pengutipan kembali komponen-komponen berharga yang terbawa oleh limbah. Teknologi membran telah diaplikasikan pada pengolahan *produced water*. Pengelolaan *produced water* dapat ditujukan untuk reinjeksi, guna ulang, dan dibuang dengan memenuhi standar buangan. Pada umumnya teknologi

konvensional yang ada saat ini belum mampu mengolah *produced water* hingga memenuhi standar guna ulang dan buangan sehingga kemudian banyak dikembangkan membran dan aplikasinya untuk pengolahan *produced water*. Salah satu contoh penerapannya adalah pengolahan *produced water* untuk reinjeksi (Wenten 2008). Selain itu, teknologi membran juga dapat ditujukan untuk pemulihan komponen berharga seperti pemulihan iodium dari limbah brine. Iodium yang terkandung dalam *produced water* berbentuk garam iodida, sehingga perlu dilakukan proses oksidasi untuk mendapatkan komponen iodium. Pemulihan senyawa iodin dari larutan garam (brine) melalui proses oksidasi dapat dilakukan menggunakan kontaktor membran (Wenten dkk. 2012). Di dalam aplikasi tersebut, kontaktor membran berupa membran keramik digunakan sebagai media pengontak pada reaksi oksidasi senyawa iodida dengan ozon. Oksidasi senyawa iodida menggunakan kontaktor membran menunjukkan kinerja oksidasi yang lebih baik daripada metode *bubbling* karena dapat menghasilkan dispersi gas dan pengontakan yang lebih baik. Selain pemulihan iodium, teknologi membran juga telah diterapkan untuk regenerasi *waste brine* yang dihasilkan dari proses regenerasi unit *softener* pada proses pengolahan *produced water*. Untuk mengurangi nilai kesadahan, *produced water* diolah menggunakan resin penukar kation dengan siklus ion Na^+ . Kemudian setelah kadar kesadahan berkurang, *produced water* tersebut diproses menjadi *steam* menggunakan boiler untuk diinjeksikan kembali ke dalam sumur minyak. Sementara itu, ketika resin mencapai titik jenuh, larutan NaCl dengan konsentrasi 8–9 % diperlukan untuk meregenerasi resin. Hasil dari proses regenerasi adalah air limbah garam (*waste brine*) yang dibuang dengan cara menginjeksikan ke dalam sumur khusus pembuangan (*disposal well*). Proses regenerasi resin tersebut menimbulkan beberapa permasalahan, seperti kebutuhan NaCl untuk larutan regenerasi dalam jumlah banyak, kandungan NaCl yang tinggi dalam *waste brine*, konsentrasi ion Ca dan Mg yang tinggi dalam *waste brine* yang menimbulkan kerak dalam saluran pipa injeksi ke sumur pembuangan, dan *waste brine* yang dibuang dengan volume yang besar. Kombinasi proses presipitasi kimiawi dan membran ultrafiltrasi (UF) telah diuji coba untuk pemanfaatan kembali *waste brine* pada skala laboratorium. Dari hasil uji coba tersebut menunjukkan bahwa produk dengan kualitas yang diinginkan dapat dicapai sehingga memungkinkan untuk guna ulang limbah *waste brine* (Wenten 2014).

Penerapan teknologi membran pada pengolahan limbah yang juga tidak kalah menariknya adalah untuk guna ulang limbah minyak pelumas. Kemampuan membran dalam proses klarifikasi untuk menghilangkan komponen-komponen pengotor di dalam minyak memunculkan peluang guna ulang limbah minyak pelumas. Sifat membran keramik yang tahan terhadap temperatur tinggi memungkinkan aplikasi membran tersebut pada proses klarifikasi minyak pelumas pada temperatur tinggi untuk menghasilkan fluks minyak pelumas yang besar. Pengembangan fabrikasi membran dengan tingkat hidrofobisitas yang tinggi memunculkan peluang baru pada proses guna ulang minyak pelumas. Dengan sifatnya yang sangat hidrofobik dapat menghasilkan fluks minyak yang cukup besar (Himma dkk.) sehingga temperatur operasi dapat diturunkan. Di sisi lain, membran dengan tingkat hidrofobisitas tinggi dapat dikembangkan dari material polimer polipropilen lokal sehingga proses fabrikasi membran menjadi lebih murah dan biaya total proses diharapkan menjadi jauh lebih murah.

4.3. Industri Akuakultur

Penerapan teknologi membran ultrafiltrasi pada sistem akuakultur memungkinkan dihasilkannya air kultur berkualitas tinggi, bebas dari virus, mikroba dan padatan tersuspensi. Proses membran ultrafiltrasi dapat diaplikasikan pada panti benih ataupun pada kolam pembesaran. Selain itu proses membran MF dan UF adalah alternatif yang dapat digunakan untuk memanen biomassa alga. MF cocok untuk filtrasi sel yang rentan pecah (Petrusevski dkk. 1995). Selain keuntungan-keuntungan di atas, pada pemanfaatan teknologi membran dalam sistem akuakultur, sekitar 80% dari air yang selama ini dibuang dapat diresirkulasi kembali. Proses ini juga dilakukan tanpa bantuan bahan kimia, sehingga penggunaan bahan kimia yang selama ini biasa dilakukan dapat ditekan seminimal mungkin. Keuntungan lain yang tidak kalah penting adalah unit ultrafiltrasi yang compact, modular, dan sederhana, sehingga bersifat *transportable* dan mudah dioperasikan. Dengan segala kelebihanannya, pemanfaatan teknologi ini pada akhirnya diharapkan dapat ikut berperan dalam memajukan industri akuakultur di Indonesia dan memberikan keuntungan baik dari segi ekonomi, teknik, maupun lingkungan.



Gambar 3. Unit membran UF industri akuakultur

4.4. Industri Agro

Teknologi membran di Indonesia juga telah dikembangkan pada sektor agroindustri misalnya pada pengolahan gula. Pada industri gula yang hampir semua tahapan produksinya merupakan proses pemisahan, teknologi membran sangat berpotensi meningkatkan produktifitas dan efisiensi proses produksi gula. Penerapan teknologi membran dapat menggantikan proses-proses yang telah ada ataupun menggabungkan proses konvensional dengan proses membran. Selain itu penggunaan teknologi membran memungkinkan langkah diversifikasi produk berbasis gula atau turunan gula yang mempunyai nilai ekonomi jauh lebih tinggi. Produk-produk seperti alkohol absolut, laktosukrosa, enzim dan turunan gula lainnya merupakan produk-produk yang sangat kompetitif untuk diproduksi dengan menggunakan teknologi membran.

Pada proses konvensional, klarifikasi merupakan proses paling penting di dalam pengolahan nira tebu, karena proses ini menentukan kualitas produk akhir yang dihasilkan. Pelaksanaan proses klarifikasi secara konvensional meliputi dua proses utama, yaitu proses kimiawi seperti defekasi, sulfitasi, fosfatasi dan karbonatasi dan selanjutnya diikuti oleh proses fisik seperti dekantasi dan filtrasi. Proses klarifikasi konvensional tidak ramah lingkungan karena menghasilkan banyak limbah anorganik. Penerapan proses membran ultrafiltrasi untuk menggantikan proses klarifikasi konvensional sangat prospektif karena konsumsi energinya yang rendah sehingga biaya operasi lebih ekonomis dan ramah lingkungan. UF juga dapat menghasilkan produk dengan kualitas yang tinggi (Bahrumisyah dkk. 1999).

Teknologi membran juga telah diaplikasikan pada industri tapioka dan memungkinkan terwujudnya produksi bersih pada industri tersebut. Penerapan

membran *low pressure reverse osmosis* (LPRO) dalam pengolahan limbah cair industri tapioka (Wenten 2002b) dapat mendaur ulang hingga 80% air proses dengan kualitas yang baik sehingga tidak berpengaruh negatif terhadap kualitas tepung tapioka dan dapat menghemat biaya yang dikeluarkan untuk penggunaan air. Penggunaan LPRO secara langsung menurunkan debit limbah sehingga mengurangi biaya *environmental fee* secara signifikan. Selain itu, penerapan proses ini juga dapat menghasilkan produk lain berupa *soluble starch* dan gula-gula terlarut yang tertahan oleh membran. Keduanya merupakan produk bernilai yang dapat dimanfaatkan, salah satunya sebagai substrat untuk fermentasi alkohol.

Penggunaan teknologi membran pada proses pengolahan minyak nabati nampaknya merupakan alternatif yang sangat menjanjikan bagi metode-metode konvensional karena dapat diterapkan di semua tahap pemurnian dan sejumlah proses deaneksasi. Produksi efluen dalam jumlah kecil dan kemungkinan pengolahannya, pengurangan konsumsi energi dan bahan kimia, dan tetap mempertahankan senyawa yang sangat penting merupakan beberapa keunggulan teknologi membran (de Morais Coutinho dkk. 2009). Salah satu aplikasi membran dalam filtrasi minyak nabati adalah klarifikasi *virgin coconut oil*. Operasi pada temperatur rendah memungkinkan untuk menjaga nutrisi dan sifat khas (aroma dan rasa) dari *virgin coconut oil* sehingga dapat menghasilkan minyak VCO dengan kualitas tinggi (Welasih dan Hapsari 2009).

