

Prinsip dan Aplikasi Membran Distilasi

Muthia Elma

Materials and Membranes Research Group (M²ReG)

2024

A decorative footer bar at the bottom of the page, consisting of three colored segments: a teal segment on the left, a dark blue segment in the middle, and a yellow segment on the right.

Prinsip dan Aplikasi Membran Distilasi

Muthia Elma



Prinsip dan Aplikasi Membran Distilasi

Penulis:

Muthia Elma

Kontributor:

Arun Dwi Nugroho, Muhammad Helmi, Chachay Talia Lalin, Jessie Catherina S., Sanah, Rusdah Musdahlipah, Zikri Daffa Aulia Madani, Alvira Andraini, Malla Firma Erlysia, Rhafiq Abdul Ghani, Aulia Rahma, Zahratunnisa, Evia Salma Zaurida

Desain Sampul:

Gusti Ratu Sri Dewi

Editor:

Zahratunnisa

Evia Salma Zaurida

Noviani

Penerbit:

ULM Press, 2024

d/a Pusat Pengelolaan Jurnal dan Penerbitan ULM

Lantai 2 Gedung Perpustakaan Pusat ULM

Jl. Hasan Basri, Kayutangi, Banjarmasin 70123

Telp/Fax. 0511 - 3305195

ANGGOTA APPTI (004.035.1.03.2018)

Hak cipta dilindungi oleh Undang Undang

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku tanpa izin
tertulis dari Penerbit, kecuali

untuk kutipan singkat demi penelitian ilmiah dan resensi

I - X + 130 hal, 15,5 × 23 cm

Cetakan Pertama. ... 2024

ISBN : ...

PRAKATA

Dengan berkembangnya teknologi dan pengetahuan di era globalisasi, kebutuhan akan inovasi dan efisiensi dalam berbagai industri semakin mendesak. Salah satu teknologi yang muncul sebagai solusi penting dalam menghadapi tantangan ini adalah membran distilasi. Buku ini, "Prinsip dan Aplikasi Membran Distilasi", hadir untuk memberikan pemahaman mendalam tentang teknologi tersebut, baik dari sisi prinsip dasar maupun aplikasinya di industri.

Membran distilasi adalah teknologi yang menarik karena menawarkan keunggulan dalam hal efisiensi energi, selektivitas tinggi, dan fleksibilitas operasional. Setiap bab dirancang untuk memberikan gambaran jelas dan terstruktur, sehingga pembaca dapat mengikuti perkembangan teknologi ini dengan mudah.

Tidak hanya teori, buku ini juga menyajikan berbagai aplikasi praktis membran distilasi. Dengan demikian, buku ini tidak hanya relevan bagi para peneliti dan profesional yang sudah berkecimpung dalam bidang teknologi membran, tetapi juga bagi mahasiswa dan akademisi yang ingin memperdalam pengetahuan mereka.

Penulisan buku ini didasarkan pada hasil-hasil penelitian yang telah diterbitkan di jurnal nasional dan internasional, yang mencerminkan keahlian penulis dalam bidang ini. Kami berharap buku ini dapat menjadi referensi yang berharga dan membantu pembaca untuk mengaplikasikan teknologi membran distilasi dalam berbagai konteks praktis.

Kami berterima kasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam proses penulisan dan penyuntingan buku ini. Semoga buku ini dapat memberikan manfaat yang luas dan mendalam bagi semua pembaca.

KATA PENGANTAR

EDITOR

Buku dengan judul "**Prinsip dan Aplikasi Membran Distilasi**" ini ditulis dan disusun oleh penulis dengan tujuan untuk menambah ilmu dan pengetahuan terutama dalam bidang membran distilasi. Dalam konteks bidang teknologi membran, buku ini diharapkan akan semakin menambah kemutakhiran pengetahuan pembaca. Seiring berkembangnya dunia global, maka kemajuan teknologi juga semakin pesat. Oleh karena itu, pengetahuan akan informasi teknologi sangat diperlukan untuk dapat beradaptasi dengan kemajuan dunia.

Membran distilasi merupakan teknologi yang semakin penting dalam berbagai industri, termasuk pengolahan air, pemisahan kimia, dan produksi makanan dan minuman. Keunggulan utamanya yang meliputi efisiensi energi, selektivitas tinggi, dan fleksibilitas operasional menjadikannya solusi yang menarik untuk berbagai tantangan pemisahan.

Dalam buku ini, pembaca akan menemukan penjelasan rinci tentang prinsip dasar membran distilasi, mulai dari mekanisme transportasi massa hingga desain dan karakterisasi membran. Selain itu, buku ini juga membahas aplikasi praktis dari teknologi ini dalam berbagai

konteks industri, serta tantangan dan peluang yang dihadapi dalam penerapannya.

Teknologi membran yang diangkat dari buku ini merupakan bidang keahlian dari penulis, sehingga pembaca akan merasakan detail ilmu yang dituangkan. Tulisan-tulisan yang ada di buku ini banyak diambil dari hasil-hasil penelitian yang telah diterbitkan pada jurnal nasional maupun internasional.

Kami berharap buku ini tidak hanya bermanfaat bagi para peneliti dan profesional yang terlibat langsung dalam teknologi membran, tetapi juga bagi mahasiswa dan akademisi yang ingin memperdalam pengetahuan mereka di bidang ini. Dengan pemahaman yang lebih baik tentang prinsip dan aplikasi membran distilasi, kami percaya bahwa pembaca akan dapat berkontribusi lebih signifikan dalam pengembangan dan penerapan teknologi ini. Data-data yang disajikan pada buku ini disusun dan disitasi oleh tim dari berbagai sumber referensi yang berkualitas. Selain itu buku ini telah melalui proses editing sesuai yang dipersyaratkan UU No 3 Tahun 2017.

Editor,

DAFTAR ISI

PRAKATA	iv
KATA PENGANTAR EDITOR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Membran Distilasi	4
BAB II SEJARAH DAN NOMENKLATUR MEMBRAN DISTILASI ...	7
2.1 Sejarah Membran	7
2.2 Konsep dan Nomenklatur Membran Distilasi	11
2.2.1 Membran Semipermeabel	14
2.2.2 Membran Permeabel	18
2.2.3 Nomenklatur	22
BAB III MEKANISME PROSES MEMBRAN DISTILASI	25
3.1 Mekanisme Pemisahan pada Membran Distilasi	25
BAB IV ASPEK ENGINEERING MEMBRAN DISTILASI	42

4.1 Karakteristik Membran Distilasi	42
4.2 Jenis Membran dan Konfigurasi Modul Membran	
Distilasi	47
BAB V TEORI FUNDAMENTAL MEMBRAN DISTILASI	58
5.1 Model Perpindahan massa melalui MD	58
5.2 Model Perpindahan panas pada MD	66
BAB VI APLIKASI MEMBRAN DISTILASI	73
6.1 Desalinasi Air Payau dan Air Laut	73
6.2 Pengolahan <i>Brine Water</i>	77
6.3 Pengolahan Air Limbah	84
6.3.1. Pengolahan Air Limbah Industri	86
6.3.2. Pengolahan Air Limbah Domestik	87
6.3.3. Pengolahan Air Limbah Pertanian	88
6.4 Perbandingan Aplikasi MD dengan Proses Membran	
Lain	89
6.4.1 Membran Distilasi (MD)	89
6.4.2 <i>Reverse Osmosis</i> (RO)	95
6.4.3 Pervaporasi	98
BAB VII PROSPEK KEDEPAN APLIKASI MEMBRAN DISTILASI	101
ACKNOWLEDGMENT	108
HALAMAN INDEX	109

TENTANG PENULIS	114
DAFTAR PUSTAKA	115
GLOSARIUM	126

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1	Kelebihan dan Kekurangan Setiap Jenis Konfigurasi Membran Distilasi	54
Tabel 6. 1	Perbandingan Manfaat Penggunaan Membran Distilasi dengan Metode Tradisional	85
Tabel 6. 2	Keunggulan dan Kekurangan MD pada Desalinasi Air Laut	91
Tabel 6. 3	Keunggulan dan Kekurangan MD pada Pengolahan Air Limbah	92
Tabel 6. 4	Keunggulan dan Kekurangan MD pada Pemisahan Larutan	93
Tabel 6. 5	Keuntungan dan Kekurangan Proses <i>Reverse Osmosis</i> (RO)	96
Tabel 6. 6	Keuntungan dan Kekurangan Proses Pervaporasi	99

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Skema Proses Pemisahan dengan Membran (PT. DELTA PURO INDONESIA, 2024)	Error! Bookmark not defined.
Gambar 2. 1 Diagram Alir Sejarah Teknologi Membran.....	12
Gambar 2. 2 Diagram Proses Pada Membran Distilasi (Febriani, 2015)	15
Gambar 3. 1 Ilustrasi proses desalinasi dari membran distilasi.....	28
Gambar 3. 2 Modul Spiral dengan Diagram Skema untuk Saluran .	40
Gambar 3. 3 Prinsip proses Memstill (Alkhudhiri and Hilal, 2018b) .	42
Gambar 3. 4 Prinsip distilasi membran Memsys V-ME (Alkhudhiri and Hilal, 2018b)	43
Gambar 4. 1 Konfigurasi Direct Contact Membrane Distillation (DCMD)	50
Gambar 4. 4 Konfigurasi Liquid Gap Membrane Distillation (LGMD)	54
Gambar 4. 5 Konfigurasi Thermostatic Sweeping Gas Membrane Distillation (TSGMD).....	55
Gambar 4. 6 Konfigurasi Vacuum Membrane Distillation (VMD)	56
Gambar 5. 1 Perpindahan Panas dan Perpindahan Massa pada Membran DCMD	72
Gambar 6. 1 Klasifikasi Proses Desalinasi Air Laut (Said, 2010)	81
Gambar 6. 2 Membran Distilasi (Febriani, 2015).....	86
Gambar 7. 1 Integrasi MD dengan Panel Surya.....	114

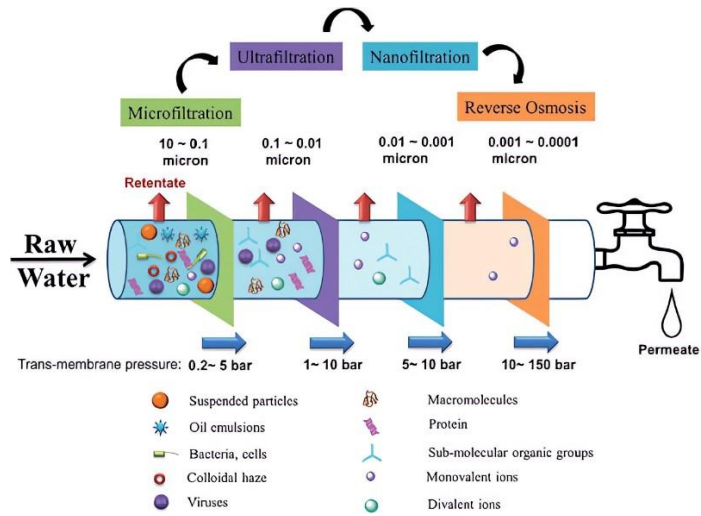
BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Teknologi membran telah menarik perhatian di seluruh dunia dalam pengolahan air dan air limbah karena efisiensinya yang tinggi, biaya ekonomis, ramah lingkungan, mudah dioperasikan dan dirawat, serta membutuhkan ruang yang relatif kecil. Membran adalah lapisan selektif yang memungkinkan zat tertentu melewatinya dan menghalangi zat yang tidak diinginkan berdasarkan ukuran.

Walaupun teknik filtrasi membran konvensional masih dipakai, teknologi membran canggih seperti membran nanokomposit, distilasi membran, bioreaktor membran, dan reaktor membran fotokatalitik kini menjadi fokus para peneliti untuk menghilangkan patogen. Teknologi membran canggih ini tidak hanya memberikan kemampuan filtrasi yang efisien tetapi juga menawarkan fungsi tambahan yang dapat meningkatkan performa membran yang ada (Atikah Mohd Nasir et al., 2022). Integrasi sifat-sifat ini menjadikan teknologi membran canggih sebagai solusi potensial untuk pengolahan air yang lebih efektif dan efisien. Seiring dengan itu, proses pemisahan membran terus berkembang, dengan berbagai aplikasi baru yang muncul dari industri, akademisi, dan laboratorium pemerintah (Khayet and Matsuura, 2011a).

Proses pemisahan membran menunjukkan kesederhanaan dan efisiensi energi yang lebih besar dibandingkan metode pemisahan alternatif, sehingga menghasilkan produk berkualitas tinggi yang cocok untuk operasi batch dalam jumlah besar maupun kecil. Membran memiliki permeabilitas dan selektivitas yang berbeda, yang dapat ditentukan dengan membedakan berbagai tingkat permeabilitas terhadap molekul yang berbeda. Pergerakan molekul melintasi membran dipengaruhi oleh sejumlah faktor, termasuk komposisi kimia zat yang diangkut, sifat struktural film membran, muatan listrik yang terkait dengan membran dan komponen yang diangkutnya, serta gaya dorong yang menyebabkannya. memfasilitasi perpindahannya, seperti gradien potensial kimia dan elektrokimia, serta perbedaan tekanan. Proses pemisahan membran memiliki jenis yang beragam seperti mikrofiltrasi, ultrafiltrasi, nanofiltrasi, osmosis balik, bioreaktor membran, dan distilasi membrane. Perbedaan jenis membran ini dapat berpengaruh terhadap persentase penghilangan polutan serta mitigasi pengotoran membran (Moneer, 2023) Berikut ini merupakan skema proses pemisahan dengan membran:



Gambar 1. 1 Skema Proses Pemisahan dengan Membran (PT. DELTA PURO INDONESIA, 2024)

Membran biasanya diklasifikasikan sebagai isotropik atau anisotropik. Membran isotropik mempunyai komposisi dan sifat fisik yang seragam di seluruh penampang membran. Sebaliknya, membran anisotropik tidak seragam pada penampang membran, dan biasanya terdiri dari lapisan dengan struktur atau komposisi kimia yang bervariasi. Membran isotropik dapat dibagi menjadi berbagai subkategori. Misalnya, membran isotropik mungkin bersifat mikropori. Membran mikropori sering kali dibuat dari bahan polimer kaku dengan rongga besar yang menciptakan pori-pori yang saling berhubungan. Membran isotropik dapat berupa film padat yang tidak memiliki pori-pori atau mengandung pori-pori yang sangat kecil. Mayoritas membran MF, UF, RO, dan NF adalah polimer organik

sintetik. Membran MF dan UF sering kali dibuat dari bahan yang sama, namun diproduksi dalam kondisi pembentukan membran yang berbeda, sehingga menghasilkan pembentukan membran dengan ukuran pori yang bervariasi (Sagle and Freeman, 2023).

1.2 Membran Distilasi

Membran distilasi (MD) adalah proses pemisahan berbasis termal yang sedang berkembang dan telah mendapatkan perhatian besar dalam beberapa tahun terakhir karena keunggulan operasionalnya yang unik dan aplikasinya yang beragam. Proses ini memanfaatkan prinsip termodinamika yaitu perbedaan suhu untuk memisahkan air dari zat terlarutnya. Teknologi ini berkembang dalam konteks strategi intensifikasi proses (*Process Intensification Strategy* atau PIS) yang bertujuan meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan industri proses. Berbeda dengan metode distilasi konvensional, yang mengandalkan perubahan fase seluruh cairan massal, MD menggunakan membran mikropori hidrofobik yang secara selektif memungkinkan lewatnya uap sambil menahan fase cair. Permeabilitas selektif ini didorong oleh gradien suhu di seluruh membran, menjadikan MD alternatif yang hemat energi untuk berbagai proses pemisahan.

MD menonjol karena selektivitas dan permeabilitas tinggi, integrasi mudah dengan proses lain, kebutuhan

energi rendah, dan jejak lingkungan kecil. Inti dari membran distilasi melibatkan pembuatan diferensial tekanan uap di seluruh membran hidrofobik. Diferensial tekanan ini dibentuk dengan menjaga gradien suhu antara larutan umpan panas dan sisi permeat yang lebih dingin. Sifat hidrofobik membran mencegah cairan menembus pori-porinya, memungkinkan hanya molekul-molekul yang menguap untuk melewatinya. Setelah uap melewati membran, uap tersebut mengembun di sisi yang lebih dingin, menghasilkan pemisahan komponen volatil dari larutan umpan.

Prinsip dasar MD dapat dijelaskan dalam empat konfigurasi utama: distilasi membran kontak langsung (*Direct Contact Membrane Distillation/DCMD*), distilasi membran celah udara (*Air Gap Membrane Distillation/AGMD*), distilasi membran gas penyapu (*Sweeping Gas Membrane Distillation/SGMD*), dan distilasi membran vakum (*Vacuum Membrane Distillation/VMD*). Setiap konfigurasi menawarkan keunggulan yang berbeda dan cocok untuk aplikasi tertentu. DCMD adalah konfigurasi paling sederhana dan umum digunakan, di mana aliran umpan dan permeat berada dalam kontak langsung dengan permukaan membran. AGMD memperkenalkan celah udara antara membran dan permukaan kondensasi, meningkatkan efisiensi termal dan mengurangi kehilangan panas konduktif. SGMD dan VMD, di sisi lain, melibatkan penggunaan gas inert atau vakum untuk memfasilitasi transportasi uap.

Aplikasi membran distilasi diterapkan di berbagai bidang. Dalam industri pengolahan air, MD digunakan untuk desalinasi, pengolahan air limbah, dan konsentrasi zat terlarut yang berharga. Kemampuannya untuk menangani umpan dengan salinitas tinggi dan terkontaminasi dengan minimal *fouling* menjadikannya teknologi yang menjanjikan untuk memproduksi air minum dari sumber air payau dan air laut. Dalam sektor makanan dan farmasi, MD digunakan untuk mengonsentrasikan jus, ekstrak, dan senyawa yang sensitif terhadap panas, menjaga kualitas dan nilai nutrisinya. Selain itu, MD juga diaplikasikan dalam industri kimia untuk pemisahan dan pemulihan pelarut volatil serta dalam pengolahan limbah industri.

Dalam desalinasi, MD menunjukkan kemajuan signifikan dengan mengurangi konsumsi energi, dampak lingkungan, dan bahaya proses secara keseluruhan. Penelitian terbaru memfokuskan pada pengembangan membran baru yang lebih permeabel dan efisien energi, serta integrasi dengan sumber energi terbarukan untuk mengatasi tantangan proses desalinasi konvensional seperti *reverse osmosis* (RO) (Drioli, 2018).

Meskipun potensinya besar, adopsi luas distilasi membran terkendala oleh beberapa tantangan. *Fouling* membran, kehilangan panas, dan pengembangan membran yang tahan lama dan hemat biaya tetap menjadi area penelitian kritis. Kemajuan dalam bahan membran, desain

modul, dan optimasi proses sangat penting untuk mengatasi keterbatasan ini dan meningkatkan kelayakan komersial teknologi MD.

BAB II SEJARAH DAN NOMENKLATUR MEMBRAN DISTILASI

2.1 Sejarah Membran

Membran terus mengalami perkembangan, pada zaman prasejarah membran digunakan sebagai alas kaki, tempat tinggal, alat musik dan peralatan lainnya. Membran pada zaman prasejarah berasal dari bagian tubuh hewan. Sedangkan pada peradapan kuno digunakan sebagai filter dalam pembuatan bir, mumifikasi dan kertas sutra. Sedangkan pada tahun 1748 seorang fisikawan Prancis Abbe Nollet mendapatkan ide tentang semipermeabilitas. Semipermeabilitas adalah sifat dari suatu membran atau bahan yang memungkinkan hanya beberapa jenis molekul atau ion tertentu melewatinya.

Pada 1800-an seorang fisikawan Jerman bernama Adolf Fick memperkenalkan tentang hukum difusi Fick yang menjelaskan persamaan fundamental pada fenomena difusi. Difusi sendiri adalah proses perpindahan partikel dari daerah konsentrasi tinggi ke daerah konsentrasi rendah. Proses ini berlangsung secara spontan tanpa perlu energi tinggi. Hukum ini digunakan pada membran untuk pemisahan gas, cairan dan padatan dengan permeabilitas optimal. Ketebalan membran, struktur pori dan sifat material membran dapat dioptimalkan untuk meningkatkan laju difusi.

Pada tahun 1907 ilmuwan Jerman lainnya bernama H. Bechhold meneliti teknik membran nitroselulosa dengan ukuran pori bertingkat. Nitroselulosa, juga dikenal sebagai *nitrocellulose* atau *Celluloid*, adalah bahan polimer yang terbuat dari selulosa yang telah dirawat dengan asam nitrat. Tahun 1950 produksi membran skala industri oleh Sartorius Werke GmbH. Perusahaan Jerman ini sebelum tahun 1950 memproduksi membran dilakukan dalam skala kecil dan dengan metode rumit. Lalu Sartorius Werke GmbH membuat inovasi dimana pengembangan membran dengan teknik manufaktur yang lebih efisien dan ekonomis.

Pada tahun 1970-an dunia teknologi membran melakukan komersialisasi awal *Sea Water Reverse osmosis* (SWRO). *Sea Water Reverse osmosis* adalah teknologi desalinasi menggunakan membran semipermeabel untuk memisahkan garam dari air laut. Proses ini menggunakan tekanan tinggi untuk mendorong air laut melalui membran, sehingga air murni melewati membran. Sedangkan garam dan kontaminan tertinggal disisi lain.

Tahun 1980 merupakan era baru pemisahan gas dengan membran industri. Ini merupakan peluang baru bagi industri yang membutuhkan pemisahan gas yang efisien dan ekonomis. Pemisahan gas menggunakan membran semipermeabel untuk memisahkan gas dengan permeabilitas tinggi melewati membran dengan lebih mudah, sedangkan gas dengan permeabilitas rendah tertahan (Wenten et al., 2010).

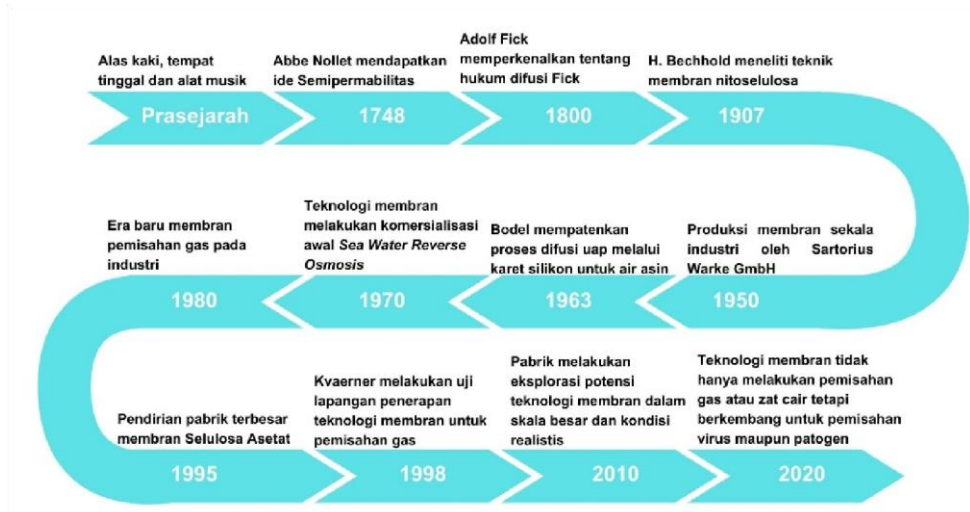
Pendirian pabrik terbesar yang menggunakan membran selulosa asetat oleh UOP di Pakistan pada tahun 1995, dan ekspansinya pada tahun 2008, merupakan perkembangan penting dalam sejarah teknologi membran. Ini menunjukkan kemampuan teknologi ini untuk diterapkan dalam skala besar dan memenuhi kebutuhan industri yang berkembang, serta memperkuat peran membran dalam pemisahan gas alam dan pengolahan gas yang lebih efisien dan ekonomis.

Uji lapangan yang dilakukan oleh Kvaerner pada tahun 1998 merupakan tonggak penting dalam penerapan teknologi membran untuk pemisahan gas, khususnya pemisahan karbon dioksida (CO_2) dari nitrogen (N_2). Uji ini bertujuan untuk menunjukkan kelayakan dan efektivitas membran kontaktor dalam kondisi nyata, melampaui eksperimen laboratorium menuju aplikasi industri. Membran kontaktor menggunakan membran berpori untuk memfasilitasi transfer gas antara fase. Dalam konteks pemisahan CO_2/N_2 , membran memungkinkan CO_2 untuk berdifusi secara selektif melalui pori-porinya sementara N_2 sebagian besar tetap tidak terpengaruh. Teknologi ini memiliki keuntungan karena modularitasnya, kemudahan penskalaan, dan kesederhanaan operasional. Berbeda dengan metode tradisional yang sering membutuhkan input energi yang signifikan untuk perubahan fase (seperti kondensasi atau absorpsi dalam pelarut), membran kontaktor beroperasi pada kondisi lingkungan, membuatnya lebih efisien energi.

Pada tahun 2008-2010, teknologi membran sedang mengalami perkembangan pesat, terutama dalam aplikasi pemisahan gas. Inovasi dalam material membran, seperti penggunaan *polyethylene oxide* (PEO), serta peningkatan desain dan fabrikasi membran, memperluas kemampuan dan efisiensi teknologi ini. Pabrik percontohan GKSS/MTR adalah salah satu dari banyak proyek yang mengeksplorasi potensi teknologi membran dalam skala yang lebih besar dan dalam kondisi operasional yang realistis. Proyek-proyek semacam ini penting karena mereka membantu menjembatani kesenjangan antara penelitian laboratorium dan aplikasi industri nyata, memberikan data dan pengalaman praktis yang diperlukan untuk mengatasi tantangan teknis dan ekonomi dalam penerapan teknologi membran di industri (Bernardo and Clarizia, 2013).

Pada abad ke-21, teknologi membran telah berkembang pesat, terutama dalam aplikasi pemisahan dan filtrasi, dengan salah satu aplikasi yang signifikan adalah penggunaan membran sebagai filter virus. Membran ini digunakan untuk menghilangkan atau menginaktivasi virus dari berbagai cairan, termasuk air minum, air limbah, dan cairan medis. Membran menyediakan fasilitas fungsionalisasi permukaan, memungkinkan penggunaan yang sama untuk berbagai tujuan. Dengan banyaknya keunggulan teknologi filtrasi membran, membran digunakan dalam pemisahan patogen dari air, dengan atau tanpa proses pra-perawatan, menggunakan berbagai konfigurasi membran dalam filtrasi mode aliran silang dan ujung mati. Terkadang, ukuran virus dan bakteri yang sangat kecil

memerlukan penerapan langkah pra-perawatan sebelum filtrasi membran untuk mencapai nol infektivitas mikroba dalam sampel permeat (Goswami and Pugazhenth, 2020). Berikut adalah skematik perkembangan teknologi membran:



Gambar 2. 1 Diagram Alir Sejarah Teknologi Membran

2.2 Konsep dan Nomenklatur Membran Distilasi

Membran distilasi (MD) adalah teknologi pemisahan yang menggunakan perbedaan tekanan uap air yang dihasilkan oleh perbedaan suhu antara dua sisi membran hidrofobik mikropori. Membran hidrofobik ini secara alami mencegah air melewatinya, sehingga hanya uap air yang dapat melintasi membran. Proses ini bergantung pada prinsip dasar perbedaan tekanan uap akibat perbedaan suhu di kedua sisi membran, yang menjadi gaya pendorong utama untuk fluks uap air melalui membran.

