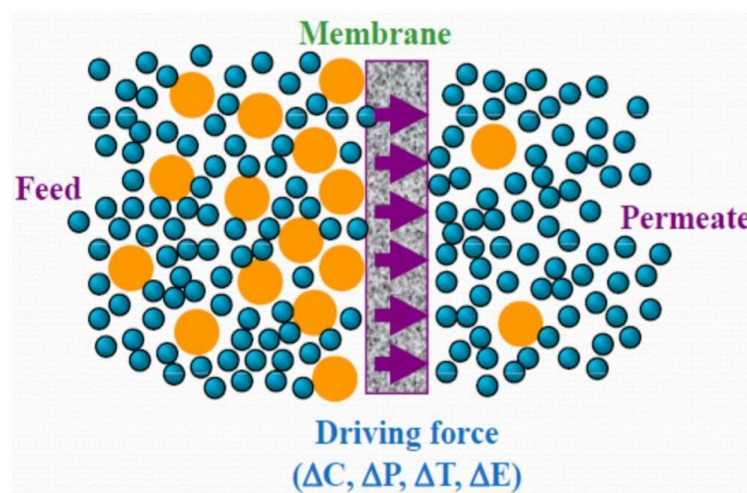


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Teknologi Membran

Teknologi membran telah berkembang serta banyak digunakan dalam pemisahan dan pemurnian air. Membran secara umum didefinisikan sebagai suatu media berpori berbentuk lapisan tipis, memiliki sifat *semipermeable* yang dapat menahan dan melewatkan spesi-spesi tertentu (Muthia, 2017). Pemisahan spesi melalui membran berdasarkan ukuran partikel senyawa dan ukuran pori membran, dimana partikel yang berukuran lebih besar dari pori membran akan tertahan pada permukaan membran. Hasil pemisahan berupa *retentate* atau bagian dari campuran yang tidak melewati membran dan *permeate* bagian dari campuran yang melewati membran. Transfer massa pada membran terjadi akibat adanya gaya dorong (*driving force*) yang dapat berupa perbedaan konsentrasi (ΔC), tekanan (ΔP), suhu (ΔT), dan potensial listrik (ΔE). Mekanisme pemisahan membran dapat dilihat pada Gambar 2.1. Untuk memisahkan suatu spesi dari campuran, membran harus memiliki karakteristik stabil secara mekanik, termal, dan bersifat selektif (Nath *et al.*, 2017).



Gambar 2.1 Mekanisme Pemisahan Menggunakan Membran (Wenten., 2016)

Teknologi membran telah banyak digunakan untuk memproduksi air bersih dari air permukaan, air tanah, air limbah ataupun air laut. Selain itu, teknologi

membran memiliki banyak keunggulan seperti pengoperasian yang mudah, efektif, konsumsi energi yang kecil dan biaya yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan teknologi lain (Lusiana *et al.*, 2020).

Berdasarkan material penyusunnya, membran dapat diklasifikasikan sebagai membran organik dan membran anorganik. Membran organik terbuat dari polimer organik seperti, *Polyethylene* (PE) (Yu *et al.*, 2022), *Polytetrafluorethylene* (PTFE) (Yu *et al.*, 2019), *Polypropylene* (PP) (Chin *et al.*, 2021), dan *Polyvinilidene Fluoride* (PVDF) (Tan *et al.*, 2017). Sedangkan membran anorganik terbuat dari bahan keramik, logam, zeolit, atau silika (Zhang *et al.*, 2022).

2.2 Klasifikasi Membran Filtrasi

Membran yang digunakan dalam filtrasi dapat diklasifikasikan berdasarkan distribusi pori, ukuran pori dan fungsi, serta homogenitas struktur dan pori.

2.2.1 Berdasarkan Distribusi Pori

Berdasarkan distribusi pori, membran diklasifikasikan menjadi dua, yaitu membran *porous* (berpori) dan membran *non-porous* (tidak berpori). Mekanisme transfer massa pada membran berpori dan tidak berpori (Gambar 2.2) .

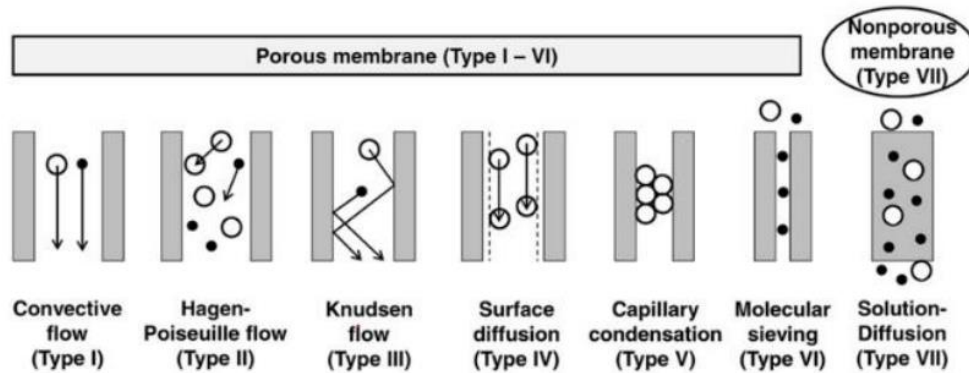
a. Membran *Porous* (berpori)

Membran berpori mempunyai rongga atau ruang dengan berbagai macam jenis pori. Prinsip pemisahan membran berpori ditentukan melalui hubungan antara ukuran pori dan ukuran partikel yang akan dipisahkan. Selektifitas yang tinggi dapat diperoleh ketika ukuran zat terlarut atau ukuran partikel relatif besar dibandingkan ukuran pori membran. Mekanisme pemisahan pada membran berpori menggunakan perbedaan tekanan antar membran sebagai gaya dorong. Aliran dari dan ke membran dapat terjadi karena adanya perbedaan tekanan di kedua permukaan membran. Membran jenis ini pada umumnya diaplikasikan dalam pemisahan mikrofiltrasi dan ultrafiltrasi (Kencana, 2018).

b. Membran *Non-porous* (tidak berpori)

Membran tidak berpori berupa lapisan tipis yang memiliki ukuran pori lebih kecil dari 0,001 μm dengan kerapatan pori yang kecil. Membran tidak berpori biasanya digunakan untuk pemisahan campuran dengan ukuran partikel seragam

dan berukuran sangat kecil yang tidak dapat dipisahkan oleh membran berpori. Pada membran tidak berpori, transfer massa terjadi karena perbedaan difusivitas (Mulyati *et al.*, 2017). Membran jenis ini umumnya diaplikasikan untuk pemisahan gas dan pervaporasi.



