

# Kajian Fouling Protein pada Membran Berbasis Polisulfon

Bambang Piluharto\*, Karlina, Dwi Indarti

Jurusan Kimia, FMIPA, Universitas Jember

\*E-mail: bampito.fmipa@unej.ac.id

## ABSTRAK

Adsorpsi protein pada membran ultrafiltrasi sering mengakibatkan kinerja membran menurun. Penurunan kinerja membran ditandai dengan menurunnya fluks membran dan fenomena ini dikenal dengan fouling. Pembuatan material membran banyak diarahkan untuk menghasilkan membran yang memiliki ketahanan terhadap fouling. Penelitian ini telah mengembangkan membran berbasis polisulfon (PSF) dan mengkaji kajian foulingnya terhadap bovine serum albumin, BSA (protein). Dua jenis membran digunakan dalam penelitian ini, yaitu membran polisulfon dan membran polisulfon termodifikasi. Modifikasi membran dilakukan dengan metode sulfonasi. Kedua jenis membran dibuat dengan teknik inversi fasa. Kinerja membran diukur melalui parameter fluks protein dan fluks air. Pengukuran ini dilakukan pada larutan umpan yang memiliki pH yang berbeda. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa pada kedua jenis membran (PSF dan PSF termodifikasi), fluks BSA terendah pada pH 5. Sementara, ketahanan membran terhadap fouling protein, membran PSF termodifikasi lebih tinggi dibanding membran PSF.

**Kata Kunci:** adsorpsi, fouling, sulfonasi, inversi fasa, fluks

## PENDAHULUAN

Permasalahan yang seringkali ditemui dalam teknologi membran adalah terjadinya *fouling*. *Fouling* merupakan suatu proses deposisi partikel terlarut pada permukaan membran dan/atau pori-pori membran akibat interaksi partikel terlarut-membran (Susanto dan Roihatin, 2011). Fenomena *fouling* secara langsung sulit diamati, namun demikian, satu indikatornya adalah penurunan fluks membran (Kurniawan, 2002). Fouling membran dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain jenis *foulant*, konsentrasi umpan, suhu, pH dan kekuatan ion (Boorlagi, 2001).

Beberapa teknik telah banyak digunakan untuk mengurangi fouling membran baik secara fisik maupun kimia (Mulder, 1996). Dalam aplikasinya, teknik mengurangi fouling bisa dilakukan pada umpan maupun pada membrannya. Mengurangi fouling dengan cara memodifikasi membran telah banyak dilakukan. Secara umum, perlakuan dapat dilakukan dengan memodifikasi membran yang sudah ada dan melakukan blend dengan material yang lain.

Salah satu modifikasi membran yang bertujuan untuk mengurangi fouling adalah melalui modifikasi permukaan membran dengan teknik sulfonasi. Masuknya gugus sulfonat pada struktur polisulfon (PSF) akan menghasilkan suatu membran bermuatan yang bersifat polar dan hidrofilik (Handayani et al., 2007). Membran hidrofilik cenderung memiliki ketahanan fouling yang lebih tinggi dibanding dengan membran hidrofobik, khususnya untuk larutan umpan protein (Yamagishi et al., 1995). Penelitian ini akan mengkaji fenomena fouling pada membran polisulfon yang termodifikasi secara sulfonasi. Sebagai pembandingan untuk kajian foulingnya, digunakan membran polisulfon tanpa modifikasi.

## METODE PENELITIAN

### Bahan

Polisulfon (Udel, Berat molekul (BM) 35000 Dalton), Asam sulfat 97%, Dimetilasetamida, Polietilen glikol 400, Bovine serum albumin (BSA) BM 66500 g/mol, sodium hidroksida, asam sitrat, sodium hydrogen fosfat, indicator fenolftalien, etanol 96%, .

