

MODEL PERPINDAHAN MASSA PADA PEMEKATAN SARI JERUK SIAM DENGAN *REVERSE OSMOSIS* TEKANAN RENDAH

MASS TRANSFER MODEL FOR CONCENTRATING SIAM JUICE BY LOW PRESSURE REVERSE OSMOSIS

Erliza Noor^{1)*}, Adetiya Rachman², Setyadjit³

¹Departemen Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor
Kampus IPB Darmaga PO BOX 220 Bogor
Email : erlizanoor@yahoo.com

²Balai Pengkajian Teknologi Pertanian Jawa - Barat

³Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Pascapanen Pertanian
Jl. Tentara Pelajar No. 12 A Bogor

ABSTRACT

This research studied mass transfer model for concentrating siam juice by low pressure reverse osmosis (LPRO). A spiral wound module equipped by a polyamide membrane was operated at various transmembrane pressures and crossflow velocities. The permeate flux was predicted by using a modification of Solution-Diffusion (SD) with thin film model and adsorption resistance model. Modified solution diffusion model with adsorption resistance predicted well the flux for LPRO (< 8 bars) compared to modified solution diffusion and thin film model. Concentrating of juice by LPRO was more influenced by adsorption rather than by deposition of solute on the membrane surface.

Keywords: low pressure reverse osmosis, concentration of siam juice, solution diffusion model, adsorption

ABSTRAK

Penelitian ini mempelajari model perpindahan massa pada pemekatan sari jeruk siam dengan *Reverse Osmosis* (RO) bertekanan rendah atau disebut *Low Pressure Reverse Osmosis* (LPRO) menggunakan membran poliamida berkonfigurasi lilitan spiral pada variasi laju alir umpan dan tekanan. Fluksi diprediksi menggunakan model modifikasi *Solution-Diffusion* (SD) dengan model lapisan tipis dan model adsorpsi membran. Model SD-tahanan adsorpsi ternyata lebih baik untuk memperkirakan fluksi pada RO tekanan rendah (< 8 bar) dibanding dengan model SD – lapisan tipis. Fluksi pada pemekatan sari jeruk dengan RO pada tekanan rendah lebih dipengaruhi oleh adsorpsi solut dibanding penumpukan solut pada permukaan membran.

Katakunci: *reverse osmosis* tekanan rendah, pemekatan sari jeruk siam, model *solution diffusion*, adsorpsi

PENDAHULUAN

Model matematis pada RO umumnya dilakukan untuk memprediksi fluksi, kinerja proses dan perancangan proses. Model ini dapat memprediksi karakteristik pemisahan sehingga dapat meminimalkan penelitian yang harus dilakukan untuk menjelaskan sistem tertentu. Pada awalnya model RO terbatas untuk pemisahan garam. Perluasan aplikasi RO mendorong pengembangan model perpindahan massa pada RO tidak hanya untuk desalinasi air laut, tetapi juga berkembang untuk aplikasi lain terutama untuk industri makanan dan farmasi. Model dapat dibedakan atas model termodinamika satu arah (*irreversible thermodynamics*), model membran nonpori atau homogen (*nonporous or homogeneous membrane models*) dan model pori (*pore models*) (Williams, 2003). Model yang telah banyak digunakan diantaranya model *preferential sorption-capillary flow* (Murthy dan Gupta, 1997; Ghiu *et al.*, 2003). Model tersebut termasuk kategori model pori.

Salah satu model perpindahan massa untuk RO yang dikembangkan dari larutan garam untuk aplikasi lain adalah model Difusi Larutan (*Solution Diffusion* atau SD). Model ini terbukti mampu memprediksi fluksi larutan ideal dari larutan multi komponen (*multisolute solution*). Kimura *et al.* (1992) serta Dickson *et al.* (1994) menggunakan model ini pada pemekatan campuran larutan ideal dengan RO dan menghasilkan kesesuaian model dengan hasil percobaan. Selanjutnya pada pemekatan jus apel dengan RO, model Difusi Larutan dikombinasikan dengan teori film (Alvarez *et al.*, 1997). Hasil penelitian menunjukkan model SD yang dikombinasikan dengan teori film mampu memprediksi nilai fluksi pemekatan jus apel dengan akurat. Kombinasi pendekatan pada model ini terutama ditujukan dalam memprediksi fenomena polarisasi konsentrasi pada permukaan membran. Pengembangan model SD dengan menggunakan membran LPRO (*Low Pressure Reverse Osmosis*) dilakukan oleh Williams (1989); Bhattacharyya dan