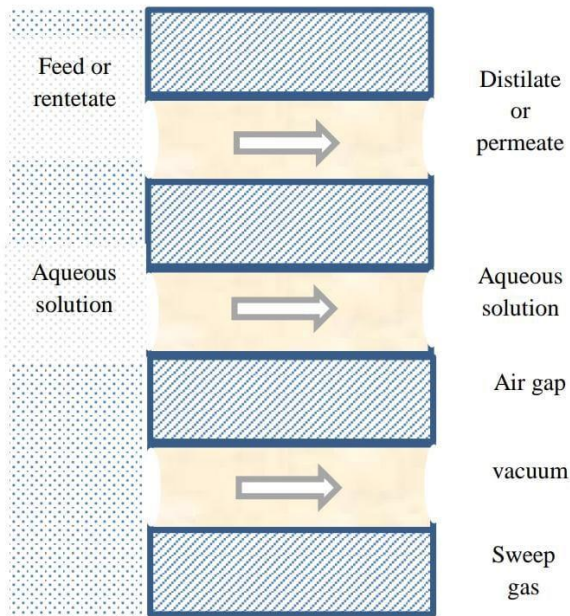
Membran distilasi merupakan teknik pemisahan air dari campurannya dengan memanfaatkan perbedaan tekanan uap melalui membran makropori. Proses ini menyerap air dan

menolak konstituen non-volatil lainnya. Membran distilasi merupakan bagian dari membran kontaktor, yang memungkinkan kontak langsung antara fasa gas dan cairan tanpa pencampuran untuk perpindahan antar fasa. Sebagai proses membran yang didorong oleh perbedaan suhu, membran distilasi membutuhkan membran dengan karakteristik khusus seperti porositas tinggi untuk memungkinkan aliran uap air yang optimal, sifat hidrofobik untuk menolak air sehingga air hanya dapat melewati pori-pori dalam bentuk uap, ketahanan termal untuk tahan terhadap suhu tinggi yang dibutuhkan dalam proses distilasi, dan ketahanan kimia untuk tahan terhadap bahan kimia yang ada dalam air umpan.

Pada proses membran distilasi tidak boleh mengubah keseimbangan uap dari komponen-komponen yang berbeda dalam cairan proses untuk menjaga kemurnian air yang dihasilkan. Setidaknya satu sisi membran harus bersentuhan langsung dengan cairan proses, memungkinkan transfer uap air melalui pori-pori membran (Enrico Drioli, 2015). Dalam proses membran distilasi (MD), membran hidrofobik berpori mikro dihubungkan dengan larutan air yang dipanaskan di satu sisi (sisi umpan/retentat). Sifat hidrofobik membran secara alami mencegah transfer massa dari fase cair dan membentuk antarmuka uap-cair pada pori-pori membran. Senyawa volatil dalam larutan akan menguap, berdifusi, dan/atau terkonveksi melalui pori-pori membran. Uap ini kemudian terkondensasi atau terserap di sisi lain (sisi permeat/destilat) dari sistem (Monis Bin Abid, 2023).

Membran distilasi (MD) maupun distilasi konvensional bergantung pada keseimbangan uap-cair sebagai dasar proses pemisahan. Kedua proses ini membutuhkan suplai panas laten dari proses penguapan. Membran distilasi beroperasi berdasarkan prinsip keseimbangan uap-cair. Secara teoritis, membran distilasi mampu menyisihkan 99,99% ion, makromolekul, koloid, sel, dan konstituen non-volatil lainnya dari air. Ketika sistem MD diaplikasikan pada proses desalinasi, MD mampu mencapai fluks hingga $75 \text{ kg/m}^2\cdot\text{h}$, menunjukkan efisiensi proses desalinasi membran (Sulaeman, 2018).

Prinsip dasar MD didasarkan pada perbedaan tekanan uap yang dihasilkan oleh perbedaan suhu di kedua sisi membran. Tekanan uap ini menjadi gaya pendorong utama untuk fluks melalui membran, dengan hanya fase uap yang diangkut melintasi membran. Ketika air menguap di sisi umpan, sebagian energi dari umpan diambil dan dibawa oleh fluks uap air. Energi ini kemudian ditransfer ke sisi permeat selama proses kondensasi. Proses ini juga memunculkan lapisan batas termal di dekat antarmuka membran, yang dapat mengurangi fluks melalui membran. Prinsip dasar membran distilasi digambarkan pada skema dibawah ini.



Gambar 2. 2 Diagram Proses Pada Membran Distilasi (Febriani, 2015)

2.2.1 Membran Semipermeabel

Membran semipermeabel adalah jenis membran yang memungkinkan hanya molekul atau ion tertentu untuk melewatinya, berdasarkan ukuran, muatan, atau sifat kimia. Membran ini memiliki pori-pori kecil atau mekanisme selektif yang memungkinkan molekul-molekul kecil seperti air, oksigen, atau ion tertentu untuk melintasi, sementara molekul yang lebih besar atau ion yang tidak diinginkan ditahan. Membran semipermeabel adalah alat yang sangat penting dalam teknologi dan biologi karena kemampuannya untuk secara selektif mengontrol komposisi molekuler di dalam suatu ruang atau wadah.

Membran semipermeabel adalah struktur yang memungkinkan pergerakan selektif zat tertentu melewati batasan fisiknya, sementara zat lainnya dibatasi atau dihalangi. Konsep ini menjadi dasar penting dalam banyak bidang ilmu, termasuk kimia, fisika, biologi, dan teknik. Konsep membran semipermeabel mengacu pada kemampuan membran, dalam konteks ini, membran digunakan untuk membatasi secara selektif perjalanan spesies kimia terlarut (solut). Secara khusus, dalam penghalang membran, perilaku membran mengacu pada sifat untuk memungkinkan atau menghalangi aliran zat tertentu berdasarkan karakteristiknya. Dalam kasus penghalang, pembatasan ion anorganik dikaitkan dengan tolakan elektrostatis ion karena interaksi dari medan listrik yang terkait dengan lapisan ganda difusi (DDLs) dari partikel membran yang berdekatan. Ini berarti bahwa membran dapat membatasi pergerakan ion tertentu. Berdasarkan sifat-sifat elektrokimianya, interaksi ini terjadi ketika partikel membran cukup dekat satu sama lain, sehingga menyebabkan tumpang tindih medan listrik. Membran tertentu memiliki senyawa, seperti natrium bentonit (Na-bentonit), yang mengandung mineral membran yang sangat aktif, seperti smektit (contohnya, montmorillonit), dapat menunjukkan perilaku membran dengan baik. Dalam aplikasi penghalang geo-environmental yang menggunakan penghalang berbasis bentonit, seperti lapisan tanah sintetis (GCLs), lapisan tanah yang padat (CCLs), dan dinding pemotong tanah-bentonit (Ernawati et al.), keberadaan perilaku membran dapat menjadi aspek yang signifikan dan bermanfaat.

Namun, untuk beberapa aplikasi khusus, seperti penggunaan GCLs dan buffer bentonit yang sangat padat untuk penahanan limbah radioaktif tingkat rendah dan tingkat tinggi, pengukuran perilaku membran sangat penting untuk memprediksi kinerja jangka panjang penghalang tersebut. Perilaku membran dievaluasi dengan menggunakan koefisien efisiensi membran, ω , yang berkisar antara 0 hingga 1. Nilai ω yang mendekati nol menunjukkan bahwa perilaku membran tidak ada, sementara nilai ω yang mendekati satu menunjukkan pembatasan solut yang lengkap. Namun, secara umum, nilai ω untuk membran yang terjadi secara alami dan menunjukkan perilaku membran berada di antara dua kasus ekstrim tersebut, yaitu $0 < \omega < 1$. Dalam hal ini, membran tersebut dapat disebut sebagai membran semipermeabel atau tidak sempurna karena hanya sebagian dari pori-porinya yang membatasi pergerakan zat (Takeda and Manaka, 2018).

Membran semipermeabel pada mikrokapsul memiliki pori-pori yang seragam dan terdefinisi dengan baik yang memungkinkan permeabilitas yang selektif terhadap ukuran. Artinya, membran tersebut memungkinkan zat-zat yang lebih kecil dari pori untuk melewati sementara menghalangi zat-zat yang lebih besar. Mikrokapsul semacam itu dapat menyimpan bahan aktif besar tanpa kebocoran dan mengatur transportasi melintasi membran pada saat yang sama, yang sangat bermanfaat untuk berbagai aplikasi kimia dan biologi. Metode produksi mikrokapsul semipermeabel melibatkan penggunaan lapisan demi lapisan pengendapan dan perakitan koloid

antarmuka pada templat tetesan partikel atau emulsi. Selain itu, tetesan aerosol juga telah digunakan sebagai templat untuk menghasilkan mikrokapsul dengan cangkang berpori. Namun, metode konvensional memiliki kendala dalam kontrol ambang batas, keseragaman kapsul, dan efisiensi enkapsulasi. Pengembangan mikrokapsul semipermeabel dengan efisiensi enkapsulasi tinggi telah dimungkinkan melalui penggunaan tetesan ganda emulsi sebagai templat dalam mikrofluidika berbasis tetesan. Membran cangkang dirancang untuk memiliki pori yang seragam yang menghubungkan inti dan sekitarnya dengan menggunakan perakitan sendiri koloid atau pemisahan fasa polimer. Namun, perakitan koloid rentan terhadap tekanan mekanik dan hanya memberikan penggunaan terbatas. Pemisahan fasa mikro dari polimer blok telah memberikan struktur nanopori yang sangat teratur dengan ukuran pori biasanya antara 5 hingga 50 nm. Namun, tantangan dalam menciptakan nanopori yang meresap ke seluruh ketebalan membran tetap ada. Untuk mengatasi ini, telah dikembangkan strategi produksi tiga dimensi (3D) berkelanjutan nanopori melalui pemisahan fasa mikro yang diinduksi oleh polimerisasi (PIMS). PIMS menawarkan rute yang dapat disintesis secara sintesis untuk menghasilkan fase nano bicontinuous yang tidak teratur melalui sintesis in situ dan cross-linking simultan polimer blok yang menginduksi pemisahan fasa mikro selama polimerisasi. Sehingga, jaringan 3D dari nanopori kontinu dapat dengan mudah dibuat dalam matriks polimer yang *dicross-link* melalui penghapusan domain pengorbanan. Mikrokapsul

nanopori dengan membran 3D dapat dengan mudah dibuat menggunakan proses PIMS, memberikan kontrol yang tepat terhadap ukuran pori (Yang et al., 2017).

Aplikasi membran semipermeabel diantaranya:

1. Membran Dialisis yang digunakan dalam mesin dialisis untuk pasien dengan gagal ginjal. Membran semipermeabel ini memungkinkan limbah dan ion berlebih dalam darah melewati, sementara protein dan sel darah tidak dapat melintasinya.
2. Membran *Reverse Osmosis* digunakan untuk desalinasi air laut, membran ini memungkinkan molekul air untuk melintasi sambil menahan garam dan kotoran lainnya.
3. Membran sel dalam organisme hidup berfungsi sebagai membran semipermeabel, mengontrol masuk dan keluarnya nutrisi, ion, dan zat lainnya, sambil mempertahankan struktur dan fungsi seluler.
4. Pemurnian gas, membran semipermeabel dapat digunakan untuk memisahkan gas dengan memungkinkan gas tertentu untuk melintasi membran lebih cepat daripada yang lain.
5. Biosensor, membran semipermeabel digunakan dalam biosensor untuk memisahkan molekul target dari matriks sampel.

2.2.2 Membran Permeabel

Membran permeabel adalah struktur yang memungkinkan pergerakan selektif molekul atau partikel tertentu melalui batasan fisiknya, sementara menghalangi pergerakan zat-zat lainnya. Cara kerja membran permeabilitas

didasarkan pada prinsip selektivitas molekuler, difusi, dan osmosis, di mana zat-zat melewati membran berdasarkan sifat-sifat molekuler dan gradien konsentrasi. Sementara itu, sistematika membran permeabilitas mencakup struktur membran, bahan baku, metode produksi, dan modifikasi membran yang mempengaruhi kinerja dan aplikasinya.

Dalam aplikasi praktisnya, membran permeabilitas digunakan dalam berbagai industri seperti pengolahan air, industri farmasi, dan bioteknologi untuk tujuan pemurnian, pemisahan, dan pemrosesan zat-zat kimia atau biologis. Konsep membran permeabilitas dalam teknologi osmosis balik sangat penting dalam menyediakan sumber air alternatif melalui desalinasi dan reklamasi air.

Membran osmosis balik terkini berbasis kimia poliamida, yang dihasilkan melalui polimerisasi antarmuka monomer amina, *m*-fenilenediamina (MPD), dan monomer klorida asil, *trimesoyl chloride* (TMC), membentuk lapisan tipis yang menolak garam (biasanya tebal 20-400 nm) pada substrat berpori. Film poliamida tipis ini, yang secara selektif menghilangkan ion dan molekul kecil sambil memungkinkan permeasi air, secara signifikan menentukan sifat pemisahan membran. Studi terbaru menunjukkan transportasi pelarut ultra cepat dalam nanofilm poliamida sub-10 nm, dengan aliran metanol menunjukkan peningkatan 2 tingkat dibandingkan dengan membran filtrasi nanosolven organik yang tersedia secara komersial. Permeabilitas dan selektivitas membran osmosis balik sangat tergantung pada morfologi dan struktur

film poliamida tipisnya. Film poliamida biasanya memiliki kekasaran permukaan sekitar 100 nm karena adanya struktur "*ridge-and-valley*". Diperkirakan bahwa permukaan poliamida yang lebih kasar menghasilkan permeabilitas air yang lebih tinggi karena peningkatan luas permukaan membran.

Karakterisasi film poliamida menunjukkan bahwa struktur kasar "*ridge-and-valley*" mengandung sejumlah besar nanorongga diskret dengan ukuran dari beberapa nanometer hingga sekitar 100 nm. Meskipun pentingnya nanorongga dalam sifat pemisahan membran, mekanisme pembentukannya masih belum sepenuhnya diketahui. Hipotesis yang umum adalah bahwa nanorongga terbentuk oleh penangkapan tetesan air di dalam lapisan poliamida selama polimerisasi antarmuka. Namun, hipotesis ini tidak dapat menjelaskan mengapa struktur "*ridge-and-valley*" tidak ada ketika konsentrasi monomer amina dan klorida asil rendah. Kami menghipotesiskan bahwa nanorongga terbentuk karena pelepasan gelembung gas berukuran nano selama proses polimerisasi antarmuka. Gambar 1 menunjukkan reaksi eksotermik MPD dan TMC untuk membentuk lapisan penolakan poliamida silang-link. Panas yang dihasilkan dari reaksi mengurangi kelarutan gas terlarut seperti CO₂, N₂, dan O₂. Selain itu, reaksi ini juga menghasilkan asam kuat (HCl) sebagai produk sampingan, yang dapat lebih memfasilitasi pengeluaran CO₂. Dalam konteks polimerisasi antarmuka, gelembung gas halus yang dilepaskan akan dikapsulasi saat poliamida *cross-link* "beku" dengan cepat. Kami juga menunjukkan strategi yang berbeda untuk

meningkatkan atau menghilangkan pembentukan nanogelembung untuk menyetel morfologi dan kinerja pemisahan lapisan penolakan poliamida. Studi kami memberikan pemahaman mendalam tentang mekanisme fundamental yang terlibat dalam pembentukan membran poliamida dan menawarkan dimensi baru untuk menyesuaikan struktur dan kinerja pemisahan mereka (Ma et al., 2018).

Kemampuan untuk mengendalikan permeabilitas membran pada vesikel memungkinkan transportasi zat teratur melintasi dinding vesikel. Vesikel dapat dilihat sebagai kantong mikroskopis yang berisi volume cairan yang terkompartemen, tersebar dalam lingkungan cairan yang lebih besar. Alam telah menciptakan strategi yang canggih untuk mencapai kontrol transportasi transmembran, termasuk endo- dan eksositosis serta penambahan protein transmembran ke dalam membran sel. Ilmuwan telah mengeksplorasi berbagai pendekatan sintesis untuk mencapai kontrol tersebut dalam sistem buatan manusia. Contohnya termasuk sistem hibrida di mana protein transmembran diinkorporasi sebagai bagian dari vesikel sintesis, dan penggunaan blok bangunan makromolekul yang responsif untuk mengatur porositas membran atas pemicu eksternal dalam vesikel polimer, yang juga dikenal sebagai polimerisom. Di sini, kami pertama kali menunjukkan bahwa permeabilitas membran vesikel polimer dapat dikendalikan oleh partikel mangan oksida yang tertanam dalam membran. Kemampuan untuk memicu aktivitas katalitik partikel ini secara kimiawi, yang menginduksi peningkatan sementara permeabilitas membran,

menawarkan kontrol waktu yang spesifik terhadap transportasi transmembran. Kami yakin bahwa konsep ini dapat diterapkan pada berbagai sistem berbasis membrane (Jaggers et al., 2016).

Membran permeabel adalah jenis membran yang memungkinkan semua jenis molekul atau ion melewatinya tanpa selektivitas. Membran ini memiliki pori-pori besar atau tidak ada penghalang fisik yang mencegah partikel dari berbagai ukuran dan sifat untuk melewatinya. Oleh karena itu, baik molekul besar maupun kecil, serta ion, dapat melintasi membran ini dengan mudah.

Contoh dan Aplikasi:

1. Jaring kasa atau kain: Sebagai contoh sederhana, kain atau jaring kasa dapat dianggap sebagai membran permeabel, karena memungkinkan molekul udara dan sebagian besar molekul lainnya untuk melewatinya.
2. Saringan atau filter kasar: Dalam industri, saringan kasar digunakan untuk memisahkan partikel besar dari campuran cairan atau gas. Misalnya, dalam pengolahan air limbah, saringan kasar digunakan untuk menghilangkan benda-benda besar sebelum proses filtrasi yang lebih halus.

2.2.3 Nomenklatur

Berdasarkan rekomendasi *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC) tahun 1996, distilasi membran didefinisikan sebagai proses pemisahan antara fase cair dan gas menggunakan membran berpori yang porinya tidak ditembus oleh fase cair. Istilah MD sendiri muncul karena adanya kesamaan antara MD dengan distilasi konvensional.

Kedua proses ini sama-sama didasarkan pada kesetimbangan uap-cair (VLE) untuk pemisahan dan membutuhkan panas yang diberikan pada larutan umpan untuk mencapai panas laten penguapan yang diperlukan. Sebelum lokakarya tentang distilasi membran yang diadakan di Roma pada 5 Mei 1986, berbagai istilah digunakan untuk menyebut MD, seperti distilasi transmembran, pervaporation termal, pervaporation, evaporasi membran, dan distilasi kapiler.

Terminologi untuk MD pertama kali dibahas oleh komite yang beranggotakan enam orang selama lokakarya tentang distilasi membran yang diadakan di Roma pada 5 Mei 1986, yaitu: V. Calabro (Universitas della Calabria, Calabria, Italia), A. C. M. Franken (Universitas Twente, Enschede, Belanda), S. Kimura (Universitas Tokyo). Istilah, definisi, dan simbol yang terkait dengan MD telah didiskusikan, distandarisasi, dan dilaporkan.

Secara umum, MD sebaiknya digunakan untuk operasi membran non-isotermal di mana gaya pendorongnya adalah gradien tekanan parsial melintasi membran yang memenuhi karakteristik berikut (Khayet dan Matsuura, 2011):

1. Berpori: Membran harus memiliki pori-pori yang cukup kecil untuk menahan cairan proses, tetapi cukup besar untuk memungkinkan uap melewatinya. Ukuran pori-pori ini biasanya berkisar antara 0,1 hingga 10 mikrometer.
2. Tidak dibasahi oleh cairan proses: Membran tidak boleh dibasahi oleh cairan proses, yang berarti bahwa cairan tersebut tidak boleh menempel pada permukaan membran atau mengisi

pori-porinya. Hal ini penting untuk memastikan bahwa hanya uap yang dapat melewati membran dan mencapai sisi permeat.

3. Tidak mengubah VLE dari spesies yang terlibat: Membran tidak boleh mengubah kesetimbangan uap-cair (VLE) dari spesies yang terlibat dalam proses pemisahan. VLE adalah rasio antara tekanan uap suatu zat dalam fase uap dengan konsentrasinya dalam fase cair. Jika membran mengubah VLE, maka proses pemisahan akan menjadi tidak efisien.

4. Tidak memungkinkan kondensasi terjadi di dalam porinya: Membran tidak boleh memungkinkan kondensasi uap terjadi di dalam pori-porinya. Kondensasi dapat menyumbat pori-pori dan mengurangi permeabilitas membran.

5. Dipelihara dalam kontak langsung setidaknya dengan larutan cair umpan panas yang akan diproses: Membran harus dipelihara dalam kontak langsung dengan larutan cair umpan panas yang akan diproses. Hal ini penting untuk memastikan bahwa uap yang dihasilkan dari larutan umpan dapat dengan mudah mencapai membran dan melewatinya.

BAB III MEKANISME PROSES MEMBRAN DISTILASI

3.1 Mekanisme Pemisahan pada Membran Distilasi

Mekanisme pemisahan dalam membran distilasi adalah proses kompleks yang melibatkan perbedaan tekanan uap, konduksi termal, dan difusi molekuler. Proses ini memanfaatkan membran hidrofobik untuk memisahkan komponen dalam campuran cairan berdasarkan perbedaan tekanan uap antara sisi umpan (*feed*) dan sisi permeat. Membran hidrofobik memungkinkan hanya uap air untuk melewati membran, sedangkan cairan dan zat non-volatil tetap berada di sisi umpan. Membran distilasi memanfaatkan gradien temperatur antara sisi umpan yang panas dan sisi permeat yang dingin untuk menciptakan perbedaan tekanan uap yang mendorong perpindahan uap air melalui membran.

Proses pemisahan melalui evaporasi yaitu molekul air pada sisi umpan menguap karena suhu tinggi. Uap air yang terbentuk kemudian bergerak menuju permukaan membran. -
Transportasi Melalui Membran: Membran hidrofobik memiliki pori-pori yang memungkinkan uap air untuk melewati tetapi mencegah cairan dan zat terlarut. Proses ini disebut sebagai transpor molekuler, di mana uap air bergerak melalui pori-pori membran.

- Kondensasi: Setelah melewati membran, uap air mengalir ke sisi permeat yang lebih dingin, di mana ia mengembun menjadi cairan lagi.

3. Mekanisme Transportasi Molekuler

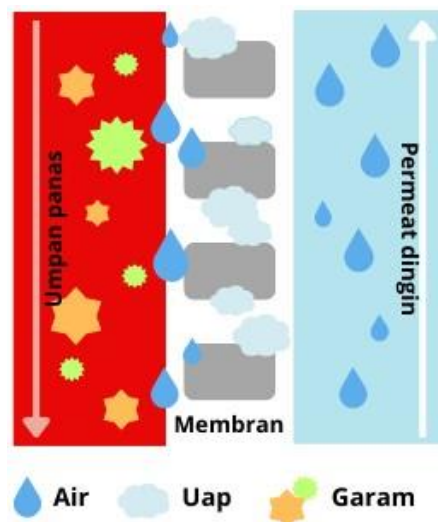
- Difusi Knudsen: Ketika ukuran pori membran lebih kecil dibandingkan dengan panjang jalur bebas molekul, transportasi uap air melalui pori-pori terjadi terutama melalui tumbukan uap dengan dinding pori, yang disebut difusi Knudsen.
- Transpor Molekuler: Pada pori yang lebih besar, transportasi uap air dapat melibatkan tumbukan antar molekul dan dinding pori, yang dikenal sebagai difusi molekuler.

4. Faktor yang Mempengaruhi Pemisahan

- Temperatur Umpan dan Permeat: Perbedaan temperatur yang lebih besar meningkatkan *driving force* untuk evaporasi dan perpindahan uap.
- Tekanan: Penggunaan vakum atau gas sweeping pada sisi permeat dapat menurunkan tekanan parsial uap air dan meningkatkan efisiensi pemisahan.
- Karakteristik Membran: Ukuran pori, konduktivitas termal, dan sifat hidrofobik membran mempengaruhi laju pemisahan dan efisiensi proses.

Transportasi membran distilasi dikendalikan oleh gradien tekanan uap parsial yang mudah menguap melalui membran hidrofobik mikropori. Kekuatan pendorong sebenarnya dari membran distilasi biasanya ditentukan oleh perbedaan suhu di

seluruh membran. Untuk menciptakan tekanan uap jenuh yang lebih tinggi, suhu pada sisi umpan ditingkatkan dan permeat didinginkan hingga suhu kamar atau lebih rendah. Hal ini telah memastikan bahwa perbedaan tekanan uap cukup untuk terjadinya penguapan air pada permukaan membran. Uap air kemudian diangkut melalui pori-pori membran yang tidak terhidrasi dan dikondensasi dalam aliran permeat (seperti pada gambar 3.1) (Zhong et al., 2020).



Gambar 3. 1 Ilustrasi proses desalinasi dari membran distilasi

Dalam proses membran distilasi, perpindahan panas dan massa keduanya berlangsung secara bersamaan. Seperti yang diketahui, dalam semua sistem perpindahan panas, terdapat lapisan batas fluida yang berdekatan dengan sisi membran umpan dan permeat. Lapisan batas ini menyebabkan polarisasi suhu, sehingga mengakibatkan penurunan suhu transmемbran (karena suhu pada permukaan membran (T_m) menjadi berbeda dengan suhu larutan bulk (T_b)). Demikian juga, konsentrasi zat

terlarut (s) pada permukaan membran (cm) berbeda dengan konsentrasi zat terlarut pada larutan *feed bulk* (C_b), sehingga menyebabkan terjadinya polarisasi konsentrasi (Sanmartino et al., 2016).

Perpindahan massa dan panas dapat dijelaskan melalui tiga tahapan, yaitu perpindahan melalui lapisan batas pada sisi umpan, perpindahan melalui membran, dan perpindahan melalui lapisan batas pada sisi permeat. Perpindahan massa pada lapisan batas dapat dijelaskan dengan koefisien perpindahan massa. Pada fase membran, difusi uap air dapat dijelaskan dengan salah satu dari empat mekanisme, yaitu model difusi molekuler Knudsen atau Aliran Poiseuille, atau dengan Dusty Gas Model (DGM). Koefisien perpindahan panas digunakan untuk menggambarkan perpindahan panas pada lapisan batas di kedua sisi membran. Perpindahan panas pada membran terjadi melalui uap dan konduksi (Upadhyaya and Nene, 2015).

