

KARAKTERISTIK KOEFISIEN PERPINDAHAN PANAS KONVEKSI PAKSA PADA PEMODELAN BIJI KAKAO DENGAN *NAPHTHALENE* MENGGUNAKAN ANALOGI PERPINDAHAN PANAS DAN MASSA

Muhammad Irsyad

Jurusan Teknik Mesin
Universitas Lampung
Irsyad71@unila.ac.id

ABSTRAK

Dalam proses pengeringan laju perpindahan kalor tergantung pada nilai koefisien perpindahan kalor konveksi pada permukaan benda. Bentuk-bentuk khusus pada biji-bijian belum terwakili oleh nilai koefisien perpindahan panas konveksi untuk bentuk standar, seperti kubus, bola dan silinder. Penggunaan metode analogi perpindahan panas dan massa dengan menggunakan *naphthalene* merupakan salah satu cara yang akurat dalam penentuan koefisien perpindahan panas konveksi. Penentuan koefisien perpindahan panas pada biji kakao sangat cocok dengan pemodelan biji kakao dengan *naphthalene*. Pengujian dilakukan pada wind tunnel, dimana benda uji memiliki panjang mayor 22 mm, minor 13 mm, menggunakan alas berlubang, tanpa lubang serta variasi posisi peletakan benda (lurus dan zig zag) pada kecepatan aliran udara 0, 2, 4, dan 6 m/s. Penggunaan lubang pada plat alas benda uji mampu meningkatkan koefisien perpindahan panas konveksi dengan persamaan bilangan Nusseltnya adalah $Nu = 4,297 Re^{0,625}$ untuk posisi sejajar dan $Nu = 1,809 Re^{0,736}$ untuk posisi zig-zag.

Kata kunci: kakao, *naphthalene*, koefisien perpindahan panas konveksi

ABSTRACT

Heat transfer of drying process depends to the convection heat transfer coefficient on the surface of the object. Specific forms of the grains have not been represented by the convection heat transfer coefficient for the standard form, such as cubes, spheres and cylinders. The use of methods analogous heat and mass transfer by using naphthalene is one way of determining accurately the convection heat transfer coefficient. Determination of heat transfer coefficient in cocoa beans is perfect with the modeling of cocoa beans with naphthalene Tests performed on the wind tunnel, where the specimen has a length of 22 mm major and minor 13 mm. base test specimen use perforated plate, and plate without a hole. variations in the position of the test object is straight and zig zag. air flow rate used was 0, 2, 4, and 6 m/s. The use of holes in base plate specimens can improve the convection heat transfer coefficient with the equation Nusselt number is $Nu = 4.297 Re^{0.625}$ for the parallel position and $Nu = 1.809 Re^{0.736}$ for zig-zag position.

Keywords: cocoa, *naphthalene*, convection heat transfer coefficient

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan produsen kakao terbesar kedua di dunia setelah Pantai Gading dengan produksi 809.583 ton pertahun[1]. Sebagian besar (93,99%) areal pertanaman kakao ini merupakan perkebunan rakyat dengan jumlah petani yang terlibat secara langsung sekitar 1.475.353 KK [1]. Produksi biji kakao memiliki ukuran yang beragam yakni besar, sedang, dan kecil. Distribusi ukuran dan bentuk biji kakao, berdasarkan dimensi mayor (panjang) adalah, sekitar 79 % dari biji kakao berukuran sedang (antara 20 – 25 mm), 12 % berukuran kecil (<20 mm) dan 9% berukuran besar (>25 mm). Ukuran rata-rata untuk dimensi *major*, *intermediate* dan *minor* berturut-turut adalah $22,38 \pm 1,92$ mm, $13,18 \pm 1,24$ mm dan $7,14 \pm 1,21$ mm [2].

Pengeringan merupakan salah satu proses pasca panen yang dilakukan untuk menjaga kualitas produk dalam jangka waktu lama. Standar kadar air pada biji kakao kering berdasarkan SNI adalah 7,5% [3]. Apabila kandungan air pada produk masih tinggi, aktivitas mikroorganisme akan terus berkembang, sehingga menurunkan kualitas produk. Oleh karenanya penanganan lebih lanjut terhadap produk hasil pertanian tersebut mutlak diperlukan. Sistem pengeringan buatan telah banyak dikembangkan untuk berbagai keperluan pengeringan, termasuk proses pengeringan hasil pertanian dalam bentuk biji-bijian. Pada sistem pengeringan secara konveksi paksa, kandungan air pada produk akan menguap setelah panas yang dibawa oleh udara kering diserap oleh produk. Laju penyerapan panas oleh produk tergantung pada nilai koefisien perpindahan panas konveksi pada permukaan benda. Melihat bentuk biji kakao tidak termasuk bentuk standar seperti bola, kubus, silinder, maka dalam perhitungan luas permukaan akan mengalami kesulitan. Bentuk eksperimen untuk menentukan koefisien perpindahan panas untuk benda dengan bentuk tidak standar dapat dilakukan dengan analogi perpindahan kalor dan massa.