Gambar 2.2 Mekanisme Transfer Massa pada Membran Berpori dan Tidak Berpori (Afzali *et al.*, 2015)

2.2.2 Berdasarkan Ukuran Pori dan Fungsi

Membran berfungsi untuk memisahkan spesi berdasarkan ukuran pori dalam setiap jenis membrannya. Berdasarkan ukuran pori, membran dapat diklasifikasikan menjadi empat kategori, yaitu mikrofiltrasi, ultrafiltrasi, nanofiltrasi, dan *reverse osmosis*. Susunan proses pemisahan menggunakan membran ditunjukkan pada Gambar 2.3.

a. Mikrofiltrasi (MF)

Membran mikrofiltrasi memiliki ukuran pori antara 0,1 – 10 μm dan digunakan pada tekanan relatif lebih rendah yaitu dibawah 2 barr. Membran mikrofiltrasi dapat digunakan untuk memisahkan mikroorganisme, bakteri, dan *suspended solid*. Mikroorganisme yang terbawa oleh air dan polutan lain secara umum memiliki ukuran lebih besar dari 0,5 μm , sehingga membran mikrofiltrasi dengan ukuran pori rata-rata 0,5 μm dapat digunakan untuk mensterilkan dan memisahkan media yang terkontaminasi. Oleh karena itu, sebagian besar membran mikrofiltrasi banyak diaplikasikan untuk filtrasi dalam bidang medis, farmasi, dan industri (Moslehi & Mahdavi, 2019).

b. Ultrafiltrasi (UF)

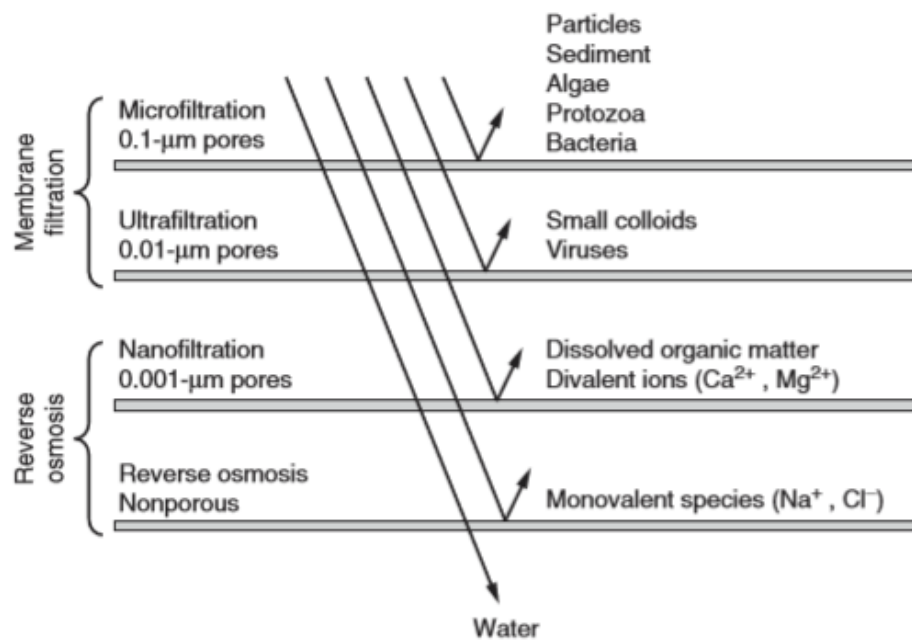
Membran ultrafiltrasi memiliki ukuran pori antara 2 – 100 nm dengan proses pemisahan pada tekanan 1 – 10 barr. Membran ultrafiltrasi termasuk membran berpori yang mampu menyaring partikel-partikel dengan ukuran 0,01 – 1 mikron, secara umum sering digunakan dalam memisahkan koloid, bakteri, dan makromolekul. Membran ultrafiltrasi dapat memberikan pemisahan selektif yang cukup besar dan dapat dioperasikan pada suhu rendah (Yong *et al.*, 2019). Selain itu, membran jenis ini banyak diaplikasikan dalam pengolahan air limbah, produksi air, bioteknologi, pengolahan bahan kimia, dan pengolahan makanan (Isawi, 2019).

c. Nanofiltrasi (NF)

Membran nanofiltrasi memiliki ukuran pori dibawah 2 nm sehingga tekanan yang digunakan berkisar 10 – 25 barr. Karena membran nanofiltrasi memiliki ukuran pori dalam kisaran nanometer, membran jenis ini mendukung *fluks permeat* yang tinggi dan filtrasi yang lebih presisi untuk molekul kecil (Guo *et al.*, 2019). Nanofiltrasi merupakan membran yang relatif baru dan sering digunakan untuk menghilangkan kation polivalen (*softening*) dan produk samping seperti zat organik buatan atau alami. Selain itu, membran nanofiltrasi banyak diaplikasikan dalam industri makanan seperti produk susu dan industri tekstil untuk penghilangan garam sehingga menghasilkan produk yang bernilai tinggi (Wenten *et al.*, 2012).

d. *Reverse Osmosis* (RO)

Membran *reverse osmosis* memiliki ukuran pori dibawah 2 nm sehingga tekanan yang digunakan dalam operasinya berkisar 15 – 80 barr (Wenten *et al.*, 2012). Membran jenis ini mampu menahan banyak spesi molekul seperti ion berukuran besar, zat terlarut dengan berat molekul rendah seperti garam anorganik atau molekul organik kecil. Membran *reverse osmosis* dapat menghilangkan partikel dan ion dalam *feed*, sehingga banyak diaplikasikan dalam pemurnian air dan desalinasi (Prayitno, 2020).



Gambar 2.3 Susunan Proses Pemisahan Membran (Nzeribe, 2016)

2.2.3 Berdasarkan Homogenitas Struktur dan Pori

Berdasarkan homogenitas struktur dan pori, membran diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu membran simetrik dan membran asimetrik.

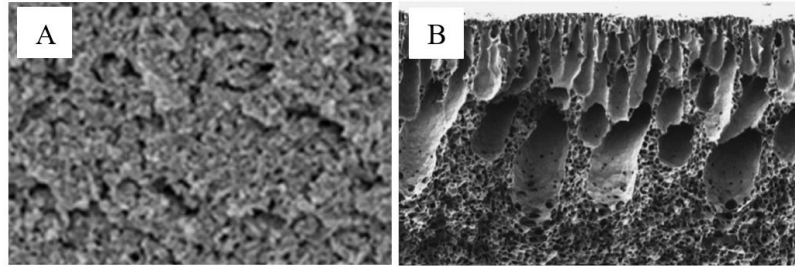
a. Membran Simetrik

Membran simetrik adalah membran yang terdiri dari satu lapisan (Gambar 2.4) dengan ketebalan 10 – 200 µm. Semua bagian membran simetrik memiliki kerapatan dan ukuran pori yang sama serta tidak memiliki lapisan kulit (Rusmaningsih *et al.*, 2018). Membran jenis ini terdiri dari membran berpori dan membran non-pori, akan tetapi jenis membran ini kurang efektif karena memungkinkan lebih cepat terjadinya penyumbatan pori dan mengakibatkan *fouling*.

b. Membran Asimetrik

Membran asimetrik adalah membran yang terdiri dari lapisan tipis aktif dan lapisan pendukung di bawahnya dengan kerapatan pori dan ukuran pori yang tidak sama, dimana ukuran pori bagian kulit lebih kecil dibandingkan pada bagian pendukung. Lapisan pendukung pada membran asimetrik berbentuk seperti jari (Rusmaningsih *et al.*, 2018) dengan ketebalan berkisar 50 – 150 µm dan ketebalan

lapisan kulit berkisar 0,1 – 0,5 μm . Pembentukan lapisan pendukung dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu, temperatur koagulasi, zat aditif organik dan anorganik, serta komposisi larutan pembentuk (Mulyati *et al.*, 2017).



