

TEORI DASAR MEMBRAN

Kiki Rezki Lestari

BUKU AJAR

TEORI DASAR MEMBRAN

KIKI REZKI LESTARI

LP UNAS

Teori Dasar Membran

Oleh : Kiki Rezki Lestari

Hak Cipta© 2020 pada Penulis

Editor : Fitri Rahma
Penyunting : Fitria Hidayanti
Desain Cover : Erna Kusuma Wati

ISBN: 978-623-7376-73-6

Hak Cipta dilindungi Undang-undang.

Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanis, termasuk memfotocopy, merekam atau dengan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin dari Penulis.

Penerbit : LP_UNAS

Jl.Sawo Manila, Pejaten Pasar Minggu, Jakarta Selatan

Telp. 021-78067000 (Hunting) ext.172

Faks. 021-7802718

Email : bee_bers@yahoo.com

ISBN 978-623-7376-73-6



KATA PENGANTAR

Dalam pembuatan buku ajar **Teori Dasar Membran** ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada beberapa pihak yang telah banyak membantu. Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. El Amry Bermawi Putra, MA selaku Rektor Universitas Nasional
2. Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Nasional
3. LP Unas
4. Jajaran dosen dan karyawan di lingkungan Universitas Nasional

Demikianlah semoga buku ajar **Teori Dasar Membran** ini dapat bermanfaat bagi mahasiswa termasuk mahasiswa Program Studi Teknik Fisika Universitas Nasional. Tentunya dalam pembuatan buku ajar ini, tidak luput dari kesalahan. Untuk itu, kami mohon masukan dari para pembaca untuk perbaikan buku ajar ini.

Jakarta, November 2020

Penulis

Kiki Rezki Lestari

DAFTAR PUSTAKA

BAB 1. IKHTISAR ILMU PENGETAHUAN DAN TEKNOLOGI MEMBRAN	1
1.1. Definisi Membran.....	1
1.2. Perkembangan Sejarah Dan Kunci Teknologi Membran	7
<i>1.2.1 Kontribusi Penelitian Membran Sebelum Tahun 1900</i>	<i>7</i>
<i>1.2.2 Kontribusi Penelitian Membran Setelah Tahun 1900</i>	<i>13</i>
1.3. Ilmu Membran.....	28
1.4. Teknologi Membran	29
1.5. Proses Pemisahan Membran	35
1.6. Bahan Membran	38
1.7. Bahan Membran Anorganik.....	41
1.8. Bahan Membran Organik: Polimer.....	46
<i>1.8.1 Evaluasi Membran</i>	<i>49</i>

1.8.2 Karakteristik Evaluasi Membran	51
1.8.3 Fluks Filtrasi	52
Ringkasan	54
Daftar Pustaka	55
BAB 2. <u>MEMBRANE FOULING</u> DAN STRATEGI UNTUK KONTROL PEMBERSIHAN DAN PENGOTOR.....	68
2.1. Pelanggaran Membran.....	68
2.1.1 Definisi Membrane Fouling	69
2.1.2 Pelanggar.....	71
2.1.3 Klasifikasi Fouling	73
2.1.4 Pelanggaran Koloid (Partikulat)	75
2.1.5 Pelanggaran Organik.....	77
2.1.6 Pelanggaran Anorganik	80
2.1.7 Biofouling	83
2.1.8 Faktor yang Mempengaruhi Fouling ...	87
2.1.9 Penurunan Fluks.....	99
2.1.10 Polarisasi Konsentrasi Dan Tekanan Osmotik.....	100

2.1.11 Tekanan Osmotik	105
2.2. Mekanisme Fouling	106
2.3. Fouling Membran Yang Dapat Dibalik Dan Tidak Dapat Dipulihkan	115
2.4. Strategi Pembersihan Membran	122
2.4.1 Kategori Metode Pembersihan	123
2.4.2 Suhu dan Waktu Pembersihan.....	148
2.5. Pengurangan Fouling Dengan Modifikasi Dan Pelapisan	151
2.5.1 Modifikasi Membran oleh Nanomaterials	155
Kesimpulan	159
Daftar Pustaka	162
BAB 3. KLASIFIKASI MEMBRAN BERDASARKAN BAHAN PEMBENTUKNYA	177
3.1. Pendahuluan	177
3.2. Klasifikasi Berdasarkan Bahan	181
3.2.1 Membran Sintetis	183
3.2.2 Membran Anorganik.....	184

3.2.3 Membran Organik.....	191
3.2.4 Poliamida	193
3.2.5 Polimer Selulosa	195
3.2.6 Polisulfon	196
3.2.7 Polimer Berbasis Hidrokarbon	198
3.2.8 Fluoropolimer.....	200
3.2.9 Polikarbonat	201
Kesimpulan	202
Daftar Pustaka	203

BAB 1.

IKHTISAR ILMU PENGETAHUAN DAN TEKNOLOGI MEMBRAN

1.1. Definisi Membran

Membran didefinisikan sebagai lembaran, film, atau lapisan tipis, yang berfungsi sebagai penghalang selektif antara dua fase yang dapat berupa cairan, gas, atau uap. Dengan kata lain, membran adalah antarmuka antara dua fase yang peduli yang bertindak sebagai penghalang selektif, pengangkutan pengangkutan antara dua kompartemen (Ulbricht 2006).

Membran itu sendiri bisa berupa padat, cair, atau gel. Membran permukaan sebagai saringan molekuler yang dibuat dalam bentuk

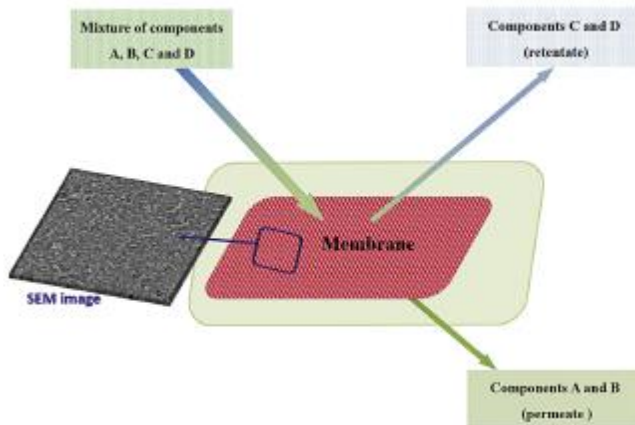
film dari satu bahan yang berlapis dengan jaring halus atau pori-pori kecil untuk memungkinkan pemisahan partikel dan molekul kecil. Ini penghalang sebagai penghalang selektif, memungkinkan zat tertentu melewatinya sambil menahan zat lain. Kemampuan membran untuk membedakan antar spesies disebut selektivitas. Membran digunakan untuk menyimpan zat terlarut, zat terlarut-zat terlarut, partikel-zat terlarut, dan partikel-pelarut.

Menurut European Membrane Society, membran adalah fase intervensi yang salah dua fase dan bertindak sebagai penghalang aktif

atau pasif untuk pengangkutan materi antara fase yang terhubung dengannya.

Membran bisa berpori atau tidak keropos. Dalam membran berpori, proses pemisahan campuran komponen yang melewati satu atau lebih komponen melalui membran (fraksi permeat) dan menolak komponen membran lainnya (fraksi retentasi). Retentate disebut konsentrat, karena merupakan media terkonsentrasi dari zat-zat yang ditolak. Misalnya, campuran komponen A, B, C, dan D dapat diakses oleh membran yang menolak C dan D sebagai fraksi retentat dan melewati komponen A dan B merembes fraksi melalui pori-pori membran seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.1. Kata membran digunakan untuk menunjukkan antarmuka atau wilayah

diskontinuitas antara dua fase. Membran mengontrol zona di mana senyawa merembes melaluinya. Dengan demikian, membran juga dapat didefinisikan sebagai penghalang, yang bertujuan untuk mencegah perembesan semua senyawa. Membran dapat mengontrol laju perembesan senyawa (Mulder 1996). Dengan demikian membran juga dapat dianggap sebagai media permeabel. Diperlukan energi yang diperlukan untuk menyelesaikan pemisahan zat atau komponen. Jumlah energi minimum, W_{min} , yang dibutuhkan untuk menyelesaikan pemisahan lebih besar dari entalpi bebas pencampuran seperti yang ditunjukkan oleh $W_{min} \geq \Delta G_m = \Delta H_m - T\Delta S_m$.



Gambar 1.1 Prinsip Proses Ideal Membran Berpori.

Proses membran adalah operasi di mana aliran umpan dibagi menjadi dua aliran: permeat dan retentate. Membran, seperti yang diterapkan pada pengolahan air, adalah bahan yang memungkinkan beberapa komponen fisik atau kimiawi lebih mudah melewatinya yang lain. Oleh karena itu, perm-selektif karena lebih

permeabel terhadap komponen-komponen yang melewatinya - permeat - yang ditolak olehnya - retentate (Judd 2011). Retensi, juga disebut konsentrat, biasanya diperkaya dengan zat yang peduli oleh membran. Malah, permeat atau filtrat adalah aliran yang melewati membran, tanpa zat yang peduli oleh membran. Peran membran adalah untuk mengubah komposisi larutan berdasarkan permeasi relatif dan secara fisik atau kimiawi perembesan untuk pembantuan laju permeasi. Dari sisi lain, untuk menghantarkan arus listrik, untuk mencegah perembesan - untuk retentasi. Bergantung pada kemampuan membran untuk mengubah sifat kimiawi yang

sifatnya bersifat pasif, membran dapat bersifat pasif atau reaktif. Oleh karena itu, berdasarkan sifat ioniknya, membran dapat diklasifikasikan menjadi membran netral atau membran bermuatan.

1.2. Perkembangan Sejarah Dan Kunci Teknologi Membran

Sejarah membran dimulai dengan perkembangan beberapa bahan sebagai membran alami atau sintesis untuk memisahkan gas dan uap.

1.2.1 Kontribusi Penelitian Membran Sebelum Tahun 1900

Thomas Graham melaporkan penggunaan membran karet datar untuk

mempelajari difusi gas dan spesies uap (Graham 1829; 1833). Dia melaporkan solusi, yang dia menggunakan karet sebagai cairan di mana gas larut dan berdifusi ke konsentrasi gradien. Pada 1748, ulama Prancis Abbé Jean-Antoine Nollet menemukan fenomena transportasi udara (Nollet 1748; 1779). Nollet menempatkan roh anggur di sebuah bejana. Mulut kapal ditutup dengan kandung kemih hewan, dan kemudian dia membenamkan wadah itu ke dalam udara. Karena lebih mudah ditembus udara anggur, kandung kemih kadang-kadang-kadang bahkan pecah, menunjukkan kemampuan semiper-meabilitas untuk pertama kalinya. Delapan puluh tahun

setelah itu, istilah osmosis diciptakan oleh ahli fisiologi Prancis Henri du Trochet (du Trochet 1828).

Mitchell melaporkan perembesan gas melalui karet alam (Mitchell 1831). Schoenbein melaporkan sintesis selulosa nitrat, polimer sintetik (atau semisintetik) pertama (Schoenbein 1846). Baterai hewan adalah contoh kelas biobateri, yang dapat dibuat dari banyak. Istilah umum untuk contoh kelas ini adalah tumpukan otot. Carlo Matteucci menciptakan baterai katak terkenal pertama pada tahun 1845, tetapi ada yang lain sebelum dia. Matteucci juga membuat baterai dari

hewan lain, dan Giovanni Aldini membuat baterai dari kepala sapi.

Fick membuat membran sintetik dari selulosa nitrat yang melayani sebuah partikel dalam studi klasiknya "Ueber Diffusion" untuk mendialisis cairan biologis (Fick 1855). Fick melakukan dialisis larutan melalui membran buatan yang terbentuk dari collodion. Berdasarkan eksperimennya, dia menerbitkan hukum difusi, yang masih digunakan. Graham bekerja dengan bakteri yang diisolasi dan "koloid dari kristaloid". Graham dikreditkan dengan menggunakan istilah dialisis saat dia melaporkan pengalaman dialisis dengan membran sintesis. Dia juga menunjukkan

bahwa film karet menunjukkan permeabilitas yang berbeda terhadap gas yang berbeda. Sebuah perangkat yang terdiri dari datar membran dengan ruang hampa di satu sisi dilaporkan untuk mengukur tingkat permeabilitas (Graham 1866). Graham mendalilkan untuk proses permeasi (Graham 1861; 1866). Tabel 1.1 merangkum di bidang teknologi membran yang dibuat sebelum tahun 1900.

Tabel 1.1 Kontribusi Penelitian Membran sebelum tahun 1900

Pengembangan	Penyumbang	Tahun
Penemuan fenomena osmosis pada membran alami	Nollet	1748

Penelitian tentang anisotropi membran alami	Matteucci	1845
Hukum difusi	Fick	1855
Dialisis, permeasi gas	Graham	1861
Membran sintetis dari nitrocellulosis	Fick	1865
Mekanisme transportasi difusi solusi	Graham	1866
Penelitian tentang pemisahan gas pada membran karet	Graham	1866
Penelitian tentang osmosis pada membran sintetis	Traube	1867
Penelitian tentang osmosis pada membran keramik	Pfeffer	1877

Penelitian tentang fenomena osmosis	Gibbs; van't Hoff	1897; 1888
Teori fenomena osmosis	Gibbs; van't Hoff	1897; 1888
Tekanan osmotik	Pfeffer; Traube; van't Hoff	1860– 1887

1.2.2 Kontribusi Penelitian Membran Setelah Tahun 1900

John William Strutt (1900) menentukan permeabilitas relatif oksigen, nitrogen, dan argon dalam karet (John William Strutt 1900). Kemudian, polimer membran digunakan untuk pemisahan gas, dan seterusnya (Glaser 1998; Matthes 1944). Traube dan Pfeffer menyiapkan membran buatan, dan mereka

mengembangkan hubungan tekanan osmotik van't Hoff sebagai hasil kerja mereka dengan fenomena osmotik. Bechold menciptakan istilah ultrafiltrasi pada tahun 1906 (Bechold 1907, Bechold & Schlesinger 1931). Michaels (1968) mengembangkan ultrafiltrasi lebih lanjut. Zsigmondy mengembangkan filter mikropori asimetris yang dibuat dengan kulit berpori halus pada sisi umpan dan struktur terbuka pada sisi permeat (Zsigmondy 1922). Membran ultrafiltrasi yang paling ketat terbuat dari plastik atau selulosa.

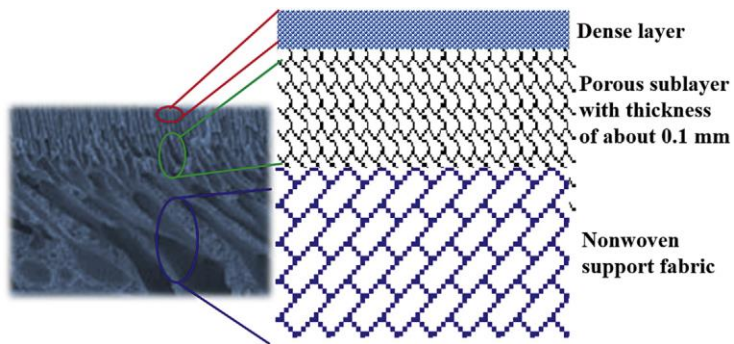
Reverse osmosis dimulai dan dipelajari pada tahun 1920-an. Itu ditemukan kembali oleh Reid dan rekan kerjanya pada 1950-an.

Fenomena praktis hemodialisis dikembangkan oleh Kolff (Kolff & Berk 1944). Reverse osmosis, juga disebut hiperfiltrasi, untuk desalinasi air laut diprakarsai oleh Kantor Air Saline untuk memenuhi kebutuhan air di masa mendatang. Karena ukuran pori yang besar, membran mikroporous tidak cocok untuk desalinasi (Sing, Hoffman & Judd 2006).

Reid dan Berton menemukan membran polimer yang dapat menunjukkan penolakan garam yang tinggi. Tantangan mereka adalah bahwa membrannya terlalu tebal dan membutuhkan pengecoran film tipis tanpa cacat. Karena ketebalannya sekitar 6,0 mm, yang tidak cukup untuk menghasilkan fluks

yang tinggi, fluks air tidak praktis. Masalah ini relatif terpecahkan ketika Loeb dan Sourirajan, selama 1958 hingga 1962, menemukan cara membuat membran asimetris dengan ketebalan kecil dan dengan ukuran pori yang terkontrol (Loeb 1981; Loeb & Sourirajan 1963). Membran tersebut dibuat dari lapisan tipis selulosa asetat yang didukung oleh substrat berpori selulosa asetat halus, menggunakan metode fase-inversi, dan disebut membran LS (Loeb & Sourirajan 1963). Perkembangan ini merupakan terobosan besar dalam teknik membran, dan terutama dalam proses pemisahan berbasis tekanan yang digunakan untuk pemurnian air. Ketika

dikarakterisasi di bawah mikroskop elektron oleh Riley pada tahun 1964, membran ditemukan terkelupas dengan ketebalan sekitar 0,1 mm (Lonsdale 1982).



Gambar 1.2 Representasi Dari Membran Berkulit Asimetris.

Membran berkulit (asimetris) memiliki lapisan atas seperti kulit dan sisi bawah memiliki pori-pori besar di atas kain pendukung bukan tenunan, yang memberikan kekuatan mekanis pada membran, seperti yang

diilustrasikan pada Gambar 1.2. Mereka mampu menghasilkan fluks 5 sampai 11 galon per kaki persegi per hari dari air NaCl 0,05%, di bawah tekanan 100 sampai 135 bar (g).

Westmoreland dan kemudian Bray menemukan modul spiral-luka, yang lebih efisien daripada modul tube-in-shell. Membran spiral-luka dapat dilihat sebagai susunan pelat-dan-rangka yang telah digulung. Modul asli memiliki selaput daun tunggal, sedangkan modul lilitan spiral modern berisi selaput multileaf.

Setelah itu, membran serat berongga selulosa triasetat dan sarana untuk memodularisasi serat ini dikembangkan oleh

Mahon, McLain dan lain-lain (Mahon 1966; McLain 1969; McLain dan Mahon 1969). Namun, perkembangan yang cukup kompetitif dengan membran tipe LS, membran poliamida aromatik serat berongga, dibuat oleh Henry Hoehn dan George Milford di DuPont pada akhir 1960-an. Membran ini dibuat dengan larutan yang dipintal menjadi serat berlubang dengan diameter dalam 42 mm dan diameter luar 85 mm dengan struktur berkulit pada sisi cangkang. Meskipun fluks air jauh di bawah yang ditunjukkan oleh membran selulosa asetat, penolakan garam lebih tinggi. Oleh karena itu, untuk meningkatkan fluks, diperlukan beberapa ratus ribu serat untuk

dimasukkan ke dalam modul yang berisi beberapa ribu kaki persegi luas membran. Perkembangan ini adalah kunci untuk pengembangan ultrafiltrasi serat-berongga dan mikrofiltrasi. Tabel 1.2 dan 1.3 meringkas pencapaian di bidang teknologi membran setelah 1900 (Ferry 1936; Kołtuniewicz 2006; Koros 2004; Loeb & Sourirajan 1963; Loeb 1981; Lonsdale 1982; 1987; Michaels 1968; Petersen 1993; Strathmann 2001).