*Penulis untuk korespondensi

Madadi (1988); Deshmukh (1989); dan Kothari (1991) untuk larutan organik. Untuk menjelaskan perolehan fluksi yang rendah maka diperkirakan adanya tahanan akibat proses adsorpsi. Williams (1989) mengasumsikan larutan organik teradsorpsi pada permukaan membran ketika beroperasi pada tekanan rendah. Peristiwa adsorpsi ini menyebabkan tahanan membran bertambah selain dari tahanan instrinsik membran dan dihitung sebagai tahanan adsorpsi (Williams, 2003).

Model Solution Diffusion (SD) – teori film

Alvarez *et al.* (1997) menggunakan model SD dikombinasikan dengan model *thin film* (lapisan tipis) untuk memprediksi fluksi permeat pada pemekatan jus apel dengan persamaan sebagai berikut:

$$J = L_p(AP - \pi(C_m)) \quad (1)$$

$$C_m = C_b \exp(J/k) \quad (2)$$

dimana :

J = fluksi

AP = tekanan transmembran atau *Trans Membrane Pressure* (TMP)

L_p = permeabilitas air

Π = tekanan osmotik

K = koefisien perpindahan massa

C_m = konsentrasi solut di permukaan membran.

Model SD – Tahanan adsorpsi

Model ini dikembangkan Williams (1989) untuk menjelaskan rendahnya nilai fluksi pada pemisahan dan pemurnian larutan organik dengan LPRO. Model mengasumsikan terjadi adsorpsi larutan organik oleh permukaan membran yang menyebabkan peningkatan tahanan membran dalam melewati pelarut. Model yang digunakan adalah:

$$J_w = \frac{\Delta P - \Delta \pi}{R_m + R_{ads}} \quad (3)$$

dimana:

J_w = fluksi air

R_m = tahanan membran

R_{ads} = tahanan adsorpsi

$\Delta \pi$ = perbedaan tekanan osmotik.

Perbedaan tekanan osmosis didapat melalui perhitungan menggunakan model Gibbs yang dimodifikasi Alvarez *et al.* (1997). Tahanan adsorpsi (R_{ads}) dihitung dengan mengukur tahanan membran setelah membran digunakan untuk filtrasi jus jeruk dikurangi tahanan internal membran mengikuti perhitungan dari Rai *et al.* (2006) dalam menghitung tahanan seri ultrafiltrasi jus jeruk mosambi. Menurut Goosen *et al.* (2004) tahanan adsorpsi menunjukkan adanya lapisan adsorpsi solut pada permukaan membran yang bersifat *reversible* yang merupakan penyebab utama penurunan fluksi selama filtrasi membran.

Tekanan osmotik diberikan oleh komponen terlarut sebagai gaya tolak pembalikan proses osmosis pada membran semipermeabel terhadap air. Tekanan

osmotik dalam penelitian diukur sebagai perbedaan tekanan osmosis ($\Delta \pi$) pada permukaan membran di sisi umpan dan tekanan osmosis pada sisi permeat sebagai berikut:

$$\Delta \pi = \pi(C_b) - \pi(C_p) \quad (4)$$

Dimana subskrip b dan p menunjukkan konsentrasi pada umpan dan permeat. Tekanan osmotik pada jus jeruk ditentukan oleh komponen utama dengan konsentrasi yang tinggi dalam jus jeruk yaitu komponen gula (glukosa dan sukrosa) dan asam organik (asam sitrat). Tekanan osmotik dihitung dengan persamaan berikut:

$$\pi(C_s, C_g, C_c) = \frac{RT}{V_w} \ln \left[\frac{(1000 - C_s - C_g)/M_w - 4C_s/M_s - 2C_g/M_g}{(1000 - C_s - C_g)/M_w - 3C_s/M_s - C_g/M_g} \right] + RT \frac{C_c}{M_c}$$

dimana:

C_s, C_g, C_c = konsentrasi sukrosa, glukosa, asam sitrat pada permukaan membran

M_s, M_g, M_c = berat molekul sukrosa, glukosa, asam sitrat

M_w = berat molekul air

V_w = volume molar air murni ($18,07 \times 10^{-3} \text{ kmol}^{-1}$)

R = konstanta gas ideal ($0,08206 \text{ atm L gmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

T = suhu (K).

Konsentrasi glukosa ditetapkan berdasarkan asumsi prosentase glukosa dalam jus jeruk (ACT, 2008) sebesar 52% dari total gula pereduksi. Konsentrasi sukrosa, glukosa dan asam sitrat pada permukaan membran diukur dengan persamaan 5, dimana subskrip r , p dan b menunjukkan konsentrasi pada retentat, permeat dan umpan. Sedangkan subskrip i menunjukkan jenis komponen.

$$C_{ri} = C_{pi} + (C_{bi} - C_{pi}) \exp(J/k_i) \quad (5)$$

Nilai koefisien transfer massa komponen i (k_i) pada model difusi larutan yang dikembangkan Alvarez *et al.* (1997) diprediksi dari hubungan bilangan tak berdimensi untuk modul *spiral wound* sebagai berikut:

$$k_i = 0,238 \frac{D_i^{0,75} \rho^{0,625} v^{1,5-0,625n}}{d_h^{0,75-0,625n} K^{0,625} \left(\frac{6n+2}{n}\right)^{0,625n}} \quad (6)$$

Nilai K dan n diperoleh dari plot garis persamaan hubungan logaritmik antara laju geser dengan viskositas. ρ dan v adalah densitas dan laju alir. Diameter hidraulik ekivalen, d_h , dihitung menggunakan persamaan 7. Sedang koefisien difusi (D_i) glukosa, sukrosa dan asam sitrat pada lapisan batas dihitung dengan menggunakan persamaan 8 yang diperoleh Gladen dan Dole (Kimura *et al.*, 1992) untuk modul *spiral wound*.

$$d_h = 2 \left(\frac{a \times b}{\pi} \right)^{0,5} \quad (7)$$

$$D_i = D_{oi} (\mu_w / \mu)^{0,45} \quad (8)$$

dimana i menunjukkan komponen, a dan b masing-masing lebar dan tinggi celah (slit) pada modul membran, π sama dengan 3,14. D_{oi} adalah koefisien difusivitas komponen i dalam larutan sangat encer. Nilai D_{oi} untuk glukosa dan sukrosa pada suhu 25 °C adalah $6,9 \times 10^{-10}$ dan $5,24 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ detik}^{-1}$. μ viskositas larutan dengan subskrip w menunjukkan viskositas pada permukaan membran.

Pengembangan model SD untuk jus buah maupun larutan organik dengan RO pada umumnya menggunakan jenis membran RO dengan kondisi operasi TMP tinggi di atas 20 bar. Pengembangan model untuk jus buah dengan menggunakan RO dengan tekanan rendah belum banyak dipublikasikan. Penelitian ini mengkaji proses pemekatan sari jeruk siam menggunakan membran RO dengan tekanan rendah (< 10 bar), serta memprediksi fluksi menggunakan model SD. Model SD akan dikombinasikan dengan model lapisan tipis dan adsorpsi. Variabel operasi yang berpengaruh besar pada pemisahan ini akan ditentukan melalui hasil kesesuaian model dan percobaan.