Beberapa penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti terdahulu untuk memperoleh koefisien perpindahan panas yaitu dengan menentukan koefisien perpindahan massa. Analogi perpindahan kalor dan massa telah dibuktikan dapat digunakan untuk menentukan koefisien perpindahan panas berbagai bentuk benda. Penyimpangan dari nilai Nu penelitian terhadap Nu persamaan adalah 2,34 – 13,51 %, dengan hasil ini (bentuk tidak beraturan) maka metoda analogi perpindahan massa secara umum dapat digunakan untuk penelitian perpindahan panas konveksi dengan udara. [4]. Penelitian pada piringan berputar memperlihatkan bahwa peningkatan kecepatan dapat meningkatkan bilangan Nusselt. Hal ini disebabkan karena peningkatan kecepatan aliran udara maka massa udara yang melewati permukaan benda uji menjadi lebih besar, sehingga massa benda uji yang diambil oleh udara semakin banyak. Hal ini menyebabkan kenaikan koefisien perpindahan massa dan koefisien perpindahan kalor [5].

Dalam perancangan sistem pengering biji kakao perlu untuk mengetahui koefisien perpindahan panas konveksi pada permukaan biji kakao. Penelitian ini diharapkan dapat menentukan koefisien perpindahan panas konveksi dalam bentuk persamaan bilangan Nusselt dan melihat pengaruh penggunaan model alas berlubang dan tanpa lubang serta posisi penempatan lurus dan zig-zag.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Naphthalene merupakan rangkaian hidrokarbon jenis aromatik dengan struktur kimia berbentuk cincin benzena yang bersekutu dalam satu ikatan atau dua orto lingkaran atom C dan 4 atom H sehingga rumus kimianya menjadi $C_{10}H_8$. Secara fisik, *naphthalene* merupakan zat yang berbentuk keping kristal, mudah menyublim dan tidak berwarna. *Naphthalene* mencair pada temperatur $80,2^{\circ}C$. Umumnya *naphthalene* berasal dari minyak bumi atau batubara [6]. Keuntungan lain penggunaan *Naphthalene* (kapur barus) adalah kadar racunnya rendah, mudah dibentuk dengan cara pengecoran melalui pemanasan langsung, tekanan uap pada temperatur ruang yang rendah, dan temperatur peleburan kira-kira $80,5^{\circ}C$ ($176,5^{\circ}F$). Kelemahan yang membatasi penggunaan *naphthalene* adalah benda uji dari *naphthalene* hanya dapat diuji didalam aliran udara dan tidak dapat diuji di dalam cairan, sehingga membatasi kisaran penelitian. Apabila suatu persamaan disusun hanya berdasarkan data pengukuran satu macam fluida maka pengaruh angka Prandtl tidak dapat ditunjukkan.

Parameter yang digunakan dalam korelasi perpindahan kalor konveksi dan perpindahan massa konveksi adalah bilangan Reynolds, bilangan Nusselt, bilangan Prandtl, bilangan Stanton untuk perpindahan kalor dan bilangan Stanton untuk perpindahan massa

Bilangan Reynold merupakan bilangan tak berdimensi yang didefinisikan sebagai perbandingan antara gaya inersia terhadap gaya *viscous* dalam sistem aliran fluida. Bilangan Reynold digunakan untuk menggambarkan karakteristik aliran fluida, apakah bersifat laminar atau turbulen. Secara matematis dapat dirumuskan:

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (1)$$

Bilangan Nusselt didefinisikan sebagai perbandingan antara gradien temperatur permukaan (dT/dy) terhadap gradien temperatur konveksi ($T-T_w$). Bilangan Nusselt menggambarkan karakteristik proses perpindahan kalor. Secara matematis dapat dirumuskan:

$$\text{Nu} = -D \frac{\left(\frac{dT}{dy}\right)}{(T - T_w)} = \frac{hD}{k} \quad (2)$$

Bilangan Prandtl merupakan bilangan tak berdimensi yang didefinisikan sebagai perbandingan antara viskositas kinematik fluida terhadap difusivitas *thermal* fluida. Bilangan Prandtl berguna untuk mengetahui keefektifan dari perpindahan momentum dan energi oleh difusi pada lapis batas. Secara matematis bilangan Prandtl dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{c_p \mu}{k} \quad (3)$$

Bilangan Stanton ini didapat dari gabungan bilangan Nusselt, Reynolds, dan Prandtl. Secara matematis dirumuskan sebagai berikut [7]:

$$\text{St}_h = \frac{\text{Nu}}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} = \frac{h}{c_p u \rho} \quad (4)$$

