ISSN : 1693 - 1750

DISINFEKSI AIR MINUM DENGAN MENGGUNAKAN MEMBRAN ULTRAFILTRASI

Suprihatin, M. Romli, N. S. Indrasti
Departemen Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian IPB
Kampus IPB Darmaga, PO. Box 220 Bogor
Telp/Fax: 0251 – 621 974, e-mail: suprihatin@indo.net.id

Abstract

Chlorination has been used widely in water supplies to protect public health from waterborne diseases. While this technique has proven effective, researches show the process of chlorinating water can result in formation of disinfection by-products. The health effects of some of these by-products are of little concern, but some are suspected to be carcinogenic or have other health effects and are therefore subject to regulation in developed countries. Chlorination of water containing natural organic matter and synthetic organic compounds, for example, can result in the formation of disinfection by-products such as trihalomethanes and haloacetic acids. An alternative disinfection approach for complying with disinfection by-product requirements would be the membrane ultrafiltration This research work investigated the ability of dimethylacetamide (DMAc) membrane ultrafiltration with MWCO of app. 69,000 Da to remove pathogen-indicator organism (Escherichia coli). The membrane was able to produce clean, clear, and particle free permeate. The filtrate contained no pathogen-indicator organism (E. coli). The membrane process can therefore be considered as an effective approach of drinking water disinfection, while avoiding by-product formation. Stable fluxes of more than 120 L/m^{2}h can be achieved.

Key words: *drinking water disinfection, disinfection by-product, ultrafiltration membrane filtration; pathogen-indicator microorganism*

Pendahuluan

Disinfeksi merupakan tahapan kritis dalam proses pengolahan air minum. Disinfeksi dimaksudkan untuk membunuh atau meng-inaktifkan mikroorganisme patogen di dalam air tersebut. Bakteri patogen penting yang sering dijumpai di dalam air minum adalah *Salmonella*, *Shigella*, *E. Coli* enterotoksigenik, *Campylobacter*, *Vibrio* dan *Yersinia*. Persyaratan air minum telah ditetapkan bahwa kandungan bakteri koliform maupun E. Coli harus 0 per 100 mL.

Metode disinfeksi yang sejak bertahun-tahun telah diaplikasikan pada instalasi pengolahan air adalah disinfeksi dengan menggunakan kaporit atau klor (klorinasi). Meskipun klorinasi sangat efektif untuk disinfeksi air minum, karena sangat sederhana dan biaya murah, tetapi klorinasi dapat menyebabkan gangguan kesehatan secara tidak langsung akibat dari efek produk samping disinfeksi (desinfection by-products), yaitu senyawa-senyawa yang terbentuk jika klorin bereaksi dengan bahan-bahan organik terdapat secara alami di dalam air atau senyawa-senyawa hasil dekomposisi vegetasi atau hewan. Tipikal produk samping disinfeksi yang di negara maju (misalnya di USA) telah ditetapkan batas maksimum konsentrasinya adalah senyawa trihalometan ($CHCl_3$), yaitu senyawa karsinogenik atau senyawa yang memicu kanker. Sejalan dengan perkembangan jaman, dimana era industri dan era telematika telah bergeser ke era *human life*, dimana isu kesehatan terutama usaha preventif / pencegahan penyakit (bukan pengobatan) menjadi topik yang semakin penting, klorinasi air minum yang semula dianggap sebagai 'obat dewa' dalam disinfeksi air minum mulai ditengarai bahayanya. Studi pada inaktivasi mibroba baru-baru ini selain pada mikroba-mikroba patogen difokuskan pada usaha pencegahan / minimisasi timbulnya produk samping dan juga pada usaha optimasi biaya pengolahan.