Selain minyak VCO, air kelapa juga dapat dimanfaatkan dan diproses lebih lanjut menjadi minuman isotonik alami dengan nilai citarasa dan nutrisi yang tinggi. Dengan konsep filtrasi tanpa perubahan fasa dan tidak dioperasikan pada suhu tinggi, air kelapa yang steril namun tetap memiliki citarasa khas dan kandungan nutrisi yang relatif terjaga dapat diperoleh melalui klarifikasi menggunakan teknologi membran ultrafiltrasi. Hasil lain berupa konsentrat dapat diolah lebih lanjut menjadi bahan *nata de coco*.

Pada pengolahan minyak sawit, teknologi membran juga memunculkan peluang untuk mewujudkan konsep "*Zero Sludge Palm Oil Milling Plant*" (Wenten 2004). Permasalahan utama yang dihadapi industri sawit adalah pengolahan limbah yang ada saat ini sulit untuk menghasilkan luaran yang mengarah pada industri CPO bebas limbah. Solusi terpadu program *zero waste effluent* dan integrasi kebun-ternak dalam industri CPO menggunakan teknologi membran dapat

diterapkan untuk mengatasi permasalahan limbah tersebut. Membran keramik dapat digunakan untuk pengutipan (*recovery*) seluruh solid dari *heavy phase*. Salah satu keunggulan dari penggunaan teknologi membran adalah potensi dihasilkannya bahan baku pakan ternak dan luaran yang tidak saja memenuhi standar buangan tetapi juga dapat digunakan kembali ke dalam proses. Penggunaan membran MF dengan pori yang berukuran submikron memungkinkan dilakukannya pengutipan seluruh solid dari *heavy phase* dekanter. *Heavy phase* keluaran dekanter memiliki temperatur yang tinggi (95°C) sehingga dalam proses pengolahannya digunakan membran MF keramik. Proses filtrasi terhadap *heavy phase* dengan menggunakan membran keramik menunjukkan hasil yang menggembirakan dimana seluruh solid dapat dikutip (Wenten 2004). Selama ini *cake* yang berasal dari dekanter telah terbukti dapat digunakan sebagai pakan ternak. Uji coba pemberian pakan pada ternak sapi dengan menggunakan *cake* yang berasal dari dekanter telah dilakukan di Sumatera Utara dan telah mencapai hingga empat generasi (Manurung 2004). Pada proses filtrasi dengan membran keramik, selain dihasilkan solid yang telah terpekatkan, dihasilkan pula aliran permeat berupa air yang telah terpisah dari solid dan dapat dipergunakan kembali sebagai air proses. Dengan demikian, seluruh keluaran dari proses filtrasi dapat dimanfaatkan. Selama ini pengolahan kondensat lebih ditujukan pada pengolahan untuk mencapai standar buangan. Penggunaan membran khususnya membran UF yang dikombinasikan dengan *dissolved air flotation* (DAF) membuka peluang untuk pemanfaatan kembali luaran membran sebagai air proses sedangkan padatnya digunakan sebagai bahan baku pupuk kompos untuk pembibitan (Wenten 2004).

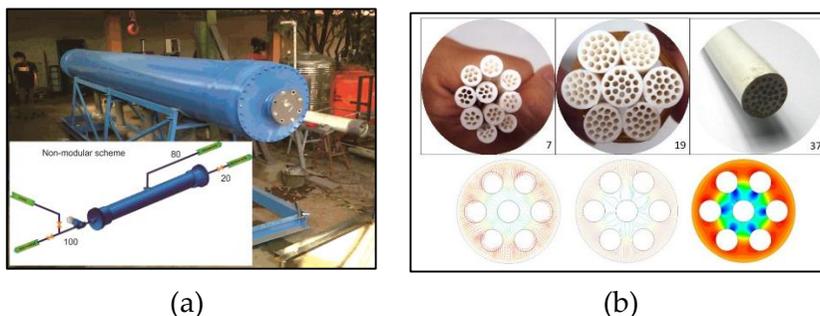


Gambar 4. Membran keramik untuk pengutipan solid dari *heavy phase decanter* di PT Agrical, Bengkulu

4.5. Teknologi Membran Non-Modular

Membran pada umumnya bersifat modular dengan kapasitas tertentu untuk tiap modulnya. Sehingga untuk kapasitas yang besar, modul membran dapat disusun secara paralel bergantung pada kapasitas keseluruhan proses dan dimensi yang diinginkan. Namun membran modular memiliki kelemahan, yaitu desain perpipaan, koneksi dan instrument yang semakin kompleks dengan semakin banyaknya membran terpasang untuk memenuhi kapasitas produksi. Kebocoran di antara koneksi pipa menjadi permasalahan utama yang dihadapi dalam operasional membran modular sehingga kapasitas keseluruhan sistem membran menjadi tidak terpenuhi.

Terobosan teknologi membran yang cukup menarik perhatian dan telah dikembangkan di Indonesia adalah konsep membran ultrafiltrasi non-modular. Sederhananya atau kesederhanaan yang ditawarkan oleh konsep membran non-modular adalah kemampuannya menyelesaikan permasalahan yang dihadapi oleh membran modular, yaitu desain satu pompa bolak-balik yang dapat digunakan untuk *backwash* dan filtrasi. Penggunaan pompa tunggal ini tentunya berdampak pada pengurangan biaya investasi dan energi (Wenten dkk. 2014). Walaupun biaya penggantian membran cukup besar, namun kelemahan ini dapat diminimalisasi dengan pengembangan membran UF yang sangat kuat, tahan terhadap fouling dan sistem potting membran yang baik, sehingga umur membran non-modular dapat lebih panjang.



Gambar 5. Sistem membran (a) non-modular dan (b) membran kapiler *multibore* 7, 19 dan 37 lubang (Sumber: gdppfilter.co.id)

Pengembangan teknologi membran non-modular tidak terlepas dari pengembangan fabrikasi membran kapiler *multibore*. Membran kapiler *multibore* merupakan membran berbentuk kapiler dengan banyak saluran. Membran kapiler *multibore* memiliki sifat *self support*. Struktur ini menyebabkan membran memiliki

kekuatan yang lebih kokoh, serta dapat digunakan pada kapasitas umpan yang lebih tinggi. Dengan kekuatan mekanik yang lebih baik dan *packing density* yang lebih besar, membran kapiler *multibore* mengurangi biaya tanpa mengorbankan kualitas. Membran kapiler *multibore* tersebut dapat difabrikasi setelah melalui pengembangan spinneret untuk pada spinning membran.

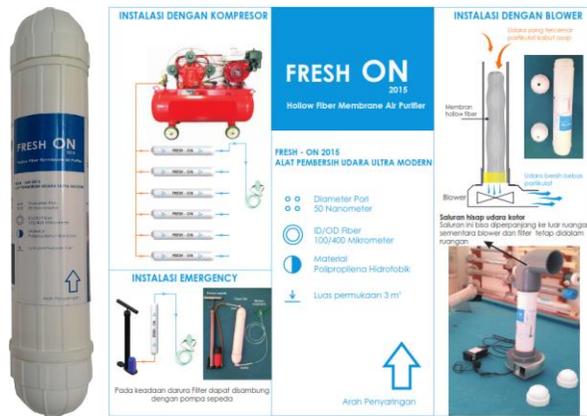
4.6. Membran Superhidrofobik

Fabrikasi membran merupakan tahap yang paling penting dalam pengembangan teknologi membran. Pengembangan terbaru dalam fabrikasi membran adalah pembuatan membran superhidrofobik berbasis polimer polipropilen. Polipropilen (PP) banyak digunakan untuk pembuatan membran mikropori hidrofobik karena memiliki stabilitas termal, resistensi kimia, dan kekuatan mekanik yang baik, serta murah. Akan tetapi, hidrofobisitas PP yang kurang tinggi menyebabkan terjadinya fenomena pembasahan membran oleh cairan yang mengakibatkan penurunan kinerja membran. Membran hidrofobik dibutuhkan untuk aplikasi yang tidak mengijinkan pembasahan pori-pori membran oleh cairan, seperti pada proses distilasi membran, absorpsi gas membran, ekstraksi pelarut organik, dan pemisahan emulsi air dalam minyak. Oleh karena itu, diperlukan membran superhidrofobik sehingga permasalahan pembasahan tersebut dapat diatasi. Pada proses pengolahan minyak nabati seperti minyak sawit, membran dengan tingkat hidrofobisitas yang tinggi sangat diperlukan untuk memperoleh nilai fluks yang tinggi. Dengan hidrofobisitas yang tinggi, maka afinitas membran terhadap minyak sawit akan meningkat, sehingga laju permeasi minyak melalui membran menjadi lebih tinggi dan menghasilkan kapasitas produksi yang lebih besar. Tingginya laju permeasi minyak akan berdampak positif terhadap desain dari unit proses, dimana unit *refined palm oil* berkapasitas besar dapat dibuat dengan ukuran peralatan yang minimum. Hal yang sama juga dapat diperoleh pada pengolahan minyak nabati lainnya. Pengembangan membran superhidrofobik ini sangat mendukung pengembangan industri minyak nabati di Indonesia. Salah satu contoh aplikasi membran superhidrofobik dalam pengolahan minyak nabati adalah ekstraksi minyak-minyak berbasis membran superhidrofobik dalam pengolahan minyak sawit menggunakan konsep pemasakan tanpa air (Wenten 2015). Dengan konsep

tersebut, limbah air yang selama ini menjadi salah satu kendala besar pada proses pengolahan minyak sawit dapat dihilangkan. Selain itu, keunggulan lain konsep tersebut adalah kompleksitas proses dapat diturunkan, kehilangan minyak dapat dikurangi, dan kualitas minyak dapat ditingkatkan.