### Pembuatan Membran Polisulfon

Polisulfon (PSf) sebanyak 18% w/w (3,6 g) ditambahkan dengan larutan DMAc 72% w/w (15,3 mL) dan PEG 400 10% w/w (1,8 mL) dilarutkan dalam gelas erlenmeyer dengan pengadukan selama 16 jam sampai diperoleh larutan yang homogen. Setelah diperoleh larutan yang homogen, larutan tersebut didiamkan selama  $\pm 4$  jam untuk menghilangkan gelembung udara, kemudian larutan dicetak di atas kaca datar yang kedua sisinya telah diberi selotip. Setelah dicetak di atas kaca datar membran dicelupkan ke dalam bak koagulasi yang berisi nonpelarut (air). Sebelum direndam membran dibiarkan  $\pm 5$  detik. Membran yang telah terbentuk dikeringkan di udara terbuka. Terakhir, membran PSf yang dihasilkan disimpan dalam desikator (Piluharto *et al.*, 2011).

### Sintesis Polisulfon Tersulfonasi (SPSF)

Sulfonasi polisulfon (PSf) dilakukan secara heterogen. Dalam hal ini sebanyak 3,6 gram PSf dimasukkan sedikit demi sedikit ke dalam 36 mL H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 5 M yang sebelumnya telah dipanaskan sampai suhu  $\pm 80^{\circ}\text{C}$ , kemudian dilakukan refluks selama 3 jam sambil diaduk menggunakan pengaduk magnetik dan tetap menjaga suhunya pada  $80^{\circ}\text{C}$  (Handayani *et al.*, 2007).

Setelah proses sulfonasi selesai dilakukan, padatan SPSF dipisahkan dari larutannya. Padatan SPSF dicuci

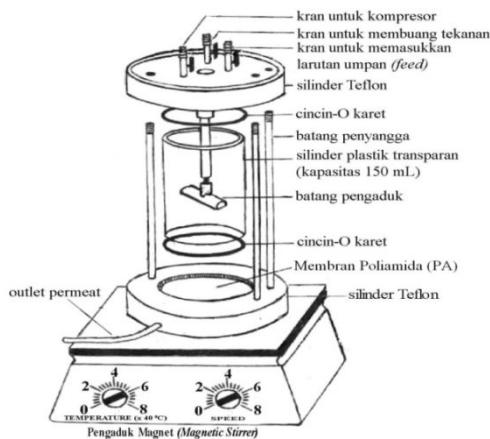
dengan aquades sebanyak 3 kali sampai diasumsikan netral kemudian disaring dan dikeringkan dalam oven pada suhu 60°C selama 2 jam (Piluharto et al., 2011).

### Pembuatan Membran SPSF

Pembuatan membran SPSF ini menggunakan metode inversi fasa. 3,6 gram padatan SPSF ditambahkan dengan larutan DMAc 72% w/w (15,3 mL) dan PEG 400 10% (1,8 mL) dilarutkan dalam gelas erlenmeyer dengan pengadukan selama 16 jam sampai diperoleh larutan yang homogen. Setelah diperoleh larutan yang homogen, larutan tersebut didiamkan selama ± 4 jam untuk menghilangkan gelembung udara, kemudian larutan dicetak di atas kaca datar yang kedua sisinya telah diberi selotip. Setelah dicetak di atas kaca datar membran dicelupkan ke dalam bak koagulasi yang berisi nonpelarut (air). Sebelum direndam membran dibiarkan ± 5 detik. Membran yang telah terbentuk dikeringkan di udara terbuka. Terakhir, membran PSf yang dihasilkan disimpan dalam desikator (Piluharto et al., 2011).

### Uji Fouling Protein pada pH 3, pH 5 dan pH 7

Uji kinerja membran dapat dilakukan dengan melakukan uji *fouling* adsorptif dan ultrafiltrasi dengan melakukan pengukuran fluks air dan BSA pH 3, 5 dan 7 menggunakan sel ultrafiltrasi (Gambar 3.2). Membran yang digunakan yaitu membran PSf (sebelum dimodifikasi) dan membran SPSF (setelah modifikasi).



