

MODEL PERPINDAHAN MASSA MIKROFILTRASI LEMBU SIAM (*Citrus  
nobilis* L. var. *microcarpa*)

Erliza Noor  
02521101000  
Genladi

Departemen Teknologi Industri Pertanian  
Fakultas Teknologi Pertanian  
Institut Pertanian Bogor



Surat Pendokumentasian Karya Ilmiah  
Nomor 699/TS.6.3/PP/2009

Karya ilmiah hasil penelitian atau hasil pemikiran yang tidak dipublikasikan, dengan judul

1. STUDI KINETIKA DAN MEKANISME PERPINDAHAN MASSA NANOFILTRASI MENGGUNAKAN MODEL TAHAPAN SERI PADA PEMISAHAN BETA-KAROTEN DAN ALFA TOKOFEROL MINYAK SAWIT DALAM ISOPROPANOL, 2008  
Penulis : Uki Ismiyati, Sapta Raharja, Prayoga Suryadarma, Erliza Noor
2. KEBIJAKAN MANAJEMEN LINGKUNGAN UNTUK EMISI DIKOKSIN, FURAN YANG BERSUMBER DARI INDUSTRI LOGAM, 2008  
Penulis : Lina Warlina, Erliza Noor, Akhmad Fauzi, Rudy C Tarumingkeng, Surjono H Sutjahjo
3. MODEL PERPINDAHAN MASSA MIKROFILTRASI JUS JERUK SIAM (Citrus nobilis L. Var microcarpa), 2008  
Penulis : Erliza Noor, Fatma Aghitsni, Setyadjit
4. PROSES MIKROFILTRASI UNTUK PENGHILANG LIMONIN DAN NARINGIN PADA JUS JERUK SIAM (Citrus nobilis L. Var microcarpa), 2008  
Penulis : Erliza Noor, Fatma Aghitsni, Setyadjit, Dondy Setyabudi
5. KAJIAN AKTIVITAS HAMBAT PERTUMBUHAN BAKTERI PATOGEN OLEH SERBUK BAKTERIOSIN YANG DIHASILKAN BAKTERI ASAM LAKTAT GALUR SCG 1223, 2008  
Penulis : Sri Usniati, Erliza Noor, Siti Rachmanti Nasution
6. HIDROLISIS PATI GARUT OLEH BERBAGAI KOMBINASI ENZIM PADA PEMBENTUKAN SIKLODEKSTRIN, 2008  
Penulis : Erliza Noor
7. PENJERNIHAN EKSTRAK DAUN STEVIA (Stevia rebaudiana Bertoni) DENGAN ULTRAFILTRASI ALIRAN SILANG, 2008  
Penulis : Erliza Noor, Fifi Isdranti

Didokumentasikan di Departemen Teknologi Industri Pertanian Fakultas Teknologi Pertanian Institut Pertanian Bogor.

Ketua

Prof. Dr. H. Nastiti Siswi Indrasti  
NIP. 19621009 198903 2 001

# MODEL PERPINDAHAN MASSA PADA MIKROFILTRASI JUS JERUK SIAM (*CITRUS NOBILIS* L. VAR *MICROCARPA*)

Erliza Noor<sup>1</sup>, Fatma Aghitsni<sup>2</sup>, Sctyadjit<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor

<sup>2</sup>Dinas Perindustrian, Perdagangan, dan Koperasi Pemerintah Kabupaten Sambas

<sup>3</sup>Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Pascapanen Pertanian

Masalah utama proses membran adalah penurunan fluksi. Penurunan kinerja membran dapat dikendalikan apabila mekanisme perpindahan massa yang terjadi selama proses filtrasi dipahami. Penelitian ini bertujuan memprediksi mekanisme perpindahan massa yang terjadi selama proses mikrofiltrasi jus jeruk. Bahan baku yang digunakan adalah jeruk Siam Pontianak. Pada penelitian ini dipelajari karakteristik jus jeruk dan mekanisme perpindahan massa pada proses mikrofiltrasi jus jeruk dengan mode operasi resirkulasi. Mekanisme perpindahan massa dianalisis dengan cara membandingkan data hasil penelitian dengan data hasil perhitungan menggunakan model *thin film* untuk fluida non-Newtonian berdasarkan analisis hilangan tak berdimensi dengan pendekatan difusi Brownian dan *self-diffusion*, model Zidney-Colton, serta model Davis-Sherwood. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jus jeruk Siam merupakan fluida non-Newtonian dan bersifat dilatant dengan nilai indeks perilaku aliran ( $n$ ) sebesar 1.47. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai fluksi percobaan lebih cenderung kepada nilai fluksi prediksi yang menggunakan model untuk suspensi, baik itu model Zidney-Colton maupun model Davis-Sherwood. Berdasarkan kecenderungan terhadap model-model tersebut, maka jus jeruk dapat dikategorikan sebagai suspensi. Salah satu faktor yang berpengaruh dominan dalam mekanisme perpindahan massa pada mikrofiltrasi jus jeruk adalah konsentrasi partikel, bukan konsentrasi senyawa limonin dan naringin. Mekanisme perpindahan massa pada mikrofiltrasi jus jeruk sangat tergantung pada sifat jus. Model Zidney-Colton lebih sesuai untuk menggambarkan mekanisme perpindahan massa pada mikrofiltrasi jus jeruk yang dipengaruhi oleh ukuran dan konsentrasi partikel di dalam larutan serta laju geser. Hal ini yang ditunjukkan oleh nilai *mean square error* model Zidney-Colton yang lebih kecil dibandingkan dengan model lainnya. Dengan demikian, mekanisme perpindahan massa pada mikrofiltrasi jus jeruk untuk penghilangan limonin serta naringin dapat dideskripsikan sebagai mekanisme perpindahan massa secara difusi yang dipacu oleh geseran (*shear-induce diffusion*). Nilai fluksi percobaan lebih mendekati nilai fluksi prediksi menggunakan model polarisasi konsentrasi Zidney-Colton untuk suspensi encer dibandingkan dengan model untuk suspensi pekat, dengan demikian jus jeruk dapat dikategorikan sebagai suspensi dengan sifat encer.

Kata kunci : mikrofiltrasi, *Citrus nobilis*, suspensi, *shear-induce diffusion*

ABSTRACT

## PENDAHULUAN

Salah satu kendala aplikasi teknologi membran secara komersial adalah penurunan fluksi permeat. Polarisasi konsentrasi dan *fouling* adalah dua fenomena umum yang menyebabkan penurunan fluksi dan berimplikasi pada penurunan kinerja membran. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mempelajari penurunan kinerja membran pada filtrasi jus jeruk. Rai *et al.* (2006b) menggunakan model resistansi seri untuk mempelajari *fouling* pada proses ultrafiltrasi jus jeruk manis dan Cassano *et al.* (2007b) mempelajari mekanisme *fouling* pada ultrafiltrasi jus *blood orange*. Analisis penurunan kinerja terutama difokuskan pada mekanisme *fouling*. Hasil analisis belum menggambarkan mekanisme utama yang sebenarnya terjadi pada proses filtrasi sehingga belum dapat memberikan solusi yang jelas untuk mengatasi penurunan kinerja membran.

Penurunan kinerja membran dapat dikendalikan apabila mekanisme perpindahan massa yang terjadi selama proses filtrasi dipahami. Menurut Belfort (1994), pemahaman terhadap perilaku

larutan selama proses filtrasi tidak hanya untuk mengurangi polarisasi konsentrasi dan *fouling*, tetapi juga bermanfaat dalam pengembangan mode operasi yang lebih baik dan kemungkinan untuk lebih mengefisienkan elemen-elemen membran.