Mekanisme perpindahan seperti perpindahan massa dan perpindahan panas digabungkan dalam proses membran distilasi. Secara umum mekanisme perpindahan yang diterima untuk perpindahan massa biasanya adalah difusi molekuler, difusi Knudsen, dan aliran kental. Mekanisme perpindahan massa bergantung pada Knudsen number (Kn) yang didefinisikan sebagai rasio jalur bebas rata-rata (λ) perpindahan molekul terhadap diameter membran berpori (D_p) (Pangarkar et al., 2016).

$$k_l = \frac{D}{\delta} \quad \dots(3.1)$$

Jalur bebas rata-rata, λ , dapat dihitung seperti berikut:

$$\lambda = \frac{RT}{P} \left(\frac{M}{2\pi RT} \right)^{-0.5} \quad \dots(3.2)$$

dimana μ adalah viskositas dari uap pada suhu atmosfer dan tekanan sekitar. M adalah molekuler berat, R adalah konstanta gas, T adalah suhu, P adalah tekanan rata-rata didalam pori-pori.

Ketika nilai Knudsen lebih besar dari satu, kemungkinan tumbukan antara molekul uap dengan dinding pori lebih besar dibandingkan tumbukan antara molekul uap dengan molekul lainnya. Dalam hal ini, permeabilitas melalui pori-pori membran ketika ukuran pori seragam d_p , diasumsikan dapat dihitung dari persamaan berikut (Kebria and Rahimpour, 2020):

$$\beta_{p,1} = \frac{\epsilon}{\tau} \left(\frac{d_p}{\lambda} \right)^{5.6} \quad \dots(3.3)$$

dimana ϵ , τ , dan δ masing-masing mewakili porositas membran, tortuositas membran, dan ketebalan membran. Ketika nilai Knudsen lebih kurang dari 0,01, molekul difusi molekuler adalah mekanisme perpindahan massa yang mengatur, dan permeabilitas membran didefinisikan sebagai berikut:

$$\beta_{p,1} = \frac{D}{\delta} \left(\frac{d_p}{\lambda} \right)^{5.6} \quad \dots(3.4)$$

dimana P , D , dan P_{air} masing-masing mewakili tekanan total dalam pori, koefisien difusi, dan tekanan udara di dalam pori. Ketika tekanan hidrostatis diterapkan pada membran yang memiliki pori-pori lebih besar dari jalur bebas rata-rata, aliran kental akan berubah menjadi mekanisme perpindahan massa yang mengatur. Pada kondisi ini, tabrakan antar molekul uap lebih besar kemungkinannya daripada tabrakan antara molekul uap dengan dinding pori. Asumsikan ukuran pori seragam $d_{p,1}$ untuk membran berpori, permeabilitas dapat diukur dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\beta_{9,1} = \frac{\mu}{P_1} + \frac{d_{p,1}^2}{8} \quad (3.5)$$

dimana μ dan P_1 adalah viskositas molekul uap yang ditransfer dan rata-rata tekanan pori-pori.

Dalam konfigurasi VMD, karena adanya ruang hampa pada sisi permeat molekul difusi tidak mencukupi sehingga menyebabkan tekanan parsial udara yang rendah terjadi di dalam pori-pori. Oleh karena itu, aliran Knudsen dan difusi kental harus lebih disukai. Semakin besar ukuran pori-pori membran, maka semakin banyak tabrakan molekul-molekul yang terjadi kontrol dan aliran kental juga terjadi di membran. Dalam konfigurasi AGMD, perpindahan uap melalui membran dijelaskan oleh teori difusi molekuler dan udara di dalam pori-pori membran dan di celah udara adalah film yang tergenang. Model

difusi molekuler telah berhasil diterapkan di AGMD (Pangarkar et al., 2016)

Dalam konfigurasi AGMD, perpindahan uap melalui membran dijelaskan oleh teori molekul difusi yang mengakui adanya udara di dalam pori-pori membran dan di ruang besar sebagai film yang stagnan. Difusi Stefan dan hubungan tipe biner (yaitu, persamaan difusi molekuler Fick) serta Stefan Persamaan Maxwell digunakan untuk menggambarkan perpindahan massa multikomponen dalam AGMD dalam sistem AGMD. Dalam semua model teoritis ini, ukuran pori tidak diperhitungkan meskipun studi eksperimental menunjukkan ketergantungan fluks AGMD pada parameter ini. Baru-baru ini, upaya telah dilakukan untuk memprediksi kinerja AGMD menggunakan model gas berdebu yang memperhitungkan semua parameter membran untuk menggambarkan difusi Knudsen simultan, difusi molekuler dan model aliran kental (Khayet and Matsuura, 2011a).

Berdasarkan teori utama perpindahan panas, lapisan batas termal terbentuk pada antarmuka cair atau padat dengan suhu berbeda. Pada modul MD, cairan panas bersentuhan langsung dengan permukaan padat (membran, dengan ketebalan δ) dimana akan terbentuk lapisan batas termal yang berdekatan dengan permukaan membran. Karena adanya perbedaan suhu dalam modul MD, maka dua lapisan batas akan terbentuk pada sisi umpan (dengan ketebalan δ_1) dan sisi permeat (dengan ketebalan δ_2) dari membran hidrofobik. Di dalam lapisan batas termal, suhu umpan menurun dari T_1 ; (*feed*

bulk) menjadi T_1 : (permukaan membran). Selain itu, suhu permeat meningkat dari T_2 (permeat *bulk*) ke T_1 (permukaan membran). Karena proses MD bergantung pada penguapan suatu komponen, panas laten harus dipindahkan dari *feed bulk* ke permukaan membran melalui lapisan batas termal. Koefisien perpindahan panas (h_c) berperan besar dalam perpindahan panas melalui lapisan batas. Jadi, fluks panas antara *feed bulk* dan permukaan membran didefinisikan sebagai berikut (Kebria and Rahimpour, 2020):

$$q_c = h_c(T_2 - T_1) \quad \dots(3.6)$$

Perpindahan panas melalui lapisan batas seringkali merupakan langkah yang membatasi laju perpindahan massa, karena sejumlah besar panas harus disuplai ke permukaan membran untuk menguapkan cairan. Laju perpindahan panas melalui lapisan batas umpan dapat dihitung sebagai berikut (Upadhyaya and Nene, 2015):

$$Q_c = H_c(T_c - T_1) \quad \dots(3.7)$$

Laju perpindahan panas melalui lapisan batas permeat dapat dihitung sebagai berikut:

$$Q_8 = H_8(T_1 - T_8) \quad \dots(3.8)$$

di mana H_c dan H_8 , masing-masing adalah koefisien perpindahan panas melalui lapisan batas umpan dan permeat dan dapat diperkirakan menggunakan persamaan empiris.

Fluks panas total dari larutan umpan dan cairan yang diserap infiltrat (Q) diperoleh dengan menjumlahkan dua fluks panas yang terjadi pada membran hidrofobik, yaitu panas laten penguapan (Q_v) dan konduksi (Q_c) melalui uap yang terkandung di dalam lubang membran dan bahan membran. Komponen air yang menguap di bagian luar membran pada sisi umpan, keluar dari pori-pori membran, dan mengembun pada batas uap-cair di sisi permeat dengan fluks panas dituliskan sebagai berikut (Alhathal Alanezi et al., 2021):

$$Q = J \cdot \Delta H. \quad \dots(3.9)$$

Dimana Q (W/m^2) adalah bentuk energi yang ditransfer ke cairan dalam aliran uap melalui panas laten untuk menyediakan panas penguapan yang diperlukan, dan untuk mengimbangnya panas tersebut dengan kondensasi di sisi lain dari membran, J (kg/m^2s) adalah fluks air melalui membran dan ΔH (kJ/kg) adalah panas laten penguapan uap air.

Disebutkan bahwa dari jumlah total fluks panas ditransfer melalui membran, 50-80% dikonsumsi sebagai panas laten untuk meresap ke dalam proses produksi, sedangkan sisanya hilang melalui konduksi termal. Bahkan, kehilangan panas konduksi melalui matriks membran menjadi kurang signifikan ketika sistem MD beroperasi suhu operasi yang tinggi, dibawah titik didih larutan air umpan. Hal ini dapat dianggap salah satu metode untuk meminimalkan kehilangan panas melalui membran, yang merupakan salah satu kelemahan proses MD

pada umumnya dan khususnya pada DCMD (Khayet and Matsuura, 2011a).

Perpindahan panas dan massa melalui membran hidrofobik berpori yang terjadi pada proses membran distilasi itu secara bersamaan. Perpindahan panas terjadi melalui pori-pori membran saat panas dipindahkan melalui matriks membran dan pori-porinya. Perpindahan panas di dalam membran disebabkan oleh panas laten fluks uap atau gas yang menyertainya, dan kemudian ditransmisikan melalui konduksi ke kedua bahan membran dan pori-pori membran yang mengandung gas. Karena membran hidrofobik, hanya uap air atau bahan yang mudah menguap yang diangkut dari sisi umpan ke sisi permeat melalui pori-pori membran. Selain itu, kehadiran lapisan batas fluida yang berbatasan dengan keduanya memberi makan dan menembus sisi membran menyebabkan fenomena yang dikenal sebagai polarisasi konsentrasi dan polarisasi suhu (Souhaimi et al., 2011).

Pengangkutan uap yang disebabkan oleh variasi suhu melalui membran berpori hidrofobik yang tidak membasahi adalah inti dari distilasi membran. Gaya penggeraknya adalah variasi tekanan uap melintasi pori-pori membran, atau lebih tepatnya variasi potensial kimia yang terjadi di sekitarnya. Cairan berair tidak dapat memasuki pori-pori membran hidrofobik karena kekuatan kapiler. Selama proses distilasi membran, panas dan massa berpindah secara bersamaan. Proses pemisahan ini sangat menarik karena efisiensi

penahannya yang tinggi. Ini karena kebutuhan energi yang jauh lebih rendah dari perbedaan tekanan hidrolik (Nagy, 2019).

Membran yang digunakan dalam distilasi membran harus mempunyai ciri-ciri sebagai berikut (Smolders and Franken, 1989):

- Membran harus berpori.
- Membran tidak dibasahi oleh fluida proses.
- Tidak terjadi kondensasi kapiler di pori-pori membran.
- Bahan membran tidak boleh mengubah kesetimbangan uap/cair komponen zat terlarut.
- Cairan pada sisi suplai harus bersentuhan langsung dengan membran berpori.
- Kekuatan pendorong transpor komponen adalah gradien tekanan parsialnya dalam fase uap

Cairan umpan bersentuhan langsung dengan membran hidrofobik berpori. Cairan kontak tidak dapat menembus pori-pori hidrofobik membran sampai tekanan fluida tidak lagi melebihi gaya kapiler, yang disebut perbedaan tekanan pecah dapat dihitung menggunakan persamaan Laplace (Lawson and Lloyd, 1997) :

$$P_{\text{fluida}} - P_{\text{membran}} = \Delta P_{\text{kapiler}} < \Delta P_{\text{gesek}} = \frac{4\sigma \cos \theta}{d_p} \quad (3.10)$$

Dalam hal ini, tegangan permukaan zat cair adalah σ (N/m), sudut kontak zat cair/padat adalah θ (radian), diameter pori terbesar adalah d_p (m), faktor geometri yang ditentukan oleh struktur pori adalah B (nilainya adalah satu untuk silinder),

perbedaan tekanan operasi $\Delta P_{\text{EFD} < \text{BGF}}$ adalah Pa, dan tekanan penetrasi ΔP_{GB8} adalah Pa. Suhu dan komposisi pelarut tidak terpengaruh, tetapi nilai sudut kontak cairan/padat dan cairan dapat sangat dipengaruhi oleh parameter ini tegangan yang ada di permukaan Ketika pengguna memilih membran untuk proses ini, mereka harus mempertimbangkan parameter ini. Agar sistem dapat digunakan untuk distilasi membran, sudut kontak cairan dan padatan di dalam secara umum harus lebih besar dari 90°. Tekanan penetrasi untuk membran hidrofobik air yang biasanya digunakan dengan sudut kontak 130° adalah sekitar 1,8 bar.

Sangat banyak penelitian telah dilakukan tentang cara gas dan uap mengalir melalui media berpori. Untuk memprediksi kinerja membran MD tergantung pada konfigurasi MD yang digunakan, model teoritis telah dikembangkan menggunakan teori kinetik gas. Model aliran Knudsen, kental, atau Poiseuille, model difusi molekul biasa, dan beberapa jenis mekanisme lain yang disarankan untuk transportasi massal sering disebut sebagai model gas berdebu. Bilangan Knudsen (Kn) adalah jumlah yang mengatur yang membantu menentukan mekanisme operasi transpor massa dalam pori tertentu di bawah kondisi percobaan tertentu. Kn adalah rasio jalur bebas rata-rata, λ , dari molekul yang diangkut dengan ukuran pori selaput. Rata-rata jalur bebas (λ_i) untuk spesies i dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut (Khayet, 2011b) :

$$\lambda_i = \frac{B}{\sqrt{2\pi} p} + \dots \quad (3.11)$$

dimana σ adalah diameter tumbukan (2,641 Å untuk uap air), k_B adalah konstanta Boltzmann, p adalah tekanan rata-rata dalam pori-pori membran dan T adalah suhu absolut. Untuk campuran biner (i dan j) di udara, jalur bebas rata-rata dapat dievaluasi dengan persamaan berikut :

$$\lambda = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_{i,0} \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{0.5}}} \quad \dots(3.12)$$

di mana M_i dan M_j adalah berat molekul komponen i dan j, dan $\lambda_{i,0}$ dan $\lambda_{j,0}$ adalah diameter tumbukan.

Gaya penggerak dalam MD adalah perbedaan tekanan uap melintasi membran, yang sangat dipengaruhi oleh perbedaan suhu melintasi membran, atau oleh vakum atau gas pembersih pada sisi permeat. Kesetimbangan uap/cair pada suhu tertentu dapat dipengaruhi oleh kelengkungan permukaan cairan dalam kapiler. Besaran kelengkungan yang dihitung dengan persamaan Kelvin adalah (Khayet, 2011b) ; (Souhaimi et al., 2011):

$$P^o = P_{j,0}^o \exp \left(\frac{2\sigma}{r} + \frac{C}{T} \right) \quad \dots(3.13)$$

dimana P^o adalah tekanan saturasi cairan murni di atas permukaan cairan cembung dengan radius kurva r (Pa), $P_{j,0}^o$ adalah tekanan saturasi zat cair murni pada permukaan datar (Pa), σ adalah tegangan permukaan zat cair (N/m), C adalah

massa jenis molar zat cair (mol/m^3), R adalah universal konstanta gas (J/molK) dan T adalah suhu absolut (K). Secara umum, efek kelengkungan dapat diabaikan jika ukuran pori $> 0,1$ mm, dalam kasus membran berpori yang saat ini digunakan untuk distilasi larutan berair dengan $\theta > 130$ derajat. Pengaruh gradien suhu melintasi membran berpori juga cukup kecil, mendekati atau kurang dari 1°C untuk proses MD pada umumnya.

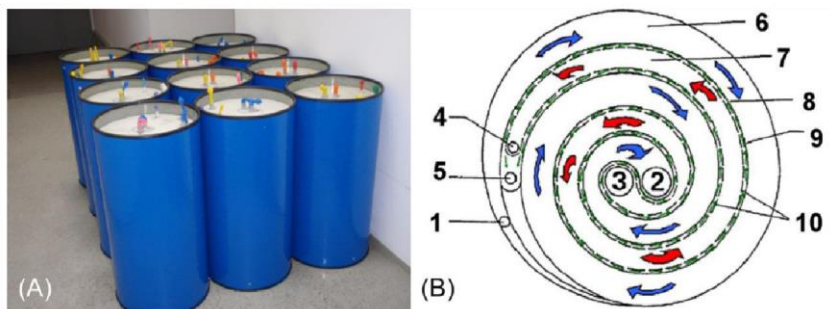
Dalam proses MD, transport molekul melintasi matriks membran yaitu difusi permukaan diabaikan karena luas difusi matriks membran adalah kecil dibandingkan dengan luas pori. Untuk membran hidrofobik MD, “afinitas” antara air dan bahan membran sangat rendah dan dapat diabaikan kontribusi transport tersebut melintasi membran matriks, terutama untuk busa membran dengan ukuran pori besar dan membran hidrofobik MD. Namun demikian, bila terdapat senyawa lain dalam larutan air umpan, terutama untuk senyawa yang mempunyai “afinitas” kuat terhadap bahan membran, maka mekanisme transport melalui membran basa mempunyai pengaruh yang signifikan. Studi sistematis diperlukan untuk memperjelas hal ini dalam kedokteran. Difusi permukaan telah dilaporkan dapat mempengaruhi kinerja MD pada membran dengan ukuran pori kecil ($<0,02$ mm) (Fujii et al., 1992).

Sebuah teori model mempertimbangkan transportasi massal melalui matriks membran melalui difusi terlarut mekanisme telah diusulkan untuk VMD dan studi perbandingan ekstensif antara proses pemisahan per penguapan (PV) dan

VMD menggunakan bahan membran yang sama (PVDF) telah dilakukan (Khayet, 2011b).

Sistem pemulihan panas meningkatkan efisiensi MD, tetapi biaya keseluruhan sistem akan meningkat. Untuk mengurangi kehilangan panas dan memaksimalkan fluks permeat, desain konfigurasi modul yang efektif dan karakteristik membran yang lebih baik diperlukan. Proses MD baru yang efisien, seperti Memstill, Fraunhofer ISE, dan distilasi membran multieffek (Memsys), belum banyak diteliti (Alkhudhiri, dkk 2018).

Pabrik desalinasi AGMD yang digerakkan oleh tenaga surya Fraunhofer ISE meningkatkan produksi 10 m³ per hari. Dalam proses ini, modul MD *spiral wound* dengan penukar panas arus berlawanan digunakan. Modul MD memiliki luas membran 5–14 m², panjang saluran antara 3,5 dan 10 m, dan tinggi saluran 0,7 m. Dengan mendaur ulang energi internal, kebutuhan energi panas turun menjadi 130 kW/m³ (Winter et al., 2011).

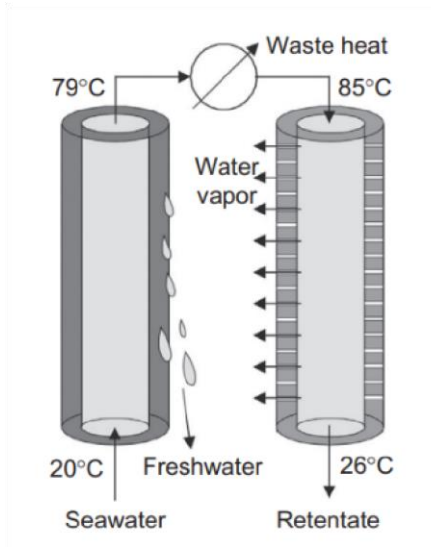


Gambar 3. 2 Modul Spiral dengan Diagram Skema untuk Saluran

Panas dan Dingin. Konsep : (1) Inlet kondensator, (2) outlet kondensator, (3) evaporator inlet, (4) outlet evaporator, (5) distilat outlet, (6) saluran kondensator, (7) saluran evaporator, (8) foil

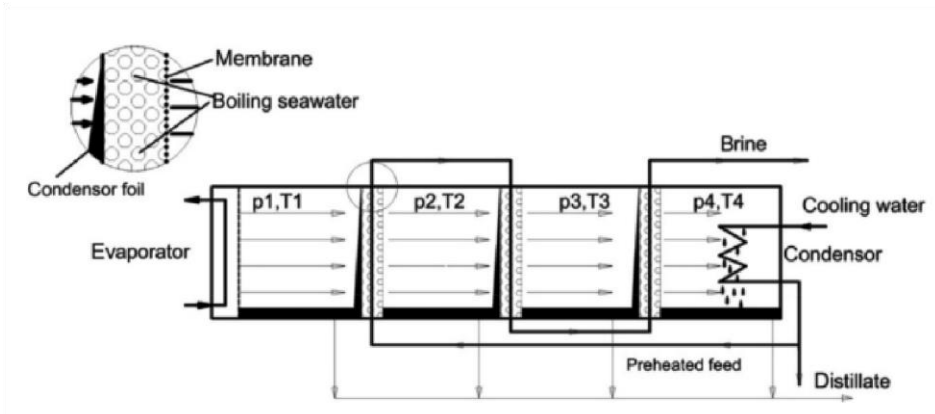
kondensor, (9) saluran distilat, dan (10) membran hidrofobik (Alkhudhiri and Hilal, 2018b)

TNO (Organisasi Belanda untuk Penelitian Ilmiah Terapan) mengembangkan proses Memstill. Larutan umpan, seperti air laut, dipompa melalui saluran nonpermeabel dan dipanaskan oleh panas kondensasi. Panas buang, sumber panas eksternal, memanaskan umpan sekitar 2-5 derajat Celcius. Kemudian masuk kembali ke membran evaporator, yang terdiri dari membran hidrofobik mikropori, yang mengalir dalam arah yang berlawanan. Uap air melalui membran dan mengembun di sisi lain. Proses ini memiliki keuntungan terbaik, yaitu biaya total yang rendah dan konsumsi energi yang rendah. Terdapat tiga pabrik percontohan yang menggunakan teknologi Memstill. Pabrik percontohan pertama didirikan untuk desalinasi air laut di Singapura, dan pabrik percontohan kedua dan ketiga didirikan untuk pengolahan air payau di Belanda. Untuk menghasilkan 1 m³, Memstill membutuhkan energi panas antara 56 dan 100 kilowatt jam (Meindersma et al., 2006).



Gambar 3. 3 Prinsip proses Memstill (Alkhudhiri and Hilal, 2018b)

Proses Memsys, yang juga dikenal sebagai distilat membran multiefek, menggabungkan keuntungan VMD dan multiefek. Setiap tahap mengembalikan panas yang hilang dari tahap sebelumnya. Dengan demikian, pemulihan panas yang efektif dapat dicapai. Kapasitas produksinya bervariasi tergantung pada jumlah tahapan dan besar kecilnya masing-masing tahapan. Pada tahap pertama, uap air dihasilkan melalui penggunaan panas dan tekanan vakum. Uap ini melewati membran hidrofobik dan mengembun kertas timah. Energi ditransfer ke efek berikutnya melalui foil ini. Setiap tahap dan di kondensator menghasilkan distilat (Camacho et al., 2013). Memsys telah menjadi produk komersial yang sukses. Dengan dua tahap, aliran destilat dapat mencapai 33,5 liter per jam (Heinzl et al., 2012).



Gambar 3. 4 Prinsip distilasi membran Memsys V-ME (Alkudhiri and Hilal, 2018b)

BAB IV ASPEK ENGINEERING MEMBRAN DISTILASI

4.1 Karakteristik Membran Distilasi

Dalam teknologi membran distilasi, pemilihan jenis membran yang tepat adalah aspek krusial untuk mencapai efisiensi dan efektivitas proses pemisahan. Membran yang digunakan harus memiliki karakteristik khusus yang memungkinkan hanya uap yang dapat melewatinya, sementara cairan tidak bisa menembus lapisannya. Karakteristik lainnya yaitu meliputi ukuran pori-pori, ketebalan seluruh membran, porositas, distribusi ukuran pori, tortuositas rendah, stabilitas mekanik serta kimia, dan material membran seperti konduktivitas termal (Alkhudhiri et al., 2012b, AlFuraiji et al., 2019).

Membran distilasi dapat dikategorikan berdasarkan strukturnya yaitu bentuk simetris (isotropik) dan asimetris (anisotropik). Dalam konteksnya, pemilihan struktur membran simetris dan asimetris mempengaruhi efektivitas dan efisiensi proses membran distilasi. Membran simetris merupakan membran yang tersusun atas satu macam lapisan (homogen) dengan ketebalan 10-200 μm dengan kemampuan dapat menahan hampir semua partikel umpan dalam poriporinya. Sedangkan membran asimetris merupakan membran

lapisan tipis yang aktif dan beberapa lapisan pendukung yang berpori dibawahnya (heterogen) dengan ketebalan lapisan tipis sebesar 0,10,5 μm serta lapisan pendukungnya sebesar 10-150 μm (Elma et al., 2023). Membran simetris dengan sifat yang seragam memberikan keuntungan dalam kinerja membran yang lebih konsisten dan kekuatan mekanik (Huang et al., 2019). Namun, membran asimetris juga memberikan peningkatan selektivitas dan karakteristik mekanik yang berbeda sehingga menyebabkan peningkatan kekakuan pada membran (Haraya et al., 1988, Elani et al., 2015). Selain struktur membran, modul membran seperti tubular dan pelat mewakili dua konfigurasi modul dalam MD. Modul tubular serat berongga (*Hollow Fiber*) terdiri dari membran HF yang dikemas dalam sebuah housing yang memiliki potensi tinggi untuk aplikasi komersial karena area aktif membran HF yang besar (Alessandro et al., 2023). Modul pelat pada membran distilasi memiliki kemudahan dalam aplikasinya serta dinamika aliran yang dapat ditingkatkan dengan penggunaan spacer dan baffle untuk meningkatkan turbulensi dan menghomogenkan suhu didalam saluran (Liu and Martin, 2006). Dalam aplikasi membran distilasi, penggunaan membran hidrofobik juga sangat penting untuk mencegah fase cair melewati pori-pori membran, sehingga hanya uap yang dapat melewati lapisan hidrofobik ini dan menjadi kekuatan pendorong gradien tekanan parsial transmembran.

Membran hidrofobik merupakan membran yang diperlukan untuk aplikasi membran distilasi (MD) dan saat ini telah menjadi perhatian khusus dalam studi MD (Kusuma et al., 2021). Membran yang diperlukan untuk aplikasi membran distilasi harus memiliki setidaknya satu lapisan hidrofobik. Hanya uap yang dapat melewati

lapisan hidrofobik ini, yang kemudian menjadi kekuatan pendorong gradien tekanan parsial transmembran. Selain itu, membran tidak boleh mengubah kesetimbangan uap atau cairan senyawa yang terlibat dan kondensasi tidak boleh terjadi di dalam pori-porinya. Sifat hidrofobik membran bertujuan mencegah cairan melewati membran karena gaya tegangan permukaan yang dihasilkan dalam pembentukan antarmuka cairan sehingga hanya uap air yang dapat meresap (Zukefli et al., 2019). Dalam beberapa kasus, untuk membangun kekuatan pendorong transmembran dan panas laten yang diperlukan untuk penguapan, larutan umpan dipanaskan hingga suhu antara 30°C sampai 90°C (yaitu dibawah titik didih larutan umpan cair berair). Oleh sebab itu, panas dan massa secara simultan transfer terjadi dalam proses ini (Khayet and Matsuura, 2011a).

Material hidrofobik yang umum digunakan adalah *polytetrafluoroethylene* (PTFE), polipropilena (PP), dan polivinilidena fluorida (PVDF) (Fuzil et al., 2023, Kusuma et al., 2021). Umumnya pembuatan membran menggunakan metode seperti inversi fasa, peregangan dan pemisahan fasa yang diinduksi secara termal (thermally induced phase separation) (Attia et al., 2018). Beberapa penelitian terdahulu menyatakan bahwa material polimer untuk membran hidrofobik memiliki sejumlah karakteristik penting, seperti energi permukaan yang rendah, ketahanan kimia, stabilitas termal, dan kekuatan mekanik yang baik (Efome et al., 2015).