Gambar 1. Skema alat ultrafiltrasi

Sebelum dilakukan uji fluks, membran dikompaksi terlebih dulu menggunakan tekanan 3 bar. Selanjutnya larutan *foulant* yaitu Bovine serum albumin (BSA) untuk masing-masing pH dimasukkan ke dalam sel ultrafiltrasi dan diukur fluksnya, sesuai persamaan berikut:

$$J_v = \frac{V}{A.t}$$

dengan  $J_v$  = fluks volume (L/m<sup>2</sup>jam); V = volume permeat (L). Setelah fluks larutan BSA diukur, larutan

BSA dikontakkan selama 1 jam dengan permukaan membran tanpa ada fluks pada pengadukan konstan, kemudian larutan dikeluarkan dan permukaan membran dibilas dua kali dengan cara mengisi sel filtrasi dengan aquades (5 mL). Setelah itu diukur fluks air sesudah adsorpsi. Dari nilai fluks air sebelum dan sesudah adsorpsi yang didapatkan digunakan untuk mengukur RFR (*relative water flux reduction*) dengan persamaan berikut:

$$RFR = \frac{J_{am} - J_{ads}}{J_{am}} \times 100\%$$

RFR adalah penurunan fluks air relatif,  $J_{am}$  adalah fluks air membran sebelum adsorpsi dan  $J_{ads}$  adalah fluks air membran sesudah adsorpsi (Susanto et al., 2006). Selanjutnya dari nilai RFR yang didapat diukur tahanan *fouling*nya menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Tahanan fouling} = \frac{J_{am}}{J_{ads}} = 1 - RFR$$

### Karakterisasi Membran

#### a. Analisis Gugus Fungsi

Karakterisasi kualitatif membran PSf dan membran SPSF menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR). Analisis FTIR dilakukan untuk memperoleh data kualitatif dengan mendeteksi gugus fungsi membran hasil sulfonasi. Spektra FTIR diukur pada daerah bilangan gelombang 600-4000 cm<sup>-1</sup> (Piluharto et al., 2011).

#### b. Daya Serap Air (DSA)

Membran PSf dan SPSF masing-masing dikeringkan dalam oven pada suhu 60°C selama 18 jam dan ditimbang sebagai berat sampel kering (W kering). Selanjutnya, direndam ke dalam aquades selama 18 jam dan kelebihan air pada permukaan membran basah dihilangkan menggunakan kertas tisu sebelum ditimbang kembali. Membran ditimbang sebagai berat basah (W basah). Besar DSA dapat dihitung dengan persamaan berikut (Piluharto et al., 2011).

$$DSA = \frac{W \text{ basah} - W \text{ kering}}{W \text{ kering}} \times 100\%$$

#### c. Uji Densitas

Pengujian densitas yang dilakukan terdiri dari densitas larutan polimer dan densitas membran. Densitas larutan polimer diukur dengan menimbang massa larutan polimer dibagi dengan volume larutan polimer, sedangkan untuk pengukuran densitas membran yaitu membran dipotong dengan ukuran yang sama kemudian ditimbang dan diukur beratnya setelah itu menghitung volume membran yaitu luas permukaan dikalikan tebal film seperti pada persamaan 3.2 (Piluharto, 2001).

$$\text{Densitas} = \frac{\text{berat membran (gram)}}{\text{volume membran (cm}^3\text{)}} \dots (3.2)$$

#### d. Pengukuran Kapasitas Penukar Ion (KPI) dan Derajat Sulfonasi (DS)

KPI mengindikasikan banyaknya mili-equivalen ion dalam 1 gram polimer kering. Penentuan KPI pada sampel membran SPSF dilakukan dengan merendam sampel dalam 50 mL NaOH 0,01 N selama 12 jam pada suhu ruang. Selanjutnya diambil 10 mL larutan tersebut untuk dititrasi dengan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,01 N. Sebelum dilakukan titrasi pada sampel, dilakukan titrasi pada blanko (10 mL NaOH 0,01 N) Besar KPI dihitung dengan menggunakan persamaan berikut (Smitha *et al.*, 2003).

$$\text{KPI} = \frac{B - P \times 0.01 \times 5}{W}$$

KPI adalah Kapasitas Penukar Ion (m-eq/g), B adalah volume H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> yang digunakan saat titrasi pada blanko (mL), P adalah volume H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> yang digunakan saat titrasi pada sampel (mL), 0,01 adalah konsentrasi H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> setelah distandarisasi (N), 5 adalah faktor pengali yang diperoleh dari perbandingan volume NaOH yang digunakan untuk merendam membran dengan volume yang diambil untuk titrasi.

