
MEMBRAN NANOFILTRASI UNTUK PENGHILANGAN ION VALENSI TINGGI DAN SENYAWA ORGANIK DARI SUMBER AIR SALINITAS TINGGI

Iman Ciptaraharja, Veronica S. Praptowidodo
Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung
Labtek. X, Jln Ganesha 10, Bandung 40132
E-mail : imanc@melsa.net.id

Abstrak

Penelitian ini dilakukan untuk mempelajari pengaruh jenis pelarut dalam pembuatan membran nanofiltrasi dari polimer selulosa asetat terhadap struktur morfologi membran dalam peristiwa perpindahan massa pada proses pemisahan osmosis balik multistage. Teknik pembuatan membran yang digunakan adalah presipitasi imersi. Polimer membran yang digunakan adalah selulosa asetat (CA) pada konsentrasi 25 %-berat. Umpan yang digunakan adalah larutan ion valensi satu (NaCl), dengan variasi konsentrasi antara 2000 hingga 16.000 mg/L. Tekanan operasi diatur sedemikian rupa sehingga nilai tekanan operasi adalah sekitar tiga kali tekanan osmotik larutan NaCl. Percobaan juga dilakukan untuk umpan larutan ion valensi dua (CaCl₂), ion valensi tiga (FeCl₃), dan senyawa organik (glukosa) dengan konsentrasi, berturut-turut, adalah 200 mg/L, 50 mg/L, dan 100 mg/L. Struktur morfologi membran diuji menggunakan metoda Scanning Electron Microscopy (SEM). Membran CA-01 (CA/DMF/Air) merupakan membran nanofiltrasi dengan lapisan aktif yang lebih tipis dan ukuran pori lapisan penyangga yang lebih besar daripada membran CA-02 (CA/Aseton/Air) yang termasuk ke dalam membran osmosis balik. Penurunan konsentrasi umpan pada tekanan operasi yang tetap akan memberikan nilai fluks yang meningkat, namun memberikan nilai rejeksi yang menurun. Sementara itu, peningkatan tekanan operasi pada konsentrasi umpan yang tetap akan memberikan nilai fluks dan rejeksi yang meningkat. Membran CA-01 telah memenuhi persyaratan sebagai membran nanofiltrasi dengan rejeksi NaCl mencapai 66 % pada tekanan 20 Bar. Pada tekanan yang sama, membran CA-01 memberikan nilai rejeksi untuk CaCl₂, FeCl₃, dan glukosa, berturut-turut, sebesar 80,45 %, 82,14 %, dan 83,42 %.

Kata Kunci: Air Salinitas Tinggi, Membran, Multistage, Nanofiltrasi, Osmosis Balik, Selulosa Asetat

Abstract

The influence of solvent selection to membrane morphology for cellulose acetate nanofiltration membrane preparation in mass transfer of a multistage reverse osmosis process is studied. Membrane is prepared via precipitation immersion technique. The polymer used in this study is cellulose acetate (CA) with a concentration of 25 %-w. The feed concentration of univalent ion solution (NaCl) is varied between 2000 – 16,000 mg/L. The operating pressure is adjusted such that the operating pressure is three times of the osmotic pressure of NaCl solution. The concentration of bivalent ion (CaCl₂), trivalent ion (FeCl₃), and organic substance (glucose) are 200 mg/L, 50 mg/L, and 100 mg/L, respectively. The morphology of the membrane is characterized using Scanning Electron Microscopy (SEM). Membrane CA-01 (CA/DMF/Water) is a nanofiltration membrane with a thinner active layer and a more porous support layer than membrane CA-02 (CA/Aceton/Water) which is categorized as a reverse osmosis membrane. A reduced feed concentration (at a fixed operating pressure) gives an elevated flux, however the rejection is decreased. Meanwhile, an elevated operating pressure (at a fixed feed concentration) gives an elevated flux and rejection. Membrane CA-01 has met the requirement as a nanofiltration membrane since it gives 66 % rejection for NaCl at 20 Bar. At the same operating pressure, membrane CA-01 gives rejection for CaCl₂, FeCl₃, and glucose of 80.45 %, 82.14 %, and 83.42 %, respectively.

Keywords: Cellulose Acetate, Membrane, Multistage, Nanofiltration, Reverse Osmosis, Saline Water

1. Pendahuluan

Air merupakan salah satu sumber daya alam yang sangat penting bagi kehidupan manusia, diantaranya digunakan sebagai air minum dan air industri. Sebagian besar kebutuhan air tersebut dipenuhi dari sumber air tawar, yaitu air sumur dan air sungai. Seiring dengan meningkatnya jumlah penduduk dan pertumbuhan industri, kebutuhan air sebagai air minum dan juga air industri semakin meningkat. Sementara itu, sumber air tawar tidak bertambah, namun terlebih lagi justru cenderung untuk semakin berkurang. Jumlah penduduk yang semakin bertambah menyebabkan terjadinya usaha pembukaan hutan menjadi daerah permukiman. Hal ini mengakibatkan berkurangnya daerah resapan air dan selanjutnya menurunkan jumlah air tawar. Di samping itu, dengan bertambahnya jumlah industri, kebutuhan air untuk industri juga semakin meningkat. Kedua hal tersebut menyebabkan menurunnya daya dukung sumber air tawar terhadap tingkat kebutuhan air yang meningkat.

Peristiwa osmosis adalah peristiwa perpindahan pelarut, misalnya air, dari larutan dengan konsentrasi yang lebih rendah (encer) ke dalam larutan dengan konsentrasi yang lebih tinggi (pekat) melalui suatu lapisan yang semipermeabel. Sementara itu, proses pemurnian air atau pemisahan zat terlarut dengan membran adalah peristiwa perpindahan pelarut (air) melalui membran dari larutan pekat ke dalam larutan encer. Proses ini merupakan kebalikan dari peristiwa osmosis, sehingga dinamakan sebagai proses osmosis balik. Pada proses osmosis balik, hampir seluruh komponen zat terlarut, baik berupa ion-ion anorganik yang dapat menyebabkan tingginya salinitas air maupun bahan-bahan organik termasuk mikroorganisme, dapat dipisahkan sehingga diperoleh air dengan kemurnian sangat tinggi.

Alternatif sumber air pengganti air tawar yang dapat digunakan sebagai sumber produksi air minum maupun air industri adalah air payau dan air laut. Air payau dan air laut ini tersedia secara berlimpah. Namun demikian, kedua sumber air ini memerlukan proses pengolahan yang berbeda dibandingkan dengan pengolahan air tanah. Hal ini terutama diakibatkan oleh nilai salinitas air payau dan air laut yang lebih tinggi daripada air tawar. Salinitas air payau berada dalam rentang antara 1000 hingga 6000 mg/L, sementara itu air laut mempunyai salinitas kurang lebih 35.000 mg/L. Di samping itu, air yang akan digunakan sebagai air minum atau air industri harus memenuhi beberapa persyaratan sehingga air tersebut layak untuk digunakan sebagai air minum atau air industri.

Salah satu proses pengolahan air yang sedang berkembang dan banyak digunakan untuk mendapatkan air tawar sesuai dengan persyaratan sebagai air minum atau air industri adalah proses osmosis balik (*reverse osmosis*, RO).

Proses pengolahan air dengan membran osmosis balik memerlukan tekanan operasi yang tinggi untuk melawan tekanan osmosis. Semakin tinggi salinitas air, semakin tinggi tekanan osmosisnya, sehingga diperlukan tekanan operasi yang lebih tinggi lagi untuk memungkinkan dilakukannya proses osmosis balik. Tingginya tekanan operasi akan secara langsung memberikan biaya operasi yang tinggi.

