

# SISTEM MEMBRAN TERINTEGRASI UNTUK PENGOLAHAN AIR DAN DESALINASI

Ignatius Ivan Sulaksono

## Abstrak:

*Makalah ini menyajikan gambaran mengenai membran gabungan yang dapat menggantikan sistem konvensional maupun membran tunggal dalam pretreatment, pengolahan air minum maupun pabrik desalinasi. Pada pengolahan air, melibatkan proses konvensional yang masih didapatkan beberapa masalah seperti adanya polusi air, bertambahnya permintaan air maupun penggunaan air bersih berlebih. Dari masalah ini, diperkenalkanlah membran hybrid. Membran hybrid merupakan membran yang menggabungkan antara membran itu sendiri dengan proses lain seperti koagulasi, flokulasi maupun penukar ion. Terlepas dari itu, membran gabungan juga dapat merupakan gabungan dari membran-membran seperti nanofiltrasi-ultrafiltrasi. Dari berbagai literatur, terbukti bahwa membran hybrid ini memiliki keuntungan yang sangat banyak dan dapat menghilangkan partikel yang sebelumnya tidak dapat dihilangkan oleh sistem konvensional maupun membran tunggal itu sendiri. Namun, karena kurangnya uji coba, masalah biaya operasional masih belum diketahui dan diharapkan lebih banyak uji coba dengan skala yang lebih besar sehingga dapat diketahui biaya operasional yang dibutuhkan.*

**Kata kunci:** pengolahan air, desalinasi, membran hybrid, pretreatment, membran

## 1. Pendahuluan

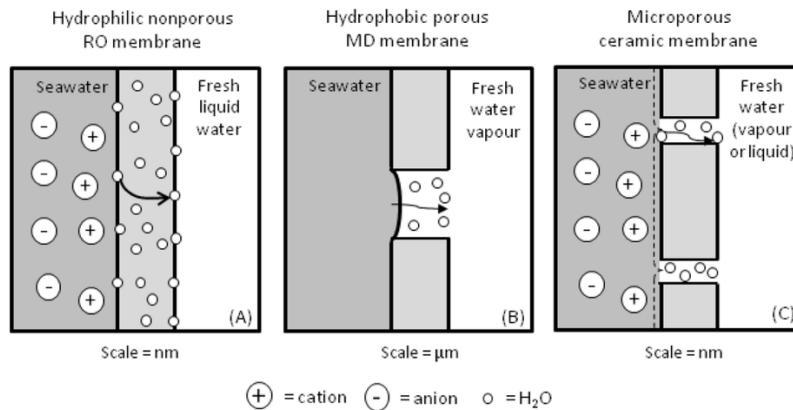
Setiap makhluk hidup terutama manusia membutuhkan air untuk dapat hidup. Air dapat menopang hidup manusia dari berbagai aspek seperti pekerjaan maupun metabolisme tubuh. Air juga merupakan salah satu sumber daya yang dengan mudah ditemukan dalam kehidupan sehari-hari. Air murni memiliki banyak sekali kegunaan. Pertanian (70%), industri (19%), dan kebutuhan domestik (11%) merupakan tiga bidang yang paling banyak memerlukan air bersih. Walaupun air mudah didapatkan, masih terdapat kemungkinan terjadinya krisis air. Hal ini dapat terjadi apabila didapatkan faktor-

faktor seperti penyalahgunaan air, polusi pada sumber air, pengaturan air yang salah maupun perubahan iklim dan bertambahnya populasi makhluk hidup. Menurut *United Nations*, sekitar 1.2 miliar orang hidup di lokasi yang memiliki kelangkaan air, 500 juta orang hidup dalam situasi yang hamper sama dan 1.6 miliar orang hidup dalam situasi perekonomian air yang bermasalah. Kelangkaan air ini dapat memengaruhi kehidupan manusia secara langsung. Permasalahan ini harus segera diselesaikan karena banyak masalah yang dapat timbul bila air bersih tidak dipenuhi. Menurut data yang diperoleh dari WHO, lebih dari 3.4 juta orang meninggal setiap tahunnya karena masalah air yang tidak bersih atau tidak higienis. Kelangkaan air juga dapat menimbulkan masalah pada bidang pertanian. Semakin sedikit air yang ada, semakin sedikit pula makanan yang dapat diproduksi. Sehingga, terdapat kelaparan pada berbagai daerah [4]. Situasi ini dapat menjadi lebih buruk dengan pesatnya pertumbuhan populasi manusia yang dapat meningkatkan permintaan air bersih.

### 1.1 Pengenalan membran

Membran merupakan sebuah penghalang selektif untuk dua fasa. Fenomena membran pertama kali dilihat oleh Abbe Nollet pada tahun 1748. Terdapat beberapa jenis membran yang digunakan dalam sistem utilitas yang melibatkan fermentasi mikrobial dan proses *biorefinery* karena membran-membran tersebut menawarkan biaya yang lebih rendah.

Permasalahan air yang dihadapi kini memang perlu ditanggapi secepatnya. Untuk menanggapi permasalahan ini, maka diperlukan solusi-solusi seperti daur ulang air, *water reuse*, desalinasi dan pengembangan pengolahan air. Dalam ulasan ini, desalinasi dan pengembangan pengolahan air akan dibahas lebih lanjut lagi. Desalinasi merupakan proses yang dapat mengubah air laut menjadi air yang dapat diminum dengan adanya rejeksi kontaminan maupun mineral yang terdapat pada air tersebut. Teknologi ini sangat berkembang dan menjadi banyak digunakan dikarenakan air laut yang tidak ada habisnya.



Gambar 1. Ilustrasi desalinasi dengan berbagai membran. Sumber: <http://www.mdpi.com/20734441/4/3/629/htm>

### 1.2 Pabrik pengolahan air minum konvensional

Mayoritas dari pabrik pengolahan air minum yang konvensional menggunakan metode-metode seperti koagulasi-flokulasi, sedimentasi, filtrasi pasir, disinfeksi dan ozonasi. Umpan dalam pengolahan air ini adalah air mentah yang dapat diperoleh dari air tanah, sumur, sungai, danau maupun sistem reservoir. Namun, dikarenakan aktivitas manusia yang dapat merusak sumber air tersebut seperti pembuangan limbah industri sembarangan dan kontaminasi yang lainnya, pabrik ini mengalami kesulitan dalam pengolahan air yang efektif. Hal ini dapat terjadi karena terdapat penurunan kualitas air yang drastis. Hal-hal ini kemungkinan besar terjadi pada negara-negara yang sedang berkembang maupun negara-negara yang belum berkembang karena pabrik yang terdapat dalam negara tersebut masih belum dapat mengolah limbah dengan baik dan benar. Di Indonesia, ribuan bayi meninggal karena diare yang disebabkan oleh air yang kurang bersih. Karena pabrik tersebut masih belum maju, maka jarang ditemukan tempat utilitas yang berfungsi untuk menjaga kualitas air yang diperbolehkan untuk dibuang. Maka dari itu, pabrik pengolahan air minum konvensional hanya dapat membuang sebagian limbahnya ke dalam air.

Beberapa hambatan yang dialami oleh pabrik pengolahan air minum konvensional adalah sebagai berikut.

#### a. Polusi sumber air

Seperti yang telah dikatakan sebelumnya, air umpan merupakan air yang berasal dari air tanah seperti sungai dan lain-lain. Sumber air yang telah tercemar membutuhkan fasilitas pengolahan lanjutan untuk menghasilkan air yang dapat dikonsumsi. Berbagai studi telah dilakukan dan diperoleh hasil

bahwa racun, pestisida, sisa-sisa farmasi, arsenic dan herbisida dari air yang telah tercemar tidak dapat disingkirkan dengan pengolahan tradisional. Contoh pengolahan lanjutan adalah oksidasi dengan ozon dan filtrasi oleh GAC. Pengolahan lanjutan ini telah terbukti mampu menyingkirkan pestisida namun masih terdapat berbagai masalah karena kejenuhan aktivasi karbon dan produk sampingan yang beracun yang dapat timbul di penyaring GAC. Kelemahan inilah yang mendorong majunya teknologi membran.