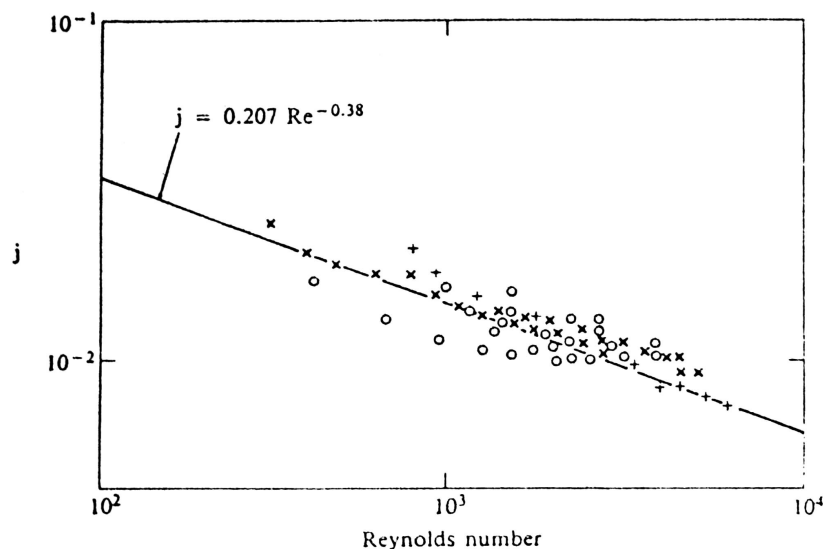
Bilangan Stanton untuk perpindahan massa didefinisikan sebagai perbandingan kecepatan perpindahan massa dengan kecepatan aliran fluida. Bilangan Stanton ini didapat dari gabungan bilangan Sherwood, Reynolds, dan Schmidt. Secara matematis dirumuskan sebagai berikut [7]:

$$\text{St}_m = \frac{\text{Sh}}{\text{Re} \cdot \text{Sc}} = \frac{k_c}{u} \quad (5)$$

Analogi perpindahan kalor dan perpindahan massa untuk memperoleh koefisien perpindahan kalor dapat dilakukan jika kondisi dari penelitian memenuhi beberapa persyaratan similaritas, yaitu [8]:

1. Bentuk geometri yang sama.
2. Nilai bilangan Reynolds yang sama dalam kedua sistem.
3. Difusivitas molekuler dari perpindahan massa dan perpindahan kalor yang sama.
4. Difusivitas turbulen dari perpindahan massa dan perpindahan kalor yang sama.
5. Kondisi batas yang sama dan fluks perpindahan massa dan perpindahan kalor yang sama melalui daerah lairan

Kondisi 1 dan 2 cukup mudah untuk dikontrol dari bentuk pemodelan dan perancangan peralatan. Walaupun hanya dua persyaratan yang dapat dipenuhi, koefisien perpindahan kalor pada alat pembakar dengan menggunakan analogi perpindahan massa, menunjukkan kesesuaian yang cukup baik jika dibandingkan dengan pengukuran secara langsung, seperti terlihat pada gambar 1.



Gambar 1. Perbandingan hasil pengukuran koefisien perpindahan kalor dengan cara sublimasi naphthalene (o), electrochemical (x) dan pengukuran langsung (+) [8].

Data yang diperoleh dari dua teknik perpindahan massa yaitu teknik sublimasi *naphthalene* dan *electrochemical* dibandingkan dengan koefisien perpindahan kalor yang diperoleh dari teknik pengukuran temperatur secara langsung. Dari gambar diatas terlihat perbedaan antara ketiganya masih dalam batas ketelitian yang dapat diterima dan memperlihatkan kondisi yang sama [8].

Metode analogi antara perpindahan massa dan perpindahan kalor untuk konveksi paksa didasarkan pada teori Chilton-Colburn, dimana persamaan umum untuk analogi ini adalah [9]:

$$St_h \cdot Pr^{2/3} = St_m \cdot Sc^{2/3} \quad (6)$$

$$St_h \cdot Pr^{2/3} = \left(\frac{h}{\rho \cdot u \cdot c_p} \right) \cdot Pr^{2/3} = j \quad (7)$$

$$St_m \cdot Sc^{2/3} = \left(\frac{k_c}{u} \right) \cdot Sc^{2/3} = j_D \quad (8)$$

Dari dua persamaan di atas untuk faktor j dengan asumsi bilangan Reynolds yang sama untuk kedua sistem maka:

$$h = k_c \cdot c_p \cdot \rho \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{2/3} \quad (9)$$

Persamaan 9 memperlihatkan hubungan antara perpindahan kalor konveksi dan perpindahan massa konveksi. Ini memungkinkan kita untuk menghitung salah satu koefisien perpindahan yang tidak diketahui dengan menggunakan informasi yang diperoleh dari fenomena perpindahan yang lain. Hal ini berlaku untuk gas dan cairan dengan bilangan Reynolds yang sama, kondisi aliran yang sama, $0,6 < Sc < 2500$ dan $0,6 < Pr < 2500$ [9].