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengkaji dan meningkatkan kinerja membran nanofiltrasi untuk mengolah air dengan salinitas tinggi. Kinerja proses pemisahan bergantung pada karakteristik struktur membran nanofiltrasi. Beberapa faktor yang mempengaruhi karakteristik struktur membran adalah jenis dan konsentrasi polimer, jenis pelarut, metoda pembuatan membran, dan penambahan zat aditif. Gandasmita (1998) menyebutkan bahwa membran selulosa asetat (*cellulose acetate*, CA) memberikan fluks dan rejeksi yang lebih tinggi daripada membran polisulfon. Penelitian yang dilakukan oleh Said (2000) menunjukkan bahwa polimer CA dengan pelarut dimetil formamida (DMF) memberikan membran CA dengan fluks yang lebih tinggi namun rejeksi yang lebih rendah dibandingkan pelarut aseton. Membran CA yang memberikan kinerja optimum adalah pada nilai konsentrasi polimer CA sebesar 25 % (Gandasmita, 1998 dan Said, 2000). Penambahan zat aditif, misalnya magnesium perklorat, dapat meningkatkan fluks membran namun memberikan nilai rejeksi yang rendah (Duhita-Stephani, 2005).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mempelajari pengaruh jenis pelarut dalam pembuatan membran nanofiltrasi dari polimer selulosa asetat terhadap struktur morfologi membran dalam peristiwa perpindahan massa pada proses pemisahan osmosis balik multistap.

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Teknologi Polimer dan Membran, Program Studi Teknik Kimia, Institut Teknologi Bandung. Teknik pembuatan membran yang digunakan adalah teknik presipitasi imersi (inversi fasa). Polimer membran yang digunakan adalah selulosa asetat (CA) pada satu nilai konsentrasi, yaitu 25 %-berat, dengan dua variasi pelarut. Pelarut untuk membran pertama adalah dimetil formamida (DMF) murni, sedangkan pelarut yang kedua adalah campuran aseton dan air. Jenis non-pelarut yang digunakan

pada pembuatan kedua membran adalah air. Di samping itu, digunakan pula satu buah membran osmosis balik dari Nitto-Denko sebagai pembanding (referensi).

Proses osmosis balik dilakukan dengan menggunakan alat Sibata RO Membran, ROE-0000-0007-A05, untuk mendapatkan nilai-nilai koefisien permeabilitas air (L_p), fluks (J), dan rejeksi (R) serta jumlah tahap pemisahan. Umpan yang digunakan adalah larutan ion valensi satu yang diwakili oleh NaCl, dengan delapan variasi konsentrasi antara 2000 hingga 16.000 mg/L pada tekanan operasi yang disesuaikan dengan tekanan osmotik larutan umpan NaCl. Percobaan juga dilakukan untuk umpan berupa larutan ion valensi dua (CaCl_2), ion valensi tiga (FeCl_3), dan senyawa organik (glukosa). Konsentrasi dari ketiga larutan tersebut, berturut-turut, adalah 200 mg/L, 50 mg/L, dan 100 mg/L. Struktur morfologi membran diuji menggunakan metoda *Scanning Electron Microscopy* (SEM).

2. Fundamental

Proses pemisahan dengan membran telah berkembang dan digunakan di dalam berbagai bidang. Diantaranya adalah pada proses produksi air minum. Membran berfungsi sebagai lapisan permaselektif yang mengatur laju perpindahan suatu komponen dari campurannya. Membran tersebut dapat bersifat netral atau memiliki muatan listrik, dapat berpori (*porous*) atau tidak berpori (*non-porous*). Proses pemisahan dengan membran terjadi akibat adanya gaya dorong (*driving force*) yang memungkinkan terjadinya perpindahan massa dari satu fasa ke fasa yang lain melalui membran. Gaya dorong tersebut dapat berupa gradien atau perbedaan konsentrasi, tekanan, potensial elektrik, atau temperatur. Jenis pemisahan dengan membran dapat dibedakan menjadi proses mikrofiltrasi, ultrafiltrasi, nanofiltrasi, osmosis balik, distilasi, pervaporasi, dan elektrodialisa.

Pada proses pemisahan dengan membran secara mikrofiltrasi (MF), ultrafiltrasi (UF), nanofiltrasi (NF), dan osmosis balik (*reverse osmosis*, RO), gaya dorong yang bekerja adalah perbedaan tekanan. Proses mikrofiltrasi digunakan untuk memisahkan partikel dengan ukuran diameter lebih dari 100 nm dapat menggunakan membran dengan struktur yang terbuka (berpori). Tahanan hidrodinamik untuk membran ini cukup rendah sehingga diperlukan tekanan operasi yang rendah pula untuk mendapatkan fluks yang tinggi. Sementara itu, proses ultrafiltrasi digunakan untuk memisahkan molekul-molekul dengan berat molekul antara 10^4

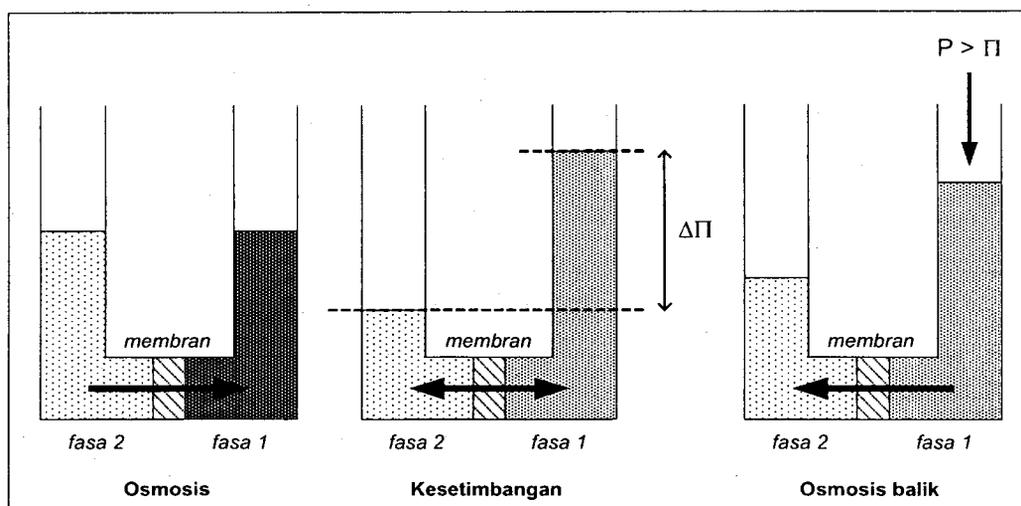
hingga 10^6 gram/mol. Proses ini memerlukan membran dengan ukuran pori yang lebih rapat dibandingkan membran mikrofiltrasi. Hal inimenyebabkan tahanan hidrodinamik membran ultrafiltrasi menjadi lebih tinggi sehingga diperlukan tekanan operasi yang lebih tinggi pula. Pemisahan molekul-molekul dengan berat molekul yang hampir sama dapat dilakukan dengan proses osmosis balik menggunakan membran yang sangat rapat (tidak berpori). Membran yang sangat rapat ini memberikan tahanan hidrodinamik yang sangat tinggi sehingga diperlukan tekanan operasi yang sangat tinggi pula untuk memungkinkan dilakukannya proses pemisahan.

