

## KOEFISIEN PERPINDAHAN MASSA SISTEM PADAT-CAIR PADA KOLOM BAHAN ISIAN

Ani Purwanti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Sains & Teknologi AKPRIND Yogyakarta  
e-mail :<sup>1</sup>ani4wanti@akprind.ac.id

### ABSTRACT

*One of the important processes in Chemical Engineering is mass transfer. This mass transfer involves the systems of solid-liquid, liquid-liquid, liquid-gas, and solid-gas phases. Mass transfer between solid and liquid is often found in industrial operations, including extraction, drying, and absorption processes. Solid-liquid and solid-gas mass transfer data are needed to design the equipment related to the process. In the mass transfer process, the mass transfer coefficient is a very important quantity to determine the operating conditions of a mass transfer device. The value of the mass transfer coefficient is known from the relationship equation between the mass transfer coefficient of the solid-liquid systems with the influence variables. The aim of this research was to study the effect of flow velocity, packed bed height, and solid diameter on the mass transfer coefficient of the solid-liquid system. The experiment was conducted by flowing water from the bottom of a vertical column or tube through a spherical sodium benzoate as a filling material. The concentration of sodium benzoate that comes out of the fixed bed column is measured by titrating the solution with a standardized solution of hydrochloric acid. The correlation of mass transfer coefficient in the fixed bed column with the influence variables is expressed as dimensionless equation. The value of the dimensionless equation's constant are  $k = 1.13$ ;  $c_1 = 0.54$ ;  $c_2 = 0.04$ ; and  $c_3 = -0.86$ , with the relative mean error of 2.4%.*

**Keywords :** dimensional analysis, mass transfer coefficient, sodium benzoate, fixed bed column

### INTISARI

*Perpindahan massa merupakan salah satu proses yang penting dalam bidang Teknik Kimia. Perpindahan massa ini dapat berupa perpindahan massa sistem padat-cair, cair-cair, cair-gas, gas-gas, serta padat-gas. Perpindahan massa antara padatan dan cairan banyak dijumpai dalam operasi industri antara lain pada proses ekstraksi, pengeringan, dan penyerapan. Untuk perancangan alat proses tersebut, data perpindahan massa padat-cair maupun padat-gas sangat diperlukan. Dalam proses perpindahan massa, koefisien perpindahan massa merupakan suatu besaran yang sangat penting untuk menentukan kondisi operasi suatu alat perpindahan massa. Salah satu cara untuk mengetahui harga koefisien perpindahan massa dapat dilakukan dengan mengetahui persamaan hubungan antara koefisien perpindahan massa sistem padat-cair dengan peubah yang mempengaruhinya. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh kecepatan aliran, tinggi tumpukan, dan diameter butiran terhadap koefisien perpindahan massa sistem padat-cair. Penelitian mengenai perpindahan massa sistem padat-cair ini menggunakan bahan natrium benzoat dan air. Penelitian dilakukan dengan mengalirkan air dari bawah kolom vertikal melalui bahan isian natrium benzoat yang berbentuk bola. Konsentrasi natrium benzoat yang keluar dari tabung diukur dengan cara menitrasi larutan tersebut dengan larutan HCl yang telah distandarisasi. Dengan menggunakan analisa dimensi, data hasil*

percobaan dapat dibuat persamaan tidak berdimensi yang menunjukkan hubungan antara koefisien perpindahan massa sistem padat-cair pada kolom bahan isian dengan peubah-peubah yang mempengaruhinya, dengan harga masing-masing konstanta yang diperoleh adalah  $k = 1,13$ ;  $c_1 = 0,54$ ;  $c_2 = 0,04$ ; dan  $c_3 = -0,86$ . Jika persamaan tersebut dipergunakan untuk mewakili data percobaan, didapatkan penyimpangan rata-rata sebesar 2,4%.

**Kata kunci :** analisis dimensi, koefisien perpindahan massa, kolom bahan isian, natrium benzoat

## 1. PENDAHULUAN

Peristiwa perpindahan massa adalah salah satu pengetahuan dasar yang penting dan banyak sekali dijumpai dalam persoalan-persoalan Teknik Kimia, disamping perpindahan panas dan perpindahan momentum. Perpindahan massa ini dapat berupa perpindahan massa sistem padat-cair, cair-cair, cair-gas, gas-gas, dan padat-gas. Beberapa operasi dalam bidang Teknik Kimia misalnya : proses penyerapan, ekstraksi, pengeringan, pertukaran ion maupun reaktor katalis adalah operasi yang berdasarkan prinsip-prinsip perpindahan massa.

