

# Kinerja Membran Reverse Osmosis dalam Pengolahan Air Baku Mengandung Ion Natrium dan Kalsium

Subriyer Nasir

Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya  
subriyer@unsri.ac.id

## **Abstrak**

*Penelitian ini bertujuan melihat efektifitas membran RO dalam mereduksi ion-ion natrium dan kalsium dalam air baku. Penelitian dilakukan menggunakan sistem RO dengan kapasitas 2000 L/det. yang dilengkapi dengan modul membran jenis Spiral-wound. Air baku dipersiapkan dengan melarutkan NaCl dan CaCO<sub>3</sub> dalam jumlah tertentu. Tekanan operasi pompa divariasikan mulai 1250 kPa sampai 4750 kPa. Hasil yang diperoleh memperlihatkan bahwa membran jenis spiral wound cukup efektif dalam mengurangi kadar ion natrium dan kalsium dalam air umpan dalam batas tertentu.*

**Kata kunci:** reverse osmosis, natrium klorida, kalsium karbonat, spiral wound

## **1. Pendahuluan**

Ion-ion natrium dan kalsium dalam air umpan (feedwater) seperti air laut dan air payau (brackish water) telah lama diperkirakan sebagai ion dominan yang dapat menyebabkan fouling dan scaling selama operasi membran utamanya untuk sistem Reverse Osmosis (RO). Umumnya air laut dan air payau mengandung konsentrasi ion natrium dan kalsium yang lebih besar dibandingkan dengan air tanah atau air limbah. Konsentrasi ion natrium dalam air laut berkisar antara 8000 sampai 11000 mg/L dan ion kalsium berkisar antara 320 sampai 565 mg/L (Nasir, S., 2007). Namun demikian, dijumpai bahwa konsentrasi kalsium dalam air limbah pertanian yang cukup tinggi pernah dilaporkan oleh Lee (Lee, et al. 2003). Meningkatnya konsentrasi natrium dan kalsium dalam air umpan akan meningkatkan kemungkinan terjadinya fouling dan scaling. Penelitian ini mempelajari pengaruh dua kation yaitu natrium dan kalsium terhadap kinerja dari membran jenis spiral wound untuk air baku yang mengandung ion-ion tersebut dalam konsentrasi rendah (dibawah 5000 mg/L) pada sistem RO.

## **2. Tinjauan Pustaka**

Teknologi desalinasi untuk memenuhi kebutuhan akan air minum dan industri telah berkembang pesat akhir-akhir ini. Ada dua kategori proses desalinasi yaitu secara termal dan dengan menggunakan membran. Dua jenis membran yang banyak digunakan dalam sistem RO adalah jenis spiral wound dan hollow fibre. Pada proses desalinasi berbasis RO, pengembangan teknologi membran diarahkan pada bagaimana meningkatkan kinerja membran, menurunkan konsumsi energi dan pada akhirnya menurunkan unit cost produksi air. Secara umum ada tiga variabel yang berpengaruh pada kinerja sistem RO yaitu proses pretreatment untuk air umpan, kinerja membran, dan kondisi operasi. Faktor

lain yang juga perlu diperhatikan laju fouling dan kemampuan cleaning/pembersihannya, (Sadhvani 2001; Siavash Madaeni, et al. 2001). Penggunaan membran pada sistem RO merupakan inovasi teknologi dalam hal pengadaan air minum dan keperluan industri dan akhir-akhir ini teknologi RO juga dimanfaatkan dalam hal pengolahan limbah cair (Mohsen and Jaber 2003).

### 2.1. Kinerja Membran

Kinerja suatu membran dapat dinyatakan dengan term rejeksi, fluks permeat dan persentase recovery air (water recovery percentage). Efektivitas membran dalam mereduksi ion tunggal dalam air umpam dapat dihitung menggunakan persamaan.

$$R = 1 - \frac{C_p}{C_f} \quad (1)$$

R = Rejeksi,  $C_p$  = Konsentrasi permeat,  $C_f$  = Konsentrasi feed

Persentase recovery air (WRP) dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\%WRP = \frac{PF}{(PF + RF)} \times 100 \quad (2)$$

PF = laju alir permeat , RF = laju alir konsentrat

### 2.2. Polarisasi Konsentrasi

Polarisasi konsentrasi merupakan akumulasi partikel berupa lapis tipis yang terbentuk pada permukaan membran. Hal ini biasa dijumpai dalam operasi membran dan dapat menyebabkan penurunan fluks, meningkatkan resistensi terhadap aliran solven, meningkatkan konsentrasi solut karena terjadinya gradient konsentrasi di dinding membran. Polarisasi konsentrasi merupakan fenomena ketidak setimbangan transport antara komponen terlarut di fasa bulk dan di permukaan membran. Polarisasi konsdentrasi dapat dikontrol dengan cara penyesuaian kecepatan, pulsasi atau penggunaan medan listrik (Parekh 1988; Sablani, et al. 2001; Goosen, et al. 2002). Secara matematis polarisasi konsentrasi (CP) dapat dinyatakan dengan persamaan berikut ini.

