

# Model Matematik untuk Menghitung Besaran Koefisien Transfer Massa pada Ekstraksi Cair-cair

Oleh  
Hono Witono

## I. PENDAHULUAN

Setiap proses dalam teknik kimia harus dijalankan secara ekonomis dengan suatu pedoman pokok yang selalu dipakai bahwa: "setiap biaya yang dikeluarkan harus secukupnya saja". Jadi dalam hal ini setiap pengeluaran, misalnya untuk bahan baku, bahan bakar, ukuran alat dan lain-lain, diusahakan untuk sejauh mungkin diketahui berapa jumlah yang diperlukan. Kemudian berdasarkan hal ini pengeluaran dibuat sedikit di atas kebutuhan tersebut (*over design*). Makin tinggi ketepatan perkiraan kebutuhan tersebut, bisa makin kecil *over design* yang harus diberikan. Beberapa cara perkiraan tersebut misalnya, dengan coba-coba (*trial and error*), dengan perasaan ataupun dengan analisis kuantitatif (perhitungan). Perkembangan terakhir menunjukkan bahwa analisis kuantitatif makin berperan. Hal ini terutama karena tersedianya alat-alat hitung yang semakin canggih dan makin murah, dalam hal ini komputer. Hitungan-hitungan yang dulu tidak *feasible* sekarang menjadi *feasible* [1].

Di dalam industri kimia, baik organik, anorganik, maupun perminyakan, operasi ekstraksi sering dilakukan terutama apabila: (i) komponen-komponennya tidak mudah menguap; (ii) antara komponen dengan larutannya mempunyai titik didih yang hampir sama; (iii) komponen-komponennya peka terhadap suhu sehingga operasi pemisahan dengan panas tidak dapat dilakukan; atau (iv) secara kuantitatif jumlah komponen yang akan diambil sedikit [2,3].

Pada ekstraksi terjadi peristiwa transfer massa, yaitu berpindahnya solut terlarut dari fase rafinat ke fase ekstrak dengan melewati batas antarmuka. Pada analisis teknik banyak dipakai persamaan-persamaan mengenai transfer massa, terutama pada perancangan kontaktor kontinu yang dalam hal ini tujuan utamanya adalah menghitung tinggi kolom untuk mendapatkan derajat pemisahan tertentu. Analisis ini menjadi sangat penting apabila dikenakan pada alat seperti kolom terisi karena fenomena transfernya menjadi kompleks [4].

Kebanyakan eksperimen untuk mendapatkan data transfer massa diperoleh dengan mempelajari model cairan murni melalui bentuk-bentuk standar tertentu. Penelitian ini menggunakan model alat ekstraksi berupa kolom terisi dan model cairan murni kerosin-asam benzoat-air. Sistem *turner* ini dipilih dengan alasan klasik bahwa bahan-bahan tersebut banyak terdapat di pasaran, berharga murah, serta mudah dalam analisis hasil. Sistem ini pernah dikerjakan oleh Allerton et al. untuk mendapatkan hubungan antara tinggi satuan transfer dengan rasio kecepatan alirnya [5].

Penelitian-penelitian sebelumnya pada umumnya berdasarkan pada pendekatan dari Elgin dan Browning [6], yang menyatakan bahwa untuk suatu larutan yang encer beda konsentrasi dihitung sebagai harga rata-rata logaritmis "gaya dorong" pada puncak kolom dan pada dasar kolom. Sedangkan pada penelitian ini beda konsentrasi dihitung pada setiap posisi sepanjang kolom dan kurva setimbang didekati dengan suatu bentuk persamaan matematis. Di samping itu rancangan alat yang dipakai merupakan modifikasi serta kombinasi alat *spray tower* dari Voghs et al. dan *packed tower* dari Morello et al. [7].

## II. PENYUSUNAN MODEL MATEMATIK

Ada dua tahapan (langkah) pokok dalam penyusunan model matematik. Pertama penyusunan persamaan-persamaan matematik yang bisa mendekati proses yang ditinjau (*mathematical modelling*) dan kedua penyelesaian persamaan-persamaan matematis yang tersusun.

