

## PEMODELAN PERPINDAHAN MASSA EKSTRAKSI KOLOM ISIAN DENGAN DISTRIBUSI UKURAN TETESAN

Iwan Ridwan\*, Danu Ariono

Kelompok Keahlian Perancangan dan Pengembangan Proses Teknik Kimia  
Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Bandung  
Jalan Ganesha 10 Bandung, 40132  
Email: ridwantk@gmail.com

### Abstrak

Ukuran tetesan dari fasa dispersi yang tidak homogen menyebabkan pendekatan perhitungan kolom dengan asumsi bentuk tetesan bersifat konstan tidak dapat digunakan lagi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membangun model distribusi tetesan dan model perpindahan massa pada berbagai ketinggian kolom ekstraksi baik di fasa kontinu maupun di fasa dispersi. Model distribusi tetesan lebih tepat digunakan untuk memodelkan fraksi tetesan pecah hasil penelitian pada ekstraksi kolom isian bola kaca dengan rata-rata *error* sebesar 4,53% dibandingkan dengan kolom isian *raschig ring* yang mempunyai *error* sebesar 11,52. Pada isian bola kaca pemodelan perpindahan massa dengan tetesan total mempunyai *error* rata-rata sebesar 57,67% sedangkan pada isian *raschig ring* mempunyai *error* rata-rata sebesar 121,38%. Model kolom isian bola kaca mempunyai *error* rata-rata yang lebih kecil dibandingkan dengan kolom isian *raschig ring*, dikarenakan model isian bola kaca bentuknya lebih beraturan dibanding dengan kolom isian *raschig ring* yang bentuknya lebih tidak beraturan. Besarnya *error* perpindahan massa antara model dengan percobaan disebabkan oleh tidak samanya jumlah tetesan awal pada kolom setengah lingkaran dengan jumlah tetesan awal pada kolom lingkaran penuh.

**Kata kunci** : ekstraksi, kolom isian, model distribusi tetesan, model perpindahan massa

### Abstract

The evaluation of liquid extraction packed column is not able yet to give a satisfying result caused by constant spherical droplet size assumption. Droplet size from dispersion phase that is not homogeneous causes column calculation approach with assumption form of droplet has the character of constant cannot be applied again. The goal of this research is to build droplet distribution model and mass transfer model at various heights of extraction column both in continuous phase and in dispersion phase. Droplet distribution model is more accurately applied to describe droplet breaks distribution for extraction in glass ball packed column with average of errors 4.53% compared to *raschig ring* packed column with average error of 11.52 %. At glass ball packing, the mass transfer modeling with total droplet has errors average to 57.67% while at *raschig ring* packing the model has errors average to 121.38%. Glass ball packing column model has smaller mean errors compared to *raschig ring* packing column because the glass ball packing form is more regular than the *raschig ring* packing. The amount of error between the mass transfer models and the experiment is caused by difference of the initial number of droplets that exit from the nozzle in the half circle column and in the full circle column.

**Keyword**: extraction, packed column, droplet distribution model, mass transfer model

\*korespondensi

**1. Pendahuluan**

Evaluasi unjuk kerja ekstraksi cair-cair dalam kolom isian (*packed column*) sampai saat ini belum dapat memberikan hasil yang memuaskan karena adanya penyederhanaan dinamika tetesan dalam fasa dispersi. Penyederhanaan tersebut antara lain dengan mengasumsikan bahwa tetesan berbentuk bola dengan ukuran yang konstan walaupun tetesan tersebut bergerak disela-sela isian. Akibat dari penyederhanaan tersebut, korelasi koefisien perpindahan massa baik di fasa dispersi maupun fasa kontinu dikembangkan berdasarkan dinamika bola kaku. Model ini tidak dapat memberikan gambaran yang tepat dari peristiwa perpindahan massa atau proses pemisahan yang terjadi dalam kolom. Oleh karena itu diperlukan sebuah model yang dapat memberikan gambaran yang tepat tentang peristiwa perpindahan massa di dalam ekstraksi cair-cair yang melibatkan berbagai ukuran tetesan pada berbagai ketinggian kolom (Ariono dkk., 2008a).