Besarnya nilai KPI yang diperoleh dapat digunakan untuk memperoleh besarnya nilai derajat sulfonasi (DS). DS merupakan jumlah rata-rata dari gugus sulfonat yang ada dalam rantai polimer

tersulfonasi. Hubungan antara DS dengan KPI dapat dinyatakan dengan persamaan berikut (Handayani *et al.*, 2007).

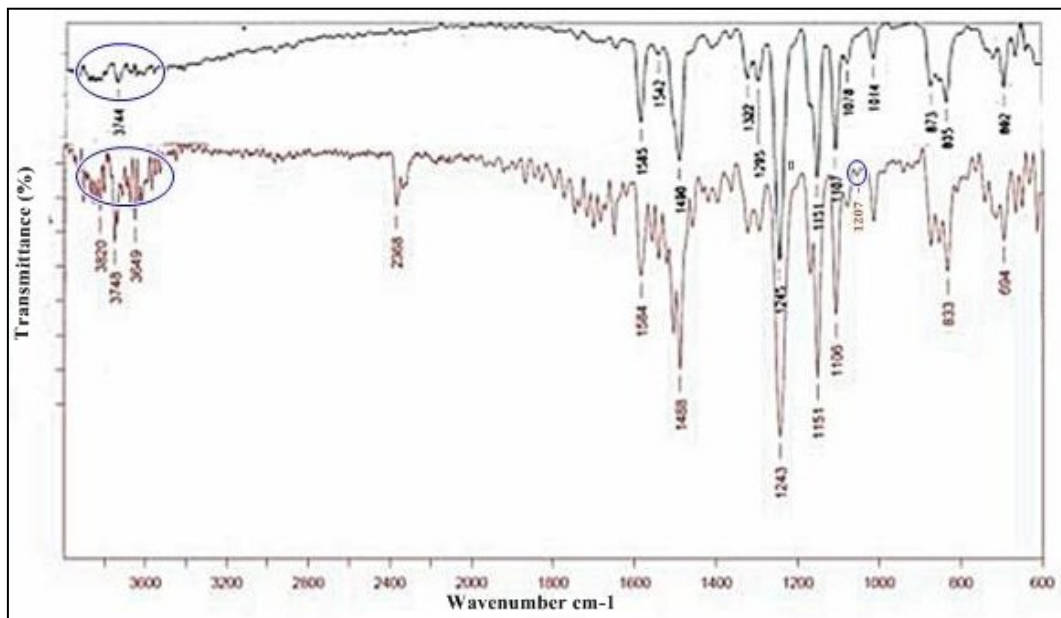
$$\text{DS} = \frac{M_o \times (\text{KPI})}{1000 - 81 \times (\text{KPI})} \times 100\%$$

Di mana, M<sub>o</sub> adalah massa molar dari unit ulang polimer PSF (440 g/mol) dan 81 adalah massa molar dari gugus SO<sub>3</sub>H (g/mol).

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Membran polisulfon tersulfonasi (SPSF)

Membran SPSF diperoleh melalui reaksi sulfonasi pada membran PSF. Masuknya gugus sulfonat (-SO<sub>3</sub>H) pada membran SPSF dapat dijelaskan melalui analisa gugus fungsi menggunakan FTIR yang ditunjukkan pada Gambar 2. Berdasarkan Gambar 2 tersebut dapat ditunjukkan bahwa pada kedua membran PSF dan SPSF ada puncak serapan di daerah ~3700 cm<sup>-1</sup> yang mengindikasikan serapan gugus -OH. Namun, serapan di daerah ~1027 cm<sup>-1</sup> yang menunjukkan serapan O=S=O stretching hanya dimiliki oleh membran SPSF, tidak ada pada membran PSF. Hal ini menunjukkan adanya gugus -SO<sub>3</sub>H yang masuk pada struktur PSF.