Kinerja atau efisiensi proses pemisahan dengan membran ditentukan oleh nilai-nilai fluks dan selektivitas. Fluks atau laju permeasi adalah laju alir volumetrik suatu larutan melalui membran per satuan luas permukaan membran per satuan waktu. Selektivitas suatu membran adalah ukuran laju permeasi relatif suatu komponen yang dipisahkan melalui membran. Selektivitas dapat dinyatakan sebagai rejeksi atau retensi (R) atau faktor pemisahan (α). Untuk larutan encer yang mengandung komponen pelarut (umumnya adalah air) dan komponen zat terlarut, selektivitas biasanya dinyatakan sebagai rejeksi. Rejeksi dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$R = \frac{c_i - c_p}{c_i} = 1 - \frac{c_p}{c_i} \quad (1)$$

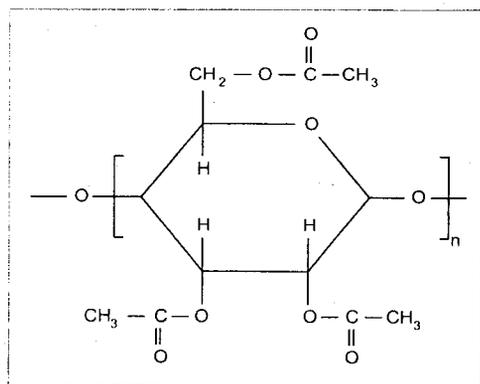
dengan c_i dan c_p , berturut-turut, adalah konsentrasi zat terlarut dalam umpan dan permeat.

Peristiwa osmosis terjadi ketika suatu pelarut (misalnya air) mengalir dari larutan yang lebih encer melewati suatu membran semipermeabel menuju larutan yang lebih pekat (Gambar 1). Membran semipermeabel tersebut adalah membran yang hanya dapat melewatkan air, tetapi tidak melewatkan zat terlarut (misalnya garam) yang terlarut dalam air. Sistem tersebut akan mencapai kesetimbangan pada saat konsentrasi pada kedua larutan adalah sama. Pada kondisi ini, beda tekanan antara larutan yang lebih pekat terhadap larutan yang lebih encer disebut tekanan osmotik. Jika pada larutan yang lebih pekat diberi tekanan yang lebih besar daripada tekanan osmotik, maka akan terjadi aliran balik air dari larutan yang lebih pekat melalui membran menuju larutan yang lebih encer. Peristiwa ini disebut dengan osmosis balik.



Gambar 1. Peristiwa Osmosis dan Osmosis Balik

Polimer selulosa asetat memiliki berat molekul antara 25.000 hingga 80.000. Selulosa asetat (Gambar 2) merupakan polimer hidrofilik, yaitu polimer yang memiliki kemampuan untuk mengikat air. Sifat hidrofilik tersebut dikarenakan oleh adanya gugus dalam rantai polimer yang mampu berinteraksi dengan molekul air dengan cara membentuk ikatan hidrogen. Meskipun bersifat hidrofilik, polimer selulosa asetat ini tidak larut dalam air, hal tersebut dikarenakan oleh kristalinitas dan ikatan hidrogen antarmolekul antar gugus hidroksil.

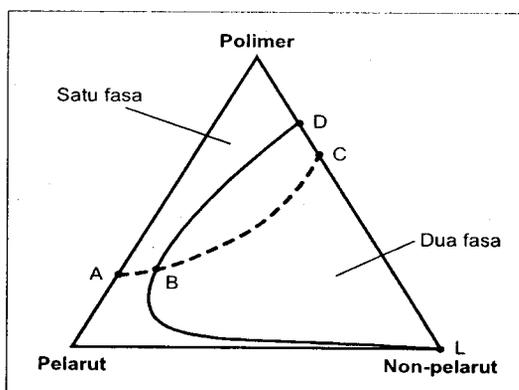


Gambar 2. Struktur Kimia Selulosa Asetat

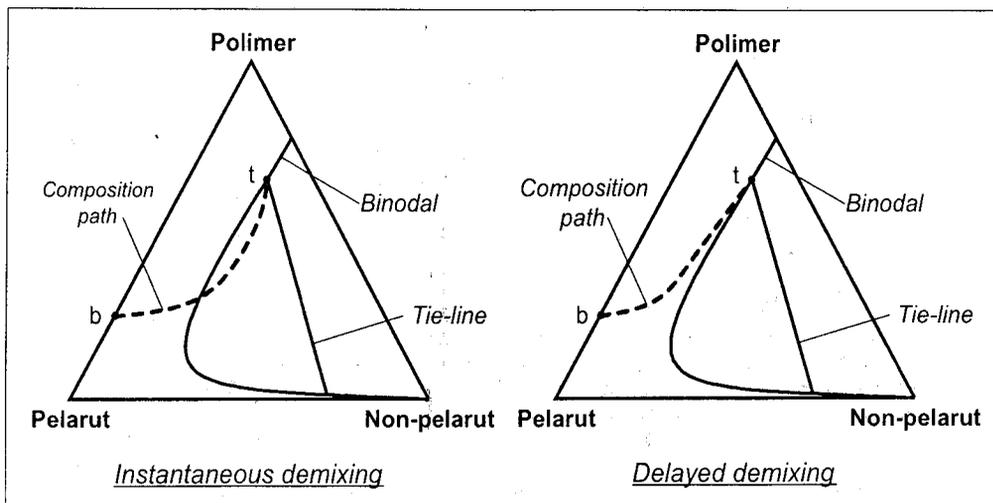
Pada pembuatan membran dengan teknik inversi fasa, polimer membran ditransformasikan secara terkendali dari fasa cair menjadi fasa padatan (Mulder, 1996). Proses solidifikasi (pemadatan) dimulai dengan transisi dari fasa satu cairan menjadi fasa dua cairan (*liquid-liquid demixing*). Pada tahap tertentu dalam proses demixing, salah satu fasa cair (fasa polimer konsentrasi tinggi) akan memadat sehingga

terbentuk matriks padatan. Dengan mengatur tahap awal transisi ini, morfologi membran dapat dikendalikan, misalnya untuk mendapatkan membran berpori atau tidak berpori. Salah satu teknik inversi fasa yang sering dilakukan adalah presipitasi imersi.

Larutan polimer yang telah dicetak dicelupkan ke dalam bak koagulasi yang berisi non-pelarut. Pada bak koagulasi, pelarut akan berdifusi ke dalam bak koagulasi sedangkan non-pelarut akan berdifusi ke dalam lapisan polimer. Setelah proses difusi ini berlangsung lama, larutan polimer secara termodinamika menjadi tidak stabil dan akhirnya terjadi *demixing*. Struktur membran asimetrik diperoleh sebagai kombinasi proses perpindahan massa dengan proses pemisahan fasa. Mekanisme pembentukan membran asimetrik juga dapat dijelaskan melalui diagram segitiga sistem terner (Gambar 3) yang terdiri dari komponen-komponen polimer, pelarut, dan non-pelarut (sebagai presipitator).



Gambar 3. Diagram Segitiga Sistem Polimer/Pelarut/Non-Pelarut



Gambar 4. Mekanisme Demixing Pembentukan Membran

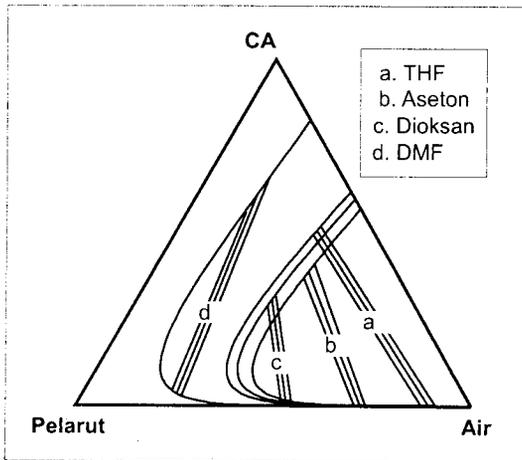
Diagram segitiga tersebut dibagi menjadi dua daerah, yaitu daerah satu fasa dan dua fasa. Kurva DL adalah kurva binodal, tempat dimulainya proses pemisahan cairan (*liquid-liquid demixing*). Pada daerah satu fasa terbentuk larutan yang homogen. Titik A adalah komposisi larutan polimer dalam pelarut setelah proses pencetakan (*casting*) atau biasa disebut sebagai larutan dope. Pada proses presipitasi dalam bak koagulasi yang mengandung non-pelarut, terjadi difusi pelarut ke dalam non-pelarut sampai titik B. Pada titik B ini mulai terjadi pembentukan dua fasa. Pembentukan gel lebih lanjut menyebabkan seluruh pelarut berdifusi ke dalam non-pelarut dan berhenti pada titik C. Pada akhir tahap presipitasi diperoleh campuran dua fasa. Fasa pertama adalah fasa padatan kaya polimer (ditunjukkan sebagai titik C) yang membentuk matriks membran. Sedangkan fasa kedua adalah fasa cair yang tidak mengandung polimer (ditunjukkan sebagai titik L). Titik L tersebut menyatakan volume pori yang terisi oleh non-pelarut.