Salah satu alternatif proses disinfeksi air minum yang tidak membentuk hasil samping disinfeksi adalah proses membran filtrasi, yaitu penggunaan lapisan semipermiable (membran) untuk memisahkan bahan-bahan dengan pengenaan tenaga penggerak berupa perbedaan tenakanan antara sisi permeat dan sisi konsentrat (tekanan transmembran). Beberapa tahun yang lalu teknologi membran hanya diperhatikan untuk desalinasi air laut, namun belakangan ini perhatian dan penggunaan proses membran semakin

ISSN : 1693 - 1750

meningkat untuk mengiliminasi bakteri dan mikroorganisme lainnya, bahan partikulat dan bahan organik penyebab warna, rasa dan bau pada air. Aplikasi teknologi membran untuk disinfeksi secara teknis dan ekonomis sangat kompetitif karena memiliki berbagai keunggulan, antara lain: kualitas permeat stabil meskipun karakteristik umpan bervariasi, tidak memerlukan bahan kimia, proses berlangsung cepat, mudah dalam pengoperasian dan penggadaan skala (*scale up*), tidak memerlukan banyak tempat (*compact*), dan dapat menahan semua jenis padatan teruspensi termasuk bakteri dan virus. Keunggulan-keunggulan tersebut telah laporkan oleh beberapa peneliti, misalnya Rautenbach dan Vassenkaul (1998), Schmidt (1998), dan Madaeini et al (1995).

Hambatan utama penerapan proses membran filtrasi adalah masih tingginya harga membran, karena membran filtrasi harus diimpor dengan harga tinggi. Oleh karena itu, untuk dapat memanfaatkan tingginya nilai ekonomi membran filtrasi dan untuk memanfaatkan keunggulan proses membran filtrasi guna mendukung perkembangan industri di dalam negeri, maka perlu pengembangan proses pembuatan membran ultrafiltrasi. Dengan demikian, diharapkan masalah ketergantungan pada membran filtrasi impor dapat diatasi. Paper ini menyajikan hasil ujicoba disinfeksi air minum dengan menggunakan membran yang disiapkan sendiri di laboratorium.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengkaji kinerja membran filtrasi berbahan polimer polisulfon dan pelarut *N,N-Dimetilacetamid* (DMAc) untuk disinfeksi air minum, meliputi pengukuran fluks dan rejeksi terhadap kontaminan air, serta kualitas permeat yang dihasilkan dengan fokus kajian pada parameter fisik (kekeruhan dan warna) dan parameter mikrobiologis (*Escherichia Coli*).

Bahan dan Metode Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah polisulfon, *N,N-Dimetilacetamid (DMAc)*, albumin, aquades. Polisulfon yang digunakan diperoleh dari ALDRICH *Chemical Company, Inc.* USA dengan spesifikasi: *Typical* Mn 26 000 (MO); Tg 190,0°C; *Reduced viscosity* 0,48 –0,520 dL/g (0,2 % w/v in $CHCl_3$, 25°C); *Melt index* 3.50 g/10 min (343°C/0,3 Mpa, ASTM D 1238). DMAc yang digunakan memiliki karakteristik: minimum 99 % CAS 127-19-5; C_4H_9NO; FW 87.12; Fp 70°C (158°F); bp 164.5-166°C / 760 mmHg; mp -20°C; d 0,937; beracun dan higroskopis.

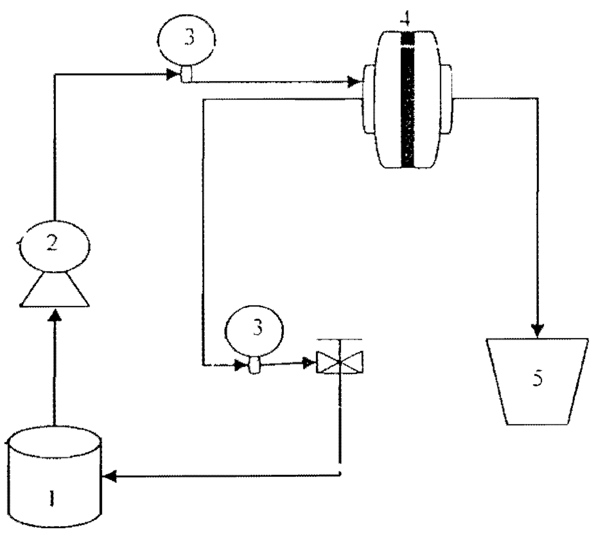
Peralatan untuk penelitian meliputi erlenmeyer, gelas ukur, *glass plate* 10 cm x 25 cm, aplikator, baki plastik, sudip, neraca analitik, mikrometer, cawan petri, cawan alumunium, cawan pengabuan, corong, kertas saring (no. 41), pipet, penjepit, kuvet, pH meter, otoklaf, inkubator, spektrofotometer, oven pengering, oven pengabuan (tanur), dan desikator.