$$CP = \frac{(C_m - C_p)}{(C_b - C_p)} = \exp(J_w / k) \quad (3)$$

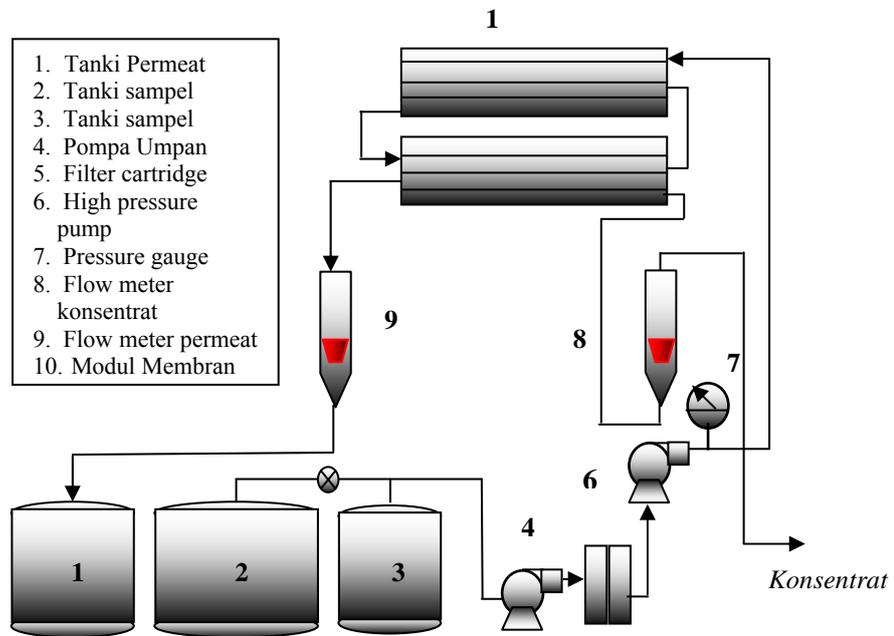
$C_m$  = konsentrasi solut pada dinding membran  $C_p$  = konsentrasi permeat,

$C_b$  = konsentrasi di fasa bulk,  $J_w$  = fluks permeat  $k$  = koefisien mass transfer

### 3. Metodologi Penelitian

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah sistem RO dengan kapasitas 2000 L/hari yang berada di Laboratorium Water and Wastewater Desalination, Curtin University of Technology Perth Australia. Sistem RO yang digunakan dilengkapi dengan modul membran jenis spiral wound. Larutan simulasi yaitu air yang disiapkan dengan cara melarutkan konsentrasi tertentu dari NaCl, CaCO<sub>3</sub> dan kombinasi dari NaCl/CaCO<sub>3</sub>. Larutan CaCO<sub>3</sub> dipersiapkan dengan cara mereaksikan

NaHCO<sub>3</sub> dan CaCl<sub>2</sub> dengan konsentrasi tertentu. Masing-masing sampel ditempatkan pada tanki dengan kapasitas 1000 L. Tekanan operasi yang digunakan adalah berkisar antara 1250 sampai 4750 kPa dengan waktu operasi selama 1 jam. Skema peralatan yang digunakan dalam penelitian ini ditampilkan pada Gambar 1.