Gambar 2. Spektra FTIR membran PSF dan membran SPSF

**Tabel 1.** Paramater-parameter sifat fisik dan kimia membran PSF dan SPSF

Jenis Membran	DSA (%)	KPI (m-eq/g)	DS (%)
PSf	15,60	0,470	21,53
SPSF	33,02	1,26	61,49

### **Karakteristik sifat fisik dan kimia Membran PSF dan MembranSPSF**

Karakterisasi fisikokimia ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh proses sulfonasi terhadap sifat fisik dan sifat kimia membran PSf. Karakterisasi yang dilakukan meliputi uji sifat fisik yaitu pengukuran daya serap air (DSA), dan sifat kimia yang terdiri dari kapasitas penukar ion (KPI) dan derajat sulfonasi (DS). Hasil yang diperoleh ditunjukkan pada table 1.

Tabel 1 menunjukkan bahwa nilai KPI pada membran SPSF lebih besar daripada membran PSf. Hal ini menunjukkan bahwa membran SPSF memiliki kemampuan bertukar ion (H+) lebih besar dibandingkan dengan membran PSf. Hal ini dikarenakan pada permukaan membran SPSF terdapat gugus sulfonat (SO<sub>3</sub>H) yang memiliki kemampuan menukarkan ion H<sup>+</sup> nya dengan ion Na<sup>+</sup> dari larutan NaOH.

Ditinjau dari nilai derajat sulfonasi, kecenderungannya menunjukkan bahwa derajat sulfonasi yang lebih tinggi juga memiliki nilai KPI dan DSA yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa, masuknya gugus sulfonat menghasilkan perubahan struktur yang lebih polar dan bersifat hidrofilik.

### **Karakteristik fluks Membran pada berbagai pH**

Karakteristik kinerja membran selanjutnya yaitu pengukuran fluks BSA. Larutan BSA yang digunakan dalam penelitian ini memiliki konsentrasi 1000ppm. Sebelum diukur fluksnya larutan umpan BSA yang digunakan dikondisikan pada pH 3, pH 5 dan pH 7.

Pengaruh pH larutan umpan BSA terhadap fluks dapat dilihat pada Gambar 3. Fluks terendah didapatkan pada pH 5, kondisi protein pH 5 dalam larutan berada dalam keadaan netral, tidak bermuatan atau titik ini disebut sebagai titik isoelektris protein (Ahmad, 2009). Karena pada pH ini protein netral (tidak bermuatan), maka kelarutan protein menjadi rendah dan protein cenderung membentuk *aggregate* menjadi molekul besar dan protein dengan mudah diserap pada permukaan membran dan menyebabkan terjadinya *fouling* protein. Berbeda dengan kondisi larutan BSA pada pH lain, dalam media cair, protein membentuk *zwitter ion* yaitu memiliki muatan positif dan negatif. Kondisi larutan BSA yang berada di bawah pH 5 (asam), maka larutan protein akan bermuatan positif sedangkan di atas pH 5 (basa), maka larutan protein akan bermuatan negatif. Sifat protein tergantung pada kondisi di sekitarnya sehingga mempengaruhi fluksnya.

Gambar 3 menunjukkan bahwa nilai fluks BSA pada membran SPSF lebih besar dibandingkan dengan

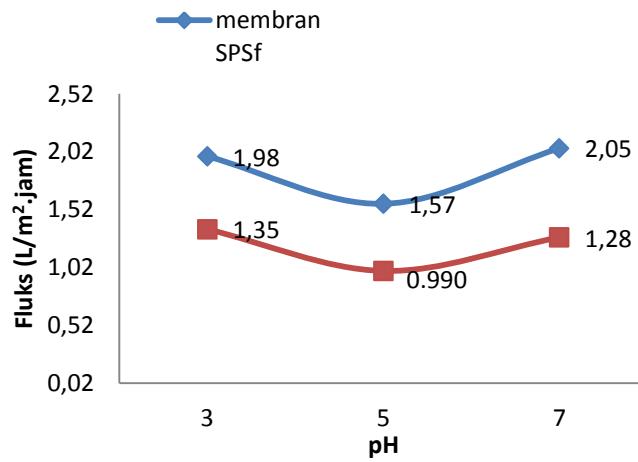
membran PSf. Hal ini dikarenakan pada permukaan membran SPSF terdapat gugus ionik (SO<sub>3</sub>H) yang menyebabkan membran menjadi lebih polar dan menjadi lebih hidrofilik, sehingga interaksi antara membran SPSF dengan molekul protein BSA menjadi lemah. Akibatnya, protein BSA lebih mudah untuk melewati membran SPSF dibandingkan dengan membran PSf. Pengukuran fluks larutan BSA ini juga digunakan untuk menguji *fouling* adsorptif dengan mengukur fluks air setelah adsorpsi BSA.

