

KARAKTERISTIK INTERAKSI MEMBRAN-FOULANT DAN FOULANT-FOULANT SEBAGAI DASAR PENGENDALIAN FOULING

Heru Susanto^{*}), Asteria Apriliani Susanto, dan I Nyoman Widiasta

Membrane Research Center, Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudarto, SH, Tembalang, Semarang, Telp. (024) 7460058, Fax. (024) 76480675

^{*}Penulis korespondensi: heru.susanto@undip.ac.id

Abstract

THE CHARACTERISTICS OF MEMBRANE-FOULANT AND FOULANT-FOULANT INTERACTIONS AS THE BASIS FOR CONTROL OF FOULING. *Industrial membrane applications for solid liquid and liquid-liquid filtration are limited by fouling and concentration polarization. Because fouling significantly reduces the membrane performance and often changes the membrane selectivity, efforts to overcome the fouling problem are very important from practical applications point of view. This paper presents the basic knowledge required to control fouling and recent development in fouling control including the method developed by the author. Control of fouling can be done by (i) commercial membrane modification (post modification) by photo-graft polymerization, (ii) modification by polymer blending during membrane manufacturing and (iii) integration of a pretreatment into membrane processes. The results showed that all the developed methods can significantly reduce the resulting fouling; however, none of the method could totally remove the occurring fouling. The understanding of the membrane-foulant and foulant-foulant interactions is the key to success in control of fouling.*

Keywords: *control of fouling; foulant; membrane; membrane modification*

Abstrak

Aplikasi teknologi membran untuk pemisahan padat cair di berbagai industri dibatasi oleh peristiwa fouling yang menyebabkan penurunan laju produk dan perubahan selektifitas membran. Oleh karena itu, pengendalian fouling merupakan upaya yang mutlak harus dilakukan. Makalah ini mempresentasikan pengetahuan dasar yang diperlukan untuk pengendalian fouling dan perkembangan terkini dalam pengendalian fouling termasuk hasil-hasil yang telah dikembangkan oleh penulis. Pengendalian fouling dilakukan dengan (i) modifikasi membran komersial (post modification) menggunakan metode photo-grafting, (ii) modifikasi dengan pencampuran polimer selama proses pembuatan (polymer blend) dan (iii) integrasi unit perlakuan awal (pre-treatment) dengan proses membran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kesemua metode yang dikembangkan dapat mengurangi terjadinya fouling secara signifikan. Namun, tidak ada satu pun metode yang dapat mengurangi fouling dengan sempurna. Pemahaman terhadap interaksi membran-foulant dan foulant-foulant merupakan kunci sukses dalam pengendalian fouling.

Kata kunci: *pengendalian fouling; foulant; membran; modifikasi membran*

PENDAHULUAN

Dalam tiga dasa warsa terakhir, membran telah menunjukkan sebagai teknologi yang menjanjikan di dalam banyak aplikasi industri seperti pengolahan air, pengolahan limbah cair, industri makanan dan minuman juga industri kedokteran dan farmasi. Membran merupakan lapisan tipis diantara dua fasa yang bersifat selektif permeabel dan berfungsi mengatur perpindahan komponen pada dua

kompartemen yang berdekatan tersebut. Keuntungan utama penggunaan teknologi membran dibandingkan dengan unit-unit operasi konvensional adalah prinsip pemisahannya yang unik (*sieving mechanism* atau *solution-diffusion*) (Susanto dan Ulbricht, 2009). Dengan mekanisme ini proses pemisahan dengan membran tidak membutuhkan bahan kimia aditif, beroperasi secara isothermal pada temperatur kamar dan konsumsi energi yang lebih rendah. Selain itu

proses *upscaling*, *downscaling* dan pengintegrasian pada proses lain untuk intensifikasi proses mudah dilakukan.

Seiring dengan semakin meluasnya aplikasi teknologi membran, fouling-deposisi *foulant* (komponen penyebab fouling) pada permukaan dan atau pori-pori membran-merupakan kelemahan utama dari teknologi ini. Fouling menyebabkan penurunan fluks permeat sebagai produk dan perubahan selektifitas membran. Pada akhirnya, fouling tidak hanya menurunkan kinerja proses tetapi juga memperpendek umur membran karena pencucian yang sering dilakukan. Oleh karena itu, usaha-usaha untuk memecahkan permasalahan fouling mendapat perhatian yang serius pada penelitian-penelitian teknologi membran. Makalah ini mereview secara singkat perkembangan terkini dalam studi fouling dan pengendaliannya serta menyajikan hasil-hasil penelitian yang telah dilakukan penulis dalam pengendalian fouling.