Gambar 2.4 Struktur Pori Membran (A) Simetrik (Deronzier *et al.*, 2021), (B) Asimetrik (Zhou *et al.*, 2019)

Tingkat pemisahan menggunakan membran asimetrik jauh lebih baik dibandingkan dengan membran simetrik, karena kerapatan pori pada membran simetrik dapat menyebabkan spesi yang melewati pori akan menyumbat pori-pori dan menurunkan kinerja membran secara drastis.

2.3 Desalinasi Air

Desalinasi air merupakan sebuah proses pemisahan mineral terlarut (termasuk garam) dari air laut, air payau, atau air limbah hasil olahan (Saleem & Zaidi, 2020). Terdapat beberapa teknik dasar yang dapat digunakan untuk memisahkan garam dan padatan terlarut lainnya yaitu, destilasi, *ion exchange*, *freeze desalination*, dan membran, (Subramani & Jacangelo, 2015). Teknologi desalinasi membran mengacu pada penggunaan membran *semipermeable* untuk mengisolasi garam dan mencapai pemisahan antara garam dan air. Teknologi desalinasi menggunakan membran seperti *reverse osmosis* dan nanofiltrasi dapat digunakan dalam proses desalinasi air (Anis *et al.*, 2019). Berdasarkan *driving force* teknologi desalinasi air membran dengan tekanan (RO dan NF) memiliki keuntungan efisiensi energi yang relatif tinggi, tekanan operasi rendah, memiliki tingkat rejeksi yang tinggi untuk garam *divalent* dan ramah lingkungan dibandingkan teknologi pemisahan garam yang lain (Homaeigohar & Elbahri, 2017). *Reverse osmosis* saat ini merupakan teknologi yang paling efektif untuk menghasilkan air minum dari air laut. Selama desalinasi menggunakan membran

reverse osmosis, air akan ditekan pada membran *semipermeable* yang menyebabkan air akan melewati membran dan garam akan tertahan. Air *feed* akan ditekan ke dalam membran dengan pompa bertekanan tinggi untuk menyuplai tekanan dan mendorong air melewati membran sehingga tekanan yang lebih tinggi diperlukan untuk memproses air dengan konsentrasi garam yang lebih tinggi.

2.4 Metode Sintesis Membran

Membran dapat disintesis menggunakan beberapa teknik antara lain, inversi fasa, *sintering*, *stretching*, *template leaching* dan *electrospinning* yang ditunjukkan pada Tabel 2.1. (Mamah *et al.*, 2022).

Tabel 2.1 Kelebihan dan Kekurangan Metode Sintesis Membran

Teknik Pembuatan Membran	Kelebihan	Kekurangan	Referensi
Inversi fasa	a. Membran memiliki struktur pori asimetrik sehingga lebih selektif.dalam filtrasi	a. Memiliki kecenderungan <i>fouling</i> lebih besar	(Tang <i>et al.</i> , 2021)
Proses pepadatan polimer cair menjadi padat berpori, pertukaran <i>solvent</i> dan <i>non-solvent</i> terjadi saat larutan <i>casting</i> dimasukkan dalam larutan <i>non-solvent</i> .	b. Pemrosesan yang mudah dan aman c. Memerlukan biaya yang relatif lebih rendah		
<i>Stretching</i>	a. Membran memiliki struktur pori simetrik	a. Membutuhkan suhu yang tinggi	(Lestari, 2021)
<i>film</i> yang terbuat dari polimer kristalin			

<p>diregangkan secara tegak lurus ke arah ekstruksi, sehingga bagian kristalin dari <i>film</i> berada pada posisi paralel dengan arah ekstruksi.</p>	<p>b. Porositas membran tinggi. c. Kekuatan mekanik relatif lebih tinggi</p>		
<p><i>Sintering</i></p> <p>Pemanasan atau pepadatan serbuk partikel berukuran tertentu menggunakan suhu tinggi mendekati titik lelehnya.</p>	<p>a. Membran memiliki kekuatan mekanik yang baik b. Menghasilkan permease fluks lebih tinggi</p>	<p>a. Memerlukan biaya yang relatif lebih tinggi</p>	<p>(Shi <i>et al.</i>, 2022)</p>
<p><i>Track-etching</i></p> <p>Penembakan <i>film</i> (biasanya polimer) dengan radiasi berenergi tinggi secara tegak lurus terhadap <i>film</i>. Kemudian <i>film</i> direndam dalam bak berisi</p>	<p>a. Relatif lebih mudah b. Memiliki akurasi yang tinggi c. Membran berpori simetris</p>	<p>a. Biaya relatif mahal b. Waktu pembuatan lama c. Porositas relatif rendah</p>	<p>(Mamah <i>et al.</i>, 2022)</p>

larutan basa atau asam.			
<i>Template leaching</i>	a. Diameter pori-pori membran relatif kecil.	a. Membutuhkan biaya relatif lebih besar	(Mamah <i>et al.</i> , 2022)
Pelepasan salah satu komponen <i>film</i> dari sebuah komponen sistem sehingga dihasilkan membran berpori.			
<i>Electrospinning</i>	a. Membran memiliki struktur pori terbuka b. Porositas membran tinggi.	a. Kapasitas produksi terbatas b. Reproduktifitas rendah	(Koushkbaghi <i>et al.</i> , 2018)
Pembuatan serat yang efisien dengan memanfaatkan pengaruh medan listrik dalam menghasilkan lelehan polimer, serat nano polimer terbentuk karena terjadi penguapan pelarut.			

2.5 Metode Sintesis Inversi Fasa

Inversi fasa merupakan metode yang sederhana dan mudah digunakan untuk membuat membran berpori dengan berbagai morfologi. Membran yang disintesis dengan inversi fasa di dasarkan pada proses pemadatan (solidfikasi), dimana

Yurin Karunia Apsha Albaina Iasya, 2022

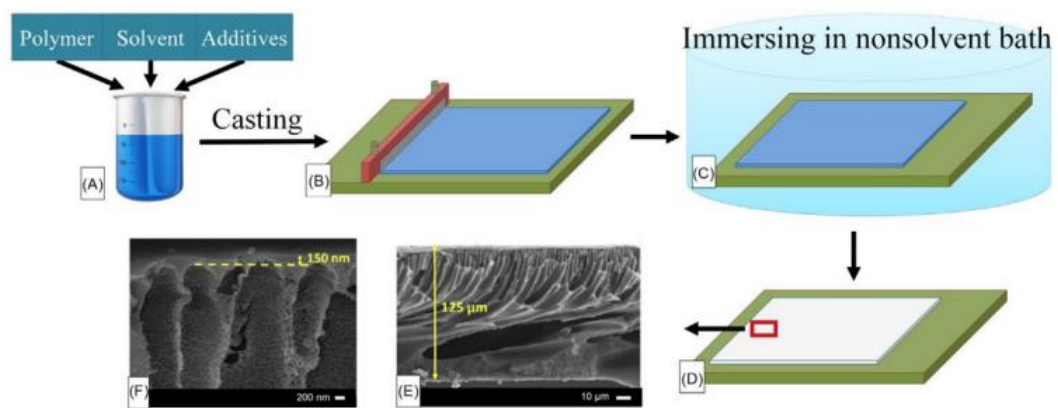
SINTESIS DAN KARAKTERISASI MEMBRAN KOMPOSIT BERBASIS POLI(VINILIDEN FLUORIDA)/MWCNT/Fe₃O₄