METODE PENELITIAN

Bahan dan Metode

Bahan baku yang digunakan adalah jus jeruk siam Pontianak dengan konsentrasi antara 6,5 – 8° brix yang diperoleh dari hasil pemisahan dengan modul mikrofiltrasi dengan membran *polypropylene* (PP) berukuran pori 0,1 μm . Pemekatan jus dilakukan dengan RO dengan modul spiral berputar (*spiral wound*) menggunakan membran Poliamida (PA) dan luas permukaan 0,59 m^2 . Umpun dialirkan dengan moda silang (*crossflow*).

Parameter Mikrofiltrasi dan Reverse Osmosis

Mikrofiltrasi jus jeruk bertujuan untuk menghilangkan rasa pahit yang disebabkan senyawa limonin dan naringin. Jus jeruk hasil persiapan bahan

baku diumpankan ke membran mikrofiltrasi dengan kondisi operasi terbaik yang diperoleh Aghitsni (2008) yaitu TMP 1,74 bar dan laju alir 0,08 $\text{m} \text{ detik}^{-1}$. Proses RO dilakukan menggunakan laju alir 0,01; 0,015; 0,02, dan 0,03 $\text{m} \text{ detik}^{-1}$ dan tekanan 4, 6 dan 8 bar. Pengambilan sampel RO dilakukan setelah tercapai kondisi tunak yaitu setelah 15 menit operasi.

Model yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah model difusi-larutan yang dikembangkan Alvarez *et al.* (1997) dan model tahanan adsorpsi yang digunakan oleh Williams (1989). Model yang dianalisis mempertimbangkan jus jeruk sebagai larutan multikomponen dan jenis membran. Modelan pada akhirnya bertujuan untuk melihat faktor-faktor yang berpengaruh terhadap mekanisme perpindahan massa pemekatan jus jeruk dengan RO. Pada tahap ini fluksi hasil percobaan dibandingkan dengan fluksi prediksi dari model.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Permeabilitas dan Tahanan Membran

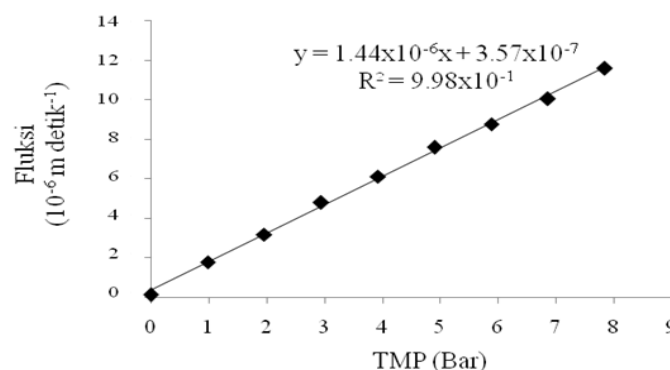
Permeabilitas dan tahanan membran RO poliamida yang digunakan pertama-tama ditentukan untuk penentuan fluksi menggunakan model SD tahanan adsorpsi. Tahanan dihitung dengan mengukur fluksi air pada laju alir tetap dan beberapa TMP. Permeabilitas membran diperoleh dari kemiringan (*slope*) garis antara fluksi dan TMP (Gambar 1).

Kemiringan garis dari persamaan pada Gambar 1 menunjukkan nilai permeabilitas, L_p , membran yaitu sebesar $1,44 \times 10^{-6} \text{ m} \text{ detik}^{-1} \text{ bar}^{-1}$ atau $5,17 \text{ L} \text{ m}^{-2} \text{ jam}^{-1} \text{ bar}^{-1}$. Tahanan membran, R_m , diperoleh dari permeabilitas membran, dimana $R_m = 1/L_p$ dan diperoleh sebesar $6,94 \times 10^5 \text{ bar} \text{ detik} \text{ m}^{-1}$ atau sebesar $0,91 \text{ bar} \text{ m}^2 \text{ jam} \text{ L}^{-1}$.