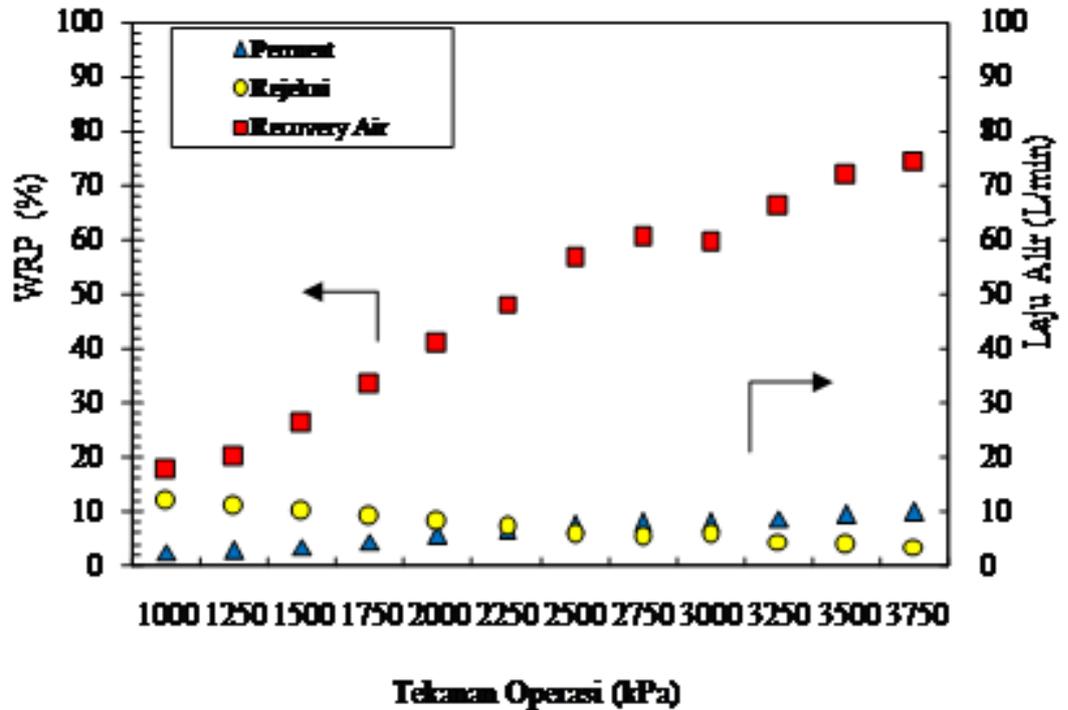
Gambar 1. Skema rangkaian peralatan

Sampel dari tanki (3) dialirkan dengan menggunakan pompa (4) melalui sistem filter cartridge (5) untuk menyaring impurities yang mungkin terkandung dalam umpan. Selanjutnya larutan ditekan dengan menggunakan high-pressure pump (6) menuju modul membran (10). Konsentrat diukur debitnya menggunakan flow meter (8). Permeat yang diperoleh ditampung pada tangki berkapasitas 1000 L setelah diukur debitnya menggunakan flowmeter (9). Semua sampel dan produk (permeat) dianalisa komposisinya dengan menggunakan Atomic Absorption Spectrophotometer Varian SpectrAAS type 110. AAS digunakan untuk menentukan konsentrasi ion natrium dan kalsium pada panjang gelombang 489 dan 422,7 nm. Pengambilan sampel dilakukan secara periodik setiap 15 menit dan analisa dilakukan menurut metoda APHA (APHA-AWWA-WEF 1992). TDS dan pH diukur menggunakan Hanna pH-EC-TDS meter. Konduktivitas listrik diukur menggunakan Yokogawa SC 82 conductivitymeter. Semua percobaan dilakukan pada suhu  $20 \pm 0.5$  °C dengan waktu operasi selama satu jam.

#### 4. Hasil dan Pembahasan

Untuk melihat kinerja membran secara umum telah dilakukan eksperimen awal menggunakan air PAM (tap water) yang diumpankan ke sistem RO pada berbagai tekanan operasi. Gambar 2

menampilkan linearitas dari persentase recovery air (water recovery percentage atau WRP), laju permeat dan konsentrat yang diperoleh.



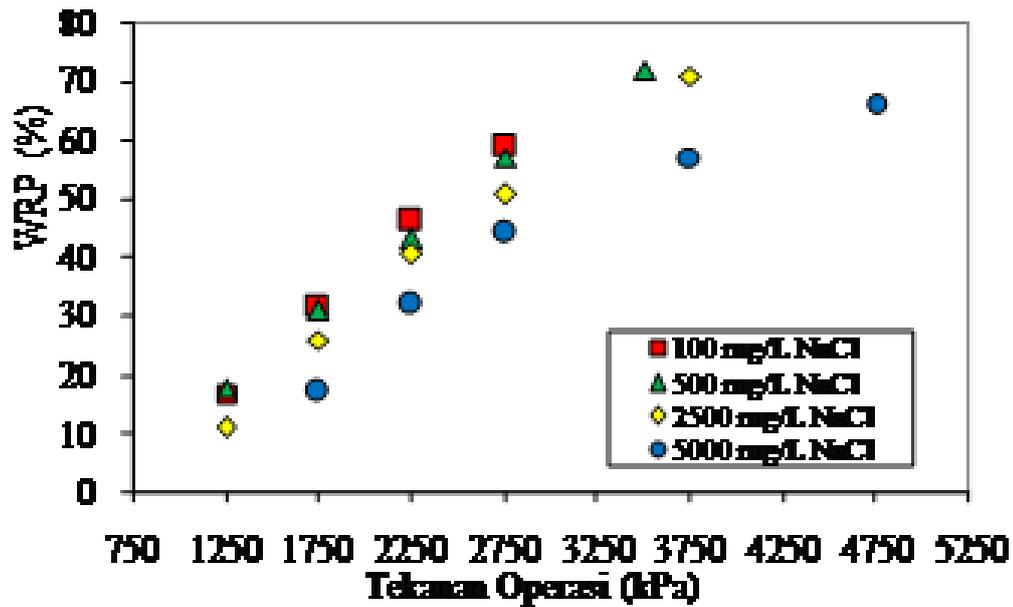
Gambar 2. WRP pada berbagai tekanan operasi (tap water)

Laju alir konsentrat memperlihatkan penurunan dengan kenaikan tekanan operasi. Pada tekanan operasi 2250 Kpa atau WRP sebesar 10%, laju alir permeat dan konsentrat akan bernilai sama. Analisis terhadap permeat dan konsentrat memperlihatkan harga TDS yang rendah. Hal ini menunjukkan bahwa keadaan kesetimbangan tercapai bila tekanan osmosa larutan sebanding atau sama dengan tekanan operasi. Kenaikan tekanan osmosa larutan akan menghambat difusi ion sehingga konsentrasi ion dalam permeat akan menurun dan sebaliknya meningkat pada fasa bulk dan dalam aliran konsentrat.

