

PENGARUH KECEPATAN ALIR UDARA DAN TEMPERATUR TERHADAP NILAI KOEFISIEN PERPINDAHAN MASSA PADAT DAN GAS (BOLA NAFTALENA-UDARA) DALAM SISTEM KOLOM AKRILIK

Martin^{1*}, Lindawati¹

¹Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Surya
Jl. M.H. Thamrin KM 2.7, Tangerang, Banten, Indonesia

*Email: martinea03@gmail.com, lindawati@surya.ac.id

Abstrak

Fenomena perpindahan massa merupakan fundamental penting dan aplikatif dalam proses industri, tanpa terkecuali proses industri kimia. Proses sublimasi, adsorpsi, dan pengeringan merupakan contoh proses yang merepresentasikan proses perpindahan massa fase padat dan gas. Penelitian ini dilaksanakan dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh perubahan temperatur dan kecepatan alir udara terhadap nilai koefisien perpindahan massa fase padat dan gas yang direpresentasikan oleh sistem bola naftalena dan udara. Selain itu, diharapkan produk hasil penelitian dapat dijadikan modul praktikum yang dapat dimanfaatkan untuk keperluan pembelajaran. Penelitian ini dilakukan dengan metode observasi. Hasil observasi menunjukkan bahwa peningkatan temperatur dan kecepatan alir udara akan meningkatkan nilai koefisien perpindahan massa padat dan gas (K_G). Nilai koefisien perpindahan massa padat dan gas tertinggi diperoleh pada variasi temperatur 75°C dan kecepatan alir udara 4,98 m/s.

Kata Kunci: Perpindahan Massa, Padat, Gas, Temperatur, Kecepatan Udara

Abstract

Mass transfer phenomenon is one of the fundamental and applicative knowledge in industrial process, including chemical industrial process. Sublimation, adsorption, and drying are the examples of the processes representing mass transfer phenomenon of solid and gas. The purpose of this study was to determine the effect of temperature and air velocity in the solid and gas mass transfer coefficient. Furthermore, the output of this study can be used for learning purposes concerning solid and gas mass transfer. The research was done by observation method. The observation result shows that the increase of temperature and air velocity will cause the increasing of solid-gas mass transfer coefficient (K_G). Highest value of solid-gas mass transfer coefficient obtained at 75°C and 4,98 m/s.

Keywords: Mass Transfer, Solid, Gas, Temperature, Air Velocity

1. PENDAHULUAN

Perpindahan massa merupakan salah satu kajian studi fundamental yang dipelajari di dalam ilmu teknik kimia. Jika didefinisikan, perpindahan massa merupakan suatu fenomena di mana terjadi perpindahan sejumlah materi (dapat berupa aliran, fase, fraksi, dan/atau komponen) dari satu lokasi ke lokasi lainnya. Secara spesifik, perpindahan massa merupakan suatu fenomena yang ditimbulkan oleh perbedaan konsentrasi di antara kedua titik sehingga

terjadi perpindahan materi (massa) dari area dengan konsentrasi yang lebih tinggi ke area dengan konsentrasi yang lebih rendah; fenomena ini dikenal sebagai peristiwa difusi (Treybal, 1980).

Berdasarkan fasenya, perpindahan massa sendiri dapat terjadi dalam berbagai alternatif, salah satunya adalah perpindahan massa sistem padat dan gas (Treybal, 1980). Sublimasi kapur barus berbahan dasar naftalena di udara merupakan contoh fenomena perpindahan massa padat dan gas yang dapat diamati

dalam kehidupan sehari-hari. Dalam peristiwa ini, naftalena akan berpindah (berdifusi) secara kontinu dari bola kapur barus dengan konsentrasi naftalena yang tinggi menuju udara dengan konsentrasi naftalena yang rendah sehingga pada suatu titik, kandungan naftalena di dalam kapur barus akan habis.

Koefisien perpindahan massa merupakan suatu parameter yang dapat digunakan sebagai basis untuk menggambarkan fenomena perpindahan massa secara matematis, termasuk fenomena difusi naftalena dari kapur barus ke udara. Rodriguez, dkk. (1998) dalam jurnalnya "A Simple Experiment of Mass Transfer" dan Utgikar (2015) dalam jurnalnya "Facilitating Active Learning of Concepts in Transport Phenomena: Experiment with a Subliming Solid" merupakan contoh penelitian yang telah melakukan kajian terhadap variabel-variabel yang mampu memengaruhi nilai koefisien perpindahan massa (naftalena-udara).