Model Perpindahan Massa

Model SD – Thin Film

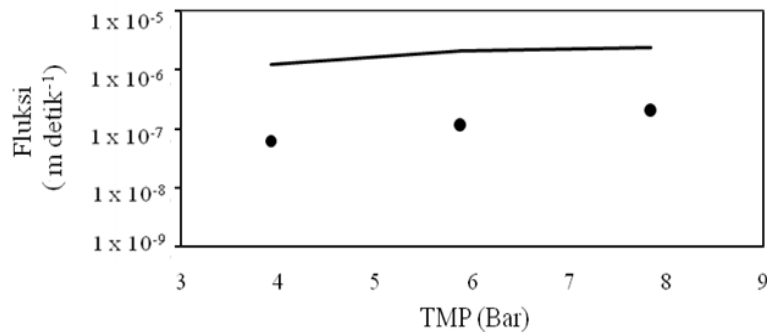
Hasil perhitungan fluksi sari jeruk pada variasi TMP 4, 6 dan 8 bar dan laju alir 0,01 – 0,03 $\text{m} \text{ detik}^{-1}$ dengan menggunakan persamaan 1 dan 2 menunjukkan nilai satu orde lebih tinggi dibandingkan fluksi hasil percobaan (Gambar 2). Namun fluksi keduanya menunjukkan pola yang sama, yaitu kenaikan fluksi dengan pertambahan TMP.



Gambar 1. Fluksi air pada berbagai tekanan (laju alir 0,01 $\text{m} \text{ detik}^{-1}$)

Pada kenaikan TMP selisih nilai fluksi hasil prediksi dan percobaan makin mengecil. Pada RO dengan TMP tinggi, model SD – lapisan tipis dapat memprediksi fluksi dengan baik (Alvarez *et al.*, 1997).

Fluksi hasil percobaan LPRO menunjukkan adanya faktor selain TMP dan konsentrasi solut di permukaan membran yang mempengaruhi fluksi.



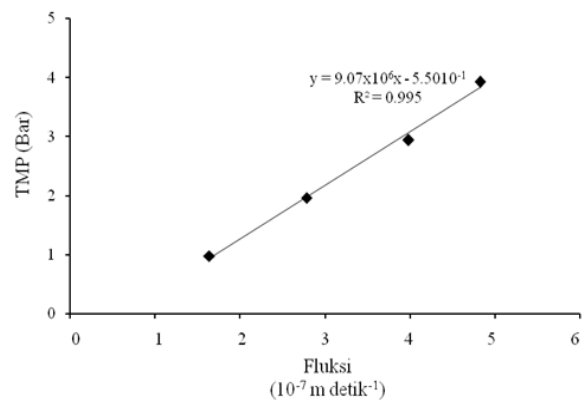
Gambar 2. Fluksi percobaan (•) dan prediksi model (-) menggunakan model SD – lapisan tipis pada laju alir 0,03 m detik⁻¹

Model SD – Tahanan Adsorpsi

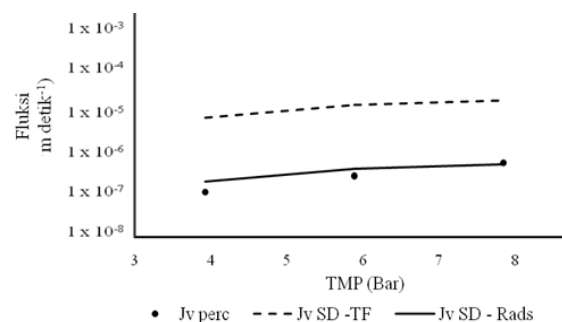
Perkiraan fluksi dengan Model SD - tahanan adsorpsi dihitung menggunakan persamaan (3) (Williams, 2003). Persamaan ini sesuai untuk memprediksi fluksi larutan organik pada RO tekanan rendah. Pada model ini selain tahanan membran juga diperhitungkan pertambahan tahanan akibat adanya adsorpsi solut oleh membran. Nilai tahanan adsorpsi diperkirakan dari tahanan membran setelah filtrasi (R'_m) dikurangi nilai tahanan membran internal (R_m) yang diukur dengan menggunakan air murni (Rai *et al.*, 2006). Tahanan membran setelah filtrasi (R'_m) didapat dari pengukuran fluksi air murni pada beberapa TMP setelah membran digunakan untuk filtrasi sari jeruk dan dilakukan pembilasan untuk membersihkan sisa jeruk dipermukaan membran. Pengukuran fluksi air pada beberapa TMP untuk perkiraan tahanan membran setelah filtrasi (R'_m) diperoleh dari kemiringan garis. Tahanan adsorpsi (R_{ads}) didapat dari persamaan sebagai berikut :