Dalam proses perpindahan massa, koefisien perpindahan massa merupakan suatu besaran yang sangat penting untuk menentukan kondisi operasi suatu alat perpindahan massa. Beberapa penelitian mengenai perpindahan massa sistem padat-cair telah dilakukan, bahan yang digunakan antara lain : Naphtol 2 dengan air, Asam Salisilat-Benzene, Asam Suksinat-Aceton, Asam Benzoat-air dan lain-lain. Salah satu cara untuk mengetahui harga koefisien perpindahan massa dapat dilakukan dengan mengetahui persamaan hubungan antara koefisien perpindahan massa sistem padat-cair dengan peubahnya.

Telah dilakukan beberapa macam penelitian mengenai perpindahan massa sistem padat-cair antara, lain :

- 1) Mulyono dan Erwanta (2004), meneliti koefisien perpindahan massa pelarutan padatan dalam tangki berpengaduk dan berpenghalang. Padatan yang dipakai adalah asam benzoate teknis, pelet NaOH.
- 2) Wibowo, dkk. (2012), melakukan penelitian tentang pengaruh laju alir pelarut dan tinggi tumpukan bahan terhadap nilai koefisien transfer massa volumetrik ( $k_c a$ ) pada proses ekstraksi soda KI dari abu klotok randu.
- 3) Widodo (2009), melakukan penelitian tentang koefisien perpindahan massa, padat-cair dalam kolom bahan isian dengan menggunakan natrium benzoat dengan air. Dalam penelitian ini disimpulkan bahwa koefisien perpindahan massa berbanding lurus dengan kecepatan aliran dan berbanding terbalik dengan tinggi tumpukan bahan, serta koefisien perpindahan massa merupakan fungsi dari bilangan Reynold.

Perpindahan massa antar fase terjadi apabila terdapat perpindahan konsentrasi antar sistem yang lebih tinggi konsentrasinya ke sistem yang konsentrasinya lebih rendah (Treybal, 1981). Perpindahan massa antar fase terjadi apabila suatu komponen dalam suatu campuran berpindah dalam fase yang sama atau fase yang berbeda karena adanya perbedaan konsentrasi (Geankoplis, 1983). Data-data kecepatan perpindahan massa diperlukan untuk perancangan alat perpindahan massa, sedangkan untuk menentukan kecepatan perpindahan massa diperlukan harga koefisien perpindahan massa.

Penelitian ini meninjau tentang peristiwa pelarutan dengan menggunakan fluida air, yang dilakukan pada kolom bahan isian. Proses perpindahan massa yang terjadi pada penelitian ini adalah peristiwa difusi.

Karena konsentrasi antar muka padatan lebih besar dari konsentrasi antar muka cairan, maka difusi terjadi dari sistem yang konsentrasinya tinggi ke sistem yang konsentrasinya rendah, dalam hal ini dari fase padat ke fase cair.

Difusivitas padatan ke dalam cairan dapat dihitung dengan persamaan Wilke - Chang (Treyball, 1981) sebagai berikut:

$$D_v = \frac{7,4 \times 10^{-8} (\phi.M)^{0,5} T}{\mu_v^{0,6}} \quad (1)$$

Dalam penelitian ini, digunakan natrium benzoat yang merupakan suatu garam, sehingga ketika suatu garam terdisosiasi kedalam larutan, dalam hal ini adalah air, maka bukan molekul-molekul melainkan ion-ionnya yang terdifusi. Untuk larutan encer garam tunggal, koefisien difusivitas dihitung menggunakan persamaan Nernst - Haskell yaitu :

$$D_v = \frac{RT}{F^2} \left[ \frac{1/n_+ + 1/n_-}{1/\lambda^0_+ + 1/\lambda^0_-} \right] \quad (2)$$

Harga-harga  $\lambda^0_+$ , dan  $\lambda^0_-$  untuk setiap jenis pada 25°C, pada temperatur lain dibutuhkan faktor koreksi yaitu  $T/334\mu_w$  dimana  $\mu_w$  adalah viskositas air pada T dalam centipoise.