### **Karakteristik Fouling Adsorptif**

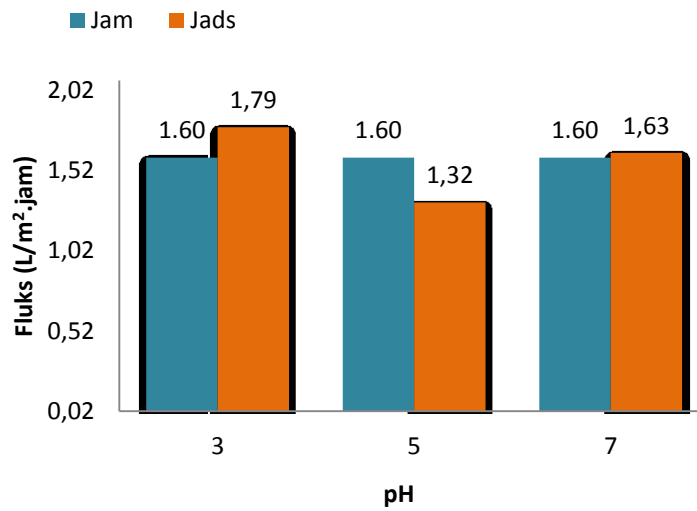
Interaksi membran dengan zat terlarut yaitu BSA diketahui setelah membran dikontakkan dengan larutan BSA selama 1 jam kemudian dilakukan pengukuran fluks air. Fluks air yang diperoleh ini merupakan fluks air setelah adanya adsorpsi BSA pada permukaan membran. Dengan mengetahui besarnya fluks air setelah adsorpsi BSA ( $J_{ads}$ ), maka dapat diketahui besarnya ketahanan *fouling* pada membran PSf dan membran SPSF. Nilai ketahanan *fouling* didapatkan dari persamaan 3. Apabila besarnya ketahanan *fouling* sama dengan 1 atau lebih besar dari 1 berarti tidak ada *fouling* adsorptif yang terjadi.

Gambar 4 menunjukkan bahwa fluks air setelah adsorpsi BSA pH 5 pada membran PSf mengalami penurunan sedangkan fluks air setelah adsorpsi BSA pH 3 dan pH 7 mengalami kenaikan. Hal ini diakibatkan pada pH 5 BSA mengalami denaturasi dan membentuk agregat yang dapat menutupi pori-pori membran sehingga fluks air menurun. Turunnya fluks air ini menandakan terjadinya *fouling* adsorptif. Hal ini dikarenakan terbukanya struktur tersier pada BSA yang menyebabkan perubahan susunan molekul, sehingga terjadi interaksi hidrofobik antara protein BSA dengan permukaan membran PSf. Lain halnya dengan pH 3 dan pH 7, molekul protein BSA memiliki bagian-bagian yang polar ketika dikondisikan pada pH asam atau basa. Hal ini menyebabkan interaksi antara molekul BSA dengan permukaan membran menjadi lemah, sehingga larutan BSA pada pH 3 dan pH 7 dapat dengan mudah dibersihkan dengan pencucian membran sehingga fluks membran meningkat.