Proses *demixing* dapat terjadi melalui dua mekanisme (Gambar 4) yang akan menghasilkan struktur membran yang berbeda. Pada *instantaneous liquid-liquid demixing*, proses *demixing* antara pelarut dengan non-pelarut berlangsung cepat atau sesaat setelah dilakukannya tahap pencelupan *casting film* ke dalam bak koagulasi. Membran yang terbentuk memiliki struktur yang lebih terbuka. Pada *delayed onset liquid-liquid demixing*, proses *demixing* antara pelarut dengan non-pelarut berlangsung beberapa lama setelah tahap pencelupan *casting film* ke dalam bak koagulasi. Membran yang terbentuk memiliki struktur yang lebih rapat.

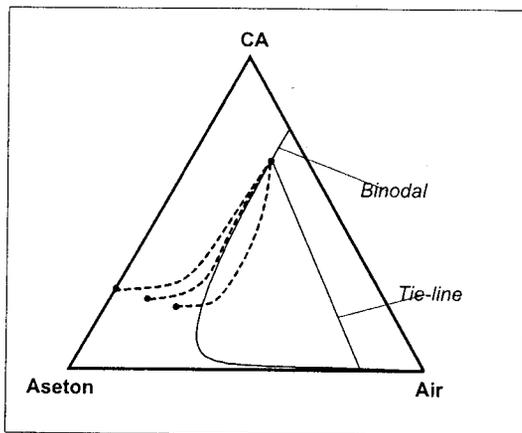
Salah satu faktor yang mempengaruhi struktur membran adalah sistem pelarut dan non-pelarut. Sistem pelarut dan non-pelarut yang memiliki tingkat kelarutan yang tinggi akan menyebabkan proses difusi antara pelarut dan non-pelarut berlangsung dengan cepat, mekanisme yang terjadi adalah *instantaneous liquid-liquid demixing*. Membran yang terbentuk memiliki lapisan atas dengan struktur yang lebih terbuka. Sebaliknya pada sistem pelarut dan non-pelarut dengan tingkat kelarutan rendah, proses *demixing* antara pelarut dan non-pelarut akan membutuhkan waktu beberapa lama, mekanisme yang terjadi adalah *delayed onset liquid-liquid demixing*. Membran yang terbentuk mempunyai struktur yang lebih rapat (*dense*).

Gambar 5. menunjukkan bahwa semakin kedua zat (pelarut dan non-pelarut) dapat saling larut, semakin curam gradien garis *tie-line*-nya. Kecenderungan kelarutan antara pelarut dengan air (sebagai non-pelarut) adalah menurun sesuai dengan urutan DMF > dioksan > aseton > THF. Dari hal ini, dapat disimpulkan bahwa pemakaian DMF dan dioksan akan menghasilkan mekanisme *instantaneous demixing*. Sedangkan aseton dan THF akan memberikan mekanisme *delayed demixing*.

Penambahan non-pelarut ke dalam larutan *casting* mampu mengubah mekanisme pembuatan membran dari *delayed onset liquid-liquid demixing* menjadi *instantaneous liquid-liquid demixing*. Penambahan non-pelarut ke dalam larutan *casting* harus dalam konsentrasi yang tidak mengganggu kelarutan seluruh komponen yang ada dalam larutan *casting* agar tidak menyebabkan terjadinya proses *demixing*. Transisi dari mekanisme *delayed onset liquid-liquid demixing* menjadi mekanisme *instantaneous liquid-liquid*



Gambar 5. Kurva Binodal dan Garis Tie-Line Sistem Selulosa Asetat/Pelarut/Air



Gambar 6. Diagram Segitiga Sistem Selulosa Asetat/Aseton/Air pada Variasi Komposisi Larutan Casting

demixing untuk kombinasi selulosa asetat/aseton/air disajikan pada Gambar 6.

Apabila dalam larutan casting tidak terdapat non-pelarut, maka mekanisme yang terjadi adalah *delayed onset liquid-liquid demixing* yang akan menghasilkan membran tidak berpori. Pada penambahan 12,5 % dan 20 % air ke dalam larutan casting, mekanisme yang terjadi adalah *instantaneous liquid-liquid demixing*.

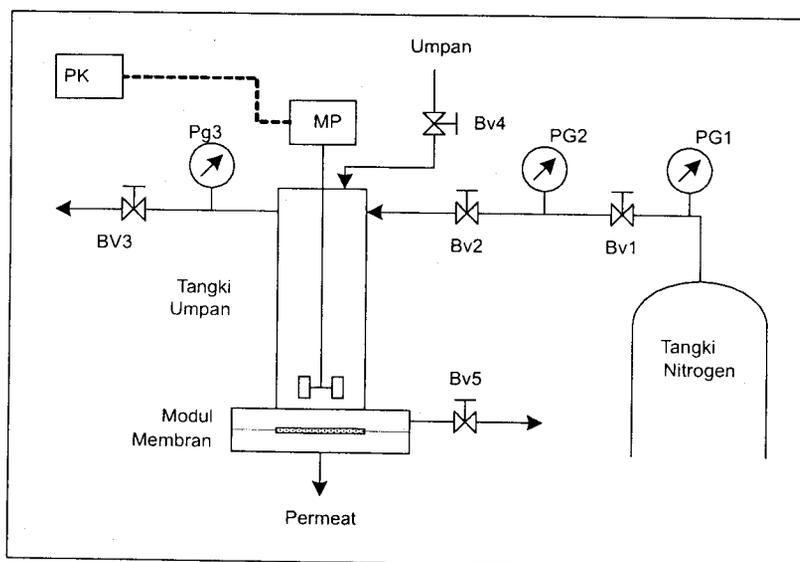
Proses perpindahan pada membran osmosis balik berlangsung secara *solution diffusion* yaitu molekul larutan akan melarut dan berdifusi ke dalam membran. Membran osmosis balik merupakan membran asimetrik dengan lapisan atas yang rapat tidak berpori sehingga proses perpindahan massa melalui membran osmosis balik merupakan akibat adanya aliran difusi. Persamaan yang menyatakan fluks air (J_w) melalui membran osmosis balik sebagai fungsi perbedaan tekanan adalah sebagai berikut :

$$J_w = L_p (P - \Delta\pi) \quad (2)$$

dengan ΔP adalah perbedaan tekanan operasi dan $\Delta\pi$ adalah tekanan osmotik. Variabel L_p adalah koefisien permeabilitas air. Nilai variabel ini bernilai tetap (sama) untuk suatu membran.

3. Metodologi

Rangkaian peralatan osmosis balik yang digunakan pada penelitian ini adalah seperti yang disajikan pada Gambar 7. Dengan PK adalah pengatur kecepatan motor pengaduk (MP), PG adalah manometer gas nitrogen, dan BV adalah kerangan.



Gambar 7. Rangkaian Peralatan Osmosis Balik

Penelitian diawali dengan pembuatan dua buah membran selulosa asetat (CA) dengan teknik presipitasi imersi. Membran pertama (CA-01) dibuat dengan menggunakan pelarut dimetil formamida (DMF), sedangkan membran kedua (CA-02) dibuat menggunakan pelarut campuran aseton dan air. Selanjutnya dilakukan percobaan penentuan nilai permeabilitas air murni (L_p) menggunakan umpan air murni.

