

PEMANFAATAN NERACA POPULASI FASA DISPERSI DALAM EVALUASI EKSTRAKSI CAIR-CAIR PADA KOLOM ISIAN

(Utilizing of Population Balance of Dispersion Phase in Evaluation of Liquid-Liquid Extraction in Packed Column)

Danu Ariono¹, Veronica Japri¹, dan Setyo Widodo^{1,2}

¹Laboratorium Proses Pemisahan, Program Studi Teknik Kimia, FTI ITB,
Jl. Ganesha No. 10, Bandung 40132, Indonesia

^{1,2}Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Minyak dan Gas Bumi "LEMIGAS"
Jl. Ciledug Raya Kav.109, Cipulir, Kebayoran Lama, Jakarta Selatan
Telepon: +62-21-7394422, Fax.: +62-21-7246150

E-mail: danu@che.itb.ac.id; setyow@lemigas.esdm.go.id

Teregistrasi I tanggal 15 Maret 2017; Diterima setelah perbaikan tanggal 12 Juli 2017;
Disetujui terbit tanggal: 30 Agustus 2017

ABSTRAK

Ekstraksi cair-cair adalah metode pemisahan dengan memanfaatkan perbedaan kelarutan komponen dari suatu larutan ke pelarut lain. Ekstraksi cair-cair diaplikasikan pada sistem kolom isian pada industri kimia untuk menghilangkan sulfur, lilin, resin, serta senyawa aromatik pada pengolahan minyak, isolasi vitamin dalam industri farmasi, pengambilan gliserida dari minyak nabati, pertambangan, dan pengolahan limbah. Pada aplikasi tersebut, kolom ekstraksi cair-cair dirancang menggunakan korelasi hidrodinamika yang mengasumsikan bahwa distribusi fasa dispersi di sepanjang kolom adalah seragam dan berperilaku sebagai gelembung tunggal. Studi ini dilakukan untuk mengembangkan suatu neraca populasi yang menyatakan perubahan dan distribusi gelembung dalam suatu ruang dan waktu. Aplikasi neraca populasi digunakan untuk memperoleh jumlah tahap (Number of Transfer Unit) dan tinggi tiap tahap (Height of Transfer Unit) dari suatu kolom isian. Hasil kajian menunjukkan bahwa neraca populasi dapat digunakan untuk menjelaskan fenomena ketidakhomogenan ukuran (diameter) gelembung di sepanjang kolom isian pada ekstraksi cair-cair untuk mengevaluasi unjuk kerja (performance) kolom isian. Disamping itu, dapat digunakan sebagai model matematika dalam evaluasi unjuk kerja kolom isian sehingga estimasi nilai konsentrasi di setiap posisi dan waktu di sepanjang kolom isian lebih sesuai dengan fenomena sebenarnya.

Kata Kunci: Ekstraksi Cair-Cair, Neraca Populasi.

ABSTRACT

Liquid-liquid extraction is a separation method that utilizes the solubility difference of the components in the solution. The application of liquid-liquid extraction in industry include removal of sulfur, wax, resin, and aromatic compounds in oil treatment, vitamin isolation in pharmaceutical industry, glyceride removal from vegetable oil, mining and waste treatment. In those application, the liquid-liquid extraction column is designed using a hydrodynamic correlation which assumes that the distribution of the dispersion phases along the columns is uniform and behaves as a single bubble. The purposes of this study is to develop a population balance that describes the bubbles distribution and to obtain the more real conditions of Number of Transfer Unit and the Height of Transfer Unit of a packed column. The results indicate that the population balance can be used to explain the phenomenon of the homogeneity of the bubble size along the packed column and to evaluate the performance of the column in

the liquid-liquid extraction. In addition, it can be used as a mathematical model so that the concentration value at each position and time along the column is more appropriate to the actual value.

Keywords: *Liquid-liquid extraction, Population Balance.*

I. PENDAHULUAN

Ekstraksi adalah metode pemisahan yang memanfaatkan perbedaan kelarutan suatu komponen dalam larutan dengan menggunakan pelarut lain sebagai media pemisah. Pada ekstraksi cair-cair suatu komponen diekstrak dari larutan menggunakan pelarut fasa cair lainnya (Ladda 1976, Hanson 2013). Aplikasi ekstraksi cair-cair dalam industri kimia diantaranya untuk pemisahan toluena dari heptana (Larriba et al. 2013), ekstraksi senyawa zinc sulfat (Neto and Mansur 2013), menghilangkan senyawa sulfur (Srivastava 2012, Jiang et al. 2015), pemisahan senyawa fenol (Jiao et al. 2015), pemisahan senyawa aromatik pada pengolahan minyak (Colati et al. 2013, Franck and Stadelhofer 2012, Holbach et al. 2015), ekstraksi dan deasidifikasi minyak (Oliveira et al. 2012, Rodrigues et al. 2014), isolasi vitamin dalam industri farmasi (Højskov et al. 2010, Yazdi and Yazdinezhad 2014, Ghassemi et al. 2017), pengambilan gliserida dari minyak nabati (Dubois et al. 2014), proses pirolisis bio-oil (Wei et al. 2014), ekstraksi minyak dari mikroalga (Halim et al. 2012), dan pengolahan limbah (Olkiewicz et al. 2014, Fredj et al. 2015, Swain et al. 2015).