Koefisien perpindahan massa konveksi dari suatu permukaan dapat dihitung dari persamaan:

$$k_c = \frac{\dot{m}}{A \cdot \Delta C} \quad (10)$$

Bilangan Schmidt didapat menggunakan persamaan [10]:

$$Sc = 7 T_\infty^{-0,185} \quad (11)$$

Selisih konsentrasi *naphthalene* pada permukaan benda uji dan dalam aliran udara dapat dihitung mengikuti persamaan gas ideal dan hubungan tekanan uap *naphthalene* yaitu [9]:

$$\Delta C = \frac{\Delta p}{R \cdot T_\infty} \quad (12)$$

Sehingga koefisien perpindahan massa k_c adalah:

$$k_c = \frac{\dot{m} \cdot R \cdot T}{\Delta p \cdot A} \quad (13)$$

Pada penelitian ini, udara melalui seksi uji tanpa aliran balik atau bersirkulasi, sehingga tekanan uap *naphthalene* di dalam aliran udara (p_∞) sama dengan nol. Dengan demikian, k_c dapat dihitung langsung dari tekanan uap jenuh *naphthalene* di permukaan benda uji.

Tekanan uap jenuh *naphthalene* di permukaan benda uji dihitung berdasarkan temperatur permukaan *naphthalene*, yang bisa dianggap sama dengan temperatur aliran udara dengan suatu persamaan [11]:

$$\log p_s = 11,55 - \left(\frac{3765}{T_\infty} \right) \dots\dots\dots (14)$$

Setelah didapat koefisien perpindahan kalor konveksi, maka didapat nilai bilangan Nusselt, yaitu [12]:

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (15)$$

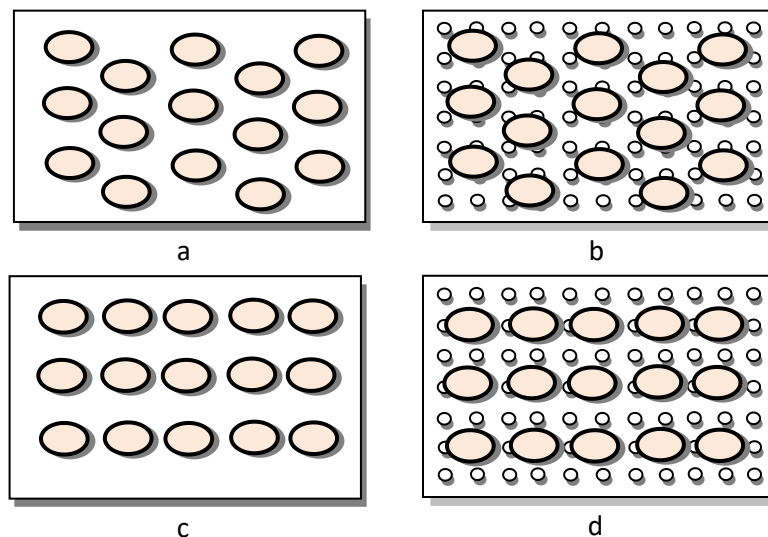
3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan kaji eksperimental dengan menggunakan *Wind tunnel* sebagai peralatan utama. Section uji berukuran 40 x 40 cm untuk penampang dan panjang 750 cm, seperti terlihat pada gambar 2.



Gambar 2. *Wind tunnel*

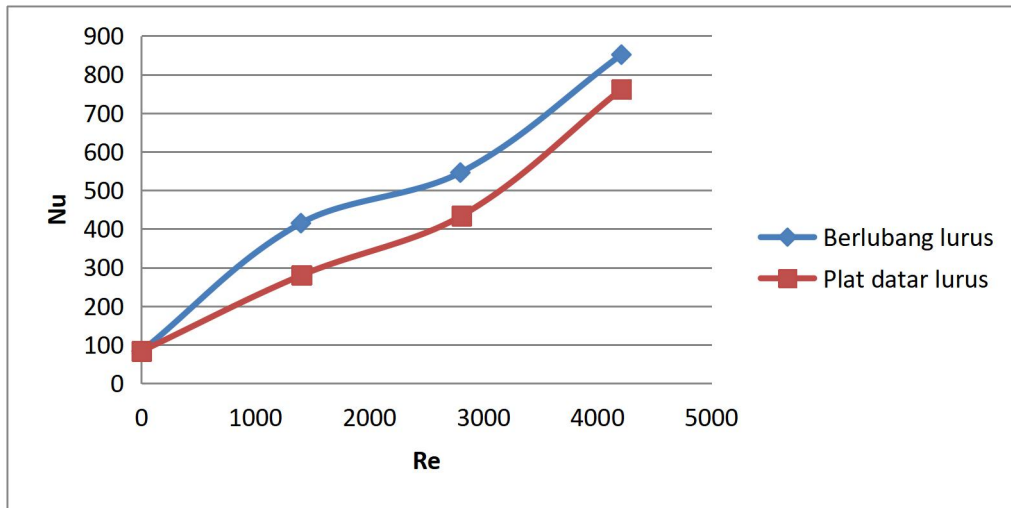
Pada pengujian ini, biji kakao dibuat duplikasinya dari *naphthalene*, dimana dibentuk persis seperti biji kakao berukuran sedang dengan panjang mayor 22 mm, minor 13 mm. *Naphthalene* dilebur kemudian dicetak pada cetakan yang sudah disiapkan. Dalam pengujian ini, divariasikan alas penempatan benda uji, posisi penempatan yakni sejajar dan zig zag serta kecepatan aliran udara yaitu 0 m/s, 2 m/s, 4 m/s, 6 m/s. Jarak antara benda uji adalah 2 cm, seperti pada gambar 3.