Pada umumnya tidak ada peristiwa fisis yang bisa disusun model matematisnya tanpa penyederhanaan-penyederhanaan. Di samping itu, model yang dipilih umumnya adalah yang tidak terlalu rumit tetapi masih bisa mendekati peristiwa-peristiwa yang sebenarnya.

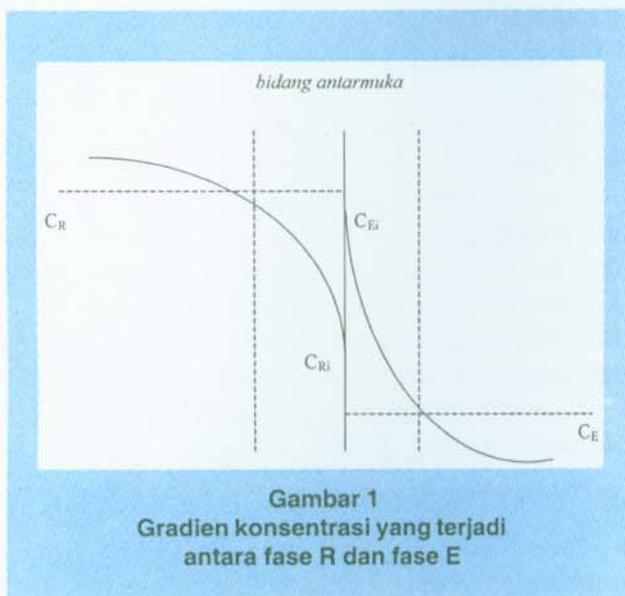
Langkah selanjutnya, yaitu penyelesaian persamaan-persamaan matematis yang terbentuk, dapat dikerjakan secara analitis maupun numeris. Yang

lebih sering digunakan adalah penyelesaian secara numeris dengan bantuan komputer atau sering disebut sebagai simulasi komputer. Dalam hal ini seolah-olah peristiwa yang sebenarnya ditiru (disimulasi) dengan komputer. Perhitungan dengan komputer ini sekaligus dapat dipakai untuk mengecek suatu model matematis berdasarkan data percobaan dan mengevaluasi harga tetapan-tetapan yang ada dalam model matematis tersebut.

Perhitungan koefisien transfer massa yang terjadi disekitar batas antarmuka menggunakan teori dua lapisan (*two film concept*) yang didasarkan atas konsep koefisien transfer panas lapisan pada perpindahan panas konveksi.

Di sini ada tiga langkah transfer, yaitu transfer massa dari badan utama fase satu ke antarmuka, kemudian transfer massa melalui bidang antarmuka, dan transfer massa dari antarmuka ke badan utama fase kedua.

Skema gradien konsentrasi untuk peristiwa ini adalah sebagai berikut:



Pada keadaan mantap (*steady*), fluks massa dalam arah z adalah untuk elemen volume sebesar  $S \times \delta h$ :

$$N_{Az} \delta A = K_R a (C_R - C_R^*) \quad S \delta h = K_E a (C_E^* - C_E) S \delta h \quad (1)$$

dengan  $S$  = luas penampang lintang kolom

$\delta h$  = elemen tinggi kolom.

#### A. Penyederhanaan

Berdasarkan konsep teori yang telah ditinjau dapat disusun suatu model matematik untuk transfer massa yang terjadi di dalam kolom ekstraksi. Karena analisis

transfer massa di dalam kolom cukup kompleks, maka diperlukan penyederhanaan secukupnya agar model matematiknya dapat disusun antara lain: (i) prosesnya isothermal, (ii) tidak terjadi *back mixing* atau aliran balik, dan (iii) tidak terjadi difusi molekular yang searah dengan aliran fluida.