Tabel 1.2 Kontribusi Penelitian Membran selama 1900–1950

Pengembangan	Penyumbang	Tahun
Efek afinitas dalam ultrafiltrasi	Bechold	1907

Hukum distribusi ion (Hukum distribusi)	Donnan	1911
Pervaporasi	Kober	1916
Membran mikro	Zigmondy	1907– 1918
Penelitian tentang dialisis	Abel	1926
Penelitian tentang reverse osmosis	Manegold; McBain; Michaels	1926– 1931
Deskripsi prosedur hemodialisis	Abel; Haas	1913
Penelitian tentang elektrodialisis	Penatua I in	1934
Potensi membran	Meyer; Teorell; Pengayak	1930- an
Hemodialisis	Kolff	1944

Tabel 1.3 Kontribusi Penelitian Membran Setelah 1950

Pengembangan	Penyumbang	Tahun
Pemisahan gas pada karet silikon	Kammermeyer	1957
Pervaporasi campuran azeotropik	Kammermeyer	1957
Membran berkulit	Loeb & Sourirajan	1959
Penelitian tentang membran komposit	Lonsdale	1960
Sintesis membran asimetris dan pengontrolan ukuran pori pada membran	Loeb & Sourirajan	1962
Membran kapiler	Mahon	1963
Polarisasi konsentrasi	Merten	1963

Membran serat berongga	Mahon	1966
Model transportasi membran	Katachalsky; Kedem; Loeb & Sourirajan; Lonsdale; Merten; Pusch	1960– 1970
Elemen membran luka spiral	Meringkik; Westmoreland	1965– 1970
Membran RO serat berongga	Hoehn; Mahon; Milford	1965– 1970
Membran komposit film tipis	Cadotte & Rozelle	1977
Klasifikasi proses yang digerakkan oleh tekanan	Porter	1975
Model transportasi yang difasilitasi	Goddard	1977

Membran dengan pembawa yang tidak bisa bergerak	LeBlanc	1980
Deskripsi transportasi yang difasilitasi dalam membran	LeBlanc	1980
Membran dengan pusat aktif	Yoshikawa	1986
Model transportasi rantai yang difasilitasi	Aris; Cokelat; Cussler	1989
Proses membran hibrida	Rautenbach	1990

Pada 1970-an, Cadotte dan Rozelle mengembangkan membran komposit film tipis untuk aplikasi osmosis balik. Membran ini terbuat dari polimer poliamida yang diendapkan pada penyangga membran

polisulfon dengan reaksi polimerisasi antarmuka (Schafer, Fane & Waite 2004). Pada tahun 1984, Petersen mengembangkan aplikasi lain dengan menggunakan membran seperti itu, yang disebutnya nanofiltrasi (Petersen 1993). Merangsang dari teknologi ini, Henis dan Tripodi membuat pemisahan gas industri menjadi ekonomis dengan memanfaatkan pengalaman perkembangan dalam membran dan modul osmosis balik. Hal ini juga mengarah pada pengembangan beberapa modul membran dan aplikasinya di pasar, seperti modul luka spiral dengan selulosa asetat dan membran poliamida komposit film tipis, membran serat berongga poliamida,

Tabel 1.4 Beberapa Modul Membran dan Aplikasinya di Pasar

Membran atau Modul	Aplikasi
Membran luka spiral selulosa asetat	Pengolahan air industri dan kota
Membran reverse osmosis komposit film tipis dengan luka spiral	Desalinasi air dan produksi air dengan kemurnian tinggi
Membran reverse osmosis serat-berongga	Desalinasi air laut
Ultrafiltrasi serat berongga dan membran mikrofiltrasi	Aplikasi industri

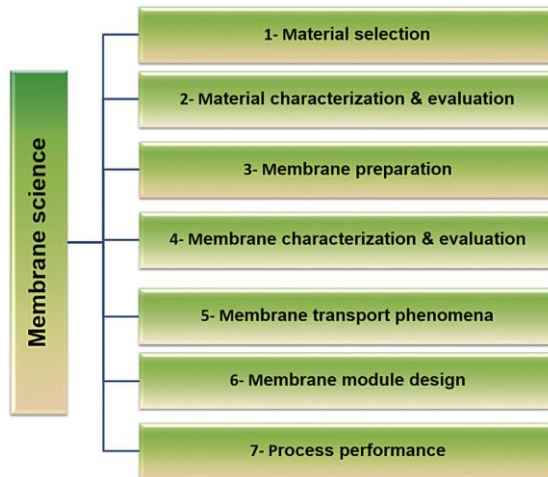
Memahami mekanisme transportasi air melalui membran adalah poin kunci untuk perkembangan osmosis balik. Pada 1960-an, Sourirajan mengembangkan model aliran serapan-kapiler preferensial berdasarkan asumsi bahwa permukaan membran memiliki

pori-pori. Mekanisme lain adalah model yang disebut model aliran difusi solusi, yang didasarkan pada asumsi permukaan membran bebas pori. Ini pertama kali digunakan oleh Ferry pada tahun 1936, untuk menjelaskan permeasi gas, uap, dan cairan organik melalui membran padat, tidak berpori, homogen, dan bebas cacat (Ferry 1936). Hal ini didasarkan pada asumsi bahwa spesies diserap oleh membran pada satu antarmuka, diangkut melalui difusi melintasi membran melalui celah antara rantai polimer, dan didesorpsi pada antarmuka lainnya.

1.3. Ilmu Membran

Ilmu membran adalah bidang yang berhubungan dengan pengembangan material untuk desain membran dan kinerja prosesnya. Oleh karena itu, ilmu membran dapat secara sederhana dikategorikan menjadi pemilihan bahan, karakterisasi dan evaluasi bahan, persiapan membran, karakterisasi dan evaluasi membran, fenomena transpor membran, desain modul membran, dan kinerja proses (Meares 1976; Turbak 1981; Starzak 1984). Masing-masing dari kategori ini berhubungan dengan studi tentang permeasi dan media permeabel, yang merupakan membran (Lloyd

1985). Kategori dasar ilmu material diilustrasikan pada Gambar 1.3.



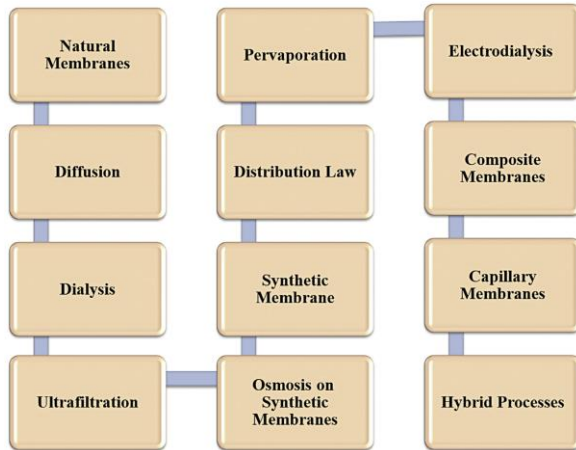
Gambar 1.3 Kategori Dasar Ilmu Material.

1.4. Teknologi Membran

Teknologi membran mencakup pendekatan ilmiah dan teknik terkait untuk pengangkutan atau penolakan komponen,

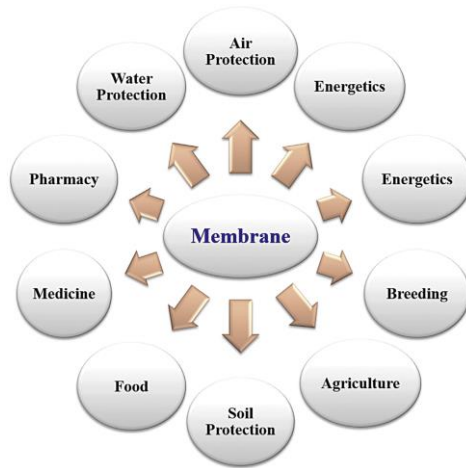
spesies, atau zat melalui atau oleh membran. Teknologi membran digunakan untuk menjelaskan proses pemisahan mekanis untuk memisahkan aliran gas atau cairan (Baker 2004; Nunes & Peinemann 2001). Beberapa langkah utama dalam pengembangan teknologi membran tercantum pada Gambar 1.4.

Karena sifat multidisiplinnya, teknologi membran digunakan di beberapa industri, termasuk pengolahan air untuk pasokan air rumah tangga dan industri, kimia, farmasi, bioteknologi, minuman, makanan, metalurgi, dan proses pemisahan lainnya.



Gambar 1.4 Beberapa Langkah Utama Dalam Pengembangan Teknologi Membran.

Representasi skematis dari aplikasi proses membran digambarkan pada Gambar 1.5.

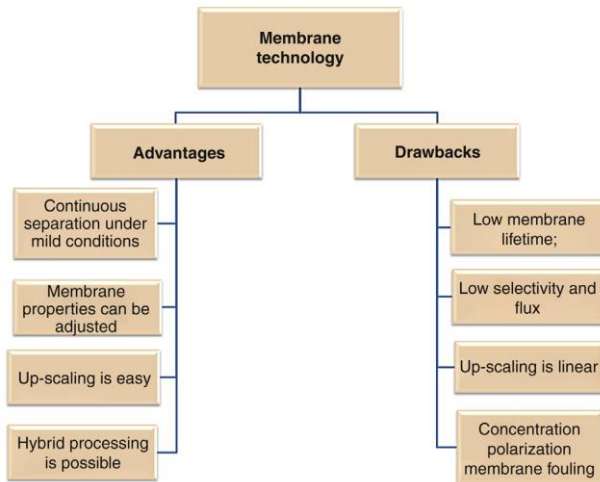


Gambar 1.5 Representasi Skema Aplikasi Proses Membran.

Aplikasi industri dan lingkungan yang lebih luas disebabkan oleh keunggulan pemisahan membran sebagai teknologi bersih; menghemat energi; dan kemampuannya untuk menggantikan proses konvensional, seperti filtrasi, distilasi, pertukaran ion, dan sistem pengolahan bahan kimia. Keunggulan lainnya adalah kemampuannya untuk menghasilkan

produk berkualitas tinggi dan fleksibilitas dalam desain sistem. Keuntungan utama dari teknologi membran tercantum pada Gambar 1.6.

Dengan menggunakan teknologi membran, pemisahan dapat dilakukan secara kontinyu dalam kondisi ringan dengan konsumsi energi yang relatif rendah dan tanpa perlu bahan tambahan. Selain itu, teknologi dapat digabungkan dengan proses pemisahan lainnya, membentuk proses hibrid.



Gambar 1.6 Manfaat Dan Kekurangan Teknologi Membran.

Akan tetapi, teknologi ini memiliki beberapa kendala, seperti polarisasi konsentrasi dan fouling membran, umur membran yang rendah, serta selektivitas dan fluks yang rendah. Gambar 1.6. menggambarkan keuntungan dan kerugian dari teknologi membran. Meskipun pengotoran membran dan

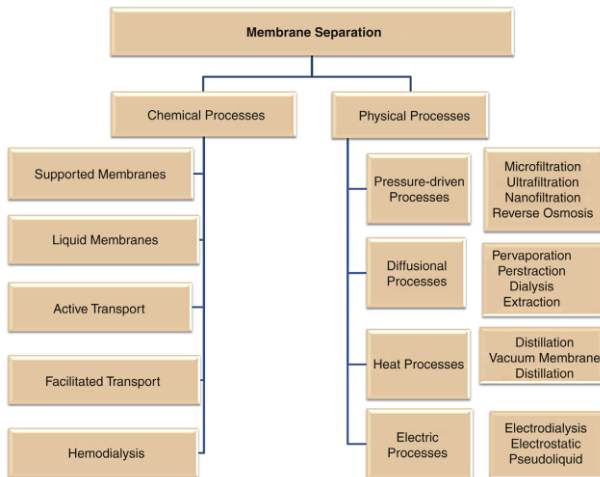
polarisasi konsentrasi merupakan kerugian, keduanya merupakan bagian dari proses pemisahan.

1.5. Proses Pemisahan Membran

Proses pemisahan membran adalah proses dimana membran digunakan untuk memisahkan komponen-komponen dalam suatu larutan dengan cara menolak zat yang tidak diinginkan dan membiarkan yang lain melewati membran. Peran membran juga untuk mengubah komposisi suatu larutan berdasarkan laju permeasi relatif. Kinerja membran dapat diukur dengan kemampuan membran untuk mencegah, mengatur, atau meningkatkan permeasi. Beberapa faktor

mengontrol laju permeasi dan mekanisme transportasi. Ini termasuk besarnya gaya penggerak dan ukuran molekul perembesan relatif terhadap ukuran permanen yang tersedia. Sifat kimiawi — dispersif, polar, ionik, dan sebagainya — baik dari permean maupun bahan yang digunakan untuk membuat membran juga dapat berpengaruh pada pemisahan tersebut. Kondisi proses membran harus direkayasa dengan hati-hati, akan tetapi, batasan kinerja ditentukan oleh sifat membran. Proses pemisahan membran digunakan dalam berbagai aplikasi industri dan lingkungan. Proses pemisahan membran secara sederhana dapat diklasifikasikan menjadi proses fisik dan

kimia, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.7.



Gambar 1.7 Klasifikasi Sederhana Proses Pemisahan Membran Menjadi Proses Fisik Dan Kimia.

Berbagai proses pemisahan membran dapat dikategorikan menurut gaya penggerak, jenis dan konfigurasi membran, atau kemampuan dan mekanisme penghilangan. Pengangkutan zat terpilih melalui membran

dapat dicapai dengan menerapkan gaya penggerak (tekanan, suhu, konsentrasi, potensial listrik) melintasi membran.

1.6. Bahan Membran

Pemilihan bahan yang sesuai untuk membuat membran untuk aplikasi tertentu merupakan faktor kunci yang memerlukan penyelidikan lebih lanjut. Pemilihan bahan membran memungkinkan kontrol atas sifat dan besarnya interaksi antara permeant dan membran. Ini menentukan kepadatan pengepakan dan mobilitas segmen rantai polimer yang terdiri dari daerah padat membran. Meskipun pemilihan bahan dan prosedur preparasi membran mempengaruhi

mekanisme transportasi, stabilitas membran, dan kinerja membran, yang terakhir menentukan morfologi membran, yang mempengaruhi laju permeasi oleh sifat fisik, seperti halangan sterik.

Membran dibuat dari berbagai macam bahan organik dan anorganik. Contoh bahan anorganik adalah karbon, alumina, dan zeolit. Namun, sebagian besar membran komersial dibuat dari polimer dan cairan. Contoh bahan organik tercantum pada Tabel 1.5. Bahan-bahan ini digunakan untuk membuat membran dengan kekuatan mekanik tinggi, stabilitas termal, dan ketahanan kimia, selain sifat pemisahan jangka panjang yang stabil.

Tabel 1.5 Bahan Organik untuk Pembuatan Membran untuk Proses Pemisahan

Nomor Seri	Proses Pemisahan	Contoh bahan bekas
1	Mikrofiltrasi	Selulosa nitrat, selulosa asetat, poliamida, polisulfon, poli (eter sulfon), polikarbonat, poli (eter imida), poli (vinilidena fluorida), polytetrafluoroethylene, polipropilen, poliakrilonitril, selulosa regenerasi
2	Ultrafiltrasi	Selulosa asetat, poliamida, polisulfon, poli (eter sulfon), polikarbonat, poli (eter imida), poli (vinilidena fluorida), poliakrilonitril, poli (metil metakrilat), selulosa regenerasi

3	Nanofiltrasi	Poliamida
4	Dialisis	Selulosa asetat, poliamida, polikarbonat, poliakrilonitril, poli (metil metakrilat), selulosa regenerasi
5	Pervaporasi	Polivinil alkohol), polidimetilsiloksan
6	Pemisahan gas	Selulosa asetat, polisulfon, polikarbonat, poli (2,6-dimetil-1,4-fenilena oksida), polimida, polidimetilsiloksan
7	Reverse osmosis	Selulosa asetat

1.7. Bahan Membran Anorganik

Membran anorganik digunakan untuk pemisahan gas, mikrofiltrasi, dan nanofiltrasi.

Membran ini sangat bervariasi dalam ukuran pori, bahan pendukung, dan konfigurasi (De Vos & Verweij 1998). Contoh jenis ini adalah kaca, logam, alumina, zirkonia, zeolit, dan membran karbon. Namun, bahan anorganik lainnya seperti silika, silikon karbida, silikon nitrida, titania, kordierit, oksida timah, dan mika dapat digunakan untuk menghasilkan membran berpori. Umumnya, membran anorganik yang menutupi berbagai macam bahan dapat diklasifikasikan menjadi padat (tidak keropos) atau berpori (simetris dan asimetris). Masing-masing bahan anorganik ini memiliki keunggulan untuk penggunaan khusus dalam teknologi membran.

Membran padat dapat dibuat dari paladium dan paduannya, perak, nikel, dan zirkonia yang distabilkan. Mereka digunakan untuk tujuan pemisahan gas. Misalnya, membran padat keramik digunakan dalam pemisahan oksigen dari udara atau pemisahan gas hidrogen dari campuran. Keterbatasan aplikasi industrinya disebabkan oleh permeabilitasnya yang rendah.

Sebaliknya, membran berpori digunakan dalam aplikasi industri karena sifat pengayak molekulernya, seperti permeabilitas dan selektivitas yang tinggi. Mereka memiliki stabilitas kimia yang tinggi, yang membuatnya dapat digunakan dalam pemisahan di mana

terdapat media yang agresif, seperti asam dan pelarut yang kuat. Mereka juga memiliki toleransi termal yang tinggi, yang membuatnya dapat digunakan dalam operasi membran suhu tinggi. Mereka sangat tahan terhadap bahan kimia korosif. Perhatian khusus diberikan pada membran berpori, seperti silika, zeolit, dan karbon, yang tampaknya menjanjikan dalam pemisahan gas dalam aplikasi nyata (Chen & Yang 1994; Fuertes & Centeno 1995).

Sebagai contoh, membran berbasis silika secara selektif memisahkan hidrogen dari gas lain (Hayashi et al. 1997); permselektivitas antara molekul berukuran serupa, seperti oksigen dan nitrogen, tampaknya tidak cukup

dan tidak terlihat untuk aplikasi nyata. Saringan molekuler karbon yang dihasilkan dari pirolisis polimer termoseting, seperti poliakrilonitril, poli (vinilidena klorida), polimer perfluoroalkoksi (PFA), selulosa, selulosa triasetat, saran kopolimer, dan resin fenol formaldehida, atau dari batu bara seperti tempurung kelapa, cukup menjanjikan agar efektif untuk pemisahan gas dalam aplikasi adsorpsi. Beberapa parameter mempengaruhi ukuran dan dimensi pori karbon, dan efek pengayak molekuler. Ini adalah (1) morfologi prekursor organik, (2) kimia pirolisis, (3) aktivasi ringan, dan (4) langkah sintering (Koresh & Soffer 1981; 1983; 1986; 1987).

1.8. Bahan Membran Organik: Polimer

Polimer dapat didefinisikan sebagai rantai yang sangat panjang (molekul atau makromolekul) yang terdiri dari molekul atau unit kecil yang disebut monomer. Polimer dapat terbentuk secara alami atau sintetis. Polimer sintetis dan alami memainkan peran penting dan ada di mana-mana dalam ilmu membran karena berbagai sifatnya (McCrum et al. 1997; Painter & Coleman 1997; Roiter & Minko 2005). Membran yang dibuat dari polimer lebih banyak digunakan dalam aplikasi industri karena performanya yang tinggi dan kemudahan desain (Osada & Nakagawa 1992; Pinnau & Freeman 1999). Ada sejumlah polimer, tetapi

memilih polimer membran bukanlah tugas yang mudah karena polimer harus memiliki karakteristik yang sesuai untuk aplikasi yang dimaksudkan (Zeaman & Zydney 1996). Selain stabilitas kimia dan mekanis dan dengan sifat pemisahan yang baik, polimer harus menawarkan afinitas pengikatan rendah untuk molekul terpisah dan harus tahan terhadap kondisi pembersihan yang keras. Selain itu, harus kompatibel dengan teknologi fabrikasi membran (Zeaman & Zydney 1996). Polimer harus sesuai dalam hal kekakuan rantai dan interaksi serta polaritas gugus fungsinya (Zeaman & Zydney 1996). Ini harus tersedia dengan harga yang bagus. Beberapa polimer

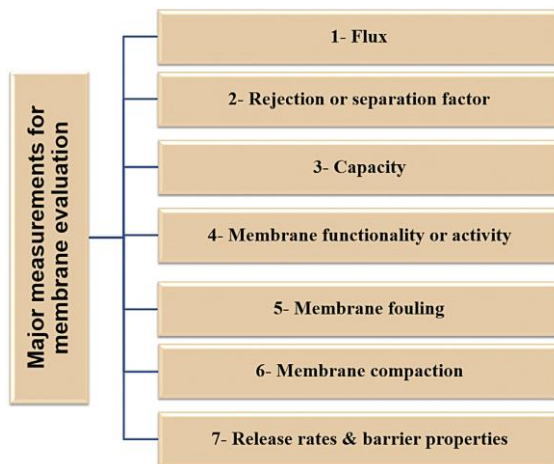
umum yang digunakan dalam membran tercantum dalam Tabel 1.5 (Madaeni 2001; Martinez et al. 2000; Palacio et al. 1998; Templin et al. 2006; Zydney & Ho 2003). Polimer harus sesuai dalam hal kekakuan rantai dan interaksi serta polaritas gugus fungsinya (Zeaman & Zydney 1996). Ini harus tersedia dengan harga yang bagus. Beberapa polimer umum yang digunakan dalam membran tercantum dalam Tabel 1.5 (Madaeni 2001; Martinez et al. 2000; Palacio et al. 1998; Templin et al. 2006; Zydney & Ho 2003). Polimer harus sesuai dalam hal kekakuan rantai dan interaksi serta polaritas gugus fungsinya (Zeaman & Zydney 1996). Ini harus tersedia

dengan harga yang bagus. Beberapa polimer umum yang digunakan dalam membran tercantum dalam Tabel 1.5 (Madaeni 2001; Martinez et al. 2000; Palacio et al. 1998; Templin et al. 2006; Zydney & Ho 2003).