FOULING DAN FILOSOFI PENGENDALIANNYA

Fouling merupakan peristiwa kompleks hasil interaksi antara membran (termasuk di dalamnya pori-pori membran) dan komponen dalam umpan (pelarut, solut, partikel, makromolekul) dan juga antara *foulant* (komponen/solut/partikel yang menyebabkan terjadinya fouling) teradsorpsi dengan komponen lain yang ada dalam umpan. Secara umum, peristiwa fouling dipengaruhi oleh karakteristik membran, karakteristik umpan dan kondisi operasi (Cheryan, 1998; Mulder, 1996). Karakteristik membran yang mempengaruhi fouling adalah hidrofilitas, muatan, topografi permukaan dan struktur pori. Karakteristik umpan yang mempengaruhi fouling meliputi konsentrasi, muatan, hidrofilitas dan struktur fisik. Selain itu kandungan ion, pH larutan dan jenis kation merupakan karakteristik umpan yang dapat berkontribusi terhadap perilaku fouling. Tingkat fouling juga dipengaruhi kondisi operasi seperti temperatur, laju alir dan tekanan.

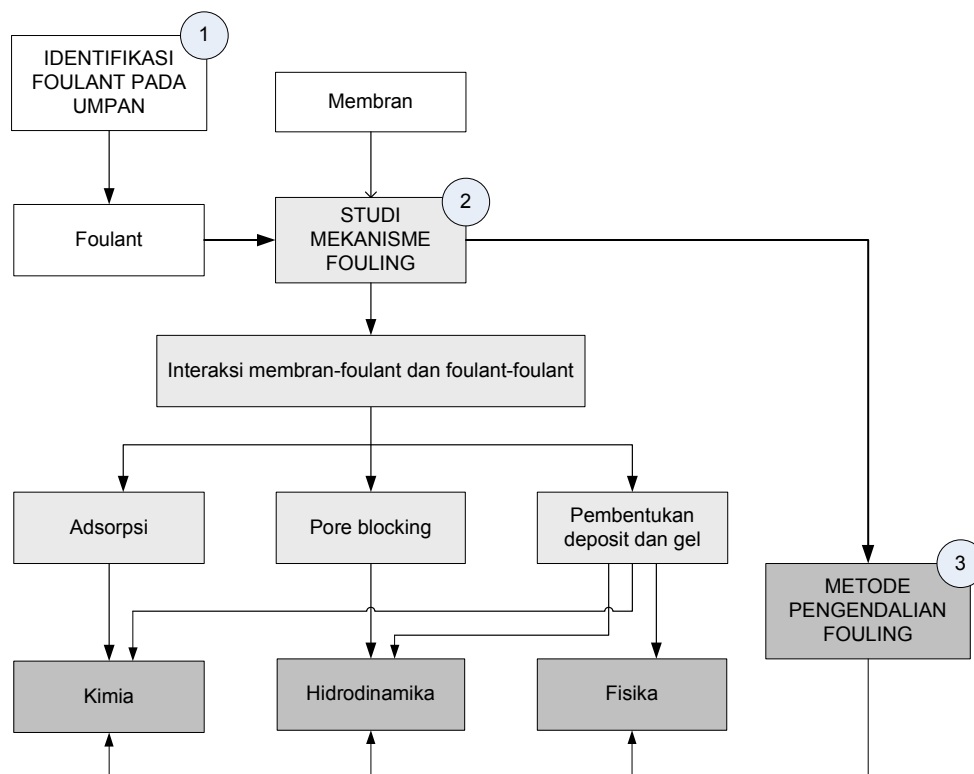
Banyak metode pengendalian fouling telah dikembangkan yang secara umum dapat dikelompokkan menjadi tiga, yaitu secara fisika, hidrodinamika dan kimia (Belfort dkk., 1994; Hilal dkk., 2005). Metode hidrodinamika pada prinsipnya dilakukan dengan memanipulasi tekanan dan/atau kecepatan aliran silang selama operasi. Selain itu, metode hidrodinamika mencakup pengembangan desain modul yang dapat meningkatkan perpindahan masa pada permukaan membran bagi komponen yang melalui membran dan meningkatkan migrasi balik bagi komponen yang ditahan oleh membran. Metode pengendalian fouling secara fisika dapat dilakukan dengan penambahan partikel atau penggunaan medan listrik yang dimaksudkan untuk menarik dan membawa *foulant* dari permukaan membran. Bowen (1991) mereview penggunaan medan listrik untuk

pengendalian fouling. Pengendalian fouling secara kimia dilakukan dengan memodifikasi karakteristik polimer membran untuk mengurangi gaya tarik menarik atau meningkatkan gaya tolak-menolak antara membran dengan *foulant*. Teknik-teknik untuk memodifikasi membran secara kimia direview dengan baik oleh Ulbricht (2006). Selain dengan memodifikasi polimer membran, pengendalian secara kimia juga dapat dilakukan dengan mengatur kondisi umpan seperti pH dan kekuatan ionik (Cheryan, 1998).