#### b. Mudah tercemat mikroorganisme

Di Perancis, terdapat pabrik pengolahan air yang tidak dapat mencegah bertumbuhnya mikroba di dalam air dikarenakan tingginya level dari material organik yang tidak memungkinkan proses penghilangan mikroorganisme. Fenomena yang sama dapat dilihat di *Cheng Ching Water Works* dimana alga dan mikroorganisme lainnya tidak dapat dipisahkan sempurna dalam sistem.

#### c. Air yang "keras"

Air yang dihasilkan dari pabrik konvensional akan terlalu keras [20]. Berbagai proses seperti *lime softening* diperlukan untuk mencegah hal seperti ini.

#### d. Produk sampingan dari disinfeksi

Untuk menghilangkan virus dan bakteri, proses yang paling ampuh adalah proses klorinasi. Namun, klorinasi dapat membentuk senyawa baru yang bersifat karsinogenik dan sulit dihilangkan.

### 1.3 Pabrik desalinasi reverse osmosis dengan pretreatment konvensional

*Pretreatment* merupakan salah satu teknologi yang dapat meminimalisir *fouling* dan memperpanjang umur membran. Air laut biasanya mengandung kontaminan-kontaminan yang bermacam-macam seperti partikel

koloid, mikroorganisme, garam, material organik alami, hidrokarbon dan minyak. Polutan-polutan yang terdapat dalam air laut tersebut sulit dipisahkan tanpa adanya *pretreatment* yang ekstensif. Tanpa adanya *pretreatment* yang benar, kontaminan-kontaminan seperti padatan yang tidak terlarut akan menghalangi membran *reverse osmosis* dan mengurangi laju permeat serta kualitas rejeksi membran. *Pretreatment* konvensional ini telah banyak diterapkan di pabrik SWRO (*Seawater Reverse Osmosis*) yang pada umumnya terdapat proses koagulasi, flokulasi, sedimentasi, pengaturan pH, klorinasi, inhibisi *scaling*, *dual media filter*, dan flotasi. Sistem ini dapat menghasilkan umpan air yang memenuhi kualitas RO sehingga operasi RO dapat berjalan dengan optimal. Beberapa contoh permasalahan yang dapat terjadi pada *reverse osmosis* adalah sebagai berikut.

a. Performa yang berfluktuasi

Dari penelitian Doha, telah ditunjukkan bahwa *pretreatment* konvensional memroduksi instabilitas dalam nilai SDI yang sama seperti proses *backwashing*, dan konsumsi kimiawi yang tinggi. Contoh lain ada pada pabrik SWRO di Jeddah dimana *pretreatment* konvensional rentan terhadap perubahan kualitas air laut. Hal ini diobservasi berdasarkan perubahan kondisi yang disebabkan oleh perubahan iklim. Perubahan kualitas air dapat menyebabkan perubahan performa pula sehingga perlu ditanggapi dengan *pretreatment* yang lebih baik lagi.

b. Rentan terhadap biofouling

*Biofouling* adalah masalah yang cukup serius dalam penggunaan membran RO. Kegagalan *pretreatment* konvensional yang harusnya menurunkan nilai SDI mengindikasikan terdapat nutrisi bagi bakteri maupun mikroorganisme untuk tumbuh dan berkembang. Di Brazil Selatan, *pretreatment* konvensional gagal untuk memisahkan mayoritas parameter-parameter *biofouling* dan tidak ada yang menunjukkan reduksi microbial yang signifikan. Di dalam salah satu proses *pretreatment*, didapatkan mikroorganisme yang berkembang pada GAC filter. Membran dan permukaan *feed channel spacer* dapat dipenuhi oleh lapisan *fouling* yang tebal.

c. Scaling

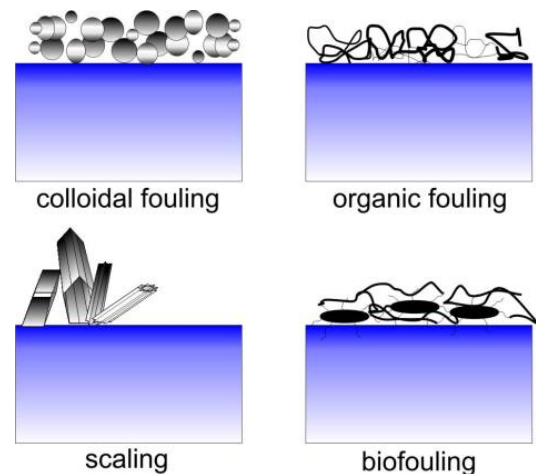
*Scaling* adalah permasalahan lain di dalam pabrik desalinasi berbasis *reverse osmosis*. *Scaling* dapat terjadi ketika konsentrasi dari garam telah melebihi batas kapasitasnya dan mengkristal di permukaan membran. Beberapa contoh *scaling* yang dapat ditemukan di permukaan membran adalah kalsium

karbonat, silica, barium sulfat dan kalsium sulfat. Beberapa contoh proses pencegahan telah diterapkan pada insutri dan dapat dikategorikan menjadi tiga jenis yaitu,

- Alterasi karakteristik umpan
- Adisi *antiscalant*
- Optimisasi dari parameter operasi dan desain sistem

Metode yang paling umum untuk mengubah karakteristik air adalah asidifikasi. Namun, penggunaan asam seperti asam sulfat mampu meningkatkan kemungkinan terjadinya *scaling* oleh sulfur. Selain itu, *ion-exchange softening* dapat menjadi pendekatan yang baik untuk mengendalikan *scale*. Namun, karena biaya operasionalnya yang mahal, alternatif lain akan menjadi lebih menarik. Untuk memaksimalkan parameter operasi, diperlukan pengurangan *recovery* produk. Apabila hal tersebut dilakukan, akan terdapat dampak ekonomi untuk efisiensi operasi. Beberapa masalah ini dapat diselesaikan dengan adanya *antiscalant*. *Antiscalant* dapat mencegah terbentuknya *scale* dan dapat dikategorikan menjadi tiga jenis yaitu fosfat, fosfonat dan polikarboksilat. Meskipun demikian, *antiscalant* dapat menyebabkan terjadinya *biofouling* pada membran.

Karena performa konvensional yang kurang baik, maka diusulkan penggunaan membran terintegrasi atau hybrid.



Gambar 2. *Fouling* pada membran. Sumber: Al-Sheikh 1997.

#### 1.4 Definisi proses membran terintegrasi / hybrid

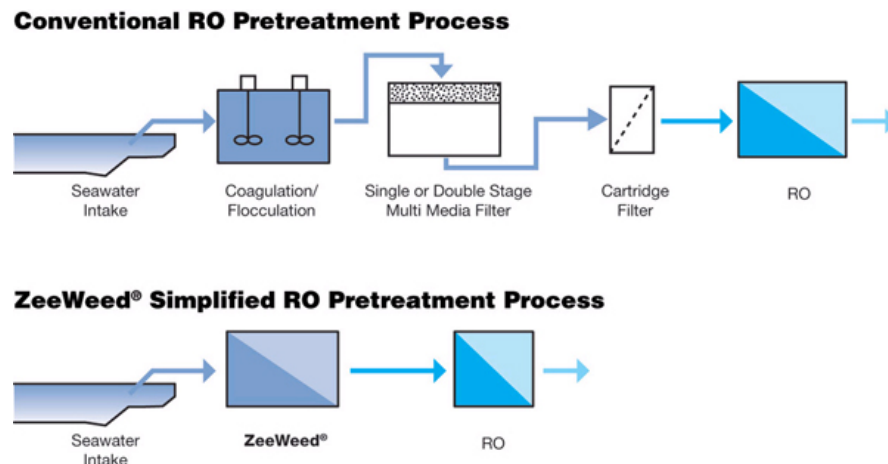
Secara umum, proses membran *hybrid* dideskripsikan sebagai proses dimana satu atau lebih proses membran yang dipasangkan dengan unit-unit lain seperti Semua proses ini digabungkan menjadi satu