Gambar 3. Posisi penempatan benda uji; a. Zig-zag tanpa lubang, b. Zig-zag dengan lubang, c. Lurus tanpa lubang, d. Lurus dengan lubang.

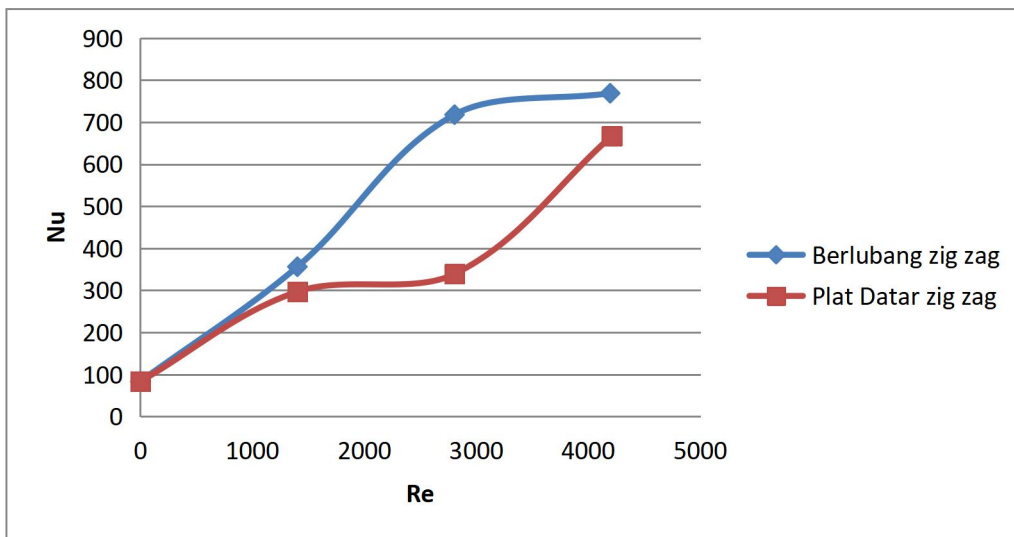
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data hasil pengujian berupa perubahan massa *naphthalene* dalam waktu tertentu, diolah untuk mendapatkan koefisien konveksi pada permukaan benda uji, dan dibuat dalam bentuk bilangan tak berdimensi yakni bilangan Nusselt. Kecepatan aliran udara nyatakan dalam bentuk bilangan tak berdimensi yakni bilangan Reynolds. Bilangan Nusselt yang didapat kemudian diplot kedalam grafik terhadap bilangan Reynolds, variasi posisi peletakkan benda uji, dan penggunaan alas berlubang dan tanpa lubang. Dari grafik diharapkan akan didapatkan hubungan antar beberapa variabel tadi terhadap bilangan Nusselt.



Gambar 4. Hubungan bilangan Reynold-Nusselt pada variasi alas berlubang dengan plat datar.

Pengaruh pemberian lubang pada alas benda uji terhadap bilangan Nusselt, terlihat pada gambar 4 untuk posisi penempatan lurus dan gambar 5 untuk posisi penempatan zig-zag. Pada pengujian dengan variasi kecepatan; 0 m/s, 2 m/s, 4 m/s, dan 6 m/s, pemberian lubang pada plat menaikkan koefisien perpindahan panas konveksi pada benda uji dibandingkan plat tanpa lubang. Ini dibuktikan dengan bilangan Nusselt pada bilangan Reynolds yang sama lebih tinggi pada pengujian dengan alas plat berlubang dibandingkan dengan plat tanpa lubang. Kenaikan kecepatan aliran udara juga menaikkan nilai bilangan Nusselt. Dengan adanya lubang pada plat alas, udara dapat mengalir dari bagian bawah benda uji, sehingga permukaan yang dialiri udara semakin besar. Begitu juga dengan bertambahnya kecepatan udara, maka laju aliran massa udara akan bertambah. Sehingga panas yang bisa diserap akan bertambah.