Pemisahan pada ekstraksi cair-cair terjadi melalui mekanisme perpindahan massa pada saat kontak antara larutan yang dialirkan secara kontinu dengan pelarut yang dialirkan secara dispersi (Ladda 1976, Hanson 2013). Fasa kontinu mengalir dari bagian atas dan turun di sepanjang kolom, mengisi celah-celah kosong, dan membentuk lapisan tipis pada permukaan bahan isian. Fasa terdispersi dialirkan dari bagian bawah dan terbentuk dispersi gelembung di fasa kontinu serta terjadi perpindahan zat terlarut di dalamnya (Ladda 1976). Gelembung di fasa dispersi dapat mengalami perpecahan dan/atau penggabungan akibat tumbukan dengan bahan isian sehingga ukuran gelembung di sepanjang kolom isian dan luas permukaan kontak antara fasa dispersi dengan fasa kontinu tidak homogen.

Perubahan dan distribusi ukuran gelembung di sepanjang kolom sangat mempengaruhi kinerja perpindahan massa kolom isian. Neraca populasi menggunakan pendekatan statistika dapat digunakan untuk memperkirakan distribusi ukuran gelembung

di sepanjang kolom (Rigopoulos and Jones 2003, Kumar and Ramkrishna 1996, Nicmanis and Hounslow 1998, Ramkrishna and Singh 2014, Hanson 2013). Tujuan dari kajian ini adalah untuk memberikan pendekatan yang lebih baik yang menjelaskan neraca populasi untuk menggambarkan distribusi gelembung, serta korelasi perpindahan massa zat terlarut dari suatu larutan ke dalam pelarut lain sehingga desain kolom isian dapat dibuat lebih mendekati kondisi nyata.

II. BAHAN DAN METODE

Pemahaman terhadap neraca populasi gelembung serta perpindahan massa dapat digunakan untuk mendesain kolom isian yang lebih mendekati kondisi nyata. Kajian ini dilakukan melalui studi untuk mendapatkan pemahaman teoritis dari berbagai literatur sehingga dapat memberikan pendekatan yang lebih baik pada neraca massa perpindahan zat terlarut.

Pada kajian ini dibahas neraca populasi yang meliputi fungsi distribusi, laju alir pertumbuhan, kecepatan linier, dan model neraca populasi. Selanjutnya dilakukan kajian terhadap model neraca populasi pada ekstraksi cair-cair yang meliputi aspek hidrodinamika gelembung, perpindahan massa gelembung, parameter interaksi gelembung, distribusi ukuran gelembung, serta penyelesaian model neraca massanya. Estimasi proses perpindahan massa dilakukan untuk mengetahui perpindahan yang terjadi di fasa kontinu dan di fasa terdispersi. Hasil kajian tersebut dapat digunakan untuk mendesain kolom isian yang lebih mendekati kondisi nyata karena jumlah tahap (*Number of Transfer Unit*) dan tinggi tiap tahap (*Height of Transfer Unit*) dapat diketahui sehingga sangat bermanfaat untuk diterapkan dalam banyak aplikasi di industri khususnya sektor minyak dan gas bumi.

III. HASIL DAN DISKUSI

A. Neraca Populasi

Populasi merupakan suatu kesatuan entitas yang terdiri dari berbagai elemen dimana masing-masing mempunyai karakteristik tersendiri yang bersifat makroskopik maupun mikroskopik. Neraca populasi digunakan untuk menyatakan perubahan suatu

populasi yang tidak dihitung banyaknya (Walpole and Myers 1995, Sporleder et al. 2012, Solsvik and Jakobsen 2015). Definisi matematika neraca populasi menggunakan pendekatan statistik dibahas dalam subbab berikut.

1. Fungsi Distribusi

Fungsi distribusi digunakan untuk menyatakan penyebaran sifat-sifat yang menjadi karakteristik suatu populasi entitas pada rentang ruang dan waktu tertentu sehingga dapat diperoleh fraksi total populasi entitas tersebut (Tsouris et al. 1994, Zhang and Li 2003, Rasrendra 2004, Elimelech et al. 2013). Jika masing-masing karakteristik dalam populasi entitas dinotasikan dengan $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_m$, maka distribusi populasi entitas dapat dinyatakan dalam suatu fungsi berikut:

$$\Phi(x, y, z, \xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_m, t) \quad (1)$$

2. Laju Alir Pertumbuhan

Perubahan yang terjadi dalam populasi entitas disebabkan oleh fenomena pertumbuhan atau pemusnahan dengan laju tertentu (Hamilton and Pratt 1984, Kopriwa et al. 2012, Jildeh et al. 2013), didefinisikan dengan persamaan:

$$G(x, y, z, \xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_m, t) \quad (2)$$

3. Kecepatan Linier

Populasi entitas dalam volume geometri tertentu mengalami perubahan posisi dengan adanya gerakan atau perpindahan pada waktu tertentu. Jika kecepatan linier entitas merupakan fungsi $v(x, y, z, \xi_i, t)$, maka kecepatan linier tiap komponen entitas dapat didefinisikan dengan persamaan:

$$U_x = \frac{\partial x}{\partial t} \quad (3)$$

$$U_y = \frac{\partial y}{\partial t} \quad (4)$$

$$U_z = \frac{\partial z}{\partial t} \quad (5)$$

$$v_i = \frac{\partial \xi_i}{\partial t} \quad (6)$$

4. Model Neraca Populasi

Neraca populasi yang menyatakan perubahan dalam populasi entitas dapat dianalogikan seperti neraca massa dan neraca energi (Ladda 1976, Hanson 2013):

$$\begin{aligned} &(\text{Masukan}) - (\text{Keluaran}) + \\ &(\text{Pertumbuhan}) - (\text{Pemusnahan}) = (\text{Akumulasi}) \\ &\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \text{div}(\Phi \bar{u}) + \sum_{i=1}^m \frac{\partial}{\partial \xi_i} (v_i \Phi) - G = 0 \quad (7) \end{aligned}$$