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

polimer akan diubah dari kondisi cair menuju padat berpori, pertukaran *solvent* dan *non-solvent* terjadi ketika larutan *casting* dimasukkan dalam larutan *non-solvent*, sehingga menghasilkan struktur berpori yang stabil secara termodinamika. Proses solidifikasi dimulai dengan perubahan kondisi dari fasa satu cairan menjadi fasa dua cairan (*demixing* cair-cair). Saat kondisi tertentu selama *demixing*, salah satu fasa cair (fasa polimer dengan konsentrasi tinggi) akan menjadi padat sehingga membentuk matriks padat. Secara umum tahapan pada inversi fasa antara lain: homogenisasi, pencetakan, penguapan sebagian pelarut, dan perendaman ke dalam bak koagulasi (Asad *et al.*, 2019). Sebagian besar membran dibuat menggunakan metode inversi fasa dengan salah satu teknik berikut:

2.5.1 *Non-solvent Phase Inversion (NIPS)*

Dalam metode NIPS, larutan *casting* direndam ke dalam bak koagulasi yang mengandung *non-solvent*, menghasilkan pertukaran *solvent* dengan *non-solvent* (Gambar 2.5). Setelah merendam *film* polimer dalam bak koagulasi, pemisahan fasa terjadi pada bagian antarmuka *film*. Polimer akan mengendap karena penurunan kelarutan polimer dengan penurunan suhu larutan. Setelah itu, pelarut diekstraksi dengan penguapan atau pengeringan (Asad *et al.*, 2019).

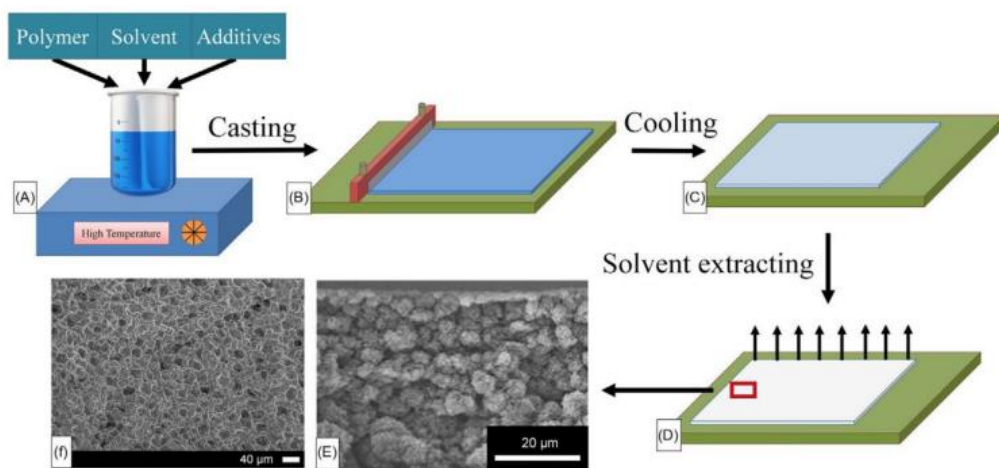


Gambar 2.5 Mekanisme Proses Preparasi NIPS (Asad *et al.*, 2019)

2.5.2 *Temperature Induced Phase Separation (TIPS)*

Metode TIPS digunakan untuk mensintesis membran mikropori, kebanyakan membran mikrofiltrasi dengan morfologi isotropik disintesis dengan metode ini. TIPS bergantung pada penghilangan energi panas dari larutan polimer untuk menginduksi pemisahan fasa. Larutan polimer dibuat dengan melarutkan

polimer dalam pelarut dengan suhu tinggi (Gambar 2.6). Polimer akan mengendap karena penurunan kelarutan polimer dengan penurunan suhu larutan. Setelah itu, pelarut diekstraksi dengan cara penguapan atau *freeze drying*. Salah satu keunggulan dari metode ini adalah kemampuannya untuk membuat membran polimer yang tidak larut pada suhu ruang dan metode ini lebih mudah untuk mengontrol proses pemisahan fasa dibandingkan dengan metode NIPS. Selain itu, metode NIPS memiliki jangkauan yang terbatas, misalnya tidak dapat digunakan untuk pembuatan membran UF atau NF. Baik metode TIPS maupun NIPS keduanya dapat digunakan untuk mensintesis membran berpori (Asad *et al.*, 2019).

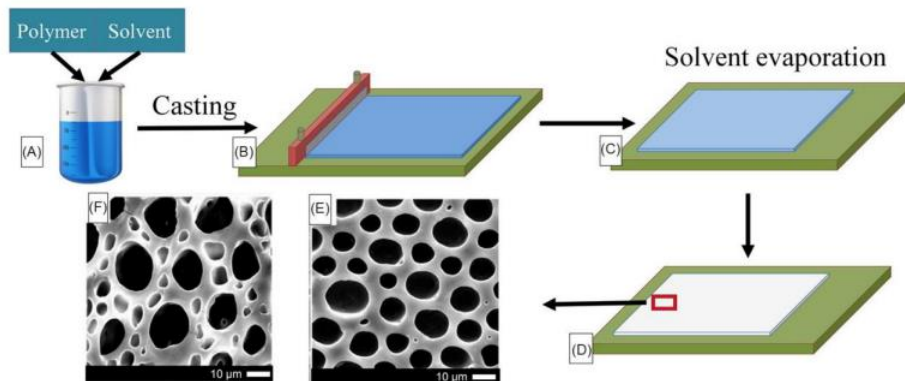


Gambar 2.6 Mekanisme Proses Preparasi TIPS (Asad *et al.*, 2019)

2.5.3 *Evaporation Induced Phase Separation (EIPS)*

Pada metode EIPS, pembentukan membran terjadi karena penguapan pelarut volatile dari campuran larutan polimer yang mengandung larutan *volatile*, *non-solvent* kurang *volatile*, dan polimer. Dengan penguapan pelarut terus menerus, kelarutan polimer akan menurun dan larutan polimer terpisah menjadi fase kaya polimer dan fase tanpa polimer. Pemadatan bagian kaya polimer akan membentuk matriks padat yang mengelilingi bagian tanpa polimer yang kaya akan pelarut. Membran berpori terbentuk setelah mengekstraksi *non-solvent* dari membran (Gambar 2.7). Membran yang disintesis dengan metode EIPS biasanya sangat berpori. Namun, morfologi membran secara signifikan dipengaruhi oleh konsentrasi *non-solvent* awal dan laju penguapan. Pada konsentrasi awal *non-solvent* yang rendah, pemisahan fasa yang tertunda dapat menyebabkan

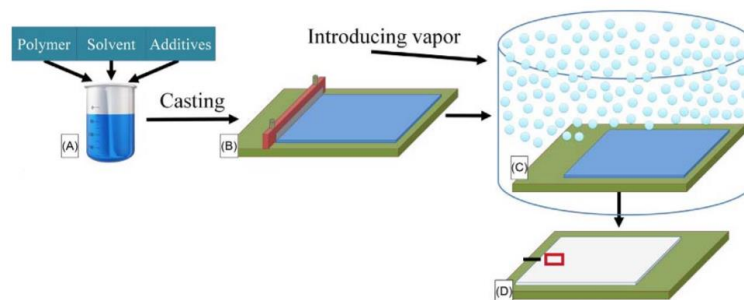
pembentukan membran yang lebih padat. Selain itu, pada laju pengeringan yang lebih tinggi dapat membentuk permukaan membran yang mengelupas (Asad *et al.*, 2019).