Sejauh pengetahuan penulis, tidak ada metode pengendalian fouling yang berhasil digunakan pada berbagai aplikasi. Metode yang tepat dan efektif untuk mengendalikan fouling sangat tergantung pada karakteristik fouling yang dipengaruhi oleh interaksi membran-*foulant* dan *foulant-foulant*. Oleh karena itu identifikasi terhadap komponen umpan yang menyebabkan terjadinya fouling (*foulant*) mutlak diperlukan. Perlu dicatat bahwa tidak semua komponen yang ada pada umpan menyebabkan terjadinya fouling. Setelah *foulant(s)* diketahui, tahapan berikutnya adalah pemahaman terhadap mekanisme fouling. *Foulant* dapat menyebabkan fouling melalui mekanisme berikut (Belfort dkk., 1994; Bacchin dkk., 2006):

- (i) Adsorpsi: terjadi jika terdapat gaya tarik-menarik antara *foulant* dan membran.
- (ii) *Pore blockage*: terjadi jika komponen dalam umpan memblokir pori membran secara total maupun parsial.
- (iii) Deposit: *foulant* yang telah terdeposisi pada permukaan membran dapat terus tumbuh membentuk lapisan *cake* yang menyebabkan penambahan tahanan hidrolik.

Studi mekanisme fouling menunjukkan bahwa karakteristik membran dan umpan sangat menentukan karakteristik interaksi membran dan *foulant* (e.g., Matthiasson, 1983; Kim dkk., 1992; Koehler dkk., 1997; Huisman dkk. 2000). Sayangnya, hampir semua studi mekanisme fouling dilakukan dengan menggunakan protein sebagai model *foulant*. Padahal dalam aplikasi industri banyak dijumpai solut/makromolekul selain protein yang berpotensi menjadi *foulant*. Merespon kondisi tersebut penulis dan tim telah melakukan penelitian tentang mekanisme fouling dengan menggunakan polisakarida (Susanto dan Widiasa, 2009; Susanto dkk., 2008; Susanto dkk., 2007; Susanto dan Ulbricht, 2005), *humic acid* (Susanto dan Ulbricht, 2008) dan senyawa polifenol (Susanto dkk., 2009) sebagai model *foulant*. Secara umum, hasil penelitian menunjukkan bahwa mekanisme fouling dengan adsorpsi dijumpai dalam semua studi yang menggunakan membran hidrofobik. Lebih lanjut, tingkat fouling dipengaruhi oleh ukuran pori, material membran, karakteristik *foulant* dan kondisi operasi. Hasil ini menunjukkan bahwa protein bukan satu-satunya senyawa yang berpotensi menjadi *foulant*.



Gambar 1. Skematik filosofi pengendalian fouling.

Setelah material penyebab fouling dan mekanisme fouling diketahui, tahapan berikutnya adalah pemilihan metode pengendalian. Metode kimia akan efektif untuk mengendalikan fouling di mana mekanisme yang terjadi adalah adsorpsi atau mekanisme pembentukan gel/cake yang diawali peristiwa adsorpsi pada tahap awal. Metode pengendalian secara kimia tidak efektif untuk fouling dengan mekanisme *pore blocking*. Sebaliknya metode hidrodinamika akan efektif untuk pengendalian fouling dengan mekanisme *pore blocking*. Gambar 1 merangkum tahapan-tahapan dalam pengendalian fouling dan luaran dari masing-masing tahapan.

PENGENDALIAN FOULING DENGAN MODIFIKASI MEMBRAN

Penelitian-penelitian terdahulu menunjukkan bahwa fouling dapat dikurangi dan kinerja membran dapat ditingkatkan dengan merekayasa kondisi proses dan hidrodinamika fluida (Cheryan, 1998; Belfort dkk., 1994; Hilal dkk., 2005). Namun dalam banyak kasus fluks permeat ditentukan oleh membran itu sendiri sebagai jantung proses. Modifikasi membran untuk pengendalian fouling dimaksudkan untuk meminimasi interaksi yang tidak diinginkan (adsorpsi). Minimisasi adsorpsi juga dapat menurunkan akumulasi lanjutan seperti denaturasi dan agregasi protein (Ulbricht, 2006). Untuk mencapai tujuan tersebut, tiga pendekatan dapat dilakukan, yaitu (Susanto dan Ulbricht, 2009): (i) modifikasi polimer membran sebelum digunakan untuk pembuatan

membran (*pre-modification*) (ii) pencampuran polimer membran dengan polimer lain (*polymer blend*) dan (iii) modifikasi setelah pembuatan membran (*post-modification*). *Pre-modification* dapat menghasilkan polimer membran dengan kinerja yang bagus namun membutuhkan waktu yang lama dan biaya yang mahal. Oleh karena itu, modifikasi dengan pencampuran polimer membran dan modifikasi setelah pembuatan merupakan merupakan dua pendekatan yang lebih menarik perhatian para peneliti maupun praktisi membran termasuk penulis.