1.8.1 Evaluasi Membran

Penting untuk mengevaluasi kinerja membran, menggunakan parameter penting, sebelum menggunakannya dalam aplikasinya nyata. Ada beberapa ukuran yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja membran. Ini termasuk pengukuran fluks, faktor penolakan, faktor pemisahan, kapasitas, aktivitas membran, fouling membran, pemadatan

membran, laju pelepasan, dan properti penghalang (tercantum dalam Gambar 1.8).



Gambar 1.8 Pengukuran Utama Untuk Evaluasi Membran.

Langkah-langkah ini berkaitan langsung dengan pemilihan bahan dan metode persiapan membran.

1.8.2 Karakteristik Evaluasi Membran

Membran dapat digunakan dalam proses pemisahan industri dan lingkungan jika menunjukkan karakteristik yang diperlukan. Ini termasuk fluks tinggi, selektivitas tinggi dengan penolakan yang diperlukan, stabilitas mekanis, toleransi terhadap komponen aliran umpan, ketahanan fouling, toleransi terhadap variasi suhu, reprodutifitas manufaktur, efektivitas biaya, dan kemampuan untuk dikemas ke dalam modul area permukaan tinggi (Baker dkk 1991; Kesting 1971; Koros dkk. 1988). Selektivitas menentukan sejauh mana pemisahan menuju aplikasi tertentu karena kemurnian produk yang lebih tinggi dapat

dicapai jika membran memiliki selektivitas yang lebih tinggi.

1.8.3 Fluks Filtrasi

Laju pengotoran permukaan membran merupakan fungsi dari laju fluks permeat, diukur sebagai galon per kaki persegi luas membran per hari (GFD). Semakin rendah laju fluks, semakin rendah pula laju fouling. Dengan fluks filtrasi yang lebih tinggi, zat terlarut diseret lebih banyak ke arah pori-pori, dan menghasilkan penyumbatan pori dan lapisan kue di atas permukaan membran. Fluks optimum adalah fluks yang cukup rendah untuk memastikan tidak terjadi deposisi di atas membran. Pemilihan dilakukan dengan

menggunakan hipotesis fluks kritis, yaitu bahwa pada permulaan terdapat fluks yang di bawahnya tidak terjadi penurunan fluks seiring waktu; di atasnya, pelanggaran diamati (Field et al. 1995). Fluks ini adalah fluks kritis dan nilainya tergantung pada hidrodinamika dan mungkin variabel lain. Tingkat fluks kritis antara lain bergantung pada kecepatan laju aliran silang, jenis membrane, jenis zat terlarut, dan konsentrasi zat terlarut.

Ringkasan

Pada bab ini dibahas konsep dasar yang berkaitan dengan gambaran sejarah membran, teknologi membran, dan proses pemisahan membran. Ini termasuk definisi membran, sejarah, dan kontribusi dalam ilmu pengetahuan dan teknologi membran. Proses dan metode pemisahan membran untuk evaluasi membran juga disorot dan kami berusaha memberikan gambaran yang lengkap. Berbagai jenis bahan membran utama diklasifikasikan.

Daftar Pustaka

- Amin, M.T., Alazba, A.A., Manzoor, U., 2014. A review of removal of pollutants from water/wastewater using different types of nanomaterials. *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2014, Article ID 825910.
- Baker, R.W., 2004. *Membrane Technology and Applications*, second ed. Wiley, Hoboken, NJ.
- Baker, R.W., Cussler, E.L., Eykamp, W., Koros, W.J., Riley, R.L., Strathmann, H., 1991. *Membrane Separation Systems-Recent Developments and Future Directions*. Noyes Data Corporation, Park Ridge, NJ.
- Bechold, H., 1907. Kolloidstudien mit der Filtrations method. *Z. Phys. Chem. Stoechiom. Verwandtschafts* 60, 257–318.
- Boholm, M., Boholm, A., 2012. The many faces of nano in newspaper reporting. *J. Nanopart. Res.* 14, 722.
- Chen, Y.D., Yang, R.T., 1994. Preparation of carbon molecular sieve membrane and diffusion of

- binary mixtures in the membrane. *Ind. Eng. Chem. Res.* 33 (12), 3146–3153.
- De Vos, R.M., Verweij, H., 1998. High-selectivity, high-flux silica membranes for gas separation. *Science* 279 (5357), 1710–1711.
- Du Trochet, H., 1828. *Nouvelles Recherches sur l'Endosmose et l'Exosmose*. J-B Baillièrre, Paris.
- Faraday, M., 1847. The Bakerian lecture: experimental relations of gold (and other metals) to light. *Philos. Trans. R. Soc. Lond.* 147, 145–181.
- Feynman, R., 1960. There's Plenty of Room at the Bottom. *Eng. Sci.* 23(5), pp 22–36.
- Ferry, J.D., 1936. Ultrafilter membranes and ultrafiltration. *Chem. Rev.* 18, 373–455.
- Fick, A., 1855. *Über Diffusion*. Poggendorff's *Annalen der Physik und Chemie* 94, 59–86.
- Field, R.W., Wu, D., Howell, J.A., Gupta, B.B., 1995. Critical flux concept for microfiltration fouling. *J. Membr. Sci.* 100, 259–272.

- Fuertes, A.B., Centeno, T.A., 1995. Preparation of supported asymmetric carbon molecular sieve membranes. *J. Membr. Sci.* 144 (1-2), 105-111.
- Gibbs, J.W., 1897. Semi-permeable films and osmotic pressure. *Nature* 55, 461-462.
- Ginger, D.S., Zhang, H., Mirkin, C.A., 2004. The evolution of dip-pen nanolithography. *Angew Chem. Int. Ed. Engl.* 43 (1), 30-45.
- Glater, L., 1998. The early history of reverse osmosis membrane development. *Desalination* 117, 297-309.
- Graham, T., 1829. Notice of the singular inflation of a bladder. *Q. J. Sci.* II, 88-89.
- Graham, T., 1833. On the law of the diffusion of gases. *Lond. Edinb. Philos. Mag. J. Sci.* II, 175-190, 269-276, 351-358.
- Graham, T., 1866. On the absorption and dialytic separation of gases by colloidal septa, part I. *Lond. Edinb. Dubl. Philos. Mag. J. Sci.* 22, 401-420.
- Graham, T., 1861. Liquid diffusion applied to analysis. *Phil. Trans. Roy. Soc.* 151, 183-224.

- Hayashi, J., Mizuta, H., Yamamoto, M., Kusakabe, K., Morooka, S., 1997. Pore size control of carbonized BPTA-pp'ODA polyimide membrane by chemical vapor deposition of carbon. *J. Membr. Sci.* 124 (2), 243–251.
- Iijima, S., 1991. Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature* 354, 56–58.
- Judd, S., 2011. *The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment*. Elsevier.
- Judd, S., Jefferson, B., *Membranes for Industrial Wastewater Recovery and Re-use*. Elsevier, ISBN: 978-1-85617-389-6.
- Kesting, R.E., 1971. *Synthetic Polymeric Membranes*. McGraw-Hill, New York.
- Klein, T., Buhr, E., Johnsen, K.-P., Frase, C.G., 2011. Traceable measurement of nanoparticle size using a scanning electron microscope in transmission mode (TSEM). *Meas. Sci. Tech.* 22, 094002.
- Kolff, W.J., Berk, H.T.J., 1944. Artificial kidney, dialyzer with great area. *Geneesk. gids*, 21.

Kołtuniewicz A., The history and state of arts in membrane technologies, VIII Spring Membrane School: Membrane, membrane processes and their application, Opole-Turawa, April 23–26, 2006.

Koresh, J., Soffer, A., 1981. Molecular sieve carbons. Part 3. Adsorption kinetics according to a surface barrier model. *J. Chem. Soc., Faraday Trans. 1.* 77 (12), 3005–3018.

Koresh, J.E., Soffer, A., 1983. Molecular sieve carbon permselective membrane. Part I. Presentation of a new device for gas mixture separation. *Sep. Sci. Tech.* 18 (8), 723–734.

Koresh, J.E., Soffer, A., 1986. Mechanism of permeation through molecular-sieve carbon membrane. Part 1. The effect of adsorption and the dependence on pressure. *J. Chem. Soc., Faraday Trans. 1.* 82 (7), 2057–2063.

Koresh, J.E., Soffer, A., 1987. The carbon molecular sieve membranes. General properties and the permeability of CH₄/H₂ mixture. *Sep. Sci. Tech.* 22 (2–3), 973–982.

- Koros, W.J., 2004. Evolving beyond the thermal age of separation processes: membranes can lead the way. *AICHE J.* 50 (10), 2326–2334.
- Koros, W.J., Fleming, G.K., Jordan, S.M., Kim, T.H., Hoehn, H.H., 1988. Polymeric membrane materials for solution-diffusion based permeation separations. *Prog. Polym. Sci.* 13, 339–401.
- Kresge, C., Leonowicz, M., Roth, W., Vartuli, C., Beck, J., 1992. Ordered mesoporous molecular sieves synthesized by a liquid-crystal template mechanism. *Nature* 359, 710.
- Lee, H.J., Ho, W., 1999. Single bond formation and characterization with a scanning tunneling microscope. *Science* 286, 1719.
- Lloyd, D.R., 1985. Membrane materials science: an overview. In : Lloyd, D.R., (Ed.), *Materials Science of Synthetic Membranes*. In: ACS Symposium Series, vol. 269. American Chemical Society, Washington, DC, pp. 1–21.
- Loeb, S., Sourirajan, S., 1963. Sea water demineralization by means of an osmotic membrane. In: Gould, R.F. (Ed.), *Saline Water Conversion II, Advances in Chemistry Series*

- number, vol. 38. American Chemical Society, Washington, DC, pp. 117–132.
- Loeb, S., 1981. The Loeb–Sourirajan membrane: how it came about. In: Albin F. (Ed.), *Synthetic Membranes*, ACS Symposium Series, vol. 153, pp 1–9, Chapter 1.
- Lonsdale, H.K., 1987. The evolution of ultrathin synthetic membranes. *J. Membr. Sci.* 33, 121–136.
- Lonsdale, H.K., 1982. The growth of membrane technology. *J. Membr. Sci.* 10, 81–181.
- Madaeni, S.S., 2001. The effect of large particles on microfiltration of small particles. *J. Porous Mater.* 8, 143–148.
- Martinez, F., Martin, A., Pradanos, P., Calvo, J.I., Palacio, L., Hernandez, A., 2000. Protein adsorption and deposition onto microfiltration membranes: the role of solute-solid interactions. *J. Colloid Interf. Sci.* 221, 254–261.
- Matsuura, T., 1994. *Synthetic Membranes and Membrane Separation Processes*. CRC Press, Boca Raton, FL.

- Matteucci, C., Cima, A., 1845. Memoire sur I endosmose. *Annal. Chemi. Et Phys.* 13, 63–86.
- Matthes, A., 1944. *Kolloid Z.* 108, 79.
- McCrum, N.G., Buckley, C.P., Bucknall, C.B., 1997. Principles of polymer engineering. Oxford University Press, Oxford/New York, p. 1.
- McLain, E.A., 1969. Wound hollow fiber permeability apparatus and process of making the same. U.S. Patent 3,422,008.
- McLain, E.A., Mahon, H.I., 1969. Permselective hollow fibers and method of making. U.S. Patent 3,423,491.
- Meares, P. (Ed.), 1976. Membrane Separation Processes. Elsevier, Amsterdam.
- Michaels, A.S., 1968. Ultrafiltration. Perry, E.S. (Ed.), *Progress in Separation and Purification*, vol. I, Interscience, New York, p. 297.
- Mitchell, J.K., 1831. On the Penetrativeness of Fluids. *J. R. Anthropol. Inst.* 4, 101–118, 307–321.
- Mahon, H.I., 1966. Permeability separatory apparatus and process utilizing hollow fibers. U.S. Patent 3,228,877.

- Mulder, M., 1996. Basic Principles of Membrane Technology, second ed. Kluwer Academic, Boston.
- Murray, C.B., Nirmal, M., Norris, D.J., Bawendi, 1993. Synthesis and structural characterization of II–VI semiconductor nanocrystallites (quantum dots). *Z. Phys. D: At., Mol. Clusters.* 26, 231–233.
- Nollet J.A., 1748. Lecons de physique experimentale. Hippolyte-Louis Guerin and Louis-Francios Delatour, Paris.
- Nollet J.A., 1779. Recherches sur les causes du bouillonnement des liquides. In: *Histoire de l'Académie Royale des Sciences.* Paris, pp. 57–104.
- Nunes, S.P., Peinemann, K.V. (Eds.), 2001. Membrane Technology in the Chemical Industry. Wiley- VCH, Oxford.
- Osada, Y., Nakagawa, T., 1992. Membrane Science and Technology. Marcel Dekker, New York.

- Painter, P.C., Coleman, M.M., 1997. Fundamentals of Polymer Science: An Introductory Text. Technomic, Lancaster, PA, p. 1.
- Palacio, L., Ho, C., Pradanos, P., Calvo, J.I., Kherif, G., Larbot, A., Hernandez, A., 1998. Fouling, structure and charges of composite inorganic microfiltration membrane. *Colloids Surf. A* 138 (2-3), 291-299.
- Petersen, R.J., 1993. Composite reverse osmosis and nanofiltration membranes. *J. Membr. Sci.* 83, 81-150.
- Pinnau, I., Freeman, B.D., 1999. Membrane Formation and Modification. ACS, USA.
- Richter, J.W., Hoehn, H.H., 1971. Permselective, aromatic, nitrogen-containing polymeric membranes. U.S. Patent 3,567,632.
- Roiter, Y., Minko, S., 2005. AFM single molecule experiments at the solid-liquid interface: in situ conformation of adsorbed flexible polyelectrolyte chains. *J. Am. Chem. Soc.* 127 (45), 15688-15689, doi:10.1021/ja0558239.

- Rozelle, L.T., Cadotte, J.E., Cobian, K.E., Kopp, C.V., Sourirajan, S., 1977. NS-100 Membranes for reverse osmosis and synthetic membranes. National Research Council Canada, Ottawa, Canada, pp. 249.
- Schafer, A.I., Fane, A.G., Waite, T.D. (Eds.), 2004. Nanofiltration. Elsevier, Oxford.
- Schoenbein, C., 1846. Improvements in the Manufacture of Explosive Compounds. British Patent 11, 402.
- Sing R., Hoffman J., Judd, S. 2006. Membrane Technology. Elsevier, Germany.
- Starzak, M.E., 1984. The Physical Chemistry of Membranes. Academic Press, New York.
- Strathmann, H., 2001. Membrane separation processes: current relevance and future opportunities. *AIChE J.* 47 (5), 1077–1087.
- Strutt, J.W., (Lord Rayleigh), 1900. On the passage of argon through thin films of India rubber. *Philos. Mag.* 49, 220.
- Taniguchi, N., 1974. On the basic concept of “nanotechnology.” In: Proceedings Japan, August 26–

- 29, Society of Precision Engineering, doi:10.1002/aic.690470514.
- Templin, T., Johnston, D., Singh, V., Tumbleson, M.E., Belyea, R.L., Rausch, K.D., 2006. Membrane separation of solids from corn processing streams. *Biores. Tech.* 97, 1536–1545.
- Turbak, A.F. (Ed.), 1981. *Synthetic Membranes*, vols. I and II. American Chemical Society, Washington, DC.
- Ulbricht, M., 2006. Advanced functional polymer membranes. *Polymer*. 47 (7), 2217–2262.
- U.S. National Nanotechnology Initiative, n.d. Nanotechnology timeline. <http://www.nano.gov/timeline> (accessed July 2015).
- van't Hoff, J., 1888. The function of osmotic pressure in the analogy between solutions and gases. *Philos. Mag.* 26, 81–105.
- Westmoreland, J.C., 1968. Spirally wrapped reverse osmosis membrane cell. US Patent 3.367.504.

Zeaman, L.J., Zydney, A.L., 1996. Microfiltration and Ultrafiltration. Principles and Applications- Marcel Dekker, New York.

Zsigmondy, R., 1922. Filter and method of producing same US1421341, 1922.

Zydney, A.L., Ho, C., 2003. Effect of membrane morphology on system capacity during normal flow microfiltration. Biotechnol. Bioeng. 83, 537-543.

BAB 2.

***MEMBRANE FOULING* DAN STRATEGI UNTUK KONTROL PEMBERSIHAN DAN PENGOTOR**

2.1. Pelanggaran Membran

Teknologi membran tradisional dipengaruhi oleh pengotoran, yang merupakan hambatan utama untuk penggunaan yang luas dari berbagai proses berbasis membran, seperti osmosis balik dan ultrafiltrasi dalam pengolahan air (Khulbe, Feng & Matsuura 2008). Materi yang menyebabkan fouling disebut foulant. Fouling mengakibatkan hilangnya produktivitas dan penurunan kualitas.

2.1.1 Definisi Membrane Fouling

Istilah fouling membran digunakan untuk menggambarkan akumulasi bahan (foulant) di permukaan atau di pori-pori membran, yang menyebabkan penurunan fluks permeat membran (Speth, Summers & Gusses 1998). Hilangnya kapasitas throughput pada membran terutama disebabkan oleh terbentuknya lapisan batas pada permukaan membran selama proses filtrasi. Ini menyebabkan penurunan fluks membran di bawah kapasitas teoritis yang dihitung dari membran untuk gaya penggerak yang diberikan menggunakan modul tertentu.

Secara umum, fouling dapat dibagi menjadi dua jenis: eksternal dan internal.

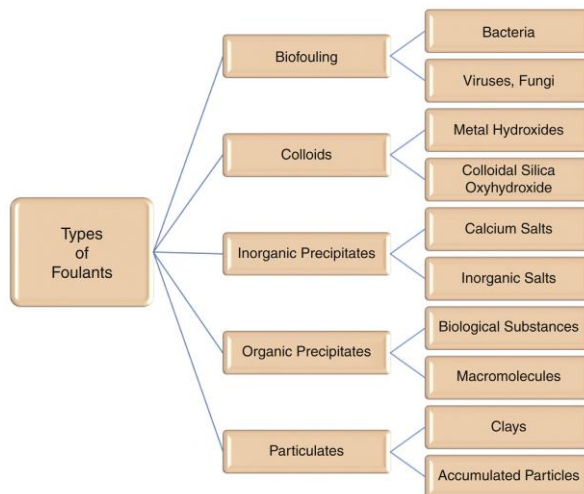
Fouling membran luar adalah hasil dari akumulasi partikel atau foulant yang ditolak pada permukaan luar membran. Pengotoran membran internal adalah hasil deposisi atau adsorpsi partikel kecil atau makromolekul di dalam struktur pori internal membran. Dengan pengotoran seperti itu, kinerja membran menurun bahkan dalam kondisi dinamis. Contohnya adalah pengendapan agregat protein pada atau di dalam membran, yang dianggap sebagai penyebab utama permulaan fouling semacam itu (Belfort, Davis & Zydney 1994; Bowen & Gan 1991; Guell, Czekaj & Davis 1999). Hal ini dianggap sebagai kendala utama untuk meluasnya penggunaan teknologi

membran karena pengotoran dapat menyebabkan penurunan fluks yang parah dan pada saat yang sama,

2.1.2 Pelanggar

Sumber fouling (foulant) antara lain partikel koloid, garam terlarut hemat, pelarut organik terlarut, mikroorganisme, molekul protein, dan partikulat lainnya. Jenis foulant dan contoh masing-masing diilustrasikan pada Gambar 2.1. Partikel koloid dianggap sebagai sumber pengotoran eksternal karena partikel koloid terakumulasi di permukaan membran dan meningkatkan resistensi aliran air melalui membran. Partikel koloid dapat berupa mineral lempung, silika koloid, oksihidroksida,

aluminium, besi dan oksida mangan, koloid organik, makromolekul organik besar, koloid organik, zat tersuspensi, dan endapan kalsium karbonat (Chandavarkar 1990; Kelly & Zydney 1997; Tracey & Davis 1994) .