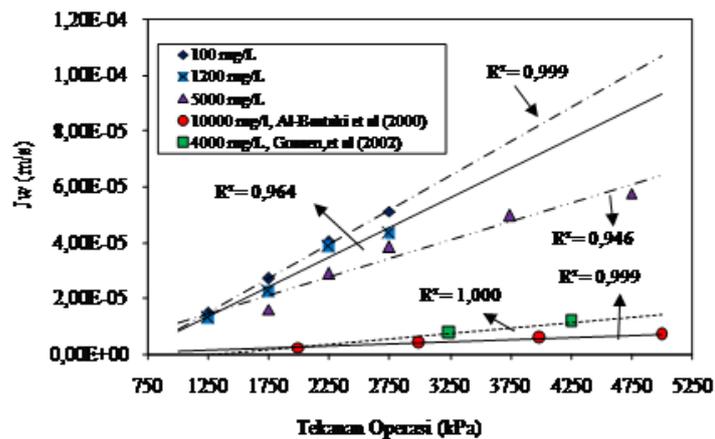
#### 4.1 Kinerja Membran untuk desalinasi larutan NaCl

Gambar 3 memperlihatkan harga WRP sebagai fungsi dari tekanan operasi pada berbagai konsentrasi NaCl. Terlihat bahwa WRP akan linear dengan peningkatan tekanan operasi dan konsentrasi NaCl. Namun demikian WRP akan sedikit menurun bila tekanan operasi melampaui tekanan 2750 kPa dan konsentrasi NaCl lebih besar dari 2500 mg/L. Peningkatan konsentrasi NaCl akan meningkatkan tekanan osmosa dari NaCl dan tekanan osmosa larutan. Hal ini diindikasikan dengan tidak adanya permeat pada tekanan operasi dibawah 1750 kPa dan konsentrasi NaCl dalam air baku sebesar 5000 mg/L. Hasil yang mirip juga diperoleh oleh Avlonitis et al (Avlonitis, et al. 1993). Pada konsentrasi NaCl sebesar 63,000 mg/L dan tekanan operasi 5000 kPa tidak ada permeat yang

diperoleh. Ini memperkuat dugaan bahwa tekanan osmosa larutan adalah sebanding dengan net driving-pressure (Stewart, et al. 1991; Song, et al. 2003) dan untuk mengatasi tekanan osmosa larutan pada konsentrasi yang tinggi dibutuhkan pula tekanan operasi yang tinggi. Inkonsistensi WRP dan laju permeal pada tekanan operasi yang tinggi disebabkan karena polarisasi konsentrasi, penyumbatan pori membran (membrane pore blockage), dan kekompakan membran (membrane compaction). Penyumbatan pori membran akan menghambat laju difusi solut ke dalam permukaan membran terutama untuk waktu operasi yang lama (long term of operation).



Gambar 3 .WRP pada berbagai tekanan operasi untuk berbagai konsentrasi NaCl



Gambar 4 Pengaruh tekanan operasi terhadap fluks permeal

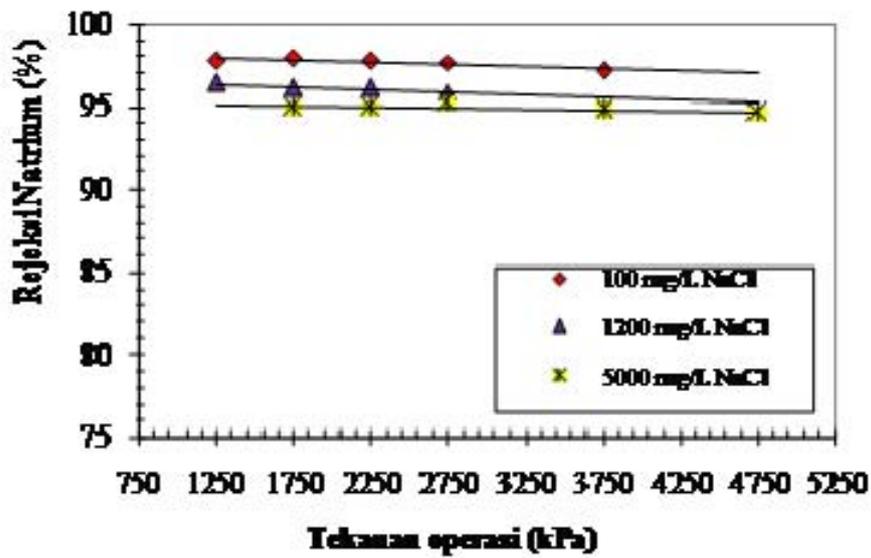
Menurut teori solution-diffusion, difusi solut atau garam ke dalam pori membran dipengaruhi oleh koefisien mass transfer ( $k$ ) dan ketebalan boundary layer ( $\delta$ ). Penyumbatan pori akan meningkatkan ketebalan boundary layer dan menurunkan koefisien mass transfer. Akibatnya terjadi penurunan fluks

yang akan menyebabkan penumpukan (build-up) solut pada dinding membran, khususnya bila konsentrasi NaCl dalam air baku cukup tinggi dan bila RO beroperasi dalam jangka waktu yang lama. Faktor lain yang dapat menyebabkan penurunan laju permeat adalah kekompakan membran (membrane compaction). Akan tetapi, membran yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis polyamide composite yang tahan terhadap compaction sehingga membran compaction tidak akan terjadi jika tekanan operasi tidak melampaui 1000 psig (sekitar 7000 kPa) (Sudak 1990).