Membran filtrasi yang dikaji dalam penelitian ini adalah membran yang dibuat sendiri di laboratorium dengan bahan polisulfon sesuai dengan metode inversi fasa (Mulder, 1996). Sejumlah polisulfon ditimbang dan dimasukkan ke dalam erlenmeyer, kemudian dicampur dengan pelarut DMAc dan ditutup dengan alumunium foil untuk menghasilkan larutan polisulfon 11% (b/v). Proses pencampuran dilakukan di lemari asam. Setelah itu, larutan disimpan di dalam lemari es selama ± 24 jam. Setelah semua kristal polisulfon larut, erlenmeyer dikocok sampai larutan homogen. Proses pencetakan membran dilakukan dengan cara menuangkan larutan polisulfon ke atas *glass plate*, kemudian larutan ditarik dengan menggunakan aplikator untuk membentuk lapisan tipis (membran). Setelah itu, *glass plate* segera dimasukkan ke dalam baki plastik yang berisi aquades sehingga terbentuk membran (proses koagulasi). Membran yang dihasilkan adalah membran datar berupa lembaran tipis dengan ketebalan 0,05 mm. Membran yang telah terbentuk kemudian disimpan dalam aquades untuk mempertahankan membrane tetap dalam kondisi basah.

Karakterisasi membran filtrasi yang diteliti dilakukan dengan pengukuran fluks dan rejeksi dengan menggunakan umpan air bebas partikel dan larutan albumin. Percobaan dilakukan dengan cara mensirkulasikan larutan umpan melalui permukaan membran pada berbagai tekanan, yaitu 0,7, 1,4, dan 2,1 bar. Selanjutnya membran polisulfon diaplikasikan untuk disinfeksi air minum. Percobaan filtrasi dilakukan sesuai dengan mode aliran silang (crossflow), yaitu dengan cara mensirkulasikan larutan umpan dengan kecepatan 0,4 m/s selama 60 menit pada 3 taraf tekanan, yaitu 0,7, 1,4, dan 2,1 bar. Pengukuran tekanan berdasarkan rata-rata nilai tekanan dari dua *pressure gauge*. Air hasil penyaringan (permeat) diukur volumenya dengan interval waktu 5 menit dan lama filtrasi 60 menit pada tiap taraf tekanan. Skema rangkaian alat operasi filtrasi membran dapat dilihat pada Gambar 1. Membran filtrasi yang dikaji dalam penelitian ini berbentuk plate dengan luas permukaan 0,0025 m^2.

Parameter utama pengamatan meliputi kinerja membran filtrasi (fluks dan tingkat rejeksi) dan kualitas permeat, mencakup parameter kekeruhan, warna, dan parameter mikrobiologis (*E. coli* dan *Total Plate Count* /TPC). Penanganan sampel air dilakukan secara aseptis untuk menghindari terjadinya kontaminasi sampel oleh bakteri lain.

ISSN : 1693 - 1750



Keterangan:
1. Wadah umpan
2. Pompa umpan
3. Alat pengukur tekanan (*pressure gauge*)
4. Modul membran
5. Wadah permeat

Gambar 1. Peralatan uji coba kenerja membran ultrafiltrasi untuk disinfeksi air minum

Membran polisulfon 11% memiliki nilai rejeksi terhadap albumin berkisar 91-94% pada tekanan 0,7-2,1 bar, yang berarti bahwa membran yang dihasilkan memiliki MWCO sekitar 69.000 Da (ultrafiltrasi). Nilai rejeksi terhadap larutan albumin cenderung menurun dengan menurunnya konsentrasi polisulfon dan meningkatnya tekanan (Tabel 1).