Penentuan nilai-nilai fluks (J) dan rejeksi (R) menggunakan umpan larutan ion valensi satu yang diwakili oleh larutan NaCl. Variasi percobaan yang digunakan adalah variasi konsentrasi NaCl dalam umpan antara 2.000 hingga 16.000 mg/L. Tekanan operasi yang digunakan adalah 3 kali lebih besar daripada nilai tekanan osmotik larutan NaCl. Di samping itu, dilakukan pula penentuan jumlah tahap pemisahan yang diperlukan untuk mendapatkan permeat dengan konsentrasi NaCl kurang dari atau sama dengan 400 mg/L.

Selanjutnya dilakukan penentuan nilai-nilai fluks (J) dan rejeksi (R) menggunakan umpan berupa larutan ion valensi dua (CaCl_2), ion valensi tiga (FeCl_3), dan senyawa organik (glukosa). Penggunaan umpan berupa larutan CaCl_2 , FeCl_3 , dan glukosa ditujukan untuk mengetahui kinerja pemisahan membran terhadap ion-ion valensi dua dan tiga serta senyawa organik. Konsentrasi dari ketiga larutan tersebut yang digunakan pada penelitian ini, berturut-turut, adalah 200 mg/L, 50 mg/L, dan 100 mg/L. Tekanan operasi yang digunakan untuk ketiga larutan adalah didasarkan pada hasil percobaan untuk larutan ion valensi satu (NaCl).

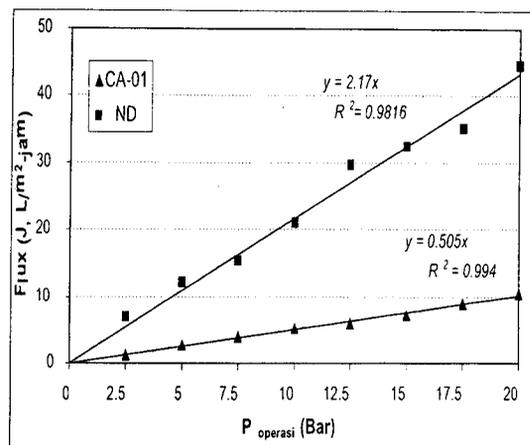
Penelitian diakhiri dengan interpretasi data berdasarkan hasil percobaan serta hasil analisa SEM yang dilanjutkan dengan pembahasan dan pengambilan kesimpulan dari penelitian.

4. Hasil dan Pembahasan

Pada rentang tekanan operasi antara 2,5 hingga 20 Bar, membran CA-01 memiliki nilai fluks dalam rentang antara 1,13 hingga 10,27 $\text{L/m}^2\text{-jam}$. Sementara itu, membran komersial Nitto-Denko (ND) memiliki nilai fluks dalam rentang antara 7,01 hingga 44,55 $\text{L/m}^2\text{-jam}$. Dengan demikian, dapat dinyatakan bahwa membran CA-01 tergolong sebagai membran nanofiltrasi. Sementara itu, nilai koefisien permeabilitas air murni untuk membran CA-02 tidak dapat ditentukan karena membran ini memberikan nilai fluks yang sangat kecil. Diperkirakan bahwa membran CA-02 termasuk ke dalam kelompok membran osmosis balik dengan lapisan aktif membran yang lebih tebal dan lebih rapat dibandingkan membran-membran lain yang

digunakan pada penelitian ini. Membran CA-02 memerlukan tekanan operasi yang lebih tinggi untuk memungkinkan terjadinya proses perpindahan dan pemisahan melalui membran.

Nilai koefisien permeabilitas air murni menunjukkan kemudahan molekul air untuk melewati membran. Semakin tinggi nilai koefisien permeabilitas, menunjukkan semakin mudah air untuk melewati membran yang pada akhirnya akan memberikan fluks air yang lebih tinggi. Berdasarkan hasil percobaan penentuan koefisien permeabilitas (Gambar 8), dapat diketahui bahwa membran ND ($L_p = 2,170 \text{ L/m}^2\text{-jam-Bar}$) yang merupakan membran komersial memiliki nilai koefisien permeabilitas air murni yang lebih tinggi dibandingkan dengan membran CA-01 ($L_p = 0,505 \text{ L/m}^2\text{-jam-Bar}$).



Gambar 8. Kurva Aluran Fluks Air Murni Terhadap Tekanan Operasi

Hal yang menyebabkan tingginya nilai fluks dan koefisien permeabilitas membran ND adalah karena membran ini merupakan membran komersial yang dibuat dari poliamida aromatik yang telah melewati berbagai tahapan proses penelitian, modifikasi, dan penyempurnaan sehingga dapat memberikan nilai fluks dan koefisien permeabilitas yang tinggi yang selanjutnya dapat digunakan dalam berbagai kegiatan komersial. Sementara itu, membran CA-01 dibuat dari bahan polimer selulosa asetat yang telah lama digunakan sebagai bahan pembuatan membran, dan pada penelitian ini tidak dilakukan modifikasi polimer selulosa asetat. Di samping itu, teknik pembuatan membran yang digunakan dalam penelitian ini adalah teknik presipitasi imersi sederhana dengan menggunakan pelat kaca sebagai tempat pencetakan membran (*casting*) tanpa adanya proses modifikasi atau perlakuan tingkat lanjut (*advance treatment*) untuk meningkatkan kinerja membran.

Membran CA-01 dan CA-02 dibuat dengan menggunakan jenis dan konsentrasi polimer selulosa asetat yang sama, serta jenis non-pelarut yang sama, yaitu air. Hal yang membedakan dari kedua membran ini adalah jenis pelarut yang digunakan. Pelarut yang digunakan pada proses pembuatan membran CA-01 adalah dimetil formamida (DMF), sedangkan pelarut yang digunakan pada proses pembuatan membran CA-02 adalah campuran aseton dan air. Berdasarkan tingkat kelarutan antara pelarut dengan non-pelarut, dapat diketahui bahwa pelarut DMF lebih mudah larut daripada aseton dalam non-pelarut air. Dengan demikian, mekanisme *demixing* atau pembentukan membran yang akan dihasilkan oleh kedua jenis pelarut ini akan berbeda, dan pada akhirnya akan memberikan struktur morfologi membran yang berbeda pula. Jenis pelarut dengan tingkat kelarutan dalam non-pelarut yang lebih tinggi, dalam hal ini adalah DMF, akan memberikan mekanisme pembentukan membran secara *instantaneous demixing* yang selanjutnya akan memberikan membran asimetrik CA-01 dengan struktur lapisan atas (yang merupakan lapisan aktif membran) yang lebih terbuka. Sedangkan jenis pelarut aseton dengan tingkat kelarutan dalam air yang lebih rendah akan memberikan mekanisme pembentukan membran secara *delayed demixing* yang selanjutnya akan memberikan membran asimetrik CA-02 dengan struktur lapisan atas yang lebih rapat. Struktur lapisan atas membran asimetrik yang lebih rapat akan memberikan tahanan yang lebih tinggi terhadap proses perpindahan massa. Dengan demikian, pada tekanan operasi yang sama, membran CA-01 akan memberikan nilai fluks yang lebih besar daripada membran CA-02.