Pada Gambar 3 dan 4 dapat dilihat bahwa harga WRP dan fluks permeat ( $J_w$ ) akan menurun dengan meningkatnya konsentrasi NaCl dalam larutan. WRP dan  $J_w$  menunjukkan trend non-linear bila konsentrasi NaCl dalam air baku melampaui 5000 mg/L. Regresi linier terhadap data fluks permeat untuk 100 mg/L, 1200 mg/L dan 5000 mg/L memperlihatkan kesesuaian dengan harga  $R^2$  berturut-turut 0.999, 0.964 dan 0.9469. Ini merupakan indikasi bahwa penurunan fluks secara signifikan sangat dipengaruhi oleh konsentrasi ion natrium yang ada dalam air baku (umpan) dan menunjukkan terjadinya build-up (penumpukan) solut pada dinding membran sehingga efek polarisasi konsentrasi terhadap linearitas  $J_w$  hanya konsisten untuk air umpan yang memiliki NaCl yang rendah. Efek dari koefisien difusi terhadap fluks permeat telah diteliti oleh Zhou et al (Zhou, et al. 2006). Pada simulasi yang mereka lakukan menggunakan larutan NaCl dengan konsentrasi 5000 dan 20,000 mg/L menunjukkan bahwa kenaikan harga koefisien difusi NaCl akan menurunkan fluks permeat rata-rata. Adanya perbedaan hasil fluks permeat yang diperoleh peneliti lain seperti Al-Bastaki et al (Al-Bastaki and Abbas 2000) dan Goosen et al (Goosen, et al. 2002) lebih disebabkan karena perbedaan karakteristik membran seperti luas permukaan membran dan kemampuan rejeksinya.

### **Rejeksi Natrium**

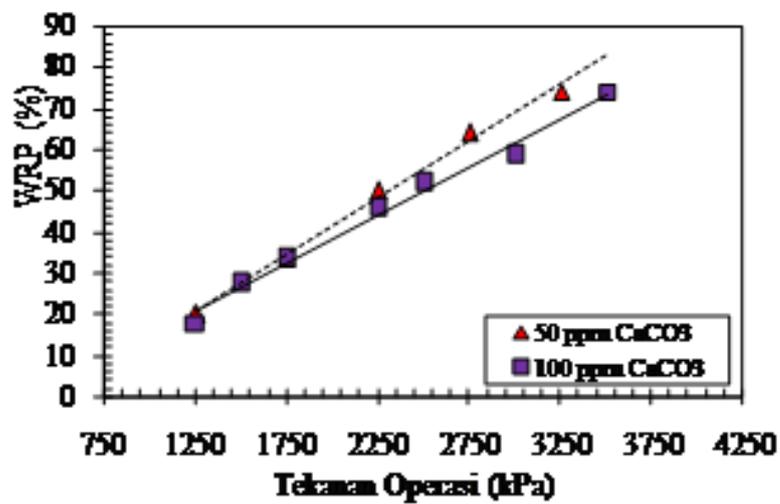
Persentase rejeksi natrium sebagai fungsi tekanan operasi ditampilkan pada Gambar 5. Persentase rejeksi ion natrium tertinggi sekitar 98.8 % didapatkan pada konsentrasi NaCl sebesar 5000 mg/L dan tekanan operasi 4750 kPa sedangkan terendah sekitar 94% pada konsentrasi NaCl 100 mg/L dan tekanan operasi 1250 kPa. Hasil ini mirip dengan hasil yang diperoleh Al-Bastaki dan Abbas (2000) bahwa persentase rejeksi garam di bawah 95% jika faktor polarisasi konsentrasi ikut diperhitungkan. Peneliti lain yaitu Sattar Kahdim dalam eksperimen mereka menggunakan air payau (brackish water) melaporkan persentase rejeksi antara 98,8 sampai 99,3% (Sattar Kahdim, et al. 2003). Namun demikian persentase rejeksi NaCl dibawah 98% didapat pada konsentrasi NaCl yang rendah dari 1200 mg/L khususnya pada tekanan operasi yang relatif rendah (kurang dari 2750 kPa). Artinya diperlukan driving force yang tinggi untuk memperoleh permeat dengan kualitas tinggi untuk air baku yang mengandung NaCl dengan konsentrasi tinggi. Peningkatan konsentrasi NaCl akan meningkatkan kekuatan ion (ionic strength), tekanan osmosa larutan, dan menurunkan efektifitas membran karena NaCl akan tertahan pada fasa bulk dan di dinding membran.



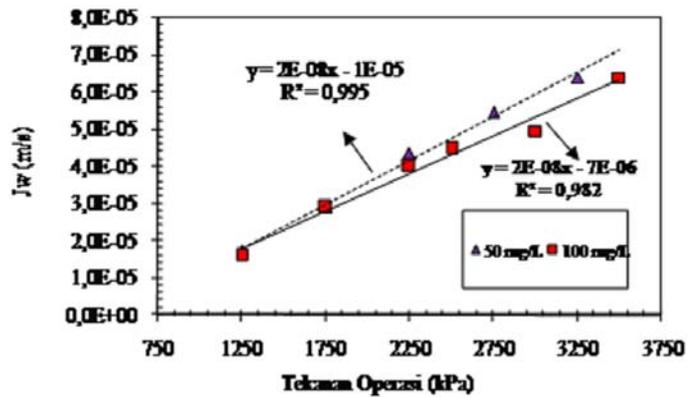
Gambar 5 Persentase Rejeksi Natrium pada berbagai tekanan operasi

#### 4.2 Kinerja Membran untuk desalinasi Larutan $\text{CaCO}_3$

Gambar 6 dan 7 memperlihatkan WRP dan  $J_w$  pada berbagai tekanan operasi berdasarkan analisis terhadap permeat dan konsentrat.