Teknik yang digunakan di dalam dua penelitian tersebut adalah memodelkan fenomena perpindahan massa naftalena-udara di dalam suatu kolom yang telah dilengkapi serangkaian instrumen dengan tujuan untuk memvariasikan variabel-variabel yang dinilai mampu memengaruhi nilai koefisien perpindahan massa. Adapun fokus dari kedua penelitian tersebut adalah mengetahui pengaruh massa awal dan diameter sampel bola naftalena terhadap nilai koefisien perpindahan massa padat-gas tanpa mempertimbangkan pengaruh kecepatan alir udara dan temperatur; kecepatan alir udara dan temperatur dijaga konstan. Padahal, kecepatan alir udara dan temperatur merupakan contoh variabel yang mampu memengaruhi nilai koefisien perpindahan massa padat-gas (Treybal, 1980).

Penelitian ini didesain untuk tidak hanya mengetahui pengaruh kecepatan alir udara dan temperatur terhadap nilai koefisien perpindahan massa saja melainkan juga untuk menciptakan sebuah unit operasi teknik kimia yang dapat digunakan untuk keperluan pembelajaran mengenai konsep perpindahan massa sistem padat-gas, terutama perpindahan massa bola naftalena-udara. Di dalam penelitian ini, sebuah kolom akrilik akan dimodifikasi sedemikian rupa dengan menggunakan instrumen dan peralatan yang tersedia sehingga didapatkan sebuah unit operasi yang reliabel untuk keperluan pembelajaran mengenai fenomena perpindahan massa sistem padat-gas, terkhusus pengaruh kecepatan alir udara dan temperatur terhadap nilai koefisien perpindahan massa bola naftalena-udara. Diharapkan, penelitian ini dapat memfasilitasi proses pembelajaran mengenai fenomena perpindahan massa padat dan gas yang murah, cepat, dan aman.

2. BAHAN DAN METODE

Peralatan yang digunakan di dalam penelitian ini adalah sistem kolom akrilik yang telah dimodifikasi, *blower*, *hair dryer* (Phillips), *thermocouple*, anemometer, jangka sorong, *stopwatch*, dan neraca analitik (Kern).

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah kapur barus berbahan dasar naftalena merek Swallow dengan geometri berbentuk bola dan berwarna putih.

Metode penelitian yang dilakukan adalah metode eksperimental. Di dalam penelitian ini dilakukan eksperimen untuk mengetahui pengaruh perubahan kecepatan alir udara dan temperatur sistem terhadap nilai koefisien perpindahan massa padat dan gas dari sistem bola naftalena-udara dengan menggunakan kolom akrilik.

Variabel yang divariasikan dalam eksperimen ini adalah kecepatan alir udara dan temperatur. Untuk variasi kecepatan alir udara, digunakan kecepatan alir udara 1,84 m/s, 3,62 m/s, dan 4,98 m/s sedangkan untuk variasi temperatur, digunakan temperatur 45°C, 57°C, dan 75°C.

Data yang diperoleh dalam penelitian ini meliputi massa dan diameter sampel bola naftalena, temperatur kolom, dan kecepatan alir udara. Data kemudian diolah dengan menggunakan persamaan di bawah ini (Rodriguez, Henriquez, & Macias-Machin, 1998):

$$\left(\frac{W}{W_0}\right)^{1/3} = 1 - K_G \left(\frac{P_s M_s}{RT_s}\right) \left(\frac{4\pi}{3W_0 \rho_s^2}\right)^{1/3} t \quad (1)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Modifikasi Alat

Konsep awal sistem kolom akrilik didesain dengan menggunakan kompresor sebagai penyuplai udara dan *hair dryer* sebagai penyuplai panas ke dalam kolom. Setelah dilakukan percobaan dengan desain konsep awal, ditemukan berbagai kendala yang menyebabkan desain ini tidak reliabel untuk diaplikasikan dalam penelitian ini. Pertama, kompresor tidak mampu memberikan suplai udara secara stabil selama 180 menit karena pada titik tertentu, kompresor akan melakukan proses pengambilan udara sehingga dikhawatirkan data yang diperoleh menjadi tidak akurat dan valid.