B. Model Neraca Populasi pada Ekstraksi Cair-Cair

Fenomena yang terjadi dalam ekstraksi cair-cair merupakan mekanisme hidrodinamika dan perpindahan massa dalam kolom isian yang mengikuti perilaku gelembung, yaitu perpindahan, pemecahan, penggabungan, dan perpindahan massa kumpulan gelembung (Seibert and Fair 1988, Al Khani et al. 1989, Kronberger et al. 1995, Weinstein et al. 1998, Hanson 2013). Hal ini menyebabkan perubahan karakteristik gelembung di sepanjang kolom yang harus diperhitungkan menggunakan populasi gelembung (mis. waktu tinggal dan diameter gelembung). Neraca populasi pada ekstraksi cair-cair terdiri dari beberapa aspek yang dibahas dalam subbab berikut.

1. Aspek Hidrodinamika Gelembung

Hidrodinamika gelembung dalam ekstraksi cair-cair menggambarkan distribusi ukuran gelembung pada tiap tingkatan di dalam kolom isian yang didefinisikan dengan persamaan (Seibert and Fair 1988, Al Khani et al. 1989, Attarakih et al. 2006, Jildeh et al. 2013, Hanson 2013):

- Hidrodinamika Fasa Kontinyu;

$$Q_c(Z) = S[1 - \Phi(Z)]U_c(Z) - S.E_c(Z) \frac{\partial}{\partial Z} [1 - \Phi(Z)]$$

$$\Phi(Z) = \int_0^{d_{\max}} P(t, Z, d) \delta d$$

- Hidrodinamika Fasa Dispersi;

$$\delta Q_d = S[P(t, Z, d) \delta d U_d(Z, d)] - E_d(Z, d) \frac{\delta}{\delta Z} P(t, Z, d) \delta d$$

- Interaksi antar Gelembung Fasa Dispersi

$$\frac{\partial}{\partial t} P(t, d) = \frac{P(t, d) - P_{in}(t, d)}{\tau} - b(d) + d(d)$$

2. Aspek Perpindahan Massa Gelembung

Model neraca populasi yang memperhitungkan distribusi ukuran gelembung secara dinamik akan mempengaruhi neraca massa pada fasa dispersi dan fasa kontinyu (Seibert and Fair 1988, Al Khani et al. 1989, Attarakih et al. 2006, Jildeh et al. 2013). Pengaruh neraca populasi dalam neraca massa dapat dilihat dalam persamaan berikut :

- Fasa Dispersi;

$$\frac{\partial}{\partial t} R_d = -\frac{\partial}{\partial Z} [U_d R_d] + \frac{\partial}{\partial Z} \left[x E_d \frac{\partial}{\partial Z} P \right] + S_d(d, P, R_d, R_c)$$

$$x = \frac{R_d}{P}$$

$$S_d(d, P, R_d, R_c) = S_{d,b}(d, R_d) + S_{d,a}(d, P, R_d) + S_{d,m}(d, P, R_d, R_c)$$

$$S_{d,b}(d, R_d) = \int_d^{\infty} \rho(d, v) \cdot S(v) \cdot R_d(v) \cdot dv - S(d) \cdot R_d(d)$$

$$S_{d,a}(d, P, R_d) = \int_0^{d/2} \beta(d-w, w) \cdot R_d(d-w) \cdot R_d(w) \cdot dw - R_d(d) \int_0^{\infty} \beta(d, w) \cdot R_d(w) \cdot dw$$

$$S_{d,m}(d, P, R_d, R_c) = K(d) \frac{6P(d)}{d} [y - m \cdot x(d)]$$

- Fasa Kontinyu.

$$\frac{\partial}{\partial t} R_c = -\frac{\partial}{\partial Z} [U_c R_c] + \frac{\partial}{\partial Z} \left[y E_c \frac{\partial}{\partial Z} (1 - \Phi) + D_m (1 - \Phi) \frac{\partial}{\partial Z} y \right] + S_c(P, R_d, R_c)$$

$$x = \frac{R_c}{1 - \Phi}$$

$$S_c(P, R_d, R_c) = -\int_0^{\infty} S_{d,m}(d, P, R_d, R_c) dd = -\int_0^{\infty} K(d) \frac{6P(d)}{d} [y - m \cdot x(d)] dd$$

3. Parameter Interaksi Gelembung

Parameter interaksi antar gelembung dalam neraca populasi didefinisikan sebagai berikut:

- Parameter Penggabungan Gelembung;

Penggabungan gelembung menyebabkan bertambahnya jumlah gelembung berukuran lebih besar sekaligus berkurangnya gelembung berukuran kecil.

$$b^a(d) = \int_0^{d/2} \beta(d-w, w) \cdot P(d-w) \cdot P(w) \cdot dw$$

$$d^a(d) = P(d) \int_0^{\infty} \beta(d, w) \cdot P(w) \cdot dw$$

- Parameter Perpecahan Gelembung.