Gambar 2.7 Mekanisme Proses Preparasi EIPS (Asad *et al.*, 2019)

2.5.4 Vapor Induced Phase Separation (VIPS)

Dalam metode ini, larutan *casting* terdiri dari polimer dan *solvent* yang terpapar uap atmosfer dari *non-solvent* biasanya air (Gambar 2.8). Pengendapan polimer terjadi karena penetrasi uap ke dalam membran, yang akhirnya membentuk membran berpori simetris tanpa lapisan kulit yang padat. Sifat termodinamika larutan *casting* dalam metode NIPS dan VIPS hampir serupa, yang menunjukkan bahwa metode VIPS menghasilkan membran dengan morfologi yang mirip dengan metode NIPS. Karakteristik utama dalam metode VIPS adalah laju difusi uap yang lambat dan seragam ke dalam larutan polimer sehingga terjadi pengendapan polimer yang seragam tanpa perubahan konsentrasi polimer secara tiba-tiba. Oleh karena itu, membran yang dihasilkan simetris tanpa ada lapisan kulit (Asad *et al.*, 2019).



Gambar 2.8 Mekanisme Proses Preparasi VIPS (Asad *et al.*, 2019)

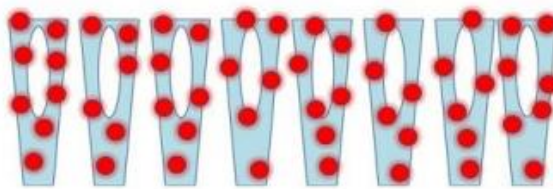
2.6 Membran Komposit

Meskipun membran polimer telah banyak digunakan untuk proses pemisahan, akan tetapi membran polimer memiliki tiga tantangan utama, yaitu (i) stabilitas termal yang rendah, (ii) hubungan *tradeoff* antara permeabilitas dan selektivitas, dan (iii) *fouling* (Asad *et al.*, 2019). Semua tantangan ini dikaitkan dengan sifat material yang digunakan dalam sintesis membran. Oleh karena itu, membran dengan gabungan nanomaterial digunakan untuk meningkatkan kinerja membran. Polimer yang umum digunakan dalam sintesis membran yaitu polipropilen (PP), polivinilidena fluorida (PVDF), polietersulfon (PES), dan politetrafluoroetilen (PTFE) yang bersifat hidrofobik, sehingga dengan menggabungkan nanomaterial hidrofilik ke dalam membran hidrofobik dapat merubah sifat membran menjadi hidrofilik (Khorshidi *et al.*, 2019).

Membran nanokomposit diklasifikasikan menjadi tiga kategori berdasarkan letak nanomaterial dan jenis membran, yaitu (1) nanokomposit konvensional dan (2) nanokomposit terletak di permukaan (Asad *et al.*, 2019).

2.6.1 Membran Nanokomposit Konvensional

Dalam membran nanokomposit konvensional, *nanofiller* didistribusikan ke dalam membran, sehingga mempengaruhi sifat fisiko kimia. Skema membran nanokomposit konvensional ditunjukkan pada Gambar 2.9.



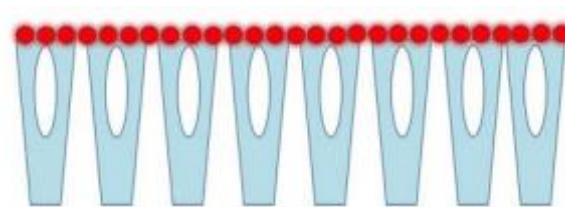
Gambar 2.9 Membran Nanokomposit Konvensional (Asad *et al.*, 2019)

Metode yang paling banyak digunakan untuk sintesis membran jenis ini adalah inversi fasa, di mana bahan nano terdispersi dengan baik dalam larutan polimer sebelum inversi fasa. Nanomaterial dapat diprasintesis kemudian dicampur dalam larutan polimer, atau proses sintesis dapat mencakup sintesis *in situ* dari nanomaterial dalam larutan polimer. Penggabungan bahan nano dalam larutan polimer mempengaruhi sifat termodinamika dan kinetik dari proses inversi fasa

yang mengarah pada perubahan yang signifikan dalam morfologi membran. Misalnya, penambahan nanomaterial ke dalam larutan polimer meningkatkan termodinamika system, yang menghasilkan percepatan laju *demixing* antara *solvent* dan *non-solvent*. Morfologi membran dalam hal ini memberikan struktur seperti jari. Di sisi lain, penambahan *nanomaterial* juga dapat meningkatkan hambatan kinetic yang memperlambat laju *demixing*. Morfologi membran cenderung berubah dari struktur jari menjadi struktur seperti *sponge*. Pada penambahan *nanomaterial* yang sedikit, termodinamika lebih dominan karena meningkatkan proses *demixing*. Namun, pada penambahan *nanomaterial* yang banyak, kinetika lebih dominan yang menghasilkan proses *demixing* yang lambat (Asad *et al.*, 2019).

2.6.2 Membran Nanokomposit di Permukaan

Menempatkan nanomaterial di permukaan membran merupakan teknik yang sangat baik untuk mengubah sifat permukaan membran tanpa mempengaruhi struktur instrinsik membran. Membran nanokomposit di permukaan dapat disintesis menggunakan metode yang berbeda tergantung pada jenis nanomaterial dan bahan membran yang digunakan. Skema membran nanokomposit di permukaan ditunjukkan pada Gambar 2.10. Metode saat ini yang sering digunakan untuk mensintesis membran jenis ini, yaitu *self-assembly*, *chemical grafting*, *electrostatic attraction*, *adsorption reduction*, *layer by layer assembly*, dan *coating* atau deposisi.



Gambar 2.10 Membran Nanokomposit dipermukaan (Asad *et al.*, 2019)

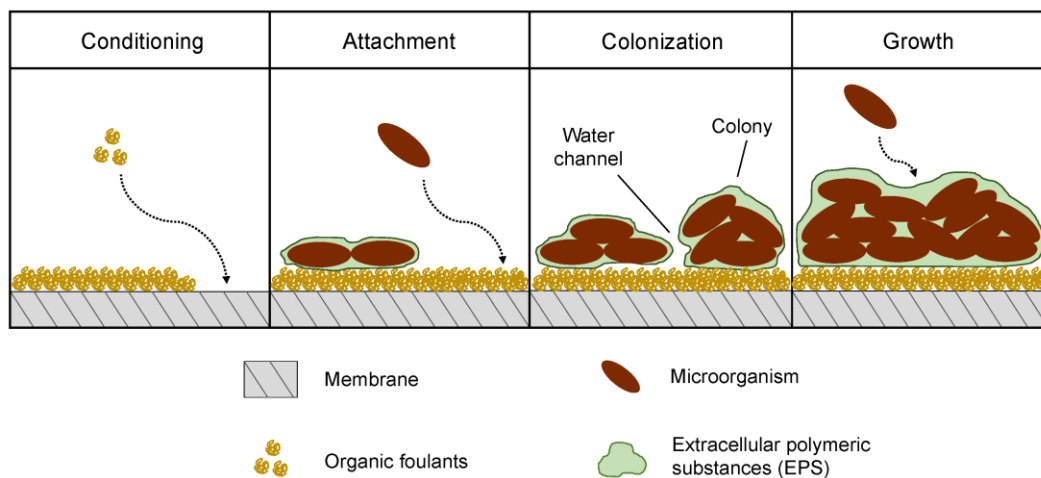
2.7 Fouling Membran Filtrasi

Membran polimer merupakan aplikasi penyaringan yang sering digunakan, dimana setelah periode tertentu membran dapat mengalami *fouling*. *Fouling* (pengotoran) merupakan proses yang menyebabkan penurunan performa membran karena deposisi substansi pada pori-pori membran. Substansi yang menyebabkan

fouling dapat berupa partikulat tersuspensi (mikroorganisme), koloid, substansi terlarut (makromolekul, garam) atau kontaminan lainnya (Zambare & Nemade, 2021).