Berdasarkan tinjauan pustaka tersebut diatas untuk menganalisa perpindahan massa tumpukan padatan dengan air digunakan anggapan-anggapan sebagai berikut :

- 1) Gaya dorong perpindahan massa adalah perbedaan konsentrasi pada tahanan lapisan sekitar butir.
- 2) Konsentrasi bahan terlarut sekitar padatan adalah konsentrasi jenuhnya pada temperatur cairan.
- 3) Butir-butir padatan tersebar merata, ukurannya seragam dan tetap selama waktu peninjauan.
- 4) Air mengikuti pola aturan sumbat (*plug flow*).
- 5) Perpindahan massa dari padatan ke cairan berlangsung secara isothermal.
- 6) Distribusi kecepatan aliran fluida dianggap sama pada seluruh penampang kolom.
- 7) Perpindahan massa arah radial dianggap harganya sama dengan nol.

Neraca bahan solut dalam cairan yang melalui kolom bahan isian pada keadaan tunak (*steady state*) untuk elemen volume  $A.\Delta x$  menghasilkan persamaan:

$$k_c a = \frac{v}{s} = \ln \left[ \frac{C_s}{(C_s - C_1)} \right] \quad (3)$$

Variabel-variabel yang diperkirakan berpengaruh terhadap harga koefisien perpindahan massa padat-cair pada kolom bahan isian antara lain:  $\rho, \mu, s, v, D_v, D_t, d_p, X, \Psi$ . Nilai X dan  $\Psi$  bisa dianggap tetap karena bentuk dan ukuran butiran tetap. Nilai  $(\mu/D_v \rho)$  juga bisa dianggap tetap karena operasi bekerja pada kondisi isothermal. Hubungan antara variabel-variabel diatas dengan analisa dimensi sistem MLT dan metode Reyleigh menghasilkan persamaan:

$$\frac{k_c a d_p^2}{D_v} = k \left[ \frac{v d_p \rho}{\mu} \right]^{c_1} \left[ \frac{s}{d_p} \right]^{c_2} \left[ \frac{D_t}{d_p} \right]^{c_3} \quad (4)$$

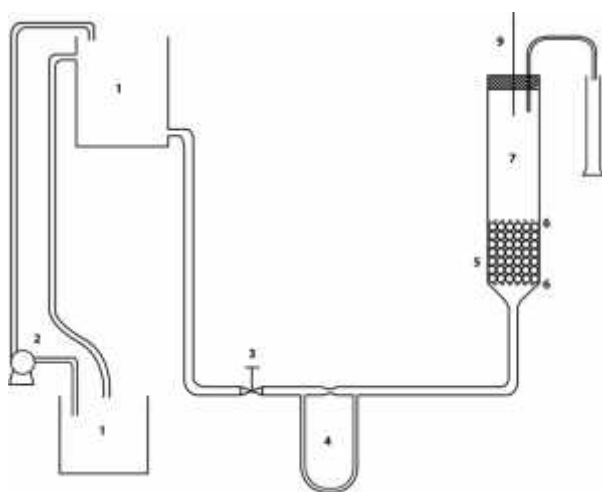
Dalam hipotesa, pada percobaan ini koefisien perpindahan massa tumpukan padatan dan cairan yang dipengaruhi oleh kecepatan aliran, tinggi tumpukan, dan diameter butiran dapat dinyatakan dalam bentuk

kelompok tak berdimensi seperti pada persamaan 4. Dalam penelitian ini akan dicari harga tetapan  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ , dan  $k$  dengan peubah kecepatan aliran ( $v$ ), tinggi tumpukan ( $s$ ), dan diameter butiran ( $d_p$ ).

## 2. METODE PENELITIAN

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain natrium benzoat, dengan rumus molekul  $C_6H_5COONa$ , berat molekul 144,2 g/gmol, bentuk serbuk putih, kelarutan 4,244 gmol/l; air, pada  $29^{\circ}C$  mempunyai berat jenis 1,00051 g/cm<sup>3</sup>, kekentalan 0,961927 cp; aquadest, dengan sifat fisis pada  $29^{\circ}C$  mempunyai berat jenis 0,9959761 g/cm<sup>3</sup>, kekentalan 0,8180 cp; dan larutan HCl yang digunakan untuk analisa larutan natrium benzoat hasil percobaan.