Model yang umum digunakan untuk menggambarkan mekanisme perpindahan massa yang terjadi selama proses filtrasi membran adalah model *thin film* (Cheryan, 1998). Salah satu pelopor modifikasi teori film yang hasil penelitiannya banyak dijadikan acuan adalah Shen dan Probstein (1977). Shen dan Probstein (1977) menghasilkan model untuk memprediksi fluksi pada ultrafiltrasi makromolekul dan bersifat Newtonian. Namun demikian, ketika model ini diaplikasikan pada umpan dengan sifat fluida yang berbeda, perilaku fluksi yang dihasilkan menjadi berbeda juga (nilai prediksi lebih tinggi atau lebih rendah *dm* nilai percobaan) sehingga tidak dapat menggambarkan fenomena sebenarnya. Kesalahan dalam memprediksi fluksi terutama disebabkan oleh keterbatasan pendekatan yang digunakan.

Oleh karena itu, pada dua puluh tahun terakhir modifikasi teori film berkembang cukup pesat dengan pendekatan berdasarkan sifat dan karakteristik fluida yang digunakan seperti Newtonian, non-Newtonian, makromolekul, suspensi, atau larutan dengan partikel besar serta konsentrasi pekat atau encer. Beberapa modifikasi teori film dengan pendekatan sifat dan karakteristik bahan dilakukan untuk menyempurnakan teori sebelumnya seperti untuk suspensi (Zidney dan Colton, 1986; Davis dan Birdsell, 1987; Davis dan Leighton, 1987; Romero dan Davis, 1990; Davis dan Sherwood, 1990) dan untuk makromolekul (Trettin dan Doshi, 1980; Song dan Elimelech, 1995b; Pritchard *et al.*, 1995; Charcosset dan Choplin, 1996). Dengan demikian, pengetahuan tentang sifat dan karakteristik umpan diperlukan untuk menentukan model mana yang cocok digunakan sehingga dapat menggambarkan mekanisme perpindahan massa yang sebenarnya.

Deposisi zat terlarut atau partikel pada permukaan membran atau di dalam pori membran terjadi ketika permeasi relatif lebih tinggi daripada variasi mekanisme perpindahan balik. Peristiwa ini seringkali terjadi pada mikrofiltrasi kotoid dan partikel yang memiliki koefisien difusi rendah (Belfort *et al.*, 1994). Dengan demikian dapat difahami bahwa mekanisme perpindahan balik massa bervariasi tergantung pada koefisien difusi zat terlarut. Mekanisme perpindahan massa pada filtrasi jus jeruk kemungkinan menunjukkan perilaku tertentu berdasarkan sifat alaminya dengan kandungan berbagai macam partikel terlarut serta tak terlarut dan sampai saat ini belum ditemukan referensi yang memuat hal tersebut. Beberapa penelitian secara teori memfokuskan pada variasi mekanisme perpindahan massa yang diakibatkan oleh variasi pergerakan partikel karena pengaruh geseran, sehingga menghasilkan model yang berbeda untuk memprediksi fluksi. Pergerakan partikel terjadi antara lain karena difusi Brownian dan difusi yang dipacu oleh geseran (*shear-induced diffusion*).

Berdasarkan uraian di atas, untuk memperkirakan mekanisme perpindahan massa yang terjadi selama proses filtrasi jus jeruk, pada penelitian ini digunakan beberapa model *thin film* yang dikembangkan berdasarkan beberapa pendekatan, yaitu berdasarkan analisis bilangan tak berdimensi yang difokuskan pada efek difusi Brownian serta difusi yang dipacu oleh geseran dan berdasarkan pertimbangan sifat bahan (makromolekul dan suspensi). Dengan mempertimbangkan

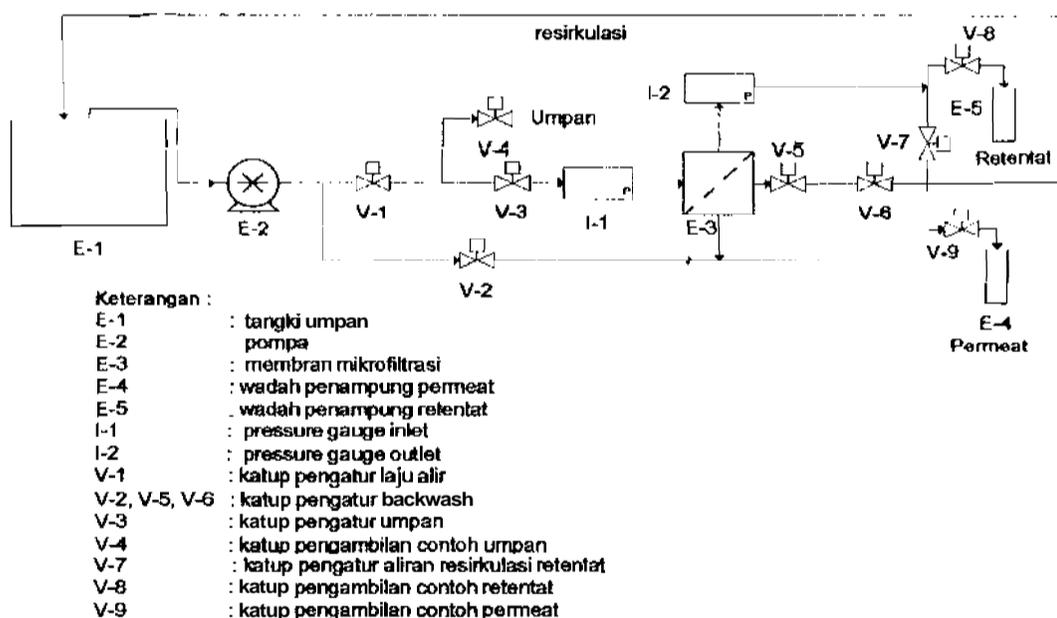
sifat bahan, maka pada hasil akhir diharapkan dapat diketahui sifat jus jeruk yang sebenarnya, apakah merupakan suspensi (pekat atau encer) atau makromolekul.

Proses filtrasi membran diharapkan menghasilkan fluksi yang tinggi. Karena itu perlu diketahui faktor-faktor dominan yang berpengaruh terhadap mekanisme perpindahan massa pada proses mikrofiltrasi jus jeruk. Penelitian ini bertujuan memprediksi mekanisme perpindahan massa yang terjadi selama proses mikrofiltrasi jus jeruk siam.

## BAHAN DAN METODE

### Bahan dan Peralatan

Penelitian berlangsung pada tahun 2007 yang dilakukan di laboratorium teknologi kimia Departemen Teknologi Industri Pertanian, FATETA, dan laboratorium Balai Besar Litbang Pasca Panen Pertanian. Larutan umpan yang digunakan dalam penelitian ini adalah jus jeruk siam Pontianak. Peralatan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah membran mikrofiltrasi (GDP Filter) dengan modul berbentuk *hollow fiber*, berbahan baku polipropilena (PP). Modul membran berukuran pori 0.1  $\mu\text{m}$  dengan luas area 1  $\text{m}^2$  dan panjang 0.3981 m. Jumlah fiber membran sebanyak 1600 buah berdiameter 0.5 mm. Skema rangkaian peralatan mikrofiltrasi dapat dilihat pada Gambar 1. Untuk penentuan sifat fisik jus jeruk digunakan piknometer dan rheometer (Digital Rheometer DVIII+, Brookfield).



Gambar 1. Skema rangkaian peralatan mikrofiltrasi

### Metodologi

Tahap awal dari penelitian ini adalah penentuan sifat fisik dan reologi jus jeruk. Penentuan sifat fisik dan reologi jus jeruk meliputi pengukuran densitas dan viskositas jus. Densitas jus jeruk

diukur menggunakan piknometer pada suhu 20°C dan 29°C. Sedangkan pengukuran viskositas jus jeruk dilakukan menggunakan rheometer *Brookfield* pada kondisi putaran antara 100 – 200 rpm dan suhu 25°C - 26°C. Spindel yang digunakan adalah LV2. Penentuan sifat reologi jus jeruk dilakukan dengan cara memplot nilai viskositas terhadap nilai laju geser. Nilai indeks perilaku aliran ( $n$ ) ditentukan dengan memplot nilai  $\ln$  viskositas terhadap nilai  $\ln$  laju geser.