Untuk mendukung penyederhanaan-penyederhanaan tersebut maka:

1. Konsentrasi asam benzoat dibuat cukup kecil sehingga panas pelarutan yang timbul dapat diabaikan.
2. Rasio laju aliran antara fase kontinu dengan fase terdispersi dibuat kecil sehingga arus balik (*back mixing*) dapat diabaikan.
3. Kolom dibuat cukup panjang sehingga kesetimbangan dapat didekati.
4. Laju kecepatan alir fase kontinu dibuat besar sehingga efek difusi aksial dapat diabaikan

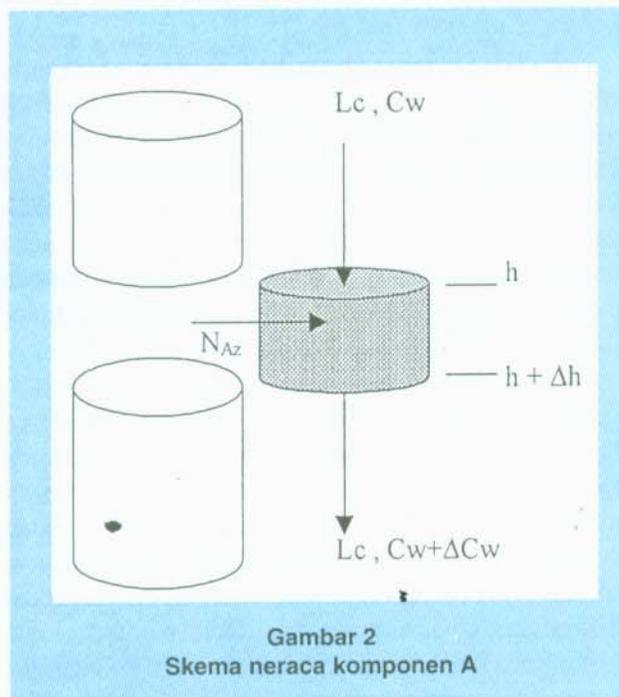
Selanjutnya dibuat neraca massa solut (asam benzoat) sekeliling bagian diferensial alat transfer sepanjang  $\delta h$  (lihat Gambar 2).

$$L_c C_w + N_{Az} \delta A = L_c C_w + L_c \delta C_w$$

atau:  $N_{Az} \delta A = L_c \delta C_w$

Dari kombinasi kedua persamaan di atas diperoleh:

$$\frac{\delta C_w}{\delta h} = \frac{K_w a S (C_w^* - C_w)}{L_c}$$



dengan kondisi batas:

$$h=0 \quad C_w = C_{wi}$$

$$h=H \quad C_w = C_{wo}$$

Hubungan antara  $C_w$  dengan konsentrasi fase terdispersi merupakan hubungan kesetimbangan dan dapat dinyatakan sebagai persamaan berikut:

$$C_w = A_1 C_K^{AZ}$$

Sedangkan hubungan  $CK$  dengan  $CW$  mengikuti persamaan garis operasinya.

### B. Penyelesaian model matematik

Apabila harga-harga  $K_{wa}$ ,  $LC$ , dan diameter kolom diketahui maka konsentrasi solut di dalam fase kontinu pada setiap posisi sepanjang kolom dapat dihitung (simulasi). Dari percobaan diperoleh data hubungan antara konsentrasi solut dengan posisi, sehingga harga  $K_{wa}$  yang terbaik dapat dihitung dengan cara optimasi (*golden section*). Dalam hal ini harga terbaik adalah yang memberikan *sum of squares of errors* yang minimum.

### C. Alat

Kolom ekstraktor terbuat dari bahan gelas dengan diameter 2,8 cm dan tinggi 100 cm. Bahan isian dari plastik berbentuk *raschig-ring* dengan diameter 0,3 cm dan panjang 0,4 cm. Tinggi isian di dalam kolom 80 cm. Pada sisi kolom dibuat kran untuk pengeluaran (*sampling*) setiap 20 cm. Agar diperoleh *head* yang tetap, maka setelah botol umpan dipasang tabung pengatur *head* untuk masing-masing aliran. Pada bagian bawah kolom dipasang pipa fleksibel untuk mengatur posisi *interface* di dalam kolom. Skema alat yang dipakai dapat dilihat pada gambar berikut.