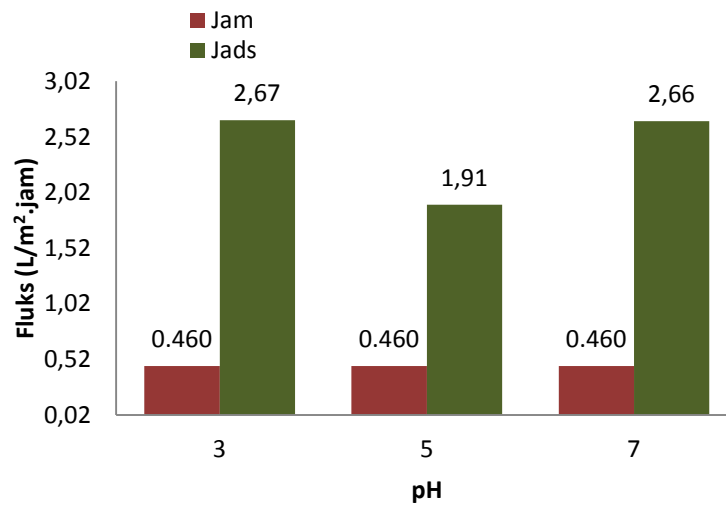
Protein BSA terdiri dari asam-asam amino yang dihubungkan oleh suatu ikatan peptida. Di dalam larutan, asam amino terionisasi dan dapat bersifat sebagai asam atau basa. Hal ini dikarenakan pada ujung-ujung rantai asam amino memiliki muatan positif atau negatif yang dikenal sebagai bentuk dipolar atau *zwitter ion*. Hal ini dapat menjelaskan fenomena meningkatnya fluks air sesudah adsorpsi pada membran SPSF dibandingkan dengan fluks air awal.



Gambar 3 Fluks BSA dengan berbagai pH



Gambar 4 Perbandingan nilai fluks air awal ( $J_{Am}$ ) dengan fluks air setelah adsorpsi ( $J_{Ads}$ ) pada membran PSF



Gambar 5 Perbandingan nilai fluks air awal ( $J_{Am}$ ) dengan fluks air setelah adsorpsi ( $J_{Ads}$ ) pada membran SPSF

**Tabel 2.** Harga RFR dan Ketahanan *Fouling* Membran PSf dan Membran SPSF

Jenis membran	RFR (%)			Tahanan <i>fouling</i>		
	pH 3	pH 5	pH 7	pH 3	pH 5	pH 7
PSf	-11,9	17,5	-1,88	1,12	0,825	1,02
SPSF	-480	-315	-478	5,80	4,16	5,78

Adanya interaksi antara permukaan membran SPSF yang bersifat hidrofilik dengan molekul protein BSA yang bersifat dipolar menyebabkan fluks air sesudah adsorpsi menjadi lebih besar daripada fluks air awal. Hal ini disebabkan karena molekul BSA “menjembatani” antara permukaan membran dengan molekul air, di mana terjadi interaksi ion-dipol antara ujung asam amino yang bermuatan dengan air yang bersifat polar sehingga lebih cepat menarik molekul air akibatnya dapat meningkatkan fluks membran (Gambar 5).

Membran yang telah dimodifikasi (SPSF) bersifat hidrofilik dan memiliki energi permukaan yang lebih rendah dibandingkan dengan membran yang tidak dimodifikasi (PSf) (Yamagishi *et al*, 1995). Energi permukaan yang rendah ini mengakibatkan terbentuknya *cake layer* pada permukaan membran yang disebabkan oleh penumpukan dari molekul-molekul BSA yang tertahan pada permukaan membran hingga membentuk lapisan yang disebut dengan *cake* (Chilukuri, 1998). Pembentukan *cake* ini yang menyebabkan penyumbatan diluar pori. Namun penyumbatan ini bersifat reversibel biasa dikenal sebagai *fouling* reversibel. Sehingga mudah dibersihkan dengan pencucian membran. Berkurangnya fluks membran akibat adsorpsi BSA dapat ditentukan dengan mengukur penurunan fluks air relatif (RFR) dengan persamaan 3.

Tabel 2 menunjukkan bahwa nilai RFR yang diperoleh pada membran PSf menunjukkan bahwa penurunan fluks hanya terjadi pada membran PSf setelah adsorpsi BSA pH 5 yaitu sebesar 17,5 %. Hal ini dikarenakan adsorpsi protein lebih besar pada membran yang bersifat hidrofobik. Selain itu pada pH 5 protein BSA mengalami denaturasi sehingga menyebabkan terbentuknya agregat yang dapat menyumbat pori membran sehingga fluks menurun. Besarnya nilai RFR ini juga digunakan untuk mengevaluasi ketahanan *fouling* pada membran. Semakin besar nilai penurunan fluks airnya maka ketahanan suatu membran terhadap *fouling* semakin rendah, sehingga akan mudah untuk terjadi *fouling*. Sebaliknya, semakin kecil nilai penurunan fluks airnya maka membran tersebut memiliki ketahanan *fouling* yang baik. Nilai ketahanan *fouling* pada membran PSf setelah adsorpsi BSA pH 5 adalah paling rendah yaitu sebesar 0,825 (kurang dari 1) yang berarti menandakan terjadinya *fouling* adsorptive.