sistem untuk melakukan suatu tugas. Tujuan utama dalam penggunaan membran hybrid ini adalah untuk meningkatkan performa pengolahan air menjadi yang lebih baik. Dengan sistem gabungan ini, diharapkan kelemahan-kelemahan pada penjelasan sebelumnya dapat diatasi pula. Sebagai contoh, dengan menggabungkan proses koagulasi dan proses membran, maka masalah *fouling* dapat diatasi dengan baik dan menunjukkan angka penurunan yang signifikan. Namun, performa dari membrane *hybrid* atau gabungan ini juga bergantung pada umpan air yang dimasukkan. Air yang terdapat pada negara maju mayoritas sudah terlindungi, namun pada negara berkembang atau negara yang belum berkembang, berbagai sumber air belum terlindungi kebersihannya dan masih banyak sekali kontaminan yang terdapat dalam air. Kontaminan pada air dapat disebabkan oleh pembuangan limbah maupun pembakaran hutan yang tidak benar. Maka dari itu, diciptakanlah proses membran *hybrid*.

## 2. Proses membran *hybrid* / gabungan dalam pabrik pengolahan air minum

Proses membran ini telah diajukan karena terdapat perkembangan teknologi membran dan diharapkan proses ini dapat menggantikan *pretreatment* konvensional yang memiliki performa yang kurang baik dalam menghilangkan kontaminan seperti arsenic, herbisida dan pestisida. Membran filtrasi memiliki beberapa keuntungan seperti tidak membutuhkan bahan-bahan kimia, kualitas air yang lebih baik, mengurangi produksi *sludge* dan ukuran pabrik yang lebih kecil. Biasanya, membran pengolahan air dapat dibagi menjadi dua kategori, yaitu proses membran tunggal dan proses membran *hybrid*. Proses membran tunggal merupakan membrane yang mengurus utilitas air saja seperti mikrofiltrasi, nanofiltrasi dan ultrafiltrasi. Proses membran *hybrid* akan terdapat *pretreatment* yang dilakukan sebelum proses pengolahan air. Proses ini dapat melibatkan proses konvensional seperti koagulasi, flokulasi, sedimentasi, dan lain-lain.

Angka penggunaan proses membran *hybrid* ini sudah meningkat untuk penggunaan pengolahan air minum. Hal ini dilakukan karena membran *hybrid* telah terbukti dapat mengatasi masalah *fouling*.



Gambar 3. Contoh proses *pretreatment* pada suatu perusahaan. Sumber: <https://iqshalahuddin.wordpress.com>

### 2.1 Membran mikrofiltrasi / ultrafiltrasi

Membran filtrasi dengan mikrofiltrasi maupun ultrafiltrasi sudah diaplikasikan dengan luas di dunia. Namun, terdapat beberapa masalah utama dalam membran jenis ini. 2 masalah utama adalah terjadinya *fouling* dan rendahnya efisiensi rejeksi kontaminan. Mikrofiltrasi dan ultrafiltrasi sendiri memang memiliki performa yang buruk dalam menghilangkan *dissolved organic solutes* (DOM), *disinfection by-products* (DBP) dan precursor, biopolymer seperti algal dan materi organik efluen. Ketika banyak kontaminan yang telah disebutkan terdapat pada air mentah, maka membran

tunggal kurang *feasible* dalam memproduksi air yang dapat dikonsumsi. Hal inilah yang menjadi dasar pengembangan membran *hybrid* dalam pengolahan air.

*Natural Organic Matter* atau dapat disingkat NOM merupakan hambatan utama bagi proses ultrafiltrasi maupun mikrofiltrasi. Hal ini dikarenakan NOM tidak dapat dihilangkan secara efektif dan dapat menyebabkan *fouling*. Beberapa studi telah dilakukan dan ternyata di pabrik pengolahan air di Heemskerk telah digunakan membran *hybrid* yang merupakan gabungan dari koagulasi-sedimentasi-filtrasi (CSF) dan

ultrafiltrasi sebagai *pretreatment* untuk pabrik yang berbasis RO. CSF memiliki masalah dalam *pretreatment*, yaitu dapat terbentuknya *fouling* dari koloid. Namun, masalah ini dapat diatasi dengan adanya ultrafiltrasi yang digabungkan dengan sistem tersebut. Contoh lain adalah pabrik pengolahan air di China yang menggunakan ultrafiltrasi untuk menghasilkan air minum. Dalam studi tersebut, yang menjadi *pretreatment* dalam membran ultrafiltrasi tersebut adalah koagulasi. Dengan besi klorida yang optimum sebagai koagulan, akan dihasilkan air yang memenuhi standar air minum yang layak. Beberapa studi lain juga mendapatkan hasil bahwa *pretreatment* dengan koagulasi dapat meningkatkan nilai penghilangan NOM dan material organik tak larut lainnya dari membran ultrafiltrasi.

Selain koagulasi, berbagai *pretreatment* lain telah dicoba seperti adsorpsi, peroksidasi, MIEX resin, dan biological treatment. Adisi dari bubuk karbon yang teraktivasi sebagai adsorban meningkatkan nilai penghilangan materi-materi organik dan dapat mengontrol *fouling*. Peroksidasi menggunakan proses oksidasi oleh ozon, klorin dan permanganat untuk menekan pertumbuhan mikroorganisme dan mencegah adanya NOM. Dengan penggunaan ozon, *fouling* dapat berkurang akan kualitas permeat meningkat karena adanya pengurangan jumlah karbon organik. Hal yang serupa ditemui pada gabungan MIEX resin-ultrafiltrasi. Namun, biaya operasional MIEX resin lebih besar dibandingkan dengan koagulasi sehingga jarang sekali digunakan.

Mikrofiltrasi adalah salah satu metode alternatif yang dapat dipakai dalam pabrik pengolahan air konvensional. Contohnya adalah air di Martapura, yang dapat dibersihkan dengan kombinasi mikrofiltrasi dengan koagulasi sebagai *pretreatment*. Pada sebuah pabrik di Korea, koagulasi dengan koagulan yang berbasis aluminium sebagai *pretreatment* meningkatkan kualitas air dan fluks dari permeat dibandingkan tanpa *pretreatment*. Sistem mikrofiltrasi *hybrid* juga telah terbukti dapat memisahkan DOM lebih baik. Dapat disimpulkan bahwa tujuan dari *pretreatment* yang dilakukan adalah untuk melindungi membran mikrofiltrasi dan memisahkan kontaminan yang tidak dapat dipisahkan oleh ultrafiltrasi maupun mikrofiltrasi itu sendiri. Contoh lain *pretreatment* adalah menggunakan *super-powdered activated carbon* yang