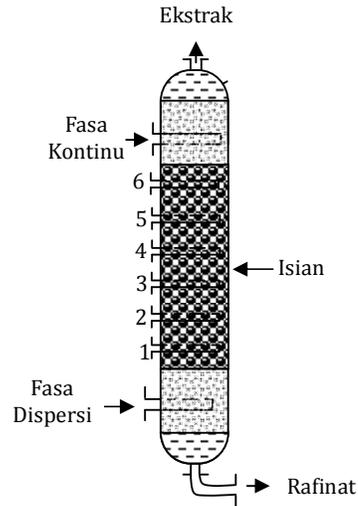
Dalam penelitian ini akan dilakukan kajian mengenai pemodelan proses perpindahan massa di sepanjang kolom dengan berbagai ukuran tetesan. Pemodelan dilakukan dengan membagi kolom kedalam beberapa diskrit pada ketinggian tertentu. Pemodelan ini dilakukan untuk mengevaluasi unjuk kerja ekstraksi cair-cair yang menyatakan hubungan antara koefisien perpindahan massa di fasa kontinu dan di fasa dispersi. Kesesuaian korelasi ini dapat diindikasikan dengan membandingkan besarnya nilai konsentrasi *solute* fasa kontinu pada ketinggian kolom isian tertentu hasil pemodelan dengan besarnya konsentrasi *solute* fasa kontinu yang didapatkan dari percobaan.

**2. Metodologi**

**2.1 Rancangan Percobaan**

Percobaan dilakukan untuk menentukan besarnya perpindahan massa sepanjang kolom ekstraksi. Percobaan dilakukan pada kolom silinder berdiameter 6 cm yang berisi dengan bola kaca sebagai bahan isian setinggi 60 cm. Kolom memiliki pengambilan sampel pada *port* setiap ketinggian 10 cm sehingga memungkinkan diperoleh profil konsentrasi zat terlarut baik pada fasa dispersi maupun fasa kontinu. Pengukuran zat terlarut menggunakan *gas chromatography* (GC). Percobaan ini menggunakan air sebagai *diluent*, metal etil

keton sebagai solut dan n-heksan sebagai pelarut. Percobaan dilakukan dalam 18 run, run 1 sampai 9 untuk isian bola kaca, run 10 sampai run 18 untuk isian *raschig ring*, dengan konsentrasi umpan masuk sebesar 2 mol/L.



**Gambar 1. Kolom ekstraksi**

**Tabel 1. Kondisi operasi percobaan**

No. Run	Vx	Vy
	(cm/s)	(cm/s)
1	0.0944	0.0052
2	0.0944	0.0708
3	0.0944	0.1510
4	0.4364	0.0050
5	0.4364	0.0708
6	0.4364	0.1510
7	0.8021	0.0057
8	0.8021	0.0708
9	0.8021	0.1510
10	0.0944	0.0056
11	0.0944	0.0708
12	0.0944	0.1510
13	0.4364	0.0057
14	0.4364	0.0708
15	0.4364	0.1510
16	0.8021	0.0057
17	0.8021	0.0708
18	0.8021	0.1510

**2.2 Metodologi Pemodelan Dinamika Tetesan**

Pergerakan tetesan dalam kolom isian dipengaruhi oleh laju alir fasa dispersi, laju alir fasa kontinu dan jenis bahan isian yang digunakan. Distribusi tetesan dihitung

berdasarkan gambar dari kamera digital. Pada saat tetesan bergerak dalam kolom isian, mula-mula tetesan yang telah lepas dari ujung nosel bergerak mendekati bahan isian. Apabila laju alir dari fasa dispersi rendah, tetesan kesulitan untuk menembus bahan isian. Dinamika tetesan sepanjang kolom ekstraksi dimodelkan dengan neraca populasi oleh (Lou dkk, 2006). Model dinamika tetesan tersebut dapat dilihat pada gambar 2.