Pada proses mikrofiltrasi, pengukuran fluksi dilakukan setelah tercapai kondisi tunak yaitu pada tekanan antara 1.7 bar – 1.9 bar. Mode operasi mikrofiltrasi yang digunakan adalah sistem resirkulasi yang mana aliran permeat serta retentat dikembalikan lagi ke tangki umpan. Resirkulasi dilakukan selama 30 menit dengan volume umpan sebanyak 1 liter. Laju alir umpan yang digunakan adalah 0.05 - 0.09 m/s. Menurut Konieczny dan Rafa (2000), berdasarkan data eksperimen, fluksi dapat dihitung secara volumetrik dengan menggunakan persamaan (1):

$$J_v = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

$J_v$  = volume fluksi (L/m<sup>2</sup>jam)

$A$  = luas permukaan membran (m<sup>2</sup>).

$dt$  = waktu (jam)

$dV$  = volume permeat (L)

Sistem resirkulasi dilakukan dengan cara menutup katup V-2, V-4, V-8 dan V-9, sedan — katup V-1, V-3, V-5, V-6 dan V-7 dibuka. Umpan yang ada di dalam tangki @-1) disedot oleh pompa (E-2) menuju membran (E-3) dan keluar dari dua sisi, yaitu sisi permeat dan retentat. Permeat mengalir melalui katup V-5, V-6 dan selanjutnya kembali ke umpan, sedangkan retentat mengalir melalui I-2, V-7 dan kembali ke umpan.

Untuk menjaga agar daya tahan dan kinerja membran tetap baik, sebelum dan setelah selesai operasi dilakukan pencucian membran. Metode pencucian yang digunakan adalah metode *backwash*. Pencucian dilakukan dengan metode *backwash* menggunakan air hangat (suhu 40 °C) selama lebih kurang 10 menit. Setelah dilakukan *backwash*, selanjutnya membran dicuci dengan menggunakan larutan NaOH (0.05%) dengan selang pH larutan pencuci antara 10 -11 dengan sistem diresirkulasi selama lebih kurang 1 jam. Efektifitas pencucian ditentukan dengan cara mengukur fluksi air sebelum membran digunakan dan setelah membran dicuci. Setelah digunakan membran harus tetap dalam kondisi basah. Karena itu penyimpanan dilakukan dengan cara merendam modul dalam larutan hipoklorit 200 ppm.

Tahapan selanjutnya adalah pengujian model. Pengujian dilakukan terhadap model perpindahan massa pada lapisan tipis (*thin film*) berdasarkan pendekatan analisis bilangan tak berdimensi yang menggunakan dua perhitungan difusi, yaitu difusi Brownian dan *shelf-diffusion* dan menambahkan sifat reologi jus sebagai faktor koreksi, model *shear-induce diffusion* Zidney-Colton, serta model *shear-induce diffusion* Davis-Sherwood. Uraian berikut adalah penjelasan tentang persamaan-persamaan dari model-model yang digunakan dalam penelitian ini.

Model *thin film* umumnya diekspresikan dengan persamaan :

$$J = k \ln \frac{C_w}{C_b} \quad (2)$$

$C_w$  : konsentrasi solut pada permukaan membran (%)

$C_b$  : konsentrasi umpan (%)

$k$  : koefisien perpindahan massa (m/s)

Koefisien perpindahan massa pada lapisan polarisasi konsentrasi untuk kondisi aliran laminar dapat ditentukan dari persamaan Leveque (Ceng dan Wu, 2001), yaitu :

$$k = 1.62 \left( \frac{vD^2}{Ld_h} \right)^{1/3} \quad (3)$$

dimana

$v$  : laju alir (m/s)

$A$  : luas area membran ( $m^2$ )

$d_h$  : diameter membran (m)

$L$  : panjang membran (m)

Untuk modul membran yang bergcometri silinder, laju geser pada dinding membran ( $\gamma_w$ ) adalah  $8v/d_h$ , sehingga persamaan (3) dapat diekpresikan juga dalam bentuk persamaan :

$$k = 0.81 \left( \frac{\gamma_w D^2}{L} \right)^{1/3} \quad (4)$$

dimana :

$\gamma_w$  = laju geser pada dinding membran ( $dk^{-1}$ )

Laju umpan melalui lumen di dalam modul *hollow fiber* bertipe laminar (Zeman dan Zidney, 1996). Dengan asumsi tidak ada akumulasi partikel atau zat terlarut yang tertahan di lapisan batas dan tidak ada slip pada dinding membran, maka persamaan laju geser menjadi :

$$\gamma_w = \frac{32vA}{\pi N d_h^3} \quad (5)$$

$A$  = luas area membran ( $m^2$ )

$N$  = jumlah fiber ( $m^2$ )

Jika dihubungkan dengan sifat reologi fluida, laju geser pada dinding membran ( $\gamma_w$ ) untuk fluida non-Newtonian memenuhi persamaan berikut (Cheryan, 1998),

$$\gamma_w = \left( \frac{6n_b + 2}{n_b} \frac{v}{d_h} \right) \quad (6)$$

sehingga koefisien perpindahan massa dapat diekpresikan dalam persamaan,

$$k = 0.81 \left( \frac{6n_b + 2}{n_b} \frac{v}{d_h} \frac{D^2}{L} \right)^{1/3} \quad (7)$$

Formula umum yang digunakan untuk memperkirakan koefisien difusi pada partikel berbentuk bola adalah persamaan Stokes-Einstein (Cussler, 1997) :

$$D = \frac{k_B T}{6\pi\mu r_s} \quad (8)$$

dimana :  $k_B$  : Konstanta Boltzman =  $1.38 \times 10^{-23} \text{ J } ^\circ\text{K}^{-1}$

$\mu$  : viskositas pelarut ( $10^{-2} \text{ g cm}^{-3}$ )

$T$  : suhu ( $^\circ \text{K}$ )

$r_s$  : jari-jari partikel (m)

Koefisien *shear-induce diffusion* menurut Eckstein (1977) ditentukan berdasarkan persamaan :

$$D = r_s^2 \gamma_w f(\phi) \quad (9)$$

dimana :

$\gamma_w$  = laju geser pada dinding membran ( $\text{dtk}^{-1}$ )

$r_s$  = jari-jari partikel (m)

$f(\phi)$  = fungsi fraksi volume partikel

Model polarisasi konsentrasi Zidney dan Colton (1986) memperhitungkan koefisien difusi berdasarkan persamaan *shear-induce diffusion* Eckstein dengan menetapkan nilai  $f(\phi) = 0.03$  untuk menggambarkan fluksi filtrat selama proses mikrofiltrasi partikel dengan. Jika umpan yang digunakan memiliki fraksi volume partikel  $\phi_b \ll \phi_w$  atau suspensi bersifat encer, maka diperoleh persamaan :

$$J_v = 0.126 \gamma_w \left( \frac{\phi_w r_s^4}{\phi_b L} \right)^{1/3} \quad (10)$$

$J_v$  fluksi permcat ( $\text{L m}^{-2} \text{ jam}^{-1}$ )

$L$  .. panjang membran (m)

$\gamma_w$  = laju geser pada dinding membran (1/s)

$\phi_w$  = fraksi volume partikel pada dinding membran

$\phi_b$  = fraksi volume partikel pada umpan

Untuk umpan yang memiliki fraksi volume  $\phi_w - \phi_b \ll \phi_w$  atau suspensi bersifat pekat digunakan persamaan :

$$J_v = 0.078 \left( \frac{r_s^4}{L} \right)^{1/3} \gamma_w \ln \left( \frac{\phi_w}{\phi_b} \right) \quad (11)$$

Beberapa asumsi lain yang digunakan pada model polarisasi konsentrasi Zidney dan Colton adalah :

1. konsentrasi pada dinding membran ( $C_w$ ) konstan pada nilai maksimum,
2. profil kecepatan adalah linier,
3. laju geser dan konsentrasi umpan tidak tergantung pada posisi aksial,
4. rasio antara laju alir volumetrik filtrat dengan laju alir suspensi yang masuk adalah kecil.
5. partikel berbentuk bola dan kaku.