Lebih jauh lagi, membran CA-02 dibuat dengan menggunakan pelarut yang merupakan campuran dari aseton dan air. Penambahan non-pelarut air ke dalam larutan cetak (*casting solution*) dalam pembuatan membran ditujukan untuk mengubah mekanisme pembentukan membran dari *delayed demixing* menuju mekanisme pembentukan membran yang lebih *instantaneous*. Dengan demikian, penambahan non-pelarut air dimaksudkan untuk memberikan membran dengan struktur lapisan atas membran asimetrik yang lebih terbuka sehingga akan memberikan nilai fluks yang lebih tinggi. Akan tetapi, penambahan non-pelarut air sebesar 15 % ke dalam larutan cetak belum dapat memberikan membran dengan struktur lapisan atas yang relatif lebih tipis dan lebih terbuka, sehingga nilai fluks membran CA-02 masih relatif sangat kecil. Percobaan penentuan nilai fluks dan rejeksi untuk ion valensi satu dilakukan dengan

menggunakan umpan ion valensi satu berupa larutan NaCl. Nilai-nilai tekanan operasi (P, bar), fluks (J, L/m²-jam), konsentrasi umpan (c_i, mg/L), konsentrasi permeat (c_p, mg/L), dan rejeksi (R, %) untuk membran CA-01 dan ND disajikan, berturut-turut, pada Tabel 1 dan 2.

Tabel 1. Nilai Fluks dan Rejeksi Ion Valensi Satu untuk Membran CA-01

No.	P	c _i	c _p	R	J
1.	2,5	2000	1101	44,96	1,09
2.	5	4000	2117	47,08	1,40
3.	7,5	6000	2838	52,71	1,78
4.	10	8000	3364	57,94	2,35
5.	12,5	10.000	3945	60,55	2,37
6.	15	12.000	4553	62,06	2,65
7.	17,5	14.000	5107	63,52	2,93
8.	20	16.000	5429	66,07	3,37

Tabel 2. Nilai Fluks Dan Rejeksi Ion Valensi Satu untuk Membran ND

No.	P	c _i	c _p	R	J
1.	2,5	2000	748	62,62	2,61
2.	5	4000	1370	65,76	2,81
3.	7,5	6000	1859	69,02	3,28
4.	10	8000	1999	75,02	4,22
5.	12,5	10.000	2397	76,03	4,76
6.	15	12.000	2617	78,19	5,58
7.	17,5	14.000	3036	78,31	5,71
8.	20	16.000	3037	81,02	5,90

Diperkirakan bahwa *free-volume* atau *void-fraction* pada membran CA-01 memiliki ukuran yang masih bervariasi pada kisaran nanometer. Sedangkan membran ND telah memiliki ukuran *free-volume* yang lebih seragam. Meskipun demikian, membran CA-01 telah memenuhi persyaratan sebagai membran nanofiltrasi dengan nilai rejeksi ion valensi satu lebih dari 60 %.

Di samping untuk menentukan nilai-nilai fluks dan rejeksi, percobaan yang menggunakan umpan berupa larutan NaCl juga dilakukan untuk menentukan jumlah tahap pemisahan yang diperlukan untuk mendapatkan permeat yang memenuhi persyaratan kualitas sebagai air minum, yaitu konsentrasi NaCl kurang dari 400 mg/L. Hasil percobaan disajikan pada Tabel 3 dan 4.

Hasil percobaan menunjukkan bahwa membran CA-01, yang dibuat pada penelitian ini, memerlukan satu tahap lebih banyak daripada membran komersial ND untuk mendapatkan permeat dengan kualitas sebagai air minum. Oleh karena itu dapat dinyatakan bahwa kinerja membran CA-01 dalam merejeksi ion valensi satu (NaCl), untuk mendapatkan permeat yang memenuhi persyaratan sebagai air minum,

Tabel 3. Jumlah Tahap Pemisahan Membran CA-01 untuk Mendapatkan Permeat Kualitas Air Minum

No.	P (Bar)	Tahap 1		Tahap 2		Tahap 3		Tahap 4	
		R (%)	J (L/m ² -jam)						
1.	2,5	44,96	1,09	42,35	2,15	40,00	3,18	-	-
2.	5	47,08	1,40	45,07	3,27	43,90	4,22	39,60	4,82
3.	7,5	52,71	1,78	54,11	3,87	49,29	4,42	40,40	5,05
4.	10	57,94	2,35	56,83	4,34	51,15	4,89	45,34	5,06
5.	12,5	60,55	2,37	58,12	6,62	53,20	7,89	48,30	9,34
6.	15	62,06	2,65	60,19	7,68	55,10	9,85	53,23	10,04
7.	17,5	63,52	2,93	62,82	8,47	61,16	10,46	56,29	10,91
8.	20	66,07	3,37	63,09	9,87	62,16	12,23	58,38	12,37

Tabel 4. Jumlah Tahap Pemisahan Membran ND untuk Mendapatkan Permeat Kualitas Air Minum

No.	P (Bar)	Tahap 1		Tahap 2		Tahap 3	
		R (%)	J (L/m ² -jam)	R (%)	J (L/m ² -jam)	R (%)	J (L/m ² -jam)
1.	2,5	62,62	2,61	50,87	3,23	-	-
2.	5	65,76	2,81	52,98	4,31	42,76	4,45
3.	7,5	69,02	3,28	60,02	5,90	49,11	6,32
4.	10	75,02	4,22	66,16	9,03	51,28	9,52
5.	12,5	76,03	4,76	70,14	10,82	53,05	12,31
6.	15	78,19	5,58	72,05	12,91	55,29	15,31
7.	17,5	78,31	5,71	75,89	14,71	63,31	17,99
8.	20	81,02	5,90	77,06	16,00	65,82	20,40

Hasil percobaan menunjukkan bahwa membran CA-01, yang dibuat pada penelitian ini, memerlukan satu tahap lebih banyak daripada membran komersial ND untuk mendapatkan permeat dengan kualitas sebagai air minum. Oleh karena itu dapat dinyatakan bahwa kinerja membran CA-01 dalam merejeksi ion valensi satu (NaCl), untuk mendapatkan permeat yang memenuhi persyaratan sebagai air minum, adalah cukup baik dibandingkan dengan membran komersial ND.

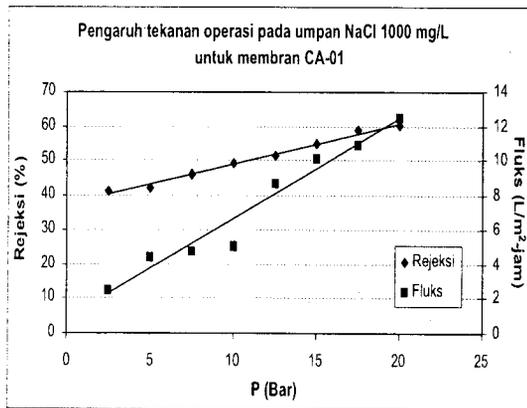
Pada tekanan operasi yang sama, baik untuk membran CA-01 maupun membran ND, nilai fluks semakin meningkat dengan menurunnya konsentrasi umpan, sedangkan nilai rejeksi semakin menurun dengan menurunnya konsentrasi umpan. Berdasarkan persamaan 2, nilai fluks (J) berbanding lurus dengan perbedaan tekanan trans-membran, yaitu perbedaan tekanan antara tekanan operasi (ΔP) dan tekanan osmotik ($\Delta \pi$). Konsentrasi larutan umpan NaCl yang lebih rendah akan memberikan tekanan osmotik yang lebih rendah pula. Dengan demikian, pada tekanan operasi yang tetap (ΔP bernilai tetap), apabila konsentrasi umpan menurun maka nilai perbedaan tekanan trans-membran ($\Delta P - \Delta \pi$) akan meningkat

sehingga akan memberikan nilai fluks yang meningkat.