Modifikasi Setelah Pembuatan Membran (*Post-Modification*)

Prinsip dari modifikasi ini adalah penambahan gugus fungsional pada permukaan membran dengan mempertahankan ketahanan kimia dan mekanik yang dimiliki. Terdapat dua pendekatan modifikasi untuk menghasilkan membran yang tahan terhadap fouling, yaitu (i) peningkatan muatan permukaan membran untuk meningkatkan gaya tolak-menolak antara membran dengan *foulant* dan (ii) hidrofiliisasi untuk meningkatkan interaksi permukaan membran dengan air.

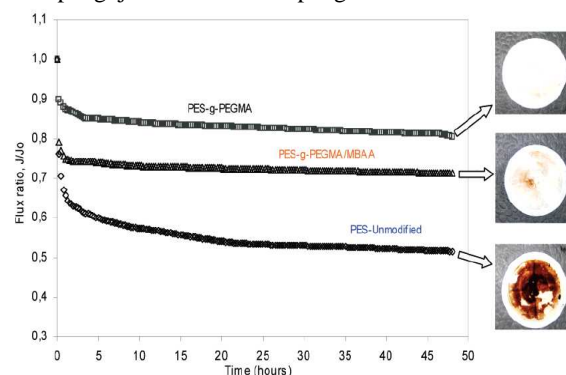
Dalam beberapa aplikasi, membran bermuatan dapat menurunkan fouling secara signifikan (Cheryan, 1998; Belfort dkk., 1994; van Reis, 2007), namun kinerja membran yang dihasilkan sangat tergantung pada pH dan kondisi ionik larutan umpan yang akan diolah. Selain itu, pendekatan ini juga sulit diaplikasikan untuk pengolahan umpan yang

kompleks. Di sisi lain, membran hidrofilik juga menunjukkan adsorpsi yang rendah dengan solut/makromolekul (Koehler dkk., 1997; Ko dkk., 1993). Meskipun dalam beberapa aplikasi membran bermuatan mempunyai kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan membran hidrofilik namun kinerja membran hidrofilik tidak rentan terhadap kondisi umpan. Menurut Whitesite dkk. (Ostuni dkk., 2001; Kane dkk., 2003) karakteristik material yang tahan terhadap adsorpsi protein adalah (i) hidrofilik/polar, (ii) bermuatan netral, (iii) penerima ikatan hidrogen dan (iv) bukan donor ikatan hidrogen. Sebagai contoh polyethylene glycol (PEG), *zwitterionic moieties* dan material dengan karakteristik “kosmotropes”.

Post-modification untuk pengendalian fouling telah banyak dilakukan melalui berbagai teknik seperti *ionization radiation*, *plasma* atau *corona discharge* dan *photo-irradiation* (Ulbricht, 2006; Taniguchi dkk., 2003). Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketahanan membran terhadap fouling dapat ditingkatkan setelah modifikasi, namun penurunan fluks setelah modifikasi tidak bisa dihindari. Selain itu, analisis yang mendalam terhadap penyebab peningkatan ketahanan terhadap fouling dan uji stabilitas modifikasi untuk aplikasi jangka panjang belum dilakukan. Penting untuk diketahui bahwa ketahanan terhadap fouling juga dipengaruhi oleh struktur pori membran (lihat referensi (Susanto dan Widiya, 2009; Susanto dkk., 2008; Susanto dkk., 2007; Susanto dan Ulbricht, 2005; Susanto dan Ulbricht, 2008; Susanto dkk., 2009). Baru-baru ini penulis dan tim telah berhasil mengembangkan metode modifikasi membran komersial PES dengan teknik *photo-graft copolymerization*. Penjelasan tentang eksperimen dan metode modifikasi secara lebih rinci dapat dilihat pada publikasi sebelumnya (Susanto dan Ulbricht, 2007). Hidrofilisasi dilakukan dengan menggunakan monomer fungsional polyethylene glycole methacrylate (PEGMA) dan N,N-dimethyl-N-(2-methacryloyloxyethyl)-N-(3 sulfopropyl) ammonium betaine (ZI). Penggunaan radiasi selektif (panjang gelombang > 300 nm) dan intensitas yang moderat (30-40 mW/cm²) dapat mengurangi penurunan fluks sebagai kelemahan dari penelitian-penelitian yang telah dikembangkan sebelumnya. Perbandingan membran hasil modifikasi dan membran komersial yang mempunyai kemiripan struktur pori menunjukkan bahwa ketahanan membran terhadap fouling protein yang lebih besar bagi membran hasil modifikasi benar-benar disebabkan oleh sifat kimia permukaan membran dan bukan oleh struktur pori. Lebih lanjut, uji stabilitas membran menunjukkan bahwa tidak terjadi pelepasan sifat hidrofilik selama pengujian yang berarti modifikasi bersifat stabil (Susanto dan Ulbricht, 2007).