Model Davis dan Sherwood (1990) merupakan pengembangan persamaan difusi-konveksi untuk kondisi dimana lapisan batas yang terpolarisasi konsentrasi berada pada kondisi tunak. Pengembangan persamaan ini dikhususkan untuk mikrofiltrasi suspensi encer ( $\phi_b < 0.1$ ) yang

mengandung satu ukuran partikel berbentuk bola, bersifat kaku dan tidak adhesif. Mekanisme perpindahan balik partikel didominasi oleh *shear-induced diffusion*. Konsentrasi maksimum zat terlarut dalam lapisan batas diasumsikan  $\Phi_w \approx 0.6$ , sehingga menghasilkan persamaan :

$$J_v = 0.072 \gamma_w \left( \frac{\phi_w r_s^4}{\phi_b L} \right)^{1/3} \quad (12)$$

Beberapa asumsi lain yang digunakan pada model *shear-induced diffusion* Davis-Sherwood adalah :

1. suspensi bersifat Newtonian.
2. komponen kecepatan transmembran lebih rendah daripada karakteristik kecepatan tangensial,
3. lapisan partikel yang mengalir cukup tipis, sehingga nilai tegangan geser adalah konstan,
4. aliran suspensi berkembang penuh dan laminar.

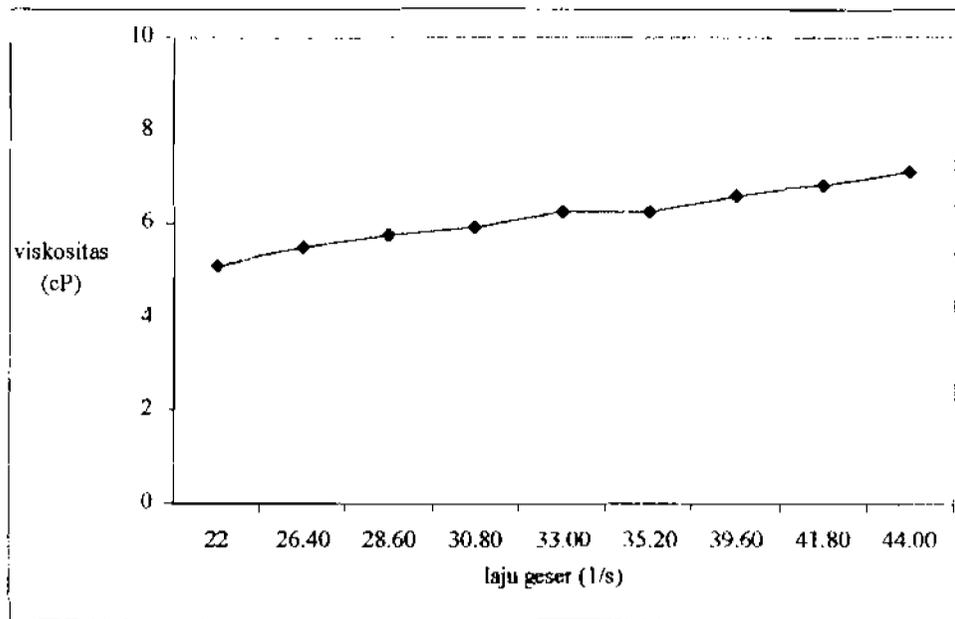
Pengujian model dilakukan dengan mengevaluasi variabel yang berpengaruh terhadap fluksi yaitu laju alir *cross flow* umpan yang disesuaikan dengan sifat reologi jus jeruk. Parameter yang diuji adalah fluksi permeal. Penghitungan fluksi dilakukan dengan cara memasukkan nilai kondisi operasi yaitu laju alir *cross flow* serta nilai karakteristik jus jeruk seperti ukuran partikel, konsentrasi partikel, dan nilai  $n$  (indeks perilaku aliran) ke dalam persamaan matematik dari model yang digunakan. Fluksi yang diperoleh dari hasil percobaan dibandingkan dengan fluksi yang dihitung berdasarkan model. Pada penelitian ini nilai  $C_w$  limonin dan naringin diasumsikan sama dengan nilai  $C_w$  pektin menurut Pritchard *et al.* (1995), sedangkan nilai  $C_b$  adalah konsentrasi campuran antara limonin dan naringin.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Penentuan densitas dan sifat reologi jus jeruk

Hasil pengukuran densitas menunjukkan bahwa densitas jus jeruk pada suhu 20 °C dan 29 °C tidak berbeda yaitu 1.04 gram cm<sup>-3</sup>. Nilai ini sesuai dengan yang dinyatakan oleh Fellow (1988) bahwa densitas jus jeruk pada suhu 20 °C adalah 1.04 gram cm<sup>-3</sup>.

Hasil pengukuran viskositas menunjukkan bahwa viskositas jus jeruk berkisar antara 5.12 cP – 7.15 cP pada rentang laju putaran 100 rpm – 200 rpm atau laju geser antara 22 - 44 per detik. Hasil pengukuran viskositas yang diekspresikan pada Gambar 2 menunjukkan bahwa viskositas jus jeruk meningkat seiring dengan peningkatan laju geser. Menurut Rao ( 1995 ), viskositas pangan non-Newtonian dipengaruhi oleh laju geser, sehingga jus jeruk dapat dikategorikan sebagai fluida non-Newtonian dan bersifat dilatan (*shear thickening*) karena peningkatan laju geser meningkatkan viskositas jus.



Gambar 2. Pengaruh laju geser terhadap viskositas jus

Berdasarkan penghitungan nilai indeks perilaku aliran, jus jeruk memperlihatkan perilaku dilatan dengan nilai ( $n$ ) yang dihasilkan sebesar 1.47. Menurut Perry dan Green (1999), nilai  $n < 1$  menunjukkan bahwa fluida bersifat pseudoplastis, sedangkan nilai  $n > 1$  menunjukkan bahwa fluida tersebut bersifat dilatan.

Komponen utama yang mempengaruhi perubahan viskositas jus jeruk adalah padatan yang tersuspensi seperti pektin dan pulp. Menurut Capannelli *et al.* (1994), kandungan pektin dan pulp merupakan sifat penting dari jus jeruk yang menentukan viskositas umpan sehingga mempengaruhi dinamika fluida pada proses ultrafiltrasi. Walaupun jumlah kandungan pektin di dalam jus jeruk yang digunakan sebagai umpan cukup kecil yaitu 0.05 %, tetapi komponen ini cukup mempengaruhi sifat reologinya yang ditunjukkan oleh perubahan viskositas jus akibat adanya geseran.

#### Pengujian Model

Mikrofiltrasi dengan teknik aliran silang umumnya digunakan untuk memisahkan suspensi, koloid, dan partikel yang berdiameter  $> 0.5 \mu\text{m}$ , yaitu antara  $0.1 - 10 \mu\text{m}$  (Zidney dan Colton, 1986; David dan Birdsall, 1987). Keuntungan penggunaan mikrofiltrasi adalah menggunakan tekanan yang rendah dan menghasilkan nilai fluksi yang relatif tinggi. Dalam mendesain dan memprediksi kinerja membran, ada beberapa hal yang perlu dipertimbangkan seperti geometri membran, sifat dan perilaku fluida, serta kondisi operasi (Belfort 1994).