PTFE adalah polimer yang sangat kristal dengan stabilitas termal dan ketahanan kimia yang serta memiliki energi permukaan yang paling rendah berkisar antara $9 - 20 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ (Wang and Chung, 2015) (Chuang et al., 2010). PP juga memiliki struktur kristal yang tinggi

sama dengan PTFE namun memiliki energi permukaan yang lebih tinggi yaitu 30×10^{-3} N/m (Camacho et al., 2013b). Jika dibandingkan dengan membran MD lainnya, PP memiliki keuntungan dalam hal dan biaya produksi namun kinerja membrannya lebih rendah karena struktur simetris dan stabilitas termalnya (Gryta, 2007, Wang and Chung, 2015). Sedangkan PVDF merupakan polimer semicrystalline dengan energi permukaan sebesar 30.3×10^{-3} N/m, kelebihan yang dimiliki polimer ini adalah kemudahan dalam proses pembuatannya dan memiliki mekanik yang sangat baik (Wang and Chung, 2015, Kusuma et al., 2021).

Karakteristik ini menjelaskan bahwa bahan polimer sangat cocok digunakan untuk membran karena memungkinkan pembentukan membran berpori mikro dengan porositas tinggi, sekitar 70-80%, serta distribusi ukuran pori yang seragam (Khayet and Matsuura, 2011b). Selain penggunaan membran berbasis polimer, membran komposit juga dapat digunakan dalam membran distilasi. Penggunaan membran komposit dapat berupa lapisan hidrofobik berpori mikro yang dilapisi pelapis hidrofilik yang tidak berpori (Díez and Rosal, 2020). Membran keramik hidrofobik juga mendapat perhatian karena karakteristik dan operasi jangka panjangnya. Alumina, besi, silika, titania dan zirkonia banyak digunakan untuk memproduksi membran keramik secara selektif (Camacho et al., 2013b). Dibandingkan dengan membran polimer, membran keramik dapat tahan terhadap berbagai *feed* (Alessandro et al., 2023). Namun, kekurangan dari membran keramik ialah biaya produksi yang dibutuhkan cukup besar (Abdullayev et al., 2019, Zhang et al., 2019a).

Untuk memastikan kinerja yang optimal, penting untuk melakukan karakterisasi membran secara menyeluruh. Teknik karakterisasi membran terbagi menjadi dua kelompok utama yaitu karakterisasi morfologi membran dan performa membran (*permeability*). Teknik yang berkaitan dengan permeabilitas membran seperti model hubungan antara struktur dan permeabilitas kuantitatif serta estimasi permeabilitas menggunakan persamaan Smoluchowski yang merupakan metode umum yang digunakan (Zhang et al., 2022). Teknik untuk karakterisasi membran yang meliputi, *water contact angle* (WCA), *fourier transform infra-red* (FTIR), *scanning electron microscope* (SEM) dan porositas (Kusuma et al., 2021, Fuzil et al., 2023, Zahratunnisa et al., 2024). Hidrofobitas membran distilasi dapat diketahui menggunakan *water contact angle* (WCA), suatu membran dikatakan hidrofobik jika memiliki sudut kontak sebesar 90° atau lebih besar (Jeong and Kim, 2023, Kulkarni and Shaw, 2016). Kedua teknik ini bertujuan untuk mengetahui morfologi dan kinerja membran yang lebih baik dan sesuai untuk proses membran distilasi.

Secara keseluruhan, pemilihan dan modifikasi membran yang tepat merupakan kunci dalam teknologi membran distilasi untuk mencapai performa optimal. Membran harus memiliki sifat hidrofobik, porositas tinggi, dan stabilitas termal serta kimia yang baik. Struktur membran, baik simetris maupun asimetris, mempengaruhi efektivitas proses distilasi, di mana membran asimetris menawarkan keuntungan dalam hal selektivitas dan kekakuan. Metode modifikasi seperti penambahan aditif, pencampuran polimer, dan pelapisan permukaan sangat penting dalam meningkatkan kinerja membran. Kombinasi teknik karakterisasi membran membantu memastikan bahwa membran

yang dikembangkan memiliki sifat morfologi dan permeabilitas yang diinginkan, yang penting untuk keberhasilan aplikasi dalam proses distilasi.

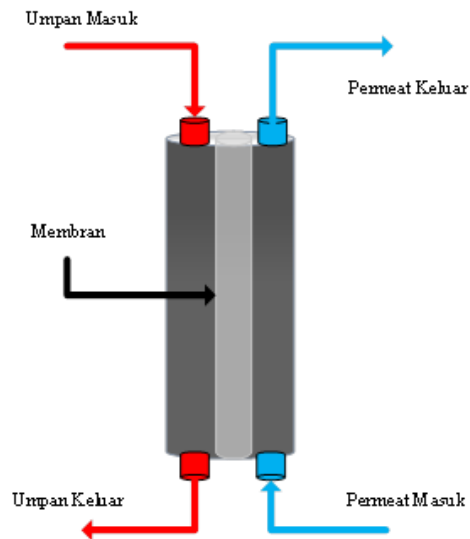
4.2 Jenis Membran dan Konfigurasi Modul Membran Distilasi

Untuk menetapkan kekuatan pendorong yang diperlukan, ada beberapa variasi Membran distilasi yang berbeda dapat digunakan dipertimbangkan. Perbedaan di antara keduanya hanyalah terletak pada sisi permeatnya (Essalhi and Khayet, 2015):

1. *Direct Contact Membran Distillation* (DCMD)

Direct Contact Membrane Distillation atau membran distilasi kontak langsung (DCMD) merupakan salah satu variasi dari membran distilasi, variasi membran distilasi ini memiliki cara kerja yaitu ketika larutan yang memiliki temperatur lebih dingin dari larutan umpan disirkulasikan secara tangensial ke sisi permeat membran. Perbedaan suhu yang ada pada membran akan menimbulkan perbedaan tekanan yang dibutuhkan oleh membran. Dimana dalam hal ini molekul-molekul yang memiliki titik didih yang lebih rendah atau mudah menguap akan menguap pada antarmuka cairan panas atau uap umpan yang kemudian akan melewati pori-pori membran pada fase uap dan kemudian dengan adanya perbedaan temperatur tersebut, uap panas yang ada pada antarmuka cairan akan mengembun pada antarmuka cairan dingin atau uap yang ada di dalam modul membran. Pada proses ini kita perlu memperhatikan beberapa hal, salah satunya adalah pencegahan pori-pori dari sisi permeat membran. Karena senyawa organik yang mudah menguap (VOC) memiliki tegangan permukaan yang rendah. Selama proses pengolahan pada membran ini, konsentrasi zat terlarut yang mudah menguap pada larutan air

permeat akan meningkat dan akan tinggi dibandingkan dengan larutan umpan. Oleh karena itu, kebasahan pori-pori akan lebih tinggi. Secara umum, DCMD digunakan untuk memproduksi air minum atau air suling dengan menggunakan larutan umpan yang membawa zat terlarut yang tidak mudah menguap, misalnya sebagai proses desalinasi. Berikut adalah gambar konfigurasi dari membran DCMD:

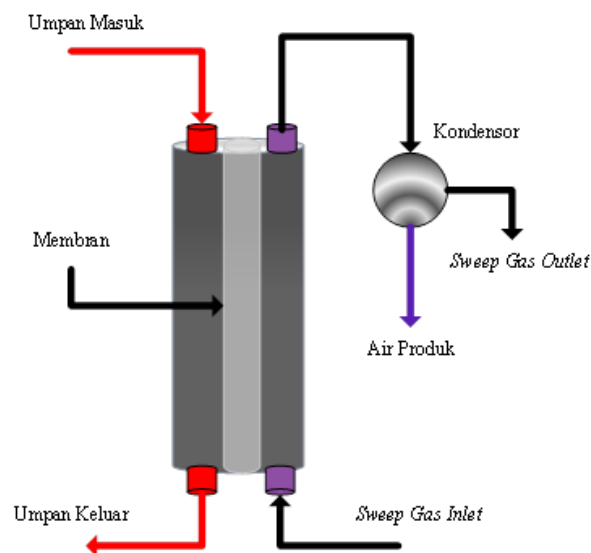


Gambar 4. 1 Konfigurasi *Direct Contact Membrane Distillation* (DCMD)

2. *Sweeping Gas Membrane Distillation* (SGMD)

Membran distilasi jenis ini menggunakan gas seperti udara atau nitrogen, dengan menyapu sisi bagian membran yang permeabel yang membawa molekul zat yang diuapkan ke luar modul membran untuk kondensasi. Jenis membran distilasi ini memiliki suhu gas dan tekanan hidrostatik yang dipertahankan di bawah larutan umpan, *Sweeping Gas Membrane Distillation* (SGMD) sebagian besar digunakan untuk menghasilkan air suling atau air minum, konsentrasi zat terlarut di sisi

membran umpan dan penghilangan serta konsentrasi VOC dalam larutan air. Jenis ini juga kadang-kadang disebut sebagai pengupasan gas membran atau pengupasan air membran (MAS) (Mahmud et al., 1998, Juang et al., 2005, Viladomat et al., 2006). Ketika membran padat dan selektif digunakan dalam modul membran alih-alih membran berpori dan hidrofobik, proses ini disebut pervaporasi gas menyapu (Calibo et al., 1987, Korngold and Korin, 1993). Berikut merupakan gambar konfigurasi dari SGMD:

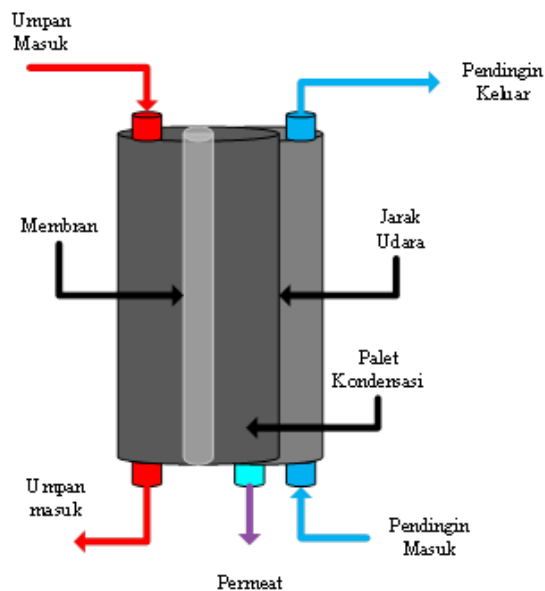


Gambar 4. 2 Konfigurasi *Sweeping Gas Membrane Distillation* (SGMD).

3. *Air Gap Membrane Distillation* (AGMD)

Dalam variasi membran distilasi ini, permukaan kondensasi dingin ditempatkan di dalam modul membran dan celah udara yang tergenang disisipkan di antara membran dan permukaan kondensasi untuk mengatasi masalah kehilangan panas melalui konduksi melalui membran, hal ini menyebabkan efisiensi termal yang relatif rendah dari membran distilasi. Penguapan molekul yang mudah menguap

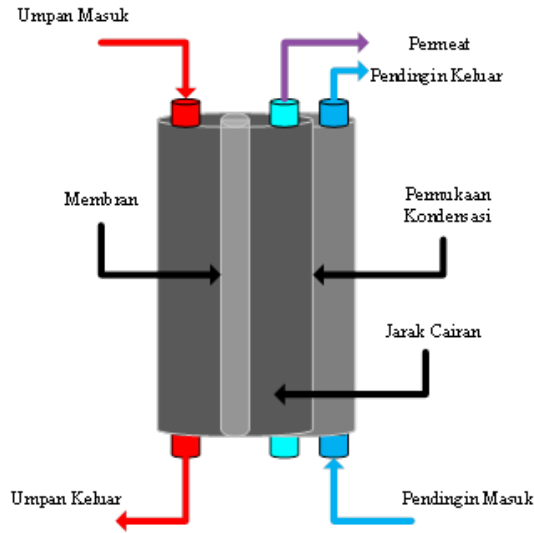
pertama-tama akan melintasi pori-pori membran dan ketebalan celah udara yang pada akhirnya akan mengembun di atas permukaan dingin di dalam modul membran. Keluarnya air permeat dari bagian bawah modul membran memanfaatkan gaya gravitasi, hal ini dikarenakan kondensasi dilakukan berulang kali pada permukaan membran yang dingin daripada langsung pada permukaan membran. Tipe ini dapat diaplikasikan di area dimana DCMD memiliki keterbatasan, seperti penghilangan VOC dari larutan. Selain itu, AGMD juga diterapkan untuk produksi air minum atau air suling serta konsentrasi zat terlarut yang tidak mudah menguap dalam larutan air umpan. Karena fluks permeat harus mengatasi penghalang udara antara membran dan permukaan kondensasi, fluks akan berkurang tergantung pada lebar celah udara yang efektif. Berikut ini merupakan gambar konfigurasi dari AGMD:



Gambar 4. 3 Konfigurasi Air Gap Membrane Distillation (AGMD)

4. *Liquid Gap Membrane Distillation (LGMD)*

Jenis ini merupakan gabungan dari konfigurasi DCMD dan AGMD. Dalam hal ini, celah udara antara membran dan permukaan dingin dijaga agar tetap terisi oleh larutan cairan dingin yang tergenang, sering kali air suling yang akan diproduksi. Ketika modul AGMD digunakan, ruang antara celah udara antara membran dan permukaan kondensasi diisi dengan air yang diproduksi. Pada tipe ini air permeat keluar dari bagian atas modul membran. Dimana konfigurasi ini juga dikenal sebagai distilasi membran celah permeat (PGMD). Seperti DCMD, LGMD juga umumnya diterapkan untuk produksi air dan konsentrasi zat terlarut yang tidak mudah menguap pada sisi umpan modul membran. Jika celah udara antara membran dan permukaan dingin diisi dengan bahan padat seperti penyangga berpori, pasir, atau bahan spons, proses ini disebut sebagai Distilasi Membran Celah Bahan (MGMD) meskipun konfigurasi baru yang diklaim ini adalah AGMD atau LGMD (Francis et al., 2013). Berikut ini merupakan gambar konfigurasi dari LGMD:

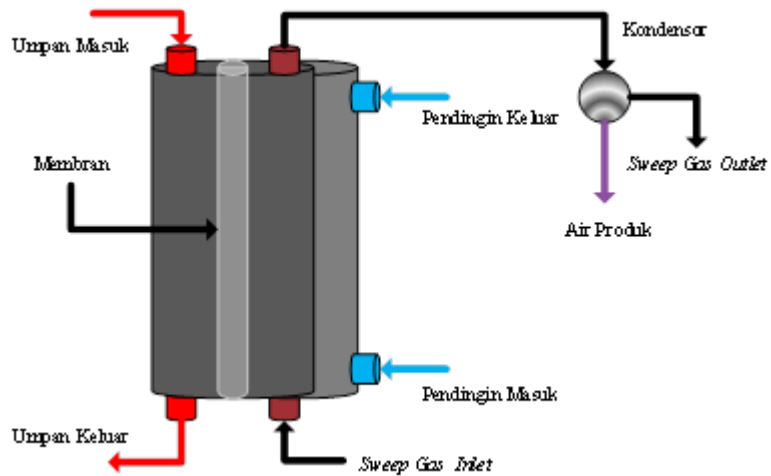


Gambar 4. 4 Konfigurasi *Liquid Gap Membrane Distillation* (LGMD)

5. *Thermostatic Sweeping Gas Membrane Distillation* (TSGMD)

Jenis distilasi membran ini menggabungkan SGMD dan AGMD untuk meminimalkan suhu gas sapan yang meningkat dengan cepat di sepanjang modul membran karena panas yang ditransfer dari sisi umpan melalui membran ke sisi permeat. Dalam SGMD, suhu gas, laju perpindahan panas, dan transportasi massa melalui membran akan berubah selama perkembangan gas di sepanjang modul membran. Kehadiran dinding dingin di sisi permeat mengurangi kenaikan suhu pada gas yang menyapu yang akan menghasilkan peningkatan tenaga penggerak dan laju produksi air sebagai konsekuensinya. Biasanya TSGMD juga dapat diterapkan pada produksi air suling atau air minum, konsentrasi zat terlarut yang tidak mudah menguap dalam larutan air

umpan dan juga konsentrasi VOC dalam larutan air. Berikut merupakan gambar konfigurasi dari TSGMD:

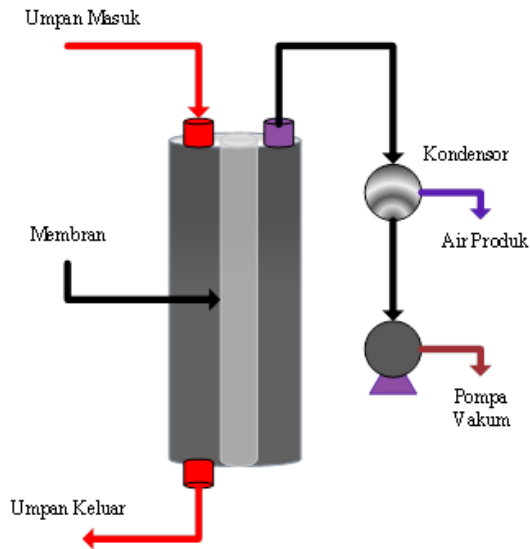


Gambar 4. 5 Konfigurasi *Thermostatic Sweeping Gas Membrane Distillation* (TSGMD)

6. *Vacuum Membrane Distillation* (VMD)

Jenis membran vakum atau tekanan rendah ini diterapkan pada sisi permeat modul membran dengan menggunakan pompa vakum. Tekanan hilir dipertahankan di bawah tekanan saturasi molekul yang mudah menguap untuk dipisahkan dari larutan air umpan. Kondensor eksternal diperlukan untuk mengumpulkan permeat. Pada skala laboratorium, perangkat dingin nitrogen cair sering digunakan ketika tekanan hilir yang sangat rendah diterapkan. VMD biasanya digunakan untuk pemisahan VOC dari air. Membran yang memiliki ukuran pori yang lebih kecil (yaitu kurang dari 0,45 mm) dibandingkan dengan varian Membran Distilasi lainnya digunakan asalkan dalam VMD risiko pembasahan pori sangat tinggi. Ketika membran yang padat dan selektif digunakan dalam modul membran daripada membran berpori dan hidrofobik, ini disebut pervaporasi (Khayet and Matsuura, 2004).

Berikut merupakan gambar konfigurasi VMD:



Gambar 4. 6 Konfigurasi *Vacuum Membrane Distillation* (VMD)

Adapun kelebihan dan kekurangan dari setiap konfigurasi metode membran distilasi dapat dilihat dari **Tabel 4.1**.

Tabel 4. 1 Kelebihan dan Kekurangan Setiap Jenis Konfigurasi Membran Distilasi

Jenis Membran Distilasi	Kelebihan	Kekurangan
-------------------------	-----------	------------

<p><i>Direct Contact Membrane Distillation (DCMD)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Kesederhanaan dan Efektivitas Biaya • Perpindahan Panas dan massa yang Efisien (Lokare et al., 2017) • Fluks lebih tinggi Ketika vakum diterapkan untuk meningkatkan transfer uap melalui membrane (Naidu et al., 2017) 	<ul style="list-style-type: none"> • Pengotor terutama dalam pengolahan air dengan salinitas tinggi mempengaruhi kinerja sistem DCMD(Lokare et al., 2017) • Penskalaan karena kristalisasi menurunkan kinerja membrane dari waktu ke waktu sehingga perlu dilakukan perawatan dan pembersihan secara teratur(Chen et al., 2014)
<p><i>Sweeping Gas Membrane Distillation (SGMD)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tidak diperlukan kondensor eksternal untuk pemulihan air(Mannella et al., 2011) • Kehilangan panas internal yang lebih rendah melalui konduksi dibandingkan DCMD(Shukla et al., 2018) • Fluks permeat yang lebih tinggi dibandingkan dengan Air Gap Membrane Distillation 	<ul style="list-style-type: none"> • Efisiensi SGMD dapat bervariasi berdasarkan parameter operasional dan kinerja proses yang disebabkan faktor-faktor seperti fenomena perpindahan massa dan perpindahan panas selama kondensiasi(Zhao et al., 2014) • Memerlukan pertimbangan tambahan untuk desain dan operasi sistem

<p>Jenis Membran Distilasi</p>	<p>Kelebihan</p>	<p>Kekurangan</p>
---------------------------------------	-------------------------	--------------------------

	<ul style="list-style-type: none"> • Memungkinkan penghilangan molekul uap oleh gas penyapu inert • Tingkat mineralisasi yang lebih rendah(Christie, 2023) 	<p>dibandingkan dengan konfigurasi lainnya</p>
<p><i>Air Membrane Distillation (AGMD)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Fleksibilitasnya yang dapat diterapkan pada berbagai aplikasi karena konfigurasinya yang unik (Lu and Liao, 2013) • Pengoperasiannya sederhana dan struktur yang ringkas (Zhang et al., 2019b) • Hemat Energi (Warsinger et al., 2014) • Meminimalkan kehilangan panas melalui konduksi dan polarisasi suhu (Attia et al., 2017) 	<ul style="list-style-type: none"> • Melibatkan celah udara tambahan antara membran dan permukaan kondensasi yang dapat menyebabkan penurunan efisiensi dibandingkan dengan DCMD • Hambatan transportasi pada celah udara dapat secara signifikan berdampak pada kinerja termal, sehingga mengarah pada penurunan laju produksi
<p><i>Liquid Membrane Distillation (AGMD)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Penghilangan makromolekul dan zat lain dengan kecepatan tinggi, suhu dan tekanan operasi yang lebih rendah (Isah et al., 2022) 	<ul style="list-style-type: none"> • Tegangan permukaan, struktur dan variable operasional sangat mempengaruhi laju distilasi dan efisiensi proses secara

Jenis Membran Distilasi	Kelebihan	Kekurangan
	<ul style="list-style-type: none"> • Potensi dalam meningkatkan laju produksi distilat dan meningkatkan efisiensi termal melalui penggunaan permukaan superhidrofobik untuk kondensasi (Warsinger et al., 2018) • Kehilangan panas yang rendah dan fluks permeat yang tinggi dibandingkan dengan metode-metode lainnya (He et al., 2011) 	<ul style="list-style-type: none"> keseluruhan (Karanikola et al., 2017) • Pengaruh tekanan hidrolik dapat menyebabkan penurunan kinerja (Park and Lee, 2019) • Pelarut mempengaruhi proses penyerapan gas membran (Dindore et al., 2004)
<p><i>Thermostatic Sweeping Gas Membrane Distillation</i> (TSGMD)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Efisiensi termal dan fluks permeat yang lebih tinggi dibandingkan dengan konfigurasi membran distilasi lainnya (Lu et al., 2018) • Laju mineralisasi yang rendah dan meningkatkan toleransi pembasahan membran (Christie, 2023) • Efisiensi pemisahan dan kinerja 	<ul style="list-style-type: none"> • Parameter operasional sangat penting dalam kinerja TSGMD yang dapat mempengaruhi efisiensi proses secara keseluruhan (Zhao et al., 2014) • Memerlukan peralatan tambahan seperti pelat dingin yang dapat meningkatkan biaya penyiapan awal

Jenis Membran Distilasi	Kelebihan	Kekurangan
	keseluruhan dalam proses seperti penghilangan logam berat dengan mencapai tingkat kemurnian yang lebih tinggi dalam distilat.	

*Vacuum
Membrane
Distillation
(VMD)*

- Suhu operasi yang rendah dan pengangkutan yang cepat (Jung et al., 2022)
- Fluks permease yang lebih tinggi dan peningkatan efisiensi termal dibandingkan dengan konfigurasi membrane distilasi lainnya (Lu et al., 2018)
- Konduksi panas rendah di sisi larutan umpan (Karanasiou et al., 2018)
- Mempertahankan volume terbatas dari peralatan membrane di bawah vakum sehingga meningkatkan efisiensinya (Bandini et al., 1997)
- Ketahanan pembasahan membrane dalam sistem sangat berpengaruh dalam efektivitasnya (Zhang et al., 2017)
- Pompa vakum ekstra dan perangkat kondensasi dapat menjadikan operasi VMD menjadi lebih rumit (Guan et al., 2014)
- Efek polarisasi suhu dalam membrane VMD dapat mengurangi kinerja operasi VMD (Alsaadi et al., 2014)

BAB V TEORI FUNDAMENTAL MEMBRAN DISTILASI

5.1 Model Perpindahan massa melalui MD

Perpindahan massa dalam membran distilasi (MD) terjadi karena perbedaan tekanan uap yang disebabkan oleh perbedaan suhu. Ketika umpan dipanaskan, ia mencapai kesetimbangan antara fase uap dan cair. Sifat hidrofobik membran mencegah perpindahan massa dalam fase cair, sehingga menciptakan lapisan antara fase cair dan uap di pori-pori membran. Uap dari umpan kemudian berdifusi secara konvektif melalui pori-pori membran, dan pada sisi permeat, uap tersebut mengembun menjadi cairan.

Perpindahan molekul uap melalui matriks membran dapat diabaikan karena luas difusi pada matriks membran jauh lebih kecil daripada difusi melalui pori-pori (Lawson & Lloyd, 1997). Selain itu, hal ini disebabkan karena membran hidrofobik memiliki afinitas yang sangat kecil antara air dan membran. Sehingga, difusi permukaan dapat diabaikan dalam MD, terutama untuk membran berpori (Khayet & Matsuura, 2011). Rata-rata panjang lintasan molekul melewati membran jauh lebih besar dibandingkan dengan diameter pori membran itu sendiri. Oleh karena itu, mekanisme perpindahan massa pada MD memiliki parameter kunci, yaitu bilangan Knudsen sebagai berikut:

$$Kn = \frac{\lambda}{d_p} \quad \dots 5.1$$

Di mana λ merupakan rata-rata panjang lintasan bebas yang dilalui uap dan d_p adalah diameter pori-pori membran. Untuk satu molekul, λ dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Lawson & Lloyd, 1997):

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{k_B T}{P_m \sigma_1} \quad \dots 5.2$$

Dimana σ_1 merupakan diameter tumbukan molekul dengan pori-pori membran, k_B adalah konstanta Boltzmann, P_m merupakan tekanan rata-rata di dalam pori membran, dan T adalah temperatur absolut. Untuk kasus air, diameter tumbukan molekulnya adalah 2,641 Å ($2,641 \times 10^{-10}$ m). Sehingga, persamaan menjadi (Khayet & Matsuura, 2011) :

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{k_B T}{P_m (2,641 \times 10^{-10})} \quad \dots 5.3$$

Untuk campuran biner (i dan j) dalam udara, $\lambda_{i,j}$ dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\lambda_{i,j} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_{i1}} + \frac{1}{\lambda_{j1}}} \quad \dots 5.4$$

Di mana σ_i dan σ_j adalah diameter tumbukan dan M_i dan M_j adalah berat molekul dari molekul i dan j.

Beberapa model yang cocok untuk memetakan perpindahan massa lebih lanjut pada MD ialah Knudsen Model, *Ordinary Molecular Diffusion Model*, *Viscous Flow Model*, kombinasi model aliran dan *Dusty Gas Model*.

a. Knudsen Model

Apabila $Kn > 1$ atau $d_p < \lambda_2$ (pori-pori membran lebih kecil daripada rata-rata lintasan molekul), kemungkinan tumbukan antara molekul – dinding pori lebih dominan daripada tumbukan antarmolekul. Dalam hal ini, maka akan muncul aliran Knudsen. Dengan demikian, permeabilitas membran dapat dihitung dengan persamaan berikut (Khayet, Velazquez, et. al. 2004):

$$B^W = \frac{1}{6} \frac{2\pi}{MRT} \frac{d_p^3}{\tau \delta} \quad \dots .5.5$$

Di mana M merupakan berat molekul yang melalui membran, R adalah konstanta gas dan δ adalah ketebalan membran.