Sedangkan peralatan yang digunakan adalah rangkaian seperti pada Gambar 1 di bawah ini:



Keterangan gambar:

1. Tangki air
2. Pompa
3. Kran
4. Manometer
5. Bahan isian
6. Saringan
7. Kolom bahan isian
8. Gelas pengukur
9. Termometer

**Gambar 1.** Rangkaian Alat Percobaan

Alat dirangkai seperti pada Gambar 1, kemudian butiran natrium benzoat dimasukkan ke dalam kolom. Pompa dihidupkan kemudian kran dibuka dan diatur sehingga didapat kecepatan aliran yang tertentu. Setelah *steady state*, sejumlah sampel yang keluar dari puncak kolom ditampung untuk dianalisa. Percobaan dilakukan dengan variasi kecepatan aliran ( $v$ ), variasi tinggi tumpukan ( $s$ ), dan variasi diameter butiran ( $d_p$ ). Larutan natrium benzoat yang diperoleh dari setiap kali percobaan ditentukan konsentrasinya dengan cara titrasi menggunakan larutan HCl, viskositasnya dengan alat viskosimeter Oswald, densitasnya dengan alat piknometer.

Berdasarkan persamaan 4 yang diperoleh maka dengan mengubah salah satu peubah dan yang lainnya tetap maka dapat ditentukan harga tetapan yang ada, yaitu dari variasi kecepatan alir dapat ditentukan  $c_1$ , dari data variasi tinggi tumpukan ditentukan harga  $c_2$ , dan dari variasi diameter butiran ( $d_p$ ) dapat ditentukan harga  $k$  dan  $c_3$ .

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Variasi Kecepatan Aliran ( $v$ )

Pengaruh kecepatan aliran terhadap koefisien perpindahan massa padat-cair pada kolom bahan isian terlihat pada persamaan 5 dan Tabel 1.

$$\frac{k_c a d_p^2}{D_v} = k' \left[ \frac{v d_p}{\mu} \right]^{c_1} \quad (5)$$

**Tabel 1.** Pengaruh Kecepatan Aliran terhadap koefisien perpindahan massa  
( $d_p = 0,6$  cm,  $s = 35$  cm,  $D_t = 3,6$  cm,  $C_S = 4,244$  gmol/l)

v	Re	Ln Re	$k_c a$	$\ln \frac{k_c a d_p^2}{D_v}$
6,8517	386,466	5,957	$1,8667 \times 10^{-4}$	1,9097
10,0285	586,818	6,375	$2,3923 \times 10^{-4}$	2,1577
13,1462	774,348	6,652	$2,7968 \times 10^{-4}$	2,3140
15,6680	924,244	6,829	$3,1222 \times 10^{-4}$	2,4240
19,4484	1151,483	7,049	$3,4114 \times 10^{-4}$	2,5126
23,7046	1408,265	7,250	$3,7180 \times 10^{-4}$	2,5987

Dengan cara kuadrat terkecil, didapatkan harga  $c_1 = 0,51$  dan  $\ln k = -1,278$  dengan kesalahan rata-rata 0,65%. Sehingga pengaruh v terhadap  $k_c a$  dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$\ln \left[ \frac{k_c a d_p^2}{D_v} \right] = -1,278 + 0,54 \ln Re \quad (6)$$

Dari Tabel 1 dapat dilihat bahwa semakin besar kecepatan aliran maka harga koefisien perpindahan massa semakin besar. Semakin besar kecepatan aliran maka padatan yang terlarut karena kontak antara air dengan padatan semakin kecil, sehingga harga  $\ln (C_S / (C_S - C_1))$  semakin kecil. Namun pengaruh kecepatan aliran terhadap harga koefisien perpindahan massa lebih besar dibanding pengaruh banyaknya padatan yang terlarut. Sehingga semakin besar kecepatan aliran maka harga koefisien perpindahan massa semakin besar.

### 3.2 Variasi Tinggi Tumpukan (s)

Data yang diperoleh dari percobaan terlihat dalam Tabel 2. Pengaruh tinggi tumpukan terhadap koefisien perpindahan massa padat-cair pada kolom bahan isian dapat dinyatakan dalam persamaan 7 sebagai berikut:

$$\frac{k_c a d_p^2}{D_v} = k'' \left[ \frac{s}{d_p} \right]^{c_2} \quad (7)$$

Dari Tabel 2 dapat dilihat bahwa semakin tinggi tumpukan maka harga koefisien perpindahan massanya semakin besar. Semakin tinggi tumpukan maka butiran yang terlarut semakin banyak sehingga harga  $\ln (C_S / (C_S - C_1))$  semakin besar. Namun pengaruh tinggi tumpukan terhadap koefisien perpindahan massa lebih kecil dibanding pengaruh banyaknya padatan yang terlarut, sehingga harga koefisien perpindahan massa semakin besar.