Model *thin film* adalah model yang umum digunakan untuk menggambarkan mekanisme perpindahan massa ketika proses filtrasi berada pada kondisi tunak. Pengujian model yang dilakukan pada penelitian ini didasarkan atas analisis perpindahan massa zat terlarut pada lapisan batas. Model yang digunakan dalam penelitian ini adalah model *thin film* berdasarkan analisis bilangan tak berdimensi untuk fluida non-Newtonian dengan pendekatan difusi Brownian dan *self-*

*diffusion* Eckstein, model polarisasi konsentrasi Zidney – Colton serta model *shear- induce diffusion* Davis-Sherwood. Hasil pengujian model yang diharapkan adalah perkiraan nilai fluksi permeat yang sesuai dengan data hasil penelitian. Laju alir umpan dijadikan faktor dominan yang berpengaruh terhadap parameter yang diuji yaitu fluksi permeat.

Sebelum melakukan pengujian model, perlu ditetapkan beberapa asumsi, yaitu:

1. Kondisi operasi dalam keadaan tunak.
  2. Fluida dalam kondisi tidak termampatkan.
  3. Sistem aliran fluida adalah laminar.
  4. Partikel tersuspensi berbentuk bola (*spherical*).
  5. Aliran berkembang penuh dengan pola parabolik.
  6. Sifat fisik fluida konstan (viskositas, densitas dan difusivitas).
  7. Ketebalan lapisan barns konstan.
  8. Tidak ada slip pada dinding membran.
  9. Ukuran partikel yang digunakan adalah ukuran partikel terkecil dengan jari-jari sebesar 0.9  $\mu\text{m}$ .
  10. Fraksi volume partikel dihitung berdasarkan perhitungan fraksi massa.
  11. Nilai  $C_w$  yang digunakan adalah nilai  $C_w$  pektin yaitu sebesar 30 g  $\text{kg}^{-1}$  atau 0.3 %.
- I. Model *thin film* untuk fluida non-Newtonian berdasarkan nilai koefisien perpindahan massa ( $k$ ) yang dihitung menggunakan persamaan difusi Brownian Navier- Stokes ( $D_{bdn}$ )

Menurut Belfort *et al.* (1994), difusi Brownian lebih dominan untuk partikel berukuran dibawah 1  $\mu\text{m}$ . Berdasarkan persamaan (8), dengan asumsi suhu umpan ditetapkan 30 °C dan jari-jari partikel tersuspensi sama, yaitu sebesar 0.9  $\mu\text{m}$ , maka diperoleh nilai koefisien difusi Brownian ( $D_{bdn}$ ) sebesar  $2.47 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ . Hasil ini tidak berbeda jauh dengan yang dilaporkan oleh Belfort *et al.* (1994), yang mana nilai koefisien difusi Brownian untuk partikel berukuran satu mikron di dalam air adalah pada orde  $10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ . Nilai koefisien difusi Brownian dimasukkan ke dalam persamaan (7) sehingga diperoleh nilai koefisien perpindahan massa pada laju alir 0.05 – 0.09 m/s sebesar  $3.91 \times 10^{-8} - 4.76 \times 10^{-8} \text{ m/s}$  (Tabel 1).

Tabel 1 Nilai  $k$  non-Newtonian ( $k_{bdn}$ ) pada berbagai laju alir

| Laju Alir<br>(m/s) | $\gamma_w$<br>( $\text{dtk}^{-1}$ ) | $k_{bdn}$<br>( $\text{m dtk}^{-1}$ ) |
|--------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 0.05               | 719.76                              | $3.91 \times 10^{-8}$                |
| 0.06               | 863.71                              | $4.16 \times 10^{-8}$                |
| 0.07               | 1007.66                             | $4.38 \times 10^{-8}$                |
| 0.08               | 1151.62                             | $4.57 \times 10^{-8}$                |
| 0.09               | 1295.57                             | $4.76 \times 10^{-8}$                |

Keterangan /Remarks:

$k_{bdn}$  : koefisien perpindahan massa pada model *thin film* untuk fluida non-Newtonian

Selanjutnya nilai  $k_{sub}$  yang diperoleh dimasukkan ke dalam persamaan (2), sehingga menghasilkan nilai fluksi sebesar  $8.18 \times 10^{-8} - 1.01 \times 10^{-7}$  m/s (Tabel 3). Nilai fluksi hasil prediksi jauh lebih rendah dari nilai fluksi hasil percobaan sebesar  $1.18 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-5}$  m/s dengan perbedaan hampir 3 orde. Model difusi Brownian umumnya digunakan untuk makromolekul. Makromolekul memiliki ukuran partikel yang relatif kecil, sehingga jika menggunakan model difusi Brownian, hasil yang ditunjukkan tidak berbeda jauh. Namun demikian, hasilnya dapat berbeda apabila yang digunakan adalah jus jeruk. Dengan kandungan partikel-partikel yang berukuran relatif besar, yaitu di atas satu mikron dan beragam, difusi zat terlarut menjadi lebih rendah, sehingga menghasilkan fluksi yang rendah. Hal inilah yang kemungkinan menyebabkan nilai fluksi prediksi jauh lebih rendah daripada nilai fluksi percobaan.

2. Model *thin film* untuk fluida non-Newtonian berdasarkan nilai koefisien perpindahan massa ( $k$ ) yang dihitung menggunakan persamaan *self-diffusion* Eckstein ( $D_{sd}$ )

*Self diffusion* pertama kali diperkenalkan oleh Eckstein et al. (1977) dan digunakan pada larutan suspensi. *Self diffusion* atau biasa lebih dikenal dengan *shear-induced diffusion* memperhitungkan pengaruh laju geser dan ukuran partikel dalam mekanisme perpindahan balik massa.

Berdasarkan persamaan (9) maka diperoleh nilai koefisien *self-diffusion* sebesar  $1.49 \times 10^{-11} - 2.68 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s. Nilai ini mendekati nilai yang dilaporkan oleh Belfort et al. (1994), yaitu nilai koefisien *self-diffusion* dari partikel dengan jari-jari satu mikron pada  $\dot{\gamma}_w = 1000$ /s adalah sebesar  $3 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s. Nilai koefisien *self-diffusion* kemudian dimasukkan ke dalam persamaan (7), maka diperoleh nilai koefisien perpindahan massa pada laju alir 0.05 – 0.09 m/s sebesar  $6.02 \times 10^{-7} - 1.08 \times 10^{-6}$  m/s (Tabel 2).

Selanjutnya nilai  $k_{sub}$  dimasukkan ke dalam persamaan (2), sehingga menghasilkan nilai fluksi sebesar  $1.26 \times 10^{-6} - 2.30 \times 10^{-6}$  m/s (Tabel 3). Nilai fluksi hasil prediksi lebih rendah dari nilai fluksi percobaan sebesar  $1.18 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-5}$  m/s dengan perbedaan satu orde.

Tabel 2. Nilai  $D_{sd}$  dan  $k_{sub}$  pada berbagai laju alir

| Laju Alir<br>(m dtk <sup>-1</sup> ) | $\dot{\gamma}_w$<br>(dkk <sup>-1</sup> ) | $D_{sd}$<br>(m <sup>2</sup> /s) | $k_{sub}$<br>(m dtk <sup>-1</sup> ) |
|-------------------------------------|--|---------------------------------|-------------------------------------|
| 0.05                                | 719.76                                   | $1.49 \times 10^{-11}$          | $6.02 \times 10^{-7}$               |
| 0.06                                | 863.71                                   | $1.79 \times 10^{-11}$          | $7.23 \times 10^{-7}$               |
| 0.07                                | 1007.66                                  | $2.09 \times 10^{-11}$          | $8.43 \times 10^{-7}$               |
| 0.08                                | 1151.62                                  | $2.38 \times 10^{-11}$          | $9.63 \times 10^{-6}$               |
| 0.09                                | 1295.57                                  | $2.68 \times 10^{-11}$          | $1.08 \times 10^{-6}$               |

### 3. Model polarisasi konsentrasi (*shear-induce diffusion*) Zidney-Colton

Pengembangan model polarisasi konsentrasi diperkenalkan oleh Zidney dan Colton (1986) dengan mengganti difusi Brownian dengan *shear-induce diffusion* Eckstein. Menurut Belfort *et al* (1994) *shear-induce diffusion* sesuai untuk menggambarkan mekanisme perpindahan balik pada suspensi.