Secara keseluruhan, ketika ukuran pori membran diasumsikan seragam, $d_{p,m}$ maka permeabilitas rata-rata membran dapat dijabarkan dengan persamaan:

$$B_{1W} = \frac{2}{3} \frac{\epsilon d^3}{\tau \delta} \frac{1}{MRT} \quad \dots .5.6$$

b. Ordinary Molecular Diffusion Model

Ketika $Kn < 0,01$ atau $d_p > 100 \lambda_2$, terdapat udara yang stagnan di dalam pori-pori membran. Hal ini berlaku bagi seluruh jenis MD, kecuali *Vacuum Membrane Distillation* (VMD). Kelarutan yang rendah dalam air menyebabkan udara terperangkap di dalam membran. Dengan demikian, model difusi molekul dapat merumuskan

perpindahan massa dan menghitung permeabilitas membran berpori (Khayet, Velazquez, et al 2004).

$$= \frac{\pi P D}{4RT p_B \tau \delta} \dots .5.7$$

Di mana D merupakan koefisien difusi, P merupakan tekanan total di dalam pori, sedangkan P_B adalah tekanan udara di dalam pori.

Untuk air dalam udara, perhitungan tekanan (PD, Pa m²/s) dapat menggunakan persamaan berikut (Phattaranawik, Jiraratananon, & Fane, 2003):

$$PD = 1,895 \times 10^{V6T} \dots .5.8$$

Permeabilitas dalam keseluruhan bagian membran dapat dirumuskan dengan persamaan berikut (Khayet & Matsuura, 2011):

$$B_1 = \frac{1}{RT \delta \tau} \frac{\epsilon PD}{Y_{=1}} \dots .5.9$$

Di mana Y₌₁ merupakan rata-rata logaritmik dari fraksi mol udara sebagai fungsi fraksi mol udara pada permukaan membran bagian umpan dan permeat, Y_{a,m,f} dan Y_{a,m,p}. Sehingga, Y₌₁ dapat dicari dengan persamaan:

$$Y_{=1} = \frac{Y_{B,1,<} - Y_{B,1,8}}{\ln(Y_{B,1,<}/Y_{B,1,8})} \dots .5.10$$

c. Viscous Flow Model

Ketika tekanan hidrostatis transmembran diberikan pada membran dengan ukuran pori yang lebih besar dari rata-rata lintasan

molekul melewati membran ($d_p > 100\lambda_2$), maka kemungkinan tumbukan antarmolekul lebih dominan daripada tumbukan antara molekul-pori membran. Dalam hal ini, perpindahan massa berlangsung berdasarkan aliran viskos (Poiseuille flow). Permeabilitas melalui satu pori didefinisikan dengan persamaan berikut (Lawson & Lloyd, 1997):

$$B_9 = \frac{\pi P_1}{2\eta RT} d_p^3 \tau \delta \quad \dots .5.11$$

Dimana η merupakan viskositas dari molekul yang dipindahkan dan P_1 merupakan rata-rata tekanan dalam pori. Kemudian untuk keseluruhan membran dengan ukuran pori yang diasumsikan seragam $d_{p,m}$, permeabilitas membran dapat didefinisikan dengan persamaan:

$$B_{19} = \frac{\varepsilon P_1}{2\eta RT} d_{p,m}^3 \tau \delta \quad \dots .5.12$$

d. Kombinasi Model Aliran

Perpindahan massa melalui pori membran disebabkan oleh lebih dari satu mekanisme dan kombinasi model aliran berdasarkan konfigurasi MD, jenis membran dan kondisi operasi MD. Ketika terdapat udara dalam pori membran, tidak ada tekanan hidrostatik transmembran yang berlaku. Misalnya pada konfigurasi *Direct Contact Membrane Distillation* (DCMD), bilangan Knudsen memiliki rentang $0,01 < Kn < 1$ ($\lambda_2 < d_8 < 100 \lambda_2$). Model yang sesuai untuk konfigurasi ini adalah kombinasi Knudsen Model dan *Ordinary Molecular Diffusion Model*. Hal ini disebabkan karena pada kasus

DCMD, kedua model tersebut memiliki perannya masing-masing dalam perpindahan massa melalui pori membran. Permeabilitas membran dengan model kombinasi Knudsen/*Ordinary diffusion* melalui satu pori dapat didefinisikan dengan persamaan berikut (Khayet, Velazquez, et al., 2004):

$$w-x = \frac{0B1w + \overline{B-1x1v}}{B} \quad \dots .5.13$$

$$= \frac{\dots}{\dots} V = \dots V =$$

$$Bw-x = 0B1w + \overline{B-1x1v} = \frac{RT\pi \epsilon \delta 1}{ef0} \frac{9\pi 4RTM \& \$g}{1 d8} + \frac{01-PD-d8\&1v=h}{4 pB}$$

Dengan mengasumsikan diameter yang seragam pada setiap pori-pori membran ($d_{8,1}$), permeabilitas dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$w-x = \frac{0 1w + B1-1x1v}{B1} \quad \dots .5.14$$

$$= \frac{\dots}{\dots} \frac{\dots}{\dots} = i \quad \dots \quad (Z,-)\% + 8*3j$$

Ketika terdapat tekanan hidrostatik transmembran, tidak ada lagi udara yang terjebak dalam pori-pori membran. Misalnya, pada konfigurasi VMD, dan bilangan Knudsen berkisar antara 0,01-1, ordinary molecular diffusion model dapat diabaikan dengan mempertimbangkan kedua tumbukan molekul–dinding membran dan

tumbukan antarmolekul. Dengan ini, pori membran berpengaruh terhadap perpindahan massa total dengan mekanisme Knudsen/Viscous. Permeabilitas satu pori membran dideskripsikan dengan persamaan berikut:

$$P_{1jv} = \frac{(H_{i+} - H_{i-})v_{i+}}{i(Z_{i+})_{\%} d_{i+} + \dots} \quad \dots .5.15$$

Permeabilitas membran dengan pori seragam dapat dideskripsikan dengan persamaan berikut:

$$B_{1w9} = \frac{(H_{i+} - H_{i-})v_{i+}}{i(Z_{i+})_{\%} + \dots} \quad jv = \dots .5.16$$

Untuk menghitung fluks permeat, misalnya molekul i , dan fluks permeatnya dalam MD adalah J_i . Nilai fluks bergantung pada karakteristik membran dan *driving force* yang berlaku. Nilai fluks dapat didefinisikan sebagai berikut (Khayet & Matsuura, 2011): $J_i = B_{1i} \Delta p_i = B_{1i} (p_{i+} - p_{i-})$

$$= B_{1i} (p_{i+} - p_{i-}) \quad \dots .5.17$$

Di mana a_i , γ_i dan x_i merupakan aktivitas, koefisien aktivitas dan fraksi mol dari molekul i secara berturut-turut. p_i adalah tekanan uap parsial dari molekul i yang didefinisikan dengan persamaan:

$$p_i(x, T) = p_i^s(T) a_i(x) \quad \dots .5.18$$

Di mana p_i^s merupakan tekanan uap murni (dalam Pa) dari molekul i , yang didapatkan dari persamaan Antoine:

$$\ln p_i^s(T) = \frac{A - B}{C + T} \quad \dots .5.19$$

Bergantung pada konfigurasi membran, persamaan 1.16 dapat disederhanakan. Misalnya untuk konfigurasi DCMD, di mana akuades umumnya tersirkulasi pada sisi permeat, dan fluks permeat dapat didefinisikan dengan persamaan (Essalhi & Khayet, 2013):

$$J_w = B_w (p_{i,1} - p_{i,2}) \quad \dots .5.20$$

Di mana J_w merupakan fluks air.

Mengingat MD seringkali digunakan pada proses desalinasi, untuk larutan NaCl cair, hubungan antara koefisien aktivitas air, γ_w , dan fraksi mol natrium klorida, x_{NaCl} adalah sebagai berikut (Khayet & Matsuura, 2011):

$$\gamma_w = 1 - 0,5x_{NaCl} - 10x_{NaCl}^2 \quad \dots .5.21$$

Berdasarkan persamaan tersebut, semakin besar konsentrasi garam dalam air umpan, maka fluks permeat MD akan semakin berkurang. Hal ini disebabkan karena tekanan uap air umpan pada permukaan membran menyebabkan penurunan *driving force*.

e. Dusty Gas Model

Dusty Gas Model (DGM) merupakan model yang lengkap untuk seluruh konfigurasi MD. Model ini dapat diterapkan untuk berbagai campuran, baik gas dan uap melalui padatan berpori. Dalam hal ini, pori-pori membran diumpamakan sebagai molekul gas berukuran besar yang stasioner. DGM mengombinasikan semua model perpindahan massa melalui membran, yaitu Knudsen Model, *Ordinary Molecular Diffusion*, *Viscous Flow* dan difusi permukaan. Dengan demikian, persamaan menjadi (Khayet, 2011; Khayet & Matsuura, 2011; Lawson & Lloyd, 1996a, 1996b, 1997; Mason & Malinauskas, 1983):

$$\frac{J_x}{D_{i,j}^*} + n \frac{J_x}{D_{i,j}^*} = -RT \nabla p \quad \dots .5.22$$

$$D_{i,j}^* = \frac{D_{i,j} \lambda}{\lambda + D_{i,j}} \quad \& \quad J_x = -\frac{p_i}{RT} \nabla p$$

$$J_x = \frac{\epsilon d}{\tau} \frac{p}{RT} \quad \dots .5.23$$

$$D_w = \frac{\epsilon d}{3\tau} \frac{RT}{\pi M} \quad \dots .5.24$$

$$J_i = \frac{\varepsilon P D_i^5}{D_{SF} \tau} \quad \dots .5.25$$

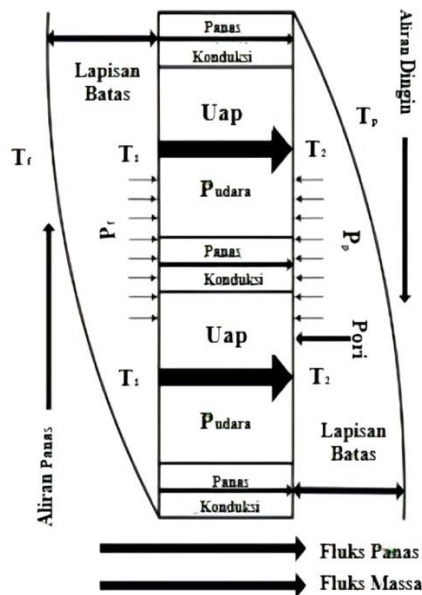
$$J_i = J_i^X + J_i^9 \quad \dots .5.26$$

Di mana J^X adalah fluks difusifitas, J^9 adalah fluks viskos, D^W merupakan koefisien difusifitas Knudsen, D^5 merupakan koefisien difusi molekuler ordiner, P adalah tekanan total, p adalah tekanan parsial, η merupakan viskositas campuran gas, ε merupakan porositas membran, M merupakan berat molekul, τ adalah liku pori dan subskrip e , i dan j merujuk pada koefisien difusi efektif dan molekul i dan j .

5.2 Model Perpindahan panas pada MD

Membran distilasi adalah suatu membran dengan menggunakan proses non-isotermal (Prawira, 2017). Dalam proses MD, perpindahan panas dan massa dari sisi panas ke sisi dingin digabungkan dalam arah yang sama. Gambar 5.1 mengilustrasikan proses ini dalam konfigurasi MD yang khas, DCMD. Suhu saluran masuk T_f turun melewati lapisan batas pada sisi saluran masuk ke T_1 pada permukaan membran. Sebagian air menguap dan diangkut melalui membran. Pada saat yang sama, panas dialirkan melalui membran ke sisi dingin (mengalir). Ketika uap air mengembun di aliran air dingin dan menyerap panas dari sisi umpan, suhu T_p aliran dingin meningkat melintasi lapisan batas permeal menjadi T_2 pada permukaan membran sisi dingin. Oleh karena itu, gaya penggeraknya adalah selisih tekanan uap antara T_1 dan T_2 , yang lebih kecil dari selisih

tekanan uap antara T_f dan T_p . Fenomena ini disebut polarisasi suhu (Camacho et al., 2013a).



Gambar 5. 1 Perpindahan Panas dan Perpindahan Massa pada Membran DCMD

Perpindahan panas dari sisi umpan ke sisi permeat terjadi melalui dua tahap: Pertama, perpindahan panas terjadi melalui membran dari sisi panas ke sisi dingin sebagai panas sensibel dan panas laten sehingga akan terjadi perbedaan suhu antar membran. Lapisan batas dan aliran massa. Kedua, perpindahan panas dari aliran massa umpan ke lapisan batas secara konveksi termal karena perbedaan suhu yang terjadi pada langkah pertama. Pada langkah pertama, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.1, panas masuk akan dialirkan melalui membran ke sisi dingin, dan panas laten dibawa oleh uap air yang menguap pada antarmuka antara aliran panas dan pori-pori membran.

Dalam proses membran distilasi, perpindahan panas disebabkan oleh panas laten serta fluks uap yang dihasilkan (Q_v) serta perpindahan panas secara konduksi mengikuti hukum Fourier's (Q_c) yang melewati matriks membran dan pori-pori membran tersebut terisi oleh gas. Hukum Fourier's pada membran distilasi adalah sebagai berikut (Alkhudhiri et al., 2012a):

$$Q_m = Q_v + Q_c \quad \dots(5.27)$$

Membran distilasi, Q_c mengalami kehilangan panas melalui konduksi termal, dimana efisiensi energi dan laju produksi air pada membran akan berkurang. Ketika hanya terjadi penguapan air pada membran distilasi, maka perpindahan panas yang terjadi dalam keadaan konstan dapat dituliskan pada persamaan berikut (Khayet, 2011a):

$$Q_m = J_w \Delta H_v + \frac{k_m}{\delta} (T_{m,f} - T_{m,p}) \quad \dots(5.28)$$

Dimana J_w adalah fluks permeat air; k_m adalah konduktivitas termal membran; δ adalah ketebalan membran; ΔH_v adalah panas penguapan dari air; $T_{m,f}$ adalah suhu dari larutan cairan umpan pada permukaan membran; dan $T_{m,p}$ adalah suhu permeat pada permukaan membran. Saat kondisi konstan, nilai fluks panas harus dalam keadaan sama yang tuliskan pada persamaan 5.29 berikut:

$$Q_m = h_f (T_{b,f} - T_{m,f}) = h_p (T_{m,p} - T_{b,p}) \quad \dots(5.29)$$

Dimana subskrip b mengacu pada fluida dalam jumlah besar dan h_f serta h_p adalah koefisien perpindahan panas pada lapisan batas umpan dan permeat yang berbatasan dengan permukaan membran, masing-masing. Koefisien h_f dan h_p dihitung dari persamaan semi empiris bilangan tak berdimensi (bilangan Nusselt, Nu ; bilangan Reynolds, Re ; dan bilangan Prandtl, Pr). Persamaannya dapat dituliskan sebagai berikut (Gryta and Tomaszewska, 1998, Gryta et al., 1997, Khayet, 2011a):

$$Nu = \alpha Re^b Pr^c \quad \dots(5.30)$$

Dimana α , b , c , dan d adalah konstanta karakteristik aliran cairan dari saluran modul membran.

Konduktivitas termal membran distilasi memainkan peran penting dalam efisiensi proses. Seperti penelitian yang dilakukan Xiang et al. (2023) hal yang harus diperhatikan untuk konduktivitas termal membran diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Model Efisiensi Termal

Model berdasarkan efisiensi termal dikembangkan untuk menentukan konduktivitas termal membran distilasi. Model tersebut tidak memerlukan informasi tentang ketebalan membran, porositas, atau faktor lainnya dan menunjukkan akurasi yang tinggi dalam memprediksi laju aliran membran.

2. Penggunaan Material Komposit

Penggunaan material-material komposit seperti PVDF dengan penambahan silikon aerogel (SiAG) dapat mengurangi konduktivitas termal secara signifikan.

3. Stabilitas Termal

Penambahan bahan seperti SiAG tidak hanya mengurangi konduktivitas termal tetapi juga meningkatkan stabilitas termal membran, sehingga memungkinkan penggunaan pada suhu tinggi tanpa degradasi yang signifikan.

4. Struktur dan Porositas Membran

Penambahan partikel SiAG pada PVDF mengubah struktur pori dan porositas membran. Pada konsentrasi optimal, interkoneksi pori meningkat, namun terlalu banyak SiAG dapat menurunkan porositas dan diameter pori rata-rata.

Membran distilasi dalam literatur memiliki dua model yang digunakan untuk menentukan konduktivitas termal membran. Model tersebut adalah isostrain dan isostress. Model isostrain yaitu resistansi dalam model paralel (persamaan 5.31) sedangkan model isostress merupakan resistansi dalam model seri (persamaan 5.32) (Khayet, 2011a, Phattaranawik et al., 2003):

$$k_m = \epsilon k_g + (1-\epsilon)k_s \quad \dots(5.31)$$

$$k_m = \left(\frac{2}{a} + \frac{V}{J} \right) \quad \dots(5.32)$$

Dimana k_g adalah konduktivitas termal dari fraksi volume rongga yang berisi gas pada membran dan k_s adalah konduktivitas termal dari matriks padat pada membran.

Koefisien perpindahan panas keseluruhan pada proses membran distilasi dapat dituliskan pada persamaan berikut (Essalhi and Khayet, 2013, Khayet, 2011a, Lawson and Lloyd, 1997):

$$v =$$

$$H = \frac{c + b \bar{d}}{e} = q_{e=1} + \frac{5 \bar{N}}{3 \cdot 12 \cdot 3} = 78 \Delta \cdot \bar{N} \quad e = ! \Gamma$$

...(5.33)

Dalam VMD, resistensi lapisan batas pada sisi permeat dan panas yang diangkut dengan konduksi melalui membran sering diabaikan. Hal ini dikarenakan oleh penerapan vakum pada sisi permeat membran (Khayet, 2011a, Lawson and Lloyd, 1997, Mengual et al., 2004).

Efisiensi termal (EE) dari modul MD didefinisikan sebagai rasio panas penguapan yang berkaitan dengan transpor massa melalui pori-pori membran, Q_v , terhadap total fluks panas yang ditransfer melalui membran, Q_m . Persamaan efisiensi termal (EE) dapat dituliskan melalui persamaan berikut (Essalhi and Khayet, 2013, Khayet, 2011a):

$$EE = \frac{b \cdot 100}{g \cdot c + 0,12 \cdot 30 \cdot d} = \frac{f \cdot 8 \Delta \cdot \bar{N}}{100}$$

...(5.34)

Dalam MD, efisiensi termal harus setinggi mungkin atau sama dan juga Q_c harus serendah mungkin. Secara umum nilai efisiensi termal (EE) dalam sistem MD ketika arus berlawanan berada pada kisaran 60-70% (Khayet, 2011a). Namun dengan menggunakan membran nanofiber elektro diperoleh nilai efisiensi termal (EE) yang lebih tinggi yaitu 78,8-94,3% dengan nilai Q_c kurang dari 20% (Essalhi and Khayet, 2013).

Perpindahan panas dalam membran distilasi dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor pentingnya adalah suhu lingkungan dan jumlah energi matahari yang diserap peralatan destilasi (Puja and Sambada,

2022). Selain itu, faktor lain yang mempengaruhi perpindahan panas antara lain media kerja sebagai media perpindahan panas dan sumbu sebagai media fluida cair yang bersirkulasi sesuai prinsip efektif kerja kapiler (Tamba et al., 2019). Penelitian juga menunjukkan bahwa perpindahan panas dalam membran distilasi terjadi melalui mekanisme perpindahan panas laten yang mencakup aliran uap melalui membran dan perpindahan panas konduktif melalui matriks membran (Mengual et al., 2004). Selain faktor-faktor tersebut, penelitian ini juga menyoroti pentingnya desain modul membran dalam mempengaruhi perpindahan panas. Misalnya, penelitian telah menunjukkan bahwa perpindahan panas dan tekanan parsial uap menurun seiring dengan bertambahnya jumlah tahapan atau panjang modul karena penurunan koefisien perpindahan panas konvektif dan peningkatan kehilangan konduksi sepanjang saluran (Lee et al., 2017). Selain itu, beberapa penelitian lain menunjukkan bahwa efisiensi distilasi dapat dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti kelembaban gas buang, dan efisiensi distilasi menurun seiring dengan meningkatnya bilangan Reynolds sisi udara dan suhu saluran masuk udara (Zeng et al., 2022).

BAB VI APLIKASI MEMBRAN DISTILASI

6.1 Desalinasi Air Payau dan Air Laut

Indonesia merupakan negara kepulauan dengan jumlah tidak kurang dari 17.000 pulau. Sehingga terdapat berbagai risiko yang berhubungan dengan kesehatan masyarakat pesisir dan pulau kecil seperti ketersediaan air bersih dalam jumlah yang cukup dan kualitas baik, limbah cair dan padat, sanitasi dasar, keterbatasan bahan pangan serta perubahan iklim dan cuaca yang tidak menentu. Oleh karena itu, diperlukan terobosan dan inovasi kebijakan menggunakan pendekatan ekosistem untuk menghadapi permasalahan di wilayah ekosistem pesisir dan pulau-pulau kecil.

Permasalahan tersebut dapat dikelompokkan sebagai berikut (Susilawaty et al., 2016):

1. Perubahan iklim dunia (*global climate change*)
2. Ekosistem-ekosistem yang rapuh (*fragile ecosystems*)
3. Erosi tanah, degradasi kualitas lahan karena pencemaran
4. Terbatasnya sumberdaya air tawar
5. Limbah yang tidak diolah dan langsung dibuang ke lingkungan
6. Permasalahan kritis pada kesehatan masyarakat

Kondisi ini dapat terjadi di segala wilayah, baik itu perkotaan, pedesaan, maupun di wilayah pesisir pantai dan pulau-pulau ditengah lautan lepas. Terutama di wilayah pesisir

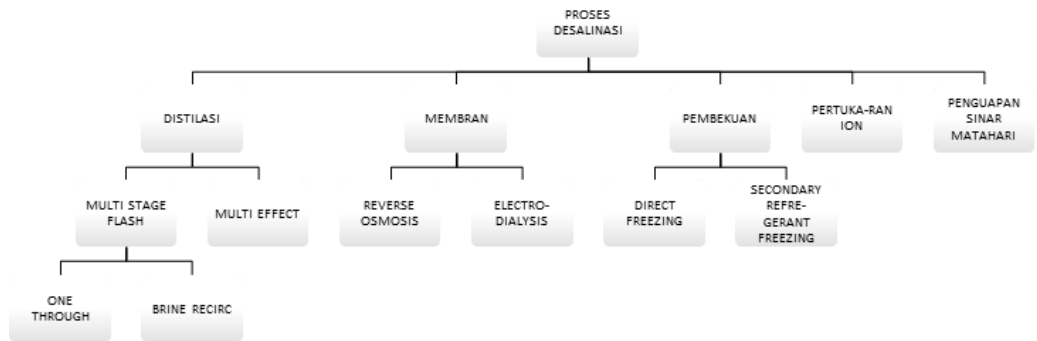
dan pulau-pulau ditengah lautan lepas, sumber daya air yang terdapat di daerah ini umumnya berkualitas buruk, misalnya air tanahnya yang asin (Harling, 2020). Sedangkan daerah yang berlokasi khususnya muara, banyak dijumpai kondisi air payau. Air payau atau air asin adalah larutan yang mengandung beberapa jenis zat terlarut seperti garam-garam, yang jumlahnya rata-rata 3 sampai 4,5% (Said, 2010).

Air laut mengandung kadar garam atau *Total Dissolved Solid* (TDS) sangat tinggi sehingga diperlukan pengolahan lebih lanjut agar dapat dimanfaatkan sebagai air bersih, bahkan nantinya dapat dimanfaatkan sebagai air minum. Air yang mengandung mineral tinggi (TDS tinggi) tidak baik untuk dikonsumsi, karena akan melebihi kebutuhan mineral yang diperlukan oleh tubuh. Air laut memiliki TDS lebih dari 3000 ppm sehingga tidak dapat dikonsumsi langsung oleh tubuh. Menurut standar WHO, air minum dapat dikonsumsi apabila memiliki kadar TDS kurang dari 100 ppm (Krisdiarto et al., 2020). Begitu pula dengan air payau, walaupun kandungan garam yang dimiliki oleh air payau lebih sedikit dari air laut, namun air payau juga kurang layak untuk dikonsumsi.

Pada kondisi semacam ini, sangat diperlukan instalasi pengolahan air (IPA) untuk mengolah air payau maupun air laut menjadi air tawar. Alternatif yang paling efektif yaitu pembangunan unit instalasi pengolahan air yang sesuai dengan kondisi air baku. Beberapa instalasi pengolahan air dapat dilakukan, contohnya seperti proses oksidasi, filtrasi, serta desalinasi.

Menurut Abid et al. (2023), terdapat dua fundamental mendasar terkait teknologi desalinasi air, yaitu pendekatan termal dan pendekatan membran. Pada proses desalinasi termal, air dari laut diuapkan menggunakan energi panas, lalu menghasilkan hanya air murni setelah proses kondensasi. Di Timur Tengah, proses desalinasi termal banyak digunakan karena lebih banyak menghasilkan air bersih, namun desalinasi termal juga memiliki kekurangan yaitu memerlukan energi yang besar untuk melakukan prosesnya, sehingga biaya operasional yang dikeluarkan pun tinggi. Sedangkan desalinasi dengan membran lebih hemat biaya operasional karena hanya sedikit energi yang digunakan. Beberapa teknologi membran yang telah diterapkan pada proses desalinasi air dari waktu ke waktu yaitu *Reverse osmosis (RO)*, *nanofiltration (NF)*, *multiple-effect distillation (MED)*, *mechanical vapor compression (MVC)*, dan *membrane distillation (MD)*.

Menurut Said (2010), proses desalinasi dengan cara distilasi adalah pemisahan air tawar dengan cara merubah fase air. Sedangkan pada proses dengan membran yakni pemisahan air tawar dari air laut dengan cara pemberian tekanan dan dengan cara elektrodialisa. Disamping alat desalinasi itu sendiri, perlengkapan lainnya yang umum pada proses desalinasi adalah sistem intake air laut termasuk pompa intake, saringan kasar dan saringan halus, perpipaan air laut, perpipaan air hasil proses (air tawar) dan tangka penampungan, peralatan energi (listrik) dan sistem distribusi dan lain sebagainya. Berikut beberapa jenis teknologi proses desalinasi air laut.