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan hidrofobisitas membran PP, diantaranya adalah metode coating, plasma treatment, grafting secara kimia dan irradiasi. Telah diketahui bahwa hidrofobisitas dapat ditingkatkan dengan menurunkan energi permukaan dan meningkatkan kekasaran. Peningkatan hidrofobisitas dengan mengontrol kimia permukaan saja memiliki keterbatasan, sebagaimana dilaporkan bahwa energi bebas permukaan terendah yang dapat dicapai pada permukaan yang diterminasi $-CF_3-$ adalah $6,7 \text{ mJ/m}^2$ yang sama dengan 119° (Nishino dkk. 1999). Maka, untuk mencapai kondisi superhidrofobik perlu mengkombinasikan material berenergi permukaan rendah dan kekasaran permukaan. Prosedur-prosedur yang umum digunakan untuk menghasilkan permukaan superhidrofobik yaitu mengkasarkan permukaan material yang memiliki energi permukaan rendah atau mengkasarkan permukaan diikuti dengan hidrofobisasi (Xue dkk. 2010). Jumlah tahap yang berbeda mungkin diperlukan untuk memperoleh permukaan superhidrofobik.

Teknologi filtrasi membran superhidrofobik juga merupakan salah satu solusi yang tepat bagi penyisihan partikulat di udara. "Fresh ON" merupakan teknologi purifikasi udara berbasis membran ultrafiltrasi *hollow fiber* yang dikembangkan oleh penulis seperti terlihat pada Gambar 6, dengan ukuran pori 50 nanometer, luas permukaan 3 meter persegi, serta desain sederhana. Dengan ukuran pori tersebut, teknologi penyaringan membran tidak hanya dapat memisahkan partikulat saja tetapi juga serbuk sari, spora, dan virus secara efektif. Fresh ON diharapkan menjadi teknologi purifikasi udara yang dapat diterapkan untuk kondisi darurat seperti penanganan bencana kabut asap. Fresh ON juga diharapkan menjadi alat purifikasi udara yang dapat digunakan untuk keperluan sehari-hari sehingga masyarakat dapat menikmati udara yang segar dan bebas debu.



Gambar 6. Teknologi membran untuk purifikasi udara “Fresh ON”

4.7. Lain-lain

Contoh penerapan teknologi membran dalam bidang medis adalah pengembangan unit hemodialysis dan mesin guna ulang hemodialysis (Wenten 1999). Untuk meringankan beban pasien gagal ginjal terminal (*Terminal Renal Failure*, TRF) di Indonesia, telah dikembangkan mesin khusus untuk guna ulang membran hemodialisis (*artificial kidney*). Dengan mesin tersebut, membran hemodialisis dapat digunakan kembali beberapa kali hampir selama dua tahun. Guna ulang membran hemodialisis dapat mengurangi biaya terapi bagi pasien gagal ginjal.

Selain pengembangan aplikasi teknologi membran, di Indonesia juga telah dikembangkan proses-proses berbasis membran seperti proses *conductive electro dialysis* (CED). CED dikenal juga sebagai *electrodeionization* (EDI) atau *continuous electrodeionization* (CEDI) adalah membran dengan gaya dorong potensial listrik yang menggabungkan proses *ion-exchange* konvensional dengan *electrodialysis*. Resin-resin penukar ion (*ion-exchange resin*) di dalam kompartemen-kompartemen CED berperan untuk meningkatkan konduktivitas modul keseluruhan sehingga dapat mencapai pemurnian pada level yang tinggi dan menghasilkan air ultra murni. Keunggulan dari CED adalah tidak memerlukan regenerasi kimiawi (*chemical-free operation*). Resin-resin di dalam modul CED mengalami regenerasi secara kontinyu sehingga dapat mengeliminasi biaya dan bahan kimia yang diperlukan untuk meregenerasi resin pada proses konvensional seperti larutan asam dan basa kuat. CED telah banyak digunakan pada berbagai macam aplikasi seperti produksi air ultramurni, pengolahan air limbah, maupun

bidang bioteknologi (Khoiruddin dkk. 2014a). Pada produksi air ultramurni seperti air umpan boiler tekanan tinggi, CED menunjukkan hasil kinerja yang lebih baik dan biaya yang relatif lebih rendah dibanding teknologi *ion-exchange* konvensional (Wenten dkk. 2013). CED juga dapat digunakan untuk pemulihan atau *recovery* asam sitrat dari proses fermentasi (Widiasa dkk. 2004). CED juga dapat digunakan untuk demineralisasi larutan gula pada proses *refinery* larutan gula (Khoiruddin dkk. 2014b; Widiasa dan Wenten 2003). CED juga dapat dikombinasikan dengan RO untuk pemulihan kembali gula dari limbah yang mengandung gula dan menghilangkan kandungan garamnya (Widiasa dan Wenten 2007).

Hollow fiber cooling system merupakan teknologi sistem pendingin yang dikembangkan menggunakan membran *hollow fiber* (Wenten dan Widiasa 2005). Sistem pendingin sirkulasi tertutup merupakan salah satu perkembangan mutakhir dimana sistem ini sangat berbeda dengan teknologi yang sudah ada sebelumnya. Sistem pendinginan tersebut menggunakan membran *hollow fiber* hidrofobik mikropori yang permeabel terhadap uap tetapi tidak permeabel terhadap air. Keunggulan dari sistem tersebut terletak pada susunan sistem pemroses yang memungkinkan untuk menurunkan kembali temperatur air pendingin dan sekaligus produksi air ultramurni dengan memanfaatkan panas yang dibuang oleh air pendingin tersebut. Karena sistem sirkulasinya tertutup, kontaminasi air pendingin oleh partikel dan mikroorganisme dari udara sebagaimana sering terjadi jika menggunakan *cooling tower* konvensional dapat dihindari. Dengan demikian, terjadinya *fouling* pada dinding penukar panas juga dapat diminimasi. Peralatan yang bersifat modular dan mampat merupakan keunggulan lainnya dari sistem tersebut.

Teknologi kontaktor membran telah digunakan pada proses pengontakan gas-cairan untuk mengabsorpsi gas CO₂ menggunakan larutan absorben. Kontaktor membran gas-cair dengan *cyclone* terintegrasi yang dikembangkan oleh penulis, memungkinkan memungkinkan adsorpsi CO₂ tanpa terjadinya pembasahan membran yang merupakan momok operasional kontaktor membran.

Di dalam teknologi membran, membran merupakan komponen utama pemisahan sehingga pengembangan pembuatan membran adalah bagian yang sangat penting. Pengembangan pembuatan membran yang telah dilakukan diantaranya, pembuatan membran ultrafiltrasi untuk pengolahan air, pembuatan

membran untuk pengolahan gas, pembuatan membran penukar ion heterogen, pembuatan membran superhidrofobik, serta pengembangan teknologi pembuatan membran seperti mesin *spinning*, *casting*, *stretching*, hingga pembuatan membran *multibore* dan pengembangan teknologi membran non-modular.

5. PENUTUP: PROSPEK MASA DEPAN

Kiprah penulis dalam dunia membran dimulai ketika mengambil program master di Technical University of Denmark, tahun 1988. Pada tahun 1993, penulis memperoleh paten dari alat yang dikembangkan untuk peningkatan efisiensi filtrasi pada industri bir. Pada tahun 1994, penulis meraih penghargaan dari Filtration Society London berupa Suttle Award, sebagai bukti tingginya nilai inovasi penemuan tersebut. Teknik *backshock* yang dikembangkan merupakan solusi bagi permasalahan filtrasi bir dan filtrasi larutan bersuspensi. Pada tahun 2002, penulis mendirikan workshop di Indonesia untuk mengembangkan membran dan mentransformasikan ide-ide baru agar dapat diwujudkan. Membran mulai diangkat ke skala industri diawali dengan berdirinya GDP Filter sebagai fabrikasi membran pertama dan satu-satunya di Indonesia pada tahun 2002 di Bandung. Didukung oleh sistem riset dan pengembangan yang baik, GDP Filter mampu mengeluarkan inovasi-inovasi paten produk membran yang mulai dikenal di dunia luar. Produk-produk yang dihasilkan pun beragam dan ditujukan untuk memenuhi kebutuhan skala rumah tangga, laboratorium, hingga skala industri, dan juga untuk keperluan-keperluan darurat dan bencana. Salah satu produk yang menyedot perhatian dunia baru-baru ini adalah konsep membran yang dikonstruksi secara non-modular untuk pengolahan air. Membran non-modular mengajukan suatu konsep baru untuk menaikkan kapasitas membran dengan konfigurasi membran hanya dalam satu vessel.