Tabel 1. Karakteristik membran filtrasi polisulfon 11%

Tekanan Transmembran (bar)	Fluks Air (L/m^2.jam)	Fluks pada filtrasi larutan Albumin 500 ppm (L/m^2.jam)	Rejeksi terhadap Albumin (%)
0,7	396 ± 32	168 ± 3	93,81 ± 1,83
1,4	424 ± 21	165 ± 3	93,32 ± 1,06
2,1	408 ± 21	156 ± 5	92,97 ± 1,69

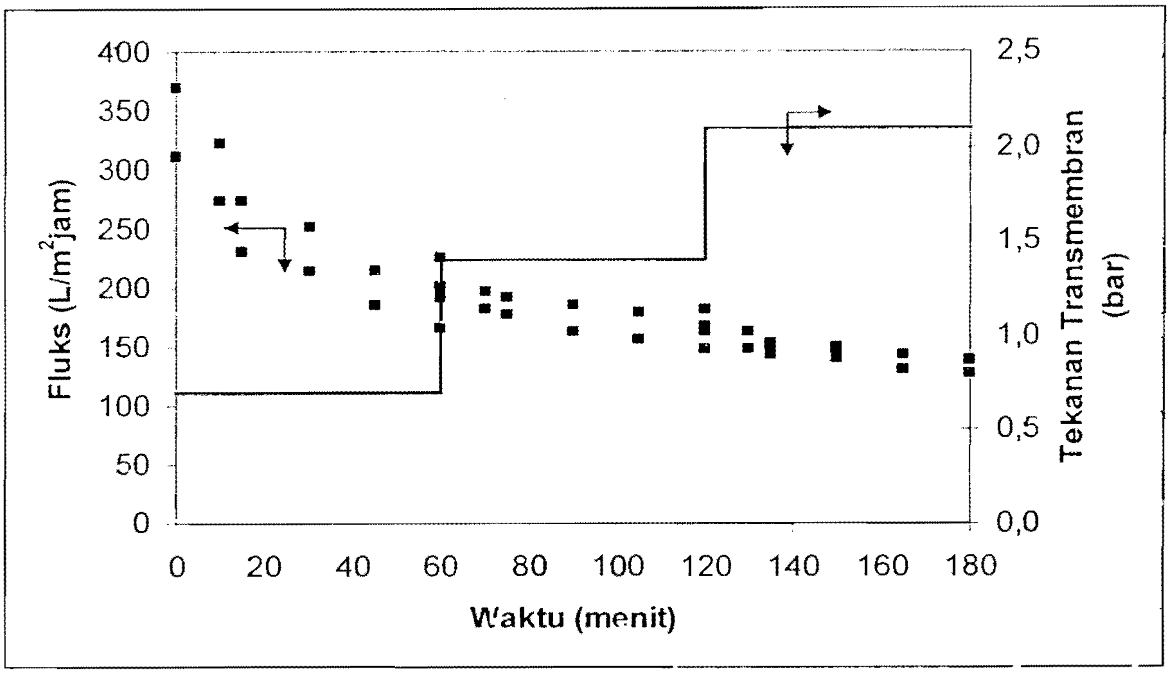
Hasil dan Pembahasan

Fluks

Salah satu parameter penting kinerja proses membran filtrasi adalah fluks, karena nilai fluks menentukan luasan membran yang diperlukan. Gambar 2 menunjukkan perubahan fluks membran filtrasi polisulfon 11% selama operasi. Dari gambar tersebut terlihat bahwa dengan meningkatnya waktu operasi nilai fluks semakin menurun. Hal ini terjadi karena kotoran – kotoran yang terdapat dalam air umpan terdorong ke permukaan membran akibat aliran permeat, sehingga kotoran dalam air menutupi sebagian permukaan membran dan fluks mengalami penurunan.

Pada kasus tersebut teramati adanya penurunan fluks secara cepat pada awal waktu operasi dan setelah sekitar 30-60 menit fluks mencapai kondisi mendekati tunak (fluks tidak menurun lebih lanjut). Peningkatan tekanan transmembran dari 0,7 menjadi 1,4 bar dan dari 1,4 menjadi 2,1 bar tidak menyebabkan peningkatan nilai fluks secara signifikan. Nilai fluks yang stabil terjadi pada tingkat sekitar 120 - 130 L/m^2jam.