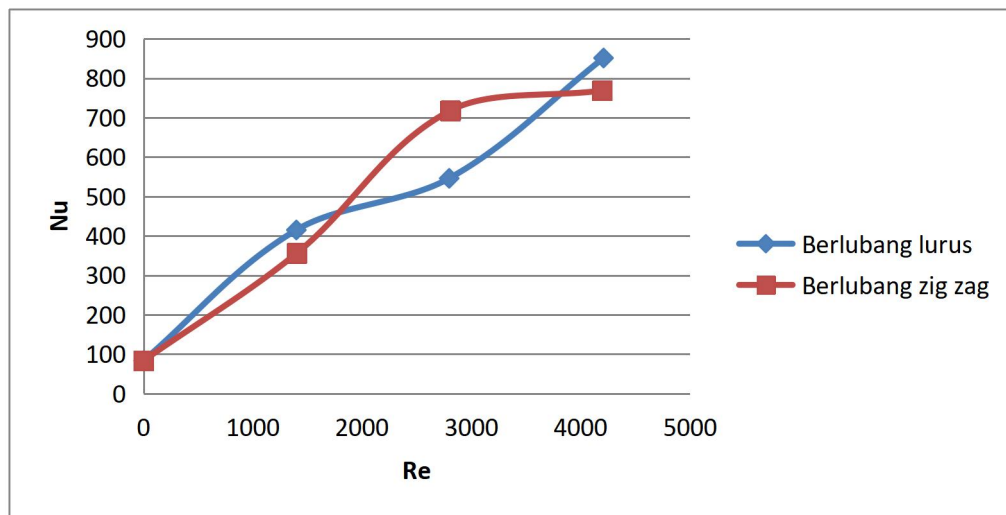


Gambar 5. Hubungan bilangan Reynold-Nusselt pada variasi alas berlubang dengan plat datar.

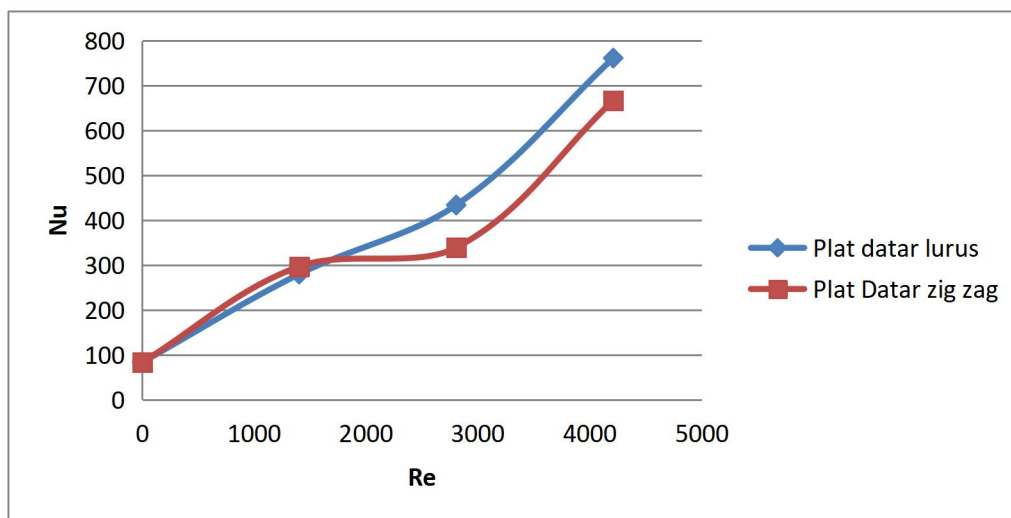
Pada posisi penempatan zig-zag hasil yang didapatkan memiliki kecenderungan yang sama dengan posisi lurus. Alas yang diberi lubang memiliki bilangan Nusselt lebih tinggi dibandingkan alas tanpa lubang untuk setiap perubahan bilangan Reynolds. Peningkatan bilangan Nusselt berarti juga peningkatan pada koefisien perpindahan panas konveksi.