Perpecahan gelembung menyebabkan bertambahnya gelembung berukuran lebih kecil sekaligus berkurangnya gelembung berukuran lebih besar.

$$b^b(d) = \int_d^{\infty} \rho(d, v) \cdot S(v) \cdot P(v) \cdot dv$$

$$d^b(d) = S(d) \cdot P(d)$$

Berdasarkan definisi parameter interaksi antar gelembung dalam persamaan tersebut, parameter interaksi antar gelembung mempunyai karakteristik sebagai berikut (Kumar and Ramkrishna 1996, Ramkrishna and Singh 2014):

1. Laju Penggabungan Gelembung, meliputi beberapa karakteristik yaitu:

- Fungsi kernel tidak tergantung ukuran gelembung (*Size-Independent Kernel*);

$$\beta(d-w, w) = \beta_o$$

- Fungsi penjumlahan kernel (*Sum (Golovin) Kernel*);

$$\beta(d-v, w) = \beta_o(d+w)$$

- Fungsi kernel dengan tegangan fluida (*Fluid Shear Kernel*);

$$\beta(d-w, w) = \beta_o \left[(d-w)^{1/3} + w^{1/3} \right]^3$$

- Fungsi kernel gravitasi (*Gravitational Kernel*).

$$\beta(d-w, w) = \beta_o \left[(d-w)^{1/3} + w^{1/3} \right]^2 \left[(d-w)^{2/3} - w^{2/3} \right]$$

2. Laju Perpecahan Gelembung, meliputi berbagai karakteristik yaitu:

- Fungsi kernel tidak tergantung ukuran gelembung;

$$S(v) = S_o$$

- Fungsi kernel tergantung ukuran gelembung.

$$S(v) = v$$

3. Frekuensi Perpecahan Gelembung, meliputi berbagai karakteristik yaitu:

- Perpecahan gelembung induk menjadi dua gelembung anak yang seragam (*Uniform Binary Breakage*);

$$\rho(d, v) = \frac{2}{v}$$

- Perpecahan gelembung induk menjadi dua gelembung anak yang tidak seragam (*Parabolic Binary Breakage*);

$$\rho(d, v) = \frac{24 \left[1 - \frac{l}{2} \right] \left[d^2 - dv + \frac{v^2}{4} \right]}{v^3} + \frac{l}{v}$$

$1 < l < 2 \rightarrow$ profil berbentuk cekung

$l = 2 \rightarrow$ perpecahan gelembung biner dan seragam

$2 < l < 3 \rightarrow$ profil berbentuk cembung

- Perpecahan gelembung induk menjadi beberapa gelembung anak yang tidak seragam (*Multiple Breakage/ Fragmentat-ion*).

$$\rho(d, v) = \frac{ab}{v} \left[\frac{d}{v} \right]^{b-2} + \frac{(1-a)c}{v} \left[\frac{d}{v} \right]^{c-2}$$

4. Distribusi Ukuran Gelembung

Distribusi ukuran gelembung dalam elemen volum tertentu didekati menggunakan konsep statistika peubah acak kontinyu untuk menentukan parameter-parameter yang terlibat dalam neraca populasi (Al Khani et al. 1989, Tsouris et al. 1994, Samani et al. 2012, Hanson 2013, Khajenoori et al. 2015). Berbagai karakteristik distribusi ukuran gelembung dapat dituliskan dalam persamaan berikut:

a. Peristiwa Penggabungan Murni

Penyelesaian model neraca populasi untuk menentukan karakteristik distribusi ukuran gelembung dengan menggunakan asumsi:

- Distribusi umpan eksponensial, dinyatakan dalam persamaan:

$$P_{in}(d) = \frac{Po}{do} \exp\left[-\frac{d}{do}\right]$$

- Penggabungan kernel yang tidak tergantung pada ukuran gelembung, dinyatakan dalam persamaan:

$$\beta(d, w) = \beta o$$

Karakteristik distribusi gelembung yang dihasilkan berbentuk persamaan berikut:

- Penyelesaian Analisis (Hounslow 1990).

$$P(d) = \frac{Po}{do} \frac{I_0\left[-\frac{td}{d_o(1+2t)}\right] + I_1\left[-\frac{td}{d_o(1+2t)}\right]}{\sqrt{1+2t} \exp\left[\frac{(1+t)d}{(1+2t)d_o}\right]}$$

$$t = \beta o \cdot Po \cdot \tau$$

- Ekspansi Asimtotik (Nicmanis and Hounslow 1998).

$$P(d) = \frac{\exp\left[-\frac{d}{2d_o t}\right]}{\sqrt{\pi}(2t)^2 \left[\frac{d}{2d_o t}\right]^{3/2}}$$

$$t = \beta o \cdot Po \cdot \tau$$

- Ekspresi Analisis untuk Penyelesaian Fungsi Momen.

$$m_0 = \frac{-1 + \sqrt{1 + 2\beta o \cdot m_0^{in} \tau}}{\beta o \cdot \tau}$$

$$m_1 = m_1^{in}$$

$$m_2 = \beta o \cdot m_1^2 \tau + m_2^{in}$$

b. Peristiwa Perpecahan Murni.