$$R_{ads} = R'_m - R_m \quad \dots\dots\dots (9)$$

Kemiringan garis pada Gambar 3 menunjukkan tahanan R'_m sebesar $9,07 \times 10^6$ bar detik m^{-1} . Setelah tahanan ini dikurangi dengan tahanan membran (R_m) diperkirakan tahanan adsorpsi sebesar $8,38 \times 10^6$ bar detik m^{-1} . Tahanan adsorpsi menunjukkan adanya solut yang terikat oleh membran. Solut pada larutan umpam diadsorpsi oleh permukaan membran dan selanjutnya melewati dinding membran melalui proses difusi. Tahanan adsorpsi yang diperoleh digunakan pada perhitungan persamaan (3) untuk memprediksi fluksi. Perhitungan ini menunjukkan hasil perediksi yang mendekati fluksi percobaan (Gambar 4).



Gambar 3. Hubungan TMP dan fluksi air untuk penentuan tahanan membran setelah filtrasi (R'_m)



Gambar 4. Perbandingan fluksi percobaan (•) dan hasil prediksi menggunakan model SD – tahanan adsorpsi (—) dan SD – lapisan tipis (- - -) pada laju alir 0,03 m detik⁻¹

Hal ini menunjukkan bahwa model SD - tahanan adsorpsi dapat memprediksi fluksi lebih baik dibandingkan model SD - lapisan tipis. Prediksi nilai fluksi pada variasi laju alir dengan model SD - tahanan adsorpsi menunjukkan perpindahan massa lebih dipengaruhi oleh proses adsorpsi dibanding akumulasi solut pada permukaan membran. Tahanan adsorpsi memberikan pengaruh yang dominan pada pemekatan sari jeruk menggunakan RO bertekanan rendah (< 10 bar).

Perhitungan neraca gula total digunakan untuk memperkirakan pengaruh variabel proses terhadap massa gula yang teradsorpsi. Pengamatan dilakukan dengan menghitung konsentrasi gula di umpan, retentat dan permeat. Selisih massa gula pada aliran masuk dan keluar pada berbagai laju alir dan TMP seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Pada TMP dibawah 8 bar, kenaikan laju alir umpan kecil pengaruhnya pada tingkat adsorpsi, namun pada TMP 8 bar, pengaruhnya terlihat cukup signifikan menurunkan tingkat adsorpsi. Pada penggunaan TMP yang tinggi (> 8 bar) diperkirakan proses perpindahan massa akan lebih dipengaruhi oleh

dekomposisi solut pada permukaan membran dan fluksi lebih baik diperkirakan dengan model SD - lapisan tipis.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Mekanisme perpindahan massa pada pemekatan jus jeruk dengan *Reverse Osmosis* pada TMP rendah (< 8 bar) lebih didominasi oleh adsorpsi solut pada membran dibandingkan akumulasi solut pada permukaan membran. Hal ini karena model SD-tahanan membran yang lebih baik untuk memperkirakan fluksi dibanding model SD-lapisan tipis. Adsorpsi solut pada pemisahan menggunakan LPRO akan menurun dengan kenaikan laju alir umpan.

Saran

Untuk memperkecil adsorpsi solut pada pemisahan menggunakan *Low Pressure Reverse Osmosis* diperlukan penggunaan laju alir umpan yang tinggi.