Distribusi ukuran tetesan pada saat keluar kolom (*packing*) segmen pertama ( $Z_1=20\text{cm}$ ) adalah mengikuti distribusi normal. Persamaan untuk distribusi normal tersebut adalah :

$$f(i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(d_i - d_m)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

dimana

$d_m$  = diameter rata-rata (mm)

$d_i$  = diameter pada tetesan kelas  $i$  (mm)

$\sigma$  = standar deviasi (mm)

Tetesan akan pecah menjadi dua dengan volume yang sama besar. Kemungkinan tetesan pecah menjadi tetesan yang lebih kecil dimodelkan dengan model  $w$  yang mengikuti persamaan berikut :

$$w(i) = \exp\left(-\frac{0,395}{We_{(i)}}\right) \quad (2)$$

Dimana  $w_e$  adalah bilangan *Weber* dengan persamaan sebagai berikut :

$$w_e(i) = \frac{\rho_y V_y^2 d(i)}{\gamma_y} \quad (3)$$

dimana

$w$  = probabilitas tetesan pecah

$w_e$  = bilangan weber

$\rho_y$  = massa jenis fasa dispersi, ( $\text{kg/m}^3$ )

$V_y$  = kecepatan linier fasa dispersi, ( $\text{m/s}$ )

$\gamma_y$  = tegangan permukaan fasa dispersi, ( $\text{N/m}$ )

$d_i$  = diameter kelas  $i$ , (m)

Distribusi jumlah tetesan yang pecah dimodelkan oleh (Lou dkk, 2006), dengan model beta ( $\beta$ ). Beta menunjukkan jumlah distribusi tetesan yang pecah (*daughter droplet*) dengan diameter  $d(i_1')$  dan  $d(i_2')$  dari tetesan asalnya (*mother droplet*) dengan diameter tetesan  $d(i)$ . Ketika tetesan pecah menjadi dua tetesan, maka distribusi tetesan yang pecah mengikuti persamaan sebagai berikut:

$$\beta(i, i') = \frac{\epsilon_{i'}}{\sum_{d_i < d_i'} \epsilon_{i'}} \quad (4)$$

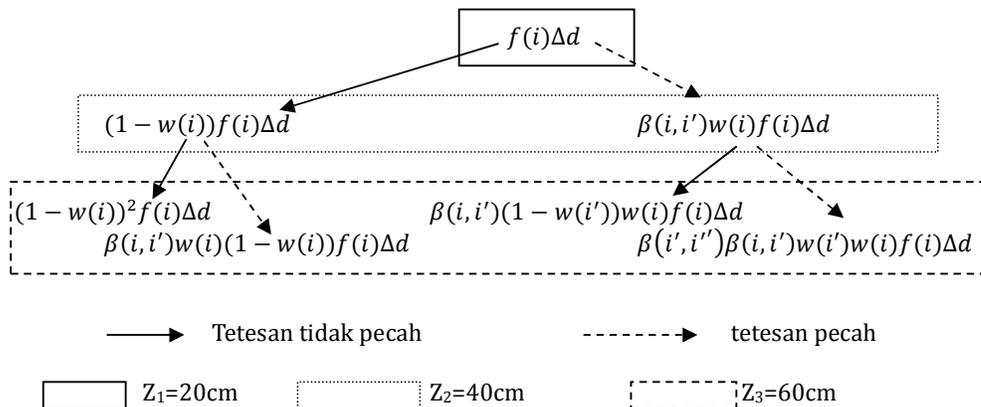
dimana  $\epsilon_{i'} = \pi \gamma_y (d_{i'}^2 - d_i^2)$

$\epsilon$  = energi permukaan, N

Tetesan pecah dan tidak pecah dimodelkan seperti pada gambar 2 sehingga didapatkan fraksi tetesan pecah menurut pemodelan. Sedangkan tetesan pecah secara percobaan didapatkan dari pengambilan gambar dengan kamera digital setiap 20 cm. Perbandingan antara fraksi tetesan pecah menurut model dan percobaan akan menghasilkan *error* fraksi tetesan pecah.