Telah banyak dilakukan pengembangan yang melampaui konsep teknik kimia “tradisional” melalui peralatan dan metode atau teknik baru yang dapat mengubah konsep *plant-plant* industri kimia terdahulu menjadi proses-proses yang kompak, aman, efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan. Kontribusi penting untuk mewujudkan pengembangan industri yang berkelanjutan dapat dilakukan dengan “*green process engineering*” berdasarkan prinsip strategi “intensifikasi proses”. Teknologi membran memberikan solusi yang menjanjikan bagi permasalahan yang dihadapi oleh masyarakat industri modern dan dapat memenuhi tujuan

intensifikasi proses karena memiliki potensi untuk menggantikan teknologi konvensional yang bersifat *energy-intensive*, memfasilitasi transfer komponen spesifik secara selektif dan efisien, dan meningkatkan kinerja proses reaksi. Desain dan pengembangan proses terintegrasi yang inovatif berbasis membran juga terus meningkat, sehingga dapat memberikan dukungan penting bagi pembangunan masa depan pertumbuhan industri berkelanjutan (Drioli dkk. 2011). Pengembangan teknologi membran juga begitu pesat meliputi pengembangan fabrikasi membran, pemisahan gas, pembangkitan energi, desalinasi air laut, proses membran distilasi dan kristalisasi, aplikasi medis dan rekayasa jaringan, serta pengembangan proses-proses berbasis membran lainnya. Oleh karena itu, penguasaan teknologi membran merupakan jalan untuk memajukan industri Indonesia. Pengembangan membran superhidrofilik dan superhidrofobik berbasis polipropilen lokal, pengolahan gas alam, produksi *biofuel*, ekstraksi bahan alam, pengolahan sawit bebas limbah, produksi bersih industri tapioka, industri akuakultur bebas patogen, pengolahan air untuk percepatan pencapaian MDGs, dan *zero discharge seawater desalination* adalah beberapa aplikasi strategis teknologi membran Indonesia di masa depan.

Salah satu kendala utama dalam pengembangan teknologi membran adalah bahan baku polimer yang merupakan bahan baku utama dalam fabrikasi membran. Untuk pertimbangan daya saing, pengembangan membran Indonesia di masa mendatang akan lebih bertumpu pada material polipropilen lokal. Polipropilen banyak digunakan untuk pembuatan membran karena memiliki stabilitas termal, resistensi kimia, dan kekuatan mekanik yang baik. Membran polipropilen juga dapat dikembangkan lebih lanjut menjadi membran superhidrofilik dan membran superhidrofobik melalui proses modifikasi. Membran superhidrofilik memiliki karakteristik permeabilitas air yang tinggi sekaligus kerentanan terhadap fouling yang rendah sehingga sangat cocok untuk pengolahan air. Sebaliknya, membran superhidrofobik memiliki tingkat pembasahan air yang sangat rendah dan karakteristik permeabilitas minyak yang tinggi sehingga sangat cocok untuk aplikasi seperti pengolahan minyak nabati, klarifikasi minyak dan oli, kontaktor gas-cair tanpa pembasahan, dan lain-lain. Oleh karena itu, salah satu cara untuk mengatasi kendala bahan baku tersebut adalah dengan mengembangkan membran berbahan dasar polipropilen lokal.

Proses kontaktor membran yang dapat diterapkan untuk penyisihan CO₂ dari gas alam adalah salah satu contoh intensifikasi proses berbasis teknologi membran. Indonesia dikenal sebagai salah satu produsen gas alam terbesar di dunia dengan cadangan gas yang mencapai 151,33 TCF (www.migas.esdm.go.id 2015). Namun gas alam di Indonesia memiliki kandungan karbon dioksida yang tinggi yang merupakan tantangan tersendiri bagi pemanfaatan gas alam tersebut. Kontaktor membran merupakan teknologi alternatif yang tepat untuk pemisahan CO₂ menggantikan proses pengontakan teknologi konvensional. Penyisihan gas CO₂ dari gas alam dalam upaya untuk meningkatkan kualitas gas alam yang dihasilkan menggunakan kontaktor membran dapat diintegrasikan dengan *Carbon Capture and Storage* (CCS) untuk meningkatkan produksi minyak melalui proses EOR (*Enhanced Oil Recovery*). Kombinasi kedua proses tersebut yaitu penyisihan CO₂ dari gas alam dan injeksi CO₂ untuk EOR, diharapkan dapat menjadi salah satu solusi untuk memajukan industri minyak bumi dan gas alam di Indonesia.

Selain *Salinity-gradient energy*, bioetanol juga diakui secara luas sebagai salah satu sumber energi terbarukan dan berkelanjutan. Namun, tingginya biaya produksi dan biaya pemurnian bioetanol menjadi hambatan utama dalam aplikasinya sebagai pengganti bahan bakar fosil. Salah satu alternatif untuk menghasilkan bioetanol dengan biaya produksi yang rendah dapat dilakukan melalui dealkoholisasi bir (Purwasasmita dkk. 2015). *Non-alcoholic beer* dikenal sebagai produk dengan harga pasar yang kompetitif, sementara bioetanol yang dihasilkan sebagai produk samping akan semakin meningkatkan keekonomian industri bir. Produk samping dari produksi *non-alcoholic beer* berupa bioetanol dengan kemurnian tinggi dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif yang terbarukan. Salah satu keunggulan teknologi membran dalam proses dealkoholisasi bir adalah dapat mengurangi hilang atau rusaknya komponen nutritif di dalam bir karena temperatur operasi yang relatif rendah. Selain pengambilan etanol melalui proses dealkoholisasi, etanol juga dapat diperoleh dengan kemurnian yang tinggi melalui proses pervaporasi, salah satunya menggunakan membran Zeolit NaA.

Teknologi membran juga dapat berperan dalam pengambilan dan pemanfaatan komponen nutritif dari bahan-bahan alam yang beragam di Indonesia. Teknologi membran memungkinkan untuk mengekstrak bahan-bahan nutritif dari alam

secara molekuler dengan biaya operasi yang rendah dan dapat menghasilkan produk dengan kemurnian tinggi. Sebagai contoh, teknologi membran dapat diterapkan dalam proses pengutipan komponen minor dari minyak sawit yang berupa karoten (alpha- dan beta- karoten), tokotrienol, dan tokoferol. Proses pemisahan berbasis membran juga dapat mengurangi kerusakan komponen-komponen nutritif dari bahan alam karena prosesnya beroperasi pada temperatur relatif rendah. Seperti misalnya pada proses klarifikasi jus tebu menggunakan membran UF. Selain prosesnya memerlukan energi yang relatif lebih rendah dan ramah lingkungan, klarifikasi jus tebu menggunakan membran UF dapat menghasilkan produk dengan kemurnian tinggi dan menjaga komponen nutritif seperti zat anti-diabetes yang terkandung di dalamnya. Hal ini tidak terbatas pada komponen-komponen tersebut saja, tetapi juga dapat diterapkan pada komponen-komponen nutritif lain dari berbagai macam bahan alam yang memiliki khasiat *pharmaceutical* seperti ekstrak temu lawak, ekstrak kumis kucing, minuman isotonik dari air kelapa, dan lain-lain.

Teknologi membran juga berpotensi untuk digunakan dalam memajukan industri agro seperti pengolahan minyak sawit di Indonesia. Minyak sawit merupakan salah satu sumberdaya alam terbesar dan menjadi salah satu tulang punggung perekonomian di Indonesia. Namun pengolahan minyak sawit di Indonesia masih menggunakan proses konvensional, dimana kebutuhan akan air dan bahan kimia, serta energi masih sangat besar. Di sisi lain, proses konvensional yang berbasis pada ekstraksi minyak dengan *steam* juga terkendala oleh adanya limbah cair yang membutuhkan unit pengolahan limbah tersendiri. Konsep "*zero sludge palm oil milling plant* dengan metode ekstraksi minyak-minyak" merupakan salah satu solusi yang diusulkan untuk menyelesaikan permasalahan limbah cair tersebut. Konsep tersebut merupakan kombinasi antara metode pemasakan buah sawit tanpa air dan ekstraksi minyak-minyak berbasis membran superhidrofobik. Selain bebas air limbah, kombinasi tersebut dapat menurunkan kompleksitas dari proses konvensional. Melalui penerapan metode tersebut, keberadaan air limbah dari proses pemasakan dapat dieliminasi sepenuhnya dan kehilangan minyak selama proses dapat diperkecil. Kualitas minyak sawit juga dapat ditingkatkan melalui proses ekstraksi menggunakan membran superhidrofobik.

