

PEMBUATAN MEMBRAN ULTRAFILTRASI DARI POLIMER SELULOSA ASETAT DENGAN METODE INVERSI FASA

Agus Mirwan^{*}, Vera Indriyani, Yunita Novianty

Program Studi Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Lambung Mangkurat

Jl. A. Yani Km. 36 Banjarbaru Kalimantan Selatan

*E-mail corresponding author: agusmirwan@yahoo.com

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p><i>Article history:</i> Received: 29-01-2017 Received in revised form: 02-02-2017 Accepted: 02-03-2017 Published: 10-04-2017</p> <hr/> <p><i>Keywords:</i> Dimethylformamid Rejection coefficient Flux</p>	<p><i>Clean water treatment with membrane technology is a water treatment process with very good quality and suitable for drinking water treatment in developing countries because the membrane has a lot of advantages. One type of membrane separation operation is with ultrafiltration membranes. Ultrafiltration is a process of filtering particles in the size range of colloids, namely liquid while large molecules detained on the surface of the membrane and the solute with very small size can pass through the membrane. The purpose of this study was to determine the best composition of %wt of dimethylformamide in the manufacture of ultrafiltration membranes. Ultrafiltration membrane is made by varying the concentration of the additive of dimethylformamide which serves for the determination of membrane pore size and the concentration of acetone. Mixing materials done by stirring for ± 6 hours, polymer film printouts is coagulated for 1 hour in ice water ($\pm 4^\circ\text{C}$) and then washed with running water and stored in a container containing formalin. Then conducted testing on the membrane using peat water where permeate that generated is measured the volume of each interval of 5 minutes to determine the membrane flux. Then analyzing the concentration of permeate to determine the coefficient of rejection, where the expected rejection is $> 90\%$. Based on the research results, the best ultrafiltration membrane was membrane with composition wt% of dimethylformamide of 20; 24 and 28, where rejection coefficient average respectively was 98.15; 92.80 and 95.41%.</i></p>

Abstrak- Pengolahan air bersih dengan teknologi membran merupakan proses pengolahan air dengan kualitas yang sangat baik dan sesuai untuk pengolahan air minum di negara-negara berkembang karena membran memiliki banyak sekali keunggulan. Salah satu jenis operasi pemisahan membran adalah dengan membran ultrafiltrasi. Ultrafiltrasi merupakan proses penyaringan partikel-partikel dalam rentang ukuran koloid, yaitu larutan dan molekul besar ditahan dipermukaan membran dan zat terlarut dengan ukuran sangat kecil dapat melewati membran. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan komposisi % berat dimetilformamida pada pembuatan membran ultrafiltrasi yang terbaik. Membran ultrafiltrasi ini dibuat dengan memvariasikan konsentrasi aditif dimetilformamida yang berfungsi untuk penentuan ukuran pori membran dan konsentrasi aseton. Pencampuran bahan dilakukan dengan pengadukan selama ± 6 jam, hasil cetakan film polimer dikoagulasi selama 1 jam dalam air es ($\pm 4^\circ\text{C}$) kemudian dicuci dengan air mengalir dan disimpan dalam wadah yang diberi formalin. Kemudian dilakukan pengujian pada membran tersebut menggunakan air gambut dimana permeat yang dihasilkan diukur volumenya setiap selang waktu 5 menit untuk menentukan fluks membrannya. Kemudian dilakukan analisa terhadap konsentrasi permeat untuk menentukan koefisien rejeksi, di mana rejeksi yang diharapkan adalah $> 90\%$. Berdasarkan hasil penelitian, membran ultrafiltrasi yang terbaik adalah membran dengan komposisi % berat dimetilformamida 20; 24 dan 28 dimana koefisien rejeksi rata-rata yang diperoleh masing-masing adalah 98,15; 92,80 dan 95,41%.