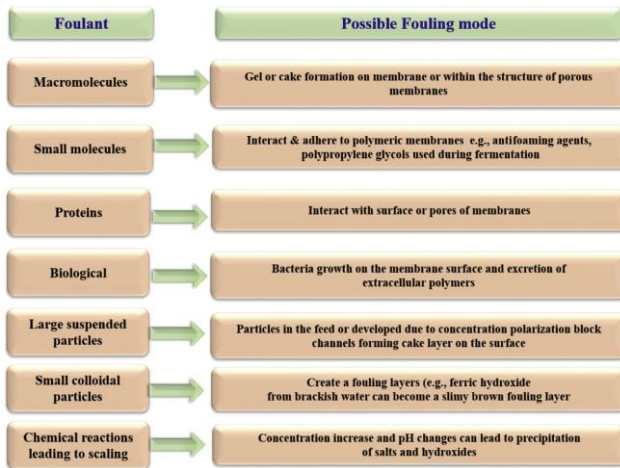


Gambar 2.1 Jenis Foulant Dengan Contoh Masing-Masing Jenis.

2.1.3 Klasifikasi Fouling

Berdasarkan materi yang mengendap di permukaan membran, fouling dapat dikelompokkan menjadi empat jenis yaitu koloid, organik, anorganik, dan biofouling (Meng et al. 2009; Mohanty & Purkait 2012; Zhang et al. 2012). Pengotoran koloid digambarkan sebagai akumulasi partikel koloid pada permukaan membran membentuk lapisan kue. Pengotoran organik meliputi adsorpsi spesies organik atau membran. Fouling anorganik (scaling) terjadi sebagai akibat pengendapan atau pengendapan partikel koloid anorganik dan partikulat serta kristalisasi garam mineral keras dari umpan pada struktur

membran. Terakhir, biofouling (pengotoran mikroba) terjadi karena melekat dan berkembangnya bakteri, virus, jamur, dan lain sebagainya, pada permukaan membran. Modus fouling terhadap setiap kategori foulant diilustrasikan pada Gambar 2.2.

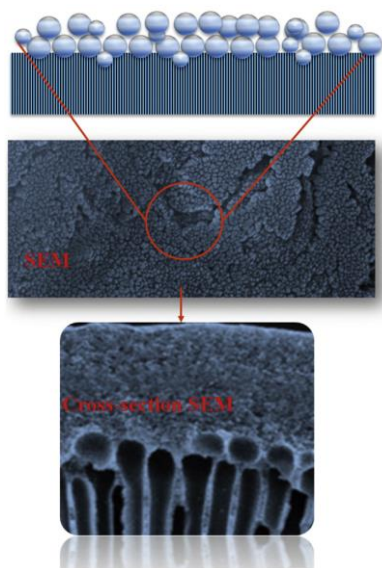


Gambar 2.2 Mode Fouling yang Mungkin Dan Sumber Foulantnya.

2.1.4 Pelanggaran Koloid (Partikulat)

Akumulasi koloid pada permukaan membran atau di dalam pori-pori membran selama proses pemisahan disebut fouling koloid. Gambar 2.3 menggambarkan kemungkinan representasi fouling koloid dan citra scanning electron microscopy (SEM) dari membran fouling. Ini mempengaruhi kualitas (jenis zat terlarut) dan kuantitas (fluks perembesan dan konsentrasi zat terlarut) dari air yang diproduksi secara negatif. Dalam membran yang digunakan untuk osmosis balik, nanofiltrasi, dan ultrafiltrasi, partikel terakumulasi pada permukaan membran, membentuk lapisan kue yang memberikan

ketahanan hidraulik tambahan terhadap aliran air, sehingga mengurangi fluks air produk.



Gambar 2.3 Representasi Sederhana Gambar Colloidal Fouling Dan Scanning Electron Microscopy (Sem) Dari Membran Fouled.

Mengingat membran yang digunakan dalam mikrofiltrasi, partikel koloid dapat menyumbat pori-pori dan menumpuk di

permukaan membran. Tingkat pembentukan lapisan kue dan penyumbatan pori bergantung pada ukuran partikel dibandingkan dengan ukuran pori membran (Zhu & Elimelech 1997).

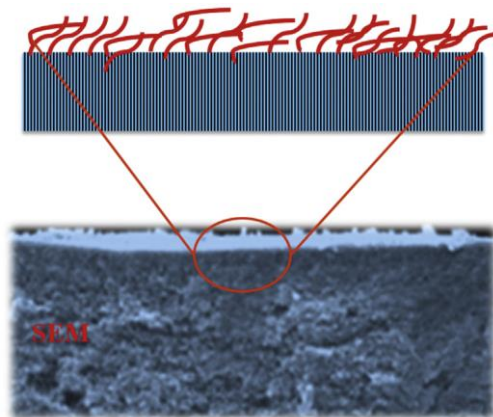
2.1.5 Pelanggaran Organik

Pengotoran organik disebabkan oleh beberapa jenis zat yang larut dalam larutan umpan dan cenderung menempel pada permukaan membran. Contoh zat ini adalah minyak, makromolekul, protein, zat antifoaming, asam fulvat, polisakarida, dan polimer poliakrilat. Ini dapat berkontribusi pada lapisan gel organik yang terbentuk di atas membran atau di pori-porinya. Adsorpsi dianggap sebagai penumpukan awal lapisan.

Hidrofilisitas atau hidrofobisitas bahan organik alami memainkan peran kunci dalam pengotoran membran dan penurunan fluks membran. Bahan organik di sini termasuk zat organik kompleks dalam air alami berupa polisakarida koloid, asam humat, asam lemak, dan protein. Gambar 2.4 menggambarkan representasi sederhana dari fouling organik dan citra SEM dari membran fouled organik.

Besar kecilnya molekul zat organik mempengaruhi kinerja fouling dan filtrasi membran itu sendiri. Zat organik dengan berat molekul lebih besar dari ukuran pori membran kemungkinan dapat menyumbat pori-pori membran, yang menyebabkan turunnya fluks

membran dengan membentuk lapisan pada membran. Bahan organik dengan berat molekul relatif lebih kecil dari ukuran pori membran masuk ke dalam pori membran, yang mempengaruhi fluks membran dan mengakibatkan pemblokiran pori (Sun et al. 2013).



Gambar 2.4 Representasi Sederhana Dari Gambar Organic Fouling Dan Scanning Electron Microscopy (Sem) Dari Membran Organic-Fouled.

Contoh pengotoran membran mikro adalah fraksi hidrofilik netral, fraksi hidrofobik kuat, fraksi hidrofobik lemah, dan fraksi hidrofilik polar (Fan et al. 2001).

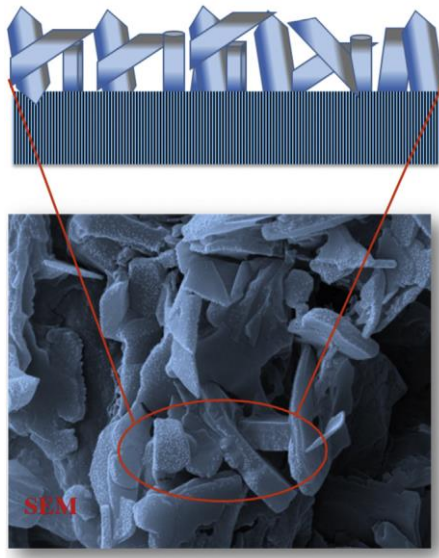
2.1.6 Pelanggaran Anorganik

Pengotoran anorganik, yang juga disebut penskalaan atau lebih khusus skala mineral, melibatkan kristalisasi garam padat, oksida, dan hidroksida dari larutan. Ilustrasi penskalaan terdapat pada Gambar 2.5 yang merupakan representasi penskalaan pada membran dengan citra pemindaian mikroskop elektron. Kalsium karbonat, kalsium sulfat, kalsium fosfat, natrium klorida, magnesium,

sulfat, karbonat, bikarbonat, barium sulfat, oksida besi, aluminium oksida, dan silikat dianggap sebagai ion penskalaan utama. CaSO_4 , CaCO_3 , SiO_2 , dan BaSO_4 dianggap sebagai beberapa garam anorganik paling umum yang bertanggung jawab untuk kerak pada permukaan membran (Lin, Shirazi & Rao 2005; van de Lisdonk, van Paassen & Schippers 2000). Dalam skenario di mana konsentrasi garam tersebut melebihi tingkat kejenuhan, pengendapan kristal garam terbentuk. Ini disebut pengotoran presipitasi, yang merupakan masalah umum pada osmosis balik, boiler, dan penukar panas yang beroperasi

dengan air sadah, yang sering kali menghasilkan kerak kapur.

Salah satu cara untuk mencegah kerak adalah dengan menurunkan pH larutan. Namun, ini tidak selalu mungkin. Oleh karena itu, antiscalant generasi telah dikembangkan.



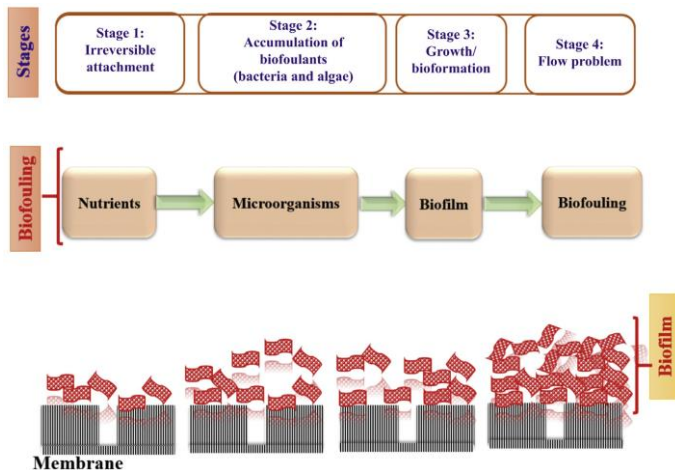
Gambar 2.5 Representasi Sederhana Scaling Pada Membran Dan Gambar Scanning Electron Microscopy (Sem).

Dalam antiscalant tersebut, bahan aktif adalah campuran yang dipatenkan dari berbagai polikarboksilat dengan berat molekul, poliakrilat, dan polielektrolit, termasuk polifosfonat dan polifosfat.

2.1.7 Biofouling

Pengotoran biologis didefinisikan sebagai penumpukan alga, tumbuhan, jamur, lumpur, ragi, atau mikroorganisme pada permukaan basah membran, mengakibatkan pembentukan biofilm berlendir. Biofilm berkembang ketika bakteri tumbuh dalam kondisi suhu dan nutrisi yang menguntungkan di unit pengolahan air. Istilah mikrofoouling digunakan untuk menggambarkan kasus adhesi bakteri dan

pembentukan biofilm. Biofouling dapat dicirikan oleh beberapa karakteristik seperti perlekatan permukaan, heterogenitas struktural, keragaman genetik, interaksi komunitas yang kompleks, dan penggunaan yang tepat dari matriks ekstraseluler zat polimer.



Gambar 2.6 Tahapan Pembentukan Biofouling Pada Permukaan Membran.

Biofouling menyebabkan masalah operasional yang parah karena membatasi aliran air melalui membran. Ini dapat ditemukan dalam sistem pretreatment ketika biosida tidak ada. Jenis pengotoran ini terbentuk ketika sel-sel biologis mengapung atau berenang secara independen dalam media cair yang dikemas rapat dan menempel satu sama lain membentuk permukaan padat. Pembentukan biofilm dimulai ketika mikroorganisme yang mengambang bebas menempel pada permukaan membran.

Mekanisme yang mungkin untuk membentuk biofouling diilustrasikan pada Gambar 2.6. Pada tahap 1, biofoulant, seperti

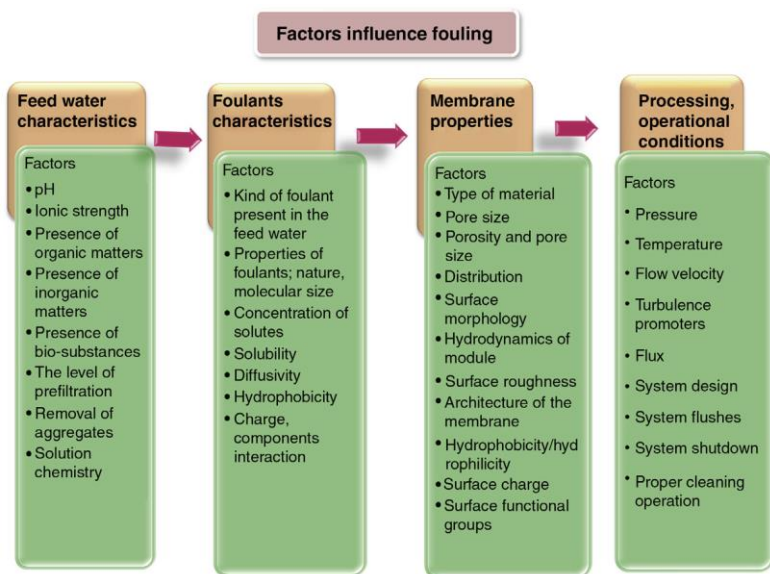
bakteri dan alga, menempel ke permukaan melalui gaya van der Waals yang lemah. Jika penempelan tidak dapat diubah, mereka dapat menambatkan diri secara permanen menggunakan struktur adhesi sel seperti pili. Pada tahap 2, kolonis pertama memfasilitasi kedatangan lebih banyak sel dengan menyimpan lebih banyak lokasi adhesi (pusat penampung) dan membangun matriks yang menyatukan biofilm. Setelah kolonisasi (tahap 3), biofilm dapat tumbuh melalui kombinasi pembelahan sel dan perekrutan. Perkembangan adalah tahap akhir (tahap 4) pembentukan biofilm dan merupakan tahap di

mana biofilm terbentuk dan sel-sel menjadi lebih resisten terhadap antibiotik.

2.1.8 Faktor yang Mempengaruhi Fouling

Fouling mengacu pada penyumbatan pori-pori membran selama filtrasi oleh partikulat dan senyawa lainnya. Ini adalah masalah parah yang membatasi potensi teknologi membran ini. Untuk memiliki pendekatan yang lebih baik dalam meminimalkan, mengurangi, dan membersihkan formasi fouling, memahami fenomena fouling sangat diperlukan. Menjadi fenomena yang kompleks, pengotoran membran dipengaruhi oleh berbagai faktor dalam pembentukannya di permukaan atau di

pori-pori membran (Tijing et al. 2015). Faktor-faktor yang mempengaruhi atau berkontribusi terhadap pengotoran membran dapat diklasifikasikan menjadi empat kategori menurut sumbernya (Gambar 2.7).



Gambar 2.7 Beberapa Faktor Utama Yang Mempengaruhi Tingkat Membran Fouling.

1. Faktor yang berhubungan dengan karakteristik air umpan. Faktor-faktor ini termasuk kimia larutan, pH, kekuatan ion, dan keberadaan bahan organik dan anorganik. Selain itu, tingkat prefiltrasi dan pemindahan agregat dapat mempengaruhi fouling. Jenis fouling yang terjadi pada permukaan membran terutama dipengaruhi oleh kimia larutan air umpan.
2. Faktor yang berhubungan dengan karakteristik foulant. Ini termasuk pengaruh jenis foulant yang ada dalam air umpan dan sifat-sifatnya, seperti

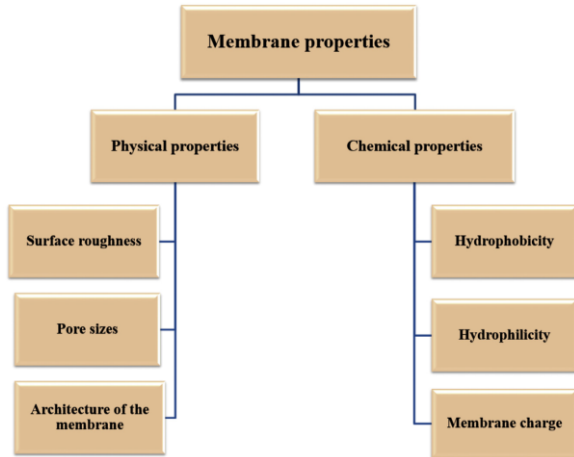
sifat, ukuran molekul, dan konsentrasi zat terlarut serta kelarutan, difusivitas, hidrofobitas, dan muatannya. Selain itu, terdapat faktor-faktor lain yang meningkatkan kecenderungan terjadinya fouling, seperti interaksi komponen dan interaksi antara foulant dengan permukaan membran.

3. Faktor-faktor yang berhubungan dengan bahan membran dan propertinya. Ini termasuk jenis, ukuran pori, porositas, distribusi ukuran pori, morfologi permukaan, dan hidrodinamika modul membran dan sifat fisikokimia lainnya. Tingkat

pengotoran berhubungan dengan sifat fisik dan kimia membran. Sifat fisik meliputi kekasaran permukaan dan ukuran pori atau arsitektur membran, sedangkan sifat kimianya meliputi hidrofobisitas dan hidrofilisitas serta muatan permukaan membran dan gugus fungsi permukaan (Phao 2013). Karakteristik fisiokimia membran yang mempengaruhi fouling diilustrasikan pada Gambar 2.8.

Interaksi antara foulant dan permukaan membran dapat meningkatkan kecenderungan fouling; dengan demikian sifat membran dapat

mempengaruhi fouling secara signifikan.



Gambar 2.8 Karakteristik Fisiokimia Membran Yang Mempengaruhi Fouling.

Kekasaran permukaan membran terkait dengan pengotorannya karena permukaan yang kasar memiliki puncak dan selip di mana zat terlarut diangkut (Vrijenhoek, Hong &

Elimelech 2001; Zhu & Elimelech 1997). Depresi dapat mengakumulasi zat terlarut dalam umpan, yang menghalangi pori-pori dan permukaan membran, menyebabkan pengurangan fluks (Chennamsetty 2007). Sebagai contoh, membran selulosa asetat kurang kotor daripada selulosa asetat dan membran komposit film tipis poliamida aromatik pada tingkat permeasi yang identik dalam osmosis balik. Fenomena ini dapat dijelaskan dengan tingginya kekasaran permukaan komposit dibandingkan dengan membran selulosa asetat

(Elimelech et al. 1997). Pengaruh serupa dilaporkan menggunakan jenis poliamida komposit yang telah disiapkan, mirip dengan membran reverse osmosis (RO) yang ada, tetapi secara kimiawi diolah untuk menyesuaikan penolakan kekerasan dan kisaran kekerasan. Rangkaian membran yang memiliki permukaan halus dan muatan netral dilaporkan memiliki pengotoran organik minimum (Bartels et al. 2008).

Biasanya, membran penggerak tekanan bersifat hidrofobik karena sifat polimer yang digunakan. Hidrofobisitas

membran ini cenderung mendorong terjadinya pengotoran, oleh karena itu, dibutuhkan untuk menghasilkan membran yang kurang hidrofobik (Hilal, Khayet & Wright 2012) dengan cara menyempurnakan sifat permukaannya. Misalnya, polietilen glikol telah digunakan untuk meningkatkan hidrofilitas membran. Selain itu, polivinilpirolidon (PVP) telah banyak digunakan sebagai aditif polimer untuk memberikan hidrofilitas dan meningkatkan permeabilitas membran (Choi, Jegal & Kim 2006; Han & Nam 2002; Lee et al.

2003). Membran permukaan yang dicangkok adalah alternatif lain untuk memperkenalkan gugus fungsi hidrofilik pada permukaan membran (Tu et al. 2006; Wang, Zhao & Wei 2012). Muatan permukaan membran memainkan peran penting dalam proses pengotoran karena lebih banyak muatan di permukaan menyebabkan interaksi yang kuat antara permukaan dan zat terlarut dari air yang diolah (Elimelech, Chen & Waypa 1994; van der Bruggen, Mänttari & Nyström 2008). Gaya tolak-menolak antara dua komponen akan

mencegah pengendapan atau adsorpsi foulant pada membran, sehingga mengurangi fouling; namun, fluks dapat terpengaruh (van der Bruggen et al. 2008).