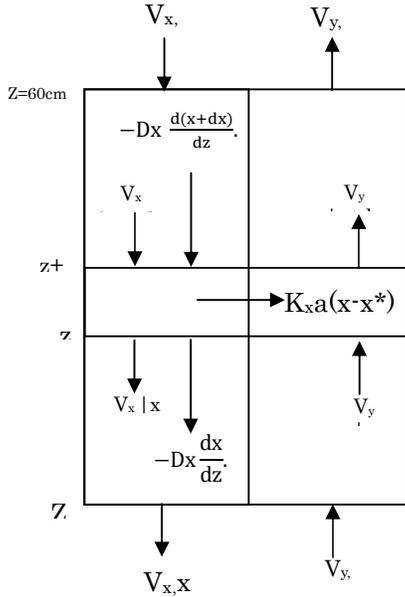
### 2.3 Metodologi pemodel perpindahan massa

Pada penelitian ini dilakukan pemodelan yang bertujuan untuk memperoleh konsentrasi *solute* baik di fasa dispersi maupun fasa kontinu di sepanjang kolom ekstraksi. Pemodelan dilakukan dengan membagi kolom pada berbagai diskrit



Gambar 2. Model Dinamika Tetesan Sepanjang Kolom Ekstraksi

ketinggian kolom tertentu dan dilakukan dengan cara menerapkan distribusi ukuran tetesan. Konsep pemodelan tersebut dapat dilihat seperti pada Gambar 3.



**Gambar 3. Konsep pemodelan perpindahan massa ekstraksi kolom isian**

Model perpindahan massa pada persamaan-persamaan tersebut di atas merupakan model untuk tetesan dengan bentuk dan ukuran yang seragam. Pada kenyataannya dalam proses ekstraksi cair-cair pada kolom isian, bentuk dan ukuran tetesan tidak seragam di sepanjang kolom. Distribusi tetesan sepanjang kolom ekstraksi di hitung berdasarkan model neraca populasi (Lou dkk., 2006). Asumsi yang dipakai dalam pemodelan ini adalah :

- tetesan berbentuk bola
- diameter tetesan sepanjang kolom tidak seragam
- memperhitungkan difusi kearah aksial dan mengabaikan difusi kearah radial
- pengaruh dispersi aksial hanya terjadi pada fasa kontinu
- laju alir fasa kontinu dan fasa dispersi adalah konstan

(Ariono dkk., 2008c), memilih koefisien perpindahan massa fasa kontinu ( $k_x$ ) adalah model yang dikembangkan oleh *Garner Foord Tayeban* (GFT). Koefisien perpindahan massa fasa dispersi ( $k_y$ ) yang dipilih adalah model yang dikembangkan oleh *Handlos-Baron* (HB) dengan asumsi bahwa di dalam tetesan terjadi sirkulasi penuh.

Koefisien perpindahan massa keseluruhan dengan basis fasa kontinu dapat dihitung dari koefisien perpindahan massa fasa kontinu dan fasa dispersi dengan persamaan berikut:

$$\frac{1}{K_x} = \frac{1}{k_x} + \frac{m}{k_y} \quad (5)$$

Konsentrasi *solute* di fasa kontinu dan fasa dispersi di sepanjang kolom dapat dicari dengan menurunkan persamaan neraca massa dengan distribusi ukuran tetesan sepanjang kolom berdasarkan model neraca populasi. Persamaan-persamaan tersebut adalah :

$$\frac{dx}{dt} = -V_x \frac{dx}{dz} + D_x \frac{d^2x}{dz^2} - \sum_{i=1}^N \{ni \cdot K_{x(i)} a(i) (x-x_i^1(i))\} \quad (6)$$

$$\frac{dy}{dt} = V_y \frac{dy}{dz} + K_x(i) a(i) (x-x_i^1(i)) \quad (7)$$

$$y_i^1 = mx_i^1 \quad (8)$$

ni = jumlah tetesan total

Pada kondisi *steady state* dimana  $dx/dt=0$  dan  $dy/dt=0$  maka persamaan pada  $Z_1$  di atas menjadi :

$$-V_x \frac{dx}{dz} + D_x \frac{d^2x}{dz^2} - \sum_{i=1}^N \{ni \cdot K_x(i) a(i) (x-x_i^1(i))\} = 0 \quad (9)$$

$$V_y \frac{dy_i^1}{dz} + K_x(i) a(i) (x-x_i^1(i)) = 0 \quad (10)$$

Dengan syarat batas sebagai berikut :