ISSN : 1693 - 1750



Gambar 2. Fluks membran filtrasi polisulfon 11% selama waktu operasi pada berbagai tekanan transmembran

Parameter Fisik

Parameter fisik penting air minum mencakup kekeruhan (*turbidity*) dan warna (*color*). Kekeruhan merupakan karakteristik yang terlihat pertama kali tentang air. Air tampak keruh, jika dalam air tersebut terdapat partikel-partikel koloid. Pengukuran kekeruhan dilakukan dengan mengukur transmisi cahaya menggunakan sumber cahaya standar. Uji tersebut sangat berguna dalam penentuan kualitas air dalam pengolahan air minum. Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1, kualitas permeat yang dihasilkan proses membran ini dapat mencapai 0 NTU. Persyaratan air minum menurut Keputusan Menkes No. 907/MENKES/SK/VII/2002 adalah 5 NTU.

Tabel 1. Hasil uji kekeruhan dan warna air sebelum (umpan) dan sesudah (pemcat) filtrasi dengan membran polisulfon 11 %

Sampel	Kekeruhan (NTU)		Warna (TCU)	
	Ulangan 1	Ulangan 2	Ulangan 1	Ulangan 2
Umpan	1	1	6	6
Permeat filtrasi pada 0,7 bar	0	0	3	2
Permeat filtrasi pada 1,4 bar	0	0	3	2
Permeat filtrasi pada 2,1 bar	0	0	3	2

Selain kekerruhan, parameter penting air minum adalah warna. Banyak warna yang bergabung dengan air bukan merupakan warna sejati, tetapi hasil dari suspensi koloid. Warna sejati dihasilkan dari bahan-bahan terlarut, biasanya bahan organik. Sebagian besar warna dalam air alami disebabkan oleh tanin terlarut yang tersekstrak dari proses pembusukan tanaman, yang menghasilkan warna kecoklatan. Beberapa limbah industri berwarna dan jika tidak ditangani dengan tepat dapat berkontribusi terhadap warna air badan air penerima yang digunakan sebagai air baku dalam instalasi pengolahan air bersih / air minum. Pengotor penyebab warna dalam air umumnya tidak dapat dihilangkan seratus persen dengan

ISSN : 1693 - 1750

teknologi standar pengolahan air (misalnya yang diterapkan oleh kebanyakan Perusahaan Daerah Air Minum/PDAM). Pada penelitian ini diperoleh hasil bahwa dengan membran ultrafiltrasi sekitar 69.000 Da warna air dalam sampel tersebut tidak dapat dihilangkan seratus persen, tetapi dapat diturunkan hingga 2 – 3 TCU.

Parameter Mikrobiologis

Air minum berkualitas baik, jika air tersebut bebas dari mikrooragnisme patogen, seperti virus, protozoa, dan cacing. Pengujian mikrorganisme secara spesifik, seperti *Salmonella typhosa* (penyebab tipus), dan *Enthamoeba hystolica* (penyebab desentri) sangat rumit dan tidak praktis serta membutuhkan waktu dan biaya tinggi. Pendekatan praktis yang umum digunakan didasarkan pada pemikiran bahwa jika air dalam air contoh mengandung mikroorganisme, maka dapat diasumsikan bahwa air tersebut 'mungkin' tercemar oleh organisme patogen dan dapat merupakan ancaman bagi kesehatan manusia.

Sebagian besar kelompok bakteri koliform sebenarnya tidak patogen dan selalu terdapat di dalam sistem pencernaan manusia. Jutaan bakteri koliform keluar bersama kotoran manusia, sehingga air yang terkontaminasi oleh kotoran manusia selalu mengandung koliform. Spesies koliform yang terdapat di dalam sistem pencernaan manusia adalah jenis *E. coli*, yang sebenarnya tidak mengganggu kesehatan, kecuali *E. Coli* O157:H7 yang belakangan ini semakin meningkat diperhatikan sebagai bakteri patogen dalam air minum.