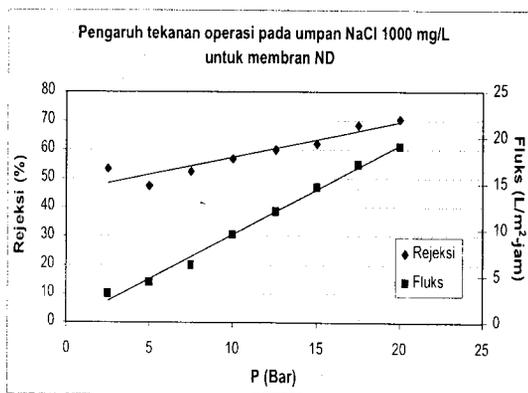
Pada proses perpindahan massa melalui membran yang rapat (*dense*) atau tidak berpori, perpindahan zat terlarut melalui membran dapat diakibatkan oleh adanya efek kopling, yaitu peristiwa perpindahan massa (difusi) zat terlarut oleh adanya perpindahan massa pelarut. Dalam pelarut air, molekul zat terlarut (dalam hal ini adalah ion-ion Na⁺ dan Cl⁻) dikelilingi oleh molekul-molekul air sehingga terbentuk interaksi antara molekul-molekul air sebagai pelarut dengan molekul-molekul zat terlarut. Pada saat melewati membran, molekul-molekul pelarut air turut membawa zat terlarut ion-ion Na⁺ dan Cl⁻. Atau dengan kata lain, terjadi efek kopling yang bersifat "positif", yaitu peningkatan laju difusi zat terlarut oleh adanya difusi pelarut melalui membran. Dengan demikian, semakin tinggi nilai fluks pelarut, akan semakin banyak zat terlarut yang ikut terbawa oleh pelarut. Hal ini akan mengakibatkan konsentrasi zat terlarut dalam permeat akan meningkat pula relatif terhadap konsentrasi zat terlarut dalam umpan. Atau dengan kata lain, rejeksi zat terlarut menjadi menurun. Oleh karena itu, peningkatan fluks pelarut (sebagai akibat

penurunan konsentrasi zat terlarut dalam umpan, pada tekanan operasi yang tetap) akan memberikan nilai rejeksi yang menurun.

Kurva hubungan antara nilai-nilai fluks dan rejeksi terhadap tekanan operasi pada konsentrasi umpan yang sama disajikan pada Gambar 9 dan 10. Berdasarkan kedua gambar tersebut, dapat diketahui bahwa pada konsentrasi umpan yang sama, nilai-nilai fluks dan rejeksi semakin meningkat dengan meningkatnya tekanan operasi. Hal ini berlaku baik bagi membran CA-01 maupun membran komersial ND.



Gambar 9. Pengaruh Tekanan Operasi Terhadap Fluks dan Rejeksi pada Konsentrasi Umpan Tetap untuk Membran CA-01



Gambar 10. Pengaruh Tekanan Operasi Terhadap Fluks dan Rejeksi pada Konsentrasi Umpan Tetap untuk Membran ND

Seperti yang telah disampaikan sebelumnya, nilai fluks (J) berbanding lurus dengan perbedaan tekanan trans-membran, yaitu perbedaan tekanan antara tekanan operasi (ΔP) dan tekanan osmotik ($\Delta \pi$). Konsentrasi larutan umpan NaCl yang tetap akan memberikan nilai tekanan osmotik yang tetap pula. Dengan demikian, pada konsentrasi umpan yang tetap ($\Delta \pi$

bernilai tetap), apabila tekanan operasi ditingkatkan maka nilai perbedaan tekanan trans-membran ($\Delta P - \Delta \pi$) akan meningkat, sehingga pada akhirnya akan memberikan nilai fluks yang meningkat.

Nilai fluks yang lebih tinggi menunjukkan semakin banyaknya jumlah pelarut air dalam permeat. Peningkatan jumlah pelarut air dalam permeat jauh lebih besar daripada peningkatan jumlah zat terlarut dalam permeat. Hal ini akan mengakibatkan konsentrasi zat terlarut dalam permeat menjadi semakin menurun dengan semakin banyaknya air dalam permeat. Meskipun sebenarnya terdapat efek kopling yang dapat menyebabkan terjadinya penurunan nilai rejeksi, namun kontribusi dari efek kopling ini jauh lebih kecil daripada pengaruh peningkatan tekanan operasi terhadap peningkatan fluks pelarut air. Dengan demikian, pada tekanan operasi yang meningkat dan konsentrasi umpan yang tetap, nilai rejeksi yang diperoleh adalah semakin meningkat.

Tabel 5. Nilai Fluks dan Rejeksi Membran CA-01 pada Tekanan 20 Bar untuk Berbagai Umpan

Umpan	c_f (mg/L)	c_p (mg/L)	R (%)	J (L/m ² -jam)
NaCl	1000	430	57,0	12,40
CaCl ₂	200	39,1	80,4	16,99
FeCl ₃	50	8,9	82,1	17,03
Glukosa	100	16,6	83,4	18,85

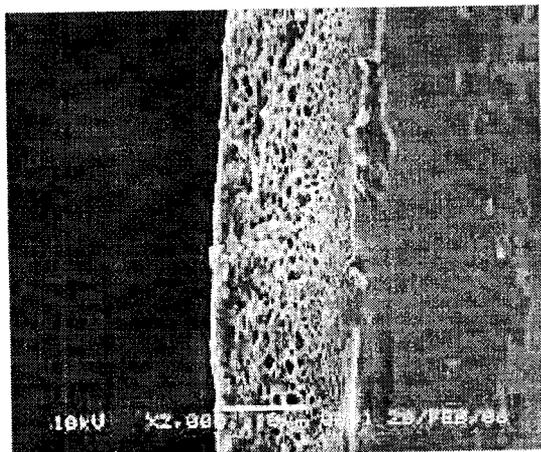
Tabel di atas menunjukkan bahwa nilai rejeksi menurun dengan urutan glukosa > FeCl₃ > CaCl₂ > NaCl. Nilai rejeksi terhadap ion valensi satu, yaitu larutan NaCl, memiliki nilai rejeksi yang paling rendah. Sementara itu, umpan berupa larutan glukosa memberikan nilai rejeksi yang paling tinggi. Perbedaan nilai-nilai rejeksi tersebut berkaitan dengan berat molekul umpan.

Proses perpindahan suatu molekul melalui membran adalah mengikuti mekanisme difusi. Proses difusi zat terlarut dipengaruhi oleh ukuran atau berat molekul dari zat terlarut. NaCl merupakan zat terlarut dengan ukuran paling kecil sehingga lebih mudah untuk berdifusi melewati membran dan juga lebih mudah terbawa oleh pelarut air. Selanjutnya, hal ini akan mengakibatkan tingginya konsentrasi NaCl dalam permeat sehingga nilai rejeksi untuk NaCl menjadi rendah. Hal ini juga berlaku bagi zat-zat terlarut yang lain. Semakin besar ukuran molekul zat terlarut, semakin sulit zat terlarut tersebut untuk berdifusi melewati membran. Dengan demikian, konsentrasi zat terlarut dalam permeat menjadi lebih kecil dan pada akhirnya akan memberikan nilai rejeksi yang meningkat.

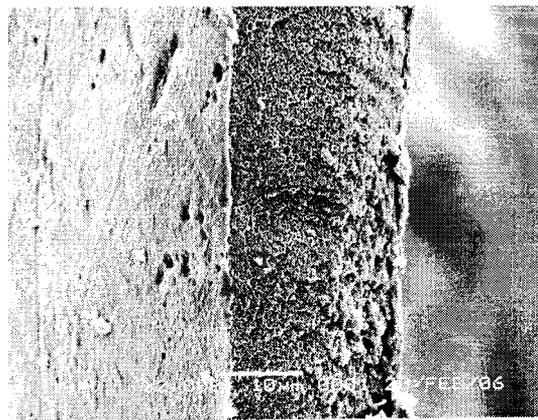
Di samping oleh adanya perbedaan difusivitas, zat terlarut juga dapat melewati membran akibat adanya perpindahan molekul zat pelarut, yaitu akibat adanya efek kopling. Efek kopling ini berkaitan dengan interaksi antara molekul-molekul zat terlarut dengan molekul pelarut. Interaksi antara NaCl dengan pelarut air termasuk interaksi yang kuat. Hal ini dikarenakan oleh ukuran dari ion-ion Na^+ dan Cl^- yang lebih kecil sehingga lebih mudah untuk terbawa oleh molekul air pada saat terjadinya perpindahan molekul air melewati membran.