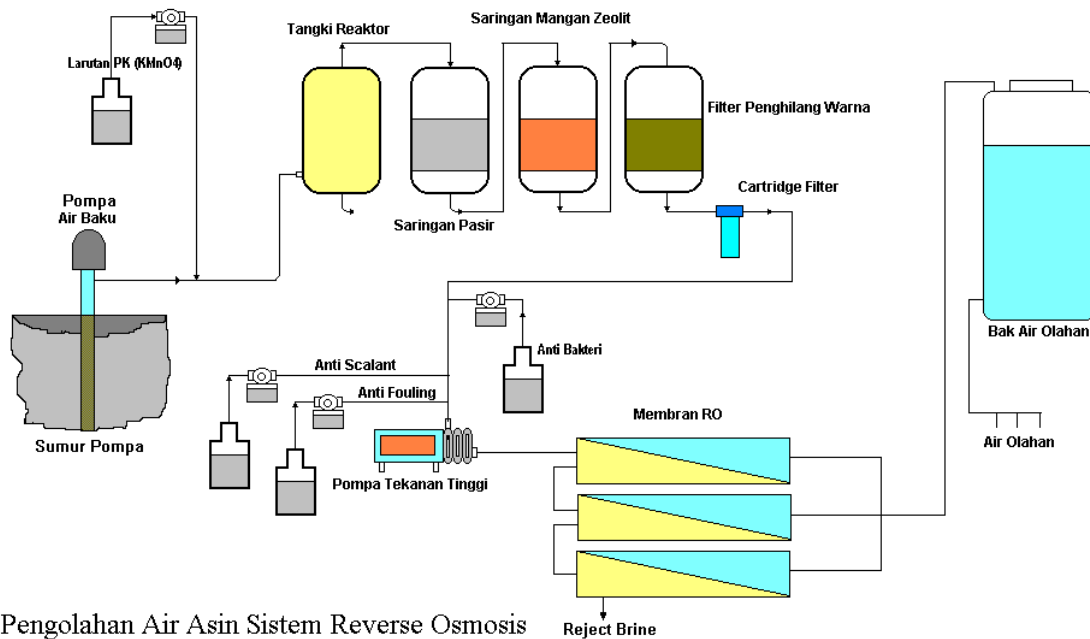
dapat membuat lapisan *fouling* pada permukaan membran menjadi lebih permeabel dan filtrasi lebih stabil. MIEX resin dapat digunakan untuk menghilangkan DOC dan molekul-molekul koloid lainnya dan dapat mencegah *short-term fouling* pada mikrofiltrasi.

## 2.2 Nanofiltrasi

Mikrofiltrasi dan ultrafiltrasi terbukti sudah banyak digunakan untuk mengolah air tanah dan air permukaan dengan hasil yang baik dan sedikit kontaminan. Namun, kedua sistem tersebut masih belum bisa mengolah air yang memiliki kontaminan berkonsentrasi rendah dan *low MW organic material*. Selain itu, mikrofiltrasi dan ultrafiltrasi tidak dapat melembutkan air tawar yang memiliki ion-ion yang tidak larut di dalamnya. Meskipun demikian, pabrik pengolahan air yang menggunakan nanofiltrasi masih menghadapi masalah yang sama yaitu *fouling* oleh NOM dan terdapat partikel submicron di dalam air. Untuk mengatasi hal tersebut, diperlukan sistem nanofiltrasi (NF) *hybrid*.

Nanofiltrasi sangat berguna dalam proses *water softening* sejak tahun 1990. Seperti yang telah dituliskan pada bagian sebelumnya, metode konvensional kurang dapat dipercaya dalam proses *water softening* yang dapat diantisipasi dengan adanya membran nanofiltrasi. Air sungai di Perancis khususnya di Oise banyak mengandung materi-materi organik yang banyak dan pestisida yang sulit dihilangkan dengan metode konvensional saja. Namun, dengan NF, sungai tersebut dapat diolah. Studi lain dilakukan di Jerman dimana air tanahnya memiliki kekerasan yang tinggi serta memiliki NOM yang tinggi. *Pretreatment* yang dilakukan adalah dengan deferasasi, demanganisasi dan *rapid sand filtration* dan setelahnya diumpankan ke dalam membran NF.

Sistem RO dengan *pretreatment* konvensional dapat mengolah air menjadi air bersih. Namun, hasil kualitas sangat kurang. Dari beberapa studi di atas, dapat disimpulkan bahwa proses *pretreatment* dapat meningkatkan kualitas permeat dan mengurangi *fouling* pada membrane. Namun, diperlukan kehati-hatian saat memilih kombinasi untuk *pretreatment*. Hal-hal yang perlu diperhatikan antara lain adalah kondisi umpan dan ekonomi pabrik.



Gambar 4. Salah satu cara pengolahan air minum dengan *pretreatment*. Sumber: <http://www.kelair.bppt.go.id>

### 3. Membran *hybrid* sebagai *pretreatment* dalam pabrik desalinasi RO

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, metode *pretreatment* konvensional telah banyak diaplikasikan pada pabrik desalinasi SWRO. Namun, dengan adanya perkembangan teknologi membran, terdapat hal baru yang patut dicoba, yaitu memaksimalkan penggunaan membran sebagai *pretreatment*. *Pretreatment* dengan menggunakan membran seperti MF/UF/NF menarik

perhatian sebagai alternatif metode konvensional. Sebagai bagian dari proses *pretreatment*, membran perlu digabungkan dengan proses lain seperti koagulasi. Membran gabungan atau *hybrid* tidak hanya populer pada pengolahan air, namun juga dalam proses desalinasi. Latarbelakang digunakannya *pretreatment* jenis ini adalah rendahnya kualitas air laut dan air payau yang membutuhkan *pretreatment* yang intensif.

Tabel 1. Salah satu analisa air umpan RO di Florida. Sumber: Ebrahim & Burney, 1997

	Feed	Concentrate
Ca	470.00	783.33
Mg	61.00	101.67
Ba	0.11	0.18
Sr	1.20	2.00
Fe	Not Defined	Not Defined
Mn	Not Defined	Not Defined
Al	Not Defined	Not Defined
Na	310.00	516.67
Cl	865.00	1441.67
HCO <sub>3</sub>	1097.90	1829.84
SO <sub>4</sub>	135.24	225.40
PO <sub>4</sub>	0.37	0.61
SiO <sub>2</sub>	135.24	225.40
pH	7.58	7.80
Temperature (°C)	25.40	26.20

### 3.1 Mikrofiltrasi/Ultrafiltrasi

Sebuah penelitian mengenai *pretreatment* dengan membran mikrofiltrasi telah dilakukan dan hasilnya didapatkan tahun 1997. Studi mengatakan bahwa sistem MF sanggup menyediakan air dengan kualitas yang baik kepada sistem RO secara kontinyu. Meskipun demikian, masih terdapat *fouling* pada membrane tersebut. Untuk mengatasi hal tersebut, diperlukan klorinasi untuk menghindari *fouling*. Sebuah studi menunjukkan bahwa jumlah biaya air yang digunakan dalam sistem MF ini lebih rendah dan hal ini menyimpulkan bahwa sistem membran memiliki daya saing yang baik dari segi ekonomi.

Membran MF dapat digabungkan dengan metode konvensional lainnya. Contohnya adalah kombinasi antara *deep bed filtration* dengan flokulasi dapat digabungkan dengan MF untuk menghasilkan efisiensi MW yang baik. Masalah *fouling* dan *biofouling* dapat diatasi dengan gabungan ozon-MF dan klorinasi-MF.

Membran mikrofiltrasi memang menunjukkan banyak performa yang baik, namun membran-membran UF lebih dapat diterima karena kemampuan UF untuk merejeksi materi organik, silt, patogen dan virus dengan efisiensi yang lebih besar [59]. Ultrafiltrasi dapat menyediakan lapisan pelindung terhadap kontaminan dikarenakan ukuran pori yang sangat kecil dibandingkan dengan MF. Banyak sekali uji yang membandingkan mikrofiltrasi dengan ultrafiltrasi dan hasilnya adalah memang benar ultrafiltrasi lebih baik daripada mikrofiltrasi. Mayoritas membran yang digunakan dalam *pretreatment* saat ini adalah membran UF *hybrid*.