Seorang yang sedang mengidap penyakit tertentu selain mengekskresikan *E. coli* juga dapat mengekskresikan organisme patogen. Oleh karena *E. coli* relatif lebih *survive* di dalam air dibanding dengan kebanyakan bakteri patogen, maka secara umum dapat dikatakan bahwa "jika dalam air sampel tidak ditemukan bakteri koliform, maka air tersebut tidak tercemar oleh kotoran manusia, dan dengan demikian mikroorganisme patogen hampir dapat dipastikan tidak ada di dalam air tersebut" atau sebaliknya "Jika bakteri koliform ditemukan dalam contoh air, ada kemungkinan bahwa air tersebut tercemar kotoran manusia" (Nathanson, 1997).

Tabel 2 menunjukkan perbandingan konsentrasi mikroba dalam sampel air sebelum dan sesudah difiltrasi dengan membran polisulfon 11%. Permeat filtrasi baik pada tekanan 0,7, 1,4 maupun 2,1 bar tidak mengandung bakteri *E. Coli*, dan bakteri lainnya. Berdasarkan hasil penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa membran 69.000 Da dapat digunakan untuk disinfeksi air minum. Pemisahan mikroba tersebut terjadi karena ukuran mikroba lebih besar daripada ukuran pori membran ultrafiltrasi. Sebagai ilustrasi, ukuran pori membran ultrafiltrasi 0,01 µm dan mikrofiltrasi sekitar dan 0,2 µm sedangkan ukuran Bacillus substilis 0,3 µm, *E. Coli* 0,5-1,5 µm, dan kriptosoridin 5-7 µm (Schelling, Groemping dan Kollbach, 1998), Adenovirus (Hepatitis A dan E) 0,06-0,09 µm dan enterovirus (polio) 0,02 µm (Schmidt, 1998).

Tabel 2. Hasil uji mikrobiologis air sebelum (umpan) dan sesudah (pemeat) filtrasi dengan membran polisulfon 11%

Sampel	Total Plate Count /*TPC (jumlah/100 mL)*	E. coli (jumlah/100 mL)
Umpan	$1,32 \times 10^4$	$1,68 \times 10^2$
Permeat filtrasi pada 0,7 bar	Negatif	Negatif
Permeat filtrasi pada 1,4 bar	Negatif	Negatif
Permeat filtrasi pada 2,1 bar	Negatif	Negatif

Kualitas Permeat

Tabel 3 menunjukkan rangkuman karakteristik air hasil filtrasi dengan membran polisulfon 11% hasil preparasi sendiri di laboratorium. Sebagai pembanding disajikan juga hasil percobaan dengan dengan membran mikrofiltrasi komersial berbahan polipropilena berbetuk hollow fibre dengan ukuran pori 100.000 Da dan luas area 0,5 m². Sebagaimana didiskusikan di atas, berbagai bahan pengotor dengan

ISSN : 1693 - 1750

ukuran lebih besar dari ukuran pori membran akan ditahan oleh membran. Hal ini ditunjukkan oleh adanya peningkatan kejernihan air atau penurunan warna air. Kekeruhan dan warna air yang dihasilkan oleh membran polisulfon 11% adalah 0 NTU dan 2-3 TCU sedangkan hasil membran mikrofiltrasi komersial menunjukkan nilai masing-masing 1 NTU dan 3 TCU. Dengan membran ultrafilitrasi maupun mikrofiltrasi dihasilkan permeat yang tidak mengandung *E. Coli*. Hasil ini menunjukkan bahwa ditinjau dari parameter tersebut air hasil filtrasi memenuhi persyaratan air minum sesuai PERMENKES No. 907/MENKES/SK/VII/2002.

Tabel 3. Kualitas permeat membran ultra- dan mikrofiltrasi dibandingkan baku mutu air minum

Parameter	Satuan	Membran Buatan Sendiri (Ultrafiltrasi)		Membran Komersial (Mikrofiltrasi)		Baku mutu*)
		Umpan	Permeat	Umpan	Permeat	
Warna	TCU	6	2,5	8	3	15
Kekeruhan	NTU	1	0	1	1	5
Total bakteri (TPC)	Jumlah/100 mL	$1,32 \times 10^4$	0	tda	tda	---
Total koliform	Jumlah/100 mL	tda	tda	$2,00 \times 10^1$	0	0
Bakteri *E. coli*	Jumlah/100 mL	$1,68 \times 10^2$	0	$1,00 \times 10^1$	0	0

Keterangan: *)Nilai baku mutu sesuai PERMENKES No. No. 907/MENKES/SK/VII/2002; tda = tidak dianalisa

Proses membran merupakan proses fisik murni, sehingga kekawatiran akan terbentuknya senyawa hasil samping proses disinfeksi yang berpotensi merugikan kesehatan seperti senyawa trihalometan ($CHCl_3$) sebagaimana terbentuk pada disinfeksi dengan klorinasi tidak akan terjadi pada proses membran. Hal ini dapat dianggap sebagai keunggulan proses membran untuk disinfeksi air minum dibandingkan dengan klorinasi.