Gambar 6. 1 Klasifikasi Proses Desalinasi Air Laut (Said, 2010)

Desalinasi air laut menyediakan tambahan air tawar untuk meringankan krisis air yang disebabkan oleh pertumbuhan penduduk yang pesat, industrialisasi, dan kontaminasi sumber daya air tawar yang tersedia. Dalam beberapa tahun terakhir, *Reverse osmosis* (RO) telah digunakan sebagai teknologi paling hemat energi untuk desalinasi air laut yang menyebabkan teknologi ini menjadi berkembang pesat di seluruh dunia. Namun RO tidak mampu mengolah air hypersaline yang memiliki salinitas lebih dari 70 g/L, karena tekanan osmotik yang berlebihan sehingga perlu diatasi. Sejumlah besar air laut pekat dengan salinitas tinggi (kira-kira dua kali lipat air laut) dibuang dari proses RO konvensional. Jika air laut yang pekat dibuang langsung ke lingkungan perairan, maka akan berdampak buruk bagi biota laut di dekat saluran keluar pembuangan. Di sisi lain, perlu disebutkan bahwa desalinasi lebih lanjut dari air laut yang terkonsentrasi ini merupakan sebuah tantangan. Dalam skenario seperti itu, membrane distillation (MD), yang memiliki

keuntungan menggunakan limbah panas untuk mengolah uap air hypersaline yang menantang, dapat menjadi kandidat yang cocok untuk lebih mengonsentrasikan air laut pekat ke zero liquid debit (ZLD) (Zhong et al., 2021).

Proses MD kompetitif untuk desalinasi air payau dan air laut. Ini juga merupakan proses yang efektif untuk menghilangkan logam organik dan berat dari larutan air, dan dari air limbah. MD juga telah digunakan untuk mengolah limbah radioaktif, sehingga produknya dapat dibuang dengan aman ke lingkungan. Namun, MD juga memiliki beberapa kelemahan seperti fluks permeat yang rendah (dibandingkan dengan proses pemisahan lainnya, seperti RO), kerentanan fluks permeat yang tinggi terhadap konsentrasi, dan suhu kondisi umpan karena fenomena polarisasi konsentrasi dan suhu. Selain itu, udara yang terperangkap di dalam membrane menimbulkan resistensi perpindahan massa lebih lanjut, yang juga membatasi fluks permeat MD. Selain itu, panas yang hilang secara konduksi cukup besar dan tidak ada membran yang sesuai untuk MD juga (Alkhudhiri and Hilal, 2018a).

6.2 Pengolahan *Brine Water*

Air *brine*, atau juga disebut air payau, adalah air dengan kadar garam lebih tinggi dibandingkan air tawar tetapi lebih rendah daripada air laut. Air *brine* sering ditemukan di lingkungan alami, seperti laut mati, danau garam, serta dalam proses industri seperti produksi minyak dan gas, desalinasi, dan pengolahan makanan sehingga menghasilkan lingkungan

dengan tingkat salinitas yang berbeda. Komposisi air *brine* dalam konteks industri sangat bervariasi tergantung pada sumbernya. Karena karakteristik kimianya yang unik, air payau sering digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti akuakultur dan desalinasi. Studi yang dilakukan oleh (Hammer Jr ., 2020). Air payau mengandung 0,5–30 gram garam per liter, membuatnya lebih asin daripada air tawar tetapi tidak seasin air laut. Penelitian juga menemukan bahwa air payau tidak seasin air laut menunjukkan bahwa pengolahan air payau memerlukan teknik khusus, seperti oksidasi elektrokimia, untuk mengatasi masalah kontaminasi dan meningkatkan kualitas air (J. Hammer, 2020). Dalam konteks industri, komposisi *brine* water bisa sangat bervariasi tergantung pada sumbernya dan proses yang terlibat, tetapi umumnya mencakup natrium (Na^+), klorida (Cl^-), kalsium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), dan sulfat (SO_4^{2-}) sebagai ion-ion utama (Hernández et al., 2020). Di era modern, pengelolaan air *brine* water semakin penting. Pengembangan teknologi untuk mengolah air dengan konsentrasi garam tinggi menjadi semakin penting seiring dengan meningkatnya permintaan akan sumber daya air yang bersih dan terbatas. Industri minyak dan gas menghadapi masalah besar dengan air *brine* water karena air produksi yang kaya akan garam harus diproses dengan hati-hati sebelum dapat digunakan kembali atau dibuang dengan aman.

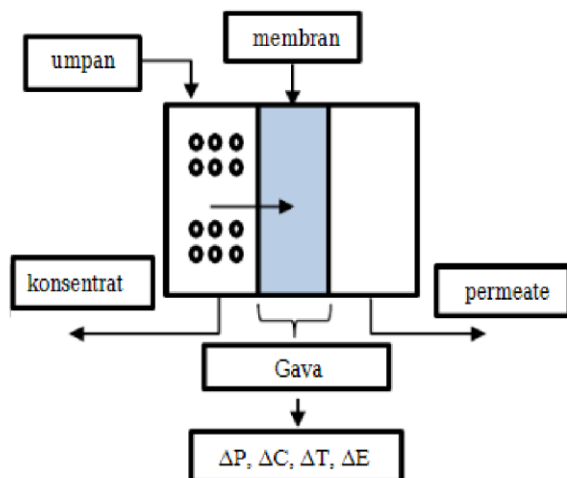
Pengolahan air *brine* merupakan proses yang bertujuan untuk menghilangkan kadar garam yang tinggi dari air, membuatnya aman untuk digunakan untuk berbagai tujuan. Berikut adalah beberapa

teknik umum yang digunakan untuk mengolah air *brine* (Jairo et al., 2021) :

1. Distilasi, merupakan metode yang menguapkan air *brine* dengan meninggalkan garam dan mineral di dalam tangki. Uap air kemudian menjadi air bersih. Meskipun membutuhkan banyak tenaga kerja, proses destilasi menghasilkan air bersih yang murni dari air *brine*.
2. Osmosis Terbalik, adalah salah satu teknik yang paling umum digunakan saat ini. Dalam proses ini, tekanan diterapkan pada air *brine* melalui membran semipermeabel, memungkinkan air bersih melewati sementara garam dan mineral tetap terperangkap. Ini memecah konsentrat garam dan menghasilkan air bersih yang dapat digunakan.
3. Evaporasi: Saat air *brine* dipanaskan dalam tangki terbuka atau sistem tertutup, air menguap, meninggalkan garam dan mineral sebagai endapan. Air uap kemudian dikondensasi kembali menjadi air bersih. Industri pengolahan air laut menjadi air tawar sering menggunakan metode ini.
4. *Ion Exchange* (Pertukaran Ion): Dalam metode ini, resin digunakan untuk mengeluarkan ion garam dari larutan *brine*. Air *brine* mengalir melalui kolom yang diisi dengan resin, dan ion garam ditukar dengan ion yang lebih ramah lingkungan, seperti ion natrium atau kalium. Tidak seperti sebelumnya, air yang keluar dari sistem ini lebih murni.

5. *Freezing*: Ini adalah teknik di mana pembekuan air *brine* terjadi, menyebabkan air membeku dan meninggalkan garam dan mineral terkonsentrasi di sekitar es. Es kemudian meleleh, meninggalkan air bersih di belakangnya. Tergantung pada kebutuhan dan kondisi lingkungan tertentu, setiap metode memiliki kelebihan dan kelemahan tertentu. Faktor-faktor seperti harga, pasokan energi, kualitas air yang diinginkan, dan dampak lingkungan seringkali menentukan metode terbaik.

Teknologi membran, seperti Membran Distilasi (MD), telah digunakan secara luas untuk mengatasi masalah air krisis melalui proses desalinasi air. Proses MD memisahkan air dari larutan garam melalui proses distilasi, di mana air menguap melalui membran semi-permeabel. Konsentrasi garam yang lebih rendah dalam air asin adalah masalah yang signifikan bagi industri dan pemenuhan kebutuhan air bersih di seluruh dunia. Untuk mempelajari berbagai aspek teoritis, teknis, dan aplikasi praktis teknologi membran, sejumlah penelitian dan ulasan telah dilakukan. Penelitian ini memberikan gambaran mendalam tentang prinsip kerja, pengembangan model matematis, dan



masalah skala dan *fouling* yang terkait dengan teknologi membran dalam konteks desalinasi air.

Gambar 6. 2 Membran Distilasi (Febriani, 2015)

Membran distilasi dapat menghasilkan air bersih dari berbagai sumber air, seperti air laut, air payau, dan *brine*. Namun, perlu dipahami bahwa banyak faktor yang kompleks memengaruhi kinerja distilasi membran untuk mencapai proses yang paling efisien (Smith, 2019).

Salah satu faktor yang memiliki dampak besar adalah komposisi *brine*. Komposisi *brine* adalah salah satu komponen yang sangat penting. Sumber air yang penuh dengan garam dan mineral, *brine* memiliki karakteristik yang berbeda yang bervariasi tergantung pada sumbernya dan proses pengolahan yang dialaminya. Tekanan osmotik, yang dipengaruhi oleh komposisi garam dan konsentrasi ion tertentu dalam *brine*, dapat memengaruhi laju perpindahan massa melalui membran. pH *brine* dan keberadaan senyawa organik juga dapat

memengaruhi fungsi membran. Oleh karena itu, penting untuk memahami secara menyeluruh komposisi *brine* dan bagaimana hal itu mempengaruhi proses distilasi membran (Johnson, 2019).

Selain komposisi *brine*, karakteristik membran juga merupakan faktor penting dalam menentukan kinerja distilasi membran (Lee, 2019). Kemampuan membran untuk memisahkan air dari *brine* dipengaruhi oleh tiga karakteristik: ketebalan membran, porositas, dan selektivitas. Ketebalan yang ideal meningkatkan kekuatan membran dan mengurangi resistansi massa, sementara porositas yang sesuai memungkinkan uap air memasuki tanpa mengurangi kemampuan pemisahan. Membran selektif terhadap air dan garam juga sangat penting untuk menjaga kualitas air bersih yang dihasilkan. Oleh karena itu, pemilihan membran dengan karakteristik yang tepat sangat penting untuk mencapai tingkat efisiensi proses yang optimal. Parameter operasional sistem distilasi membran juga sangat penting. Ada beberapa parameter yang dapat diubah untuk mempengaruhi kinerja proses, termasuk suhu operasi, tekanan, laju aliran *brine*, dan tekanan transmbran. Suhu operasi yang terlalu tinggi dapat menyebabkan kerusakan membran, sementara suhu yang terlalu rendah dapat mengurangi laju penguapan (Smith, 2019). Namun demikian, untuk memanfaatkan sepenuhnya potensi teknologi ini, penelitian terus menerus diperlukan untuk memahami faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja distilasi

membran dan mengembangkan metode yang lebih efisien untuk mengatasi masalah tersebut.

Oleh karena itu, distilasi membran mungkin merupakan salah satu metode yang paling efektif untuk mengatasi masalah air di seluruh dunia di masa depan. Setelah mempertimbangkan semua aspek tersebut, dapat disimpulkan bahwa memahami bagaimana komposisi *brine*, karakteristik membran, dan parameter operasional berinteraksi sangat penting untuk meningkatkan efisiensi dan keberhasilan proses distilasi membran dalam pengolahan air *brine*. Dengan perkembangan pengetahuan dan teknologi di bidang ini, distilasi membran dapat menjadi salah satu solusi utama untuk di masa depan (Lee, 2019).

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengembangkan metode pengolahan air *brine* water yang efisien dan berkelanjutan. Sebagai contoh, (Schumann, A., Seshadri, R., Barry, S. I., & Walker, 2018). melakukan penelitian tentang potensi penggunaan air produksi dan air *brine* dalam pertanian setelah melalui serangkaian proses pengolahan yang sesuai. Hasil penelitian mereka menyoroti pentingnya mendaur ulang air limbah industri untuk kepentingan yang lebih produktif, seperti pertanian, yang dapat membantu mengurangi tekanan terhadap sumber daya air bersih.

Selain itu, (Wang, Y., Chong, S. P., Fane, T., & Wang, 2018) Dalam upaya untuk mengatasi masalah dalam penggunaan kembali air limbah dengan salinitas tinggi, tinjauan ini meninjau berbagai teknik untuk mengontrol *fouling* dalam

proses osmosis maju. Tinjauan ini menunjukkan bahwa teknologi yang lebih efisien diperlukan untuk mengatasi masalah *fouling* dalam pengolahan air *brine*.

Selanjutnya, (Qiblawey, R., Abu Seman, N., & Hilal, 2018) membahas aplikasi distilasi membran dalam konsentrasi *brine* dari sistem *Zero Liquid Discharge* (ZLD). Tinjauan ini memberikan informasi tentang bagaimana teknologi distilasi membran dapat digunakan untuk mengatasi masalah konsentrasi *brine* dalam sistem ZLD. Teknologi ini menjadi semakin penting dalam upaya untuk mencapai tujuan keberlanjutan.

secara keseluruhan, proses pengolahan air *brine* water sangat penting untuk industri modern. Penelitian-penelitian seperti yang disebutkan di atas memberikan gambaran menyeluruh tentang berbagai metode dan teknologi yang dapat digunakan untuk mengatasi masalah-masalah ini, dan ini akan membantu industri dalam mengambil langkah menuju pengelolaan sumber daya air yang lebih berkelanjutan.

6.3 Pengolahan Air Limbah

Air limbah, yang merupakan hasil buangan dari aktivitas manusia, saat ini menjadi masalah lingkungan yang mendesak dan rumit yang perlu ditangani (Zarrabi et al., 2022). Penyebab utama meningkatnya volume air limbah adalah urbanisasi, industrialisasi, dan pertumbuhan penduduk (Peng et al., 2015). Sayangnya, sejumlah besar air limbah dilepaskan ke lingkungan tanpa diolah karena peralatan yang ada saat ini untuk

pengolahan air limbah seringkali tidak mencukupi. Hal ini membahayakan kesehatan manusia dan ekosistem dengan mencemari pasokan air bersih, tanah, dan udara (Koyuncu and Toprak, 2019). Situasi ini diperparah dengan kurangnya pengetahuan masyarakat dan penegakan hukum yang tidak efektif (Lingo et al., 2010). Kerja sama dari berbagai sumber diperlukan untuk mengatasi masalah air limbah ini, termasuk meningkatkan kesadaran masyarakat, memperkuat penegakan hukum, menciptakan infrastruktur dan teknologi yang lebih baik untuk pengolahan air limbah, dan meningkatkan kerja sama antar pihak (Gryta et al., 2009).

Teknik yang potensial untuk mengolah berbagai air limbah, seperti air limbah industri, rumah tangga, dan pertanian, adalah distilasi membran (MD) (Zarrabi et al., 2022). Membran distilasi (MD) memiliki sejumlah manfaat dibandingkan teknik pengolahan air konvensional, termasuk:

- Efisiensi tinggi: Bahkan dengan air limbah yang memiliki tingkat polutan yang tinggi, membran distilasi (MD) dapat mencapai tingkat pemulihan air yang sangat baik (Peng et al., 2015).
- Mudah digunakan: Menurut Koyuncu and Toprak (2019), membran distilasi (MD) adalah teknik yang cukup mudah yang tidak memerlukan bahan kimia atau pretreatment yang rumit.
- Mampu mengolah spektrum polutan yang luas: Menurut Lingo et al. (2010), membran distilasi (MD) mampu

menghilangkan spektrum kontaminan yang luas, seperti bahan kimia organik, logam berat, dan mikroplastik.

- Ramah lingkungan: membran distilasi (MD) adalah metode yang tidak melepaskan emisi berbahaya dan oleh karena itu ramah lingkungan (Gryta et al., 2009).

Tabel 6. 1 Perbandingan Manfaat Penggunaan Membran Distilasi dengan Metode Tradisional

Fitur	Membran Distilasi	Metode Tradisional
Efisiensi pemulihan air	Tinggi	Rendah
Kemampuan menghilangkan polutan	Berbagai macam polutan	Terbatas
Fitur	Membran Distilasi	Metode Tradisional
Kebutuhan bahan kimia	Tidak diperlukan	Diperlukan
Dampak lingkungan	Ramah lingkungan	Berpotensi mencemari lingkungan
Kompleksitas operasi	Sederhana	Kompleks
Biaya operasi	Relatif tinggi	Relatif rendah

6.3.1. Pengolahan Air Limbah Industri

Beberapa pengaplikasian membran distilasi pada industri yang dapat berpotensi menghasilkan limbah seperti:

- Aplikasi Membran Distilasi (MD) dalam Industri Tekstil Air limbah dari sektor tekstil terkontaminasi oleh berbagai macam hal, termasuk logam berat, deterjen, dan warna. Menurut Peng et al. (2015), membran distilasi (MD) dapat digunakan untuk

menghilangkan kontaminan ini dari air limbah dan menyediakan air yang dapat digunakan kembali dalam proses pembuatan tekstil.

- Aplikasi Membran Distilasi (MD) dalam Industri Kertas & Pulp
Air limbah dari sektor pulp dan kertas mengandung serat, bahan kimia, dan lignin. Ketika memproduksi pulp dan kertas, membran distilasi (MD) dapat digunakan untuk menghilangkan kontaminan ini dari limbah dan menyediakan air yang dapat digunakan kembali (Koyuncu and Toprak, 2019).
- Penggunaan Membran Distilasi (MD) di Industri Kimia
Air limbah dari industri kimia terkontaminasi dengan banyak zat yang berbeda, termasuk asam, logam berat, dan senyawa organik berbahaya. Menurut Lingo et al. (2010), membran distilasi (MD) dapat digunakan untuk menghilangkan kontaminan ini dari air limbah dan menciptakan air yang aman untuk dibuang ke lingkungan.
- Penggunaan Membran Distilasi (MD) di Industri Lain
Air limbah dari berbagai industri lain, termasuk sektor makanan dan minuman, elektronik, dan farmasi, dapat diolah menggunakan membran distilasi (MD).

6.3.2. Pengolahan Air Limbah Domestik

Bahkan di tengah hiruk pikuk kehidupan modern, air limbah domestik terus mengalir dan mengandung bahan-bahan pencemar yang mengancam kelestarian lingkungan. Membran distilasi (MD) menjadi solusi inovatif, membuka pintu menuju era

baru pengolahan air berkelanjutan. MD dapat digunakan untuk mengolah air limbah dari berbagai sumber, termasuk:

- Air limbah rumah tangga: Membran distilasi (MD) mampu menangani air limbah rumah tangga, termasuk yang berasal dari wastafel, bak mandi, dan toilet.
- Air limbah komersial: Air limbah dari perusahaan seperti restoran, fasilitas penginapan, dan tempat kerja dapat diolah menggunakan membran distilasi (MD).
- Air limbah dari institusi: Membran distilasi (MD) dapat digunakan untuk mengolah air limbah dari penjara, rumah sakit, dan sekolah.

Membran distilasi (MD) dapat digunakan untuk membuat air yang aman untuk digunakan kembali untuk berbagai penggunaan, seperti menyiram kebun, mencuci mobil, mencuci baju dan lain-lain.

6.3.3. Pengolahan Air Limbah Pertanian

Meskipun kegiatan pertanian menghasilkan sumber pangan vital, disisi lain juga menghasilkan air limbah yang dapat membawa dampak negatif bagi lingkungan. Air limbah pertanian dapat merusak lingkungan, kesehatan manusia, dan pasokan air. Air limbah ini, yang sarat dengan polutan seperti pestisida, pupuk kimia, dan kotoran ternak, dapat mencemari sumber air, tanah, dan ekosistem sekitarnya. Dampak ini dapat berlangsung lama dan menimbulkan berbagai konsekuensi serius, mulai dari kerusakan kesuburan tanah, keracunan air minum, hingga punahnya spesies. Oleh karena itu, memahami dan menangani

masalah air limbah pertanian secara efektif menjadi sangat penting untuk menjaga kelestarian lingkungan dan kesehatan manusia. Air limbah pertanian dihasilkan oleh sejumlah sumber,

termasuk:

- Irigasi: Pestisida, pupuk, dan garam semuanya termasuk dalam air limbah irigasi.
- Peternakan: Antibiotik, air seni, dan kotoran hewan semuanya ada dalam air limbah peternakan.
- Pengolahan hasil panen: Limbah dari pengolahan tanaman termasuk pupuk, insektisida, dan bahan organik.

Membran distilasi (MD) dapat digunakan untuk mengolah air limbah pertanian dengan aman dari berbagai sumber dan menghasilkan air yang dapat digunakan kembali dalam berbagai pengaturan, seperti irigasi tanaman, mengairi ternak:

membersihkan peralatan pertanian dan masih banyak lagi.

6.4 Perbandingan Aplikasi MD dengan Proses Membran Lain

6.4.1 Membran Distilasi (MD)

Membran distilasi (MD) adalah teknologi pengolahan air yang memanfaatkan membran semipermeabel untuk mengatasi berbagai macam air limbah, termasuk air limbah industri, air limbah domestik, dan air limbah pertanian. MD menawarkan beberapa keunggulan dibandingkan metode pengolahan air tradisional, seperti:

- **Efisiensi tinggi:** MD dapat mencapai tingkat pemulihan air yang tinggi, bahkan untuk air limbah dengan kontaminan tinggi.

- **Operasi yang sederhana:** MD adalah proses yang relatif sederhana yang tidak memerlukan bahan kimia atau pretreatment yang rumit.
- **Kemampuan untuk menangani berbagai macam polutan:** MD dapat digunakan untuk menghilangkan berbagai macam polutan, termasuk senyawa organik, logam berat, dan mikroplastik.
- **Ramah lingkungan:** MD adalah proses yang ramah lingkungan yang tidak menghasilkan emisi berbahaya.

Beberapa contoh studi kasus pengaplikasian membran distilasi yang telah digunakan di berbagai penjuru dunia adalah sebagai berikut:

- 1 Membran distilasi (MD) dapat digunakan untuk mengolah air limbah tekstil dengan menghilangkan 90% warna dan 80% deterjen, menurut sebuah penelitian di Cina (Peng et al., 2015).
- 2 Pengolahan air limbah *pulp* dan kertas dengan membran distilasi (MD) : Menurut sebuah penelitian di Turki Koyuncu and Toprak (2019), air limbah pulp dan kertas dapat diolah dengan membran distilasi (MD) untuk menghilangkan 90% serat dan 95% lignin.
- 3 Membran distilasi (MD) dapat digunakan untuk mengolah limbah industri kimia dengan menghilangkan 99% senyawa organik berbahaya dan 95% logam berat, menurut sebuah penelitian yang dilakukan di Belanda (Lingo et al., 2010).

- 4 Membran distilasi (MD) dapat digunakan untuk mengolah air limbah rumah tangga dengan menghilangkan 99% bakteri dan 95% virus, menurut sebuah penelitian yang dilakukan di Australia (Zarrabi et al., 2022) .
- 5 Membran distilasi (MD) dapat digunakan untuk mengolah air limbah komersial dengan menghilangkan 90% minyak dan lemak serta 85% deterjen, menurut sebuah studi yang dilakukan di Amerika Serikat (Gryta et al., 2009).
- 6 Pengolahan membran distilasi (MD) untuk air limbah institusi: Menurut sebuah penelitian di Jepang Koyuncu and Toprak (2019), MD dapat menghilangkan 98% obatobatan dan 95% hormon dari air limbah institusi.

Membran distilasi (MD) menawarkan solusi inovatif untuk berbagai aplikasi pengolahan air, seperti desalinasi air laut, pengolahan air limbah, dan pemulihan air. Teknologi ini memanfaatkan membran semipermeabel untuk memisahkan air murni dari larutannya.

Pemilihan jenis membran distilasi yang tepat tergantung pada beberapa faktor, antara lain:

- **Jenis air limbah:** Kontaminasi, pH, dan viskositas air limbah.
- **Laju permeasi yang diinginkan:** Seberapa cepat air murni ingin dihasilkan.
- **Selektivitas membran:** Seberapa efektif membran dalam memisahkan air murni dari zat terlarut.
- **Biaya membran:** Harga membran yang berbeda-beda.

Beberapa aplikasi teknologi membran distilasi seperti desalinasi air laut, pengolahan air limbah, dan pemisahan larutan beserta dengan kelebihan dan kekurangannya.

1. Desalinasi Air Laut

Tabel 6. 2 Keunggulan dan Kekurangan MD pada Desalinasi Air Laut

Kekurangan	
Keunggulan	
<ul style="list-style-type: none"> • Memproduksi air • Biaya awal yang tinggi: minum berkualitas Membran MD dan tinggi: MD dapat sistemnya bisa mahal menghasilkan air untuk dipasang 	
Keunggulan	Kekurangan
<ul style="list-style-type: none"> • Hemat energi: MD • dapat dioperasikan dengan energi termal yang rendah dibandingkan dengan teknologi desalinasi lainnya, seperti Reverse osmosis. 	<p><i>Fouling:</i> <i>Fouling</i> (penumpukan zat terlarut pada membran) dapat menurunkan kinerja MD dan memerlukan pembersihan membran secara berkala.</p>

- Ramah lingkungan: MD tidak menghasilkan air limbah yang terkontaminasi dan tidak memerlukan bahan kimia berbahaya.
- Keterbatasan suhu: MD memiliki keterbatasan suhu operasi, sehingga tidak cocok untuk air laut yang sangat panas.

2. Pengolahan Air Limbah

Tabel 6. 3 Keunggulan dan Kekurangan MD pada Pengolahan Air Limbah

		Kekurangan
Keunggulan		
• Menghilangkan	• Biaya operasi yang tinggi: berbagai kontaminan:	
MD	dapat	
Keunggulan	Kekurangan	
menghilangkan berbagai kontaminan dari air limbah, seperti garam, logam berat, senyawa organik, dan mikroorganisme.	memanaskan air limbah bisa tinggi.	

- Memproduksi air daur • ulang: MD dapat menghasilkan air daur ulang yang aman untuk digunakan kembali dalam berbagai aplikasi, seperti irigasi, industri, dan domestik
 - Ramah lingkungan: MD tidak menghasilkan air limbah yang terkontaminasi dan tidak memerlukan bahan kimia berbahaya.
- Fouling:* *Fouling* (pendumpukan zat terlarut pada membran) dapat menurunkan kinerja MD dan memerlukan pembersihan membran secara berkala
- Keterbatasan jenis air limbah: MD tidak cocok untuk air limbah dengan viskositas tinggi atau kandungan padatan yang tinggi.

3. Pemisahan Larutan

Tabel 6. 4 Keunggulan dan Kekurangan MD pada Pemisahan Larutan

Keunggulan	Kekurangan
------------	------------

- Memisahkan komponen larutan secara selektif: MD dapat memisahkan komponen larutan secara selektif berdasarkan perbedaan volatilitasnya
- komponen Biaya awal yang tinggi: Membran MD dan sistemnya bisa mahal untuk dipasang.
- Mendapatkan produk dengan kemurnian tinggi: MD dapat menghasilkan produk dengan kemurnian tinggi, karena hanya komponen yang lebih mudah menguap yang melewati membran
- Keterbatasan jenis larutan: MD tidak cocok untuk larutan dengan komponen yang memiliki volatilitas
- Proses yang aman dan ramah lingkungan: MD tidak memerlukan bahan kimia berbahaya dan menghasilkan sedikit limbah

6.4.2 Reverse Osmosis (RO)

Reverse osmosis (RO) adalah teknologi menyerupai media filter yang memiliki membran *semi-permeable* dengan

pori-pori 0,0001 mikron yang dapat memisahkan air dari komponen-komponen yang tidak diinginkan dengan demikian akan didapatkan air dengan tingkat kemurnian yang tinggi (Meidinariasty, 2019). RO menggunakan proses pemompaan bertekanan tinggi untuk mengalirkan air laut melewati membran, yang berfungsi memisahkan atau menghilangkan zat terlarut dalam air. RO merupakan proses difusi terkendali yang mengendalikan transfer massa zat terlarut sehingga dapat melewati struktur polimer membran. Difusi air tawar menuju air laut melewati membran semipermeabel dipengaruhi oleh daya atau tekanan osmosis. Adanya pengaruh tekanan yang lebih besar dari tekanan osmosis menyebabkan aliran air tawar berbalik arah, yaitu dari air asin ke air tawar. Tekanan osmosis dipengaruhi oleh karakteristik jenis membran, temperatur, konsentrasi garam (salinitas), dan senyawa yang terlarut dalam air (Ragetisvara and Titah, 2021).