Pada  $Z = 0$

$$y_0 = y_s$$

$$\frac{dx}{dz} = 0$$

Pada  $Z = H$

$$xz = xf$$

Pada diskrit kedua ( $Z_2$ ), fasa kontinu dimodelkan dengan persamaan:

$$-V_x \frac{dx}{dz} + D_x \frac{d^2x}{dz^2} - \sum_{i=1}^N \{ni \cdot K_x(i) a(i) (1-w(i)) (x-x_{i1}^*(i))\} + \sum_{i'=1}^N \{ni \cdot K_x(i') a(i') \beta(i, i') w(i) (x-x_{i1}^*(i))\} = 0 \quad (11)$$

Sedangkan untuk fasa dispersi dimodelkan dengan persamaan :

$$V_y \frac{dy_{III}^1(i)}{dz} + K_x(i) a(i) (x - x_{III}^1(i)) = 0 \quad (12)$$

$$V_y \frac{dy_{III}^1(i')}{dz} + K_x(i') a(i') (x - x_{III}^1(i')) = 0 \quad (13)$$

Pada diskrit ketiga (Z<sub>3</sub>), fasa kontinu dimodelkan dengan persamaan:

$$-V_x \frac{dx}{dz} + D_x \frac{d^2x}{dz^2} - \sum_{i=1}^N \left[ \left\{ ni. K_x(i) a(i) (1 - w(i))^2 (x - x_{III}^1(i)) \right\} + \sum_{i'=1}^i \left\{ ni. K_x(i') a(i') \beta(i, i') w(i) (1 - w(i')) (x - x_{III}^2(i')) \right\} + \sum_{i''=1}^{i'} \left\{ ni. K_x(i'') a(i'') w(i'') \beta(i', i'') \beta(i, i'') (x - x_{III}^4(i'')) \right\} \right] = 0 \quad (14)$$

Sedangkan fasa dispersi dimodelkan dengan persamaan :

$$V_y \frac{dy_{III}^1(i)}{dz} + K_x(i) a(i) (x - x_{III}^1(i)) = 0 \quad (15)$$

$$V_y \frac{dy_{III}^2(i_i)}{dz} + K_x(i_i) a(i_i) (x - x_{III}^2(i_i)) = 0 \quad (16)$$

$$V_y \frac{dy_{III}^3(i_i)}{dz} + K_x(i_i) a(i_i) (x - x_{III}^3(i_i)) = 0 \quad (17)$$

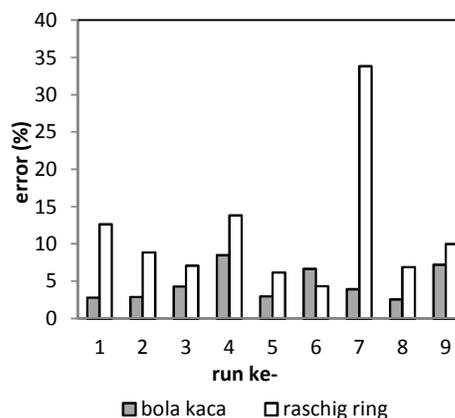
$$V_y \frac{dy_{III}^4(i_i'')}{dz} + K_x(i_i'') a(i_i'') (x - x_{III}^4(i_i'')) = 0 \quad (18)$$

### 3. Hasil dan Pembahasan

Pemodelan dilakukan untuk mengevaluasi unjuk kerja ekstraksi cair-cair. Pemodelan dilakukan dalam 2 tahap yaitu pemodelan distribusi ukuran tetesan dan pemodelan perpindahan massa berdasarkan model distribusi ukuran tetesan. Pemodelan menyatakan hubungan distribusi ukuran tetesan dan perubahan konsentrasi *solute* dengan distribusi ukuran tetes pada setiap ketinggian kolom 20 cm baik pada fasa kontinu maupun fasa dispersi.

