

Penguapan Film Air (*Falling Film*) dalam Silinder Vertikal

Engkos Achmad Kosasih

Laboratorium Heat Transfer, Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia
Kampus Baru UI Depok 16424
E-mail : kosri@eng.ui.ac.id

Abstrak

Penelitian tentang penguapan aliran lapisan tipis cairan (*falling film evaporation*) sangat penting khususnya dalam industri kertas. Selain itu laju perpindahan massa sering dihitung dengan menggunakan analogi perpindahan panas dan perpindahan massa. Penelitian ini membahas hasil eksperimen penguapan aliran film air dalam silinder yang melawan aliran udara panas dan membandingkannya dengan model analogi. Bilangan Reynold divariasikan dari 29000 sampai 40000. Bilangan Sherwood data eksperimen lebih kecil ($\pm 10\%$) dari bilangan Sherwood model analogi yang menggunakan persamaan perpindahan panas aliran berkembang penuh dalam silinder $Sh = 0,023.Re^{0,8} Sc^{0,4}$. Adapun hubungan yang didapat dari data eksperimen (bilangan Schmidt dianggap konstan yaitu 0,7) adalah $Sh = 0,0012.Re^{1,06} Sc^{0,4}$

Kata Kunci : *evaporation, heat and mass transfer analogy, drying.*

1. Pendahuluan

Indonesia kaya dengan hasil pertanian, perikanan, dan peternakan. Namun sebagian besar dari hasil tersebut tidak mempunyai nilai ekonomis tinggi karena mudah sekali membusuk maka harus diolah terlebih dahulu agar bisa dikonsumsi, mempunyai nilai ekonomis tinggi, dan tahan lama. Beberapa diantaranya harus diolah dengan cara khusus salah satu caranya adalah dengan pengeringan, misalnya dengan menggunakan pengering semprot terutama untuk bahan-bahan yang berupa sistem dispersi (larutan, suspensi, *slurry*, dan pasta) dan sensitif terhadap suhu tinggi. Pemodelan yang digunakan untuk menghitung ataupun mensimulasikan laju penguapan tetesan pada pengering semprot ini biasanya model analogi perpindahan massa dengan perpindahan panas. Persyaratan analogi diantaranya adalah bilangan Lewis Le bernilai satu, yang menjamin keserupaan profil suhu dan profil konsentrasi. Persyaratan ini sangat mungkin tidak cukup dipenuhi mengingat bilangan Lewis (uap air di udara pada temperature 300 – 700 K) sekitar 0,88 s/d 0,89. Terdapat juga enam persyaratan lain (Bird: 681, 2003) yang diantaranya adalah sifat-sifat tidak bervariasi dan laju perpindahan massa yang kecil. Arun S. Mujumdar (2003) mengatakan bahwa laju perpindahan panas dan perpindahan massa suatu tetesan yang bergerak didalam pengering semprot adalah tinggi. Jadi model analogi menjadi kurang tepat untuk digunakan. Penelitian Chen (2002) menunjukkan bahwa koefisien perpindahan panas dan massa menyimpang dari hasil perhitungan konvensional (analogi), demikian juga hasil yang ditunjukkan oleh penelitian E. A. Kosasih (2004). Dengan demikian maka dibutuhkan penelitian untuk memeriksa seberapa jauh penyimpangan model analogi ini. Mengingat pengukuran proses penguapan tetesan kecil relatif lebih sulit (terlalu mikroskopik), maka penelitian ini akan melakukan konfirmasi model analogi dengan menggunakan film air (*falling film*) di dalam silinder. Penelitian penguapan *falling-film* ini berguna juga bagi industri kertas seperti yang dilakukan oleh chen dan Gao (2004) yaitu penelitian laju penguapan lapisan *black liquor* (*falling-film*) dalam silinder.

2. Persamaan Model

Bilangan Sherwood dan Bilangan Nusselt Rumus Empiris

Dengan model analogi, bilangan Sherwood dapat dihitung dengan menggunakan rumus bilangan Nusselt, yaitu sebagai berikut:

- a. Aliran tidak berkembang penuh (*non-fully developed turbulent flow*)

$$Nu = 0.036 Re_d^{0.8} Pr^{1/3} \left(\frac{d}{L} \right)^{0.055} \quad \text{untuk} \quad 10 < \frac{L}{d} < 400 \quad (1)$$

sehingga

$$Sh = 0.036 Re_d^{0.8} Sc^{0.33} \left(\frac{d}{L} \right)^{0.055} \quad \text{untuk} \quad 10 < \frac{L}{d} < 400 \quad (2)$$