Proses *Reverse osmosis* yang dikembangkan secara komersial pada pertengahan tahun 1960an telah mengalami perkembangan yang signifikan sejak awal. *Reverse osmosis* digunakan secara luas dalam berbagai proses pemisahan termasuk desalinasi air payau dan air laut. Membran *thin film composite* (TFC) adalah membran osmosis balik yang paling umum digunakan karena kinerjanya yang unggul dalam penolakan garam dan fluks air, daya tahannya, dan rentang pengoperasian pH, suhu, dan tekanan yang luas. Membran TFC terdiri dari lapisan selektif tipis, biasanya terbuat dari poliamida dan dibuat melalui reaksi polimerisasi antarmuka antara amina

polifungsional, misalnya *m-Phenylenediamine* (MPD), dan molekul asil klorida polifungsional, seperti *Trimesyol chloride* (TMC). Struktur multilapisan membran TFC memberikan peluang unik untuk menyempurnakan dan meningkatkan sifat lapisan selektif dan pendukung secara mandiri dengan menggunakan bahan baru dan metode sintesis canggih (Raval and Sundarkumar, 2018).

Kelebihan dan kekurangan sistem *Reverse osmosis* (RO) memiliki kelebihan dan kekurangan dalam kinerjanya. Berikut merupakan kelebihan dari RO (Ragetisvara and Titah, 2021):

Tabel 6. 5 Keuntungan dan Kekurangan Proses *Reverse Osmosis* (RO)

Kekurangan	
Keunggulan	
<ul style="list-style-type: none"> • RO mampu menangani air yang penambahan bahan kimia. Kerugian terdapat pada jumlah air yang terbuang oleh proses tersebut. 	<ul style="list-style-type: none"> • RO tidak praktis untuk menghilangkan zat terlarut dan tidak memerlukan masuk dalam rumah.
<ul style="list-style-type: none"> • RO tidak memerlukan tambahan, bahan, material, dan peralatan dengan kualitas keluar dari proses memiliki yang cukup tinggi. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistem RO membutuhkan pemanasan air garam yang sehingga air yang
Keunggulan	Kekurangan
<ul style="list-style-type: none"> • suhu yang sama dengan air umpan. 	<ul style="list-style-type: none"> • RO dapat dilakukan pada suhu ruang tanpa perubahan

fase, ruang peralatan operasi kecil dan menghasilkan kualitas air sangat baik.

sedimentasi padatan tersuspensi, atau terjadinya korosi sehingga air umpan berupa air laut

- Membran RO rentan terhadap *fouling*,
- Efisiensi sistem RO sangat tinggi, membutuhkan peralatan sederhana, dan perawatan mudah.

atau air limbah perlu dilakukan pre-treatment.

RO memerlukan pencucian membran untuk mencegah *fouling* sehingga biaya dan energi yang dikeluarkan lebih besar.

- Konsumsi energi RO sangat rendah, berkisar antara 8 - 9 kwh/T dalam instalasi kapasitas kecil untuk air laut yang mempunyai 35.000 ppm TDS dan 9 - 11 kwh/T

Keunggulan	Kekurangan
-------------------	-------------------

untuk air laut yang mempunyai 42.000 ppm TDS.

6.4.3 Pervaporasi

Pervaporasi adalah metode pemisahan menggunakan membran yang didasarkan pada perbedaan volatilitas komponen-komponennya. Komponen yang lebih volatil melewati membran semipermeabel sebagai uap, sementara komponen yang kurang volatil tertahan di fase cair. Setelah melewati membran, uap tersebut dikondensasikan kembali menjadi cairan. Pervaporasi dapat digunakan untuk banyak hal, seperti memisahkan senyawa organik dari air, mengeluarkan pelarut dari air, dan memurnikan bahan kimia. Teknik ini memiliki banyak keuntungan. Ini termasuk penggunaan energi yang lebih rendah dibandingkan dengan distilasi konvensional, kemampuan untuk memisahkan bagian dengan titik didih yang lebih kecil, dan kemampuan untuk memproses berbagai jenis campuran (Ge, Q., Huang, B., & Deng, 2020)

Proses ini melibatkan tiga tahap utama:

1. Penyerapan: Pada tahap pertama, permukaan membran menyerap komponen campuran cairan yang lebih mudah menguap. Afinitas membran terhadap komponen ini ditentukan oleh sifat fisik dan kimia membran dan komponen campuran
2. Difusi: Setelah molekul komponen diserap oleh membran, molekul-molekulnya akan berdifusi melalui struktur membran. Berbagai faktor, termasuk ukuran pori membran,

interaksi molekul dengan material membran, dan suhu dan tekanan operasi, memengaruhi proses difusi ini. Molekul yang lebih besar atau kurang volatil akan berdifusi lebih lambat daripada molekul yang lebih kecil dan mudah menguap

3. Desorpsi: Molekul yang telah berdifusi melalui membran kemudian mendesorpsi dari permukaan membran ke fase uap di sisi permeat. Desorpsi terjadi karena tekanan parsial yang lebih rendah di sisi permeat, biasanya dipertahankan oleh tekanan vakum oleh pompa vakum (X. Zhang, Y. Zhang, Z. Wang, 2020).

Pervaporasi adalah metode pemisahan yang semakin populer dalam pemurnian berbagai jenis campuran. Ini melibatkan pemisahan zat cair melalui membran permeabel tertentu dengan menggunakan perbedaan tekanan parsial dari komponen-komponen tersebut. Berikut adalah beberapa keunggulan dan kekurangan dari metode pervaporasi (Yahya, M., Lai, S. O., & Ang, 2020) :

Tabel 6. 6 Keuntungan dan Kekurangan Proses Pervaporasi

Keuntungan	Kekurangan
<ul style="list-style-type: none"> • Efisiensi Energi: Pervaporasi 	<ul style="list-style-type: none"> • Biaya Awal yang Tinggi: sering kali membutuhkan lebih Membran pervaporasi sedikit energi daripada metode cenderung lebih mahal pemisahan lainnya seperti daripada sistem distilasi distilasi, terutama ketika konvensional pada berurusan dengan campuran
Keuntungan	Kekurangan

azeotropik atau larutan yang sangat awalnya, terutama untuk dilute. aplikasi skala besar.

• Operasi pada Suhu Rendah: • Perawatan yang

Pervaporasi dapat bekerja pada suhu yang lebih rendah daripada distilasi, yang mengurangi kemungkinan kerusakan atau kerusakan pada komponen sensitive panas. Diperlukan: Untuk membran tetap berfungsi, diperlukan perawatan yang cermat. Kerusakan atau kontaminasi membran dapat

mengurangi efisiensi proses.

• Pemisahan yang Selektif: • Pilihan Membran yang

Bahkan pada konsentrasi yang sangat rendah, membran dapat yang Tepat: Memilih membran yang sesuai dengan dipilih dan disesuaikan untuk campuran yang memberikan pemisahan yang dipisahkan adalah penting sangat selektif untuk keberhasilan proses pervaporasi. Untuk menemukan membran yang paling cocok, proses pengujian dan

pengembangan diperlukan.

BAB VII PROSPEK KEDEPAN APLIKASI MEMBRAN DISTILASI

Membran Distilasi (MD) memiliki banyak karakteristik menarik yang membedakannya dengan jenis membran yang lain. MD diaplikasikan pada berbagai proses, seperti proses pengeringan yang stabil termasuk *Distilasi Flash Multistage* (MSF), Distilasi Efek Berganda (MED), Distilasi Kompresi Uap (VCD), *Reverse osmosis* (RO), dan Elektrodialisis (ED) (Johnson and Nguyen, 2017). MD memiliki beberapa keunggulan, seperti retensi 100% secara teoritis zat terlarut yang tidak mudah menguap (nonvolatil), kerusakan akibat panas dapat diminimalkan pada komponen umpan (feed), retensi tinggi senyawa organik (aromatik) yang mudah menguap, konsentrasi ke tingkat zat terlarut yang tinggi, dan pemanfaatan panas yang rendah. Karakteristik ini dapat

dikaitkan dengan penggunaan membran hidrofobik dan kondisi operasi yang ringan. Jumlah dan variasi aplikasi yang telah digunakan MD pada berbagai penelitian adalah bukti pengakuan luas atas kelebihan yang ditawarkan oleh membran jenis ini. Banyak dari aplikasi MD telah melibatkan integrasi dengan proses membran lainnya termasuk mikrofiltrasi (MF), ultrafiltrasi (UF), nanofiltrasi (NF), dan *Reverse osmosis* (RO) (Johnson and Nguyen, 2017). Terlepas dari keuntungannya, prospek ke depan untuk MD dalam banyak kasus bergantung pada perkembangan lebih lanjut dalam desain modul membran dan optimalisasi umur pakai membran.

Sebagai alternatif yang menjanjikan untuk menggantikan proses pemisahan lainnya, MD telah mendapatkan banyak minat karena kebutuhan energi operasinya yang lebih rendah dibandingkan dengan distilasi konvensional. Selain itu, tekanan operasi MD lebih rendah dan faktor rejeksi yang lebih tinggi daripada proses yang digerakkan oleh tekanan, seperti NF dan RO (Onsekizoglu, 2012). Meskipun MD telah dikenal selama lebih dari 40 tahun, sejumlah masalah ada ketika MD dipertimbangkan untuk diimplementasikan pada skala industri. Sebagian besar studi MD yang dilakukan masih dalam skala laboratorium. Dalam beberapa tahun terakhir, beberapa studi percontohan pada skala pabrik (pilot) telah diusulkan untuk desalinasi (Song et al., 2008; Burrieza et al., 2011; Jia et al., 2021; Adham et al., 2023). Namun, evaluasi jangka panjang dari aplikasi pada skala pilot untuk aplikasi selain itu masih langka.

Namun, desalinasi berbasis MD akan menjadi salah satu teknik yang paling menjanjikan dengan aspek-aspek berikut yang terus dikembangkan di masa depan (Yang et al., 2014):

1. Sifat membran memainkan peran penting dalam mencapai tingkat permeasi yang tinggi dan mencegah pembasahan pori serta *fouling* dan *scaling* pada MD. Namun, diperlukannya penelitian lebih lanjut untuk mengkomersialkan membran MD dengan biaya yang kompetitif, terutama jenis hollow fiber. Oleh karena itu, eksplorasi bahan baru dan pengembangan membran MD khusus perlu lebih ditekankan.
2. Meskipun pemikiran baru telah diberikan pada desain modul dalam lima tahun terakhir, sebagian besar hasil evaluasi MD diperoleh dengan menggunakan modul yang tidak terstandarisasi yang dibuat dalam skala laboratorium. Selain itu, lebih banyak perhatian harus diberikan pada desain modul untuk konfigurasi MD yang kurang dipelajari seperti Vacuum Membrane Distillation VMD, Air Gap Membrane Distillation (AGMD), dan Sweep Gas Membrane Distillation (SGMD).
3. Secara relatif, *Direct Contact Membrane Distillation* (DCMD) adalah konfigurasi yang paling banyak dipelajari karena kesederhanaan teknisnya, diikuti oleh (*Vacuum Membrane Distillation*) VMD yang biasanya menunjukkan fluks yang jauh lebih tinggi. Pengembangan konfigurasi MD baru seperti *Vacuum-Enhanced DCMD* (VEDCMD), *Material-Gap MD* (MGMD), *Permeate-Gap MD* (PGMD), *Multi-Effect MD* (MEMD), dan *Vacuum Multi-Effect MD* (V-MEMD) memperluas aplikasi MD dalam pemulihan sumber daya air tawar dan zat

terlarut. Namun, masih banyak upaya yang diperlukan untuk mengevaluasi proses dan efisiensi energi.

4. Meskipun efek dari kondisi operasi telah dipelajari dengan baik, penting untuk mengidentifikasi interaksi di antara parameter dan mengoptimalkan sistem MD untuk mencapai efisiensi proses yang lebih baik dan mengurangi konsumsi energi. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan teknik kontrol proses seperti desain eksperimen, kontrol proses statistik, dan lain sebagainya.

Karakteristik MD yang menguntungkan membuatnya berpotensi diaplikasikan untuk berbagai keperluan di masa depan. Di antaranya adalah sebagai berikut (Johnson and Nguyen, 2017):

1. Pengolahan Air untuk Digunakan Kembali dalam Misi Ruang Angkasa Jangka Panjang

Pengolahan dan penggunaan kembali air selama misi luar angkasa dalam jangka waktu yang lama di masa depan akan menjadi hal yang sangat penting dilakukan. Ada tiga sumber utama air limbah di pesawat ruang angkasa, yaitu air sanitasi, air seni, dan kondensat kelembapan. Tempat tinggal di orbit Bumi seperti Stasiun Luar Angkasa Internasional (ISS) ditopang oleh air yang dibawa oleh pesawat selama dalam misi. Air limbah yang tersimpan dikembalikan ke Bumi untuk dibuang. Namun, misi ke Mars, misalnya, akan memakan waktu 150-300 hari sekali jalan dengan total penggunaan air yang jauh lebih banyak daripada yang dapat disimpan di pesawat ruang angkasa. Untungnya, tingkat produksi air limbah harian akan

relatif kecil dan karenanya pengolahan air hanya membutuhkan sistem skala kecil. Sistem MD menjadi perhatian khusus dalam aplikasi ini karena konfigurasi yang ringkas, rejeksi zat terlarut total, penggunaan bahan habis pakai yang minimal, kesederhanaan pengoperasian, dan perawatan yang rendah. Selain itu, demi kepentingan ruang kabin, lebih baik mengolah tiga sumber air limbah secara bersamaan. Hal ini dapat dicapai dengan menggunakan proses ini.

Beberapa penelitian yang disponsori oleh *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) mengungkapkan kemungkinan tercapainya pengolahan air limbah berbasis MD selama menjalankan misi luar angkasa. Salah satunya seperti penelitian yang dilakukan oleh Cath et al., (2005) yang membahas tentang pengembangan proses-proses membran kontak untuk pengolahan air limbah di lingkungan ruang angkasa. Dalam penelitian ini, peneliti menggunakan kombinasi tiga proses membran, yaitu *Forward Osmosis* (FO), *Osmotic Distillation* (OD), dan MD untuk mengolah air limbah metabolik yang dihasilkan oleh astronot di ruang angkasa. Penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi tiga proses membran kontak dapat menghasilkan air limbah yang lebih baik dan lebih aman untuk digunakan di lingkungan ruang angkasa. Hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa proses-proses membran kontak dapat digunakan untuk mengolah air limbah metabolik yang dihasilkan oleh astronot di ruang angkasa, sehingga memastikan keberlanjutan misi-misi ruang angkasa di masa depan.

2. Produksi Konsentrat Jus Buah Jeruk

Produksi konsentrat jus buah jeruk oleh MD biasanya membutuhkan langkah sentrifugasi atau dekantasi awal untuk menghilangkan minyak dilepaskan oleh sel-sel di kulit buah selama penghancuran. Minyak ini terutama terdiri dari limonene hidrokarbon terpenik (>90 wt%), adalah sangat polar dan membasahi membran hidrofobik bila dalam konsentrasi yang cukup (Xu et al., 2004). Limonene adalah yang utama spesies yang bertanggung jawab atas aroma jeruk dan lebih disukai ditambahkan kembali ke jus mengikuti konsentrasi.

Studi oleh Cisse dkk. (2005) menunjukkan bahwa sebagian besar *limonene* dapat dihilangkan bersama dengan pulp pada langkah awal MF. Namun demikian, limonene yang tersisa di dalam permeat MF berpotensi untuk terakumulasi di permukaan membran dan pada akhirnya menyebabkan terjadinya *wet-out*. Lapisan hidrogel memiliki potensi untuk memberikan perlindungan pada membran. Produksi konsentrat jus buah dipandang sebagai salah satu aplikasi potensial utama MD. Proses DCMD diharapkan cocok untuk aplikasi ini. Dalam proses ini, sistem pendingin siklus balik digunakan untuk mendinginkan air strip. Sementara itu, panas yang dilepaskan pada kompresi refrigeran digunakan untuk menghangatkan aliran umpan. Proses ini juga menghemat biaya pemasangan ketel uap dan pengolahan air terkait serta peralatan penanganan kondensat untuk mengkonsentrasikan kembali zat osmotik dalam mode *Osmotic Distillation* (OD). Dalam hal ini, proses tersebut diharapkan menghindari penggunaan bahan

kimia yang merupakan citra negatif bagi konsumen. Hal ini juga menghasilkan air *recycle* sebagai sumber air bersih dari buah untuk digunakan sebagai air "organik". Oleh karena itu, investigasi lebih lanjut mengenai daya tahan membran berlapis dalam aplikasi ini juga sangat diperlukan.

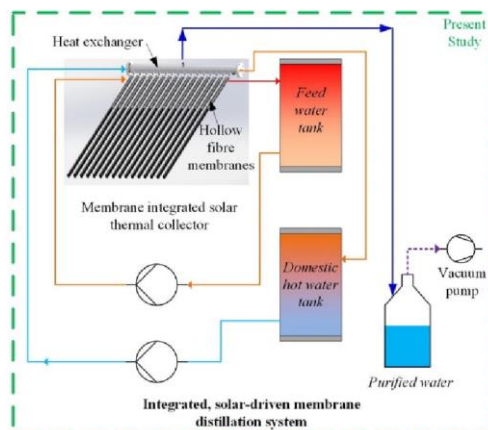
3. Pengurangan Konsentrasi Larutan Limbah Radioaktif

Konsentrat limbah nuklir tingkat rendah dan menengah dapat dihasilkan pada Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) maupun fasilitas lain yang memanfaatkan nuklir. Menurut beberapa penelitian, MD mampu mengurangi konsentrasi limbah radioaktif dalam satu kali operasi. Hal ini dapat diaplikasikan pada cemaran limbah radioaktif, khususnya yang digunakan untuk menghilangkan produk korosi radioaktif dari perpipaan dan peralatan yang terkait dengan aliran pendingin reaktor. Pembasahan membran yang dihasilkan dari kontak langsung selama operasi akan memungkinkan masuknya zat terlarut radioaktif secara bebas ke aliran strip yang selanjutnya akan hilang ke lingkungan. Dalam hal ini, penggunaan lapisan yang tepat diharapkan dapat melindungi membran hidrofobik terhadap pembasahan.

4. Integrasi MD dengan Energi Terbarukan

Beberapa penelitian pernah dilakukan untuk mengintegrasikan MD dengan energi terbarukan untuk suatu aplikasi, contohnya panel surya. Integrasi MD dengan panel surya telah berhasil didemonstrasikan dalam berbagai penelitian dan proyek percontohan, yang menunjukkan potensinya untuk implementasi skala besar. Contohnya seperti

penelitian yang dilakukan oleh Li et al. (2019) di mana mereka memanfaatkan energi panas matahari untuk desalinasi menggunakan membran distilasi. Dalam sistem ini, tangki penyimpanan termal, penukar panas, dan pengaturan pipa yang rumit diperlukan untuk mengontrol perpindahan panas dan massa antara kolektor panel surya dan unit membran distilasi. Hasil penelitian mengungkapkan bahwa $4\text{-}10 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{jam}^{-1}$ permeat dapat dicapai ketika suhu umpan berkisar antara 50 hingga 70°C , mencapai tingkat salinitas $10\text{-}200 \text{ ppm}$ dari umpan 35.000 ppm (setara salinitas air laut). Ditemukan bahwa sebuah sistem dengan area penyerap matahari seluas $1,6 \text{ m}^2$ yang diintegrasikan dengan $\sim 0,2 \text{ m}^2$ membran dapat menghasilkan $\sim 4 \text{ L}$ air yang dapat diminum dan $\sim 4,5 \text{ kWh}$ energi panas (pada suhu 45°C) per hari (dengan paparan sinar matahari harian rata-rata 4 kWh/m^2). Adapun konfigurasi dari sistem ini dapat ditampilkan pada gambar berikut:



Gambar 7. 1 Integrasi MD dengan Panel Surya

ACKNOWLEDGMENT

HALAMAN INDEX

A

air, v, 1, 4, 6, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 19, 20, 23, 26, 27, 28, 29,
31, 34, 35, 37, 38, 39, 41, 42, 45, 48, 49, 51, 52, 53, 54, 55, 56,
61, 62, 63, 64, 67, 68, 69, 71, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82,
83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97,
98,99, 100, 101, 107, 108, 109, 111, 114, 121, 123, 125,
126, 127

B

bioreaktor, 1, 2

D

desalinasi, x, 6, 9, 14, 19, 20, 28, 40, 41, 49, 67, 78, 79, 80,
81, 83, 95, 96, 99, 105, 106, 113, 126 difusi, 8, 16, 20, 26,
27, 29, 30, 31, 32, 37, 39, 61, 63, 64, 68,
69, 98, 102 distilasi, iv, v, vi, x, 1, 2, 4, 5, 6, 12, 13, 14, 23,
24, 26, 27, 28,
29, 35, 36, 37, 39, 40, 42, 43, 44, 46, 47, 48, 49, 50, 52, 53,
55, 58, 59, 61, 69, 71, 72, 73, 74, 75, 78, 83, 84, 85, 86, 87,
88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 101, 103, 105, 113

E

energi, iv, v, 2, 4, 6, 8, 10, 14, 34, 35, 40, 41, 45, 71, 75, 78,
79, 83, 96, 100, 101, 103, 105, 107, 113

F

fasa, 13, 18, 45 feed bulk, 29, 33 fluida, 28, 35, 36, 72, 75
fluks, 12, 14, 32, 33, 34, 35, 39, 51, 58, 59, 67, 68, 69, 71, 74,
80, 99, 107 fouling, 6, 84, 86, 100,
106, 125, 128 fraksi, 64, 67, 68, 74

H

hidrofobik, 4, 5, 12, 13, 26, 27, 32, 34, 35, 36, 37, 39, 40, 41,
42, 44, 45, 46, 47, 50, 54, 61, 104, 110, 113

K

kapiler, 24, 35, 36, 38, 75 koefisien, 17, 29, 31, 33, 64, 67,
69, 72, 75 komposit, 46, 73 kondensasi, 5, 10, 14, 25, 34,
36, 41, 45, 49, 50, 52, 57, 58,
60, 78 konduksi, 26, 29, 34, 35, 50, 56, 57, 71,
74, 75, 80

L

laten, 14, 24, 33, 34, 35, 45, 70, 71, 75 limbah, 1, 6, 11, 17,
19, 23, 76, 80, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92,
93, 94, 95, 96, 97, 98, 100, 108, 109, 112

M

massa, v, viii, 13, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 37, 38, 45, 53, 55,
56, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 68, 69, 70, 74, 80, 84, 85, 98, 113
membran, iv, v, vi, x, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14,
15, 16, 17, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32,
33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49,
50, 52, 53, 54, 55, 57, 58, 59, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68,
69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 78, 80, 82, 83, 84, 85, 86, 87,

88, 89, 90, 91, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103,
104, 106, 109, 110, 111, 112, 113, 120 mikrofiltrasi, 2,
105 mikropori, 3, 4, 12, 27, 41 modul, 7, 32, 40, 44, 48, 49,
50, 52, 53, 54, 72, 74, 75, 105,
106

N

nanofiltrasi, 2, 105

O

osmosis balik, 2, 20, 99 osmotik,
79, 84, 111

P

panas, viii, 5, 6, 14, 24, 25, 26, 28, 29, 32, 33, 34, 35, 39, 40,
41, 42, 45, 48, 50, 53, 56, 57, 58, 59, 69, 70, 71, 72, 74, 75,
78, 80, 96, 103, 104, 111, 113

patogen, 1, 11 pelat, 44, 59

permeabel, 6, 19, 23, 49, 82, 83, 102 permeabilitas, 2, 4, 9, 17,
19, 20, 21, 22, 25, 30, 31, 47, 63, 65,

66 permeat, 5, 12, 14, 25, 26, 27, 28, 29, 31, 32, 33, 34,
35, 38,

40, 48, 51, 52, 53, 54, 56, 58, 59, 61, 64, 67, 68, 70, 71, 72,
74, 80, 102, 111, 113

Pervaporasi, viii, 101, 102, 103

polimer, 3, 9, 18, 22, 45, 46, 47, 98

pulp, 90, 94, 111

R

reverse osmosis, 6

Reverse osmosis, viii, 9, 78, 79, 96, 98, 99, 104

S

suhu, 4, 5, 12, 13, 14, 26, 28, 30, 32, 34, 35, 38, 44, 45, 48,
49, 53, 57, 58, 60, 61, 70, 71, 73, 75, 80, 85, 96, 99, 100,
102, 103, 113

T

tekanan, 2, 5, 9, 12, 13, 14, 18, 24, 25, 26, 27, 30, 31, 35, 36,
38, 42, 44, 45, 48, 49, 54, 58, 61, 62, 64, 65, 66, 67, 68, 69,
70, 75, 78, 79, 82, 85, 86, 99, 102, 105 termal, 4, 5, 13, 14,
24, 26, 27, 32, 34, 43, 45, 47, 50, 57, 58,
59, 71, 72, 73, 74, 78, 96, 113
tubular, 44, 121

U

udara, 5, 23, 31, 32, 38, 49, 50, 52, 57, 62, 63, 64, 65, 66, 75,
80, 88 ultrafiltrasi,
2, 105

V

volatil, 5, 6, 13, 14, 26, 101, 102

Z

zat, 1, 2, 4, 6, 16, 17, 19, 20, 22, 25, 26, 29, 36, 38, 48, 49, 51,
52, 53, 58, 77, 90, 95, 96, 97, 98, 100, 102, 104, 107, 109, 111,
112

TENTANG PENULIS

Muthia Elma memulai karirnya sebagai dosen di Fakultas Teknik, Universitas Lambung Mangkurat (ULM) sejak tahun 2002. Pendidikan Sarjananya diperoleh dari jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Riau, kemudian melanjutkan program Master di Ecole Des Mines De Nantes, Prancis. Selanjutnya gelar Doktor diperoleh dari School of Chemical Engineering the University of Queensland, Australia. Selain menjadi dosen, Muthia memiliki pengalaman bekerja di beberapa universitas, seperti: Universitas Riau dan di FIMLAB (Inorganic Laboratory and Film Laboratory), Chemical Engineering School, University of Queensland, Australia. Serta pengalaman bekerja di beberapa perusahaan seperti: Gaz de France Prancis, PDAM Banjar Kalimantan Selatan, dll.