Kedua, perbedaan diameter selang sebagai lintasan udara dari kompresor menuju kolom akrilik (0,90 cm) terhadap diameter kolom akrilik yang relatif besar, yaitu 4,95 cm (pengukuran dengan jangka sorong) menimbulkan fenomena *bottleneck*. Fenomena ini menyebabkan aliran udara dari kompresor kehilangan sejumlah energi internalnya dan berimplikasi kepada penurunan kecepatan alir udara. Akibat yang ditimbulkan dari fenomena ini adalah udara yang masuk ke dalam sistem tidak dapat terukur oleh rotameter karena kecepatan alir udara yang terlalu kecil.

Ketiga, penggunaan *cone* pada bagian atas kolom akrilik berimplikasi kepada akumulasi panas di dalam sistem. Penyebabnya, laju alir panas keluar melalui ujung *cone* tidak sebanding dengan laju alir panas yang masuk ke dalam kolom melalui *hair dryer*. Akumulasi panas di dalam kolom menyebabkan peningkatan temperatur sistem secara signifikan dan pada waktu yang bersamaan *hair dryer* yang dilengkapi dengan *thermosetting* akan ternonaktifkan

secara otomatis. Jika desain ini dipertahankan, pengaruh perubahan temperatur terhadap nilai koefisien perpindahan massa bola naftalena-udara tidak dapat dikaji.

Meninjau desain awal alat yang tidak reliabel untuk digunakan dalam eksperimen, dilakukan modifikasi sebagai berikut:

1. Mengganti unit kompresor dengan *blower*

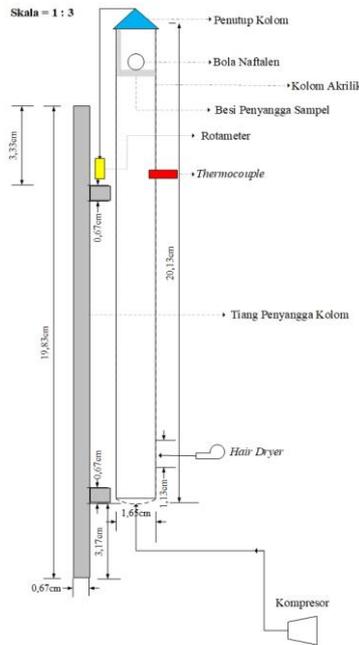
Blower memiliki tingkat stabilitas yang lebih baik dalam menyuplai udara ke dalam sistem kolom akrilik jika dibandingkan dengan kompresor.

2. Menggunakan pipa PVC sebagai lintasan udara

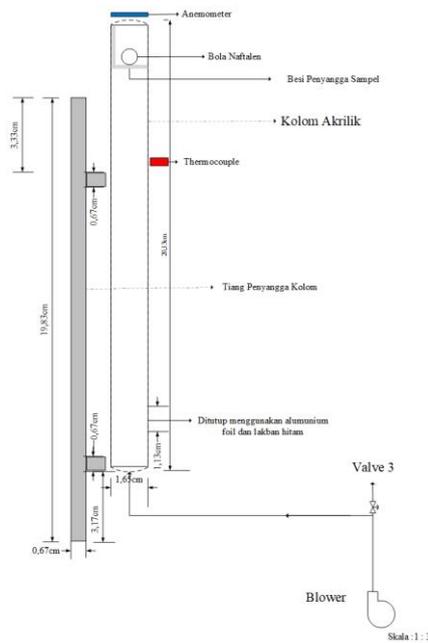
Pipa PVC dengan diameter yang lebih besar dibandingkan dengan selang mampu mencegah terjadinya fenomena *bottleneck* pada aliran udara