Kata kunci: dimetilformamida, koefisien rejeksi, fluks

PENDAHULUAN

Dewasa ini, kebutuhan akan air bersih sangat meningkat sehingga menuntut bagi sebagian orang untuk mencoba dan mencari suatu alternatif-alternatif lain yang dapat dilakukan demi pemenuhan kebutuhan akan air bersih. Saat ini, pengolahan air bersih dengan teknologi membran merupakan proses pengolahan yang sangat menjanjikan dengan kualitas yang sangat baik dan juga sesuai untuk pengolahan air minum di negara-negara berkembang karena membran memiliki banyak sekali keunggulan. Diantara keunggulan teknologi membran adalah kualitas air yang dihasilkan sangat baik, lebih sedikit menggunakan bahan kimia, mampu menghasilkan air dengan kualitas yang konstan, kemudahan dalam pengoperasian (otomatis), mampu menyisihkan bahan-bahan pencemar dalam rentang (*range*) yang besar, dan modular sehingga tidak memerlukan tempat yang luas.

Permasalahan yang dihadapi sekarang ini adalah mahalnya harga membran yang tersedia di pasaran yang mampu mengurangi keefektifan penggunaan membran tersebut dalam pengolahan air bersih. Salah satu jenis operasi pemisahan membran adalah dengan membran ultrafiltrasi, penelitian tentang pengolahan air permukaan menjadi air minum menggunakan teknologi membran ultrafiltrasi merupakan tahapan penting untuk menuju penyediaan air minum dengan kualitas yang sangat baik dan untuk mereduksi proses filtrasi membran yang sampai sekarang masih relatif lebih mahal dibanding pengolahan konvensional.

Ultrafiltrasi merupakan proses pemisahan dengan membran berdasarkan perbedaan tekanan, dimana komponen-komponen yang terpisah dalam cairan merupakan fungsi dari ukuran dan struktur komponen terlarut. Membran ultrafiltrasi pada prinsipnya digunakan untuk menahan koloid dan makromolekul tetapi melewatkan partikel garam dan air (Piluharto, 2003). Membran ultrafiltrasi secara komersial biasanya dibuat dari material polimer dan teknik pembuatan yang digunakan adalah teknik inversi. Polimer yang umum digunakan antara lain polisulfon, polietersulfon, poli(vinilidena fluoride), poli(akrilonitril) selulosa asetat, poliamida, poli(eter keton), dan lain sebagainya. Selain polimer, material anorganik seperti alumina (Al_2O_3) dan zirkonia (ZrO_2) juga mulai digunakan pada pembuatan membran ultrafiltrasi (Mulder, 1991).

Membran dapat dibuat dari berbagai material. Pemilihan polimer sebagai bahan baku membran dilakukan berdasarkan faktor strukturalnya. Faktor struktural ini akan menentukan sifat termal, kimia dan mekanik. Setiap faktor tersebut akan mempengaruhi sifat

instrinsik polimer, yaitu permeabilitas (Mulder, 1991). Selulosa asetat merupakan ester yang paling penting yang berasal dari asam organik. Sifat-sifat teknis selulosa asetat ditentukan oleh derajat substitusi yang berperan terhadap kecocokannya dengan pembuatan plastik maupun terhadap kelarutannya dalam pelarut. Kriteria kedua adalah derajat polimerisasi, yang dinyatakan dengan kekentalan. Selulosa asetat sangat berguna karena mudah larut dengan aseton, termoplastik, warna yang bagus dan stabil (Mark *et al.*, 1968). Selulosa asetat memiliki beberapa keuntungan sebagai membran didalam proses ultrafiltrasi antara lain selektifannya cukup tinggi sehingga materi-materi yang kecil pun dapat ditahan (Mulder, 1991).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dalam skala laboratorium dan dilaksanakan di Laboratorium Operasi Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Lambung Mangkurat Banjarbaru. Lama waktu penelitian yang diperlukan mulai dari persiapan hingga pelaporan adalah sekitar 4 bulan.

Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah pelat kaca yang kedua sisinya dilapisi plakban (*sealtape*), *magnetic stirrer*, *stopwatch*, neraca *ohauss*, gelas ukur 50 dan 10 mL, gelas *beaker*, bak air, spektrofotometri, pipet volume 5 mL, pipet gondok 25 dan 10 mL, erlenmeyer 100 mL, propipet, kompresor, gelas arloji, *hot plate*, sudip, kertas saring, pipet tetes, botol, aluminium *foil* dan rangkaian alat sel ultrafiltrasi *system dead-end*.

Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu selulosa asetat, pelarut aseton, aditif dimetilformamida, formalin, es batu, akuades dan air gambut.

Prosedur Penelitian Pembuatan Membran

Membran dibuat dari campuran bahan dengan komposisi 11% selulosa asetat, 20% aditif dimethylformamida dan 69% pelarut aseton. Campuran bahan tersebut diaduk dengan *magnetic stirrer* dalam erlenmeyer yang tertutup rapat sampai campuran bahan tersebut homogen selama 6 jam. Campuran yang telah homogen tersebut selanjutnya didiamkan selama 17 jam. Larutan *dope* tersebut kemudian dituangkan di atas kaca yang kedua sisinya telah dilapisi lakban (*sealtape*) dan diratakan. Larutan yang telah dicetak tersebut dibiarkan selama 30 detik kemudian dicelupkan dalam bak air es ($\pm 4^\circ C$) selama 1 jam hingga

membentuk lembaran membran yang tipis. Membran tersebut dicuci dengan air mengalir. Kemudian membran yang terbentuk disimpan dalam wadah yang berisi formalin. Mengulang langkah yang sama untuk konsentrasi aditif dimetilformamida yang divariasikan dengan *range* 20 sampai 48% dimetilformamida, sehingga ditemukan komposisi % berat bahan pembuat membran yang terbaik.

Pengujian Membran

1. Menentukan Fluks Membran

Membran yang telah dibuat kemudian diuji dengan menggunakan alat sel ultrafiltrasi *system Dead-end*. Membran yang telah dibentuk diletakkan pada dasar alat. Air gambut sebagai air sampel dimasukkan ke dalam tabung umpan sebanyak ± 150 mL. Pada alat operasi diberi tekanan operasi dari kompresor sebesar 2 bar sehingga air sampel akan mengalir melewati membran yang disebut *permeate*. *Permeate* yang keluar tersebut ditampung dalam gelas ukur setiap selang waktu 5 menit selama 1 jam kemudian dihitung volumenya untuk menentukan fluks membran (permeabilitas membran) dan merataratakannya. Melakukan sebanyak 3 kali pada membran yang berbeda pada variasi komposisi yang sama. Mengulangi langkah yang sama pada variasi komposisi pembuat membran lainnya.

2. Menentukan Koefisien Rejeksi

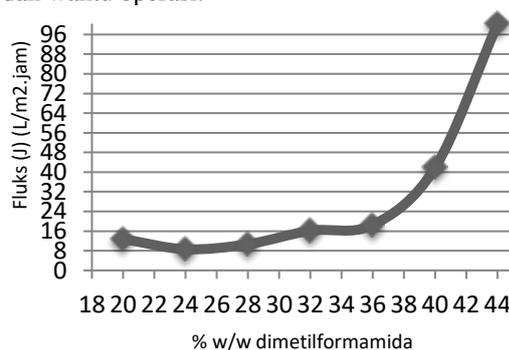
Pengukuran koefisien rejeksi dilakukan untuk mengetahui seberapa kemampuan membran untuk menahan atau melewatkan suatu spesi. *Permeate* yang diperoleh dari proses sebelumnya kemudian dianalisa menggunakan spektrofotometri pada panjang gelombang 254 nm untuk menentukan konsentrasi *permeate*, begitu juga dengan konsentrasi *retentate* yang tidak melewati membran yang akan digunakan untuk menentukan koefisien rejeksi, di mana koefisien rejeksi (R) yang diharapkan adalah lebih besar dari 90%. Mengulang langkah yang sama pada 2 sampel membran lain untuk tiap komposisi bahan pembuat membran kemudian merataratakan koefisien rejeksinya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemisahan dengan membran merupakan suatu teknik pemisahan campuran dua atau lebih komponen tanpa menggunakan panas. Komponen-komponen akan terpisah berdasarkan ukuran dan bentuknya, dengan bantuan tekanan dan selaput *semi-permeable*. Pada penelitian ini, air yang digunakan sebagai umpan adalah air gambut dari Landasan Ulin Km. 17 Kalimantan Selatan. Air gambut ini berwarna coklat tua, hal ini dikarenakan tingginya kandungan zat organik