Kemudahan untuk ikut terbawa oleh molekul air dalam melewati membran menyebabkan tingginya konsentrasi NaCl dalam permeat sehingga selanjutnya akan menyebabkan rendahnya nilai rejeksi NaCl. Sementara itu, CaCl_2 memiliki ukuran molekul yang lebih besar sehingga interaksi antara CaCl_2 dengan pelarut air menjadi lebih lemah dibandingkan NaCl. Hal ini akan mengakibatkan CaCl_2 menjadi lebih sulit untuk ikut terbawa oleh molekul air dalam melewati membran. Dengan demikian, konsentrasi CaCl_2 dalam permeat menjadi lebih rendah sehingga memberikan nilai rejeksi yang lebih tinggi. Demikian pula halnya bagi FeCl_3 dan glukosa. Glukosa dengan ukuran molekul paling besar akan memiliki interaksi dengan molekul pelarut air yang paling lemah sehingga paling sulit untuk terbawa molekul pelarut air dalam melewati membran. Hal ini pada akhirnya akan memberikan nilai rejeksi glukosa yang paling tinggi.

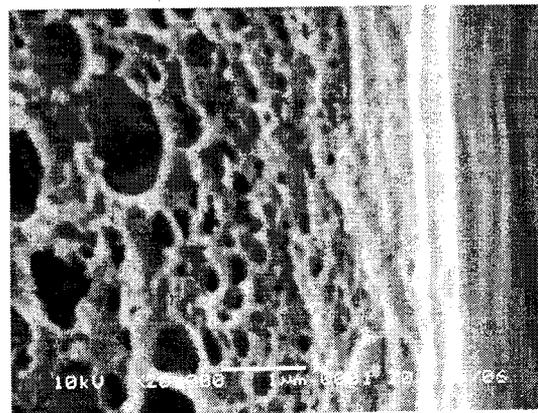
Analisa terhadap hasil uji SEM menunjukkan bahwa membran selulosa asetat yang dibuat pada penelitian ini, baik CA-01 maupun CA-02, memberikan struktur membran yang termasuk ke dalam kelompok membran asimetrik, yaitu membran yang terdiri dari beberapa lapisan.



Gambar 11. Analisa SEM Membran CA-01 pada Perbesaran 2.000x



Gambar 12. Analisa SEM Membran CA-02 pada Perbesaran 2.000x



Gambar 13. Analisa SEM Membran CA-01 pada Perbesaran 20.000x



Gambar 14. Analisa SEM Membran CA-02 pada Perbesaran 20.000x

Membran CA-01 dan CA-02 mempunyai ketebalan, berturut-turut, kurang lebih 18 μm dan 22 μm . Analisa lebih lanjut terhadap foto SEM pada tingkat perbesaran yang lebih tinggi menunjukkan bahwa membran CA-01 memiliki lapisan penyangga (*support*) berupa membran berpori dengan ukuran pori yang lebih besar

daripada membran CA-02. Tebal lapisan atas membran, yang merupakan lapisan aktif membran yang lebih rapat (*dense top layer*), untuk membran CA-01 adalah kurang lebih 0,3 μm , sedangkan membran CA-02 memiliki lapisan atas dengan ketebalan kurang lebih 1,2 μm .

Adanya perbedaan struktur antara membran CA-01 dengan CA-02 adalah sebagai akibat adanya pengaruh jenis pelarut yang digunakan pada saat pembuatan membran. Membran CA-01 yang dibuat menggunakan pelarut DMF memberikan mekanisme *instantaneous demixing*, sedangkan membran CA-02 yang dibuat menggunakan pelarut aseton memberikan mekanisme *delayed demixing*. Mekanisme pembentukan membran yang singkat (*instantaneous*) akan memberikan membran dengan lapisan penyangga yang lebih terbuka dan lapisan atas yang lebih tipis. Sebaliknya, mekanisme pembentukan membran yang lambat (*delayed*) akan memberikan membran dengan lapisan penyangga yang lebih rapat dan lapisan atas yang lebih tebal.

Membran dengan lapisan atas yang lebih tipis dan lapisan penyangga yang lebih terbuka (dalam hal ini adalah membran CA-01) akan memberikan nilai fluks yang lebih besar daripada membran dengan lapisan atas yang tebal dan lapisan penyangga yang lebih rapat (membran CA-02). Hal ini sesuai dengan hasil percobaan tahap penentuan nilai koefisien permeabilitas air murni.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil percobaan dan pembahasan yang telah disajikan dapat dinyatakan bahwa membran CA-01 yang digunakan dalam penelitian ini merupakan membran nanofiltrasi dengan lapisan aktif yang lebih tipis (0,3 μm) dan ukuran pori lapisan penyangga yang lebih besar. Sedangkan membran CA-02 termasuk ke dalam membran osmosis balik dengan lapisan aktif yang lebih tebal (1,2 μm) dan lapisan penyangga yang lebih rapat.

Jumlah tahap proses pemisahan ion valensi satu yang diperlukan oleh membran selulosa asetat CA-01 untuk mendapatkan permeat yang memenuhi persyaratan sebagai air minum adalah satu tahap lebih banyak daripada membran komersial ND yang dibuat dari polimer poliamida aromatik. Dengan demikian, polimer selulosa asetat (dengan harga yang relatif lebih murah dan dibuat dari sumber alam yang terbarukan) masih

layak untuk dikembangkan lebih lanjut sehingga dapat digunakan dalam proses produksi air minum.

Penurunan konsentrasi umpan (pada tekanan operasi yang tetap) akan memberikan nilai fluks yang meningkat, namun memberikan nilai rejeksi yang menurun. Sedangkan peningkatan tekanan operasi (pada konsentrasi umpan yang tetap) akan memberikan nilai fluks dan rejeksi yang meningkat.

Berat molekul zat terlarut menentukan laju difusi dan nilai rejeksi dari zat terlarut tersebut. Semakin besar ukuran berat molekul suatu zat terlarut, akan memberikan nilai difusi zat terlarut yang lebih kecil yang pada akhirnya akan memberikan nilai rejeksi yang tinggi.

Daftar Notasi

- c_r = konsentrasi zat terlarut dalam umpan
- c_p = konsentrasi zat terlarut dalam permeat
- J = fluks
- J_w = fluks komponen pelarut (air)
- L_p = koefisien permeabilitas air
- P = tekanan
- R = rejeksi
- α = faktor pemisahan
- π = tekanan osmotik

Daftar Pustaka

- [1] Duhita, Amelia dan Dina Stephani, (2005), "Pengaruh Penambahan Aditif Pada Kinerja Membran Nanofiltrasi", *Skripsi*, Departemen Teknik Kimia Institut Teknologi Bandung.
- [2] Gandasmita, Suryo, (1998), "Pengaruh Sifat Material Membran Polimer Pada Kinerja Membran Untuk Desalinasi Secara Osmosis Balik", *Tesis Magister*, Program Studi Ilmu dan Teknik Material Institut Teknologi Bandung.
- [3] Mulder, Marcel, (1996), "*Basic Principles of Membrane Technology*", 2nd Edition, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht.
- [4] Said, Aja Avriana, (2000), "Studi Pembuatan Membran Nanofiltrasi Untuk Pemurnian Air", *Tesis Magister*, Jurusan Teknik Kimia Institut Teknologi Bandung.
- [5] Sofyana, (2003), "Penurunan Kandungan Senyawa Organik dan Ion-Ion Dalam Air Menggunakan Membran Nanofiltrasi", *Tesis Magister*, Departemen Teknik Kimia, Institut Teknologi Bandung.