**Tabel 2.** Pengaruh Tinggi Tumpukan terhadap Koefisien Perpindahan Massa

(  $v = 10,0285 \text{ cm/dt}$ ,  $d_p = 0,6 \text{ cm}$ ,  $D_t = 3,6 \text{ cm}$ ,  $C_S = 4,244 \text{ gmol/l}$  )

s	$k_{ca}$	$\ln \left[ \frac{k_{ca} d_p^2}{D_v} \right]$	s/ $d_p$	$\ln \left[ \frac{s}{d_p} \right]$
25	$2,3898 \times 10^{-4}$	2,1587	41,6667	3,7297
30	$2,4011 \times 10^{-4}$	2,1614	50	3,9120
35	$2,4204 \times 10^{-4}$	2,1694	58,3333	4,0662
40	$2,4301 \times 10^{-4}$	2,1734	66,6667	4,1997
45	$2,4441 \times 10^{-4}$	2,1792	75	4,3175
50	$2,4515 \times 10^{-4}$	2,1822	83,3333	4,4228

Dari data tersebut, dengan cara kuadrat terkecil, didapatkan harga  $c_2 = 0,04$  dan  $\ln k = 2,013$  dengan kesalahan rata-rata 0,03%, sehingga pengaruh s terhadap  $k_{ca}$  dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$\ln \left[ \frac{k_{ca} d_p^2}{D_v} \right] = 2,013 - 0,04 \ln \left[ \frac{s}{d_p} \right] \quad (8)$$

### 3.3 Variasi Diameter Butiran ( $d_p$ )

Pengaruh diameter butiran terhadap koefisien perpindahan massa padat-cair pada kolom bahan isian terlihat pada persamaan 4,3 :

$$\frac{k_{ca} d_p^2}{D_v} \left[ \frac{v d_p}{\mu} f \right]^{-c_1} \left[ \frac{s}{d_p} \right]^{-c_2} = k \left[ \frac{D_t}{d_p} \right]^{c_3} \quad (9)$$

$$\frac{k_{ca} d_p^2}{D_v} \left[ \frac{v d_p}{\mu} f \right]^{-c_1} \left[ \frac{s}{d_p} \right]^{-c_2} = M \quad (10)$$

$$M = k \left[ \frac{s}{d_p} \right]^{c_3} \quad (11)$$

**Tabel 3.** Pengaruh Diameter Butiran terhadap Koefisien Perpindahan Massa

(  $v = 10,0285 \text{ cm/dt}$ ,  $s = 35 \text{ cm}$ ,  $d_p = 0,6 \text{ cm}$ ,  $C_S = 4,244 \text{ gmol/l}$  )

$d_p$	$D_t/d_p$	$\ln D_t/d_p$	$k_{ca}$	M	$\ln M$
0,6	6	1,7917	$2,4148 \times 10^{-4}$	0,2426	-1,4163
1,12	3,2143	1,1676	$1,5541 \times 10^{-4}$	0,3946	-0,9299
1,3	2,7692	1,0185	$1,5396 \times 10^{-4}$	0,4880	-0,7174
1,51	2,3841	0,8688	$1,5020 \times 10^{-4}$	0,5353	-0,6249
1,66	2,1687	0,7741	$1,2733 \times 10^{-4}$	0,5776	-0,5489

Dengan cara kuadrat terkecil, didapatkan harga  $c_3 = -0,86$  dan  $k = 1,13$  dengan kesalahan rata-rata 2,4%. Sehingga pengaruh  $d_p$  terhadap  $k_{ca}$  dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$\ln \left[ \frac{k_{ca} d_p^2}{D_v} \left[ \frac{v d_p}{\mu} f \right]^{-c_1} \left[ \frac{s}{d_p} \right]^{-c_2} \right] = 1,13 - 0,86 \ln \left[ \frac{D_t}{d_p} \right] \quad (12)$$

Dari Tabel 3 dapat dilihat bahwa semakin besar diameter butiran maka harga koefisien perpindahan

massa semakin kecil. Hal ini karena semakin besar diameter butiran maka luas perpindahan massa total untuk kontak antara air dengan butiran semakin kecil sehingga padatan yang terlarut akan semakin kecil dan harga  $\ln(C_s/(C_s - C_1))$  semakin kecil akibatnya harga koefisien perpindahan massa akan semakin kecil.