Gambar 6 WRP pada berbagai tekanan operasi untuk larutan  $\text{CaCO}_3$

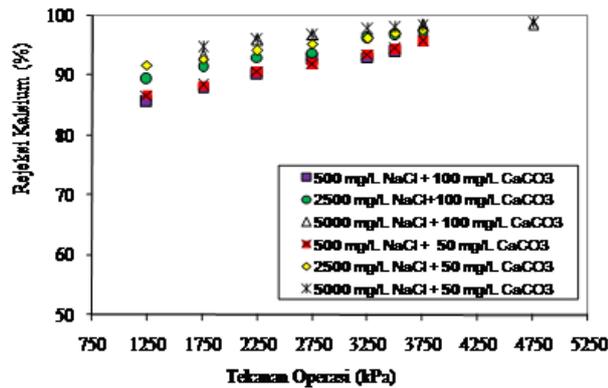


Gambar 7 Permeat fluks pada tekanan operasi untuk larutan CaCO<sub>3</sub>

Membran menunjukkan kinerja yang bagus dalam menolak ion divalen seperti kalsium dengan persentase rejeksi antara 83 dan 97.5% pada rentang tekanan operasi dari 1250 sampai 3250 kPa. Namun demikian persentase rejeksi kalsium cenderung menurun bila konsentrasi kalsium dalam air baku meningkat. Penurunan rejeksi ini disebabkan karena terjadinya build-up (penumpukan) solut karena polarisasi konsentrasi dan pembentukan deposit pada dinding membran.

### Rejeksi Kalsium

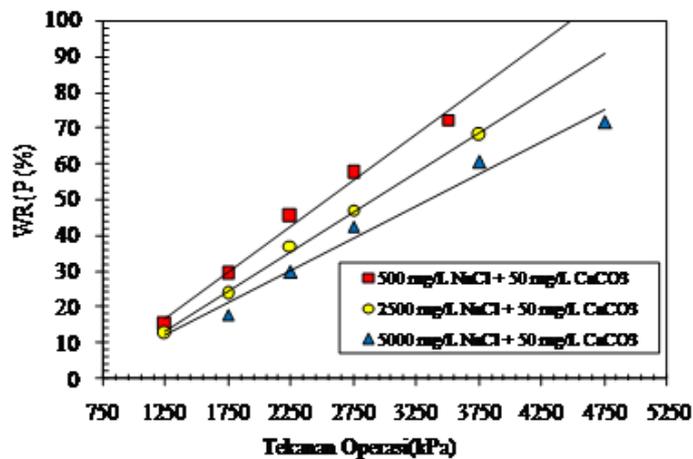
CaCO<sub>3</sub> mempunyai beberapa bentuk kristal polymorphic yaitu kalsit, aragonite, dan vaterit (Dalas and Koutsoukos 1990; Pahiadaki et al 2005). Kalsit mempunyai struktur kristal rhombohedron dengan kelarutan yang rendah dalam air dan lebih stabil dibandingkan dengan aragonit. Kalsit akan bereaksi dengan asam karbonat yang merupakan hasil reaksi dari air dan CO<sub>2</sub> membentuk kalsium bikarbonat. Kalsium bikarbonat akan mengendap di cartridge filter pada awal proses filtrasi dan akan terkonversi menjadi CaCO<sub>3</sub> di permukaan membran karena bereaksi dengan CO<sub>2</sub>. Aragonit merupakan bentuk metastable orthorhombic dari CaCO<sub>3</sub> yang akan berubah menjadi kalsit di dalam air atau pada lingkungan bersuhu tinggi. Fenomena ini juga dipertimbangkan akan meningkatkan konsentrasi ion kalsium baik pada dinding membran maupun pada larutan bulk. Jenis senyawa CaCO<sub>3</sub> lainnya yaitu vaterit tidak akan dijumpai pada dinding membran karena akan berubah menjadi kalsit akibat bereaksi dengan air. Hal ini dibuktikan oleh peneliti lain yaitu Pahiadaki et al (2005) yang mendapatkan bahwa hanya kalsit dan aragonit yang akan mengendap pada permukaan membran RO (Pahiadaki et al 2005).



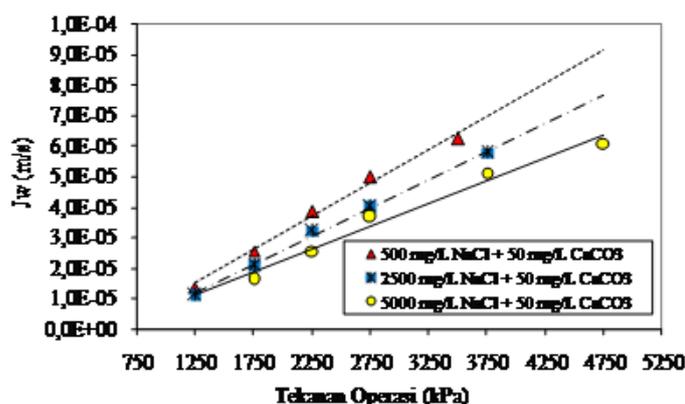
Gambar 8 Persentase rejeksi kalsium pada berbagai tekanan operasi