Fouling pada membran filtrasi mengakibatkan perubahan selektifitas, penurunan fluks, penurunan produktifitas, peningkatan biaya dan pengurangan waktu penggunaan membran. Secara umum, beberapa jenis *fouling* yang sering diidentifikasi yaitu: *biofouling*, *fouling* anorganik, dan *fouling* organik (Kumar Purkait *et al.*, 2020).

Biofouling merupakan *fouling* yang disebabkan oleh pertumbuhan bakteri. *Biofouling* pada membran diawali dari penempelan bakteri, pertumbuhan bakteri pada permukaan membran, dan pembentukan *extracellular polymeric substance* (EPS) (Gambar 2.11). EPS yang diproduksi oleh bakteri dapat menyumbat pori-pori membran dan menurunkan nilai fluks (Cirillo *et al.*, 2021). *Biofouling* menyebabkan kerusakan pada membran yang bersifat permanen dan ireversibel. Modifikasi membran untuk mencegah *biofouling* dapat dilakukan dengan penambahan agen antibakteri ke dalam membran. Agen antibakteri yang ditambahkan pada membran dapat mendeaktivasi bakteri dengan mekanisme deaktivasi yang berbeda-beda tergantung jenis agen antibakterinya (Mohd Shafie & Ahmad, 2018).

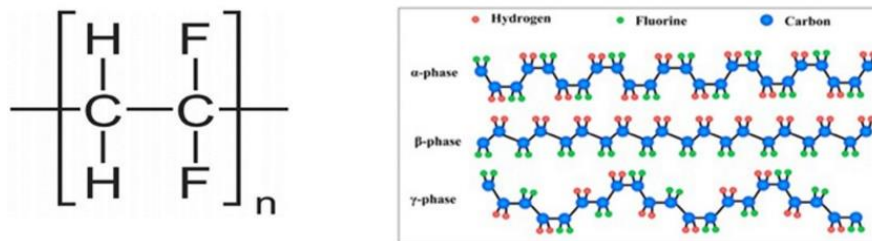


Gambar 2.11 Skema Pembentukan *Biofouling* (Cirillo *et al.*, 2021)

2.8 Material Membran

2.8.1 Polyvinylidene Fluoride (PVDF)

Polyvinylidene Fluoride (PVDF) dikenal juga sebagai poli (1,1-difluoroethylene) dengan (CH₂CF₂) sebagai unit berulang yang ditunjukkan dalam struktur molekul untuk PVDF (Gambar 2.12) (Saxena & Shukla, 2021). PVDF merupakan polimer piezoelektrik karena kemampuannya yang unik untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Material ini banyak digunakan untuk bahan sintesis membran karena memiliki sifat stabilitas termal, kekuatan mekanik yang tinggi, dan ketahanan kimia yang baik. PVDF memiliki titik leleh 177°C dan densitas 1,77 g/cm³. Umumnya, PVDF larut dalam pelarut polar seperti *dimethylformamide* (DMF), *Dimethyl Sulfoxide* (DMSO), *N-Methyl Pyrrolidone* (NMP), dan *Dimethylacetamide* (DMAc). PVDF memiliki tiga bentuk struktur molekul yaitu fase α, β, dan γ (Gambar 2.9) (Saxena & Shukla, 2021)



Gambar 2.12 Struktur Kimia dan Jenis-Jenis Fase PVDF (Saxena & Shukla, 2021)

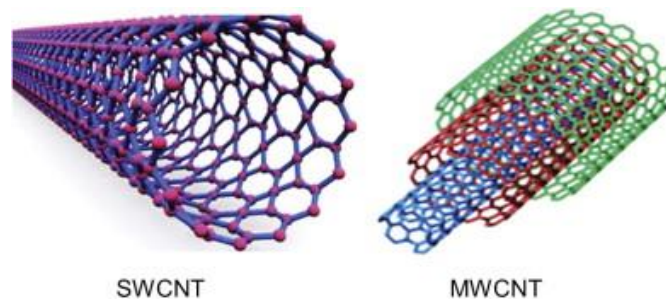
Fase α bersifat nonpolar, sedangkan fase β merupakan fase yang paling polar dibandingkan dengan dua fase lainnya. Perbedaan antara α dan β adalah pola orientasi momen dipolar dari dua molekul yang ada dalam unit sel. Selain fase α dan β, terdapat polimorf γ dengan struktur memiliki sel unit polar tetapi memiliki momen dipol lebih kecil dibandingkan fase β (Saxena & Shukla, 2021). (Li *et al.*, 2018).

2.8.2 Carbon Nanotube (CNT)

Carbon Nanotube (CNT) merupakan molekul silinder karbon dengan diameter berukuran nanometer. Bahan berbasis karbon seperti CNT memiliki luas permukaan yang besar serta stabil secara kimia, mekanik dan termal. Oleh karena itu, CNT banyak digunakan sebagai *nanofiller* pada membran untuk meningkatkan

kinerja membran polimer. Evaluasi kinerja CNT dalam pemisahan membran dilaporkan bahwa struktur CNT yang berongga dapat memfasilitasi mobilitas molekul cair sehingga memberikan permeabilitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan membran polimer murni (Ihsanullah, 2019).

CNT terdiri dari *Multi Walled Carbon Nanotube* (MWCNT) dan *Single Walled Carbon Nanotube* (SWCNT) (Gambar 2.13). MWCNT terdiri dari beberapa *carbon nanotube* yang berlapis antara satu sama lain. Jumlah *nanotube* yang berada di dalam MWCNT dapat bervariasi, mulai dari 3 hingga lebih dari 20. Diameter dalam dan luar *nanotube* dapat bervariasi dari 2 nm untuk dinding dalam hingga lebih dari 50 nm untuk dinding luar. Sama seperti SWCNT, MWCNT juga memiliki sifat termal, listrik, dan mekanik yang baik serta kapasitas adsorpsinya yang besar terhadap ion logam (Khan *et al.*, 2021).