Tabel 1. Neraca massa gula total pada pemisahan jus jeruk

Laju alir (m detik ⁻¹)	TMP (Bar)	Massa (g detik ⁻¹)			Teradsorpsi	% adsorpsi
		Masuk	Keluar			
		Umpan	Permeat	Retentat		
0,01	4	0,95134	0,00162	0,94967	0,00005	0,01
	6	0,90015	0,00179	0,89818	0,00018	0,02
	8	0,80868	0,00232	0,80413	0,00222	0,28
0,015	4	1,22029	0,00141	1,21886	0,00003	0,002
	6	1,22260	0,00195	1,22046	0,00019	0,02
	8	1,21795	0,00243	1,21315	0,00237	0,19
0,02	4	1,79455	0,00180	1,79273	0,00002	0,001
	6	1,52879	0,00146	1,52715	0,00018	0,01
	8	1,50380	0,00197	1,50000	0,00184	0,12
0,03	4	2,58548	0,00176	2,58368	0,00003	0,001
	6	2,60038	0,00222	2,59799	0,00017	0,01
	8	2,62708	0,00239	2,62215	0,00254	0,10

DAFTAR PUSTAKA

- [ACT] ACT Health Protection Service. 2008 Preservatives, Sugars and Metals in Fruit Juices. [terhubung berkala]. www.health.act.gov.au/c/healthTa=sendfile&ft=p&fid=1053860420&sid [23 Feb 2008].
- Alvarez V, Alvarez S, Riera FA, Alvarez R. 1997. Permeate Flux Prediction In Apple Juice Concentration by Reverse Osmosis. *J. Memb Sci* 127: 25-34

- Aghitsni F. 2008. Model Perpindahan Massa pada Mikrofiltrasi untuk Penghilangan Limonin dan Naringin dari Jus Jeruk Siam (*Citrus Nobilis* L. Var *Microcarpa*) [Tesis]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Bhattacharyya D, Hadad MR. 1988. Separation Phenolic Compounds by Low Pressure Composite Membrane : Mathematical Model And Experiment Results. *AIChE Symposium Series* 84 (261): 139.
- Desmukh R. 1989. Adsorption of Selected Organics On Reverse Osmosis Membranes and Its Effect On Membrane Separation

- Characteristics. [Thesis]. Lexington: University of Kentucky.
- Dickson JM, Whitacker G, DeLeeuw J, Spencer J. 1994. Dilute Single And Mixed Solute Systems In a Spiral Wound Reverse Osmosis Module. Part II: Experimental data and application of the model. *Desalination* 99: 1.
- Ghiu SMS, Carnahan RP dan Barger M. 2003. Mass Transfer In Reverse Osmosis TFC Membranes Dependence on The Salt Physical and Thermodynamic Parameters. *Desalination* 157: 385-393.
- Goosen MFA, Sablani SS, Al-Hinai H, Al-Obeidani S, Al-Belushi R, Jackson D. 2004. Fouling of Reverse Osmosis and Ultrafiltration Membranes: A Critical Review. *Separation Sci Technol* 39 (10): 2261-2298.
- Kimura S, Nabetani H, Nakajima M, Watanabe A, Nakao S. 1992. Prediction Of The Flux For The Reverse Osmosis of a Solution Containing Sucrose and Glucose. *J Chem Eng Jpn* 25: 5-11.
- Kothari A. 1991. Concentration and Purification Of Hazardous Wastes By Low Pressure Composite Membranes: Treatment Of Soil-Wash Rinse Waste Leachates. [Thesis]. Lexington: University of Kentucky.
- Murthy ZVP dan Gupta SK. 1997. Estimation Of Mass Transfer Coefficient Using a Combined Nonlinear Membran Transport And Film Theory Model. *Desalination* 109: 39-49.
- Rai P, Rai C, Majumdar GC, DasGupta S, De S. 2006. Resistance In Series Model For Ultrafiltration of Mosambi (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) Juice in a Stirred Continuous Mode. *J Memb Sci* 10: 116-122.
- Williams M. 1989. Separation and Purification of Dilute Hazardous Organics by Ozonation Low Pressure Composite Membrane Process. [Thesis]. Lexington: Department of Chemical Engineering, University of Kentucky.
- Williams M. 2003 A Review of Reverse Osmosis Theory. EET Corporation and Williams Engineering Services Company, Inc.