Koagulasi dapat ditambahkan atau digabungkan dalam membran UF untuk menghasilkan nilai SDI15 yang lebih kecil dibandingkan membran MF gabungan. Kemudian, apabila sistem tersebut digabungkan kembali dengan elektrokoagulasi-UF, maka air laut dapat diolah terlebih dahulu untuk menentukan kombinasi mana yang lebih baik. Selain dengan koagulasi, membran UF dapat digabungkan dengan penukar ion menjadi sebuah proses *pretreatment*. Dengan proses *pretreatment* penukar ion-membran UF, maka turbiditas dapat dihilangkan sebanyak 98%. Membran ultrafiltrasi *hybrid* juga digunakan untuk menghilangkan kontaminan seperti silika. Penghilangan silika dengan sistem inline coagulation - UF berhasil dilakukan dan silika yang dibuang adalah sebesar 65% dengan dosis koagulan

yang sama dengan kadar SiO<sub>2</sub> yang terdapat pada air tersebut, yaitu 30 mg/L.

Hasil dari beberapa percobaan telah menunjukkan bahwa variasi dari membran *hybrid* dapat dikembangkan selama masih cocok dalam mengolah air umpan terlebih dahulu. Dengan adanya *pretreat*, filtrat air yang dihasilkan akan memenuhi syarat air bersih yang seharusnya.

### 3.2 Nanofiltrasi

Meskipun dengan MF atau UF sudah didapatkan hasil yang menjanjikan, namun tidak ada salahnya untuk mencari alternatif lain seperti nanofiltrasi. Seperti yang kita tahu, MF dan UF kurang dapat merejeksi material organik yang terdapat di dalam air khususnya NOM dan organik tak larut. Lebih lanjut lagi, MF dan UF tidak dapat mengatasi masalah *scaling*. Biaya energi pada pabrik desalinasi sangat bergantung pada salinitas air. Ketika salinitas umpan air tinggi, maka diperlukan tekanan yang lebih tinggi pula untuk menjalankan sistem *reverse osmosis*. Maka dari itu, tujuan utama dari *pretreatment* nanofiltrasi adalah untuk mengurangi salinitas air.

Akhir-akhir ini, membran nanofiltrasi telah berkembang dan menyita perhatian para peneliti dan pengembang. NF memiliki prospek yang tinggi untuk mengurangi *fouling* pada membran RO dan mengurangi biaya SWRO karena kemampuan menolak ion-ion multivalensi dan ion-ion monovalensi parsial di dalam air. Pengenalan NF sebagai *pretreatment* dalam desalinasi tidak hanya akan berdampak pada kualitas air umpan, namun juga menguntungkan. Ketika ion garam direduksi oleh membran NF, tekanan osmosis akan berkurang secara signifikan dan unit RO dapat dioperasikan pada tekanan yang lebih rendah.

Performa NF akan mencapai maksimal ketika air laut dilewatkan dual media dan media filtrasi pasir terlebih dahulu. Namun, dampak dari filtrasi langsung pada air laut oleh NF belum dipelajari lebih lanjut, terutama dalam hal rejeksi kontaminan dan mekanisme *fouling*. Beberapa variasi *pretreatment* dilakukan untuk mengatasi partikulat dan mengontrol *fouling* inorganik pada SWRO. Membran RO memiliki fluks terbesar ketika nanofiltrasi digunakan sebagai *pretreatment* karena NF dapat menghilangkan material *scale* inorganik namun juga partikel-partikel koloid. Selain menggabungkan membran dengan sistem konvensional, gabungan membran-membran juga dapat digunakan dalam *pretreatment* seperti UF-NF



yang dapat memproduksi efluen dengan penghilangan TOC yang lebih baik. Walaupun nanofiltrasi telah diteliti lebih baik, namun masih terdapat *fouling* setelah adanya pembersihan dengan bahan kimia.

#### 4. Desalinasi air laut dan air payau oleh proses nanofiltrasi gabungan

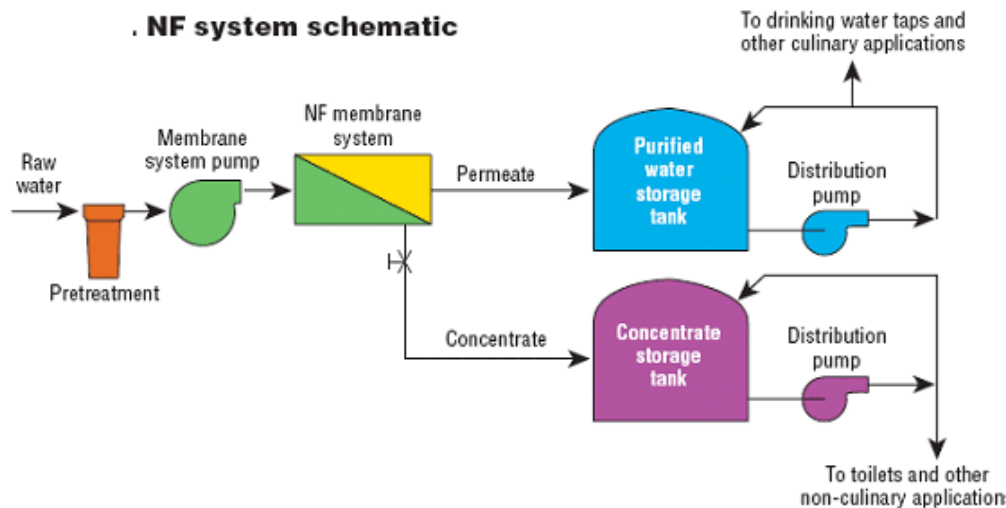
Nanofiltrasi memiliki karakteristik yang baik sehingga cocok digunakan dalam pengolahan-pengolahan air. Terdapat studi dimana dua membran nanofiltrasi komersial dibandingkan dengan membran-membran fabrikasi. Membran nanofiltrasi terbukti memiliki rejeksi  $MgSO_4$  yang lebih besar serta fluks dan permeabilitas yang lebih tinggi.

Desalinasi RO merupakan unit pada pabrik desalinasi yang menggunakan banyak sekali tenaga. Hal inilah yang mendorong para peneliti untuk mencari alternatif lain untuk mengganti membran RO tersebut. Salah satu contoh adalah membran *hybrid* penukar ion-NF untuk proses desalinasi. Dalam uji pertama, larutan garam, ion klorida monovalen dilewatkan menuju penukar anion dan penukar ion sulfat divalen. Dengan proses ini, air umpan tekanan osmosis dapat direduksi.

Dengan adanya penukar ion, membran gabungan NF dapat bekerja lebih ringan sebesar 50% dari membran RO dan menghasilkan permeabilitas yang lebih tinggi.

Kualitas dari air payau biasanya lebih baik dari air laut. Maka dari itu, dalam beberapa kasus pabrik desalinasi mengganti membran RO dengan NF karena lebih membutuhkan tekanan operasi yang lebih rendah dan menghasilkan produk yang dapat diterima pula. Sebagai contoh di Long Beach Water Department, dual-stage NF diuji untuk menggantikan membran RO. Tujuan utama uji ini adalah untuk mengurangi konsumsi energi ketika memproduksi air minum. Dari uji tersebut, dapat diperoleh hasil bahwa NF dapat menghasilkan air minum yang sesuai dengan kriteria.

Pendekatan pretreatment dalam SWRO ini telah berjalan dan berkembang seiring perkembangan waktu. Mulai dari pretreatment konvensional, membran sebagai pretreatment dan akhirnya membran gabungan. Walaupun *pretreatment* terbukti efektif berdasarkan performanya, perlu diperhatikan masalah mendasar lagi seperti *fouling* karena *backwashed* oleh bahan kimia.