4. Faktor-faktor yang berkaitan dengan pemrosesan dan kondisi operasional. Variabel pemrosesan meliputi tekanan transmembran, suhu, kecepatan aliran silang, dan promotor turbulensi. Tingkat pengotoran dapat dipengaruhi oleh parameter lain, seperti fluks, kecepatan aliran, desain sistem, pembilasan dan penghentian sistem, dan operasi pembersihan yang tepat.

Laju pengotoran membran merupakan fungsi dari laju fluks permeat, yang ditentukan sebagai galon per kaki persegi luas membran per hari (GFD). Umumnya laju fouling rendah jika laju fluks rendah dan kecepatan aliran silang sejajar permukaan membran tinggi. Perlu dicatat bahwa area membran yang lebih tinggi memungkinkan penggunaan tekanan yang lebih rendah dan aliran umpan dan konsentrat yang lebih tinggi. Foulant dapat dibuang dari permukaan membran dengan cara pemotongan yang lebih tinggi. Direkomendasikan

untuk membersihkan sistem saat shutdown dan startup dan bahkan sesekali selama standby untuk menghilangkan foulant. Salah satu alasan untuk melakukan ini, misalnya, adalah bahwa tingkat pengotoran biologis dapat meningkat secara dramatis saat sistem dalam keadaan diam dan tidak ada umpan yang mengalir.

2.1.9 Penurunan Fluks

Penurunan permeasi melalui membran sebagai fungsi waktu disebut penurunan fluks. Penurunan fluks disebabkan oleh beberapa fenomena yang terjadi selama proses filtrasi.

Ini termasuk karakterisasi air umpan, kadar ion dan potensi foulant, dan pretreatment untuk menghilangkan dan mengendalikan foulant. Hal ini juga terkait dengan evaluasi jenis membran, muatan permukaan membran, ketahanan fouling, luas membran aktif, persyaratan tekanan umpan, dan tingkat penolakan molekul organik dan ion terlarut. Umumnya penurunan fluks disebabkan oleh penurunan gaya penggerak dan peningkatan tahanan.

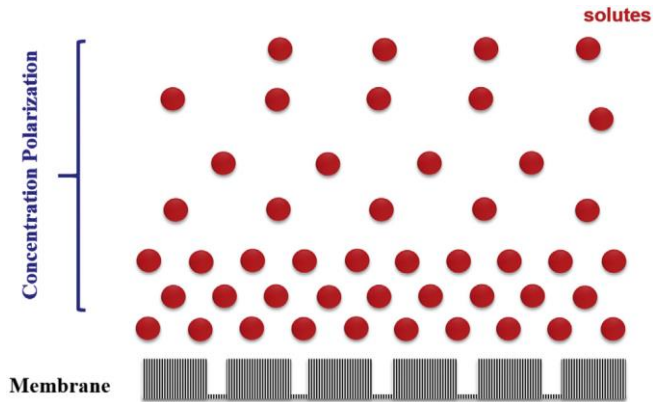
2.1.10 Polarisasi Konsentrasi Dan Tekanan Osmotik

Polarisasi konsentrasi adalah fenomena yang terjadi di dekat permukaan membran, di

mana konsentrasi zat terlarut atau partikel lebih tinggi daripada di curah (Song & Elimelech 1995). Polarisasi konsentrasi terjadi karena peningkatan konsentrasi zat terlarut yang tertahan di sisi umpan atau konsentrat, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9. Ini menyebabkan penurunan fluks karena zat terlarut ditahan dan pelarut melewati membran.

Tingkat polarisasi konsentrasi bergantung pada sejumlah faktor, termasuk fluks filtrasi, koefisien perpindahan massa di dekat permukaan membran yang digunakan, retensi zat terlarut, dan konsentrasi zat terlarut. Oleh karena itu, fluks optimum harus

dipilih seperti yang didiskusikan pada bagian sebelumnya.



Gambar 2.9 Kemungkinan Resistensi Oleh Polarisasi Konsentrasi Terhadap Transportasi Pelarut.

Koefisien perpindahan massa bergantung pada kecepatan aliran silang, yang merupakan salah satu parameter terpenting untuk mengontrol polarisasi konsentrasi. Pengaruh polarisasi konsentrasi dapat dikurangi dengan menggerakkan fluida dan dengan demikian

menurunkan konsentrasi zat terlarut di sekitar permukaan membran. Ada beberapa metode umum untuk meningkatkan koefisien perpindahan massa termasuk aliran lintas aksial, aliran lintas transversal, dan dengan menggerakkan membran itu sendiri.

Retensi zat terlarut juga sebanding dengan efek polarisasi konsentrasi. Harus diketahui dengan baik bahwa konsentrasi curah yang tinggi dari zat terlarut menghasilkan konsentrasi zat terlarut yang tinggi di dekat permukaan membran. Mekanisme yang disederhanakan dari apa yang terjadi di permukaan membran adalah konsentrasi zat terlarut yang tertahan di permukaan membran

meningkat, yang menyebabkan peningkatan viskositas. Oleh karena itu, koefisien perpindahan massa di dekat permukaan membran menurun dan menyebabkan peningkatan lebih lanjut pada konsentrasi zat terlarut yang tertahan pada permukaan membran. Oleh karena itu, polarisasi konsentrasi dapat meningkatkan risiko pengotoran, menurunkan laju permeasi yang disebabkan oleh peningkatan tekanan osmotik pada RO dan nanofiltrasi (NF), serta menurunkan kualitas permeat (Shirazi, Lin & Chen 2010).

2.1.11 Tekanan Osmotik

Tekanan osmotik adalah istilah yang digunakan dalam proses pemisahan yang digerakkan oleh tekanan, yang dikategorikan menurut ukuran molekul yang akan dibuang oleh membran atau menurut besarnya tekanan yang diperlukan untuk mendorong proses pada kecepatan yang terbatas. Tekanan yang diterapkan diperlukan untuk mengatasi tekanan osmotik dalam larutan umpan, yang secara langsung berkaitan dengan ukuran molekul zat terlarut. Oleh karena itu, tekanan osmotik adalah tekanan minimum yang diterapkan pada larutan untuk mencegah aliran masuk air melintasi membran (Voet, Voet &

Pratt 2001). Tekanan osmotik ditentukan berdasarkan sifat larutan umpan, yaitu perbedaan sifat umpan dan larutan permeat. Pengaruh tekanan osmotik bervariasi dengan jenis proses membran.

2.2. Mekanisme Fouling

Mekanisme fouling rumit, saling berhubungan, dan tidak dipahami dengan baik. Mekanisme pengotoran membran yang paling umum dapat dikategorikan menjadi empat jenis:

1. Adsorpsi zat padat di permukaan dan di dalam pori-pori membran.

2. Terbentuknya lapisan cake pada permukaan membran.
3. Pori-pori tersumbat oleh zat terlarut yang ditolak.
4. Biofouling yang disebabkan oleh mikroorganisme (Heinemann, Howell & Bryan 1988; Kelly, Opong & Zydney 1993; Kelly & Zydney 1994).

Mengingat membran berpori, sebagian besar mekanisme pengotoran terkait dengan pori-pori, yang merupakan area aktif membran (Scott 1995). Pengotoran menyebabkan pengurangan jumlah pori-pori aktif. Berdasarkan hal ini, mekanisme pengotoran

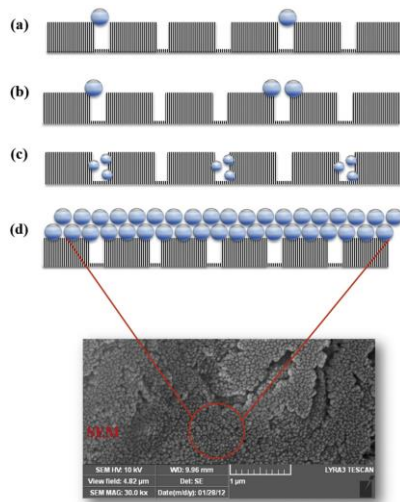
pada membran berpori dapat diilustrasikan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10, dan diklasifikasikan sebagai:

- **Pemblokiran pori.** Ini disebabkan oleh partikel yang lebih besar dari ukuran pori pada membran, yang benar-benar menghalangi pori-pori. Ini mengarah pada pengurangan area membran aktif, tergantung pada kecepatan umpan.
- **Pemblokiran pori parsial.** Hal ini disebabkan oleh partikel yang mencapai permukaan yang menghalangi sebagian atau menempel pada daerah yang tidak aktif. Ini

menghasilkan pengurangan luas membran aktif.

- **Pemblokiran pori internal.** Hal ini disebabkan oleh partikel yang lebih kecil dari ukuran pori yang masuk ke dalam pori-pori dan teradsorpsi atau disimpan ke dalam dinding pori. Ini membatasi aliran permeat dan meningkatkan ketahanan membran karena pengurangan ukuran pori. Pemblokiran pori internal tidak bergantung pada kecepatan umpan dan mitigasi dengan aliran silang hampir tidak ada.

- **Filtrasi kue.** Hal ini disebabkan oleh partikel yang tidak masuk ke pori-pori atau menutup pori-pori; sebaliknya, mereka membentuk kue di atas permukaan membran. Ini berkontribusi pada ketahanan keseluruhan, yang menjadi ketahanan kue serta ketahanan membran itu sendiri.



Gambar 2.10 Ilustrasi Skema Mekanisme Fouling Yang Mungkin Dari Membran Berpori. (A) Pemblokiran Pori. (B) Pemblokiran Pori Sebagian. (C) Pemblokiran Pori Internal. (D) Filtrasi Kue Dengan Pemindaian Mikroskopi Elektron (Sem) Gambar Membran Terkotori Permukaan.

Situs fouling dapat bersifat eksternal dan internal. Pengotoran eksternal atau permukaan mengacu pada penumpukan atau pembentukan lapisan seperti kue atau gel pada permukaan membran sisi umpan. Pemblokiran

pori internal terbentuk ketika sisik atau foulant disimpan di dalam pori-pori melalui pemblokiran sebagian (penyempitan pori secara bertahap), dan kemudian seiring waktu, dengan pemblokiran pori lengkap. Pengotoran permukaan luar biasanya dapat dibalik dan dapat dibersihkan menggunakan bahan kimia, sedangkan pengotoran internal atau pemblokiran pori dalam banyak kasus tidak dapat diubah karena pepadatan foulant dan degradasi membran (Hoek et al. 2008).

Mekanisme adsorpsi-desorpsi dimungkinkan. Sebagai contoh, membran polivinilidena fluorida superhydrophobic yang dilapisi dengan senyawa titania dan fluoro-silan

dievaluasi untuk kinerja distilasi kontak langsungnya (Meng et al. 2014). Pada temperatur yang lebih tinggi (50-70°C), senyawa asam humat dalam umpan cenderung lebih banyak terdisagregasi, membentuk asam humat dengan berat molekul rendah yang menembus melalui membran dan larut dalam permeat (Naidu et al. 2014). Oleh karena itu, penetrasi foulant organik ke dalam membran dapat dikaitkan dengan mekanisme migrasi foulant adsorpsi-desorpsi yang disebabkan oleh kekuatan adsorpsi foulant ke membran sebagai berikut:

1. Foulant organik, seperti asam humat, teradsorpsi pada permukaan membran

dengan mengikat gugus fungsi fenolik dan karboksilat.

2. Fouling bermigrasi, karena ikatan hidrogen dari gugus karboksilat dan fenolik yang tidak terikat dengan uap air, mengakibatkan desorpsi asam humat dari permukaan membran.
3. Asam humat diserap lebih jauh di dalam pori-pori membran, difasilitasi oleh pergerakan uap air di dalam pori-pori.

Ulangi tiga langkah sebelumnya sampai asam humat mencapai ke dalam pori-pori dan bahkan ke sisi yang meresap.

Dalam proses pemisahan yang nyata, kombinasi bahan dan mekanisme fouling yang berbeda terjadi pada satu jenis fouling, yang membuatnya lebih rumit untuk ditangani.

2.3. Fouling Membran Yang Dapat Dibalik Dan Tidak Dapat Dipulihkan

Ada dua jenis pengotoran membran: pengotoran yang dapat dibalik atau yang tidak dapat diubah, berdasarkan kekuatan pelekatan partikel pada permukaan membran dan bergantung pada efektivitas kontrol pengotoran dan teknologi pembersihan. Pembentukan matriks lapisan fouling dengan zat terlarut selama proses filtrasi terus menerus menghasilkan fouling yang dapat dibalik, yang

seiring waktu, berubah menjadi lapisan fouling yang kuat dan tidak dapat diubah (Franken 2009).

Pengotoran yang dapat dibalik dapat dihilangkan sepenuhnya dengan pembersihan fisik atau perlakuan awal tertentu. Pengotoran yang dapat dibalik adalah bagian yang dapat dipulihkan dengan penerapan gaya geser yang kuat, pencucian balik atau pembilasan balik, terutama untuk membran berpori karena ini tidak tersedia untuk membran tidak berpori. Sebaliknya, fouling ireversibel biasanya disebabkan oleh keterikatan partikel yang kuat. Oleh karena itu, tidak mungkin untuk menghilangkannya dengan metode

pembersihan fisik sederhana atau perlakuan awal (Gao et al. 2011; Zhu & Elimelech 1997). Pengotoran yang tidak dapat diubah seperti itu hanya dapat diatasi dengan pembersihan kimiawi, yang harus dibatasi pada frekuensi minimum, karena pembersihan kimiawi berulang dapat mempengaruhi umur membran (van der Bruggen & Vandecasteele 2002).

Sebelum filtrasi membran, perlu dilakukan proses pretreatment untuk meningkatkan efisiensi perawatan seluruh sistem, mengurangi pengotoran dan dengan demikian menurunkan frekuensi pembersihan membran, dan untuk memperpanjang umur membran. Metode utama yang digunakan

untuk pretreatment adalah koagulasi, adsorpsi, dan oksidasi, yang efektif dalam mengurangi akumulasi polutan pada permukaan membran. Metode pretreatment lain untuk meningkatkan kinerja membran dan mengurangi fouling termasuk pengobatan biologis, dan beberapa proses pretreatment terintegrasi.

Pembekuan-Metode koagulasi-sedimentasi termasuk dosis coagulan kemudian menggunakan sedimentasi dan filtrasi. Ini telah digunakan dalam pengolahan air karena biayanya yang rendah dan pengoperasian yang mudah. Pemanfaatan utama koagulasi standar dan koagulasi online adalah untuk menghilangkan kekeruhan.

Metode koagulasi-ultrafiltrasi online mengacu pada dosis koagulan sebelum ultrafiltrasi tanpa sedimentasi dan langkah filtrasi setelah koagulasi (Liang et al. 2008). Jenis lain adalah koagulasi in-line di mana koagulan diterapkan sebelum filtrasi membran tanpa prekoagulasi dan prefiltrasi. Keuntungan dari jenis ini ada dua: (1) Pembersihan hidrolis lebih efisien karena permukaan internal membran jauh lebih terlindungi dari sumber foulant, dan (2) kualitas permeat lebih baik karena bahan organik alami yang ditingkatkan dan menghilangkan kekeruhan, sehingga mengurangi pengotoran.

Adsorpsi-Perlakuan awal adsorpsi meningkatkan pembuangan polutan di dalam air. Beberapa adsorben yang dapat digunakan antara lain karbon aktif serbuk, silika, tabung nano karbon, lempung, alumina, dan lain sebagainya. Lapisan kue karbon aktif bubuk yang terbentuk pada permukaan membran juga dapat memfasilitasi efisiensi penyaringan. Ini juga dapat menurunkan ketahanan filtrasi membran dan meningkatkan fluks filtrasi ke tingkat yang terbatas, karena karbon aktif bubuk dapat menyerap organik terlarut dengan berat molekul rendah dan organik makromolekul (Gai & Kim 2008).

Oksidasi-Perlakuan awal ozon adalah metode ampuh yang mengoksidasi gugus kaya elektron yang mengandung ikatan karbon ganda dan alkohol aromatik. Dengan metode ini, makromolekul organik dioksidasi menjadi molekul kecil yang kemudian dioksidasi menjadi zat anorganik. Oleh karena itu, konsentrasi polutan pengotor berkurang dan secara radikal mengurangi pengotoran membran. Polutan yang menempel di permukaan dapat dihilangkan dengan oksidasi ozon, mengurangi pengotoran membran (De Velasquez, Monje-Ramirez & Paredes 2013).

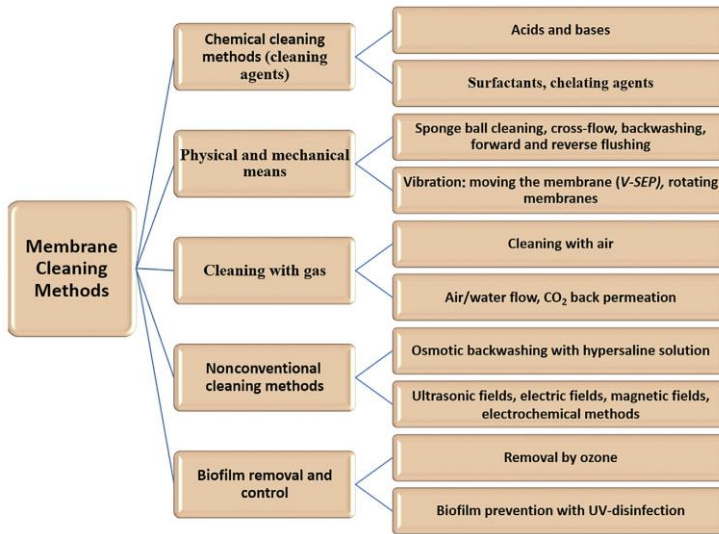
2.4. Strategi Pembersihan Membran

Penting untuk mengidentifikasi jenis pengotoran membran sebelum memilih metode pembersihan yang sesuai. Oleh karena itu, diperlukan informasi tentang jenis proses dan informasi kualitatif dan kuantitatif tentang aliran umpan dan komponen yang dipertahankan, yang memberikan indikasi jenis fouling. Misalnya, adanya konsentrasi tinggi kalsium atau magnesium di RO atau NF menunjukkan pengotoran atau penskalaan anorganik. Informasi tentang pemasangan dan riwayat membran, dan mungkin dalam beberapa kasus otopsi membran, diperlukan untuk memilih metode pembersihan yang

paling sesuai. Berdasarkan hasil identifikasi dan observasi tersebut maka dibuatlah jadwal pembersihan.

2.4.1 Kategori Metode Pembersihan

Berbagai metode telah dilaporkan untuk membersihkan membran. Metode ini dapat dikategorikan menjadi lima kategori utama seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11. Setelah jenis fouling membran diidentifikasi, bahan kimia pembersih dapat digunakan untuk menghilangkan bahan fouling dari membran dan untuk mengembalikan fluks membran.



Gambar 2.11 Ilustrasi Skema Metode Utama Yang Digunakan Untuk Pembersihan Membran Dan Kontrol Fouling.

Biasanya, produsen membran memasok bahan pembersih yang akan digunakan dengan membran. Perhatian dalam menggunakan bahan pembersih termasuk batasan pH dan efek oksidatif. Bahan kimia yang umum digunakan untuk membersihkan membran,

termasuk membran NF dan ultrafiltrasi (UF) di industri air, secara umum dapat diklasifikasikan ke dalam lima kelas berikut:

1. *Asam*, seperti asam sitrat dan nitrat dapat digunakan untuk pelarutan. Mereka sebagian besar digunakan untuk menghilangkan sisik dan dioksida logam dari lapisan pengotoran pada membran. Ketika membran dikotori oleh foulant seperti oksida besi, asam sitrat sangat efektif karena asam sitrat melarutkan endapan oksida besi dan membentuk kompleks dengan besi. Selain itu, asam dapat digunakan untuk membersihkan

beberapa senyawa organik seperti polisakarida dan protein terhidrolisis. Campuran asam juga efektif untuk membersihkan. Sebuah studi baru-baru ini melaporkan (Guillen-Burrieza et al. 2014) tentang fouling dan scaling membran yang terutama terdiri dari oksida NaCl dan Fe, Mg, dan Al. Pembersihan dilakukan dengan menggunakan asam sitrat 5% berat, asam format 5% berat, asam sulfat 5% berat, asam oksalat 0,1% berat + asam sitrat 0,8% berat, dan deterjen Na 0,1% berat. 5P.3HAI10 + 0,2% berat asam ethylenediaminetetraacetic

(EDTA). Kinerja pembersihan terbaik adalah dengan menggunakan 0,1% berat asam oksalat + 0,8% berat larutan asam sitrat.