Penyelesaian model neraca populasi untuk menentukan karakteristik distribusi ukuran gelembung dengan menggunakan asumsi:

- Distribusi umpan eksponensial, dinyatakan dalam persamaan:

$$P_{in}(d) = \frac{Po}{do} \exp\left[-\frac{d}{do}\right]$$

- Perpecahan gelembung biner seragam, dinyatakan dalam persamaan:

$$\rho(d, v) = \frac{2}{v}$$

- Laju perpecahan gelembung yang tidak tergantung pada ukuran gelembung, dinyatakan dalam persamaan:

$$S(\dot{v}) = v$$

Karakteristik distribusi gelembung yang dihasilkan berbentuk persamaan berikut:

- Penyelesaian Analisis

$$P(d) = \frac{Po[(1+\tau d)^2 + 2\tau d_o(1+\tau[d_o+d])]}{d_o(1+\tau d)^3 \exp\left(\frac{d}{d_o}\right)}$$

- Ekspresi Analisis untuk Penyelesaian Fungsi Momen.

$$m_0 = \tau \cdot m_1 + m_0^{in}$$

$$m_1 = m_1^{in}$$

5. Penyelesaian Model Neraca Populasi

Berbagai metode numerik dapat digunakan untuk menyelesaikan model neraca populasi, di antaranya:

- a. Metode Elemen Finit (*Finite Element Method*) (Nicmanis and Hounslow 1998, Nicmanis and Hounslow 1996, Kopriwa et al. 2012).

Metode ini menggunakan suatu persamaan dasar (basis) yang digunakan untuk mendefinisikan persamaan dengan pembatas tak berhingga. Persamaan dasar yang digunakan merupakan kombinasi fungsi linier.

- b. Metode Diskretisasi (*Discretization Method*) (Kumar and Ramkrishna 1996, Lister et al. 1995, Ramkrishna and Singh 2014). Metode ini membagi persamaan matematika menjadi beberapa bagian.

C. Estimasi Koefisien Perpindahan Massa

Perpindahan massa zat terlarut dalam proses ekstraksi digambarkan dalam model matematika sehingga koefisien perpindahan massa menjadi variabel utama dalam perancangan kolom ekstraksi cair-cair (Safari et al. 2012, Hanson 2013, Benitez 2016). Koefisien tersebut merupakan indikasi terjadinya perpindahan massa pada fasa dispersi dan fasa kontinyu. Gelembung yang mengalami perpindahan dari fasa dispersi ke fasa kontinyu mempunyai nilai koefisien perpindahan massa berbeda-beda sesuai sifat fisika dan sistem operasi masing-masing. Setiap fasa juga memiliki koefisien perpindahan massa tertentu.

Secara umum, koefisien perpindahan massa dapat dituliskan dalam persamaan:

$$\frac{k_c d_p}{D_c} = \Phi \left[\left(\frac{d_p U_c \rho_c}{\mu_c} \right), \left(\frac{g \rho_c \Delta \rho d_p^3}{\mu_c^2} \right), \left(\frac{\mu_c}{\rho_c D_c} \right) \right]$$

Koefisien perpindahan massa dapat diestimasi berdasarkan teori lapisan batas (*boundary layer theory*) menggunakan pendekatan bilangan tak berdimensi (Ladda 1976, Hanson 2013).

- Bilangan Sherwood (N_{Sh}); bilangan tak berdimensi yang menyatakan nilai dari koefisien perpindahan massa yang terjadi.
- Bilangan Nuselt (N_{Nu}); bilangan tak berdimensi yang mengoreksi adanya perpindahan panas pada proses perpindahan massa.
- Bilangan Reynold (N_{Re}); bilangan tak berdimensi yang menyatakan adanya aliran dalam proses ekstraksi.
- Bilangan Grashoff (N_{Gr}); bilangan tak berdimensi yang menyatakan adanya perbedaan densitas zat terlarut.
- Bilangan Schmidt (N_{Sc}); bilangan tak berdimensi yang menyatakan sifat fisis fasa kontinyu.

1. Perpindahan Massa Fasa Kontinyu

Perpindahan massa fasa kontinyu dinyatakan dalam bilangan tak berdimensi Sherwood, Reynold, dan Schmidt.

$$(N_{Sh})_c = \Phi [(N_{Re})_c, (N_{Sc})_c]$$

Perbedaan koefisien perpindahan massa fasa kontinyu untuk distribusi gelembung yang tidak seragam dengan distribusi gelembung seragam terjadi pada modifikasi bilangan Reynold yang dinyatakan dalam persamaan:

$$Re' = \frac{A_d \rho_c}{t_f \mu_c}$$

Kecepatan gelembung dalam fasa kontinyu didefinisikan dengan menggunakan luas permukaan gelembung selama waktu pembentukan gelembung. Luas permukaan gelembung diestimasi berdasarkan luas permukaan gelembung rata-rata terintegrasi, yaitu:

$$A_m = \frac{1}{t_1 - t_0} \left[\left(\frac{\pi}{6} \right)^{1/3} \left(\frac{dV}{dt} \right)^{2/3} \frac{3}{5} (t_1^{5/3} - t_0^{5/3}) \right]$$

Dengan t_0 dan t_1 merupakan waktu yang diperlukan gelembung untuk pembentukan dan pelepasan dari nozzle.