### 4.3 Kinerja Membran untuk desalinasi larutan campuran NaCl dan CaCO<sub>3</sub>

Gambar 9 dan Gambar 10 memperlihatkan pengaruh tekanan operasi terhadap WRP dan fluks permeat untuk berbagai konsentrasi NaCl dan CaCO<sub>3</sub> dalam air umpan. Kecenderungan yang mirip terhadap linearitas WRP dengan hasil yang diperoleh sebelumnya. Pada tekanan operasi 4750 kPa, WRP menurun dari 71 sampai 65% untuk CaCO<sub>3</sub> dengan konsentrasi 50 mg/L dan 100 mg/L. Pada kondisi yang sama fluks permeat menurun dari  $6.0 \times 10^{-5}$  menjadi  $5.5 \times 10^{-5}$  m/s. Deposit CaCO<sub>3</sub> pada permukaan membran diikuti dengan pelarutan CaCO<sub>3</sub> pada fasa bulk akan meningkatkan konsentrasi kalsium pada bulk solution pada tekanan operasi rendah. Efek turbulensi aliran pada sistem RO akan meminimalkan efek penumpukan solute pada permukaan membran.

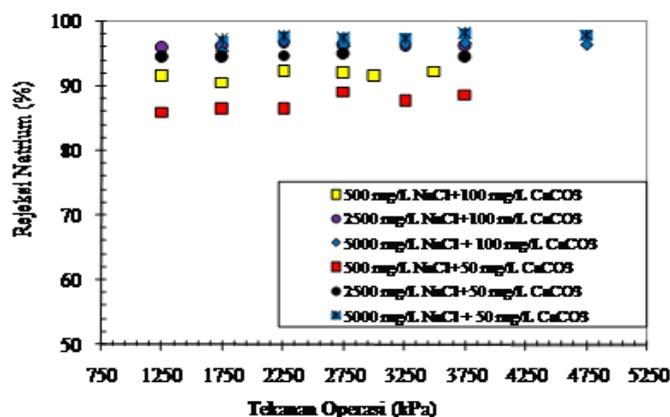


Gambar 9 WRP pada berbagai tekanan operasi untuk larutan campuran NaCl dan CaCO<sub>3</sub> yang mengandung 50 mg/L CaCO<sub>3</sub>. Namun demikian deposit CaCO<sub>3</sub> akan muncul dengan cepat bila CaCO<sub>3</sub> pada dinding membran melampaui konsentrasi jenuhnya. Penumpukan atau deposit kalsium akan meningkatkan koefisien mass transfer ( $k$ ), mereduksi fluks permeat dan WRP. Fenomena ini dikenal dengan scaling yang merupakan hal yang biasa pada operasi RO khususnya setelah jangka waktu yang panjang.



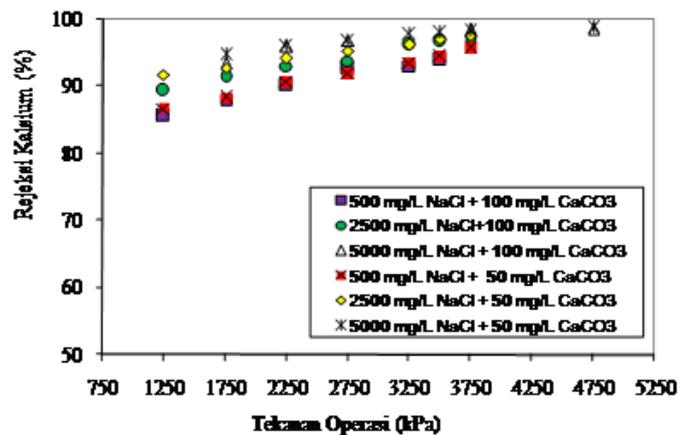
Gambar 10 Fluks Permeat untuk larutan campuran NaCl dan CaCO<sub>3</sub> yang mengandung 50 mg/L CaCO<sub>3</sub>

Gambar 11 menampilkan rejeksi natrium terhadap konsentrasi dan tekanan operasi. Persentase rejeksi natrium terlihat konstan pada rentang tekanan operasi. Namun demikian hasil memperlihatkan bahwa persentase rejeksi natrium lebih rendah dari 90% didapat pada larutan dengan konsentrasi NaCl yang rendah walaupun tekanan operasi ditingkatkan. Hal ini menunjukkan bahwa tekanan osmosa hanya berpengaruh bila air baku mempunyai konsentrasi NaCl yang tinggi. Hasil yang berbeda untuk rejeksi kalsium terlihat pada Gambar 12. Keberadaan ion natrium dalam air akan meningkatkan kelarutan kalsium pada fasa larutan sehingga persentase rejeksi ion kalsium meningkat tajam proporsional dengan konsentrasi natrium dalam air baku (umpan).



Gambar 11 Rejeksi Natrium pada berbagai tekanan operasi untuk larutan campuran NaCl dan CaCO<sub>3</sub>

Membran polyamida yang digunakan dalam penelitian ini mempunyai muatan negatif dan akan dengan mudah menolak ion divalen daripada ion monovalen. Karena air umpan yang digunakan pada penelitian ini mengandung kation dan anion kontak dengan membran yang bermuatan negatif akan meningkatkan konsentrasi kation pada fasa bulk.