Berdasarkan dugaan bahwa jus jeruk merupakan suspensi, maka pada penelitian ini dicoba untuk memprediksi fluksi dengan menggunakan model polarisasi konsentrasi Zidney-Colton. Beberapa asumsi digunakan dalam pengujian model ini, antara lain partikel tersuspensi berbentuk bola serta fraksi volume partikel pada permukaan membran ( $\phi_w$ ) ditetapkan sebesar 0.6. Asumsi ini didasarkan pada nilai fraksi volume partikel pada permukaan membran untuk partikel suspensi pekat yang bersifat kaku menurut Zidney dan Colton (1990) adalah sebesar 0.6. Sedangkan nilai ( $\phi_r$ ) berdasarkan hasil penelitian rata-rata adalah  $3.64 \times 10^{-4}$ .

Prediksi fluksi menggunakan model Zidney-Colton pada kisaran laju geser 800 – 1440  $\text{detik}^{-1}$  menghasilkan nilai fluksi sebesar  $1.42 \times 10^{-5} - 2.58 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  (Tabel 3). Nilai ini sedikit lebih tinggi dari nilai fluksi hasil percobaan, yaitu  $1.18 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ , tetapi hampir mendekati fluksi hasil percobaan dan masih dalam satu orde, yaitu  $10^{-5} \text{ m/s}$  dengan nilai *mean square error* sebesar  $1.53 \times 10^{-11}$ .

### 4. Model *shear-induce diffusion* Davis-Sherwood

Prediksi fluksi menggunakan model Davis-Sherwood pada kisaran laju geser 800 – 1440  $\text{detik}^{-1}$  menghasilkan nilai fluksi sebesar  $8.11 \times 10^{-6} - 1.48 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  (Tabel 3). Nilai ini sedikit lebih rendah dari nilai fluksi hasil percobaan, yaitu  $1.18 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ , tetapi masih dalam satu orde, yaitu  $10^{-5} \text{ m/s}$ .

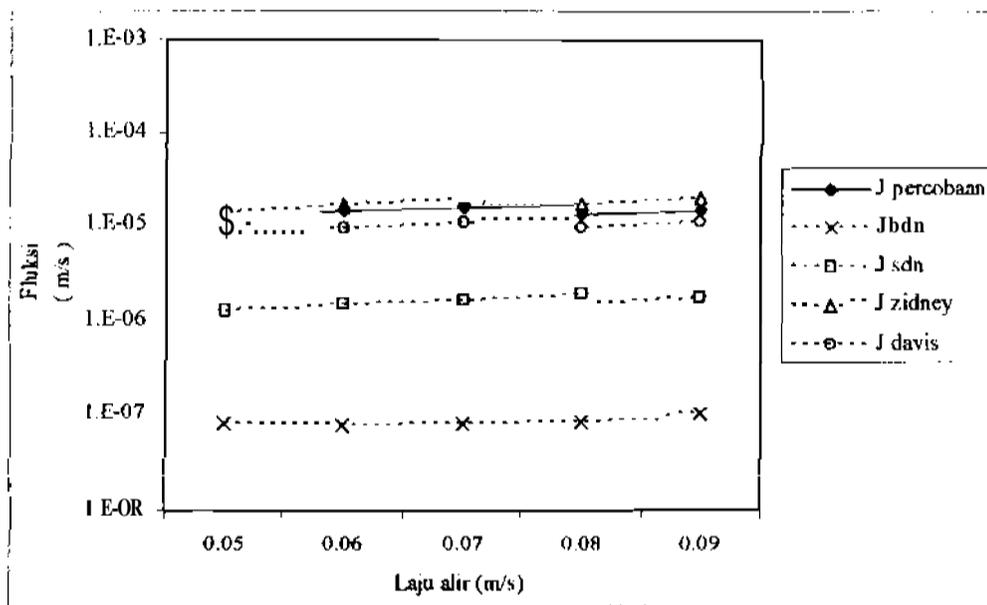
Gabungan hasil prediksi fluksi menggunakan keempat model disajikan pada Tabel 3 dan Gambar 3. Pada Gambar 3 terlihat bahwa nilai fluksi hasil prediksi menggunakan model *self-diffusion* dan model difusi Brownian lebih rendah dibandingkan dengan nilai fluksi percobaan. Namun demikian, nilai fluksi hasil prediksi berdasarkan model *self-diffusion* lebih tinggi dibandingkan dengan nilai fluksi hasil prediksi berdasarkan model difusi Brownian dan lebih mendekati nilai fluksi hasil percobaan. Hal ini ditunjukkan oleh nilai *mean square error* model *self diffusion* lebih kecil dibandingkan dengan model difusi Brownian, yaitu sebesar  $2.11 \times 10^{-10}$  untuk model *self diffusion* dan  $2.63 \times 10^{-10}$  untuk model difusi Brownian.

Perbedaan ini kemungkinan disebabkan karena model difusi Brownian tidak mempertimbangkan pengaruh laju geser terhadap laju difusi zat terlarut. Selain itu ukuran partikel menjadi faktor yang mengurangi laju difusi zat terlarut. Ketika ukuran partikel bertambah besar, maka laju difusi zat terlarut menjadi berkurang (Bhattacharjee *et al.*, 1999). Menurut Song dan Elimelech (1995a), difusi Brownian lebih efektif untuk partikel berukuran kecil. Untuk partikel berukuran  $> 1 \mu\text{m}$ , laju deposisi lokal menjadi lebih kecil dan menurun dengan cepat di sepanjang saluran jika dibandingkan dengan partikel yang lebih kecil. Menurunnya laju difusi zat terlarut

menyebabkan koefisien perpindahan massa menjadi lebih rendah sehingga fluksi yang dihasilkan menjadi lebih rendah.

Tabel 3. Perbandingan nilai fluksi hasil prediksi menggunakan berbagai model dengan nilai fluksi hasil percobaan.

| Laju alir<br>(m dtk <sup>-1</sup> ) | J percobaan<br>(m dtk <sup>-1</sup> ) | Model <i>thin film</i> non-Newtonian       |  | J zidney<br>(m dtk <sup>-1</sup> ) | J davis<br>(m dtk <sup>-1</sup> ) |
|-------------------------------------|---------------------------------------|--|--|------------------------------------|-----------------------------------|
|                                     |                                       | J <sub>bdn</sub><br>(m dtk <sup>-1</sup> ) | J <sub>sdn</sub><br>(m dtk <sup>-1</sup> ) |                                    |                                   |
| 0.05                                | 1.18 x 10 <sup>-5</sup>               | 8.01 x 10 <sup>-8</sup>                    | 1.26 x 10 <sup>-6</sup>                    | 1.42 x 10 <sup>-5</sup>            | 8.11 x 10 <sup>-5</sup>           |
| 0.06                                | 1.49 x 10 <sup>-5</sup>               | 8.59 x 10 <sup>-8</sup>                    | 1.49 x 10 <sup>-6</sup>                    | 1.69 x 10 <sup>-5</sup>            | 9.63 x 10 <sup>-6</sup>           |
| 0.07                                | 1.62 x 10 <sup>-5</sup>               | 8.82 x 10 <sup>-8</sup>                    | 1.70 x 10 <sup>-6</sup>                    | 1.93 x 10 <sup>-5</sup>            | 1.10 x 10 <sup>-5</sup>           |
| 0.08                                | 1.75 x 10 <sup>-5</sup>               | 9.93 x 10 <sup>-8</sup>                    | 1.97 x 10 <sup>-6</sup>                    | 2.24 x 10 <sup>-5</sup>            | 1.28 x 10 <sup>-5</sup>           |
| 0.09                                | 2.00 x 10 <sup>-5</sup>               | 1.01 x 10 <sup>-7</sup>                    | 2.30 x 10 <sup>-6</sup>                    | 2.58 x 10 <sup>-5</sup>            | 1.48 x 10 <sup>-5</sup>           |



Gambar 3. Perbandingan nilai fluksi hasil prediksi menggunakan berbagai model dengan nilai fluksi hasil percobaan.