2. *Basis*, seperti NaOH, dapat digunakan untuk hidrolisis dan pelarutan. Caustic digunakan untuk membersihkan membran yang dikotori oleh foulant organik dan mikroba. Bahan organik seperti polisakarida dan protein dapat dihidrolisis dengan cara kaustik. Selain itu, struktur protein tersier cenderung terganggu dan protein direduksi menjadi peptida. Selain itu, lemak dan minyak bereaksi dengan kaustik

melalui saponifikasi, menghasilkan misel sabun yang larut dalam air. Namun, penggunaan larutan asam dan basa menghasilkan penghilangan skala yang lebih baik dan pemulihan sifat hidrofobik membran.

3. *Agan chelating*, seperti asam sitrat dan EDTA dapat digunakan. Penghilangan kation divalen dengan asam atau reagen pengkelat, seperti EDTA, dapat meningkatkan pembersihan kotoran organik (Hong & Elimelech 1997).

4. *Oksidan dan desinfektan*, seperti NaOCl, H₂HAI₂, dan asam peroksiasetat, dapat digunakan untuk

oksidasi dan desinfeksi. Oksidasi polimer organik menghasilkan lebih banyak gugus fungsi yang mengandung oksigen, seperti keton, aldehida, dan asam karboksilat. Adanya gugus fungsi tersebut meningkatkan hidrofilitas senyawa induknya. Jadi, oksidasi mengurangi adhesi bahan pengotoran ke membran.

5. *Surfaktan*, seperti deterjen, dapat digunakan untuk pengemulsi, dispersi, dan pengkondisian permukaan. Mereka dapat membentuk misel dengan lemak, minyak, dan protein

dalam air dan membantu membersihkan membran yang kotor, karena surfaktan memiliki struktur hidrofilik dan hidrofobik. Surfaktan mengganggu interaksi hidrofobik antara bakteri dan membran (Paul & Jeffrey 1984; Ridgway, Rigby & Argo 1985; Rosenberg & Doyle 1990). Mereka dapat mengganggu fungsi dinding sel bakteri.

Berbagai cara fisik dan mekanis membantu menghilangkan foulant. Sistem reverse filtering terdiri dari backflushing, backwashing, dan backpulsing, dimana pompa lain digunakan untuk mengalirkan air kembali

ke feed side, dengan demikian mengangkat foulant dari membran. Perbedaan di antara mereka adalah kekuatan dan waktu yang digunakan untuk mengangkat foulant. Dalam backpulsing atau gas backpulsing, aliran balik terjadi pada frekuensi yang lebih tinggi untuk waktu yang singkat kurang dari satu detik. Backpulsing dan backpulsing frekuensi tinggi menghasilkan penghapusan lapisan kotoran secara efisien. Metode ini paling umum digunakan untuk membran keramik (Mulder 1996). Hal ini dapat dilakukan dengan memaksa permeat (nitrogen atau gas lain dapat digunakan sebagai gas backpulsing) kembali melalui membran dengan tekanan

transmembran terbalik (Kuberkar, Czekaj & Davis 1998; Ridgway 1988; Su, Liu &

Untuk efek maksimal dari pembilasan balik atau pencucian balik, aliran balik terjadi selama beberapa detik setiap beberapa menit. Backpulsing didefinisikan sebagai proses siklik dari filtrasi maju diikuti oleh filtrasi balik, yang melibatkan pembalikan aliran melalui membran dengan mengubah arah tekanan transmembran. Gbr. 2.12 menggambarkan ilustrasi skematik dari kemungkinan proses backflushing. Ini terdiri dari memompa perembesan ke arah sebaliknya melalui membran dan ini dapat menghilangkan sebagian besar pengotoran yang dapat dibalik

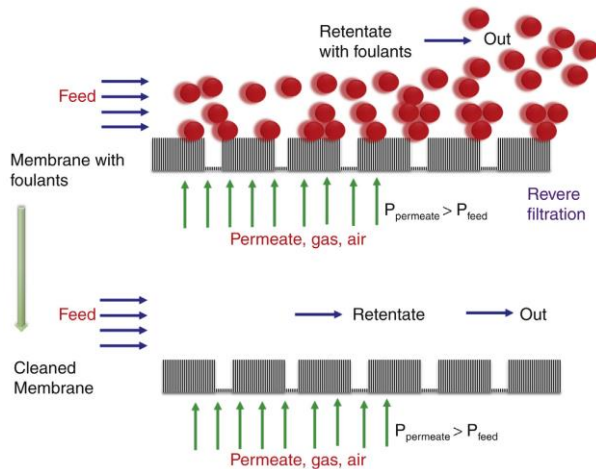
yang disebabkan oleh pemblokiran pori. Proses aliran balik diterapkan untuk menghilangkan partikel yang secara reversibel diendapkan pada permukaan membran atau di pori-pori membran. Dengan demikian, foulant tersapu oleh cross-flow, yang mengurangi fouling dan meningkatkan fluks ke depan (Ma et al. 2001). Ini dapat ditingkatkan dengan membilas udara melalui membran (Sun et al. 2004). Namun, ini dapat meningkatkan biaya operasi karena energi diperlukan untuk mencapai tekanan yang sesuai untuk pengembalian aliran permeat. Oleh karena itu, dianjurkan bahwa relaksasi dan pencucian balik digabungkan untuk hasil yang optimal (Kang, Lee & Kim

2003; Vallero, Lettinga & Lens, 2005). Relaksasi membran dapat dicapai dengan menghentikan penyaringan selama periode proses pemisahan. Ini memungkinkan filtrasi dipertahankan untuk waktu yang lebih lama sebelum pembersihan kimiawi membran. Direkomendasikan agar relaksasi dan backwashing digabungkan untuk hasil yang optimal (Kang, Lee & Kim 2003; Vallero, Lettinga & Lens, 2005). Relaksasi membran dapat dicapai dengan menghentikan penyaringan selama periode proses pemisahan. Ini memungkinkan filtrasi dipertahankan untuk waktu yang lebih lama sebelum pembersihan kimiawi membran.

Direkomendasikan agar relaksasi dan backwashing digabungkan untuk hasil yang optimal (Kang, Lee & Kim 2003; Vallero, Lettinga & Lens, 2005). Relaksasi membran dapat dicapai dengan menghentikan penyaringan selama periode proses pemisahan. Ini memungkinkan filtrasi dipertahankan untuk waktu yang lebih lama sebelum pembersihan kimiawi membran.

Bola spons digunakan dalam sistem membran tubular dengan diameter internal tabung membran lebih dari 10 mm. Dalam teknologi ini, diperlukan bola spons yang diameternya lebih besar dari diameter tabung membran, sehingga foulant dicuci secara

mekanis dari permukaan membran (Dudley 1998; Kyllönen, Pirkonen & Nyström 2005).



Gambar 2.12 Ilustrasi Skema Proses Backflushing yang Mungkin.

Metode pembilasan udara, atau semburan udara, digunakan untuk menghilangkan pengotoran eksternal dan untuk mengurangi lapisan kue yang mengendap pada permukaan membran (Arnal, García-Fayote & Sancho

2011). Meskipun banyak pola aliran tersedia, aliran siput adalah pola yang paling efektif untuk meningkatkan aliran massa (Psoch & Schiewer 2006) karena gas yang digunakan untuk semburan memiliki pengaruh pada efisiensi pembersihan. Studi melaporkan air-CO₂ campuran berkinerja lebih baik dibandingkan dengan air-N₂ campuran (Ngene et al. 2010). Penyemprotan udara biasanya dapat diterapkan selama proses penyaringan untuk mengurangi pengendapan pengotoran atau secara berkala untuk menghilangkan endapan yang sudah terbentuk. Metode ini diterapkan dalam membersihkan membran yang digunakan pada MF dan UF. Dapat

diaplikasikan untuk membersihkan membran dalam berbagai bentuk seperti tubular, lembaran datar, serat berongga, dan luka spiral (Cui & Taha 2003). Hal ini karena adanya gelembung udara yang meningkatkan turbulensi di sisi umpan membran, sehingga meningkatkan fluks permeat dan efisiensi pemisahan zat terlarut (Ducom & Cabassud 2003). BERSAMA2 permeasi balik digunakan untuk membran MF tubular dan konfigurasi serat berlubang di mana gas dipaksa dari sisi perembesan melalui serat internal (Fritsch & Morau 2008).

Pencucian balik osmotik dengan injeksi larutan hipersaline adalah metode yang baik

yang mempromosikan pemisahan yang efektif, mengangkat lapisan pengotor yang ada, melarutkan kristal mikro, dan memisahkan biomassa dari permukaan membran karena kejutan bio-osmotik (Lieberman & Lieberman 2005). Osmotik backwash diterapkan ketika tekanan osmotik sisi-umpan melebihi tekanan hidrolik yang diterapkan melintasi membran. Osmotic backwash bekerja berdasarkan mekanisme aliran balik air dari sisi permeat ke sisi umpan didorong oleh gaya osmotik atau perbedaan konsentrasi garam (misalnya natrium klorida) antar sisi membran. Setelah umpan mengalir melalui saluran umpan, itu mengencerkan lapisan polarisasi konsentrasi

dan membersihkan permukaan membran (Ramon, Agnon & Dosoretz 2010).

Ultrasonografi digunakan untuk meningkatkan permeasi dalam proses membran, terutama untuk meningkatkan mikrofiltrasi, ultrafiltrasi, dan pemisahan membran, dan ini dianggap sebagai metode perlakuan awal untuk meminimalkan pengotoran yang disebabkan oleh partikel dan zat organik. Keuntungan dari teknik ini adalah

- Membersihkan membran saat digunakan dapat dilakukan.
- Tidak ada polutan sekunder dan tidak ada masalah dalam pengangkutan dan

penanganan bahan kimia berbahaya, seperti pada pembersihan bahan kimia.

- Hidrogen peroksida dan radikal bebas hidroksil yang dihasilkan oleh USG secara langsung digunakan untuk desinfeksi sistem distribusi air minum, sehingga meminimalkan penggunaan klorin yang menghasilkan produk sampingan berbahaya (Lu, Du & Lipscomb 2009).

Medan listrik digunakan sebagai tenaga penggerak tambahan tanpa meningkatkan tegangan geser untuk mengurangi pengotoran membran dan mendukung proses pemisahan.

Medan listrik didasarkan pada fenomena yang disebut elektrokinetik, yaitu aliran cairan di sepanjang antarmuka padat-cair sebagai hasil dari gradien potensial yang diterapkan atau sebaliknya pada perkembangan potensial ketika cairan mengalir di sepanjang antarmuka (Sennett & Oliver 1965) . Kuat medan listrik bergantung pada beberapa faktor, diantaranya

- Sifat elektrokimia dari membran bekas dan zat terlarut terdispersi
- Konduktivitas pakan
- Penempatan dan material elektroda
- Sifat dan besarnya interaksi antara membran dan zat di tujuan

- Karakteristik pemisahan membran dan zat

Salah satu keunggulan utamanya adalah medan listrik dapat diterapkan dalam siklus kerja tanpa gangguan dan dapat diterapkan baik secara kontinyu maupun intermiten (Iritani, Mukai & Kiyotomo 2000).

Alat elektrokimia digunakan untuk membersihkan membran dengan kecepatan aliran silang rendah karena aplikasi potensial antara elektroda digunakan. Misalnya, digunakan untuk membersihkan filter mikro logam yang kotor dengan albumin dan fosfat. Kinerja pembersihan dan pemulihan dapat ditingkatkan dengan menerapkan arus negatif

melalui filter mikro pada media pembersih pH rendah. Perubahan pH di dekat antarmuka yang disebabkan oleh reduksi air dan gelembung gas hidrogen dapat meningkatkan pembersihan membran (Webster et al. 2000).

Perlakuan medan magnet mengubah morfologi dan adhesi jenis kerak, seperti kerak kalsium karbonat, mengubah kalsit menjadi aragonit. Pengolahan air magnetik juga dapat menurunkan kekerasan air dan menghilangkan, atau setidaknya mengurangi, skala yang ada atau menghasilkan skala yang lebih lembut dan kurang ulet. Misalnya, kesetimbangan antara kalsium terlarut dan kalsium karbonat terlarut menyebabkan

pengendapan kalsium karbonat seperti pada persamaan berikut:



Ini adalah dua bentuk alami utama CaCO_3 , dengan struktur kristal rhombohedra dan ortorombik (Coey & Cass 2000). Aragonit memiliki kepadatan yang lebih tinggi, lebih mudah larut, dan tidak mengendap, sehingga menghindari dan mengurangi pembentukan kerak. Keuntungan dari perawatan medan magnet antara lain biaya rendah, kesederhanaan pengoperasian, dan tidak membahayakan lingkungan. Ini dapat diterapkan dalam aliran umpan, di tangki

penyimpanan, atau pipa yang membawa aliran ke modul membran.

Biofouling dianggap sebagai salah satu bentuk pengotoran membran yang paling serius karena begitu terbentuk, biofilm sulit dihilangkan. Biofouling dapat dikurangi dengan (1) mengendalikan pengotoran biologis selama layanan dan mode offline, menggunakan pengenalan biosida secara terus menerus atau berkala; dan (2) membangun sanitasi yang efektif dan regimen pembersihan setelah membran menjadi kotor secara biologis.

Bergantung pada jenis biofouling, pembersihan membran secara teratur diperlukan. Biofouling dalam proses membran

dapat dikontrol atau dihilangkan (Mansouri, Harrison & Chen 2010) dengan tiga cara berikut:

1. Dosis biosida kontinyu atau intermiten
2. Mengoptimalkan kondisi operasi, termasuk perlakuan awal pakan untuk mengurangi ketersediaan nutrisi dan prosedur pembersihan
3. Mengembangkan membran baru atau memodifikasi membran yang ada agar tidak terlalu rentan terhadap biofouling

Biofouling dapat dikontrol dan dikurangi dengan agen kimia seperti larutan NaOH, agen pengkelat atau sekuestrasi, surfaktan, dan

disinfektan. Biosida dan bahan kimia pembersih biologis lainnya, seperti klorin, kloramin, hidrogen peroksida, isothiazolin asam perasetat, dan slimisida berbasis enzim, dapat digunakan. Penghapusan dan pengendalian biofilm dapat dilakukan dengan ozon dan pencegahan biofilm dengan desinfeksi sinar ultraviolet. Penting untuk diingat bahwa pembuangan atau pengurangan fosfat dari air diperlukan karena fosfat merupakan nutrisi penting bagi bakteri.

2.4.2 Suhu dan Waktu Pembersihan

Operasi pembersihan yang benar harus dilakukan secara teratur pada membran yang kotor, tetapi tidak dapat dilakukan pada

membran yang rusak. Penting juga untuk mempertimbangkan jenis membran karena setiap jenis bahan membran memerlukan jenis bahan pembersih dan proses pembersihan yang berbeda. Ada beberapa variabel penting dalam proses pembersihan, antara lain bahan pembersih, tindakan mekanis, suhu, dan waktu.

Suhu dapat mempengaruhi pembersihan membran oleh beberapa faktor seperti perubahan kesetimbangan suatu reaksi kimia, perubahan kinetika reaksi, dan perubahan kelarutan bahan pengotoran dan produk reaksi selama proses pembersihan.

Umumnya, suhu yang tinggi meningkatkan pembersihan membran. Bagaimanapun, penting untuk mempertimbangkan batasan dari membran. Misalnya, sebagian besar modul RO memiliki batasan suhu sekitar 40 hingga 50°C (biasanya membran polimer menahan suhu kurang dari 80°C). Mempertimbangkan membran keramik, terutama bila digunakan dalam pemisahan emulsi minyak-air, direkomendasikan suhu pembersihan yang sering dinaikkan sekitar 80°C. Sebagai alternatif, beberapa jenis bahan pembersih seperti bahan enzimatik, memiliki suhu optimal 30 sampai 60 ° C. Mengenai waktu, semakin lama prosedur pembersihan

berlangsung, semakin efektif pembersihannya. Namun, faktor-faktor seperti biaya dan efek jangka panjang pada membran harus dipertimbangkan.

2.5. Pengurangan Fouling Dengan Modifikasi Dan Pelapisan

Foulant dapat teradsorpsi pada permukaan membran melalui interaksi hidrofobik, tarikan van der Waals, ikatan hidrogen, interaksi asam basa Lewis, dan tolakan elektrostatis (De Velasquez et al. 2013; Voet et al. 2001). Pencegahan atau pengurangan interaksi yang tidak diinginkan antara foulant dan permukaan membran dapat menjadi cara penting untuk mengontrol adhesi

foulant. Namun hal tersebut dapat dilakukan melalui modifikasi permukaan membran dengan tujuan untuk meningkatkan hidrofilisitas permukaan, mengurangi kekasaran permukaan membran, dan memodifikasi muatan permukaan membran sehingga memiliki muatan listrik yang sama dengan foulant (Kochkodan & Sharma 2012).

Permukaan membran dapat dimodifikasi dan dilapisi sedemikian rupa sehingga tahan foulant adalah cara lain untuk mengurangi, dan dalam beberapa kasus mencegah, pengotoran. Bahan yang bervariasi dapat disesuaikan untuk antifouling, hidrofilisitas, pengisian daya,

imobilisasi, dan afinitas dengan menerapkan lapisan permukaan fungsional tipis.

Membran terdiri dari bahan polimer, seperti selulosa, polisulfon, poliakrilonitril, polivinilidena fluorida, polieter keton, dan polimida, yang bersifat hidrofobik dan tidak memiliki interaksi ikatan hidrogen dengan air. Larutan hidrofobik yang mendekati membran tersebut dapat dengan mudah mengendap di permukaan dan pada akhirnya menyebabkan penyumbatan pori. Dibutuhkan membran dari bahan yang memiliki sifat yang diinginkan, termasuk sifat pembentuk film, termostabilitas, ketahanan kimiawi, sifat tahan asam-basa, ketahanan erosi mikroba, ketahanan oksidatif,

dan pada saat yang sama memiliki kekuatan mekanik. Hampir tidak mungkin untuk memiliki semua properti ini dalam satu bahan. Karena itu,

Ada berbagai cara yang diterapkan untuk meningkatkan hidrofilitas membran dan kapasitas antipolusi, meningkatkan fluks membran, dan memperpanjang umur membran (Sun et al. 2013). Modifikasi membran dapat dilakukan dengan modifikasi matriks membran, termasuk pencampuran dan kopolimerisasi. Ini juga dapat dilakukan dengan memodifikasi permukaan dan memasukkan gugus kutub atau mencangkok gugus hidrofilik. Modifikasi fisik dan kimia juga dapat dilakukan

untuk mengurangi pengotoran membran. Berbagai teknik modifikasi, termasuk penggunaan aditif, perawatan kimiawi, komponen grafting, dan modifikasi serta pelapis pencampuran, telah dikembangkan. Melapisi substansi hidrofilik pada permukaan dapat memperkuat efek modifikasi lebih lanjut dan meningkatkan fluks membran. Namun, lapisan yang dilapisi dapat dengan mudah terkelupas.