Gambar 12 Rejeksi kalsium pada berbagai tekanan operasi untuk larutan campuran NaCl dan CaCO<sub>3</sub>

Perbedaan konsentrasi kation dan anion akan menghasilkan potensi elektrik yang dikenal dengan Potensial Donnan (Donnan potential). Potensial Donnan akan menarik kation-kation ke permukaan membran dan menolak anion menjauhi membran. Efek Donnan potential ini akan besar jika air baku mempunyai TDS antara 1000 mg/L sampai 3000 mg/L dan dapat diabaikan untuk TDS < 300 mg/L (Bartels, et al. 2005). Potensial Donnan potential akan lemah untuk larutan dengan konsentrasi ion divalen yang tinggi.

## 5. Kesimpulan

Keberadaan ion-ion natrium dan kalsium dalam air baku/umpan dan tekanan operasi pada sistem Reverse Osmosis skala kecil akan mempengaruhi kinerja membran terutama bila konsentrasi NaCl dalam air baku di atas 1200 mg/L dan tekanan operasi lebih rendah dari 2750 kPa. Adanya ion kalsium dalam air umpan akan sangat signifikan menurunkan laju permeat. Laju permeat akan dipengaruhi oleh polarisasi konsentrasi dan pembentukan deposit. Hal ini dapat dicegah dengan cara meningkatkan efek turbulensi pada aliran. Untuk meningkatkan efek turbulensi dapat dilakukan dengan meningkatkan tekanan operasi atau menambahkan spacer/baffle dalam modul membran terutama untuk sistem RO skala kecil.

## Daftar pustaka

1. Nasir, S (2007), Membrane Performance and Build-up of Solute in Small Scale Reverse Osmosis Operation, PhD Thesis Curtin University of Technology, Perth, Australia
2. Lee, Jae-Wok., Tae-Ouk, Kwon and Il-Sik, Moon (2006), Performance of polyamide reverse osmosis membranes for steel wastewater reuse, *Desalination* Selected paper from the 10th Aachen Membrane Colloquium
3. Sadhwani, J. J., Veza, J.M., (2001), Cleaning test for seawater reverse osmosis membranes." *Desalination* 139
4. Siavash Madaeni, S., T. Mohamamdi and M. Kazemi Moghadam (2001), Chemical cleaning of reverse osmosis membranes, *Desalination* 134
5. Mohsen, M. S. and J. O. Jaber (2003), Potential of industrial wastewater reuse, *Desalination* 15.

6. Parekh, B. S. (1988), *Reverse Osmosis Technology : Applications for High-Purity-Water Production*. New York, Marcel Dekker, Inc.
7. Sablani, S., M. Goosen, R. Al-Belushi and M. Wilf (2001), Concentration polarization in ultrafiltration and reverse osmosis: a critical review, *Desalination* 141
8. Goosen, M. F. A., S. S. Sablani, S. S. Al-Maskari, R. H. Al-Belushi and M. Wilf (2002), Effect of feed temperature on permeate flux and mass transfer coefficient in spiral-wound reverse osmosis systems, *Desalination* 144
9. APHA-AWWA-WEF (1992). *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. Washington DC, American Public Health Association.
10. Avlonitis, S., W. T. Hanbury and M. B. Boudinar (1993), Spiral wound modules performance an analytical solution: Part II, *Desalination* 89
11. Stewart, B. M., C. Jordan and D. T. Burns (1991), Reverse osmosis as a concentration technique for soluble organic phosphorus in fresh water, *Analytica Chimica Acta* 244
12. Al-Bastaki, N.M. and A. Abbas (2000). Predicting the performance of RO membranes *Desalination* 132
13. Song, L., J. Y. Hu, S. L. Ong, W. J. Ng, M. Elimelech and M. Wilf (2003), Performance limitation of the full-scale reverse osmosis process, *Journal of Membrane Science* 214
14. APHA-AWWA-WEF (1992). *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. Washington DC, American Public Health Association.
15. Sudak, R. G. (1990). *Reverse Osmosis. Handbook of Industrial Membrane Technology*. M. C. Porter. New Jersey, Noyes Publication
16. Zhou, Y. and R. S. J. Tol (2004), Implications of desalination for water resources in China - an economic perspective, *Desalination* 164
17. Abbas, A. and N. Al-Bastaki (2005), Modeling of an RO water desalination unit using neural networks, *Chemical Engineering Journal* 114
18. Sattar Kahdim, A., A. Abdulrazaq Jassim and S. Ismail (2003), Effect of different operation pressures for various membranes on the performance of RO plants, *Desalination* 155
19. Dalas, E. and P. G. Koutsoukos (1990), Calcium carbonate scale formation and prevention in a flow-through system at various temperatures, *Desalination* 78
20. Pahiadaki, T. T., Ch, Andritsos, N. Yiantsios, S.G., and Karabelas, A.J, (2005). An experimental study of CaCO<sub>3</sub> Scaling of RO and NF Membranes. International Desalination Association (IDA) World Congress on Desalination and Water Reuse, September, 11-16, Singapore.