Ketika jus jeruk yang mengandung partikel-partikel besar dimikrofiltrasi, geseran pada dinding membran menjadi lebih tinggi sehingga mengikis lapisan *cake* yang terbentuk. Akibatnya laju difusi balik zat terlarut meningkat sehingga fluksi yang dihasilkan menjadi lebih tinggi. Hal inilah yang kemungkinan menyebabkan nilai prediksi fluksi jauh lebih rendah daripada nilai percobaan.

Pada model *self-diffusion* berlaku sebaliknya. Laju geser dan ukuran partikel menjadi faktor dominan yang berpengaruh terhadap laju difusi zat terlarut dan deposisi partikel pada permukaan membran. Untuk partikel berukuran besar, perpindahan balik partikel dipengaruhi oleh gaya

angkat inersia. Jika ukuran partikel meningkat, gaya angkat inersia meningkat sehingga mengurangi laju perpindahan massa ke permukaan membran (Song dan Elimelech, 1995a). Berdasarkan model *self-diffusion*, maka peningkatan laju geser dan ukuran partikel meningkatkan laju difusi zat terlarut. Dengan demikian koefisien perpindahan massa meningkat, sehingga fluksi permeat menjadi meningkat. Hal ini yang kemungkinan menyebabkan nilai prediksi fluksi menggunakan model *self-diffusion* lebih tinggi dibandingkan dengan nilai fluksi prediksi menggunakan model difusi Brownian.

Gambar 3 memperlihatkan bahwa nilai fluksi hasil prediksi menggunakan model Zidney-Colton hampir mendekati nilai fluksi percobaan. Kedekatan ini kemungkinan menunjukkan adanya kesamaan sifat bahan berdasarkan asumsi model Zidney-Colton dengan sifat jus jeruk yang sebenarnya. Dengan demikian, mekanisme perpindahan massa pada mikrofiltrasi jus jeruk kemungkinan mendekati mekanisme perpindahan massa yang digambarkan oleh model Zidney-Colton. Model Zidney-Colton mempertimbangkan pengaruh konsentrasi partikel di dalam umpan dan pada permukaan membran. Model Zidney-Colton menjadikan geseran sebagai efek dari pergerakan partikel sehingga mempengaruhi difusi balik partikel pada lapisan batas dan valid untuk partikel berbentuk bulat.

Kehadiran partikel di dalam jus jeruk menyebabkan peningkatan laju geser pada dinding membran, sehingga meningkatkan laju deposisi partikel meninggalkan permukaan membran. Dengan demikian, hidrodinamika jus jeruk pada proses mikrofiltrasi sangat dipengaruhi oleh geseran. Hal ini yang kemungkinan menyebabkan hasil yang diperoleh lebih mendekati model tersebut.

Selain itu, dari pengamatan menggunakan mikroskop optik diketahui bahwa partikel jus jeruk berbentuk bola, sama dengan asumsi yang ditetapkan dalam model Zidney-Colton. Kesesuaian faktor-faktor utama yang mempengaruhi parameter operasi dalam penelitian ini dengan faktor-faktor berpengaruh yang telah ditetapkan di dalam model Zidney-Colton seperti sifat fluida, ukuran partikel, bentuk partikel, fraksi volume partikel, dan sistem aliran fluida menyebabkan nilai hasil percobaan lebih mendekati pola Zidney-Colton. Jus jeruk yang dimikrofiltrasi mengandung partikel berukuran di atas  $1 \mu\text{m}$  dan berbentuk seperti bola sesuai dengan beberapa asumsi yang ditetapkan dalam model Zidney-Colton.

Gambar 3 menunjukkan bahwa nilai fluksi hasil prediksi menggunakan model Davis-Sherwood sedikit lebih rendah dari nilai fluksi percobaan dengan nilai *mean square error* sebesar  $2.37 \times 10^{-11}$ . Hal ini kemungkinan disebabkan karena terdapat sedikit perbedaan karakteristik jus yang digunakan. Model Davis-Sherwood berlaku untuk partikel yang berukuran sama, mengabaikan interaksi antar partikel serta mengasumsikan bahwa suspensi bersifat Newtonian. Jus jeruk mengandung berbagai partikel dengan berbagai ukuran sehingga interaksi antar partikel tidak dapat diabaikan begitu saja. Selain itu, berdasarkan hasil percobaan diketahui bahwa jus jeruk merupakan fluida non-Newtonian sehingga memiliki perilaku hidrodinamika yang berbeda dengan fluida Newtonian.

Berdasarkan uraian-uraian di atas, dapat dilihat bahwa mekanisme perpindahan massa pada mikrofiltrasi jus jeruk sangat tergantung pada sifat jus. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model Zidney-Colton lebih sesuai untuk menggambarkan mekanisme perpindahan massa pada proses penghilangan limonin dan naringin dari jus jeruk menggunakan mikrofiltrasi. Hal ini ditunjukkan oleh perbandingan nilai fluksi (Tabel 3) dan nilai *mean square errors* dari keempat model di atas. *Mean square errors* (MSE) model Zidney-Colton memiliki nilai yang terkecil dibandingkan dengan model lainnya. Sebagaimana yang terlihat pada Gambar 3, nilai fluksi prediksi menggunakan model Zidney-Colton lebih mendekati nilai fluksi percobaan dibandingkan dengan model lainnya.

Gambar 3 menunjukkan adanya perbedaan perilaku fluksi hasil percobaan dengan fluksi hasil prediksi. Peningkatan fluksi hasil percobaan memperlihatkan pola yang cenderung menurun dengan semakin tingginya laju alir, sedangkan fluksi hasil prediksi meningkat secara proporsional dengan laju alir. Perbedaan ini kemungkinan disebabkan oleh keterbatasan model yang mengasumsikan bahwa ketebalan lapisan *cake* bersifat konstan sehingga dalam perhitungan ketebalan lapisan *cake* dapat diabaikan. Dengan mengabaikan ketebalan lapisan *cake*, maka tidak terjadi peningkatan tahanan yang dapat menurunkan fluksi, sehingga ketika laju alir ditingkatkan, fluksi meningkat secara proporsional. Pada kenyataannya, lapisan *cake* yang terbentuk tidak konstan. Menurut Davis dan Birdsell (1987), rasio tahanan lapisan *cake* terhadap tahanan membran akan meningkat dengan menurunnya ukuran partikel. Rasio tahanan lapisan *cake* terhadap tahanan membran meningkat jika ketebalan lapisan *cake* meningkat karena tahanan membran bersifat konstan. Pada proses mikrofiltrasi jus jeruk, peningkatan laju alir meningkatkan laju geser. Dengan peningkatan geseran, partikel jus jeruk kemungkinan pecah atau terkikis sehingga ukuran partikelnya menjadi lebih kecil. Penurunan ukuran partikel meningkatkan rasio tahanan lapisan *cake* terhadap tahanan membran, yang berarti bahwa terjadi peningkatan ketebalan lapisan *cake*. Peningkatan lapisan *cake* menyebabkan tahanan membran total menjadi lebih besar yang berakibat pada penurunan fluksi permeat.

Pada Gambar 3 juga terlihat bahwa semakin tinggi laju alir, nilai fluksi percobaan lebih mendekati nilai fluksi prediksi model Davis-Shewood. Hal ini menunjukkan bahwa pembentukan lapisan *cake* terjadi seiring dengan peningkatan laju alir, sesuai dengan pendekatan yang digunakan dalam model Davis-Shewood.