Gambar 6. Contoh sistem NF pada desalinasi air. Sumber: Mezher dkk, 2011

#### 5. Masalah energi, biaya dan dampak lingkungan

Salah satu masalah krusial dari membran *hybrid* adalah masalah biaya. Faktor ini adalah faktor yang krusial yang menentukan apakah sistem tersebut dapat dilakukan secara *feasible* atau tidak. Menurut literatur, hanya terdapat sedikit atau bahkan tidak ada informasi mengenai biaya penggunaan membran *hybrid* ini dikarenakan hal ini masih baru pada pabrik desalinasi. Maka dari itu, kebanyakan perbandingan biaya dilakukan pada proses membran tunggal maupun

proses konvensional. Sebagai contoh perbandingan, membran *hybrid* pasti akan membutuhkan biaya yang lebih mahal daripada proses konvensional, namun hasil yang diperoleh akan lebih baik seperti fluks yang lebih tinggi dan pembersihan yang dilakukan menjadi lebih sedikit. Biaya investasi UF *pretreatment* lebih besar 40% daripada sistem *pretreatment* konvensional namun hal ini akan mengimbangi kecilnya biaya pada sistem desalinasi.



Dengan berkembangnya perkembangan teknologi membran, diharapkan masalah seperti fouling dapat dikurangi dan diminimalisir. Dengan pernyataan-pernyataan di atas membran *hybrid* dalam pabrik pengolahan air minum dan pabrik desalinasi dapat diperkirakan biayanya sangat kompetitif terhadap proses konvensional atau membran tunggal. Asumsi ini dapat dikatakan berdasarkan keuntungan-keuntungan yang diperoleh dari membran gabungan atau *hybrid*.

Masalah berikutnya adalah masalah konsumsi energi. Penggunaan membran memungkinkan pabrik menggunakan pompa untuk mengalirkan air ke membran tersebut. Namun, kenaikan konsumsi energi dalam unit tersebut dapat berdampak pada unit lain yang membutuhkan energi pula. Penggunaan membran NF *hybrid* sebagai pretreatment dalam desalinasi dapat mengurangi konsumsi energi dalam *downstream* dalam unit RO karena penghilangan padatan dalam air secara parsial. Dari laporan ini, dapat dilihat bahwa energi tambahan yang digunakan pada membran NF dapat ditutupi dengan pengurangan konsumsi energi pada unit lain. Dikarenakan kurangnya informasi mengenai biaya dan konsumsi energi pada membran *hybrid* pada industri air, sulit mengatakan bahwa membran *hybrid* lebih murah dari proses konvensional maupun membran tunggal.

Pelepasan air dari sistem membran *hybrid* belum dipelajari pula. Dengan proses konvensional, dibutuhkan banyak sekali bahan kimia khususnya pada koagulasi, flokulasi atau sedimentasi. Hasilnya, banyak sekali kotoran yang dihasilkan dibuang ke lingkungan. Kotoran tersebut harus diolah dahulu sebelum dibuang. Biaya dalam pengolahan limbah dan pembuangan limbah akan menunjukkan biaya total operasi yang besar bila air mengandung partikel tersuspensi. Proses membran mengurangi penggunaan bahan-bahan kimia, namun bahan-bahan kimia tersebut masih harus digunakan untuk mengembalikan performa membran yang berkurang karena *fouling*. Bahan kimia yang dibuang ke lingkungan dapat menimbulkan berbagai bahaya pada organisme-organisme tersebut. Konsumsi bahan kimia dan pembuangannya masih belum dipelajari dengan baik, maka dari itu sekali lagi belum dapat diprediksi mengenai biaya-biaya yang dibutuhkan.

Secara keseluruhan, perkembangan dalam performa yang dihasilkan oleh membran *hybrid* dan diharapkan lebih banyak studi yang menampilkan aplikasi proses membran *hybrid*. Namun, terdapat

perbedaan besar dalam informasi dari ekonomi dan lingkungan yang dapat menentukan *feasibility* dari membran *hybrid*. Potensi membran *hybrid* sangat besar jadi sudah seharusnya faktor-faktor tersebut dipelajari kembali agar alternatif ini dapat dilakukan.

## 6. Prospek membran terintegrasi

Variasi membran *hybrid* telah digunakan pada berbagai jenis variasi umpan air. Pada umumnya, keuntungan menggunakan membran *hybrid* adalah air yang diproduksi menjadi lebih baik yang tidak dapat dicapai hanya dengan membran tunggal saja. Kemudian, pembuangan air dan dampak terhadap lingkungan lebih baik dengan membran *hybrid* daripada membran tunggal saja. Secara singkat, desain dan tipe-tipe membran *hybrid* dalam industri air sangat fleksibel namun masih banyak kombinasi yang belum dapat ditelusuri keuntungannya maupun kebutuhannya.

Sistem membran *hybrid* telah menunjukkan hasil yang positif dibandingkan membran tunggal maupun sistem konvensional. Namun, setiap pabrik desalinasi berbasis RO membutuhkan gabungan sistem yang berbeda-beda. Hal ini disebabkan karena efisiensi dan kompleksitas masing-masing membran *hybrid* bergantung pada umpan air masuk dan spesifikasi air yang keluar. Contohnya, pada umpan air yang memiliki tingkat air yang sudah baik cukup menggunakan sistem koagulasi-NF sederhana sedangkan kualitas yang buruk membutuhkan *pretreatment* yang lebih banyak lagi. Masalah-masalah seperti *fouling* apabila dipelajari dan ditemukan solusinya, membran *hybrid* akan menjadi lebih presisi dan efektif. Hal inipun dapat biaya operasi pabrik, konsumsi energi maupun pembuangan limbah.

## Daftar Pustaka

- [1] Patterson D.A., Davey C.J., Rohani R. Membrane separations: From purifications, minimisation, reuse and recycling to process intensification. In: Letcher T., Scott J., Patterson D., editors. Chemical Processes for A Sustainable Future. Royal Society of Chemistry; Cambridge, UK: 2014. pp. 469-504.
- [2] Singh. Rajindar, Hybrid Membrane Systems for Water Purification: Technology, Systems Design and Operations, Elsevier (2006) 5 - 15.
- [3] Abels C., Carstensen F., Wessling M. Membrane processes in biorefinery applications. J. Membr. Sci. 2013;444:285-317. doi: 10.1016/j.memsci.2013.05.030.
- [4] Koros W.J. Evolving beyond the thermal age of separation processes: Membranes can lead the