#### 4. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dan pembahasan dapat disimpulkan bahwa hubungan antara koefisien perpindahan massa dengan faktor-faktor yang berpengaruh pada diameter butiran antara 0,6 cm sampai dengan 1,66 cm, tinggi tumpukan antara 25 cm sampai dengan 50 cm dan Bilangan Reynolds antara 386 sampai dengan 1661 adalah:

1. Semakin besar kecepatan aliran, semakin besar pula koefisien perpindahan massanya
2. Semakin besar tinggi tumpukan, semakin besar harga koefisien perpindahan massanya.
3. Semakin besar diameter butiran, semakin kecil harga koefisien perpindahan massanya
4. Persamaan yang terjadi dinyatakan dalam kelompok tak berdimensi adalah:

$$\frac{k_c a \cdot d_p^2}{D_v} = 1,13 \left[ \frac{v d_p \rho}{\mu} \right]^{0,54} \left[ \frac{s}{d_p} \right]^{0,04} \left[ \frac{D_t}{d_p} \right]^{-0,86}$$

5. Persamaan empiris yang diperoleh apabila dipergunakan untuk mewakili data percobaan yang telah dilakukan, mempunyai penyimpangan rata-rata sebesar 2,4%.

#### DAFTAR LAMBANG

$C_s$	= Konsentrasi jenuh, gmol/ l
$C_1$	= Konsentrasi hasil, gmol/ l
$d_p$	= Diameter partikel, cm
$D_t$	= Diameter tabung, cm
$D_v$	= Difusivitas molekuler, $\text{cm}^2/\text{dt}$
$F$	= Faraday (96500 C/gekiv)
$k_c a$	= Koefisien transfer massa volumetric (1/det) = $\text{mol}/(\text{det} \cdot \text{cm}^2)/(\text{mol}/\text{cm}^3) \times (\text{cm}^2/\text{cm}^3)$
$M$	= Berat molekul solvent, g/gmol
$R$	= Tetapan gas (8,314 J/gmol/K)
$s$	= Tinggi tumpukan, cm
$T$	= Suhu absolut, K
$v$	= Kecepatan linier fluida, $\text{cm}/\text{dt}$
$X$	= Porositas
$\mu$	= Viskositas larutan, $\text{g}/\text{cm} \cdot \text{dt}$
$\rho$	= Densitas larutan, $\text{g}/\text{cm}^3$
$\kappa^{\circ}_+, \kappa^{\circ}_-$	= Konduktansi ionik batas (pada konsentrasi nol, suhu 25 <sup>0</sup> C), $\text{A}/\text{cmz}(\text{v}/\text{cm})(\text{gekiv}/\text{cm}^3)$
$n_+, n_-$	= valensi-valensi kation dan anion
	= Faktor bentuk padatan

**DAFTAR PUSTAKA**

- Geankoplis, C.J. (1983). *Transport Process and Unit Operation*. Boston: Allyn and Bacon Inc.
- Mulyono, P., Erwanta, J. (2004). Koefisien Perpindahan Massa Pelarutan Padatan dalam Tangki Berpengaduk dan Berpenghalang. *MEDIA TEKNIK*, 2, 54-60.
- Treybal, R.E. (1981). *Mass Transfer Operations*. Singapore: McGraw Hill
- Wibowo, W.A., Warmiaji, H.R., & Wijaya, K. (2012). Pengaruh Laju Alir Pelarut dan Tinggi Tumpukan Bahan terhadap Nilai Koefisien Transfer Massa Volumetris ( $k_c a$ ) pada Proses Ekstraksi Soda Ki dari Abu Klotok Randu. *EKUILIBRIUM*, 11(2), 57-61.
- Widodo, L.U. (2009). Koefisien Perpindahan Massa Natrium Benzoat dengan Air dalam Kolom Isian. *Jurnal Teknik Kimia*, 3(2), 213-217.