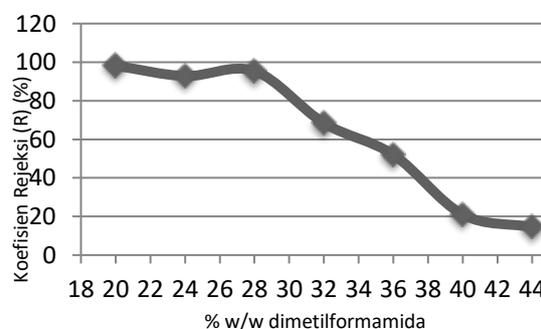
terlarut pada air gambut. Dari analisa spektrofotometri diketahui kandungan organik awal air gambut yaitu 2,725 yang menunjukkan tingginya kandungan organik pada air gambut tersebut.

Membran selulosa asetat ini dibuat dengan mencampurkan selulosa asetat, dimetilformamida dan aseton pada berbagai komposisi. Membran kemudian diuji dengan alat uji "*dead-end*". Harga fluks dan efisiensi rejeksi dipengaruhi oleh karakteristik membran tersebut. Adapun karakteristik membran meliputi komposisi membran, ketebalan membran, tekanan operasi, dan waktu operasi.



Gambar 1. Hubungan antara fluks terhadap % berat dimetilformamida

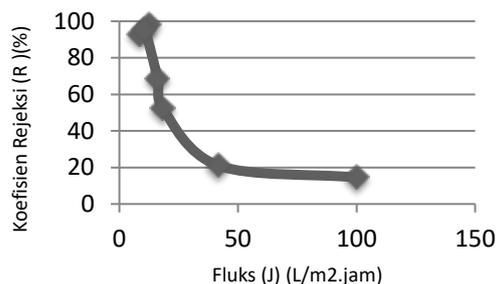
Fluks merupakan jumlah volume *permeate* yang melewati satu satuan luas membran dalam waktu tertentu karena adanya gaya dorong tekanan yang masuk ke dalam alat sel ultrafiltrasi. Pengujian fluks ini bertujuan untuk mengetahui permeabilitas membran yang dimaksudkan untuk melihat porositas membran tersebut. Berdasarkan Gambar 1 dapat dilihat bahwa semakin besar % berat dimetilformamida maka fluks yang diperoleh semakin tinggi, hal ini menunjukkan adanya ukuran pori-pori membran yang semakin besar. Hal ini sesuai dengan teori bahwa semakin besar porositas membran, maka nilai koefisien permeabilitas (fluks) semakin besar.



Gambar 2. Hubungan antara koefisien rejeksi terhadap % berat dimetilformamida

Koefisien rejeksi merupakan parameter permselektivitas. Pengujian koefisien rejeksi ini dilakukan untuk mengetahui ukuran kemampuan dari membran untuk menahan atau melewatkan zat-zat organik tertentu yang terkandung pada air gambut. Pada Gambar 2 menunjukkan bahwa semakin tinggi % berat dimetilformamida maka koefisien rejeksi akan semakin turun, hal ini disebabkan semakin banyaknya zat-zat organik yang dapat melewati membran karena ukuran pori membran yang semakin besar. Penurunan koefisien rejeksi ini menunjukkan semakin kecilnya permselektivitas dari membran tersebut.