Ekstraksi dan pengolahan pati yang berasal dari komoditas pertanian seperti ubi kayu merupakan salah satu industri agro paling penting di dunia. Teknologi membran dapat digunakan untuk mencapai produksi bersih dalam industri tapioka. Produksi bersih dalam industri tapioka tidak hanya membebaskan industri tapioka dari permasalahan limbahnya, tetapi juga akan menghasilkan produk samping berupa *soluble starch* dan onggok kualitas tinggi. Dalam konsep produksi bersih tersebut, teknologi membran dapat berperan dalam pengolahan air baku dan pengolahan limbah.

Kekayaan sumber daya perairan di Indonesia juga menjadi daya tarik bagi berbagai pihak untuk memanfaatkan sektor tersebut terutama bidang perikanan, baik perikanan tangkap maupun perikanan budidaya. Salah satu upaya untuk menjaga ketersediaan produk hasil perikanan adalah dengan melakukan suatu usaha budidaya perikanan atau sering disebut dengan akuakultur. Inovasi teknologi berupa integrasi membran ultrafiltrasi (UF) adalah terobosan baru untuk memecahkan berbagai permasalahan yang terjadi pada sistem akuakultur di Indonesia. Pemanfaatan teknologi membran dalam sistem akuakultur memiliki beberapa keuntungan, diantaranya adalah mampu mengendalikan kestabilan kualitas air dengan menghilangkan kontaminan seperti virus, bakteri, dan partikel terlarut dari dalam air. Selain itu, air yang selama ini dibuang (sekitar 80%) dapat diresirkulasi kembali. Dengan segala kelebihannya, pemanfaatan teknologi membran pada akhirnya diharapkan dapat ikut berperan dalam memajukan industri akuakultur di Indonesia dan memberikan keuntungan baik dari segi ekonomi, teknik, maupun lingkungan.

Ketersediaan dan akses terhadap air bersih menjadi salah satu persoalan yang dihadapi pemerintah dan masyarakat di tanah air. Peningkatan kebutuhan air bersih tidak dibarengi dengan peningkatan suplai air bersih. Selain itu, kualitas sumber air juga semakin menurun. Proses berbasis membran merupakan teknologi yang potensial untuk diterapkan pada sektor pengolahan air. Unit membran, bahkan, bisa didesain sedemikian rupa sehingga dapat dioperasikan tanpa menggunakan listrik. Desain yang kompak dan sederhana, mudah dioperasikan, serta dapat digunakan untuk melayani unit-unit terkecil (skala rumah tangga), memberikan peluang bagi teknologi membran menjadi sistem penyedia air terdesentralisasi. Dengan keunggulan-keunggulan yang ditawarkannya, teknologi

membran dapat menjadi solusi untuk penyediaan akses air bersih bagi masyarakat Indonesia terutama di daerah-daerah terpencil dan bencana, sekaligus untuk memenuhi salah satu target dalam *Millenium Development Goals* (MDGs) yaitu penyediaan akses terhadap air bersih.

Sebagai negara bahari dan kepulauan terbesar di dunia, serta memiliki garis pantai terpanjang kedua dunia, Indonesia memiliki potensi kelautan yang sangat besar dan beragam. Salah satunya adalah pemanfaatan air laut untuk pemenuhan kebutuhan air, baik untuk air minum, untuk keperluan industri, dan untuk pemenuhan kebutuhan energi, melalui proses desalinasi. Salah satu teknologi desalinasi yang paling banyak digunakan saat ini adalah SWRO (*seawater reverse osmosis*). Proses desalinasi SWRO dapat dipadukan dengan proses produksi garam melalui konsep *zero discharge desalination* (ZDD). *Zero discharge SWRO desalination plant* merupakan proses terintegrasi yang dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan air, energi, dan garam sekaligus. Selain air yang diperoleh memiliki kualitas tinggi, garam berharga yang diperoleh memiliki nilai ekonomis sehingga dapat mengurangi biaya produksi air. Di samping itu, *Zero discharge SWRO desalination plant* dapat mengatasi permasalahan lingkungan yang ditimbulkan oleh buangan *brine* dari proses desalinasi. Teknologi membran juga dapat digunakan untuk pengolahan air laut dalam (*deep seawater*, DSW). DSW memiliki beberapa karakteristik yang unik di antaranya adalah memiliki temperatur yang relatif rendah dan stabil, jernih, tidak bersifat patogenik, mengandung banyak nutrisi, dan mengandung mineral seperti magnesium (Mg), kalsium (Ca), potassium (K), serta mineral-mineral lain dalam jumlah banyak (Yamaguchi dkk. 2003). DSW sangat potensial untuk dimanfaatkan sebagai air tawar karena tergolong stabil, dan memiliki kandungan mineral yang tinggi serta bebas dari virus dan bakteri (maritimemagz.com 2014). Kandungan nutrisi dan mineral yang dimiliki DSW dapat dimanfaatkan untuk keperluan berbagai industri, seperti pemrosesan pangan, agrikultur, industri farmasi, industri kosmetik, dan lain-lain.

REKAMAN KARYA

I.G. Wenten, Khoiruddin. Reverse osmosis applications: Prospect and challenges. Desalination, DOI:10.1016/j.desal.2015.12.011

- P.T.P. Aryanti, R. Yustiana, R.E.D. Purnama, **I.G. Wenten**. Performance and characterization of PEG400 modified PVC ultrafiltration membrane. *Membrane Water Treatment*, 6 (2015) 379-392.
- M. Purwasasmita, E.B.P. Nabu, Khoiruddin, **I.G. Wenten**. Non Dispersive Chemical Deacidification of Crude Palm Oil in Hollow Fiber Membrane Contactor. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 47 (2015) 426-446.
- M. Purwasasmita, D. Kurnia, F. C. Mandias, Khoiruddin, **I.G. Wenten**. Beer dealcoholization using non-porous membrane distillation. *Food and Bioproducts Processing*, 94 (2015) 180-186.
- N.F. Himma, S. Anisah, N. Prasetya, **I.G. Wenten**. Advances in preparation, modification, and application of polypropylene membrane. *Journal of Polymer Engineering*, 2015, DOI:10.1515/polyeng-2015-0112
- S. Subagjo, N. Prasetya, **I.G. Wenten**. Hollow Fiber Membrane Bioreactor for COD Biodegradation of Tapioca Wastewater. *Journal of Membrane Science and Research*, 1 (2015) 79-84.
- I.G. Wenten**, P.T.P. Aryanti, Khoiruddin, A.N. Hakim, Nurul F. Himma. Advances in Polysulfone-Based Membranes For Hemodialysis. Article in Press, 2015.
- M. Purwasasmita, P.B. Juwono, A.M. Karlina, Khoiruddin, **I.G. Wenten**. Non-Dissolved Solids Removal During Palm Kernel Oil Ultrafiltration. *Reaktor*, 14 (2014) 284-290
- P.T.P. Aryanti, S. Subagjo, D. Ariono, **I.G. Wenten**. Fouling and Rejection Characteristic of Humic Substances in Polysulfone Ultrafiltration Membrane. *Journal of Membrane Science and Research*, 1 (2015) 41-45.
- Khoiruddin, I.N. Widiassa, **I.G. Wenten**. Removal of inorganic contaminants in sugar refining process using electrodeionization. *Journal of Food Engineering*, 133 (2014) 40-45.
- Khoiruddin, A.N. Hakim, **I.G. Wenten**. Advances in electrodeionization technology for ionic separation - A review. *Membrane Water Treatment*, 5 (2014) 87-108.
- K. Akli, Khoiruddin, **I.G. Wenten**. Preparation and Characterization of Heterogeneous PVC-Silica Proton Exchange Membrane. *Journal of Membrane Science and Research*, Article in Press. 2015.
- I.G. Wenten**, Khoiruddin, P.T.P. Aryanti, A.N. Hakim. Scale-up strategies for membrane-based desalination processes: A review. *Journal of Membrane Science and Research* Article in Press. 2015
- I.N Widiassa, P.D Sutrisna, **I.G. Wenten**. Performance of a novel electrodeionization technique during citric acid recovery. *Separation and Purification Technology*, 39 (2004) 89-97.
- P.T.P Aryanti, Khoiruddin, **I.G. Wenten**. Influence of Additives on Polysulfone-Based Ultrafiltration Membrane Performance during Peat Water Filtration. *Journal of Water Sustainability*, 3 (2013) 85-96.
- I.G. Wenten**, Khoiruddin, F. Arfianto, Zudiharto. Bench scale electrodeionization for high pressure boiler feed water. *Desalination*, 314 (2013) 109-114.
- I.G. Wenten**, H. Julian, N.T. Panjaitan. Ozonation through ceramic membrane contactor for iodide oxidation during iodine recovery from brine water. *Desalination*, 306 (2012) 29-34.