Dalam penelitian-penelitian berikutnya, kami mengujikan kinerja membran hasil modifikasi untuk aplikasi pengolahan air dan limbah cair (Susanto dan Ulbricht, 2008), pemrosesan umpan multi komponen

(Susanto dkk., 2008) dan untuk klarifikasi nira tebu (Susanto dkk., 2007). Gambar 2 menunjukkan contoh hasil pengujian filtrasi untuk pengolahan air.

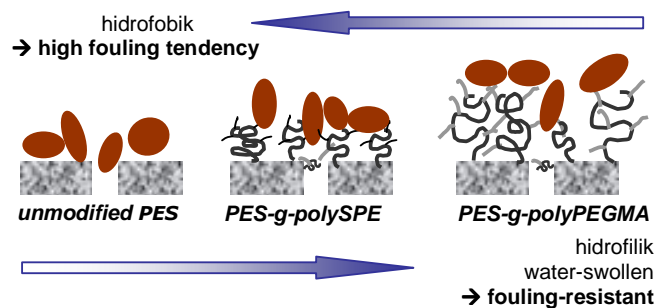


Gambar 2. Profil fluks selama proses ultrafiltrasi larutan humic acid (50 mg/L, pH 7.2, 1 mM Ca²⁺) dan foto membran setelah pencucian eksternal (Susanto dan Ulbricht, 2007).

Untuk semua kasus, membran hasil modifikasi menunjukkan ketahanan terhadap fouling yang lebih besar dibandingkan dengan membran komersial. Selanjutnya, membran yang dimodifikasi dengan PEGMA mempunyai ketahanan terhadap fouling yang lebih baik dibandingkan dengan membran yang dimodifikasi dengan ZI. Hal ini disebabkan derajat swelling PEGMA lebih besar dibandingkan dengan ZI. Secara umum peningkatan ketahanan membran terhadap fouling dapat dijelaskan dengan peningkatan hidrofilisitas membran sebagai akibat dari lapisan hidrogel yang terdapat pada permukaan membran setelah modifikasi. Adsorpsi foulant pada permukaan membran hidrofobik disebabkan oleh peningkatan sistem entropi sebagai akibat penggantian molekul-molekul air pada permukaan membran (*surface hydradion*). Keberadaan senyawa hidrogel PEGMA atau ZI akan mengurangi volume yang tersedia bagi *foulant* untuk mendekati permukaan membran karena peningkatan volume PEGMA dan ZI. Gambar 3 mengilustrasikan mekanisme peningkatan ketahanan membran terhadap fouling setelah modifikasi.

Modifikasi dengan Pencampuran Polimer (*Polymer Blend*)

Post-modification dapat meningkatkan ketahanan membran terhadap fouling secara signifikan. Namun aplikasi praktek dari modifikasi ini memerlukan tambahan tahapan setelah pembuatan membran. Oleh karena itu, modifikasi dengan pencampuran polimer membran dan polimer lain sebagai agen modifikasi (aditif) selama proses pembuatan juga mendapatkan perhatian yang tinggi dari peneliti membran. Meskipun stabilitas modifikasi tidak sekuat pada *post-modification*, modifikasi dengan pencampuran polimer sangat sederhana dan tidak memerlukan tahapan tambahan selama proses pembuatan.



Gambar 3. Mekanisme peningkatan ketahanan fouling membran setelah modifikasi

Polyvinylpyrrolidone (PVP), poly (ethylene glycole) (PEG) dan triblock kopolimer poly(ethylene oxide)-*b*-poly(propylene oxide)-*b*-poly(ethylene oxide) (Pluronic /Plu) telah banyak digunakan sebagai aditif untuk meningkatkan hidrofilisitas selama proses pembuatan membran (Wienk dkk., 1996; Boom dkk., 1992; Marchese dkk., 2003; Idris dkk., 2007; Chakrabarty dkk., 2008; Wang dkk., 2006). Hasil-hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan aditif (PVP, PEG atau Plu) dapat meningkatkan ketahanan membran terhadap fouling, namun sulit menentukan aditif terbaik yang harus dipilih untuk aplikasi industrial. Hal ini disebabkan oleh banyaknya parameter dalam pembuatan membran yang mempengaruhi karakteristik dan kinerja membran tidak dilakukan dalam kondisi yang sama. Baru-baru ini kami membandingkan secara sistematis pengaruh ketiga aditif tersebut terhadap karakteristik, kinerja dan stabilitas modifikasi membran dalam pembuatan membran PES (Susanto dan Ulbriht, 2009). Semua kondisi pembuatan dan karakteristik aditif yang digunakan dijaga dalam kondisi yang serupa. Penjelasan tentang eksperimen dan metode pembuatan membran secara lebih rinci dapat dilihat pada publikasi sebelumnya (Susanto dan Ulbriht, 2009). Hasil penelitian menunjukkan bahwa membran dengan aditif Plu mempunyai kinerja yang lebih baik dibandingkan membran dengan aditif PVP atau PEG (Tabel 1). Uji stabilitas menunjukkan bahwa efek modifikasi oleh Plu mempunyai stabilitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan PVP dan PEG. Hal ini dapat diterangkan dengan adanya interaksi hidrofobik-hidrofobik antara PES dan Plu.