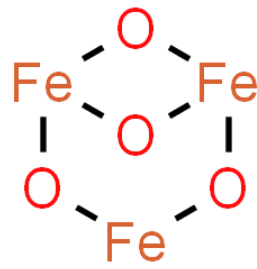


Gambar 2.13b Bentuk Fisik *Multi Walled Carbon Nanotube* (MWCNT) dan *Single Walled Carbon Nanotube* (SWCNT)

MWCNT dapat dimodifikasi melalui fungsionalisasi dengan gugus fungsi tertentu seperti hidroksida, asam karboksilat, atau amida untuk meningkatkan fungsinya, seperti meningkatkan dispersi dalam banyak pelarut organik (Wang *et al.*, 2021). Selain itu, MWCNT sering digunakan dalam bidang medis dan teknologi karena biokompatibilitasnya yang tinggi,

2.8.3 Oksida Besi Magnetit (Fe_3O_4)

Besi II, III oksida (Fe_3O_4) atau sering dikenal dengan magnetit adalah mineral oksida besi yang banyak ditemukan dalam batuan beku, metamorf, dan batuan sedimen. Magnetit merupakan bijih besi yang paling sering ditambang karena memiliki kandungan besi yang tinggi (72,4%). Struktur kimia magnetit ditunjukkan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Struktur Kimia Magnetit

Salah satu kelebihan dari magnetit adalah sifat ferromagnetiknya yang mampu mengabsorpsi gelombang elektromagnetik melalui mekanisme kemagnetan khususnya terhadap atom-atom atau ion-ion logam multivalent yang bersifat paramagnetik (Hosseini *et al.*, 2019). Penggunaan Fe₃O₄ sebagai *nanofiller* membran dapat meningkatkan performa membran dalam pemisahan air karena luas permukaannya yang besar, meningkatkan hidrofilitas, dan mengurangi aktivitas antibakteri serta polusi sekunder akibat *leaching* bertahap nanopartikel membran (Nasir *et al.*, 2020).

2.9 Karakterisasi

2.9.1 Interaksi Kimia dan Gugus Fungsi

Interaksi kimia dan identifikasi gugus fungsi dikaji menggunakan instrumentasi *Fourier Transform Infra-Red* (FTIR). Prinsip kerja FTIR yaitu melewatkan sinar inframerah pada suatu sampel sehingga terjadi transisi atau perpindahan antara tingkat energi vibrasi dan eksitasi pada suatu molekul. Tujuan utama spektroskopi FTIR yaitu untuk mengukur seberapa baik sampel menyerap panjang gelombang cahaya yang berbeda. Panjang gelombang yang digunakan biasanya antara 500 hingga 3700 cm⁻¹. Energi cahaya yang tidak diserap dapat dideteksi dan ditampilkan dalam bentuk spektrum dengan serangkaian puncak yang masing-masing mengindikasikan gugus fungsi untuk memprediksi mekanisme pembentukan interaksi kimia dari sampel uji (Asmatulu & Khan., 2019).

2.9.2 Kristalinitas

Identifikasi kristalinitas dapat dievaluasi menggunakan instrumentasi X-Ray Diffraction (XRD). Prinsip dasar XRD adalah difraksi gelombang sinar X yang

mengalami *scattering* setelah bertumbukan dengan atom kristal material yang diuji sehingga akan dihasilkan pola difraksi yang khas dari setiap material.

Analisis XRD dilakukan untuk mendeteksi kristalinitas dan ukuran kristalit. Persentasi kristalinitas dihitung dengan persamaan:

$$\% \text{kristalinitas} = \frac{\text{fraksi luas kristal}}{\text{luas difraktogram}} \times 100$$

(Moshleyani., 2015)

Ukuran kristalit dapat diperkirakan dari pola XRD menggunakan persamaan *Deybe Scherrer*:

$$d = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta}$$

Keterangan:

d = ukuran kristalit

k = konstanta *Scherrer*/ faktor ukuran (0,9)

λ = panjang gelombang *x-ray* (Å)

β = FWHM (lebar dari setengah puncak tertinggi)

θ = sudut difraksi

(Jisha, 2017)

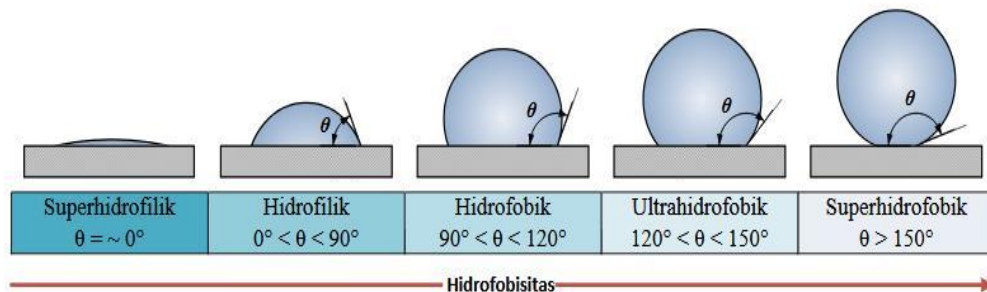
2.9.3 Struktur Morfologi dan Komposisi Elemen Membran

Struktur morfologi dan komposisi elemen dikonfirmasi melalui pengukuran menggunakan instrumentasi *Scanning Electron Microscopy -Energy Dispersive X-ray* (SEM-EDX). SEM adalah mikroskop elektron yang menggunakan berkas elektron untuk berinteraksi dengan sampel sehingga dihasilkan gambar topologi. Prinsip kerja SEM yaitu penembakan berkas elektron berenergi tinggi yang menyebabkan terjadinya penghamburan elektron. Permukaan material yang disinari atau terkena berkas elektron (elektron primer) akan memantulkan kembali berkas elektron (elektron sekunder) yang kemudian di deteksi dengan detektor yang terdapat dalam SEM (Mutalib *et al.*, 2017).

Spektroskopi EDX merupakan salah satu komponen dalam SEM yang berfungsi untuk mendeteksi unsur-unsur dengan nomor atom besar dari boron dan unsur-unsur ini dapat dideteksi pada konsentrasi minimal 0,1%. Pengaplikasian EDX secara umum meliputi identifikasi material, identifikasi kontaminan, dan analisis *spot area* pada *area* berdiameter hingga 10 cm (Mutalib *et al.*, 2017).

2.9.4 Sudut Kontak Air (Hidrofilisitas)

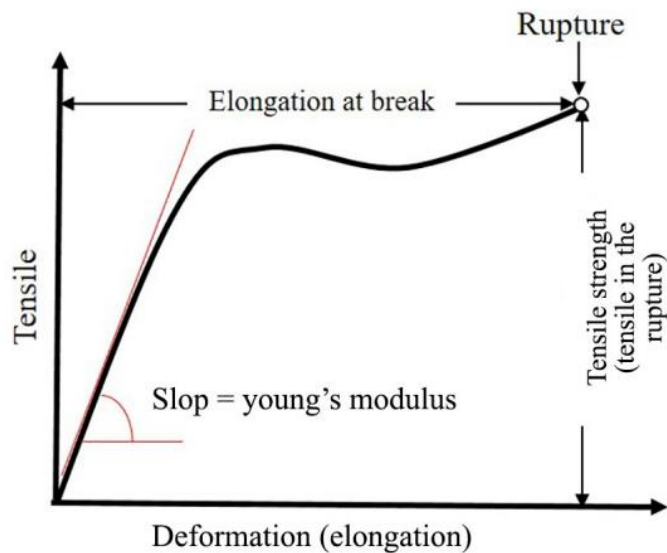
Pengukuran sudut kontak dapat memberikan informasi mengenai hidrofilisitas atau hidrofobisitas dari permukaan membran. Pengukuran sudut kontak biasanya dilakukan dengan meneteskan air (beberapa μL) pada permukaan membran, lalu sudut kontak antara tetesan dan permukaan membran diukur menggunakan *software Java ImageJ* fitur *dropsnake*. Sudut kontak air yang lebih kecil dari 90° menunjukkan permukaan yang lebih hidrofilik (Gambar 2.15) dimana, hidrofilisitas meningkat dengan semakin menurunnya sudut kontak air (Kusworo *et al.*, 2021).