- X. Yang, R. Wang, A.G. Fane, C.Y. Tang, **I.G. Wenten**. Membrane Module Design and Dynamic Shear-Induced Techniques to Enhance Liquid Separation by Hollow Fiber Modules: A Review. *Desalination and water treatment*, 51 (2013) 3604–3627.
- H. Julian, **I.G. Wenten**. Polysulfone membranes for CO₂ /CH₄ separation: State of the art. *IOSR J Eng*, 2 (2012) 484-495.
- I.N. Widiassa, **I.G. Wenten**. Combination of reverse osmosis and electrodeionization for simultaneous sugar recovery and salts removal from sugary wastewater. *Reaktor*, 11 (2007) 91-97.
- P.S. Komala, N. Ananthi, A.J. Effendi, **I.G. Wenten**, Wisjnuprpto. Pengaruh Variasi Waktu Retensi Hidrolis Reaktor Anoksik Terhadap Biodegradasi Zat Warna Azo Reaktif Menggunakan Bioreaktor Membran Aerob-Anoksik. *Jurnal Teknologi Lingkungan Universitas Trisakti*, 4 (2009) 87-92.
- I.N. Widiassa, **I.G. Wenten**. Saccharification of native cassava starch at high dry solids in an enzymatic membrane reactor. *Reaktor*, 12 (2009) 129-136.
- I.G. Wenten**. Performance of newly configured submerged membrane bioreactor for aerobic industrial wastewater treatment. *Reaktor*, 12 (2009) 137-145.
- T. Setiadi, **I.G. Wenten**, Suwardiyono. Treatment of Textile Wastewater by a Coupling of Activated Sludge Process with Membrane Separation. *Journal of Water and Environment Technology*, 3 (2005) 125-132.
- H. Susanto, **I.G. Wenten**. Fresh water production in coastal and remote areas by solar powered liquid-liquid membrane contactor. *Journal of Coastal Development*, 6 (2003) 135-144.
- I.G. Wenten**, I.N. Widiassa. Enzymatic hollow fiber membrane bioreactor for penicillin hydrolysis. *Desalination*, 149 (2002) 279-285.
- I.G. Wenten**. Recent development in membrane science and its industrial applications. *J Sci Technol Membrane Sci Technol*, 24 (2002) 1010-1024.
- Y. Ervan, **I.G. Wenten**. Study on the influence of applied voltage and feed concentration on the performance of electrodeionization. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 24 (2002): 955-963.
- V. Chen, A.G. Fane, S. Madaeni, **I.G. Wenten**. Particle deposition during membrane filtration of colloids: Transition between concentration polarization and cake formation. *Journal of Membrane Science*, 125 (1997) 109-122.
- I.G. Wenten**, D. Koenhen, H.D.W. Roesink, A. Rasmussen, G. Jonsson. Method for the removal of components causing turbidity, from a fluid, by means of microfiltration. *Biotechnology Advances*, 15 (1997) 453-453.
- I.G. Wenten**. Mechanisms and control of fouling in crossflow microfiltration. *Filtration & Separation*, 32 (1995) 252-253.

DAFTAR PUSTAKA

- Abels, C., Carstensen, F. & Wessling, M. (2013) Membrane processes in biorefinery applications. *Journal of Membrane Science*. **444**, 285–317.
- Alkhudhiri, A., Darwish, N. & Hilal, N. (2012) Membrane distillation: A comprehensive review. *Desalination*. **287**, 2-18.

- Alves, V. & Coelho, I. (2006) Orange juice concentration by osmotic evaporation and membrane distillation: a comparative study. *Journal of Food Engineering*. **74**, 125-133.
- Anson, M., Marchese, J., Garis, E., Ochoa, N. & Pagliero, C. (2004) ABS copolymer-activated carbon mixed matrix membranes for CO₂/CH₄ separation. *Journal of Membrane Science*. **243**, 19-28.
- Antrim, B., Lesan, R., Liu, B. & Von Gottberg, A. (2005) Worlds largest spiral element—history and development. *Desalination*. **178**, 313-324.
- Bahrumisyah, Purwasasmita, M. & Wenten, I.G. *Ultrafiltrasi Untuk Klarifikasi Nira Tebu: Transmisi Sukrosa pada Berbagai Kondisi Operasi*. Seminar Nasional Teknik Kimia Soehadi Reksowardojo, Bandung, Oktober, 1999.
- Baker, R.W. (2012) *Membrane Technology and Applications*. 3rd edn. John Wiley and Sons Ltd, United Kingdom
- Banat, F.A. & Simandl, J. (1999) Membrane distillation for dilute ethanol: Separation from aqueous streams. *Journal of Membrane Science*. **163**, 333-348.
- Bartolo, L.D. & Bader, A. (2013) *Biomaterials for Stem Cell Therapy: State of Art and Vision for the Future*. CRC Press, Boca Raton
- Bernardo, P. & Clarizia, G. (2013) 30 Years of Membrane Technology for Gas Separation *Chemical Engineering Transactions*. **32**, 1999-2004.
- Brunetti, A. (2010) Integrated membrane plant for pure hydrogen production for PEMFC. Institute of Membrane Technology, ITM-CNR.
- Candéa, T.V. (2013) Study of membrane emulsification process as a pre-step for the microencapsulation of lipid compounds by spray drying. *Membrane Engineering*, Universidade Nova de Lisboa, Lisbon.
- Cassano, A. & Drioli, E. (2007) Concentration of clarified kiwifruit juice by osmotic distillation. *Journal of Food Engineering*. **79**, 1397-1404.
- Cath, T.Y., Childress, A.E. & Elimelech, M. (2006) Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments. *Journal of Membrane Science*. **281**, 70-87.
- Cheryan, M. & Alvarez, J.R. (1995) Food and beverage industry applications, dalam: Noble, R.D. & Stern, S.A. (eds), *Membrane Separations Technology. Principles and Applications*. 415-465. Elsevier, Amsterdam.
- Coster, H., Farahani, T.D. & Chilcott, T. (2011) Production and characterization of piezoelectric membranes. *Desalination*. **283**, 52-57.
- Couture, G., Alaaeddine, A., Boschet, F. & Ameduri, B. (2011) Polymeric materials as anion-exchange membranes for alkaline fuel cells. *Progress in Polymer Science*. **36**, 1521-1557.
- Curcio, E. & Drioli, E. (2005) Membrane Distillation and Related Operations—A Review. *Separation & Purification Reviews*. **34**, 35-86.
- Darestani, M., Coster, H. & Chilcott, T. (2013) Piezoelectric membranes for separation processes: Operating conditions and filtration performance. *Journal of Membrane Science*. **435**, 226-232.
- Dax, M. *Membrane contactor technology gives PPB dissolved oxygen in water*. Semiconductor International, 1996.

- de Morais Coutinho, C., Chiu, M.C., Basso, R.C., Ribeiro, A.P.B., Gonçalves, L.A.G. & Viotto, L.A. (2009) State of art of the application of membrane technology to vegetable oils: A review. *Food Research International*. **42**, 536-550.
- Di Profio, G., Tucci, S., Curcio, E. & Drioli, E. (2007) Selective Glycine Polymorph Crystallization by Using Microporous Membranes. *Crystal Growth & Design*. **7**, 526-530.
- Długołęcki, P., Nymeijer, K., Metz, S. & Wessling, M. (2008) Current status of ion exchange membranes for power generation from salinity gradients. *Journal of Membrane Science*. **319**, 214-222.
- Drioli, E., Curcio, E., Di Profio, G., Macedonio, F. & Criscuoli, A. (2006) Integrating Membrane Contactors Technology and Pressure-Driven Membrane Operations for Seawater Desalination: Energy, Exergy and Costs Analysis. *Chem Eng Res Design*. **84**, 209-220.
- Drioli, E., Curcio, E. & Profio, G.d. (2005) State of the art and recent progresses in membrane contactors, . *Chemical Engineering Research and Design*. **83**, 223-233.
- Drioli, E., Stankiewicz, A.I. & Macedonio, F. (2011) Membrane engineering in process intensification—An overview. *Journal of Membrane Science*. **380**, 1-8.
- Dutta, B.K. & Sikdar, S.K. (1991) Separation of azeotropic organic liquid mixtures by pervaporation. *AIChE journal*. **37**, 581-588.
- Echavarría, A.P., Torras, C., Pagán, J. & Ibarz, A. (2011) Fruit Juice Processing and Membrane Technology Application. *Food Engineering Reviews*. **3**, 136-158.
- Fontananova, E. & Drioli, E. (2014) Membrane Reactors: Advanced Systems for Intensified Chemical Processes. *Chemie Ingenieur Technik*. **86**, 2039-2050.
- Foy, K. (2007) Investigation into the possible use of an oxygen ion transport membrane combustion unit in an oxyfired power plant. School of Mechanical and Transport Engineering, Dublin Institute of Technology Dublin.
- Gabelman, A. & Hwang, S.-T. (1999) Hollow fiber membrane contactors. *Journal of Membrane Science*. **159**, 61-106.
- Gander, M., Jefferson, B. & Judd, S. (2000) Membrane Bioreactors for Domestic Wastewater Treatment: A Review With Cost Considerations. *Separation and Purification Technology*. **18**, 119-130.
- García-Payo, M.C., Izquierdo-Gil, M.A. & Fernández-Pineda, C. (2000) Air gap membrane distillation of aqueous alcohol solutions. *Journal of Membrane Science*. **169**, 61-80.
- Gianluca, D.P. & Efrem, C. (2009) A Review on membrane crystallization. *Chimica oggi Y*. **27**, 27-31.
- Gibbon, J.H. (1954) Application of a mechanical heart and lung apparatus to cardiac surgery. *Minnesota medicine*. **37**, 171-185.
- Greenlee, L.F., Lawler, D.F., Freeman, B.D., Marrot, B. & Moulin, P. (2009) Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges. *Water Research*. **43**, 2317-2348.
- Himma, N.F., Anisah, S., Prasetya, N. & Wenten, I.G. Advances in preparation, modification, and application of polypropylene membrane. *Journal of Polymer Engineering*, Article in Press. DOI: 10.1515/polyeng-2015-0112.
- Hinds, B.J.d. (2004) Aligned multiwalled carbon nanotube membranes. *Science*. **303**, 62-65.