Pengaruh posisi penempatan benda uji terhadap koefisien perpindahan panas konveksi terlihat pada gambar 6 dan gambar 7. Dengan bervariasi kecepatan aliran udara yakni; 0 m/s, 2 m/s, 4 m/s, dan 6 m/s, didapatkan bilangan Nusselt untuk setiap perubahan bilangan Reynolds. Pada gambar 6, posisi penempatan benda uji pada plat berlubang memberikan pengaruh terhadap bilangan Nusselt. Pengaruhnya tidak terlalu signifikan untuk pengujian dengan jarak antar benda uji 2 cm (sebesar benda uji). Penempatan dengan posisi zig-zag sedikit menaikkan bilangan Nusselt. Hasil pengujian dengan penempatan benda uji pada plat tidak berlubang, seperti pada gambar 7, memperlihatkan penempatan

benda uji pada posisi zig-zag tidak memberikan pengaruh pada kenaikan bilangan Nusselt. Dengan adanya celah antar benda uji, dapat memungkinkan udara yang mengalir mampu melewati sebagian besar permukaan benda uji baik pada posisi sejajar maupun zig-zag.



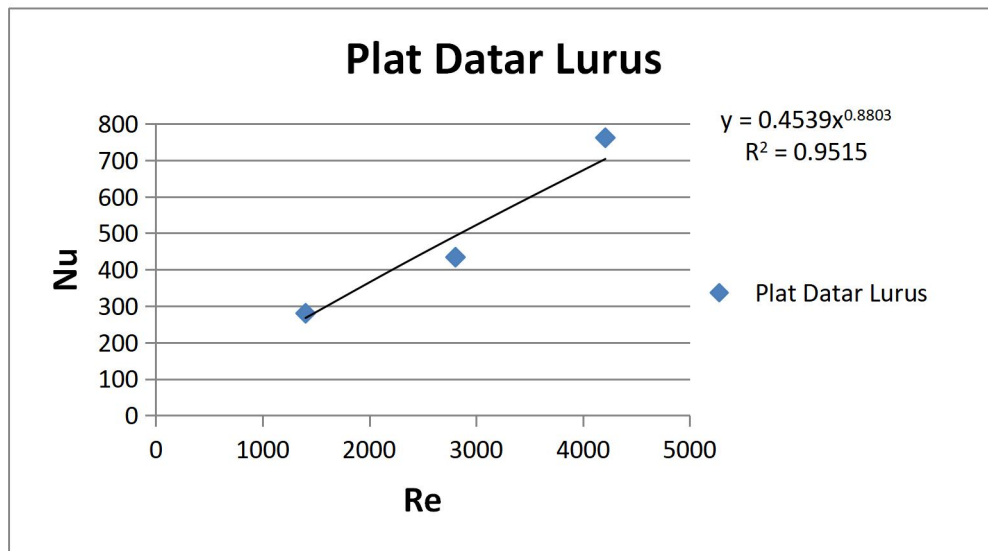
Gambar 6. Hubungan bilangan Reynold-Nusselt pada alas berlubang dengan posisi lurus dan zig zag.



Gambar 7. Hubungan bilangan Reynold-Nusselt pada alas plat datar dengan posisi lurus dan zig zag.

Penempatan benda uji zig-zag, diharapkan dapat memperbesar bidang sentuh aliran udara. Pada susunan heat sink dengan slot zig-zag (selang-seling) menghasilkan perpindahan panas yang lebih besar daripada slot segaris [13]. Faktor turbulensi aliran dan luas permukaan kontak dengan udara merupakan faktor yang menyebabkan posisi zig-zag menghasilkan perpindahan panas yang lebih besar daripada slot segaris. Namun pada pengujian ini kondisi ini tidak terlalu terlihat, bahkan pada penggunaan plat tanpa lubang penempatan zig-zag memperlihatkan nilai bilangan Nusselt sedikit lebih rendah dari posisi lurus. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh posisi penempatan benda uji belum terlalu rapat dan baru satu slot.

Grafik bilangan Nusselt dan bilangan Reynolds dibuat dalam bentuk persamaan dengan mengacu pada persamaan yang direkomendasikan oleh Dittus dan Boelter, yaitu $Nu = C Re^m Pr^n$ [14]. Sehubungan fluida yang digunakan hanya udara maka hasil yang diperoleh hanya berlaku untuk udara, dan pengaruh Pr dapat diabaikan atau tidak dimasukkan sebagai variabel dalam persamaan karena pengaruh suhu terhadap Pr sangat kecil. Sehingga dari persamaan disusun hubungan $Nu = A Re^B$. Persamaan diatas dibuat dalam bentuk logaritmanya yakni; $\text{Log}Nu = \text{Log}A + B\text{Log}Re$. Gambar 8 memperlihatkan persamaan bilangan Nusselt untuk plat datar dan penempatan lurus/sejajar yakni $Nu = 0,453 Re^{0,880}$.



Gambar 8. Hubungan Nu-Re pada alas plat datar lurus.

Dengan cara yang sama untuk variasi alas dan posisi penempatan persamaan bilangan Nusselt yang dihasilkan adalah sebagai berikut;

berlubang lurus, $Nu = 4,297 Re^{0,625}$, $R^2 = 0,921$.

berlubang zig zag, $Nu = 1,809 Re^{0,736}$, $R^2 = 0,917$.