2. Perpindahan Massa Fasa Dispersi

Proses perpindahan massa di fasa dispersi merupakan proses difusional sehingga bergantung pada ukuran gelembung yang terdispersi. Koefisien perpindahan massa fasa dispersi didefinisikan dengan bilangan tak berdimensi Sherwood (N_{Sh}), yaitu:

$$(N_{Sh})_d = \alpha$$

Penelitian yang dilakukan oleh Licht dan Pansing (1953) menghasilkan estimasi koefisien perpindahan massa fasa dispersi (Licht and Pansing 1953), yaitu:

- Untuk fenomena sirkulasi internal total:

$$k_d = 2 \left(\frac{D_d}{\pi a_e} \right)^{1/2}$$

- Untuk fenomena sirkulasi parsial:

$$k_d = 2 \left(\frac{D_d F_c^2}{\pi t_e} \right)^{1/2}$$

Variabel $t_e = \frac{d_p}{U_t}$ adalah waktu kontak elemen fluida permukaan sehingga waktu yang diperlukan gelembung untuk meningkatkan jaraknya hingga sama dengan diameternya. Pada sirkulasi parsial, waktu kontak elemen fluida permukaan dikoreksi dengan F_c^2 , yaitu perbandingan kecepatan vertikal antara daerah permukaan batas dengan daerah *bulk* fasa kontinyu.

3. Perpindahan Massa Keseluruhan

Perpindahan massa keseluruhan terdiri dari perpindahan massa fasa kontinyu dan fasa dispersi dengan memperhitungkan nilai koefisien perpindahan massa di masing-masing fasa. Namun demikian, seringkali estimasi koefisien perpindahan massa keseluruhan dihitung hanya berdasarkan koefisien perpindahan massa di salah satu fasa, yaitu fasa yang mengontrol perpindahan massa. Fenomena yang terjadi ini disebabkan karena nilai koefisien perpindahan massa salah satu fasa lebih besar daripada yang lain akibat adanya perbedaan nilai tahanan perpindahan massa yang terlalu besar antara fasa kontinyu dan dispersi.

Berdasarkan teori dua lapisan, fluks perpindahan massa zat terlarut dari fasa kontinyu ke lapisan batas sama dengan perpindahan massa zat terlarut dari lapisan batas ke fasa dispersi, sehingga dapat dituliskan:

- Koefisien perpindahan massa keseluruhan dengan basis fasa kontinyu;

$$\frac{1}{K_{oc}} = \frac{1}{k_c} + \frac{1}{mk_d}$$

- Koefisien perpindahan massa keseluruhan dengan basis fasa dispersi.

$$\frac{1}{K_{od}} = \frac{1}{k_d} + \frac{m}{k_c}$$

dengan:

$$m = \frac{C_{ci} - C_c^*}{C_{di} - C_d}$$

IV. KESIMPULAN

Neraca populasi dapat digunakan untuk menjelaskan fenomena ketidakhomogenan ukuran (diameter) gelembung di sepanjang kolom isian pada ekstraksi cair-cair untuk mengevaluasi unjuk kerja (*performance*) kolom isian. Disamping itu, dapat digunakan sebagai model matematika dalam evaluasi unjuk kerja kolom isian sehingga estimasi

nilai konsentrasi di setiap posisi dan waktu di sepanjang kolom isian lebih sesuai dengan fenomena sebenarnya.

DAFTAR NOTASI

C_c	= konsentrasi zat terlarut fasa kontinyu
C_c^*	= konsentrasi zat terlarut jenuh fasa kontinyu
C_d	= konsentrasi zat terlarut fasa dispersi
C_d^*	= konsentrasi zat terlarut jenuh fasa dispersi
$(C_s - C_o)$	= perbedaan konsentrasi antara jenuh dan mula-mula
d_{max}	= diameter gelembung maksimum
D_o	= koefisien difusi
d_p	= diameter partikel
m	= koefisien distribusi
m_i	= momen distribusi ke-i ukuran partikel
n_i	= jumlah partikel grup ke-i
P	= fraksi volum gelembung pada fasa dispersi
Q_c	= laju alir fasa kontinyu
Q_d	= laju alir fasa dispersi
r	= jari-jari partikel
R_c	= massa zat terlarut di fasa kontinyu
R_d	= massa zat terlarut di fasa dispersi
S	= luas permukaan kolom isian
S_c	= laju pembentukan gelembung di fasa kontinyu
S_d	= laju pembentukan gelembung di fasa dispersi
S_p	= laju pembentukan gelembung
$S_{p,b}$	= laju pembentukan gelembung akibat perpecahan
$S_{p,c}$	= laju pembentukan gelembung akibat penggabungan
$S_{p,f}$	= laju pembentukan gelembung akibat umpan pelarut
t	= waktu
t_0	= waktu pada saat gelembung mulai terbentuk pada nozzle
t_1	= waktu pada saat gelembung mulai terlepas dari nozzle

t_c	= waktu kontak untuk perpindahan massa
t_f	= waktu pembentukan atau jatuh gelembung
u	= kecepatan
U_c	= kecepatan superfisial fasa kontinyu
U_d	= kecepatan superfisial fasa dispersi
V_c	= volum fasa kontinyu
V_d	= volum fasa dispersi
x	= konsentrasi massa zat terlarut di fasa kontinyu
y	= konsentrasi massa zat terlarut di fasa dispersi
z	= posisi
μ_c	= viskositas fasa kontinyu
μ_d	= viskositas fasa dispersi
Φ	= hold-up gelembung