Perbandingan besarnya *error* (perbedaan nilai percobaan dengan pemodelan) pada model pecahan tetesan antara kolom isian bola kaca dan kolom isian *raschig ring* pada setiap *run* seperti terlihat pada gambar 4. menunjukkan bahwa model tetesan pecah lebih tepat untuk memodelkan hasil penelitian pada jenis kolom isian bola kaca dibandingkan dengan jenis isian *raschig ring*. Pada isian bola kaca pemodelan mempunyai rata-rata *error* sebesar 4,53 % sedangkan untuk isian *raschig ring* model tetesan pecah mempunyai rata-rata *error* sebesar 11,52 %. Model distribusi tetesan mempunyai *error* yang paling kecil (2,56%) untuk memodelkan fraksi tetesan pecah hasil

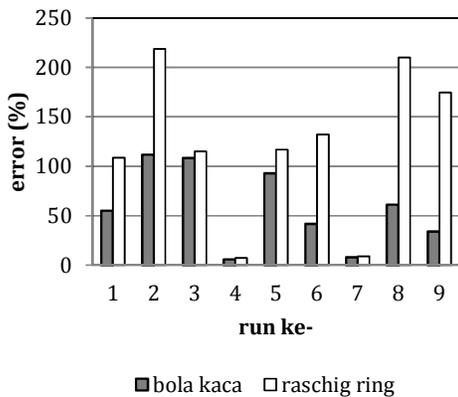
penelitian pada ekstraksi kolom isian bola kaca pada laju alir fasa dispersi sedang ( $V_y=0,0708$  cm/s) dan fasa kotinyu tinggi ( $V_x=0,8021$  cm/s). Pada ekstraksi kolom isian *raschig ring* model distribusi tetesan tidak dapat digunakan untuk memodelkan hasil penelitian karena pada kolom isian *raschig ring* bentuknya lebih tidak teratur sehingga tetesan akan pecah dan bergabung secara bersamaan, sedangkan pada pemodelan hanya memodelkan tetesan pecah.



**Gambar 4. Perbandingan besarnya error fraksi tetesan model antara kolom isian bola kaca dan kolom isian *raschig ring* pada setiap run**

Pada pemodelan perpindahan massa, perbandingan besarnya *error* model perpindahan massa antara konsentrasi *solute* pada kolom isian bola kaca dan kolom isian *raschig ring* pada setiap *run* menunjukkan bahwa model perpindahan massa lebih tepat digunakan untuk memodelkan hasil penelitian pada jenis kolom isian bola kaca dan kolom isian *raschig ring* pada laju alir fasa dispersi

yang rendah ( $V_y = 0,0052$  cm/s) dan laju alir fasa kontinu sedang ( $V_x=0,4364$  cm/s) dan laju alir fasa kontinu tinggi ( $V_x=0,8021$  cm/s). Pada isian bola kaca pemodelan perpindahan massa mempunyai *error* rata-rata sebesar 57,67% sedangkan pada isian *raschig ring* mempunyai *error* rata-rata sebesar 121,38%. Model kolom isian bola kaca mempunyai *error* rata-rata yang lebih kecil dibandingkan dengan kolom isian *raschig ring*, dikarenakan model isian bola kaca bentuknya lebih beraturan dibanding dengan kolom isian *raschig ring* yang bentuknya lebih tidak beraturan. Selain itu jumlah tetesan total pada kolom lingkaran isian bola kaca lebih mendekati dengan jumlah tetesan total setengah lingkaran. Model perpindahan massa lebih cocok untuk memodelkan kolom isian bola kaca yang bentuknya lebih teratur.



**Gambar 5. Perbandingan besarnya error model perpindahan massa antara kolom isian bola kaca dan kolom isian *raschig ring***

#### 4. Kesimpulan

Model distribusi tetesan lebih tepat digunakan untuk memodelkan fraksi tetesan pecah pada ekstraksi kolom isian bola kaca dengan rata-rata *error* sebesar 4,53 % dibandingkan dengan kolom isian *raschig ring* yang mempunyai *error* sebesar 11,52 %.