- IDE-Technologies (2014) <http://www.ide-tech.com/blog/case-study/sorek-israel-project/>.
September 17th.
- Ilame, S.A. & V. Singh, S. (2015) Application of Membrane Separation in Fruit and Vegetable Juice Processing: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. **55**, 964-987.
- Irianto, R. & Wenten, I.G. The Performance of Ultrafiltration for Wastewater Treatment in Electroplating Industry. . 3rd Regional Symposium on Membrane Science and Technology, Bandung, 26-27 April, 2005.
- Jiao, B., Cassano, A. & Drioli, E. (2004) Recent advances on membrane processes for the concentration of fruit juices: a review. *Journal of Food Engineering*. **63**, 303-324.
- Judd, S. (2008) The status of membrane bioreactor technology. *Trends in Biotechnology*. **26**, 109-116.
- Karkar, A. (2013) Advances in Hemodialysis Techniques. In. p[^]pp. InTech.
- Kezia, K., Lee, J., Hill, A.J. & Kentish, S.E. (2013) Convective transport of boron through a brackish water reverse osmosis membrane. *Journal of Membrane Science*. **445**, 160-169.
- Khoiruddin, Hakim, A.N. & Wenten, I.G. (2014a) Advances in electrodeionization technology for ionic separation – A review. *Membrane Water Treatment*. **5**, 87-108.
- Khoiruddin, Widiassa, I.N. & Wenten, I.G. (2014b) Removal of inorganic contaminants in sugar refining process using electrodeionization. *Journal of Food Engineering*. **133**, 40–45.
- Kim, S., Oh, B.S., Hwang, M.-H., Hong, S., Kim, J.H., Lee, S. & Kim, I.S. (2011) An ambitious step to the future desalination technology: SEAHERO R&D program (2007–2012). *Applied Water Science*. **1**, 11-17.
- Knepper, M.A. & Nielsen, S. (2004) Peter Agre, 2003 Nobel Prize Winner in Chemistry. *Journal of the American Society of Nephrology*. **15**, 1093-1095.
- Kolf, W.J.a.B., H.T. (1944) The artificial kidney: a dialyzer with great area. *Acta Medica Scandinavica*. **171**, 121.
- Lee, K.P., Arnot, T.C. & Mattia, D. (2011) A review of reverse osmosis membrane materials for desalination—development to date and future potential. *Journal of Membrane Science*. **370**, 1-22.
- Lipnizki, F. (2005) Optimisation and integration of membrane processes in the beverage industry. *AachenerMembran Kolloquium*.
- Lipnizki, F. (2010) Cross-Flow Membrane Applications in the Food Industry, dalam: Klaus-Viktor Peinemann, S.P.N., and Lidietta Giorno (ed) *Membrane Technology*, Volume 3: Membranes for Food Applications.
- Lonsdale, H.K. (1982) The growth of membrane technology. *Journal of Membrane Science*. **10**, 81-181.
- Lyon & Delina (2008) Assessing the antibiofouling potential of a fullerene-coated surface. *International Biodeterioration & Biodegradation journal*.
- Manurung, N.M. (2004) Personal Communication.
- maritimemagz.com (2014) Potensi air laut dalam, menjawab krisis air di daratan. <http://maritimemagz.com/potensi-air-laut-dalam-menjawab-krisis-air-di-daratan/>.

- Marrot, B., Barrios-Martinez, A., Moulin, P. & Roche, N. (2004) Industrial wastewater treatment in a membrane bioreactor: A review. *Environmental Progress*. **23**, 59-68.
- Mhaske, S.T. & Kadam, P.G. (2010) Membranes in artificial Liver and Pancreas. *International Journal of Applied Engineering Research*. **1**, 299-314.
- Mohammad, A., Teow, Y., Ang, W., Chung, Y., Oatley-Radcliffe, D. & Hilal, N. (2015) Nanofiltration membranes review: Recent advances and future prospects. *Desalination*. **356**, 226-254.
- Moss, P. & Skelton, R. (2009) Large diameter RO elements: A summary of recent operating experiences. *Desalination and Water Treatment*. **6**, 80-85.
- Mujiburohman, M. (2008) Studies on Pervaporation for Aroma Compound Recovery from Aqueous Solutions Chemical Engineering University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada.
- Mulder, M. (1996) Basic Principles of Membrane Technology. 2nd edn. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht
- Nechifor, G., Voicu, S.I., Nechifor, A.C. & Garea, S. (2009) Nanostructured hybrid membrane polysulfone-carbon nanotubes for hemodialysis. *Desalination*. **241**, 342-348.
- Nishino, T., Meguro, M., Nakamae, K., Matsushita, M. & Ueda, Y. (1999) The Lowest Surface Free Energy Based on -CF₃ Alignment. *Langmuir*. **15**, 4321-4323.
- Oo, M.H. & Song, L. (2009) Effect of pH and ionic strength on boron removal by RO membranes. *Desalination*. **246**, 605-612.
- Özer, B. & Tamime, A.Y. (2013) Membrane Processing of Fermented Milks, dalam: Membrane Processing. 143-175. Blackwell Publishing Ltd.
- Park, P.K., Lee, S., Cho, J.S. & Kim, J.H. (2012) Full-scale simulation of seawater reverse osmosis desalination processes for boron removal: Effect of membrane fouling. *Water Research*. **46**, 3796-3804.
- Peng, F., Lu, L., Sun, H., Wang, Y., Liu, J. & Jiang, Z. (2005) Hybrid organic-inorganic membrane: solving the tradeoff between permeability and selectivity. *Chemistry of Materials*. **17**, 6790-6796.
- Peters, T. (2010) Membrane technology for water treatment. *Chemical engineering & technology*. **33**, 1233-1240.
- Petrusevski, B., Boiler, G., Bremen, A.N.v. & Alerts, G.J. (1995) Tangential Flow filtration: a method to concentrate freshwater alga. *Water Res*. **29**, 1419-1424.
- Post, J.W., Goeting, C.H., Valk, J., Goinga, S., Veerman, J., Hamlers, H.V.M. & Hack, J.F.M. (2010) Towards implementation of reverse electrodialysis for power generation from salinity gradients. *Desalination and Water Treatment*. **16**, 182-193.
- Post, J.W., Hamelers, H.V.M. & Buisman, C.J.N. (2009) Influence of multivalent ions on power production from mixing salt and fresh water with a reverse electrodialysis system. *Journal of Membrane Science*. **330**, 65-72.
- Pouliot, Y. (2008) Membrane processes in dairy technology—From a simple idea to worldwide panacea. *International Dairy Journal*. **18**, 735-740.
- Purwasasmita, M., Nabu, E.B.P., Khoiruddin & Wenten, I.G. (2015) Non Dispersive Chemical Deacidification of Crude Palm Oil in Hollow Fiber Membrane Contactor. *Journal of Engineering and Technological Sciences*. **47**, 426-446.