Pada penelitian ini, nilai rejeksi yang harus dicapai dari membran filter yaitu lebih dari 90% yang menunjukkan bahwa zat-zat organik dalam air gambut ditahan oleh membran dengan sangat baik bahkan hampir sempurna. Pada Gambar 2 dapat dilihat bahwa membran dengan % berat dimetilformamida yang berkisar antara 20-28 % merupakan komposisi yang baik, dengan koefisien rejeksi berturut-turut yaitu 98,15; 92,8 dan 95,4%. Hal ini juga dapat dilihat dari hasil *permeate* yang tertampung di mana hasilnya lebih bersih dan jernih jika dibandingkan dengan *permeate* pada komposisi lainnya yang lebih keruh.

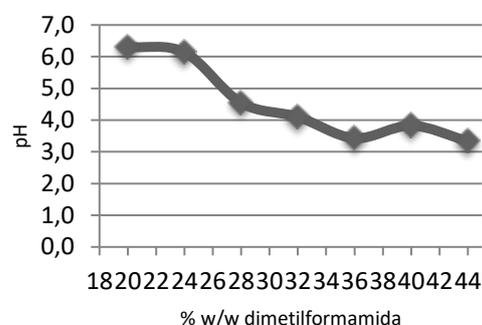


Gambar 3. Hubungan antara koefisien rejeksi terhadap fluks membran

Pada Gambar 3 dapat dilihat bahwa koefisien rejeksi dan fluks berbanding terbalik karena semakin tinggi koefisien rejeksi maka fluksnya akan semakin kecil. Hal ini dikarenakan nilai fluks yang tinggi disebabkan pori membran yang besar, sehingga koefisien rejeksinya kecil akibat semakin banyaknya zat-zat organik yang dapat melewati membran. Dari Gambar 3 dapat dilihat bahwa untuk koefisien rejeksi di atas 90% nilai fluksnya sangat rendah. Hal ini karena pori membran yang lebih kecil, sehingga zat-zat organik dapat tertahan pada permukaan membran dan menutupi pori-pori membran tersebut yang menyebabkan koefisien rejeksinya tinggi.

Pada komposisi % berat dimetilformamida 24%, fluks yang dihasilkan paling rendah. Hal ini menunjukkan bahwa pori-pori membran yang terbentuk sangat kecil. Pada komposisi ini,

koefisien rejeksi tidak sesuai dengan fluks yang didapat dimana seharusnya koefisien rejeksi yang didapat paling tinggi, hal ini ada kemungkinan disebabkan adanya sebagian zat-zat organik dengan ukuran yang sangat kecil dapat melewati membran, sehingga sangat berpengaruh terhadap konsentrasi *permeate*.



Gambar 4. Hubungan antara pH *permeate* terhadap % berat dimetilformamida

Air gambut memiliki pH yang rendah yaitu 2,84. Hal ini karena air gambut berada di daerah rawa, sehingga tingkat keasaman airnya tinggi. Pada penelitian ini, membran ultrafiltrasi ini cenderung menaikkan pH, hal ini dikarenakan adanya sebagian zat-zat organik, asam mineral, bakteri, senyawa-senyawa asam dan zat pengotor lain yang menyebabkan keasaman pada air, dapat tertahan pada permukaan membran sehingga *permeate* yang diperoleh pH-nya meningkat.

Dari Gambar 4 dapat diketahui bahwa semakin tinggi komposisi dimetilformamida maka pH *permeate* akan semakin asam. Untuk variasi komposisi membran dengan nilai koefisien rejeksi lebih dari 90%, pH *permeate* yaitu 6,3; 6,1 dan 4,5. Untuk variasi komposisi dimetilformamida 32-44%, nilai pH *permeate* cenderung masih asam dikarenakan zat-zat organik tidak tertahan dengan baik pada permukaan membran sehingga masih banyak zat-zat organik yang terdapat dalam *permeate*.