3. Menggunakan *valve* pada pipa

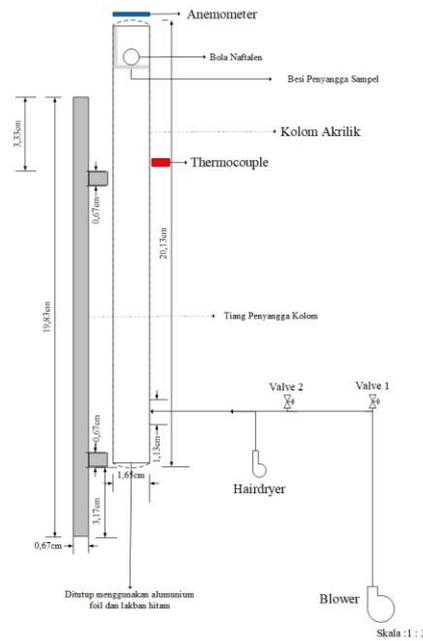
Penggunaan *valve* bertujuan untuk melakukan variasi terhadap kecepatan alir udara yang diumpankan ke dalam kolom dengan cara mengatur bukaan *valve* sehingga jumlah aliran udara dapat ditambahkan atau dikurangi sesuai dengan variasi yang diharapkan.



Gambar 1. Desain awal sistem kolom akrilik



Gambar 2. Desain alat tanpa *hair dryer*



Gambar 3. Desain alat dengan hair dryer

Desain alat tanpa hair dryer (gambar 2) digunakan untuk melakukan analisis nilai koefisien perpindahan massa padat dan gas untuk temperatur 45°C pada berbagai kecepatan alir udara sedangkan desain alat dengan hair dryer (gambar 3) digunakan untuk melakukan analisis nilai koefisien perpindahan massa padat dan gas untuk temperatur 57°C dan 75°C pada berbagai kecepatan alir udara.

3.2 Analisis Pengaruh Kecepatan Alir Udara dan Temperatur Sistem terhadap Nilai Koefisien Perpindahan Massa Bola Naftalena-Udara

Menurut Rodriguez, dkk. (1998), laju perpindahan massa padat dan gas (laju sublimasi) memiliki hubungan matematis dengan koefisien perpindahan massa padat dan gas yang dapat dinyatakan melalui persamaan berikut (Rodriguez, Henriquez, & Macias-Machin, 1998):

$$\dot{m} = K_G \cdot A \cdot (C_s - C_g) \tag{2}$$

Menjabarkan konsentrasi pada permukaan partikel (C_s) sebagai fungsi molekul didapatkan:

$$\dot{m} = K_G \cdot A \cdot \frac{P_s M_s}{RT_s} \tag{3}$$

Pada kasus sublimasi bola naftalena, Rodriguez, dkk. (1998) menyatakan tekanan uap jenuh senyawa naftalena ditentukan melalui persamaan berikut (Rodriguez, Henriquez, & Macias-Machin, 1998):

$$\log(P_s) = 13,575 - \frac{3.728,75}{T_s} \tag{4}$$

Menyatakan persamaan (4) dalam neraca massa diperoleh (Rodriguez, Henriquez, & Macias-Machin, 1998):

$$\frac{dW}{dt} = -\dot{m} = -k_G \cdot A \cdot \frac{P_s M_s}{RT_s} \tag{5}$$

Secara matematis, perhitungan W dapat didekati dengan menggunakan persamaan matematis sederhana untuk geometri bola, yaitu sebagai berikut:

$$W = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_s \tag{6}$$

Kemudian, luasan area interfasial untuk sampel bola naftalena dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$A = 4\pi r^2 \tag{7}$$

Menggabungkan kedua persamaan sebelumnya diperoleh persamaan baru sebagai berikut:

$$A = \left(\frac{36\pi W^2}{\rho_s^2} \right)^{1/3} \tag{8}$$

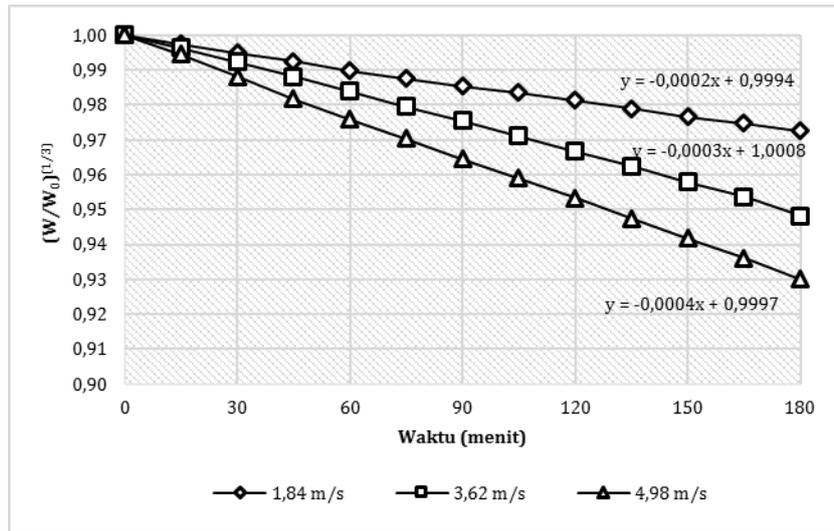
Setelah persamaan (8) diperoleh, persamaan ini dapat disubstitusikan ke dalam persamaan (5) sehingga didapatkan:

$$\frac{dW}{dt} = -\dot{m} = -K_G \cdot \left(\frac{36\pi W^2}{\rho_s^2} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{P_s M_s}{RT_s} \right) \tag{9}$$

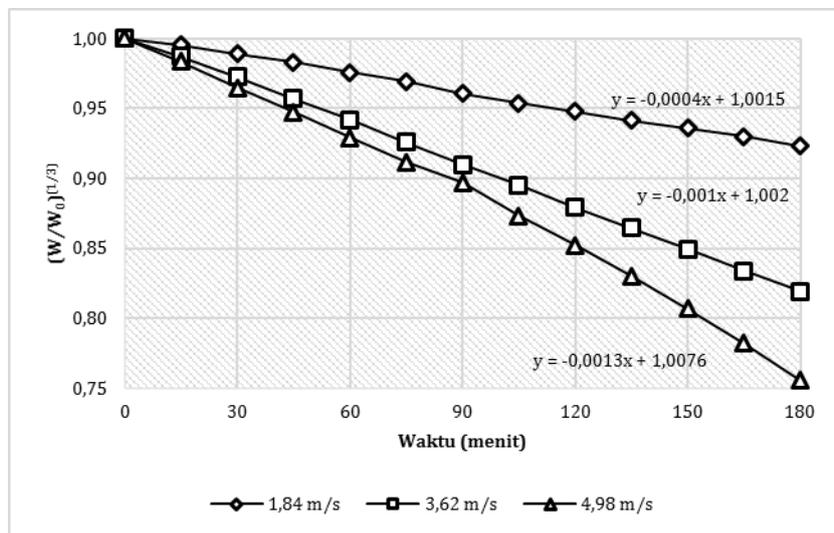
Melakukan integrasi terhadap persamaan di atas, didapatkan persamaan (1) sebagai berikut:

$$\left(\frac{W}{W_0} \right)^{1/3} = 1 - K_G \left(\frac{P_s M_s}{RT_s} \right) \left(\frac{4\pi}{3W_0 \rho_s^2} \right)^{1/3} t \tag{1}$$

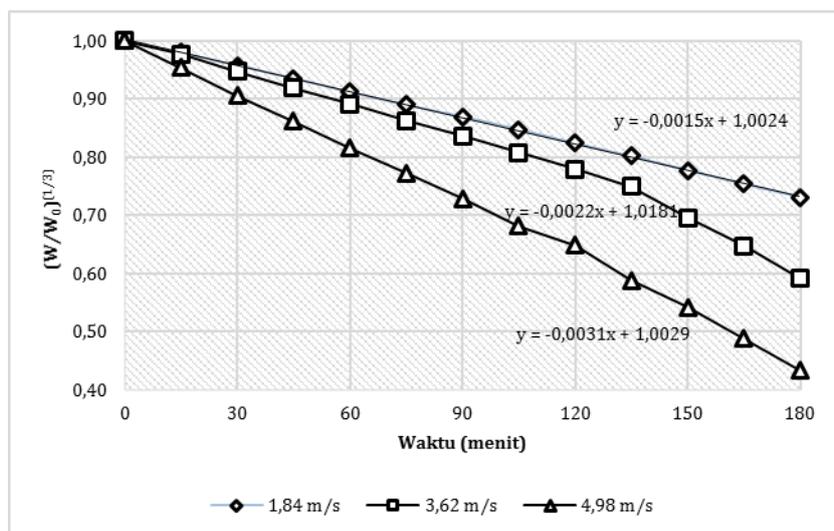
Untuk masing-masing variasi temperatur dan kecepatan alir udara, sampel massa bola naftalena ditimbang dengan menggunakan neraca analitik selama 180 menit dengan interval 15 menit. Kemudian, data massa sampel bola naftalena yang telah diperoleh, dikonversikan menjadi data rasio massa sampel terhadap waktu. Data rasio massa sampel terhadap waktu diplot ke dalam grafik sehingga terbentuk sebuah persamaan linear dengan nilai slope tertentu.