- Ramon, G.Z., Feinberg, B.J. & Hoek, E.M.V. (2011) Membrane-based production of salinity gradient power. *Energy & Environmental Science*. **4**.
- Rios, G.M., Belleville, M.P., Paolucci, D. & Marcano, J.S. (2004) Progress in enzymatic membrane reactors - A review. *Journal of Membrane Science*. **242**, 189-196.
- Rosenberg, M. (1995) Current and future applications for membrane processes in the dairy industry. *Trends in Food Science & Technology*. **6**, 12-19.
- Scott, K. (1999) *Handbook of Industrial Membranes*, 2nd ed. Elsevier Science, Ltd, Kidlington, Oxon, UK
- Sirkar, K.K., Shanbhag, P.V. & Kovvali, A.S. (1999) Membrane in a Reactor: A Functional Perspective. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. **38**, 3715-3737.
- Smitha, B., Suhanya, D., Sridhar, S. & Ramakrishna, M. (2004) Separation of organic-organic mixtures by pervaporation—a review. *Journal of Membrane Science*. **241**, 1-21.
- Sridhar, S., Smitha, B. & Shaik, A. (2005) Pervaporation-Based Separation of Methanol/MTBE Mixtures—A Review. *Separation and Purification Reviews*. **34**, 1-33.
- Stephenson, T., Judd, S.J., Jefferson, B. & Brindle, K. (2000) *Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment*. IWA Publishing Company, London
- Tedesco, M., Cipollina, A., Tamburini, A., van Baak, W. & Micale, G. (2012) Modelling the Reverse Electrodialysis process with seawater and concentrated brines. *Desalination and Water Treatment*. **49**, 404-424.
- Tu, K.L., Nghiem, L.D. & Chivas, A.R. (2010) Boron removal by reverse osmosis membranes in seawater desalination applications. *Separation and Purification Technology*. **75**, 87-101.
- Vadgama, P. (1990) Membrane Based Sensor: A Review. *Journal of Membrane Science*. **50**, 141-152.
- Vandezande, P., Gevers, L.E. & Vankelecom, I.F. (2008) Solvent resistant nanofiltration: separating on a molecular level. *Chemical Society Reviews*. **37**, 365-405.
- Vermaas, D.A., Guler, E., Saakes, M. & Mijmeijer, K. (2012) Theoretical power density from salinity gradients using reverse electrodialysis. *Energy Procedia*. **20**, 170-184.
- Visvanathan, C., Aim, R.B. & Parameshwaran, K. (2000) *Membrane Separation Bioreactors for Wastewater Treatment*. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. **30**, 1-48.
- Voith, M. (2010) Membrane movers: water treatment businesses adapt their portfolios to meet new regulations and reduce costs. *Chemical Engineering News*. **88**, 22-23.
- von Gottberg, A. (2004) High-capacity RO elements offer plant operators smaller footprints. *Filtration & separation*. **41**, 32-35.
- Wang, Y., Chen, K.S., Mishler, J., Cho, S.C. & Adroher, X.C. (2011) A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: technology, applications, and needs on fundamental research. *Applied Energy*. **88**, 981-1007.
- Welasih, C. & Hapsari, N. (2009) Peningkatan Kualitas Virgin Coconut Oil (VCO) Dengan Teknologi Membran Ultrafiltrasi : Laporan Hasil Penelitian. <http://elib.pdii.lipi.go.id/katalog/index.php/searchkatalog/byId/59403>.
- Wenten, I.G. (1999) *Metoda dan Alat Pencucian Membran Hemodialisis*. Paten Indonesia No. P-990481.

- Wenten, I.G. (2002a) Recent development in membrane science and its industrial applications. *J Sci Technol Membrane Sci Technol.* **24**, 1010-1024.
- Wenten, I.G. *Teknologi Membran Dalam Pengembangan Agroindustri: Produksi Bersih Dalam Industri Tapioka*. BK Teknik Pertanian dan BK Kimia, PII, Jakarta, Juni, 2002b.
- Wenten, I.G. Solusi Terpadu Program Zero Waste Effluent dan Integrasi Kebun-Ternak dalam Industri CPO. Seminar Nasional Sistem Integrasi Tanaman-Ternak, Denpasar, 20-22 Juli, 2004.
- Wenten, I.G. Large Scale Produced Water Treatment Using Membrane Technologies – A Reality 6th Regional Symposium on Membrane Science & Technology, Phuket, Thailand., 13-15 Agustus, 2008.
- Wenten, I.G. (2009) Performance of newly configured submerged membrane bioreactor for aerobic industrial wastewater treatment. *Reaktor.* **12**, 137-145.
- Wenten, I.G. (2014) Implementasi teknologi kombinasi proses presipitasi kimiaawi dan membran ultrafiltrasi untuk pemanfaatan waste brine di Duri Field dalam skala laboratorium. LAPI ITB
- Wenten, I.G. (2015) Zero sludge palm oil milling plant skala bench dengan metode ekstraksi minyak-minyak berbasis membran superhidrofobik dalam pengolahan minyak sawit dengan konsep pemasakan tanpa air. Laporan Akhir Riset SINAS, ITB
- Wenten, I.G., Julian, H. & Panjaitan, N.T. (2012) Ozonation through ceramic membrane contactor for iodide oxidation during iodine recovery from brine water. *Desalination.* **306**, 29–34.
- Wenten, I.G., Khioruddin, Aryanti, P.T.P. & Hakim, A.N. (2014) Scale-up strategies for membrane-based desalination processes: A review. *Journal of Membrane Science and Research.*
- Wenten, I.G., Khoiruddin, Arfianto, F. & Zudiharto (2013) Bench scale electrodeionization for high pressure boiler feed water. *Desalination.* **314**, 109–114.
- Wenten, I.G., Koenhen, D.M., Roesink, H.D.W., Rasmussen, A. & Jonsson, G. (1996) Method for the removal of components causing turbidity, from a fluid, by means of microfiltration. US Paten No. US5560828 A.
- Wenten, I.G. & Widiassa, I.N. Simultaneous Heat Dissipation and Vapor Recovery from Cooling Water by Direct Contact Membrane Distillation. *Fundamental dan Aplikasi Teknik Kimia Fundamental dan Aplikasi Teknik Kimia 2005*, Surabaya, 23-24 November, 2005.
- Westermann, T. & Melin, T. (2009) Flow-through catalytic membrane reactors—Principles and applications. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification.* **48**, 17-28.
- White, L.S. (2006) Development of large-scale applications in organic solvent nanofiltration and pervaporation for chemical and refining processes. *Journal of Membrane Science.* **286**, 26-35.
- Widiassa, I.N., Sutrisna, P.D. & Wenten, I.G. (2004) Performance of a novel electrodeionization technique during citric acid recovery. *Separation and Purification Technology.* **39**, 89–97.

- Widiyasa, I.N. & Wenten, I.G. (2003) Glucose syrup refinery by electrodeionization: ions and water transport through ion exchange membrane. *Jurnal Teknik Kimia Indonesia*. **2**, 1-9.
- Widiyasa, I.N. & Wenten, I.G. (2007) Combination of reverse osmosis and electrodeionization for simultaneous sugar recovery and salts removal from sugary wastewater. *Reaktor*. **11**, 91-97.
- www.gewater.com Traverse City Wastewater Treatment Plant
https://www.gewater.com/kcpguest/salesedge/documents/Case%20Studies_Cust/Americas/English/CS-TRAV-MUNWW-EN-1206-NA%20GE%20Logo.pdf.
- www.gewater.com (2011) Chestnut Avenue Water Works.
https://www.gewater.com/kcpguest/salesedge/documents/Case%20Studies_Cust/Americas/English/CS-CHES-MUNDW-EN%201106%20NA%20GE%20Logo.pdf.
- www.migas.esdm.go.id (2015) Cadangan Gas Bumi Indonesia 2015 Meningkat.
<http://www.migas.esdm.go.id/post/read/cadangan-gas-bumi-indonesia-2015-meningkat>. 16 November 2015.
- www.nobelprize.org (2003) The Nobel Prize in Chemistry 2003.
http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2003/.
- www.solvay.com Solvay has successfully commissioned the largest PEM fuel cell in the world at SolVin's Antwerp plant.
http://www.solvay.com/en/media/press_releases/20120206-fuelcell.html.
- Xue, C.-H., Jia, S.-T., Zhang, J. & Ma, J.-Z. (2010) Large-area fabrication of superhydrophobic surfaces for practical applications: an overview. *Sci Technol Adv Mater*. **11**, 033002.
- Yamaguchi, T., Inoue, T., Hirakawa, M., Ishii, K.i., Kagoura, T., Fujiwara, M. & Abe, S. (2003) Deep-Sea Water Suction Technology. *Furukawa Review*. **24**, 75-80.
- Zakrzewska-Trznadel, G., Harasimowicz, M. & Chmielewski, A.G. (1999) Concentration of radioactive components in liquid low-level radioactive waste by membrane distillation. *Journal of Membrane Science*. **163**, 257-264.
- Zolotarev, P.P., Ugrozov, V.V., Volkina, I.B. & Nikulin, V.M. (1994) Treatment of waste water for removing heavy metals by membrane distillation. *Journal of Hazardous Materials*. **37**, 77-82.
- Zornoza, B., Casado, C. & Navajas, A. (2013) Chapter 11 - Advances in Hydrogen Separation and Purification with Membrane Technology dalam: Gandia, L.M., Arzamendi, G. & Dieguez, P.M. (eds), *Renewable Hydrogen Technologies*. 245-268. Elsevier, Amsterdam.