Salah satu kendala pada penelitian membran ini yaitu adanya *fouling*, penggunaan membran secara terus menerus dapat mengurangi efisiensi kinerja membran karena adanya penyumbatan. Semakin lama waktu operasi maka alur pola fluks semakin turun dikarenakan *fouling* pada permukaan membran. Pada penelitian ini, waktu operasi yang digunakan adalah 1 jam sehingga belum terbentuk adanya *fouling* yang berarti. Adanya pembentukan *fouling* dapat dilihat pada komposisi % berat dimetilformamida 44%, di mana *fouling* yang terbentuk lebih banyak jika dibandingkan dengan komposisi lain. Hal ini dikarenakan fluks yang tinggi, sehingga untuk waktu operasi 1 jam, volume umpan yang

diperlukan lebih besar yang mengakibatkan *fouling* terakumulasi pada permukaan membran. Adanya pembentukan *fouling* ini menyebabkan volume *permeate* yang dihasilkan semakin turun dengan semakin lamanya waktu operasi yang menunjukkan adanya peristiwa penyumbatan pada permukaan membran.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini dapat diambil beberapa kesimpulan, antara lain:

1. Komposisi bahan pembuat membran yang baik yaitu dengan komposisi dimetilformamid berkisar antara 20 – 28 %, dengan rejeksi masing-masing yaitu 98,15; 92,8 dan 95,4%.
2. Pengaruh konsentrasi aditif dimetilformamida terhadap pori membran yaitu semakin besar komposisi dimetilformamid maka pori membran akan semakin besar dan banyak sehingga fluks semakin tinggi dan rejeksi semakin turun.

DAFTAR PUSTAKA

- AOUSTIN, E., A. I. SCHÄFER, A. G. FANE AND T. D. WAITE. 2001. Ultrafiltration of natural organic matter. *Separation and Purification Technology*, 22-23:63-78.
- BAKER, R.W. 2004. *Membrane Technology and Application*. Second Edition. John Wiley & Sons, Ltd. England. p: 4-6.
- Beerlage, M.A.M, M.H.V Mulder, C.A Smolders, And H. Strathmann. 1993. Introduction: Ultrafiltration Membranes of Non-Aqueous System. *Journal Membrane Sel.* 25: 1-19.
- BOTTINO A., C. CAPANNELLI, A. D. BORGHI, M. COLOMBINO AND O. CONIO. 2001. Water treatment for drinking purpose: ceramic microfiltration application. *Desalination* 141:75-79.
- BUNGAY, P.M, H.K LONSDALE, AND M.N. DE PINBO. 1986. *Synthetic Membranes: Science, Engineering and Applications*. D. Reidel Publishing Company. Dordrecht, Holland. p: 1-25.
- CARROL, T., S. KING, S.R. GRAY, B.A. BOLTO AND N.A. BOOKER. 2000. The fouling of microfiltration membranes by NOM after coagulation treatment. *Water Research* 34(11):2861-2868.
- CHIEMCHAI SRI, C., W. CHIEMCHAI SRI, T. KORNBOONRAKSA. 2005. Particle and microorganism removal in floating plastic media coupled with microfiltration membrane for surface water treatment. *Water Science & Technology* 51(10):93-100.
- COULSON, J.M AND J.F. RICHARDSON. 2002. *Chemical Engineering: Particle Technology and Separation Processes*. Volume 2, Fifth Edition. Maxwell MacMillan, New York. p: 437-446.
- COUSIN, R.B. 2003. *Membrane Technology*. Departement of Chemical And Process Engineering University of Strathclyde. Glasgow, Scotland. pp: 21-37.
- FAN, L., J.L. HARRIS, F.A. RODDICK AND N.A. BOOKER. 2001. Influence of the characteristics of natural organic matter on the fouling of microfiltration membranes. *Water Research* 35(18):4455-4463.
- FENGEL, D AND G. WEGENER. 1995. *Kayu “ Kimia Ultrastruktur Reaksi”*. Terjemahan Hardono Sastrohamidjaja. Gajah Mada University Press. Yogyakarta. hal: 77-78.
- FIKSDAL, L. AND T. LEIKNES. 2006. The effect of coagulation with MF/UF membrane filtration for the removal of virus in drinking water. *Journal of Membrane Science* 279:364-371.
- HIDAYAT, W. 2007. *Teknologi Membran*. Diakses tanggal 18 Desember 2009 dari <http://majarimagazine.com>
- HENDRO, MARIO DAN RATIH SULASTNINGRUM. 2008. Pemisahan Kromium dan Nikel dari Limbah Cair Elektroplating dengan Proses Ultrafiltrasi. *Penelitian S-1 Teknik Kimia*. Universitas Diponegoro.
- IRVING, N DAN J.L RICHARD. 1987. *Hawley’s Condensed Chemical Dictionary*. Eleventh Edition. Van Norstrand Reinhold Inc. USA.
- JUNG, C.-W., H.-J. SON AND L.-S. KANG. 2006. Effects of membrane material and pretreatment coagulation on membrane fouling: fouling mechanism and NOM removal. *Desalination*, 197(1-3):154-164.
- KATAYON, S., M.J. MEGAT MOHD NOOR, W.K. TAT, G.A. HALIM, A.M. THAMER AND Y. BADRONISA. 2007. Effect of natural coagulant application on microfiltration performance in treatment of secondary oxidation pond effluent. *Desalination* 204:204-212.
- KOOLS, W.F.C. 1998. *Membrane Formation by Phase Inversion In Multicomponent Polymer System, Thesis*. University of Twente. Netherland. p: 2-3.
- LEE, N., G. AMY, J.-P. CROUE, H. BUISSON. 2004. Identification and understanding of fouling in low-pressure membrane (MF/UF) filtration by natural organic