Gambar 4. Grafik perubahan rasio massa sampel pada 45°C



Gambar 5. Grafik perubahan rasio massa sampel pada 57°C



Gambar 6. Grafik perubahan rasio massa sampel pada 75°C

Dengan menggunakan persamaan (1), nilai *slope* yang diperoleh dari masing-masing persamaan linear dapat dioperasikan secara matematis untuk mendapatkan nilai koefisien perpindahan massa padat dan gas untuk bola naftalena-udara (K_G). Nilai K_G yang diperoleh dirangkum melalui tabel berikut:

Tabel 1. Data nilai K_G pada berbagai variasi

v (m/s)	Temperatur		
	45°C	57°C	75°C
1,84	0,0216	0,0438	0,1714
3,62	0,0323	0,1104	0,2566
4,98	0,0427	0,1413	0,3641

Dari tabel di atas, dapat diambil simpulan bahwa untuk temperatur yang sama, nilai koefisien perpindahan massa akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan alir udara yang diumpankan ke dalam kolom. Jika ditinjau secara fisika, peningkatan kecepatan alir udara akan mendorong kecenderungan fluida untuk mengalir secara turbulen. Dengan sifat aliran fluida yang turbulen, lapisan film gas yang terbentuk selama proses perpindahan massa berlangsung akan semakin tipis sehingga proses perpindahan massa (difusi) antara senyawa naftalena berlangsung dengan lebih intens.

Selain itu, untuk kecepatan alir udara yang sama, peningkatan temperatur memberikan implikasi kepada peningkatan nilai koefisien perpindahan massa. Secara fisik, peningkatan temperatur akan meningkatkan energi internal molekul (terutama energi kinetik) yang menyebabkan partikel-partikel padatan bergerak dengan frekuensi yang lebih tinggi. Sebagai akibatnya, proses perpindahan massa pada temperatur tinggi akan semakin intens jika dibandingkan dengan proses perpindahan massa pada temperatur menengah atau rendah.

Kecenderungan yang diperoleh juga dapat dianalisis dengan menggunakan pendekatan matematis melalui bilangan Reynolds dan Sherwood. Dari bilangan Reynolds (Cengel & Ghajar, 2015):

$$Re = \frac{\rho D_p v}{\mu} \quad (10)$$

dapat diamati bahwa parameter kecepatan udara dan bilangan Reynolds memiliki hubungan yang saling berbanding lurus. Artinya, peningkatan kecepatan alir udara akan meningkatkan nilai bilangan Reynolds secara signifikan.

Peningkatan bilangan Reynolds akan memberikan dampak terhadap peningkatan bilangan Sherwood, seperti yang digambarkan melalui persamaan (11) (Cengel & Ghajar, 2015):

$$Sh = a Re^b Sc^c \quad (11)$$

Perubahan bilangan Sherwood kemudian memberikan pengaruh terhadap perubahan nilai koefisien perpindahan massa, seperti yang digambarkan melalui persamaan (12):

$$Sh = K_G RT \frac{D_p}{D_{AB}} \quad (12)$$

Melalui persamaan di atas, dapat dinyatakan suatu kecenderungan di mana pada temperatur tetap,

peningkatan bilangan Sherwood yang disebabkan oleh peningkatan kecepatan alir udara akan meningkatkan nilai koefisien perpindahan massa.

Untuk pengaruh temperatur, semakin tinggi temperatur yang digunakan maka akan semakin besar pula nilai K_G yang diperoleh. Kecenderungan ini dapat dibuktikan dengan memodifikasi persamaan (3) sebagai berikut:

$$K_G = \frac{A}{m} \cdot \frac{RT_E}{P_A M_A} \quad (13)$$

Dari persamaan di atas, dapat diamati bahwa variabel temperatur dan nilai K_G memiliki hubungan yang saling berbanding lurus.