Diskusi di atas dibatasi pada membran ultra- dan mikrofiltrasi, nanofiltrasi dan reverse osmosis tidak bahas. Pada kesempatan ini perlu disebutkan bahwa penerapan kedua jenis membran yang terakhir disebutkan dapat selain memisahkan partikel, bakteri, dan virus juga dapat memisahkan bahan-bahan organik sintetik terlarut, seperti pestisida (Rautenbach dan Vassenkaul, 1998). Hal ini dapat dipandang sebagai potensi aplikasi kedua jenis membran tersebut dalam pengolahan air minum, terutama untuk eliminasi bahan-bahan organik sintetik yang berpotensi mengganggu kesehatan manusia.

Kesimpulan

Pada proses ultrafiltrasi air minum dengan membran polisulfon 11% diperoleh nilai fluks stabil sekitar 120-130 $L/m^2.jam$ pada tekanan 0,7-2,1 bar dan kecepatan crossflow 0,4 m/s. Membran ultrafiltrasi tersebut (MWCO ≈ 69.000 Da) dapat digunakan untuk disinfeksi air minum. Permeat yang dihasilkan bersih dan jernih (tidak mengandung padatan tersuspensi), serta tidak mengandung bakteri *E. Coli* dan mikroorganisme air lainnya, sehingga membran ultrafiltrasi dapat dipandang sebagai proses yang baik untuk memisahkan mikroorganisme patogen dan partikel-partikel lainnya dalam air minum, dan pada kondisi tertenntu dapat untuk menggantikan disinfeksi air minum konvensional, misalnya klorinasi, ozonisasi atau penyinaran dengan UV.

Ucapan Terima Kasih

Paper ini merupakan bagian dari hasil Penelitian Hibah Bersaing Perguruan tinggi yang dibiayai oleh Direktorat Pembinaan Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat, Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Departemen Pendidikan Nasional. Untuk itu, disampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya. Terima kasih juga disampaikan kepada Sdri. Retnayu Puntoajeng dan Sdr. M. Putra Siburian yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian ini.

Daftar Pustaka

1. Chiemchaisri, W. , Chart Chiemchaisri, C. and Chitlada Dumrongsukit, D. Virus And Bacteria Removal By Floating Plastic Media Pre-Filter Coupled With Microfiltration. Proceeding of the

ISSN : 1693 - 1750

Regional Symposium on Membrane Science and Technology: Membrane Technology for Industry and Environment. Bandung, 26-27 April 2005

2. Madaeini, S.S., A.G. Fane, G.S. Grohmann. 1995. Virus removal from water and wastewater using membranes J. Membrane Sci. 102 (1995) p. 65-75
3. Mulder,M. 1996. Basic Principles of Membrane Technology, 2nd ed. Kluwer Academic Publisher, Doldrech, Germany.
4. Nathanson, J. A. 1997. Basic Environmental Technology, 2nd ed. Prentice Hall, New Jersey
5. Rautenbach. R. dan Vassenkaul, K. 1998. Wirtschaftliche Perspektiven der Membranfiltration in der Trinkwasseraufbereitung. UTA 6, p. 396-407
6. Schmidt, J. 1998. Ultrafiltration in der Trinkwasseraufbereitung. WLB Wasser, Luft und Boden 7-8, p. 26-31
7. Schelling, S., Groemping, M. dan Kollbach, J. S. 1998. Perspektiven und Grenzen der Membranbiologie fuer di kommunale und inudtrielie Abwasserbehandlung. WLB Wasser, Luft und Boden 7-8, p. 34-37