Gambar 2.15 Ilustrasi Sudut Kontak dengan Metode *Sessile Drop* (Papierowska *et al.*, 2018)

2.9.5 Sifat Mekanik

Karakterisasi sifat mekanik membran dapat diukur menggunakan parameter *tensile strength* (kekuatan tarik) dan *elongation break* (perpanjangan putus) yang disebabkan oleh gaya yang diberikan pada membran (Kusworo dkk., 2021). Membran diuji dengan cara menjepit kedua ujung membran pada alat uji tarik, lalu membran akan diregangkan hingga putus. Kapasitas uji tarik membran dapat dievaluasi berdasarkan grafik *tensile* versus deformasi (*elongation*) (Gambar 2.16) yang memberikan informasi mengenai sifat dari material seperti deformasi, *modulus young*, dan kekuatan tarik (Tomoda *et al.*, 2020).



Gambar 2.16 Grafik *Tensile* vs Deformasi (*Elongation*) (Tomoda *et al.*, 2020)

Parameter ini penting karena menjadi pertimbangan dalam pemilihan membran dalam beberapa aplikasi, salah satunya filtrasi air atau ketika membran mendapatkan tekanan dari air. (Bahtiar, 2021).

2.10 Uji Aktivitas Antibakteri

Penambahan agen antibakteri pada membran merupakan metode paling sederhana untuk mencegah *biofouling* pada membran. Agen antibakteri yang ditambahkan dan telah diuji cobakan beragam, seperti ZnO (Mohd Shafie & Ahmad, 2018), CuO (Stani, 2020), AgNP (Rajeshkumar *et al.*, 2022), dan CNT (Wang *et al.*, 2018). Agen antibakteri pada membran akan mendeaktivasi bakteri yang menempel pada permukaan membran. Untuk mengetahui kemampuan antibakteri maka perlu dilakukan uji aktivitas antibakteri pada membran. Metode umum yang sering digunakan untuk menguji antibakteri antara lain melalui metode *Minimum Inhibitory Concentration* (MIC/cincin inhibisi) atau disebut juga metode Kirby Bauer dan *Total Plate Counting* (TPC).

Metode MIC merupakan metode paling sederhana untuk mengetahui keberadaan aktivitas antibakteri yang dilakukan dengan meletakkan membran berbentuk cakram (piringan) di atas kultur bakteri. Jika membran memiliki aktivitas antibakteri, maka koloni bakteri di sekitar membran akan menjauh dan membentuk cincin zona inhibisi (Erkmen, 2021).

Metode perhitungan koloni bakteri atau *Total Plate Counting* (TPC) merupakan metode uji yang lebih akurat dibandingkan dengan metode cincin inhibisi. Dalam kasus membran atau film, kebanyakan metode ini dilakukan dengan membiarkan membran berinteraksi dengan suspensi bakteri, yang kemudian dilarutkan dalam *Nutrient Broth* (NB). Larutan tersebut diencerkan secara serial dan ditanamkan ke dalam cawan petri berisi *Nutrient Agar* (NA). Koloni bakteri yang terbentuk di atas agar kemudian dihitung dan jumlah koloni bakteri (cfu) dibandingkan dengan blanko (Boukouvalas *et al.*, 2019).

2.11 Bakteri Uji

Bakteri adalah mikroorganisme mikroskopis berukuran kecil yang dapat dilihat dengan bantuan mikroskop dengan ukuran berkisar antara 0,1 hingga 0,3 μm dan diameter antara 0,5 hingga 1 μm . Berdasarkan bentuknya, secara khas bakteri memiliki bentuk yang bervariasi yaitu berbentuk bola (kokus), batang (basil), dan spiral (spirillum) (Dufossé, 2016).

Dinding sel merupakan komponen terluar dari bakteri yang mengandung peptidoglikan. Peptidoglikan memberikan dukungan struktural dan membran luar dengan struktur, komposisi kimia, dan ketebalan dinding sel yang berbeda-beda tergantung pada jenis bakterinya. Bakteri gram negatif memiliki lapisan luar yang lebih kompleks dibandingkan bakteri gram positif yang terdiri dari lipopolisakarida, lipoprotein, dan fosfolipid. Akan tetapi, bakteri gram positif memiliki lapisan peptidoglikan yang lebih tebal (20-80 nm) dibandingkan bakteri gram negatif (<10 nm) (Varghese & Balachandran, 2021).

Bakteri uji *Staphylococcus aureus* dan *Pseudomonas aeruginosa* digunakan dalam pengujian aktivitas antibakteri dalam membran filtrasi. Kedua bakteri tersebut diketahui bersifat patogen terhadap manusia dan menyebabkan *fouling* pada membran filtrasi yang diaplikasikan di air laut, seperti membran *reverse osmosis* pada desalinasi air laut. Kedua bakteri penghasil biofilm tersebut juga kerap ditemui di limbah perkotaan dan limbah rumah sakit (Sathish & Aparna., 2014).

2.11.1 *Staphylococcus aureus*

S. aureus adalah bakteri gram positif, berbentuk kokus, dan berdiameter 0,5 hingga 1 μm (Castro *et al.*, 2018). Pertumbuhan dan keberlangsungan hidup *S. aureus* tergantung pada sejumlah faktor seperti suhu, pH, komposisi makanan, dan adanya oksigen. Kisaran suhu untuk pertumbuhan *S. aureus* adalah 10 – 45 °C (optimum sebesar 30 - 37 °C) dan nilai pH antara 4,2 dan 9,3 (optimum sebesar 7 – 7,5). Namun, keberlangsungan hidup *S. aureus* berkurang pada suhu -10 sampai 0 °C dan mudah mati dalam proses pasteurisasi. Bakteri *S. aureus* bersifat anaerob fakultatif sehingga dapat tumbuh dalam kondisi aerobik dan anaerobik. Namun, pertumbuhan bakteri lebih lambat dalam kondisi anaerob. Koloni khas *S. aureus* berwarna kuning keemasan, halus, berkilau, melingkar, dan tembus cahaya. Bakteri jenis ini sering ditemui pada kulit manusia, hewan, dan produk pangan hewani (susu, daging) yang terkontaminasi salah satunya dari air (Castro *et al.*, 2018).

2.11.2 *Pseudomonas aeruginosa*

P. aeruginosa adalah bakteri gram negatif dalam bentuk sel tunggal, batang lurus atau melengkung yang berukuran 0,5 – 1,0 μm . Bakteri ini memiliki kemampuan untuk bertahan hidup di lingkungan yang memiliki sedikit nutrisi pada rentang suhu yang luas, dari 4 hingga 42 °C yang memungkinkannya untuk hidup pada berbagai lingkungan termasuk kelangsungan hidup dalam sistem air. *P. aeruginosa* menghasilkan warna hijau yang khas. Bakteri jenis ini sering ditemui pada air, tanaman, hewan dan manusia (Garvey *et al.*, 2020).