Tidak hanya itu, pengaruh temperatur terhadap nilai koefisien perpindahan massa padat dan gas juga dapat dianalisis melalui pendekatan tidak langsung dengan menggunakan persamaan Wilke-Lee (Treybal, 1980):

$$D_{AB} = \frac{0,0001 \left[\left(1,084 - 0,249 \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_E}} \right)^{3/2} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_E}} \right]}{P_A (r_{AB})^2 + (kT/\epsilon_{AB})} \quad (14)$$

Dari persamaan di atas, dapat dinyatakan bahwa peningkatan temperatur akan meningkatkan nilai difusivitas (D_{AB}) karena kedua parameter tersebut saling berbanding lurus. Secara fisik, peningkatan nilai difusivitas akan mengakibatkan proses perpindahan massa antara bola naftalena dengan udara berjalan dengan frekuensi yang lebih intens yang pada akhirnya akan meningkatkan nilai koefisien perpindahan massa bola naftalena-udara secara signifikan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil simpulan sebagai berikut:

1. Nilai koefisien perpindahan massa padat dan gas (bola naftalena-udara) memiliki hubungan yang berbanding lurus terhadap perubahan temperatur sistem dan kecepatan alir udara di mana peningkatan kedua variabel tersebut akan berimplikasi kepada peningkatan nilai koefisien perpindahan massa bola naftalena-udara
2. Modifikasi unit eksperimen serta metode penelitian dapat digunakan sebagai dasar untuk penerbitan modul praktikum yang dapat digunakan untuk kepentingan pembelajaran mengenai prinsip perpindahan massa padat dan gas.

5. ACKNOWLEDGMENT/UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Hilman Daniswara, S.Si. selaku laboran Laboratorium Teknik Kimia Universitas Surya. Kepada Cindy, Pauline, dan Betsy yang telah mengerjakan rancangan alat awal untuk keperluan eksperimen ini. Kepada Program Studi Teknik Fisika Universitas Surya yang telah menyumbangkan kolom akrilik dan *blower* untuk keperluan penelitian ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. 2015. Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications 5th Edition. McGraw-Hill, New York.
- Goldstein, R. J., & Cho, H. H. 1995. A Review of Mass Transfer Measurements Using Naphthalene Sublimation. *Experimental Thermal and Fluid Science* 10(4): 416-434.
- Merck. 2018. Naphthalene. www.sigmaaldrich.com.
- Rodriguez, J. M., Henriquez, V., & Macias-Machin, A. 1998. A Simple Experiment for Mass Transfer. *Chemical Engineering Education*: 142-145.
- Treybal, R. E. 1980. Mass-Transfer Operations 3rd Edition. McGraw-Hill, New York.
- Utgikar, V. P. 2015. Facilitating Active Learning of Concepts in Transport Phenomena: Experiment with a Subliming Solid. *Chemical Engineering Education* 49(4): 215-220.

7. NOMENKLATUR

- A : Luas Permukaan (m^2)
- ρ_s : Densitas Naftalena (kg/m^3)
- C_s : Konsentrasi pada Permukaan (kg/m^3)
- C_g : Konsentrasi pada Udara (kg/m^3)
- \dot{m} : Laju Sublimasi ($kg/detik$)
- K_G : Koefisien Perpindahan Massa (m/s)
- P : Tekanan Kolom (N/m^2)
- P_s : Tekanan Uap Jenuh Naftalena (N/m^2)
- W_0 : Massa Sampel Awal (kg)
- W : Massa Sampel Setiap Saat (kg)
- R : Konstanta Gas ($8,314 J/mol.K$)
- T_s : Temperatur Permukaan (K)
- T : Temperatur Absolut (K)
- t : Waktu (menit)
- D_{AB} : Difusivitas (m^2/s)
- M_s : Berat Molekul Naftalena (kg/mol)
- M_A, M_B : Berat Molekul A dan B ($kg/kmol$)
- r_{AB} : *Molecular Separation at Collision* (nm)
- ϵ_{AB} : Energi Gaya Tarik Molekul
- k : Konstanta Boltzmann's