Tabel 1. Perbandingan kinerja membran untuk filtrasi larutan protein

No	Membran	Rasio fluks permeate*/fluks air murni	Rasio fluks setelah pencucian
1	PES (tanpa aditif)	0,26	0,29
2	PES-PVP	0,38	0,46
3	PES-PEG	0,40	0,51
4	PES-Plu	0,65	0,70

Ket: *Fluks permeate diambil pada saat kondisi konstan

Semakin tinggi nilai rasio fluks permeate dan fluks air murni semakin tinggi ketahanan terhadap fouling
 Pencucian dilakukan dengan cara eksternal menggunakan air
 Filtrasi dilakukan dengan menggunakan umpan larutan bovine serum albumin konsentrasi 0,1 g/L dalam larutan penyangga phospat pH 7. Tekanan filtrasi sebesar 3 kg/cm²

Sebagai kelanjutan dari penelitian sebelumnya (Susanto dan Ulbriht, 2009), juga telah dikembangkan metode pembuatan membran (PES dan aditif Plu) dengan menggabungkan teknik *vapor-induced phase separation* (VIPS) dan NIPS (Susanto dkk., 2009). Selain itu, kami juga menambahkan non-solvent (triethylene glycol/TEG) dalam larutan polimer. Penggabungan teknik VIPS dan NIPS dan penambahan non solvent dalam larutan polimer dimaksudkan untuk meningkatkan permeabilitas membran dan mempertahankan hidrofilisitas membran yang dihasilkan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa komposisi TEG dan waktu kontak dengan udara (yang mengandung uap air) merupakan parameter kunci untuk mendapatkan membran dengan fluks tinggi. Sedangkan konsentrasi Plu menentukan tingkat hidrofilisitas membran. Uji ketahanan fouling menunjukkan bahwa keberadaan Plu dapat mengurangi interaksi membran-*foulant* yang pada akhirnya menurunkan peristiwa fouling secara signifikan.

PENGEMBANGAN TERKINI: INTEGRASI UF-RO UNTUK PENGENDALIAN FOULING

Selain memberikan potensi kekayaan alam yang melimpah, luasnya perairan laut Indonesia yang mencapai 5,8 juta km² (Dishidros TNI AL, 1987) menuntut aktivitas misi/ekspedisi kelautan baik untuk keperluan pertahanan dan keamanan maupun untuk kepentingan yang lain. Ketersediaan air (air konsumsi, air sanitasi dan air untuk keperluan penelitian) sering kali menjadi kendala dalam pelaksanaan misi/ekspedisi kelautan tersebut. Kondisi ini tentu saja sangat ironis karena air laut yang bisa digunakan sebagai air baku untuk penyediaan air tersedia sangat melimpah. Oleh karena itu, penyediaan air dari air laut untuk keperluan misi/ekspedisi kelautan merupakan

hal penting yang harus dilakukan agar misi/ekspedisi kelautan berlangsung optimal.

Pada saat ini, membran *reverse osmosis* (RO) telah terbukti sebagai teknologi desalinasi yang lebih ekonomis dibandingkan dengan proses konvensional, thermal desalinasi. Namun, fouling yang disebabkan oleh senyawa-senyawa organik menurunkan kinerja proses secara signifikan. Oleh karena itu, pengendalian fouling organik pada membran RO merupakan hal yang perlu mendapat perhatian secara serius. Untuk mengurangi terjadinya fouling pada membran RO unit ultrafiltrasi dipasang sebagai unit perlakuan awal terhadap umpan sebelum masuk membran RO. Pengintegrasian membran UF dimaksudkan untuk menghindari interaksi antara membran RO dengan mikroorganisme dan senyawa-senyawa organik yang dapat menyebabkan terjadinya biofouling dan fouling organik. Hal ini didorong oleh kenyataan bahwa kandungan mikroorganisme dan senyawa organik pada air laut Indonesia relatif tinggi. Hasil penelitian yang diperoleh menunjukkan bahawa pemasangan unit UF dapat menurunkan silt density index (SDI) dari 3,2 menjadi 1-1,3 tergantung ukuran pori membran UF yang digunakan (Untuk mengurangi fouling pada membran RO umpan yang masuk ke membran harus mempunyai SDI lebih kecil dari 1,5). Membran UF dengan ukuran pori 100 kDa merupakan membran yang direkomendasikan untuk aplikasi ini karena selain persyaratan SDI terpenuhi fluks yang dihasilkan relatif besar. Lebih lanjut pengintegrasian membran UF dapat meningkatkan fluks membran RO sebesar ~30% dan umur membran RO dapat diperpanjang. Hasil penelitian di laboratorium ini