Pada isian bola kaca pemodelan perpindahan massa dengan tetesan total mempunyai *error* rata-rata sebesar 57,67% sedangkan pada isian *raschig ring* mempunyai *error* rata-rata sebesar 121,38%

Model kolom isian bola kaca mempunyai *error* rata-rata yang lebih kecil dibandingkan dengan kolom isian *raschig ring*, dikarenakan model isian bola kaca bentuknya lebih beraturan dibanding dengan kolom isian *raschig ring* yang

bentuknya lebih tidak beraturan

Besarnya *error* perpindahan massa antara model dengan percobaan disebabkan oleh tidak samanya jumlah tetesan awal yang keluar dari *nozzle* pada kolom setengah lingkaran dengan jumlah tetesan awal pada kolom lingkaran penuh

#### Ucapan Terima Kasih

Terima kasih penulis sampaikan kepada DIKTI yang sudah memberikan bantuan dana untuk pelaksanaan penelitian Hibah Bersaing ini.

#### Daftar Notasi

- A = luas permukaan spesifik, ( $m^2/m^3$ )
- d = diameter tetesan (m)
- D = koefisien difusifitas solute, ( $m^2/s$ )
- dm = diameter rata-rata, (m)
- f = fungsi kerapatan probabilitas, ( $m^{-1}$ )
- K = koefisien transfer massa total, (m/s)
- $k_x$  = koefisien transfer massa fasa kontinu, (m/s)
- $k_y$  = koefisien transfer massa fasa dispersi, (m/s)
- m = konstanta pada kesetimbangan
- n = jumlah tetesan total
- r = jari-jari kolom ekstraksi, (m)
- V = Laju alir linier, (m/s)
- w = probabilitas tetesan pecah
- we = bilangan *Weber*
- x = konsentrasi solute pada fasa kontinu, (mol/L)
- $x^*$  = konsentrasi solute fasa kontinu pada kesetimbangan, (mol/L)
- y = konsentrasi solute pada fasa dispersi, (mol/L)
- Z = fraksi ketinggian kolom
- $\beta$  = probabilitas pecahan tetesan
- $\sigma$  = standar deviasi, (m)
- $\gamma$  = tegangan permukaan, (N/m)
- $\rho$  = massa jenis, ( $kg/m^3$ )
- $\mu$  = viskositas cairan, (Pa s)
- $\epsilon$  = selisih energi permukaan, (N)
- E = fasa ekstrak
- R = fasa rafinat
- F = fasa umpan
- S = fasa solvent
- x = fasa kontinu
- y = fasa disperse

#### Daftar Pustaka

Ariono, D.; Purwasasmita, M.; Kusumo, P. Distribusi ukuran tetes dalam kolom. *Jurnal Teknik Kimia Indonesia*. 2008, 7(1), 710-715.

Ariono, D.; Sasongko, D.; Purwasasmita, M.; Kusumo, P. Pengaruh Jenis Isian Terhadap

Dinamika Tetesan Fasa Dispersi Dalam Kolom Isian. *Prosiding Seminar Nasional Rekayasa Kimia dan Proses ISSN : 1411-4216*, Semarang, Indonesia, 2008, hal. K-085-1-7.

Ariono, D.; Sasongko, D.; Purwasasmita, M.; Kusumo, P. *Model Koefesien Pindah Massa Ekstraksi Cair-cair Dalam Kolom Isian*. Prosiding Seminar Nasional Rekayasa Kimia dan Proses, Semarang, 25-26 Juli 2007, hal. A7-1-7.

Laddha, G. S. *Transport Phenomena in Liquid Extraction*; McGraw-Hill Publishing Company: New Delhi, 1974, 216-218.

Tang, X.; Luo, G.; Hongbo, L.; Wang, J. A dynamic interaction mass transfer model for simulating the mass transfer process in extraction columns. *Computer and Chemical Engineering Journal*. 2006, 30(6-7), 978-988

Steinmetz, T.; Schmidt, S.; Attarakih, M.; Bart, H. J. Droplet Population Balancing for Column Simulation. Ph.D. Thesis, TU Kaiserslautern, Kaiserslautern, Germany, 2002