Selama mengajar di ULM, Muthia pernah menjabat sebagai Kepala Laboratorium Operasi Teknik, Laboratorium Teknologi Proses, Fakultas Teknik – FT – ULM dan sebagai Wakil Direktur Bidang Umum dan Keuangan Program Pascasarjana ULM. Sekarang sebagai sekretrasi Dewan Pengawas BLU Universitas Lambung Mangkurat. Muthia telah berhasil melakukan beberapa penelitian dan pengabdian kepada masyarakat baik dari dalam (DRPM, BRG) dan luar negeri (ANU, Australia Awards). Muthia juga telah menulis beberapa buku bahan ajar dan buku-buku tentang teknologi membran.

DAFTAR PUSTAKA

- ABID, M. B., WAHAB, R. A., SALAM, M. A., MOUJIDIN, I. A. & GZARA, L. 2023. Desalination technologies, membrane distillation, and electrospinning, an overview. *Heliyon*, 9, e12810.
- ALHATHAL ALANEZI, A., BASSYOUNI, M., ABDEL-HAMID, S. M., AHMED, H. S., ABDEL-AZIZ, M. H., ZOROMBA, M. S. & ELHENAWY, Y. 2021. Theoretical investigation of vapor transport mechanism using tubular membrane distillation module. *Membranes*, 11, 560.
- ALKHUDHIRI, A., DARWISH, N. & HILAL, N. 2012. Membrane distillation: A comprehensive review. *Desalination*, 287, 2e18.
- ALKHUDHIRI, A. & HILAL, N. 2018a. *Emerging Technologies for Sustainable Desalination Handbook*, Oxford, Mathew Deans.
- ALKHUDHIRI, A. & HILAL, N. 2018b. *Membrane distillation—Principles, applications, configurations, design, and implementation. Emerging technologies for sustainable desalination handbook*. Elsevier.
- ALSAADI, A., FRANCIS, L., AMY, G. & GHAF FOUR, N. 2014. Experimental and theoretical analyses of temperature polarization effect in vacuum membrane distillation. *Journal of Membrane Science*, 471(138-148).
- ALSAADI, A. S., GHAF FOUR, N., LI, J.-D., GRAY, S., FRANCIS, L., MAAB, H. & AMY, G. L. 2013. Modeling of air-gap membrane distillation process: A theoretical and experimental study. *Journal of membrane science*, 445, 5365.
- ATIKAH MOHD NASIR, P., ADAM, M. R., AQMAR, S. N. E., KAMAL, M., MOHD, J. J., OTHMAN, H. D., ISMAIL, A. F., AZIZ, F., YUSOF, N., BILAD, M. R., MOHAMUD, R.,

- RAHMAN, M. A. & SALLEH, W. N. W. 2022. A Review of The Potential of Conventional and Advanced Membrane Technology in The Removal of Pathogens From Wastewater. *Separation and Purification Technology* 286
- ATTIA, H., OSMAN, M., JOHNSON, D., WRIGHT, C. & HILAL, N. 2017. Modelling of air gap membrane distillation and its application in heavy metals removal. *Desalination*, 424, 2736.
- BANDINI, S., SAAVEDRA, A. & SARTI, G. 1997. Vacuum Membrane Distillation *Aische Journal*, 43(2).
- BERNARDO, P. & CLARIZIA, G. 2013. 30 Years of Membrane Technology for Gas Separation. *Chemical Engineering Transaction*.
- CALIBO, R. L., MATSUMURA, M., TAKAHASHI, J. & KATAOKA, H. 1987. Ethanol stripping by pervaporation using porous PTFE membrane. *J.Ferment Technol*, 65, 665-674.
- CAMACHO, L. M., DUMÉE, L., ZHANG, J., LI, J.-D., DUKE, M., GOMEZ, J. & GRAY, S. 2013. Advances in membrane distillation for water desalination and purification applications. *Water*, 5, 94-196.
- CHEN, G., LU, Y., YANG, X., WANG, R. & FANE, A. 2014. Quantitative study on crystallization-induced scaling in highconcentration direct-contact membrane distillation. *Industrial dan Engineering Chemistry Research*, 53(40).
- CHRISTIE, K. 2023. Membrane distillation–crystallization for sustainable carbon utilization and storage. *Environmental Science & Technology*, 57(43).
- DINDORE, V., BRILMAN, W., GEUZEBROEK, F. & VERSTEEG, G. 2004. Membrane–solvent selection for co2 removal using membrane gas–liquid contactors. *Separation and Purification Technology*, 40(2), 133-145.
- DRIOLI, E. 2018. *Membrane Distillation*, Mdpi AG.

- ENRICO DRIOLI, A. A., FRANCESCA MACEDONIO 2015. Membrane distillation: Recent developments and perspectives, Desalination. 356, 56-84.
- ERNAWATI, S., SRI, E. R., SUPRIHATIN & YENISBAR 2019. Potensial Medisinal Karamunting (Rhodomyrtus Tomentosa), Jakarta, Unas Press.
- ESSALHI, M. & KHAYET 2015a. Progress In Filtration and Separation. Elsevier.
- ESSALHI, M. & KHAYET, M. 2013. Self-sustained webs of polyvinylidene fluoride electrospun nanofibers at different electrospinning times: 1. Desalination by direct contact membrane distillation. Journal of membrane science, 433, 167-179.
- ESSALHI, M. & KHAYET, M. 2015b. Fundamentals of membrane distillation. Pervaporation, vapour permeation and membrane distillation. Elsevier.
- FEBRIANI, Y. 2015. Distilasi Membran Dalam Pengolahan Air dan Limbah. 5, 5-11.
- FRANCIS, L., GHAFFOUR, N., ALSAADI, A. & AMY, G. 2013. Material gap membrane distillation: a new design for water vapor flux enhancement. Journal of Membrane Science, 448, 240-247.
- FUJII, Y., KIGOSHI, S., IWATANI, H. & AOYAMA, M. 1992. Selectivity and characteristics of direct contact membrane distillation type experiment. I. Permeability and selectivity through dried hydrophobic fine porous membranes. Journal of membrane science, 72, 53-72.
- GHANI, R. A., ELMA, M., RAHMA, A. & WAHYU, W. 2024. An Insight of TiO₂ and Spent Bleaching Earth (SBE) Effect of Phase Crystalline Structures for PVDF Hollow Fiber Membrane. Elkawnie: Journal of Islamic Science and Technology, 10, 143-157.

- GOSWAMI, K. P. & PUGAZHENTHI, G. 2020. Credibility of polymeric and ceramic membrane filtration in the removal of bacteria and virus from water: A review. *Journal of Environmental Management*.
- GRYTA, M., EVERSON, E. M., ŻYŁA, G., ROBIENIEC, P. & KUJAWSKI, W. 2009. Membrane Distillation: A Versatile Separation Process for Water and Wastewater Treatment. *Chemical Engineering Science*, 15, 3441-3451.
- GRYTA, M. & TOMASZEWSKA, M. 1998. Heat transport in the membrane distillation process. *Journal of membrane science*, 144, 211-222.
- GRYTA, M., TOMASZEWSKA, M. & MORAWSKI, A. 1997. Membrane distillation with laminar flow. *Separation and Purification Technology*, 11, 93-101.
- GUAN, G., YANG, X., WANG, R., FIELD, R. & FANE, A. 2014. Evaluation of hollow fiber-based direct contact and vacuum membrane distillation systems using aspen process simulation. *Journal of Membrane Science*, 464, 127-139.
- HARLING, V. N. V. 2020. Analisis Volume Air Tawar yang Dihasilkan dari Variasi Jarak antara Lensa pada Alat Penyulingan Air Laut. *Jurnal SOSCIED*, 3.
- HE, K., HWANG, H. & MOON, I. 2011. Air gap membrane distillation on the different types of membrane. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 28(3), 770-777.
- HEINZL, W., BÜTTNER, S. & LANGE, G. 2012. Industrialized modules for MED Desalination with polymer surfaces. *Desalination and water treatment*, 42, 177-180.
- ISAH, A., TAKAIJUDIN, H. & SINGH, B. 2022. Principles and modes of distillation in desalination process. *Desalination*.
- JAGGERS, R. W., CHEN, R. & BON, S. A. F. 2016. Control of Vesicle Membrane Permeability With Catalytic Particles. *Royal Society of Chemistry*.

- JUANG, R. S., LIN, S. H. & YANG, M. C. 2005. Mass transfer analysis on air stripping of VOCs from water in microporous hollow fibers. *Journal Membrane Science*, 255, 79-87.
- JUNG, W., CHOE, Y., KIM, T., OK, J., LEE, H. & KIM, Y. 2022. High-permeability vacuum membrane distillation utilizing mechanically compressed carbon nanotube membranes. *RSC Advances*, 12(1), 201-206.
- KARANASIOU, A., KOSTOGLU, M. & KARABELAS, A. 2018. An experimental and theoretical study on separations by vacuum membrane distillation employing hollow-fiber modules. *Water*, 10(7).
- KARANIKOLA, V., CORRAL, A., JIANG, H., SAEZ, A., ELA, W. & ARNOLD, R. 2017. Effects of membrane structure and operational variables on membrane distillation performance. *Journal of Membrane*, 524.
- KEBRIA, M. R. S. & RAHIMPOUR, A. 2020. Membrane distillation: basics, advances, and applications. *Advances in membrane technologies*.
- KHAYET, M. 2011a. Membranes and theoretical modeling of membrane distillation: A Review. *Advances in Colloid and Interface Science*. 164, 56-88.
- KHAYET, M. 2011b. Membranes and theoretical modeling of membrane distillation: A review. *Advances in colloid and interface science*, 164, 56-88.
- KHAYET, M. & MATSUURA, T. 2004. Pervaporation and vacuum membrane distillation processes: modeling and experiments. *AICHEJ*, 50, 1697-1712.
- KHAYET, M. & MATSUURA, T. 2011a. Membrane distillation, Elsevier.
- KHAYET, M. & MATSUURA, T. 2011b. Thermally induced phase separation for MD membrane formation. *Membrane Distillation*, 89-120.

- KHAYET, M., MATSUURA, T., MENGUAL, J. & QTAISHAT, M. 2006. Design of novel direct contact membrane distillation membranes. *Desalination*, 192, 105-111.
- KORNGOLD, E. & KORIN, E. 1993. Air sweep water pervaporation with hollow fiber membranes. *Desalination*, 91, 187-197.
- KOYUNCU, B. N. & TOPRAK, Z. 2019. Membran distillation for desalination: A review of recent trends and emerging perspectives. *Desalination and Water Treatment*, 125, 1-24.
- KRISDIARTO, A. W., FERHAT, A. & BIMANTIO, M. P. 2020. Penyediaan Air Bagi Masyarakat Pesisir Terdampak Kekeringan dengan Teknologi Desalinasi Air Laut Sederhana. *JURNAL PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT DIKEMAS*, 4.
- LAWSON, K. W. & LLOYD, D. R. 1997. Membrane distillation. *Journal of membrane Science*, 124, 1-25.
- LEE, J.-G., ALSAADI, A. S., KARAM, A. M., FRANCIS, L., SOUKANE, S. & GHAF FOUR, N. 2017. Total water production capacity inversion phenomenon in multi-stage direct contact membrane distillation: A theoretical study. *Journal of membrane science*, 544, 126-134.
- LINGO, J., BERG, J. W. V. D. & HOEKSTRA, A. Y. 2010. Membrane Distillation: A Versatile Separation Process for Water and Wastewater Treatment. *Desalination and Water Treatment*, 1-3, 232-245.
- LOKARE, O., TAVAKKOLI, S., WADEKAR, S., KHANNA, V. & VIDIC, R. 2017. *Fouling* in direct contact membrane distillation of produced water from unconventional gas extraction. *Journal of membrane Science*, 524, 493-501.
- LU, K.-J., WANG, P. & CHUNG, T.-S. 2021. Chapter 23 - Hollow fiber membranes for membrane distillation applications. In: CHUNG, T.-S. & FENG, Y. (eds.) *Hollow Fiber Membranes*. Elsevier.

- LU, K., ZUO, J., CHANG, J., KUAN, H. & CHUNG, T. 2018. Omniphobic hollow-fiber membranes for vacuum membrane distillation. *Environmental Science & Technology*, 52(7), 4472-4480.
- LU, Y. & LIAO, A. 2013. Modeling and experimental study on airgap membrane distillation. *Asian Journal of Chemistry*, 25(12), 6873-6876.
- MA, X., YAO, Z. K., YANG, Z., GUO, H., XU, Z. L., TANG, C. Y. & ELIMELECH, M. 2018. Nanofoaming of Polyamide Desalination Membranes of Tune Permability and Selectivity. *Enviromental Science and Technology Letters*.
- MAHMUD, H., KUMAR, A., NARBAITZ, R. M. & MATSUURA, T. 1998. Membrane air stripping: a process for removal of organics from aqueous solutions. *Sep. Sci. Technol*, 33, 2241-2255.
- MANNELLA, G., CARRUBBA, V. & BRUCATO, V. 2011. Evaluation of vapor mass transfer in various membrane distillation configurations: an experimental study. *Heat and Mass Transfer*, 48(6), 945-952.
- MEIDINARIASTY, A. 2019. Uji Kinerja Membran Mikrofiltrasi Dan Reverse Osmosis Pada Proses Pengolahan Air Reservoir Menjadi Air Minum Isi Ulang. *KINETIKA*, 10, 35-41.
- MEINDERSMA, G. W., GUIJT, C. M. & DE HAAN, A. B. 2006. Desalination and water recycling by air gap membrane distillation. *Desalination*, 187, 291-301.
- MENGUAL, J., KHAYET, M. & GODINO, M. 2004. Heat and mass transfer in vacuum membrane distillation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 865-875.
- MONEER, A. A. 2023. The potential of hybrid electrocoagulationmembrane separation processes for performance enhancement and membrane *fouling* mitigation: A review National Institute of Oceanography and Fisheries, NIOF, Cairo, Egypt, 269-282.

- MONIS BIN ABID, R. A. W., MOHAMED ABDEL SALAM, IQBAL AHMED MOUJDIN, LASSAAD GZARA 2023. Desalination technologies, membrane distillation, and electrospinning, an overview. *Heliyon*, 9.
- NAGY, E. 2019. Chapter 19 - Membrane Distillation. In: NAGY, E. (ed.) *Basic Equations of Mass Transport Through a Membrane Layer (Second Edition)*. Elsevier.
- NAIDU, G., SHIM, W., JEONG, S., CHOI, Y., GHAF FOUR, N. & VIGNESWARAN, S. 2017. Transport phenomena and *fouling* in vacuum enhanced direct contact membrane distillation: experimental and modelling. *Separation and Purification Technology*, 172, 285-295.
- PANGARKAR, B., DESHMUKH, S., SAPKAL, V. & SAPKAL, R. 2016. Review of membrane distillation process for water purification. *Desalination and Water Treatment*, 57, 2959-2981.
- PARK, S. & LEE, S. 2019. Influence of hydraulic pressure on performance deterioration of direct contact membrane distillation (dcmd) process. *Membranes*, 9(3), 37.
- PENG, Y., DING, J. & LI, B. 2015. Vacuum membrane distillation for desalination: An overview and outlook. *Journal of Membrane Science*, 479, 272-281.
- PHATTARANAWIK, J., JIRARATANANON, R. & FANE, A. G. 2003. Heat transport and membrane distillation coefficients in direct contact membrane distillation. *Journal of membrane science*, 212, 177-193.
- PRAWIRA, J. 2017. Karakteristik Membran Dan Pengaruhnya Terhadap Kinerja Proses Distilasi Membran. *Delft University of Technology*, 3, 0-11.
- PUJA, I. G. K. & SAMBADA, F. R. 2022. Efek Karbon Nano Pada Efisiensi Distilasi Air Energi Matahari. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 17, 231-240.
- RAGETISVARA, A. A. & TITAH, H. S. 2021. Studi kemampuan desalinasi air laut menggunakan sistem Sea Water Reverse

- Osmosis (SWRO) pada kapal pesiar. *Jurnal Teknik ITS*, 10, F68-F75.
- RAVAL, H. & SUNDARKUMAR, V. 2018. Low-Energy Reverse Osmosis Membrane with High Boron Rejection by Surface Modification with a Polysaccharide. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*.
- SAGLE, A. & FREEMAN, B. 2023. *Fundamentals of Membranes for Water Treatment*. University of Texas at Austin.
- SAID, N. I. 2010. *Pengolahan payau menjadi air minum dengan teknologi Reverse Osmosis*, Jakarta.
- SANMARTINO, J. A., KHAYET, M., GARCÍA-PAYO, M., HANKINS, N. & SINGH, R. 2016. Desalination by membrane distillation. *Emerging membrane technology for sustainable water treatment*, 77-109.
- SHIRAZI, M. M. A., BASTANI, D., KARGARI, A. & TABATABAEI, M. 2013. Characterization of polymeric membranes for membrane distillation using atomic force microscopy. *Desalination and Water Treatment*, 51, 6003-6008.
- SHUKLA, S., MERICQ, J., BELLEVILLE, M., HENGL, N., BENES, N., VANKELECOM, I. & SANCHEZ-MARCANO, J. 2018. Process intensification by coupling the joule effect with pervaporation and sweeping gas membrane distillation. *Journal of Membrane Science*, 545, 150-157.
- SMOLDERS, C. & FRANKEN, A. 1989. Terminology for membrane distillation. *Desalination*, 72, 249-262.
- SOUHAIMI, M. K., KHAYET, M. & MATSUURA, T. 2011. *Membrane distillation: principles and applications*.
- SULAEMAN, O. 2018. *Desain Pengolahan Air Menggunakan Membran Ultrafiltrasi Kapasitas 50M³/Hari*. *JRL*, 11, 37-44.
- SUSILAWATY, A., AMANSYAH, M. & NILDAWATI 2016. Kerentanan Ketersediaan Air Bersih di Daerah Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil Sulawesi Selatan Indonesia Al-Sihah : *Public Health Science Journal*, 8.

- TAKEDA, M. & MANAKA, M. 2018. Effect of Confining Stress on the Semi Permeability of Siliceous Mudstone : Implication for Identifying Geologin Membrane Behavior of Argillaceuos Formations. *Geophysical Research Letters*.
- TAMBA, F. Y. M., SEPTIADI, W. N. & ASTAWA, K. 2019. Koefisien Perpindahan Panas Sumbu Kapiler Pipa Kalor berbasis Sintered Powder Tembaga pada Fluida Kerja Hybrid Nanofluida $Al_2O_3-TiO_2-H_2O$ dengan Komposisi Ratio 50%: 50%. *Jurnal METTEK Volume, 5*, 20-25.
- UPADHYAYA, L. & NENE, S. 2015. Membrane Distillation and Osmotic Membrane Distillation in Downstream Processing. *Current Biochemical Engineering*, 2, 102-110.
- VILADOMAT, F. G., SOUCHON, I., ATHES, V. & MARIN, M. 2006. Membrane air-stripping for aroma compounds. *Journal Membrane Science*, 277, 129-136.
- WARSINGER, D., SWAMINATHAN, J. & LIENHARD, J. 2014. Effect of module inclination angle on air gap membrane distillation.
- WARSINGER, D., SWAMINATHAN, J., MORALES, L. & LIENHARD, J. 2018. Comprehensive condensation flow regimes in air gap membrane distillation: visualization and energy efficiency. *Journal of Membrane Science*, 555, 517528.
- WENTEN, I. G., KHOIRUDDIN, ARYANTI, P. T. P. & HAKIM, A. N. 2010. *Pengantar Teknologi Membran*, Bandung, Dep. Teknik Kimia ITB.
- WINTER, D., KOSCHIKOWSKI, J. & WIEGHAUS, M. 2011. Desalination using membrane distillation: Experimental studies on full scale spiral wound modules. *Journal of Membrane Science*, 375, 104-112.
- XIANG, J., WANG, S., CHEN, N., WEN, X., TIAN, G., ZHANG, L., CHENG, P., ZHANG, J. & TANG, N. 2023. Study on Low Thermal-Conductivity of PVDF@ SiAG/PET Membranes for Direct Contact Membrane Distillation Application. *Membranes*, 13, 773.

- YANG, E., HAM, M. H., PARK, H. B., KIM, C. M., SONG, J. H. & KIM, I. S. 2017. Tunable Semi-Permeability of GrapheneBased Membranes by Adjusting Reduction Degree of Laminar Graphene Oxide Layers. *Journal of Membrane Science*.
- ZARRABI, M. H., AGHAJARI, A. & SADRZADEH, A. 2022. Membrane Distillation Treatment for Achieving High Water Recovery During Water Reclamation for Potable Reuse. *Membranes*, 1, 71.
- ZENG, T., DENG, L., CHEN, J., HUANG, H. & ZHUANG, H. 2022. Numerical Analysis of Conjugated Heat and Mass Transfer of Helical Hollow Fiber Membrane Tube Bank for Seawater Distillation. *J. Renew. Mater*, 10, 1845.
- ZHANG, J., LI, N., NG, D., IKE, I., XIW, Z. & GRAY, S. 2019. Depletion of voc in wastewater by vacuum membrane distillation using a dual-layer membrane: mechanism of mass transfer and selectivity. *Environmental Science Water Research & Technology*, 5(1), 119-130.
- ZHANG, Y., WANG, X., CUI, Z., DRIOLI, E., WANG, Z. & ZHAO, S. 2017. Enhancing wetting resistance of poly (vinylidene fluoride) membranes for vacuum membrane distillation. *Desalination*, 415, 58-66.
- ZHAO, S., FERON, P., XIE, Z., ZHANG, J. & HOANG, M. 2014. Condensation studies in membrane evaporation and sweeping gas membrane distillation. *Journal of Membrane Science*, 462, 9-16.
- ZHONG, L., AN, L., HAN, Y., ZHU, Z., LIU, D., LIU, D., ZUO, D., WANG, W. & MA, J. 2021. In Situ Three-Dimensional Welded Nanofibrous Membranes for Robust Membrane Distillation of Concentrated Seawater. *Environmental Science & Technology*, 55, 11308-11317.
- ZHONG, W., LI, Q., ZHAO, X. & CHEN, S. 2020. Membrane preparation for unconventional desalination by membrane distillation and pervaporation. *Membranes for Environmental Applications*, 265-293.

ZUO, G. & WANG, R. 2013. Novel membrane surface modification to enhance anti-oil *fouling* property for membrane distillation application. *Journal of membrane science*, 447, 26-35.

GLOSARIUM

Absorpsi: Proses di mana satu zat, seperti cairan atau gas, diserap oleh zat lain, sering kali melalui permukaan, sehingga partikel-partikelnya menyebar ke dalam volume zat yang menyerapnya.

Desalinasi: Proses penghilangan garam dan mineral dari air laut atau air asin untuk menghasilkan air tawar yang dapat digunakan untuk konsumsi manusia atau pertanian.

Difusi: Proses di mana partikel bergerak dari area dengan konsentrasi tinggi ke area dengan konsentrasi rendah hingga mencapai kesetimbangan, sering terjadi pada gas atau cairan.

Distilasi: Metode pemisahan campuran cairan berdasarkan perbedaan titik didih, di mana campuran dipanaskan sehingga komponen yang lebih mudah menguap akan menguap terlebih dahulu, kemudian dikondensasikan kembali menjadi cairan murni.

Fasa: Keadaan materi, seperti padat, cair, atau gas, yang menunjukkan bagaimana atom atau molekulnya tersusun dan berinteraksi pada kondisi tertentu.

Feed Bulk: Bahan mentah atau campuran yang dipasok dalam jumlah besar ke dalam sistem untuk diproses, misalnya dalam sistem pemrosesan atau filtrasi. **Filtrasi:** Proses pemisahan partikel padat dari cairan atau gas dengan menggunakan media berpori, seperti kertas saring atau filter lain, yang memungkinkan fluida melewati sambil menyaring material padat.

Fluida: Zat yang dapat mengalir dan berubah bentuk dengan mudah, seperti cairan atau gas, yang partikelnya bergerak bebas satu sama lain.

Fluks: Laju aliran suatu zat, seperti cairan atau gas, melalui suatu area atau permukaan, sering digunakan dalam konteks perpindahan materi atau energi.

Fouling: Penumpukan material asing, seperti endapan, mikroorganisme, atau kotoran lainnya, pada permukaan alat atau membran, yang menyebabkan penurunan efisiensi sistem atau alat tersebut.

Fraksi: Bagian atau proporsi tertentu dari suatu campuran yang melewati atau ditahan oleh membran selama proses pemisahan, seperti fraksi padatan, cairan, atau gas yang terpisah berdasarkan ukuran atau sifatnya.

Kapiler: Saluran mikroskopis yang ada dalam struktur membran yang memungkinkan cairan atau gas bergerak melalui membran melalui aksi kapilaritas, terutama dalam proses filtrasi skala kecil atau pemisahan molekul.

Koefisien: Nilai yang menggambarkan tingkat kemampuan suatu zat, seperti air atau gas, melewati membran. Koefisien ini menunjukkan seberapa efektif membran dalam memungkinkan pergerakan fluida atau gas berdasarkan tekanan atau konsentrasi tertentu.

Komposit: Material yang dibuat dari gabungan dua atau lebih komponen yang berbeda, yang bekerja bersama untuk memberikan sifat yang lebih baik daripada bahan individualnya.

Komposit: Material yang terbentuk dari kombinasi dua atau lebih bahan yang berbeda, yang disatukan untuk memperoleh sifat-sifat unggul yang tidak dimiliki oleh masing-masing bahan secara individu.

Kondensasi: Proses perubahan bentuk zat dari gas menjadi cairan, biasanya terjadi ketika gas mendingin dan partikel-partikelnya menyatu menjadi tetesan cairan.

Laten: Energi yang tersimpan dalam suatu sistem, terutama terkait dengan perubahan wujud zat tanpa perubahan suhu yang signifikan, seperti energi laten selama proses penguapan atau peleburan.

Membran: Sebuah lapisan tipis yang bersifat selektif dan digunakan untuk memisahkan zat berdasarkan ukuran atau sifat kimianya. Membran biasanya memungkinkan partikel tertentu melewatinya, sementara partikel lain ditahan.

Mikropori: Pori-pori dengan ukuran sangat kecil pada material atau permukaan, yang biasanya digunakan dalam proses penyaringan untuk menahan partikel yang sangat kecil sambil membiarkan zat lain melewati.

Modul Membran: Unit fungsional yang terdiri dari membran dan komponen pendukungnya yang digunakan dalam sistem filtrasi atau pemisahan untuk memproses fluida.

Patogen: Organisme mikroskopis seperti bakteri, virus, atau jamur yang dapat menyebabkan penyakit pada makhluk hidup, termasuk manusia, hewan, atau tumbuhan.

Permeat: Cairan atau gas yang berhasil melewati lapisan penyaring atau membran selama proses pemisahan, di mana kontaminan atau partikel yang lebih besar tertinggal.

Pulp: Massa serat yang diperoleh dari bahan mentah seperti kayu atau tanaman, yang biasanya digunakan dalam industri kertas atau pembuatan bahan lainnya.

Termal: Berhubungan dengan panas atau suhu, sering digunakan untuk menggambarkan sifat-sifat material yang terkait dengan penyerapan, pelepasan, atau transfer energi panas.

Tubular: Berbentuk seperti tabung atau silinder, biasanya digunakan untuk menggambarkan struktur dalam sistem perpipaan atau filtrasi.

Volatil: Kemampuan suatu zat untuk mudah menguap atau berubah dari bentuk cair menjadi gas pada suhu rendah, sering kali terkait dengan zat-zat kimia yang mudah menguap.