- matter (NOM). *Water Research* 38:4511-4523.
- MADAENI, S. 1999. The application of membrane technology for water disinfection. *Water Research*, 33(2):301-308.A.
- MALLEVIALLE, J., P.E. ODENDAAL AND M.R. WEISNER. 1996. *Water Treatment Membrane Processes*. McGraw-Hill, New York, USA.
- MULDER, M. 1991. *Basic Principles of Membrane Technology*. Kluwer Academic Publisher. Netherland.
- WANG, J., J. GUAN, S.R. SANTIWONG AND T. DAVID WAITE. 2008. Characterization of floc size and structure under different monomer and polymer coagulants on microfiltration membrane fouling. *Journal of Membrane Science* in press.
- PILUHARTO. 2003. Kajian Sifat Fisik Film Tipis Nata de Coco Sebagai Membran Ultrafiltrasi. *Jurnal Ilmu Dasar Vol.4*. hal: 55
- PORTER, M.C. 1990. *Handbook of Industrial Membrane Technology*. Noyes Publication. New Jersey, USA. p: 2.
- REFINEL. 1995. *Studi Tentang Polarisasi Konsentrasi dan Penyumbatan Pori-Pori Membran pada Proses Mikrofiltrasi Larutan Indigobiru*. Program Pasca Sarjana ITB. Bandung. hal: 6.
- SIBARANI, S.O. 1994. *Penggunaan Sel Ultrafiltrasi Aliran Tangensial (Cross-Flow Ultrafiltration) Pada Proses Pemisahan Secara Kontinyu*. Jurusan Kimia FMIPA ITB. Bandung. p: 14-15.
- WEBER, W.J. 1972. *Ultrafiltration*. Wiley-Interscience. New York. p: 1-2.
- WEND C.F., P.S. STEWART, W. JONES AND A.K. CAMPER. 2003 Pretreatment for membrane water treatment systems: a laboratory study. *Water Research* 37:3367-3378.
- YAMAMURA, H., S. CHAE, K. KIMURA AND Y. WATANABE. 2007. Transition in fouling mechanism in microfiltration of a surface water. *Water Research* 41:3812-3822.
- YUAN, W. AND A.L.ZYDNEY. 1999. Humic acid fouling during microfiltration. *Membrane Science*, 157(1):1-12.
- YUASA, A. 1998. Drinking water production by coagulation-microfiltration and adsorption-ultrafiltration. *Water Science & Technology*, 37(10):135-146.