## III. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Untuk penyelesaian model matematik yang diusulkan, diperlukan hubungan kesetimbangan dalam bentuk persamaan. Data setimbang tersebut telah dicoba dengan dua model persamaan polinomial dan model pangkat. Ternyata model yang kedua memberikan ralat yang lebih kecil, dan dipakai sebagai persamaan setimbang,

$$Y = 0,6349 X^{0,9550}$$

dengan ralat sebesar  $-2,05\%$ . Dalam hal ini :

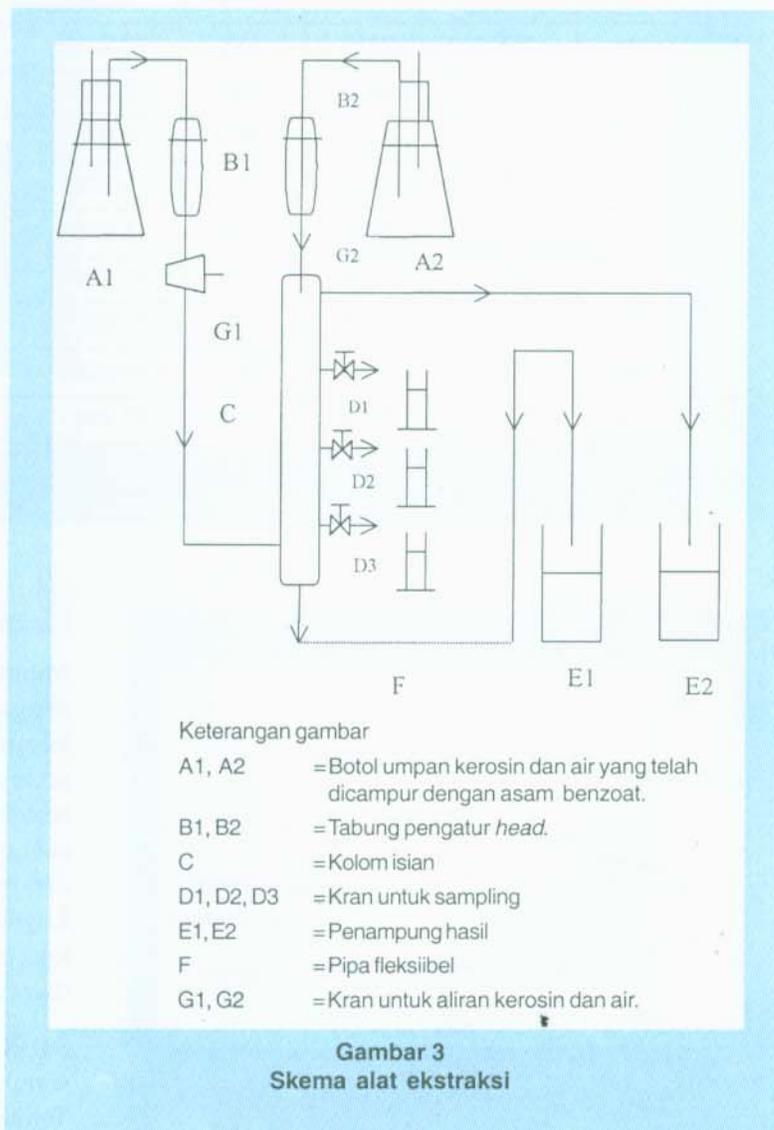
$Y$  = konsentrasi asam benzoat dalam fase air

$X$  = konsentrasi asam benzoat dalam fase minyak

Persamaan tersebut selanjutnya dipakai untuk menghitung  $K_{wa}$ .