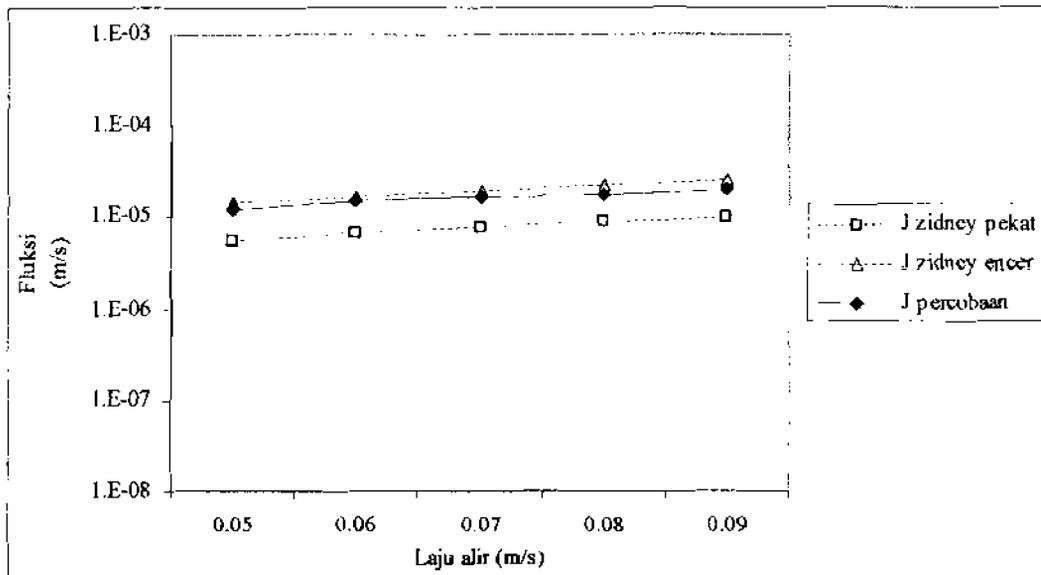
##### 5. Analisis sifat jus

Berdasarkan uraian di atas, mekanisme perpindahan massa pada mikrofiltrasi jus jeruk adalah mekanisme perpindahan massa secara difusi yang dipacu oleh geseran. Ketidakjelasan sifat jus jeruk pada awal penelitian menemukan titik terang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai fluksi percobaan lebih mendekati nilai fluksi prediksi yang menggunakan model untuk suspensi, baik itu model Zidney-Colton maupun model Davis-Sherwood. Berdasarkan kecenderungan terhadap model-model tersebut, maka jus jeruk dapat dikategorikan sebagai suspensi.

Kecenderungan perilaku fluksi pada mikrofiltrasi jus jeruk terhadap model untuk suspensi seperti yang terlihat pada Gambar 3 dan Gambar 4 menunjukkan bahwa sifat suspensi sangat berpengaruh terhadap mekanisme perpindahan massa yang terjadi selama mikrofiltrasi jus jeruk. Walaupun model *self diffusion* menggunakan dasar perhitungan koefisien difusi yang sama dengan model Zidney-Colton dan model Davis-Shew@ namun nilai fluksi prediksi model *self diffusion* cenderung lebih rendah dibandingkan dengan nilai fluksi prediksi menggunakan model Zidney-Colton dan model Davis-Sherwood. Hal ini disebabkan oleh perbedaan pendekatan konsentrasi. Model *self-diffusion* menggunakan pendekatan konsentrasi berdasarkan kandungan senyawa limonin dan naringin, sedangkan model Zidney-Colton dan model Davis-Sherwood menggunakan pendekatan konsentrasi partikel. Konsentrasi senyawa limonin dan naringin akan berbeda dengan fraksi volume partikel, karena partikel merupakan gabungan dari beberapa senyawa, tidak hanya limonin dan naringin. Dalam proses mikrofiltrasi jus jeruk, tidak hanya senyawa limonin dan naringin yang memainkan peranan penting dalam mekanisme perpindahan massa, tetapi juga melibatkan senyawa-senyawa lain yang terkandung dalam jus jeruk salah satunya adalah pektin. Bersama limonin dan naringin, senyawa tersebut bergabung dalam satu fraksi yaitu partikel. Dengan demikian, salah satu faktor yang berpengaruh dominan dalam mekanisme perpindahan massa pada mikrofiltrasi jus jeruk adalah konsentrasi partikel, bukan konsentrasi senyawa limonin dan naringin.

Untuk mengetahui sifat suspensi jus jeruk apakah pekat atau encer, pada penelitian ini dilakukan perbandingan model polarisasi konsentrasi Zidney-Colton berdasarkan dua kondisi, yaitu fraksi volume partikel umpan sebesar  $\Phi_w - \Phi_b \ll \Phi_w$  yang berarti bahwa suspensi bersifat encer memenuhi persamaan (10) dan  $\Phi_b \ll \Phi_w$  yang berarti bahwa suspensi bersifat pekat memenuhi persamaan (11).

Pada Gambar 4 terlihat bahwa fluksi hasil prediksi menggunakan model Zidney-Colton untuk suspensi pekat menunjukkan perilaku yang berbeda dengan fluksi hasil prediksi menggunakan model Zidney-Colton untuk suspensi encer. Gambar 4 menunjukkan bahwa nilai prediksi fluksi menggunakan model Zidney-Colton untuk suspensi pekat lebih rendah dari nilai fluksi percobaan. Nilai fluksi prediksi yang dihasilkan adalah sebesar  $5.48 \times 10^{-6} - 9.91 \times 10^{-6}$  m/s. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh perbedaan konsentrasi partikel umpan. Menurut Jonsson (1986), difusifitas menurun dengan meningkatnya konsentrasi umpan. Ketika konsentrasi umpan tinggi, koefisien perpindahan massa dan koefisien difusi zat terlarut menurun sehingga fluksi menjadi lebih rendah.



Gambar 4. Perbandingan nilai fluksi hasil prediksi model Zidney-Colton untuk suspensi pekat dan suspensi encer dengan nilai fluksi hasil percobaan.

Pada Gambar 4 terlihat bahwa nilai prediksi fluksi menggunakan model Zidney-Colton untuk suspensi encer lebih mendekati nilai fluksi percobaan jika dibandingkan dengan nilai prediksi fluksi menggunakan model Zidney-Colton untuk suspensi pekat. Perbedaan perilaku fluksi dari kedua kondisi suspensi menunjukkan bahwa nilai fluksi prediksi menggunakan model Zidney-Colton untuk suspensi encer lebih sesuai untuk menggambarkan sifat suspensi jus jeruk. Dengan demikian dapat dikategorikan sebagai suspensi yang bersifat encer.

#### KESIMPULAN

Model Zidney-Colton lebih sesuai untuk menggambarkan mekanisme perpindahan massa pada mikrofiltrasi jus jeruk yang dipengaruhi oleh ukuran dan konsentrasi partikel di dalam larutan serta laju geser. Hal ini yang ditunjukkan oleh nilai *mean square error* model Zidney-Colton yang lebih kecil dibandingkan dengan model lainnya. Dengan demikian, mekanisme perpindahan massa pada mikrofiltrasi jus jeruk Siam dapat dideskripsikan sebagai mekanisme perpindahan massa secara difusi yang dipacu oleh geseran (*shear-induced diffusion*) dan larutan jus jeruk dapat dikategorikan sebagai suspensi dengan sifat encer.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih ditujukan kepada Sekretariat Jenderal Penelitian dan Pengembangan Departemen Pertanian yang telah memberikan dukungan finansial bagi pelaksanaan penelitian melalui Program Kerjasama Kemitraan Penelitian Pertanian dengan Perguruan Tinggi (KKP3T).

#### DAFTAR PUSTAKA