Plat datar zig zag, $Nu = 1,999 Re^{0,677}$, $R^2 = 0,753$.

Plat datar lurus, $Nu = 0,453 Re^{0,880}$, $R^2 = 0,951$.

5. SIMPULAN

Penggunaan lubang pada plat alas benda uji mampu meningkatkan koefisien perpindahan panas konveksi dengan persamaan bilangan Nusseltnya $Nu = 4,297 Re^{0,625}$ untuk posisi sejajar dan $Nu = 1,809 Re^{0,736}$ untuk posisi zig-zag. Posisi penempatan benda uji zig-zag tidak memberikan pengaruh yang berarti dalam kenaikan koefisien perpindahan panas konveksi

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Direktorat Jenderal Perkebunan Kementerian Pertanian, 2012, *Pedoman Teknis Unit Fermentasi Biji Kakao (UFBK)*, <http://www.deptan.go.id/pedum2012/DITJEN%20PERKEBUNAN/2.2.%20pedoman-UFBK.pdf>
- [2] Sandra, dkk. 2009, *Rancang Bangun Alat Pengering Tipe Konveyor Otomatis Untuk Peningkatan Mutu Biji Kakao Hasil Pengeringan*. Hibah Strategis Nasional Universitas Andalas.
- [3] Badan Perijinan dan Penanaman Modal Daerah Kalimantan Timu, 2009, *Prospek Menggiurkan Investasi Budidaya Kakao*, <http://regionalinvestment.bkpm.go.id/newsipid/userfiles/daerah/6402/attachment/Kakao.pdf>
- [4] Susana, I.G.B., Purnomo, 2001, *Prediksi Koefisien Perpindahan Panas Dengan Analogi Perpindahan Panas-Massa Untuk Berbagai Bentuk Benda*. Teknosains, Vol.XIV, No.3.
- [5] Salahudin, Xander. 2008. *Studi Eksperimental Perpindahan Kalor Konveksi Pada Piringan Yang Berputar Menggunakan Analogi Perpindahan Kalor dan Massa*. Skripsi Universitas Lampung.
- [6] Tirtoatmodjo, R. 2001, *Pengaruh Naphthalene Terhadap Perubahan Angka Oktan Bensin, Unjuk Kerja Motor dan Gas Buangnya*. Jurnal Teknik Mesin Vol.2, No.2, hal. 97 – 101.
- [7] Basmdjian, Diran. 2005. *Mass Transfer Principles and Applications*. CRC Press. Washington, D.C.

- [8] Rhine, J.M., dan Tucker, R.J. 1991. *Modelling of Gas Fired Furnaced and Boilers*. McGraw Hill. London.
- [9] Welty, James R, dkk. 2004. *Dasar-dasar Fenomena Transport*. Erlangga. Jakarta.
- [10] Sherwood, T.K., dan Trass, O. 1960. *Sublimation Mass Transfer Through Compressible Layers On A Flat Plate*. Journal Heat Transfer, 81, pp. 313 – 325.
- [11] Sherwood, T.K., dan Bryant, H.S. 1957. *Mass Transfer Through Compressible Turbulent Boundary Layers*. Canada Journal Chemical Engineering, 35, pp 51 – 57.
- [12] Incropera, Frank P, dkk. 2002. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons, Inc. USA.
- [13] Holman, J.P. 1997. *Perpindahan Kalor*. Erlangga. Jakarta.

DAFTAR SIMBOL

- A = luas permukaan benda uji (m^2)
- c_p = kalor spesifik ($J/kg\ K$)
- D = diameter benda (m)
- h = koefisien perpindahan kalor konveksi (W/m^2K)
- k = konduktivitas *thermal* fluida ($W/m\ K$)
- k_c = koefisien perpindahan massa konveksi (m/s)
- \dot{m} = rata-rata pengurangan massa *naphthalene* per satuan waktu (kg/s)
- Pr = bilangan Prandtl
- p_s = tekanan uap *naphthalene* di permukaan benda uji pada temperatur ruang (N/m^2)
- p_∞ = tekanan uap *naphthalene* di dalam aliran udara (N/m^2)
- R = konstanta gas *naphthalene* ($J/kg.K$)
- St_h = bilangan Stanton untuk perpindahan kalor
- St_m = bilangan Stanton untuk perpindahan massa
- Sc = bilangan Schmidt
- T_∞ = temperatur aliran udara (K)
- u = kecepatan fluida (m/s)
- α = difusivitas *thermal* fluida (m^2/s)
- ΔC = selisih konsentrasi *naphthalene* pada permukaan benda uji dan dalam aliran udara (kg/m^3)
- ρ = densitas fluida (kg/m^3)
- μ = viskositas absolut fluida dinamis (Ns/m^2)
- ν = viskositas kinematik (m^2/s)