- way. *AIChE J.* 2004;50:2326-2334. doi: 10.1002/aic.10330.
- [5] B. Sarkar, N. Venkateshwarlu, R. Nageswara Rao, C. Bhattacharjee, V. Kale, Potable water production from pesticide contaminated surface water—a membrane based approach, *Desalination* 204 (2007) 368-373.
- [6] S. Xia, X. Li, R. Liu, G. Li, Study of reservoir water treatment by ultrafiltration for drinking water production, *Desalination* 167 (2004) 23-26.
- [7] R.S. Harisha, K.M. Hosamani, R.S. Keri, S.K. Nataraj, T.M. Aminabhavi, Arsenic removal from drinking water using thin film composite nanofiltration membrane, *Desalination* 252 (2010) 75-80.
- [8] H. Saitúa, F. Giannini, A.P. Padilla, Drinking water obtaining by nanofiltration from waters contaminated with glyphosate formulations: process evaluation by means of toxicity tests and studies on operating parameters, *J. Hazard. Mater.* 227-228 (2012) 204-210.
- [9] J. Gibbs, P.E. Stackelberg, E.T. Furlong, M. Meyer, S.D. Zaugg, R.L. Lippincott, Persistence of pharmaceuticals and other organic compounds in chlorinated drinking water as a function of time, *Sci. Total Environ.* 373 (2007) 240-249.
- [10] J. Radjenović, M. Petrović, F. Ventura, D. Barceló, Rejection of pharmaceuticals in nanofiltration and reverse osmosis membrane drinking water treatment, *Water Res.* 42 (2008) 3601-3610.
- [11] K.V. Plakas, A.J. Karabelas, Removal of pesticides from water by NF and RO membranes – a review, *Desalination* 287 (2012) 255-265.
- [12] M.P. Ormad, N. Miguel, a Claver, J.M. Matesanz, J.L. Ovelheiro, Pesticides removal in the process of drinking water production, *Chemosphere* 71 (2008) 97-106.
- [13] H. Jiang, C. Adams, Treatability of chloro-s-triazines by conventional drinking water treatment technologies, *Water Res.* 40 (2006) 1657-1667.
- [14] B. Cyna, G. Chagneau, G. Bablon, N. Tanghe, Two years of nanofiltration at the Mery-sur-Oise plant, France, *Desalination* 147 (2002) 69-75.
- [15] H. Yeh, I. Tseng, S. Kao, W. Lai, J. Chen, G.T. Wang, et al., Comparison of the finished water quality among an integrated membrane process, conventional and other advanced treatment processes, *Desalination* 131 (2000) 237-244.
- [16] Himma, N. F., Wardani, A. K., & Wenten, I. G. (2017). Preparation of Superhydrophobic Polypropylene Membrane Using Dip-Coating Method: The Effects of Solution and Process Parameters. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 56(2), 184-194.
- [17] Wardani, A. K., Hakim, A. N., Khoiruddin & Wenten, I. G. (2017). Combined ultrafiltration-electrodeionization technique for production of high purity water. *Water Science and Technology*, 75(12): 2891-2899.
- [18] Khoiruddin, Ariono, D., Subagjo, & Wenten, I.G. 2017. Surface modification of ion-exchange membranes: Methods, characteristics, and performance. *Journal of Applied Polymer Science*. DOI:10.1002/app.45540.
- [19] J. Schaep, B. Van der Bruggen, S. Uytterhoeven, R. Croux, C. Vandecasteele, D. Wilms, et al., Removal of hardness from groundwater by nanofiltration, *Desalination* 119 (1998) 295-301.
- [20] B. Van der Bruggen, C. Vandecasteele, Removal of pollutants from surface water and groundwater by nanofiltration: overview of possible applications in the drinking water industry, *Environ. Pollut.* 122 (2003) 435-445.
- [21] N. Prihasto, Q.-F. Liu, S.-H. Kim, Pre-treatment strategies for seawater desalination by reverse osmosis system, *Desalination* 249 (2009) 308-316.
- [22] J.K. Edzwald, J. Haarhoff, Seawater pretreatment for reverse osmosis: chemistry, contaminants, and coagulation, *Water Res.* 45 (2011) 5428-5440.
- [23] M.C. Amiri, M. Samiei, Enhancing permeate flux in a RO plant by controlling membrane fouling, *Desalination* 207 (2007) 361-369.
- [24] R. Valavala, J.-S. Sohn, J.-H. Han, N.-G. Her, Y.-M. Yoon, Pretreatment in reverse osmosis seawater desalination: a short review, *Environ. Eng. Res.* 16 (2011) 205-212.
- [25] S. Ebrahim, M. Safar, S. Bou-Hamad, M. Abdel-Jawad, Fifteen years of R & D program in seawater desalination at KISR. Part I. Pretreatment technologies for RO systems, *Desalination* 135 (2001) 141-153.
- [26] A.H.H. Al-Sheikh, Seawater reverse osmosis pretreatment with an emphasis on the Jeddah plant operation experience, *Desalination* 110 (1997) 183-192.
- [27] R. Schneider, L. Ferreira, P. Binder, E. Bejarano, K. Goes, E. Slongo, et al., Dynamics of organic carbon and of bacterial populations in a conventional pretreatment train of a reverse osmosis unit experiencing severe biofouling, *J. Membr. Sci.* 266 (2005) 18-29.
- [28] A. Antony, J.H. Low, S. Gray, A.E. Childress, P. Le-Clech, G. Leslie, Scale formation and control in high pressure membrane water treatment systems: a review, *J. Membr. Sci.* 383 (2011) 1-16.
- [29] A.I. Schafer, A. Fane, T.D. Waite, Nanofiltration of natural organic matter: removal, fouling and the influence of multivalent ions, *Desalination* 118 (1998) 109-122.
- [30] N. Lee, G. Amy, J.-P. Croué, Low-pressure membrane (MF/UF) fouling associated with allochthonous versus autochthonous natural organic matter, *Water Res.* 40 (2006) 2357-2368.
- [31] C.-W. Jung, H.-J. Son, L.-S. Kang, Effects of membrane material and pretreatment coagulation on membrane fouling: fouling mechanism and NOM removal, *Desalination* 197 (2006) 154-164.
- [32] K. Konieczny, D. Szałkol, J. Płonka, M. Rajca, M. Bodzek, Coagulation-ultrafiltration system for river water treatment, *Desalination* 240 (2009) 151-159.

- [33] Y. Chen, B.Z. Dong, N.Y. Gao, J.C. Fan, Effect of coagulation pretreatment on fouling of an ultrafiltration membrane, *Desalination* 204 (2007) 181-188.
- [34] J. Kim, S.H.R. Davies, M.J. Baumann, V.V. Tarabara, S.J. Masten, Effect of ozone dosage and hydrodynamic conditions on the permeate flux in a hybrid ozonation-ceramic ultrafiltration system treating natural waters, *J. Membr. Sci.* 311 (2008) 165-172.
- [35] M. Kabsch-Korbutowicz, K. Majewska-Nowak, T. Winnicki, Water treatment using MIEUX®/DOC/ultrafiltration process, *Desalination* 221 (2008) 338-344.
- [36] R. Ronuy, Mahmud, Pengolahan Air Sungai Martapura Melalui Proses Hibrid Pretreatment Koagulasi dan Filtrasi dengan Membran Mikrofiltrasi: Laporan Penelitian, 2006.
- [37] R. Treguer, R. Tatin, A. Couvert, D. Wolbert, A. Tazi-Pain, Ozonation effect on natural Organic matter adsorption and biodegradation – application to a membrane bioreactor containing activated carbon for drinking water production, *Water Res.* 44 (2010) 781-788.
- [38] L. Fiksdal, T. Leiknes, The effect of coagulation with MF/UF membrane filtration for the removal of virus in drinking water, *J. Membr. Sci.* 279 (2006) 364-371.
- [39] Y. Matsui, H. Hasegawa, K. Ohno, T. Matsushita, S. Mima, Y. Kawase, et al., Effects of super-powdered activated carbon pretreatment on coagulation and transmembrane pressure buildup during microfiltration, *Water Res.* 43 (2009) 5160-5170.
- [40] R. Bergamasco, C. Bouchard, F.V. da Silva, M.H.M. Reis, M.R. Fagundes-Klen, An application of chitosan as a coagulant/flocculant in a microfiltration process of natural water, *Desalination* 245 (2009) 205-213.
- [41] R. Fabris, E.K. Lee, C.W.K. Chow, V. Chen, M. Drikas, Pre-treatments to reduce fouling of low pressure micro-filtration (MF) membranes, *J. Membr. Sci.* 289 (2007) 231-240.
- [42] E.K. Lee, V. Chen, a.G. Fane, Natural organic matter (NOM) fouling in low pressure membrane filtration – effect of membranes and operation modes, *Desalination* 218 (2008) 257-270.
- [43] T. Leiknes, H. Ødegaard, H. Myklebust, Removal of natural organic matter (NOM) in drinking water treatment by coagulation-microfiltration using metal membranes, *J. Membr. Sci.* 242 (2004) 47-55.
- [44] S.-R. Chae, H. Yamamura, B. Choi, Y. Watanabe, Fouling characteristics of pressurized and submerged PVDF (polyvinylidene fluoride) microfiltration membranes in a pilot-scale drinking water treatment system under low and high turbidity conditions, *Desalination* 244 (2009) 215-226.
- [45] A. Gorenflo, F.H. Frimmel, D. Velazquez-Padron, Nanofiltration of a German groundwater of high hardness and NOM content: performance and costs, *Desalination* 1 (2002) 253-265.
- [46] Himma, N. F., Wardani, A. K., & Wenten, I. G. (2017). The effects of non-solvent on surface morphology and hydrophobicity of dip-coated polypropylene membrane. *Materials Research Express*, 4(5), 054001.
- [47] Wenten, I. G., Dharmawijaya, P. T., Aryanti, P. T. P., Mukti, R. R., & Khoiruddin (2017). LTA zeolite membranes: current progress and challenges in pervaporation. *RSC Advances*, 7(47), 29520-29539.
- [48] Wenten, I. G., Khoiruddin, K., Hakim, A. N., & Himma, N. F. (2017). The Bubble Gas Transport Method. *Membrane Characterization*, 199.
- [49] Sianipar, M., Kim, S. H., Iskandar, F., & Wenten, I. G. (2017). Functionalized carbon nanotube (CNT) membrane: progress and challenges. *RSC Advances*, 7(81), 51175-51198.
- [50] S. Ebrahim, N. Burney, Microfiltration system as a pretreatment for RO units: technical and economic assessment, *Desalination* 109 (1997) 165-175.
- [51] K. Chinu, a.H. Johir, S. Vigneswaran, H.K. Shon, J. Kandasamy, Assessment of pretreatment to microfiltration for desalination in terms of fouling index and molecular weight distribution, *Desalination* 250 (2010) 644-647.
- [52] B.S. Oh, H.Y. Jang, J. Cho, S. Lee, E. Lee, I.S. Kim, et al., Effect of ozone on microfiltration as a pretreatment of seawater reverse osmosis, *Desalination* 238 (2009) 90-97.
- [53] J. Lee, B.S. Oh, S. Kim, S.-J. Kim, S.K. Hong, I.S. Kim, Fate of *Bacillus* sp. and *Pseudomonas* sp. isolated from seawater during chlorination and microfiltration as pretreatments of a desalination plant, *J. Membr. Sci.* 349 (2010) 208-216.
- [54] N. Voutchkov, Considerations for selection of seawater filtration pretreatment system, *Desalination* 261 (2010) 354-364.
- [55] G.K. Pearce, The case for UF/MF pretreatment to RO in seawater applications, *Desalination* 203 (2007) 286-295.
- [56] H.-J. Yang, H.-S. Kim, Effect of coagulation on MF/UF for removal of particles as a pretreatment in seawater desalination, *Desalination* 247 (2009) 45-52.
- [57] T.C. Timmes, H.-C. Kim, B.a. Dempsey, Electrocoagulation pretreatment of seawater prior to ultrafiltration: bench-scale applications for military water purification systems, *Desalination* 249 (2009) 895-901.
- [58] T.C. Timmes, H.-C. Kim, B.a. Dempsey, Electrocoagulation pretreatment of seawater prior to ultrafiltration: pilot-scale applications for military water purification systems, *Desalination* 250 (2010) 6-13.
- [59] D. Abdessemed, G. Nezzal, Coupling softening – ultrafiltration like pretreatment of sea water case study of the Corso plant desalination (Algiers), *Desalination* 221 (2008) 107-113.