2.5.1 Modifikasi Membran oleh Nanomaterials

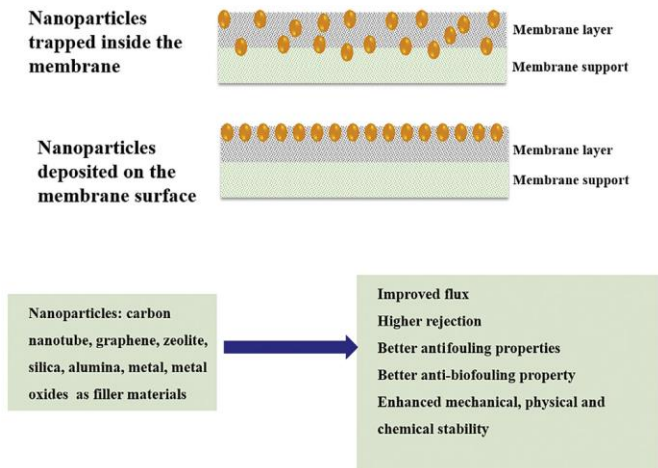
Dengan pesatnya pertumbuhan nanoteknologi, nanopartikel telah digunakan untuk memodifikasi sifat permukaan membran untuk meningkatkan kinerja membran dan

pengotoran membran paliat. Penerapan nanopartikel dalam pembuatan membran memungkinkan kontrol fouling tingkat tinggi dan kemampuan untuk menghasilkan struktur membran yang diinginkan. Misalnya, nanopartikel perak (Ag) yang memiliki sifat biosidal yang baik dan biasa digunakan untuk membuat lapisan antimikroba yang secara efektif dipasang pada permukaan membran komposit film tipis poliamida melalui ikatan kovalen dengan sistein dengan rumus $\text{HSCH}_2\text{CH}_2\text{NH}_2$, sebagai bahan penghubung atau pengikat. Membran yang dimodifikasi Ag-nanopartikel (NP) memiliki sifat antimikroba karena Ag dapat berinteraksi

dengan enzim disulfida atau gugus tiol DNA dan mengganggu proses metabolisme yang menghasilkan spesies oksigen reaktif atau mengganggu replikasi DNA, sehingga menyebabkan kematian bakteri. Ag-NPs dapat mengganggu fungsi sel dengan cara menempel pada sel atau melakukan penetrasi ke dalam bakteri, yang mengakibatkan kerusakan lebih lanjut (Misdan, Ismail & Hilal 2015; Rahaman et al. 2014).

Secara umum, untuk memodifikasi kekasaran dan hidrofobisitas permukaan membran, modifikasi membran dengan nanopartikel dapat dilakukan dengan menjebak nanopartikel di dalam membran dan

mengendapkan nanopartikel pada permukaan membran (Gambar 2.13).



Gambar 2.13 Ilustrasi Skema Membran Yang Dimodifikasi Dengan Partikel Nano.

Kesimpulan

Keberhasilan teknologi membran sangat bergantung pada bagaimana pengotoran ditangani. Perbedaan yang terlihat antara jenis fouling adalah sifat foulant yang menyebabkan fouling tersebut, karena setiap foulant memiliki pengaruh terhadap kinerja suatu membran. Fouling membran; jenis foulant; Klasifikasi fouling, seperti fouling koloid, fouling organik, fouling anorganik, dan biofouling, telah dibahas. Faktor-faktor yang terkait dengan umpan, variabel pemrosesan, dan yang terkait dengan bahan membran, dibahas pengaruhnya terhadap fouling membran. Bab ini memperkenalkan mekanisme fouling, seperti

pembentukan adsorpsi lapisan cake pada permukaan membran, pemblokiran pori, dan biofouling.

Pembersihan dan pengendalian fouling membran dengan metode pretreatment telah dibahas. Modifikasi membran dapat meningkatkan perbaikan polaritas permukaan, mengurangi sudut kontak, dan meningkatkan energi permukaan. Dengan meluasnya penggunaan teknologi membran, bahan yang digunakan sebagai membran dan penelitian tentang sifat-sifatnya harus mendapat perhatian. Lebih banyak jenis metode modifikasi akan muncul setelah bahan baru dikembangkan untuk aplikasi membran. Untuk

lebih mempromosikan aplikasi membran, penyelidikan lebih lanjut harus fokus pada pengembangan teknologi pretreatment yang efektif, kondisi umpan dan operasi membran yang efisien, dan pada desain dan pengembangan bahan membran fungsional. Oleh karena itu, tujuan dan tantangannya adalah untuk menemukan membran yang secara bersamaan dapat memberikan fluks yang sesuai dan mengurangi pengotoran.

Daftar Pustaka

- Arnal, J.M., García-Fayos, B., Sancho, M., 2011. Membrane cleaning. In: Ning, R.Y. (Ed.), *Expanding Issues in Desalination*. European Union, Rijeka, Croatia, pp. 65–84.
- Bartels, C., Wilf, M., Casey, W., Campbell, J., 2008. New generation of low fouling nanofiltration membranes. *Desalination*. 221 (1–3), 158–167.
- Belfort, G., Davis, R.H., Zydney, A.L., 1994. The behavior of suspensions and macromolecular solutions in cross-flow microfiltration. *J. Membr. Sci* 96, 1–58.
- Bowen, W.R., Gan, Q., 1991. Properties of microfiltration membranes flux loss during constant pressure permeation of bovine serum albumin. *Biotechnol. Bioeng* 38, 688–695.
- Chandavarkar, A.S., 1990. Dynamics of fouling of microporous membranes by proteins. Ph.D thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Chennamsetty, R.K., 2007. Evolution of two polymeric nanofiltration membranes following

- ion beam irradiation. The University of Toledo, Ohio, United States.
- Choi, J.-H., Jegal, J., Kim, W.-N., 2006. Fabrication and characterization of multi-walled carbon nanotubes/polymer blend membranes. *J. Membr. Sci* 284 (1-2), 406-415.
- Coey, J.M.D., Cass, S., 2000. Magnetic water treatment. *J. Magn. Magn. Mater* 209 (1-3), 71-74.
- Cui, Z., Taha, T., 2003. Enhancement of ultrafiltration using gas sparging: a comparison of different membrane modules. *J. Chem. Tech. Biotechnol* 78 (2-3), 249-253.
- De Velasquez, M.T.O., Monje-Ramirez, I., Paredes, J.F.M., 2013. Effect of ozone in UF-membrane flux and dissolved organic matter of secondary effluent. *Ozone-Sci. Eng* 35, 208-216.
- Ducom, G., Cabassud, C., 2003. Possible effects of air sparging for nanofiltration of salted solutions. *Desalination* 156 (1-3), 267-274.

- Dudley, L.Y., 1998. Membrane autopsies for reversing fouling in reverse osmosis. *Membr. Tech* 95, 9–12.
- Elimelech, M., Chen, W.H., Waypa, J.J., 1994. Measuring the zeta (electrokinetic) potential of reverse osmosis membranes by a streaming potential analyzer. *Desalination* 95 (3), 269.
- Elimelech, M., Xiaohua, Z., Childress, A.E., Seungkwan, H., 1997. Role of membrane surface morphology in colloidal fouling of cellulose acetate and composite aromatic polyamide reverse osmosis membranes. *J. Membr. Sci* 127 (1), 101–109.
- Fan, L.H., Harris, J.L., Roddick, F.A., Booker, N.A., 2001. Influence of the characteristics of natural organic matter on the fouling of microfiltration membranes. *Water Res* 35, 4455–4463.
- Franken, A.C.M., 2009. Prevention and control of membrane fouling: practical implications and examining recent innovations. *Membraan Applicatie Centrum Twente*.
- Fritsch, J., Morau, C.I., 2008. Development and optimization of a carbon dioxide-aided cold mi-

- crofiltration process for the physical removal of microorganisms and somatic cells from skim milk. *J. Dairy Sci* 91, 3744–3760.
- Gai, X.J., Kim, H.S., 2008. The role of powdered activated carbon in enhancing the performance of membrane systems for water treatment. *Desalination*. 225, 288–300.
- Gao, W., Liang, H., Ma, J., Chen, Z., Han, Z., Li, G., 2011. Membrane fouling control in ultrafiltration technology for drinking water production: a review. *Desalination* 272 (1–3), , 1-8.
- Guell, C., Czekaj, P., Davis, R.H., 1999. Microfiltration of protein mixtures and the effects of yeast on membrane fouling. *J. Membr. Sci* 155, 113–122.
- Guillen-Burrieza, E., Ruiz-Aguirre, A., Zaragoza, G., Arafat, H.A., 2014. Membrane fouling and cleaning in long term plant-scale membrane distillation operations. *J. Membr. Sci* 468, 360–372.
- Han, M.J., Nam, S.T., 2002. Thermodynamic and rheological variation in polysulfone solution by PVP and its effect in the preparation of phase

- inversion membrane. *J. Membr. Sci* 202 (1-2), 55-61.
- Heinemann, P., Howell, J.A., Bryan, R.A., 1988. Microfiltration of protein solutions: effect of fouling on rejection. *Desalination* 68, 243-251.
- Hilal, N., Khayet, M., Wright, C.J., 2012. *Membrane Modification: Technology and Applications*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Hoek, E.M.V., Allred, J., Knoell, T., Jeong, B.-H., 2008. Modeling the effects of fouling on full-scale reverse osmosis processes. *J. Membr. Sci* 314, 33-49.
- Hong, S., Elimelech, M., 1997. Chemical and physical aspects of natural organic matter (NOM) fouling of nanofiltration membranes. *J. Membr. Sci* 132, 159-181.
- Iritani, E., Mukai, Y., Kiyotomo, Y., 2000. Effects of electric field on dynamic behaviours of dead-end inclined and downward ultrafiltration of protein solutions. *J. Membr. Sci* 164, 1-2, 51-57.
- Kang, I.-J., Lee, C.-H., Kim, K.-J., 2003. Characteristics of microfiltration membranes in a

- membrane coupled sequencing batch reactor system. *Water Res* 37, 1192–1197, doi:10.1016/S0043-1354(02)00534-1.
- Kelly, S.T., Opong, W.S., Zydney, A.L., 1993. The influence of protein aggregates on the fouling of microfiltration membranes during stirred cell filtration. *J. Membr. Sci* 80, 175–187.
- Kelly, S.T., Zydney, A.L., 1994. Effects of intermolecular thioldisulfide interchange reactions on BSA fouling during microfiltration. *Biotechnol. Bioeng* 44, 972–982.
- Kelly, S.T., Zydney, A.L., 1997. Protein fouling during microfiltration: comparative behavior of different model proteins. *Biotechnol. Bioeng* 55, 91–100.
- Khulbe, K.C., Feng, C.Y., Matsuura, T., 2008. *Synthetic Polymeric Membranes Characterization by Atomic Force Microscopy*. Springer, Berlin.
- Kochkodan, V.M., Sharma, V.K., 2012. Graft polymerization and plasma treatment of polymer membranes for fouling reduction: a review. *J. Environ. Sci. Health A* 47, 1713–1727.

- Kuberkar, V., Czekaj, P., Davis, R.H., 1998. Flux enhancement for membrane filtration of bacterial suspensions using high-frequency backpulsing. *Biotech. Bioeng* 60, 77–87.
- Kuruzovich, J.N., Piergiovanni, P.R., 1996. Yeast cell microfiltration: optimization of backwashing for delicate membranes. *J. Membr. Sci* 112, 241–247.
- Kyllönen, H.M., Pirkonen, P., Nyström, M., 2005. Membrane filtration enhanced by ultrasound: a review. *Desalination* 181, 319–335.
- Lee, K.-W., Seo, B.-K., Nam, S.-T., Han, M.-J., 2003. Trade-off between thermodynamic enhancement and kinetic hindrance during phase inversion in the preparation of polysulfone membranes. *Desalination* 159 (3), 289–296.
- Liang, H., Gong, W., Chen, J., Li, G., 2008. Cleaning of fouled ultrafiltration (UF) membrane by algae during reservoir water treatment. *Desalination* 220, 267–272.
- Liberman, B., Liberman, I., 2005. Replacing membrane CIP by direct osmosis cleaning. *Desalination Water Reuse* 15 (1), 28–34.

- Lin, C.J., Shirazi, S., Rao, P., 2005. Mechanistic model for CaSO₄ fouling on nanofiltration membrane. *J. Environ. Eng* 131 (10), 1387–1392, (2005).
- Lu, J.-Y., Du, X., Lipscomb, G., 2009. Cleaning membranes with focused ultrasound beams for drinking water treatment. In: *Proceedings of 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium, Roma, Italy*, pp. 1195–1198.
- Ma, H., Hakim, L.F., Bowman, C.N., Davis, R.H., 2001. Factors affecting membrane fouling reduction by surface modification and backpulsing. *J. Membr. Sci* 189 (2), 255–270.
- Mansouri, J., Harrisson, S., Chen, V., 2010. Strategies for controlling biofouling in membrane filtration systems: challenges and opportunities. *J. Mater. Chem* 20, 4567–4586.
- Meng, F., Chae, S.-R., Drews, A., Kraume, M., Shin, H.-S., Yang, F., 2009. Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): membrane fouling and membrane material. *Water Res* 43 (6), 1489–1512.

- Meng, S., Ye, Y., Mansouri, J., Chen, V., 2014. Fouling and crystallisation behaviour of superhydrophobic nano-composite PVDF membranes in direct contact membrane distillation. *J. Membr. Sci* 463, 102–112.
- Misdan, N., Ismail, A.F., Hilal, N., 2015. Recent advances in the development of (bio)fouling resistant thin film composite membranes for desalination. *Desalination* 380, 105–111.
- Mohanty, K., Purkait, M.K., 2012. *Membrane Technologies and Applications*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Mulder, M., 1996. *Basic Principles of Membrane Technology*, second ed. Kluwer Academic/Springer, The Netherlands.
- Naidu, G., Jeong, S., Kim, S.-J., Kim, I.S., Vigneswaran, S., 2014. Organic fouling behavior in direct contact membrane distillation. *Desalination* 347, 230–239.
- Ngene, I.S., Lammertink, R.G.H., Kemperman, A.J.B., van de Ven, W.J.C., Wessels, L.P., Wessling, M., van der Meer, W.G.J., 2010. CO₂ nucleation in membrane spacer channels remove

- biofilms and fouling deposits. *Ind. Eng. Chem. Res* 49 (20), 10034–10039.
- Paul, J.H., Jeffrey, W.H., 1984. The effect of surfactants on the attachment of estuarine and marine bacteria on surface. *Can. J. Microbiol* 31, 224–228.
- Phao, N., 2013. Synthesis and application of novel functionalized nanostructured membranes incorporating N-doped CNT supported metal nanoparticles in water treatment, University of the Witwatersrand.
- Psoch, C., Schiewer, S., 2006. Direct filtration of natural and simulated river water with air sparging and sponge ball for fouling control. *Desalination* 197, 190–204.
- Rahaman, M.S., Therien-Aubin, H., Ben-Sasson, M., Ober, C.K., Nielsen, M., Elimelech, M., 2014. Control of biofouling on reverse osmosis polyamide membranes modified with biocidal nanoparticles and antifouling polymer brushes. *J. Mater. Chem. B* 2, 1724–1732.

- Ramon, G., Agnon, Y., Dosoretz, C., 2010. Dynamics of an osmotic backwash cycle. *J. Membr. Sci.* 364 (1-2), 157-166.
- Ridgway, H.F., 1988. Microbial adhesion and biofouling of reverse osmosis membranes. In: Pakekh, B.S., Dekker, M. (Eds.), *Reverse Osmosis Technology: Applications for High Purity Water Production*. Marcel Dekker Inc., New York, pp. 429-481.
- Ridgway, H.F., Rigby, M.G., Argo, D.G., 1985. Bacterial adhesion and fouling of reverse osmosis membranes. *J. Am. Water Works Assoc* 77, 97-106.
- Rosenberg, M., Doyle, R.J., 1990. Microbial Cell Hydrophobicity: History, Measurement, and Significance in Microbial Cell Surface Hydrophobicity. ASM, Washington DC, pp. 1-38.
- Scott, K., 1995. *Handbook of Industrial Membranes*. Elsevier, New York.
- Sennett, P., Oliver, J.P., 1965. Colloidal dispersions electrokinetic effects and the concept of zeta potential. *Ind. Eng. Chem* 57 (8), 32-49.

- Shirazi, S., Lin, C.-J., Chen, D., 2010. Inorganic fouling of pressure-driven membrane processes—a critical review. *Desalination* 250, 236–248.
- Song, L., Elimelech, M., 1995. Theory of concentration polarization in cross-flow filtration. *J. Chem. Soc* 91, 3389–3398.
- Speth, T.F., Summers, R.S., Gusses, A.M., 1998. Nanofiltration foulants from a treated surface water. *Environ. Sci. Tech* 32, 3612–3617.
- Su, S.K., Liu, J.C., Wiley, R.C., 1993. Cross-flow microfiltration with gas backwash of apple juice. *J Food Sci* 58, 639–641.
- Sun, Y., Huang, X., Chen, E., Wen, X., 2004. Dual functional filtration/aeration membrane bioreactor for domestic wastewater treatment. *Proceedings of Water Environment Membrane Technology*, June 7–10, Seoul, Korea. IWA Publishing, London.
- Sun, W., Liu, J., Chu, H., Dong, B., 2013. Pretreatment and membrane hydrophilic modification to reduce membrane fouling. *Membranes (Basel)* 3 (3), 226–241.

- Tijing, L.D., Woo, Y.C., Choi, J.S., Lee, S., Kim, S.H., Shon, H.K., 2015. Fouling and its control in membrane distillation—a review. *J. Membr. Sci* 475, 215–244.
- Tracey, E.M., Davis, R.H., 1994. Protein fouling of track-etched polycarbonate microfiltration membranes. *J. Colloid Interface Sci* 167, 104–116.
- Tu, C.-Y., Liu, Y.-L., Lee, K.-R., Lai, J.-Y., 2006. Hydrophilic surface-grafted poly(tetrafluoroethylene) membranes using in pervaporation dehydration processes. *J. Membr. Sci* 274 (1–2), 47–55.
- Vallero, M.V.G., Lettinga, G., Lens, P.N.L., 2005. High rate sulfate reduction in a submerged anaerobic membrane bioreactor (sambar) at high salinity. *J. Membr. Sci.* 253, 217–232. doi:10.1016/j.memsci.2004.12.032.
- van de Lisdonk, C.A.C., van Paassen, J.A.M., Schippers, J.C., 2000. Monitoring scaling in nanofiltration and reverse osmosis membrane systems. *Desalination* 132, 101–108.

- van der Bruggen, B., Mänttari, M., Nyström, M., 2008. Drawbacks of applying nanofiltration and how to avoid them: a review. *Sep. Purif. Technol* 63 (2), 251–263.
- van der Bruggen, B., Vandecasteele, C., 2002. Modelling of the retention of uncharged molecules with nanofiltration. *Water Res* 36, 1360–1368.
- Voet, D., Voet, J.G., Pratt, C.W., 2001. *Fundamentals of Biochemistry*, rev. ed. Wiley, New York, p. 30.
- Vrijenhoek, E.M., Hong, S., Elimelech, M., 2001. Influence of membrane surface properties on initial rate of colloidal fouling of reverse osmosis and nanofiltration membranes. *J. Membr. Sci* 188 (1), 115–128.
- Wang, C., Zhao, S., Wei, Y., 2012. Hydrophilic modification of microporous polysulfone membrane via surface-initiated atom transfer radical polymerization and hydrolysis of poly(glycidylmethacrylate). *Chin. J. Chem.* 30 (10), 2473–2482.

- Webster, R.D., Chilukuri, S.V.V., Levesley, J.A., Webster, B.J., 2000. Electrochemical cleaning of microporous metallic filters fouled with bovine serum albumin and phosphate under cross-flow velocities. *J. Appl. Electrochem* 30 (8), 915–924.
- Zhang, T.C., Surampalli, R.Y., Vigneswaran, S., Tyagi, R.D., Ong, S.L., Kao, C.M., 2012. *Membrane Technology and Environmental Applications*. American Society of Civil Engineers, Reston, VA.
- Zhu, X., Elimelech, M., 1997. Colloidal fouling of reverse osmosis membranes: measurements and fouling mechanisms. *Environ. Sci. Tech* 31, 3654–3662.

BAB 3.

KLASIFIKASI MEMBRAN BERDASARKAN BAHAN PEMBENTUKNYA

3.1. Pendahuluan

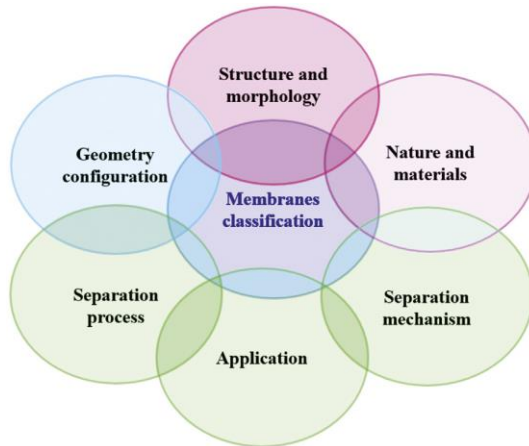
Proses pemisahan membran telah meningkat dari proses khusus menjadi pasar yang berkembang di seluruh dunia. Membran berhasil digunakan untuk produksi air, pengolahan air limbah, pemisahan gas dan minyak, pemulihan katalis, dan lain sebagainya. Pertimbangan utama saat memilih bahan membran adalah aplikasi yang ditargetkan. Oleh karena itu, beberapa faktor harus diperhatikan, antara lain permeabilitas, stabilitas kimia, kekuatan mekanik, ketahanan

fouling, kemampuan pengecoran, karakteristik pori, fluks, dan lain sebagainya. Faktor lain, seperti faktor pemisahan, selektivitas, sensitivitas, dan biaya, juga harus dipertimbangkan.