KEPUSTAKAAN

- Al Khani, S. D., Gourdon, C. & Casamatta, G.,** 1989, Dynamic and steady-state simulation of hydrodynamics and mass transfer in liquid–liquid extraction column, *Chemical engineering science*, 44, 1295-1305.
- Attarakih, M. M., Bart, H.-J. & Faqir, N. M.,** 2006, Numerical solution of the bivariate population balance equation for the interacting hydrodynamics and mass transfer in liquid–liquid extraction columns, *Chemical Engineering Science*, 61, 113-123.
- Benitez, J.,** 2016, *Principles and modern applications of mass transfer operations*, John Wiley & Sons.
- Colati, K. A., Dalmaschio, G. P., de Castro, E. V., Gomes, A. O., Vaz, B. G. & Romão, W.,** 2013, Monitoring the liquid/liquid extraction of naphthenic acids in brazilian crude oil using electrospray ionization FT-ICR mass spectrometry (ESI FT-ICR MS), *Fuel*, 108, 647-655.
- Dubois, J. L., Piccirilli, A. & Magne, J.,** 2014, Process for the purification of a fatty acid alkyl ester by liquid/liquid extraction. Google Patents.
- Elimelech, M., Gregory, J. & Jia, X.,** 2013, *Particle deposition and aggregation: measurement, modelling and simulation*, Butterworth-Heinemann.
- Franck, H.-G. & Stadelhofer, J. W.,** 2012, *Industrial aromatic chemistry: raw materials: processes: products*, Springer Science & Business Media.
- Fredj, S. B., Nobbs, J., Tizaoui, C. & Monser, L.,** 2015, Removal of estrone (E1), 17 β -estradiol (E2), and 17 α -ethinylestradiol (EE2) from wastewater by liquid–liquid extraction, *Chemical Engineering Journal*, 262, 417-426.
- Ghassemi, M., Chamkouri, N. & Mahboubi, M.,** 2017, Simultaneous Determination Trace Levels of Vitamin B1 and Vitamin B9 in Human Samples by Ultrasound-Assisted Dispersive Liquid-liquid Microextraction Coupled with HPLC-UV, *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 8, 79.
- Halim, R., Danquah, M. K. & Webley, P. A.,** 2012, Extraction of oil from microalgae for biodiesel production: a review, *Biotechnology advances*, 30, 709-732.
- Hamilton, J. A. & Pratt, H.,** 1984, Droplet coalescence and breakage rates in a packed liquid extraction column, *AIChE journal*, 30, 442-450.
- Hanson, C.,** 2013, *Recent advances in liquid-liquid extraction*, Elsevier.
- Højskov, C. S., Heickendorff, L. & Møller, H. J.,** 2010, High-throughput liquid–liquid extraction and LCMSMS assay for determination of circulating 25 (OH) vitamin D3 and D2 in the routine clinical laboratory, *Clinica Chimica Acta*, 411, 114-116.
- Holbach, A., Godde, J., Mahendrarajah, R. & Kockmann, N.,** 2015, Enantioseparation of chiral aromatic acids in process intensified liquid–liquid extraction columns, *AIChE Journal*, 61, 266-276.
- Hounslow, M. J.,** 1990, A discretized population balance for continuous systems at steady state, *AIChE journal*, 36, 106-116.
- Jiang, W., Zhu, W., Li, H., Wang, X., Yin, S., Chang, Y. & Li, H.,** 2015, Temperature-responsive ionic liquid extraction and separation of the aromatic sulfur compounds, *Fuel*, 140, 590-596.
- Jiao, T., Li, C., Zhuang, X., Cao, S., Chen, H. & Zhang, S.,** 2015, The new liquid–liquid extraction method for separation of phenolic compounds from coal tar, *Chemical Engineering Journal*, 266, 148-155.
- Jildeh, H. B., Attarakih, M. & Bart, H.-J.,** 2013, Droplet coalescence model optimization using a detailed population balance model for RDC extraction column, *Chemical Engineering Research and Design*, 91, 1317-1326.
- Khajenoori, M., Haghghi-Asl, A., Safdari, J. & Mallah, M.,** 2015, Prediction of drop size distribution in a horizontal pulsed plate extraction column, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 92, 25-32.