Menurut Wenten (2000), ketergantungan proses adsorpsi protein pada hidrofilisitas dan hidrofobisitas

membran disebabkan oleh perubahan struktur air. Ketika protein berada dalam larutan, permukaan protein berhubungan kuat dengan air, dimana energi bebas Gibbs dari molekul air yang terdekat dengan membran ditentukan oleh adanya interaksi ikatan hidrogen dan dipol. Namun, permukaan membran yang hidrofobik tidak dipengaruhi oleh interaksi tersebut. Akibatnya molekul air yang terdekat dengan permukaan membran hidrofobik mempunyai energi bebas Gibbs lebih rendah dibandingkan air dalam larutan. Sehingga pada kasus ini, akan menghasilkan interaksi tarik menarik yang cukup kuat antara protein dan permukaan membran yang menyebabkan terjadinya adsorpsi protein.

## KESIMPULAN

Berdasarkan analisis hasil penelitian ini, dapat diambil kesimpulan bahwa masuknya gugus sulfonat pada struktur polisulfon (PSF), menghasilkan suatu membran dengan karakter yang lebih polar dan hidrofilik. Karakter ini mempengaruhi nilai fluks air dan proteinnya. Membran polisulfon termodifikasi (SPSF) memiliki nilai fluks air dan protein yang lebih tinggi dibanding membran PSF. Fluks protein dengan berbagai pH larutan umpam menunjukkan bahwa pH 5 memiliki fluks protein paling rendah pada kedua jenis membran, PSF dan SPSF. Analisis ketahanan *fouling*nya menunjukkan bahwa membran SPSF memiliki ketahanan *fouling* yang lebih tinggi dibanding membran PSF.

## DAFTAR PUSTAKA

- Boerlage, S.F.E. 2001. *Scaling and Particulate Fouling in Membrane Filtration Systems*. Delft The Netherlands: Swets & Zeitlinger Publishers.
- Handayani, S., Eniya, L. D., Widodo, W. P., dan Roekmijati, W. S. 2007. Preparasi Membran Elektrolit Berbasis Poliaromatik Untuk Aplikasi Sel Bahan Bakar Metanol Langsung Suhu Tinggi. *Indonesia Journal of Material Science*. Vol. 8 (3): 192-197.
- Kurniawan, A. 2002. “Pengaruh Fouling Terhadap Konduktansi Listrik Pada Proses Filtrasi Membran Polisulfon”. Tidak Diterbitkan. Skripsi. Bogor: Jurusan Fisika, Institut Pertanian Bogor.

- Mulder, M. 1996. *Basic Principle of Membrane Technology*. 2nd Edition. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Piluharto, B. 2001. "Studi Awal Penggunaan Nata De Coco Sebagai Membran Ultrafiltrasi". Tidak Diterbitkan. Tesis. Bandung: ITB.
- Piluharto, B., Suendo, V., Ciptati, T., dan Radiman, C.L. 2011. Strong Correlation Between Membrane Effective Fixed Charge And Proton Conductivity In The Sulfonated Polysulfone Cation-Exchange Membranes. *Ionics*, Vol. 17 (3): 229–238.
- Smitha, B., Sridhar, S., and Khan, A.A. 2003. Synthesis and Characterization of Proton Conducting Polymer Membranes for Fuel Cells. *Journal of Membrane Science*. Vol. 225 (1): 63-76.
- Susanto, H., Balakrishnan, M., and Ulbricht, M. 2006. Via Surface Functionalization by Photograft Copolymerization to Low-fouling Polyethersulfone-based Ultrafiltration Membranes. *Journal of Membrane Science*. Vol. 288 (1): 157–167.
- Yamagishi, H., Crivello, J. V., Belfort, G. 1995. Development of a Novel Photochemical Technique for Modifying Poly(arylsulfone) Ultrafiltration Membranes. *Journal of Membrane Science*. Vol. 105 (3): 237-247.