kemudian digunakan dasar untuk pabrikan unit RO untuk desalinasi air laut dengan kinerja yang lebih tinggi (Gambar 4) dibandingkan dengan unit RO konvensional.

PENUTUP

Karena fouling menurunkan kinerja membran secara signifikan maka pengendalian fouling merupakan langkah vital yang harus dilakukan. Banyak metode pengendalian fouling telah diusulkan dan dikembangkan, namun dalam pemilihannya diperlukan identifikasi foulant dan pemahaman terhadap mekanisme fouling (Gambar 1). Metode fouling yang tepat dan efektif sangat tergantung pada karakteristik interaksi membran-*foulant* dan *foulant-foulant*. Pengendalian yang tidak didasari pada pengetahuan terhadap mekanisme fouling bisa jadi berhasil di tahap-tahap awal namun keberhasilan itu tidak akan berlangsung lama. Oleh karena itu, pengetahuan dan penelitian fundamental mengenai interaksi membran-*foulant* dan *foulant-foulant* sangat penting untuk dilakukan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Sebagian penelitian ini dibiayai oleh DP2M Direktorat Pendidikan Tinggi, Kementerian Pendidikan Nasional. Ucapan terima kasih disampaikan kepada Prof. Dr. Mathias Ulbricht atas kesempatan dan diskusi yang diberikan. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada anggota Membrane Research Center (MeR-C) Universitas Diponegoro atas kontribusinya dalam melakukan penelitian ini.



Gambar 4. Unit skala pilot integrasi UF-RO untuk pengendalian fouling pada proses desalinasi