- b. Aliran berkembang penuh (*fully developed turbulent flow*)

$$Nu_d = 0.023 Re_d^{0.8} Pr^n \quad (3)$$

maka

$$Sh = 0.023 Re_d^{0.8} Sc^n \quad (4)$$

dengan:

- Nu : bilangan Nusselt
- Pr : bilangan Prandtl
- Re : bilangan Reynold
- Sh : bilangan Sherwood
- Sc : bilangan Schmit
- n : 0.4 untuk perpindahan dari dinding ke aliran udara
- : 0.3 untuk perpindahan dari aliran udara ke dinding

Bilangan Sherwood dan Bilangan Nusselt Data Pengujian

Bilangan Sherwood dan bilangan Nusselt data pengujian dihitung dengan menggunakan beberapa persamaan berikut:

$$Sh = \frac{k_c d}{D} \quad (5)$$

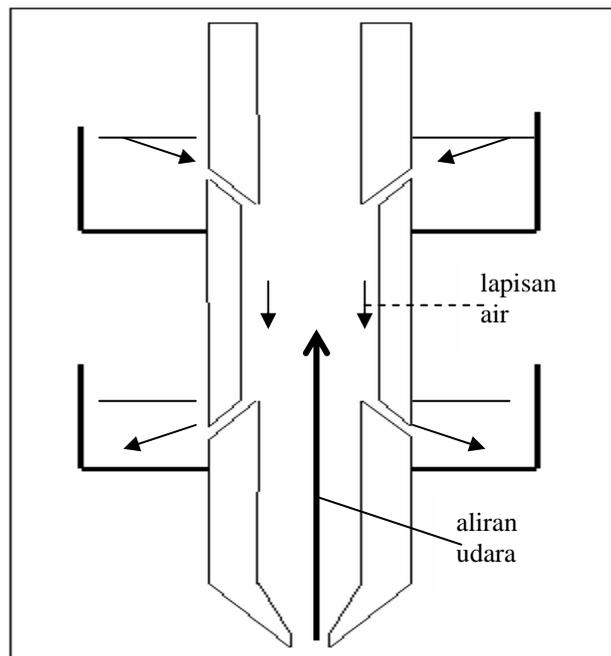
dan

$$Nu = \frac{hd}{k} \quad (6)$$

dengan: k_c : koefisien perpindahan massa [m/s]
 d : diameter dalam silinder [m]
 D : difusivitas massa uap air dalam udara [m^2/s]
 h : koefisien perpindahan panas [$W/(m^2 K)$]
 k : konduktivitas panas udara [$W/(mK)$]

Nilai k_c didapat dari selisih kelembaban permukaan air serta dari laju penguapan. Sedangkan laju penguapan ini dihitung dari data laju aliran udara dan perubahan kelembaban udara. Nilai h dihitung dari kalor yang dilepas oleh aliran udara dan selisih temperatur permukaan air dan temperatur aliran bebas.

3. Deskripsi Alat



Gambar 1. Sketsa Alat Penguapan Lapisan Air

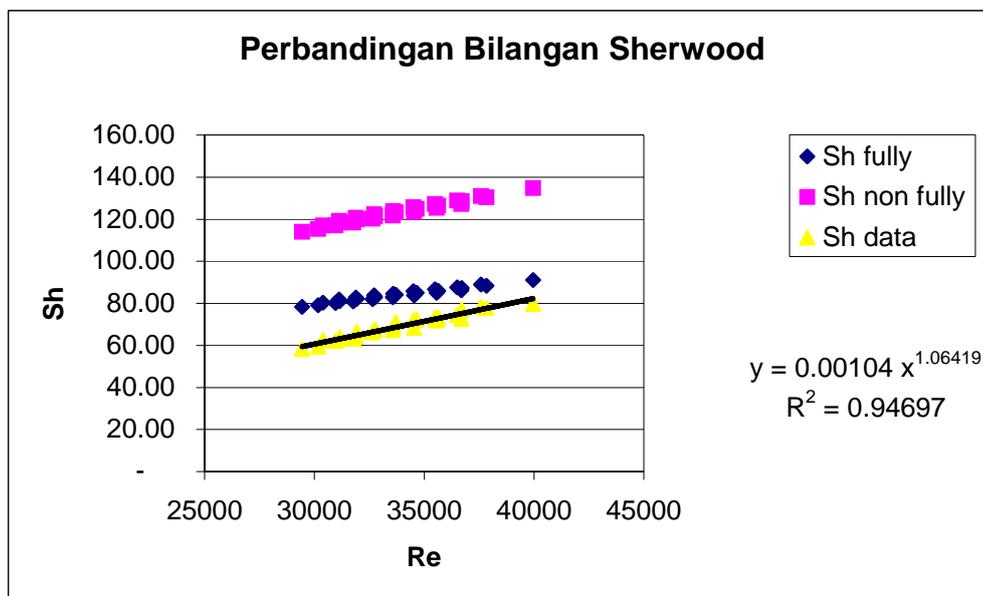
Cara kerja alat ini adalah air dialirkan menggunakan pompa ke bak penampung atas. Air dari bak ini kemudian mengalir melalui celah atas ke dalam silinder dan membentuk lapisan air yang mengalir jatuh dan akhirnya keluar dari silinder melalui celah bawah ke bak penampung bawah. Aliran air ini harus diatur sedemikian hingga tidak terjadi cipratan pada saat air memasuki tabung dengan cara mengatur katup supply.