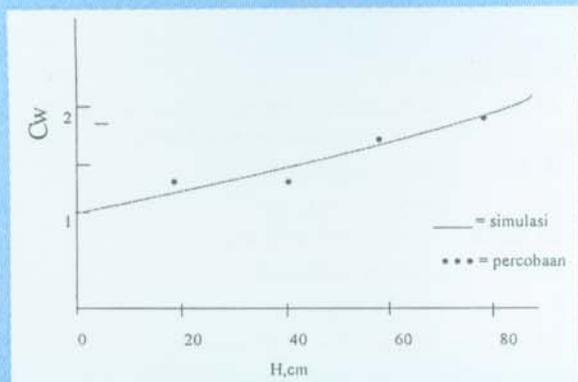
Untuk menghitung koefisien transfer massa pada kondisi operasi tertentu, diperlukan eksperimen guna mendapatkan data konsentrasi asam benzoat di dalam fase kontinu, pada setiap interval tinggi, sepanjang kolom ekstraksi. Data untuk berbagai variasi komposisi umpan dan laju aliran dapat dilihat pada Tabel 1.

Dari data tersebut dan persamaan yang tersusun, harga  $K_{wa}$  untuk setiap *run* dapat dihitung, sekaligus untuk mengetahui apakah model matematik yang diajukan benar. Untuk ini dipilih harga  $K_{wa}$  yang memberikan *sum of squares of errors*,



Tabel 1  
Hubungan antara konsentrasi asam di dalam fase kontinu dengan posisi sepanjang kolom

No. Perc.	Air		Kerosin		Konsentrasi asam pada h cm dari antarmuka $C_w \times 1000$ (mgmol/cc)			
	$L_c$	$C_{wi} \times 10^3$	$L_D$	$C_{Ki} \times 10^3$	H=20	H=40	H=60	H=80
	(cc/jam)	(mgmol/cc)	(cc/jam)	(mgmol/cc)				
38	180	0	80	7.9	0.6	1.2	2.4	3
39	195	0	90	7.9	0.6	1.2	2.3	2.91
40	240	0	85	7.9	0.6	1	1.8	2.46
41	220	0	100	7.9	0.5	1.2	2	2.75
42	180	0.2246	90	9.0369	1	2	2.6	3.6
43	220	0.2246	80	9.0369	0.8	1.6	2	2.8
44	245	0.2246	120	9.0369	0.8	1.4	2	3.15
45	320	0.2246	100	9.0369	0.8	1.2	1.7	2.33
46	255	0.2459	135	10.2453	0.8	1.4	3	3.9
47	400	0.2459	110	10.2453	0.8	1.2	1.8	2.6
48	320	0.2459	100	10.2453	0.8	1.2	1.8	2.61
49	240	0.2459	110	10.2453	1	2.3	3	3.5
50	195	0.3279	100	11.2951	1.2	2.2	3.1	4.4
51	250	0.3279	100	11.2951	1.1	1.8	2.6	3.6
52	320	0.3279	100	11.2951	1	1.6	2.2	2.9
53	400	0.3279	100	11.2951	0.8	1.4	1.8	2.4
54	150	0.3279	100	11.2951	1.8	3	4.2	5.4



Gambar 4  
Hubungan antara tinggi kolom dengan  $C_w$

$F = (K_w a) = \int \{ C_w \text{ calc} \cdot C_w \text{ exp} \}^2$  yang minimum.

Minimasi  $F$ , dengan peubah  $K_w a$  tersebut, dijalankan dengan cara *Golden Section* dan dengan bantuan komputer. Setelah harga  $K_w a$  terbaik diperoleh selanjutnya dihitung harga-harga  $C_w$  dengan model matematik yang diajukan. Bila harga  $C_w$  terhitung cukup dekat dengan harga-harga  $C_w$  data, maka dapat disimpulkan bahwa model matematik dianggap benar. Logika penyelesaian secara numeris serta simulasi komputer bisa dilihat dari diagram alir berikut (lampiran).