REFERENSI

- Bacchin, P., Aimar, P., and Field, R.W., (2006), Critical and sustainable fluxes: Theory, experiments and applications, *J. Membr. Sci.*, 281, 42.
- Belfort, G., Davis, R.H., and Zydney, A.L., (1994), The behavior of suspensions and macromolecular solutions in crossflow microfiltration, *J. Membr. Sci.* 96 (1).
- Boom, R.M., Wienk, I.M., van den Boomgaard, Th. *et al.*, (1992), Microstructures in phase inversion membranes. Part 2. The role of a polymeric additive, *J. Membr. Sci.*, 73, 277.
- Bowen, W.R., (1991), in *Chromatographic and membrane processes in biotechnology*, C.A. Costa and J.S. Cebra (Eds.), Kluwer Academic Publisher, The Netherlands, 207.
- Chakrabarty, B., Ghoshal, A.K., and Purkait, M.K., (2008), Effect of molecular weight of PEG on membrane morphology and transport properties, *J. Membr. Sci.*, 309, 209.
- Cheryan, M., (1998), *Ultrafiltration and microfiltration handbook*, Technomic Publishing Company Inc., Pennsylvania.
- Hilal, H., Ogunbiyi, O.O., Miles, N.J. *et al.*, (2005), Methods employed for control of fouling in MF and UF membranes: A comprehensive review, *Sep. Sci. Technol.*, 40, 1957.
- Huisman, I.H., Prádonos, P., and Hernández, A., (2000), The effect of protein-protein and protein-membrane interactions on membrane fouling in ultrafiltration, *J. Membr. Sci.*, 179, 79.
- Idris, A., Zain, N.M., and Noordin, M.Y., (2007), Synthesis, characterization and performance of asymmetric polyethersulfone (PES) ultrafiltration membranes with polyethylene glycol of different molecular weights as additives, *Desalination*, 207, 324.
- Kane, R.S., Deschatelets, P., and Whitesides, G.M., (2003), Kosmotropes form the basis of protein-resistant surfaces, *Langmuir*, 19, 2388.
- Kim, K.J., Fane, A.G., Fell, C.J.D. *et al.*, (1992), Fouling mechanisms of membranes during protein ultrafiltration, *J. Membr. Sci.*, 68, 79.
- Ko, M.K., Pellegrino, J.J., Nassimbene, R. *et al.*, (1993), Characterization of the adsorption-fouling layer using globular proteins on ultrafiltration membranes, *J. Membr. Sci.*, 76, 101.
- Koehler, J.A., Ulbricht, M., and Belfort, G., (1997), Intermolecular forces between proteins and polymer films with relevance to filtration, *Langmuir*, 13, 4162.
- Marchese, J., Ponce, M., Ochoa, N.A. *et al.*, (2003), Fouling behaviour of polyethersulfone UF membranes made with different PVP, *J. Membr. Sci.*, 211, 1.
- Matthiasson, E., (1983), The role of macromolecular adsorption in fouling of ultrafiltration membranes, *J. Membr. Sci.*, 16, 23.
- Mulder, M., (1996), *Basic Principle of Membrane Technology*, 2nd ed; Kluwer Academic Publishers: Dordrecht.
- Ostuni, E., Chapman, R.G., Whitesides, G.M. *et al.*, (2001), A survey of the structure-property relationships of surfaces that resist the adsorption of protein, *Langmuir*, 17, 5605.
- Susanto, H., Arafat, H., Jansen, E.M.L. *et al.*, (2008), Ultrafiltration of polysaccharides-protein mixtures: Elucidation of fouling mechanisms and fouling control by membrane surface modification, *Sep. Sci. Technol.*, 63, 558.
- Susanto, H., Balakrishnan, M. and Ulbricht, M., (2007), Via surface functionalization by photograft copolymerization to low-fouling polyethersulfone-based ultrafiltration membranes, *J. Membr. Sci.*, 288, 157.
- Susanto, H., Franzka, S., and Ulbricht, M., (2007), Dextran fouling of polyethersulfone ultrafiltration membranes—Causes, extent and consequences, *J. Membr. Sci.*, 296, 147.
- Susanto, H., Stahra, N., and Ulbricht, M., (2009), High performance microfiltration membranes having high flux and stable hydrophilic property, *J. Membr. Sci.*, 342, 153.
- Susanto, H. and Ulbricht, M., (2005), Influence of ultrafiltration membrane characteristics on adsorptive fouling with dextrans, *J. Membr. Sci.*, 266, 132.
- Susanto, H. and Ulbricht, M., (2007), Photo-grafted thin polymer hydrogel layers on PES ultrafiltration membranes: Characterization, stability and influence on separation performance, *Langmuir* 23, 7818.
- Susanto, H. and Ulbricht, M., (2008), Highly fouling resistant ultrafiltration membrane for water and wastewater treatments, *Water Sci. Technol.: Water Supply*, 8 (1) 19.
- Susanto, H. and Ulbricht, M., (2008), High-performance thin-layer hydrogel composite membrane for ultrafiltration of natural organic matter, *Water Research*, 42, 2827.

Susanto, H. and Ulbricht, M., (2009), Characteristics, performance and stability of polyethersulfone ultrafiltration membranes prepared by phase separation method using different macromolecular additives, *J. Membr. Sci.*, 327, 125.

Susanto, H. and Ulbricht, M., (2009), *Polymeric membranes for molecular separations*, in E. Drioli, L. Giorno (Eds), Membrane operations. Innovative Separations and Transformations, Wiley – VCH: Weinheim.

Susanto, H. and Widiasta, IN., (2009), Ultrafiltration fouling of amylose solution: behavior, characterization and mechanism, *J. Food. Eng.*, 95, 423.

Susanto, H., Yu, F., and Ulbricht, M., (2009), Fouling behavior during ultrafiltration of aqueous solutions of polyphenolic compounds, *J. Food. Eng.*, 91, 333.

Taniguchi, M., Pieracci, J., Samsonoff, W.A. *et al.*, (2003), UV-assisted graft polymerization of synthetic membranes: mechanistic studies, *Chem. Mater.*, 15, 3805.

Ulbricht, M., (2006), Advanced functional polymer membranes, *Polymer*, 47, 2217.

van Reis, R. and Zydney, A., (2007), Bioprocess membrane technology, *J. Membr. Sci.*, 297, 16.

Wienk, M., Boom, R.M., Beerlage, M.A.M. *et al.*, (1996), Recent advances in the formation of phase inversion membranes made from amorphous or semi-crystalline polymers, *J. Membr. Sci.*, 113, 361.

Wang, Y., Su, Y., Sun, Q., Ma, X., Ma, X., and Jiang, Z., (2006), Improved permeation performance of Pluronic F127-polyethersulfone blend ultrafiltration membranes, *J. Membr. Sci.*, 282, 44.

Wang, Y.Q., Su, Y.L., Ma, X.L., Sun, Q., and Jiang, Z.Y., (2006), Pluronic polymers and polyethersulfone blend membranes with improved fouling resistant ability and ultrafiltration performance, *J. Membr. Sci.*, 283, 440.