- Kopriwa, N., Buchbender, F., Ayesterán, J., Kalem, M. & Pfennig, A.**, 2012, A critical review of the application of drop-population balances for the design of solvent extraction columns: I. Concept of solving drop-population balances and modelling breakage and coalescence, *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 30, 683-723.
- Kronberger, T., Ortner, A., Zulehner, W. & Bart, H.**, 1995, Numerical simulation of extraction columns using a drop population model, *Computers & chemical engineering*, 19, 639-644.
- Kumar, S. & Ramkrishna, D.**, 1996, On the solution of population balance equations by discretization—I. A fixed pivot technique, *Chemical Engineering Science*, 51, 1311-1332.
- Ladda, G. S., Degalesan, T.E.**, 1976, *Transport Phenomena in Liquid Extraction*, Transport Phenomena in Liquid Extraction, New Delhi.
- Larriba, M., Navarro, P., García, J. & Rodríguez, F.**, 2013, Liquid-liquid extraction of toluene from heptane using [emim][DCA],[bmim][DCA], and [emim][TCM] ionic liquids, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52, 2714-2720.
- Licht, W. & Pansing, W. F.**, 1953, Solute transfer from single drops in liquid-liquid extraction, *Industrial & Engineering Chemistry*, 45, 1885-1896.
- Lister, J., Smit, D. & Hounslow, M.**, 1995, Adjustable discretized population balance for growth and aggregation, *AIChE Journal*, 41, 591-603.
- Neto, A. P. & Mansur, M. B.**, 2013, Transient modeling of zinc extraction with D2EHPA in a Kühni column, *Chemical Engineering Research and Design*, 91, 2323-2332.
- Nicmanis, M. & Hounslow, M.**, 1996, A finite element analysis of the steady state population balance equation for particulate systems: Aggregation and growth, *Computers & chemical engineering*, 20, S261-S266.
- Nicmanis, M. & Hounslow, M.**, 1998, Finite-element methods for steady-state population balance equations, *AIChE Journal*, 44, 2258-2272.
- Oliveira, C. M., Garavazo, B. R. & Rodrigues, C. E.**, 2012, Liquid-liquid equilibria for systems composed of rice bran oil and alcohol-rich solvents: application to extraction and deacidification of oil, *Journal of food engineering*, 110, 418-427.
- Olkiewicz, M., Caporgno, M. P., Fortuny, A., Stüber, F., Fabregat, A., Font, J. & Bengoa, C.**, 2014, Direct liquid-liquid extraction of lipid from municipal sewage sludge for biodiesel production, *Fuel processing technology*, 128, 331-338.
- Ramkrishna, D. & Singh, M. R.**, 2014, Population balance modeling: current status and future prospects, *Annual review of chemical and biomolecular engineering*, 5, 123-146.
- Rasrendra, C. B.**, 2004, *Pengembangan Model Ekstraksi Cair-Cair pada Kolom Isian Berdasarkan Distribusi Ukuran Tetapan*, Magister, ITB.
- Rigopoulos, S. & Jones, A. G.**, 2003, Finite-element scheme for solution of the dynamic population balance equation, *AIChE Journal*, 49, 1127-1139.
- Rodrigues, C. E., Gonçalves, C. B., Marcon, E. C., Batista, E. A. & Meirelles, A. J.**, 2014, Deacidification of rice bran oil by liquid-liquid extraction using a renewable solvent, *Separation and Purification Technology*, 132, 84-92.
- Safari, A., Safdari, J., Abolghasemi, H., Forughi, M. & Moghaddam, M.**, 2012, Axial mixing and mass transfer investigation in a pulsed packed liquid-liquid extraction column using plug flow and axial dispersion models, *Chemical Engineering Research and Design*, 90, 193-200.
- Samani, M. G., Asl, A. H., Safdari, J. & Torab-Mostaedi, M.**, 2012, Drop size distribution and mean drop size in a pulsed packed extraction column, *Chemical Engineering Research and Design*, 90, 2148-2154.
- Seibert, A. F. & Fair, J. R.**, 1988, Hydrodynamics and mass transfer in spray and packed liquid-liquid extraction columns, *Industrial & engineering chemistry research*, 27, 470-481.
- Solsvik, J. & Jakobsen, H. A.**, 2015, The foundation of the population balance equation: a review, *Journal of Dispersion Science and Technology*, 36, 510-520.
- Sporleder, F., Borcka, Z., Solsvik, J. & Jakobsen, H. A.**, 2012, On the population balance equation.
- Srivastava, V. C.**, 2012, An evaluation of desulfurization technologies for sulfur removal from liquid fuels, *Rsc Advances*, 2, 759-783.
- Swain, B., Mishra, C., Hong, H. S. & Cho, S.-S.**, 2015, Treatment of indium-tin-oxide etching wastewater and recovery of In, Mo, Sn and Cu by liquid-liquid extraction and wet chemical reduction: a laboratory scale sustainable commercial green process, *Green Chemistry*, 17, 4418-4431.
- Tsouris, C., Kirou, V., Tavlarides, L. & Wang, C.**, 1994, Drop size distribution and holdup profiles in a multistage extraction column, *AIChE Journal*, 40, 407-418.
- Walpole, R. E. & Myers, R. H.**, 1995, Ilmu peluang dan Statistika untuk Insinyur dan Ilmuwan, *Edisi Ke, 4*.

- Wei, Y., Lei, H., Wang, L., Zhu, L., Zhang, X., Liu, Y., Chen, S. & Ahring, B.**, 2014, Liquid-liquid extraction of biomass pyrolysis bio-oil, *Energy & Fuels*, 28, 1207-1212.
- Weinstein, O., Semiat, R. & Lewin, D.**, 1998, Modeling, simulation and control of liquid-liquid extraction columns, *Chemical Engineering Science*, 53, 325-339.
- Yazdi, A. S. & Yazdinezhad, S. R.**, 2014, Simultaneous Determination of Vitamin A and E in Infant Milk Formulas Using Semi-Micro liquid-liquid Extraction Followed by HPLC-UV, *Journal of Liquid Chromatography & Related Technologies*, 37, 391-403.
- Zhang, J. j. & Li, X. y.**, 2003, Modeling particle-size distribution dynamics in a flocculation system, *AIChE Journal*, 49, 1870-1882.