- [60] Aryanti, P. T. P., Sianipar, M., Zunita, M., & Wenten, I. G. (2017). Modified membrane with antibacterial properties. *Membrane Water Treatment*, 8(5), 463-481.
- [61] Aryanti, P. T. P., Joscarita, S. R., Wardani, A. K., Subagjo, S., Ariono, D., & Wenten, I. G. (2016). The Influence of PEG400 and Acetone on Polysulfone Membrane Morphology and Fouling Behaviour. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 48(2), 135-149.
- [62] Ariono, D., Purwasasmita, M., & Wenten, I. G. (2016). Brine Effluents: Characteristics, Environmental Impacts, and Their Handling. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 48(4), 367-387.
- [63] H.-H. Cheng, S.-S. Chen, S.-R. Yang, In-line coagulation/ultrafiltration for silica removal from brackish water as RO membrane pretreatment, *Sep. Purif. Technol.* 70 (2009) 112-117.
- [64] H. Kim, J. Choi, S. Takizawa, Comparison of initial filtration resistance by pretreatment processes in the nanofiltration for drinking water treatment, *Sep. Purif. Technol.* 56 (2007) 354-362.
- [65] B. Van Der Bruggen, C. Vandecasteele, Distillation vs. membrane filtration: overview of process evolutions in seawater desalination, *Desalination* 143 (2002).
- [66] Y.H. Choi, J.H. Kweon, D.I. Kim, S. Lee, Evaluation of various pretreatment for particle and inorganic fouling control on performance of SWRO, *Desalination* 247 (2009) 137-147.
- [67] Y. Song, B. Su, X. Gao, C. Gao, The performance of polyamide nanofiltration membrane for long-term operation in an integrated membrane seawater pretreatment system, *Desalination* 296 (2012) 30-36.
- [68] A. A. Abuhabib, Mostafa Ghasemi, A. W. Mohammad, Rakhmi Abd Rahman, A. H. El-Shafie, Desalination of Brackish Water Using Nanofiltration: Performance Comparison of Different Membranes, 2013.
- [69] S. Sarkar, A.K. SenGupta, A new hybrid ion exchange-nanofiltration (HIX-NF) separation process for energy-efficient desalination: process concept and laboratory evaluation, *J. Membr. Sci.* 324 (2008) 76-84.
- [70] C.J. Harrison, Y.A. Le Gouvellec, R.C. Cheng, A.E. Childress, Bench-scale testing of nanofiltration for seawater desalination, *J. Environ. Eng.* (2007) 1004-1014.
- [71] <http://www.aesarabia.com/nanofiltration-plants/>
- [72] T. Mezher, H. Fath, Z. Abbas, A. Khaled, Techno-economic assessment and environmental impacts of desalination technologies, *Desalination* 266 (2011) 263-273.
- [73] N. Ghaffour, T.M. Missimer, G.L. Amy, Technical review and evaluation of the economics of water desalination: current and future challenges for better water supply sustainability, *Desalination* 309 (2013) 197-207.
- [74] J. Keeley, P. Jarvis, S.J. Judd, An economic assessment of coagulant recovery from water treatment residuals, *Desalination* 287 (2012) 132-137.
- [75] J.J. Sadhwani, J.M. Veza, C. Santana, Case studies on environmental impact of seawater desalination, *Desalination* 185 (2005) 1-8.
- [76] S. Lattemann, T. Höpner, Environmental impact and impact assessment of seawater desalination, *Desalination* 220 (2008) 1-15.
- [77] A. Wei Lun, M. Abdul Wahab, H. Nidal, L. Choe Peng, A review on the applicability of integrated/hybrid membrane processes in water treatment and desalination plants.
- [78] Aquastat, Water Uses, Food Agric. Organ. United Nations, 2013.
- [79] UN-Water, International Decade for Action "Water for Life" 2005-2015, United Nations Dep. Econ. Soc. Aff., 2013
- [80] Annette Prüss-Üstün, Robert Bos, Fiona Gore, Jamie Bartram, Safer Water, Better Health: Costs, Benefits and Sustainability of Interventions to Protect and Promote Health, 2008.
- [81] UN-Water, World Water Day 2007, 2007.
- [82] <http://pelatihanguru.net/teknologi-membran>
- [83] <http://www.mdpi.com/20734441/4/3/629/htm>
- [84] <http://pengolahanair-bersih.blogspot.co.id/2014/09/masalah-air-bersih-di-indonesia.html>
- [85] <https://iqshalahuddin.wordpress.com/2016/07/13/membrane-polarisation-and-fouling/>
- [86] WHO, Guidelines for drinking-water quality, WHO Chron. 38 (2008).
- [87] <http://www.wateronline.com/doc/zeeweed-uf-membranes-offer-lower-lifecycle-co-0001>
- [88] <http://www.kelair.bppt.go.id/Sitpa/Artikel/Ro/ro.html> <http://www.slideshare.net/momalki/a-relationship-between-calcium-phosphate-and-silica-fouling-in-wastewater-ro-systems>