Karena berbagai macam membran tersedia untuk berbagai aplikasi, ada beberapa skema klasifikasi. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1, kita akan membahas klasifikasi membran berdasarkan:

- Alam dan material
- Struktur dan morfologi
- Geometri dan konfigurasi
- Proses operasi dan pemisahan

- Mekanisme pemisahan
- Aplikasi



Gambar 3.1 Skema Kategori Umum Klasifikasi Membran.

Membran banyak tersedia dalam bahan alami atau sintetis. Bahan sintetis bisa organik, seperti polimer dan makromolekul, dan anorganik, seperti keramik dan logam (Nath 2011). Struktur dan morfologi membran bisa

jadi simetris atau asimetris. Berdasarkan strukturnya, membran bisa homogen atau heterogen, tebal atau tipis, dan transpor melintasi membran bisa pasif dan aktif atau reaktif, tergantung pada kemampuan membran untuk mengubah sifat kimiawi spesies yang merembes (Graham 1861; Lloyd 1985). Transpor pasif digerakkan oleh berbagai cara seperti tekanan, konsentrasi, dan perbedaan listrik.

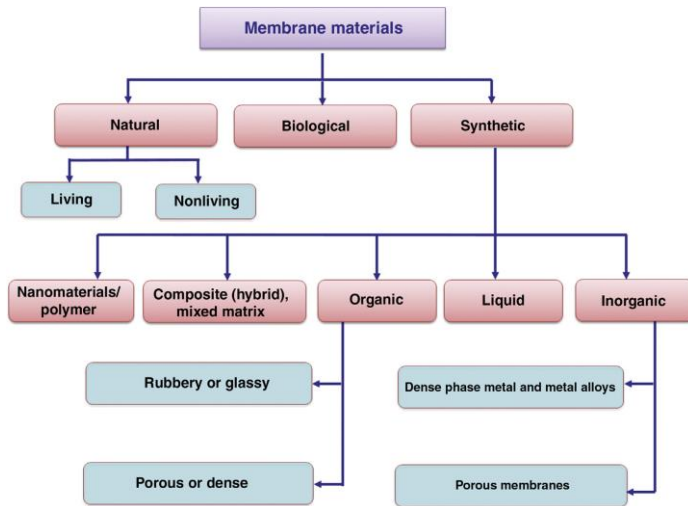
Contoh geometri atau konfigurasi adalah membran datar dan tubular. Proses operasi dan pemisahan didasarkan pada sifat fisik atau kimia dari komponen yang akan dipisahkan. Mekanisme pemisahannya bisa berupa

saringan, kelarutan-difusivitas, interaksi muatan, dan lain sebagainya. Ada banyak aplikasi teknologi membran baik dari segi fase (cair dan gas) dan dalam bidang (industri air, farmasi, makanan, petrokimia, minyak, dan gas).

3.2. Klasifikasi Berdasarkan Bahan

Pada prinsipnya, pemilihan bahan untuk fabrikasi membran bergantung pada beberapa parameter termasuk tugas pemisahan, struktur membran yang diinginkan, dan kondisi operasi yang harus dilakukan. Selain itu, biaya serta stabilitas dan kekuatan kimia dan mekanik juga dipertimbangkan. Bahan membran biasanya

dibagi menjadi alami, biologis, dan sintetis, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Klasifikasi Umum Bahan Membran.

Meskipun membran biologis mudah dibuat, namun memiliki beberapa kekurangan, seperti suhu operasi yang terbatas ($<100\text{ }^{\circ}\text{C}$) dan kisaran pH, masalah yang berkaitan dengan pembersihannya, dan kerentanan terhadap

serangan mikroba karena asal alaminya (Xia et al. 2003).

3.2.1 Membran Sintetis

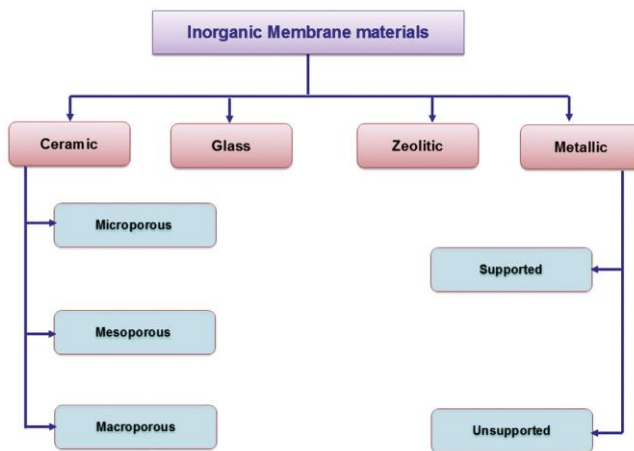
Membran sintetis dapat dibagi lagi menjadi membran organik, cair, anorganik, komposit atau hibrida, dan bahan nanopolimer. Penerapan membran organik polimerik umumnya terbatas pada suhu rendah dan pemisahan campuran yang secara kimiawi inert. Untuk operasi suhu tinggi dan dengan campuran kimiawi aktif, membran anorganik, yang dibuat dari bahan seperti keramik, aluminium, baja bermutu tinggi, kaca, dan karbon yang diperkuat serat, direkomendasikan untuk digunakan. Kategori

membran komposit, juga disebut membran matriks hibrid atau campuran, mencakup membran polimerik dan anorganik. Membran yang bertindak sebagai penghalang pemisah sebenarnya dilapisi pada penyangga berpori dan hanya memungkinkan zat tertentu untuk menembusnya.

3.2.2 Membran Anorganik

Membran anorganik beroperasi pada suhu yang lebih tinggi dari 200°C dan berguna untuk proses kimia industri karena stabilitas termal dan kekuatan mekaniknya. Secara umum ada dua kelas membran anorganik: (i) logam fase padat, paduan logam dan keramik (perovskit), dan (ii) membran keramik berpori.

Membran anorganik dapat dibuat dari bahan keramik, kaca, dan zeolitik atau logam seperti yang ditunjukkan pada klasifikasi umum bahan membran anorganik (Gambar 3.3).



Gambar 3.3 Klasifikasi Umum Bahan Membran Anorganik.

Membran keramik dapat digambarkan sebagai bahan berpori asimetris yang dibentuk oleh suatu penyangga. Penyangga makropori adalah lapisan dengan ketebalan penyangga

sekitar 1 sampai 3 mm meskipun dengan mikrofiltrasi tebal lapisan biasanya 10 sampai 30 mm. Perlu diingat bahwa klasifikasi International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) untuk ukuran pori adalah sebagai berikut:

- Makropori adalah >50 nm.
- Mesopori berukuran 2 hingga 50 nm.
- Mikropori adalah <2 nm.

Oksida logam yang paling banyak digunakan untuk membran adalah zirkonia (ZrO_2), alumina (Al_2O_3), titania (TiO_2), dan ceria (CeO_2), dan ini digunakan dalam membran ultrafiltrasi dengan ketebalan beberapa

mikrometer. Membran nanofiltrasi terbuat dari bahan zirkonia dan titania dengan ketebalan <1 mm. Sedangkan lapisan pendukung dan mikrofiltrasi diuraikan dengan teknik keramik klasik, proses sol-gel digunakan untuk lapisan ultra dan nanofiltrasi.

Membran anorganik memiliki beberapa keunggulan. Ini termasuk yang berikut:

- Mereka memiliki distribusi ukuran pori yang jelas.
- Mereka menunjukkan ketahanan tinggi terhadap panas (stabilitas termal tinggi); misalnya, membran keramik memiliki ketahanan suhu tinggi (350°C).

- Mereka memiliki ketahanan yang tinggi terhadap bahan kimia, secara kimiawi stabil, dan telah mengurangi penuaan dan umur panjang; misalnya, membran keramik tidak bereaksi terhadap sebagian besar larutan kimia kecuali HF dan H₃PO₄.
- Mereka stabil pada kisaran pH yang luas; misalnya, membran keramik stabil pada pH 1 hingga 13.
- Mereka menunjukkan ketahanan erosi dan dapat menunjukkan aktivitas katalitik atau elektrokimia.
- Mereka dapat digunakan dengan prosedur pembersihan yang ketat,

seperti bahan pembersih yang lebih kuat, sterilisasi uap, pembilasan balik, dan pembersihan ultrasonik.

- Mereka kurang rentan terhadap serangan mikroba dan degradasi biologis.
- Mereka dapat digunakan di lingkungan yang lebih parah daripada membran polimerik. Oleh karena itu, mereka digunakan dalam beberapa aplikasi, termasuk industri makanan, minuman, bioteknologi, farmasi, dan petrokimia, dan dalam pengendalian lingkungan, industri elektronik, dan pemisahan gas.

Namun, ada beberapa kelemahan membran anorganik yang menghambat atau setidaknya membatasi aplikasi industrinya, antara lain:

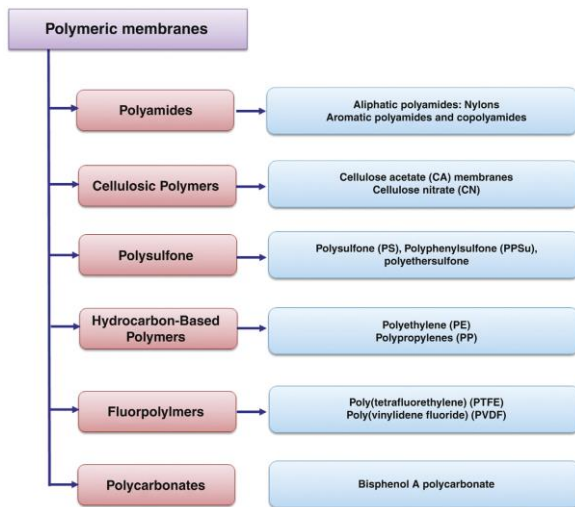
- Kesulitan dalam proses pembuatan untuk mencapai kualitas produk akhir yang dapat direproduksi.
- Menjadi bahan yang rapuh secara intrinsik.
- Memiliki tapak yang relatif lebih besar dan jauh lebih berat dibandingkan dengan membran polimerik, terutama konstruksi modul membran anorganik yang mahal

Umumnya, bahan anorganik digunakan untuk membuat membran, terutama jika penggunaan membran polimer dikecualikan karena karakteristik air baku atau jika pembersihan sering diperlukan seperti dalam pengolahan air limbah.

3.2.3 Membran Organik

Bahan polimer adalah bahan yang paling umum digunakan untuk membuat membran. Sejumlah besar bahan polimer tersedia; oleh karena itu, dimungkinkan untuk memilih polimer yang sesuai untuk masalah pemisahan spesifik. Contohnya adalah *polisulfon* (PS), *polietersulfon* (PES), *poliakrilonitril* (PAN), *polivinilidena fluorida* (PVDF), *polifenilulfon*

(PPSu), *polieterimida* (PEI), *selulosa regenerasi*, *selulosa asetat* (CA), dan *poliamida* (PA).



Gambar 3.4 Ilustrasi Bahan Polimer Yang Digunakan Untuk Industri Membran Dengan Beberapa Contoh Umum.

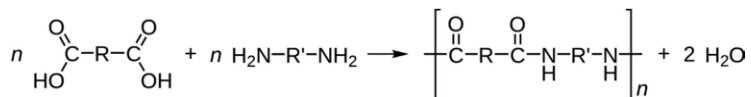
Oleh karena itu, untuk mempermudah pembahasan, bahan-bahan ini akan dikategorikan menjadi *PA*, *polimer selulosa*, *PS*, polimer berbasis *hidrokarbon*, *fluoropolimer*,

dan *polikarbonat*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4.

3.2.4 Poliamida

Gugus amida dalam rantai mencirikan gugus polimer ini. PA alifatik dan semiaromatik digunakan sebagai polimer dasar untuk membran mikrofiltrasi.

PA umumnya dapat dibuat dengan kondensasi asam dikarboksilat dengan poliamina yang memiliki gugus amino.



PA alifatik, seperti nilon 6; nilon 6,6; dan nilon 6,12, sangat umum dalam berbagai aplikasi. Namun, PA aromatik lebih disukai

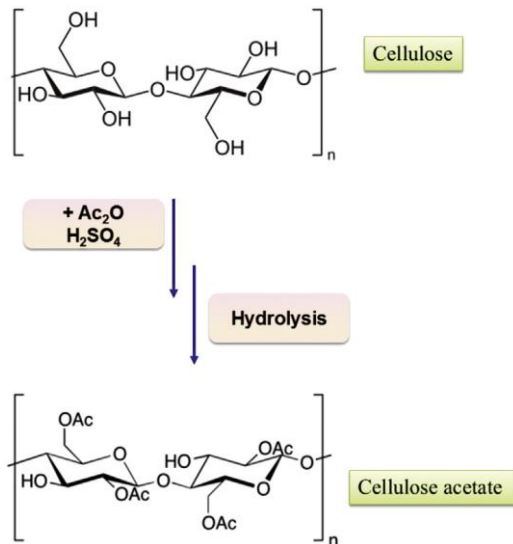
karena kompatibilitas kimia, termal, dan fisiknya yang baik dengan banyak pelarut, yang menjadikannya pilihan aplikasi filtrasi. Mereka memiliki sifat yang baik, seperti ketahanan lelah dan abrasi, tetapi ketahanan terhadap kondisi pH tinggi dan rendah yang ekstrim terbatas. Membran *PA* memiliki muatan yang lemah dan oleh karena itu bersifat hidrofilik dan menunjukkan kapasitas adsorpsi yang sangat tinggi. Adsorpsi air ke dalam membran menyebabkan pembengkakan membran, tetapi hal ini tidak mempengaruhi kekokohan membran. Strukturnya dibatasi pada matriks yang lebih simetris dengan porositas rendah. Mereka digunakan dalam filtrasi untuk pelarut

dimana kompatibilitas kimia menguntungkan (Reif 2006).

3.2.5 Polimer Selulosa

Polimer selulosa adalah polisakarida dengan berat molekul hingga 1.500.000 g / mol. Mereka dapat dibentuk dari ester, seperti selulosa asetat dan selulosa nitrat, atau dari eter, seperti etil selulosa. Selulosa dapat diekstraksi dari sumber nabati, seperti pulp kayu dan kapas. Selulosa asetat diproduksi dengan modifikasi kimiawi selulosa. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5, selulosa diesterifikasi dalam kondisi asam, diikuti dengan hidrolisis parsial. Ini menghasilkan

penggantian gugus hidroksil dalam selulosa dengan gugus asetil.



Gambar 3.5 Representasi Skema Esterifikasi Selulosa Dengan Anhidrida Asetat Untuk Menghasilkan Selulosa Asetat.

3.2.6 Polisulfon

Polimer yang mengandung sulfone termasuk PS dan PES. Mereka berstruktur amorf dan relatif polar, oleh karena itu, hanya

dapat menyerap sedikit air dan oleh karena itu menunjukkan hampir tidak ada pembengkakan dalam larutan berair. Selain itu, rantai PS menghasilkan modulus yang sangat fleksibel dan matriks membran yang kuat. Polimer membran tahan terhadap hidrolisis pada seluruh rentang pH, bahkan dalam uap panas atau air. Pelarut organik, seperti dimetilformamida dan dimetil sulfoksida, yang polaritasnya mirip dengan polimer, dapat menunjukkan efek pelarutan. Ketahanan terhadap iradiasi pengion dan stabilitas termal hingga $>200^{\circ}\text{C}$ luar biasa. Membran yang terbuat dari PS dapat menjadi simetris, asimetris, atau kombinasi keduanya dan

dengan demikian menawarkan struktur membran terluas dengan porositas tinggi. Mereka cocok untuk mikrofiltrasi, ultrafiltrasi, nanofiltrasi, atau sebagai pendukung dasar untuk membran komposit.

3.2.7 Polimer Berbasis Hidrokarbon

Polimer berbasis hidrokarbon dibentuk dari monomer vinil ($H_2C = CHR$). Contohnya adalah polietilen dan polipropilena, yang masing-masing dapat dibuat dari polimerisasi etena dan propilena. Membran polypropylene mencapai porositas terbatas dan sebagian besar memiliki struktur simetris. Kekuatan dan keserbagunaannya dihasilkan dari matriks kristal yang saling terkait yang memungkinkan

pembentukan struktur polimer yang kaku dan tangguh. Kecuali polietilen, jenis polimer ini dapat diklasifikasikan berdasarkan posisi gugus alkil (R):

- Polimer hidrokarbon isotaktik (kristalin) adalah polimer dengan semua gugus R di sisi yang sama dari rantai karbon.
- Polimer hidrokarbon ataktik (amorf) adalah polimer dengan semua gugus R yang tersusun secara acak pada kedua sisi rantai karbon.
- Polimer hidrokarbon sindiotaktik (sebagian kristal) adalah polimer

dengan gugus R yang terdistribusi secara teratur pada kedua sisi rantai karbon.

3.2.8 Fluoropolimer

Contoh fluoropolimer adalah *polytetrafluorethylene* (PTFE) dan *polyvinylidene fluoride* (PVDF). Membran yang terbuat dari polimer ini simetris dengan porositas tinggi, menghasilkan laju aliran yang baik. Mereka biasanya digunakan dalam teknologi membran. PTFE memiliki keuntungan karena relatif stabil secara termal dengan suhu operasi $>260^{\circ}\text{C}$ dan memiliki resistivitas terhadap semua pelarut yang diketahui. Jadi dengan hidrofobisitas ekstrimnya, ia

merupakan kandidat yang sangat baik untuk penyaringan bahan kimia atau udara panas.

3.2.9 Polikarbonat

Contoh polikarbonat yang paling umum adalah polikarbonat bisphenol A. Ini memiliki ketangguhan ekstrim, tahan panas tinggi, harga murah, dan transparansi tinggi. Ini kompatibel dengan air, alkohol, dan pelarut alifatik. Karena porositas yang rendah dibandingkan dengan polimer lain, jenis polimer ini dibatasi dalam penggunaan membran.

Kesimpulan

Bab ini memberikan pengenalan singkat dan komprehensif tentang klasifikasi membran, termasuk klasifikasi menurut sifat dan bahan. Pilihan bahan membran tertentu untuk aplikasi tertentu bergantung pada banyak faktor.

Daftar Pustaka

- Graham, T., 1861. Liquid diffusion applied to analysis. *Phil. Trans. Roy. Soc.* 151, 183–224.
- Lloyd, D.R., 1985. Membrane materials science: an overview. In: Cadotte, J.E. (Ed.), *Materials Science of Synthetic Membranes*, ACS Symposium Series, vol. 269, American Chemical Society, Washington, DC, pp. 1–21.
- Nath, K., 2011. *Membrane Separation Processes*. PHI Learning Private Limited, New Delhi.
- Reif, O.W., 2006. Microfiltration membranes: characteristics and manufacturing. *Adv. Biochem. Eng., Sterile Filtration* 98, 73–103.
- Xia, Y., Lu, Y., Kamata, K., Gates, B., Yin, Y., 2003. Macroporous materials containing three-dimensionally periodic structures. In: Yang, P. (Ed.), *Chemistry of Nanostructured Materials*. World Scientific, Singapore, pp. 69–100.



Tentang Penulis
Kiki Rezki Lestari,
S.T.,M.Sc. Lulus S-1 pada
program studi Teknik Fisika
Universitas Nasional di
tahun 2013.

Melalui pendanaan *National Research Foundation of Korea (NRF)*, berhasil mendapatkan beasiswa untuk *Research Assistantship of Basic Science Research Program* untuk menempuh jenjang Magister di Hankuk University of Foreign Studies, Korea Selatan pada program studi Fisika di tahun 2014. Saat ini menjabat sebagai Ketua Program Studi Teknik Fisika, Universitas Nasioanal. Pernah bekerja sebagai *Research Assistant* di *Center of Sustainable Energy and Resources Management* pada tahun 2016.

ISBN 978-623-7376-73-6