Salah satu contoh hasil perhitungan dengan cara simulasi tersebut di atas dapat dilihat pada Tabel 2. Terlihat bahwa konsentrasi  $C_w$  hasil simulasi tidak jauh

**Tabel 2**  
Hubungan antara tinggi kolom dengan konsentrasi asam benzoat hasil simulasi dan hasil percobaan

Panjang Kolom, cm	CW-simulasi mgmol/cc	CW-data mgmol/cc
0	0.2246E-3	0.2246E-3
5	0.3041E-3	
10	0.3893E-3	
15	0.4805E-3	
20	0.5783E-3	0.8000E-3
25	0.6830E-3	
30	0.7949E-3	
35	0.9142E-3	
40	1.0427E-3	1.2000E-3
45	1.1795E-3	
50	1.3257E-3	
55	1.4817E-3	
60	1.6482E-3	1.7000E-3
65	1.8258E-3	
70	2.0152E-3	
75	2.2170E-3	
80	2.4322E-3	2.3300E-3

( $K_w a = 0,4705$  per jam,  
 $L_c = 320$  cc/jam,  
 $L_D = 100$  cc/jam,  
 $C_{wi} = 0,2246E-3$  mgmol/cc,  
 $C_{ki} = 9,0369E-3$  mgmol/cc)

berbeda dari hasil percobaan dan secara kualitatif akan terlihat lebih jelas seperti pada Gambar 4.

#### IV. KESIMPULAN

- Transfer massa pada ekstraksi cair di dalam kolom terisi untuk sistem kerosin-asam benzoat-air, mengikuti model matematik sebagai berikut:

Persamaan diferensial berbentuk :

$$\frac{\delta C_w}{\delta h} = \frac{K_w a}{L_c} S (C_w * -C_w).$$

dengan kondisi batas:  $h = 0, C_w = C_{wi}$   
 $h = H, C_w = C_{wo}$

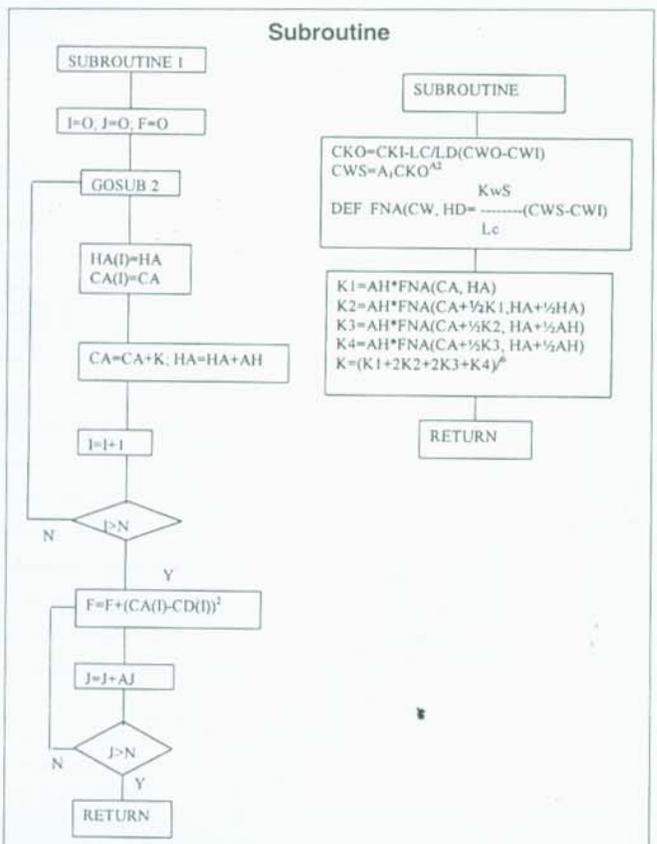
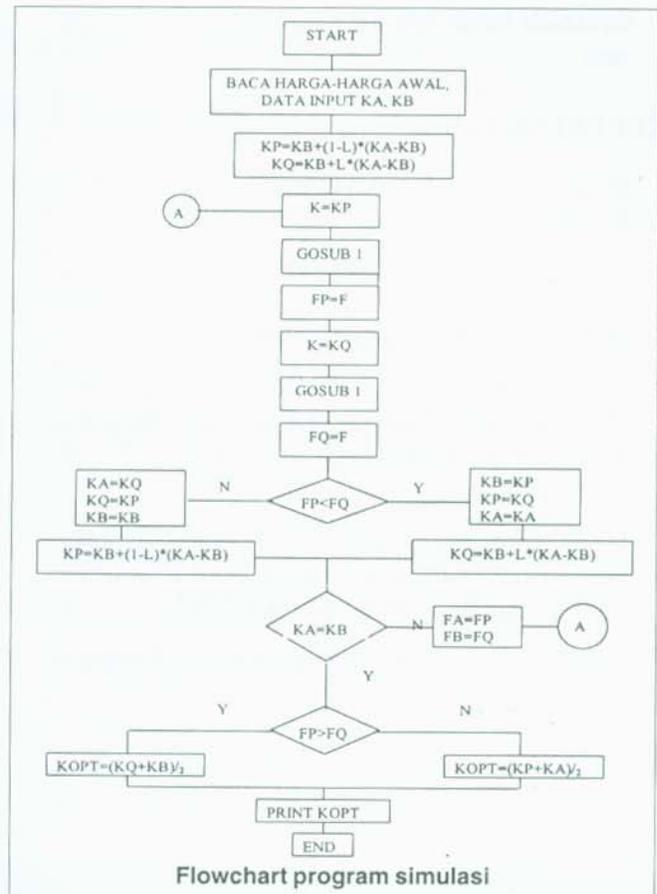
- Pada kondisi operasi:

$$L_c = 320 \text{ cc/jam}$$

$$L_D = 100 \text{ cc/jam}$$

$$C_{wi} = 0,2246E-3 \text{ mgmol/cc}$$

$$C_{ki} = 9,0369E-3 \text{ mgmol/cc}$$



diperoleh harga terbaik Kwa sebesar 0,4705 per jam.

#### KEPUSTAKAAN

1. Brown, G.G; 2001; "Unit Operation", Modern Asia Ed. John Wiley & Sons, Inc. New York
2. Laddha, G.S. and Deegalisan, T.E; 1976, "Transport Phenomena in Liquid Extraction:", Tata McGraw Hill Publishing Co. Ltd; New Delhi
3. Martin Henschke and Andreas Pfennig, 2001, "Mass Transfer Enhancement in Single-Drop Extraction Experiments", AIChE J., vol 45, No.10, p.2079-2086.
4. Morello, V.S. and Beckmann, R.B; 1950, "Temperature Studies in Packed Liquid-Liquid Extraction Tower", Ind, Eng Chem., 42,1078-1087.
5. Sediawan, W.B; 1990, "Peranan Simulasi Komputer dalam Teknik Kimia", Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, UGM, Yogyakarta.
6. Simon Piche, Bernard P.A., Ion Iliuta and Faucal Larachi, 2001, "Interfacial Mass Transfer in Randomly Packed Towers", Environmental Science & Technology.
7. Treybal, R.E. , 1963, "Liquid Extraction", 2<sup>nd</sup> ed. , Mc Graw Hill Book Co. , New York. Johnstone, R.E, and Thring, M.W; 1957, "Pilot Plans, Model, and Model, and Scale Up Method in Chemical Engineering", Mc Graw Hill Book Company, Inc., New York.
8. Treybal, R.E., 1981, "Mass Transfer Operation", Thir ed. ,International Student Edition, McGraw HillBook Co., Tokyo.
9. Vogt, H.J. and Geankoplis, c.j.,1954, "Processing Variables in SolventExtraktion Tower", Ind. Eng. Chem. ,46, 1773-1767. ✓