4. Analisa

a. Bilangan Sherwood (Perpindahan massa)

Gambar-2 menunjukkan bahwa kecenderungan nilai bilangan Sherwood hasil percobaan menyerupai kecenderungan bilangan Sherwood rumus empiris baik yang berkembang penuh maupun yang tidak berkembang penuh. Namun nilai bilangan Sherwood hasil percobaan ini tidak berada dalam kisaran kedua nilai Sherwood tersebut yaitu jauh lebih kecil dari yang tidak berkembang penuh dan lebih kecil sekitar 10 % dari yang berkembang penuh. Hal ini berimplikasi bahwa model analogi kurang tepat untuk diterapkan. Model empiris data pengujian yang didapat adalah (bilangan $Sc \approx 0,7$):

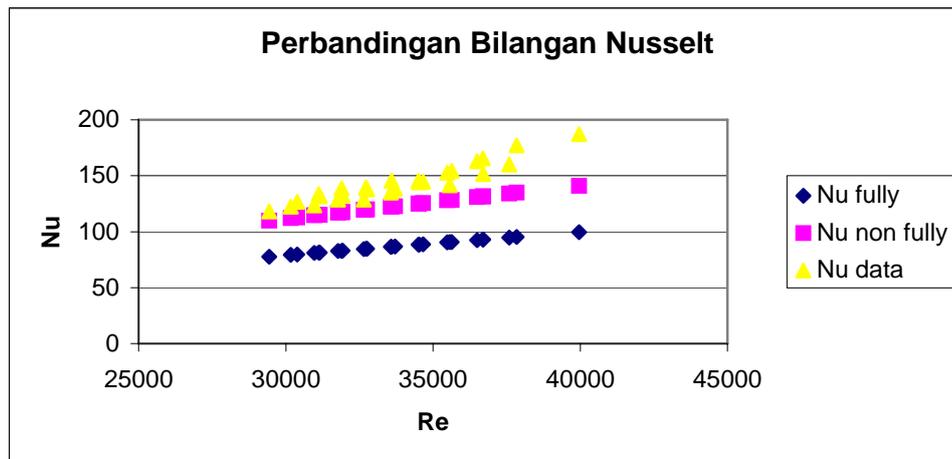
$$Sh = 0,0012 \cdot Re^{1,06} Sc^{0,4} \quad (7)$$



Gambar 1. Perbandingan Sh antara rumus berkembang penuh, rumus tidak berkembang penuh Sh data percobaan

b. Bilangan Nusselt (Perpindahan kalor)

Gambar 3 menunjukkan bahwa kecenderungan nilai bilangan Nusselt hasil percobaan juga menyerupai kecenderungan bilangan Nusselt rumus empiris baik yang berkembang penuh maupun yang tidak berkembang penuh. Pada saat bilangan Reynolds rendah nilai bilangan Nusselt hasil percobaan mendekati nilai Nusselt yang tidak berkembang penuh setelah itu semakin menjauh dari kisaran nilai tersebut. Berbeda dari bilangan Sh yang lebih dekat kepada yang berkembang penuh, bilangan Nu ini lebih dekat kepada nilai Nu yang tidak berkembang penuh dan nilainya lebih besar. Ini juga berarti bahwa model perpindahan panas tanpa perpindahan massa kurang tepat digunakan dalam perpindahan panas yang melibatkan perpindahan massa.



Gambar 3. Perbandingan Nu antara rumus berkembang penuh, rumus tidak berkembang penuh dan Nu data percobaan

5. Kesimpulan

- Model analogi perpindahan massa dan perpindahan panas kurang tepat untuk diterapkan.
- Model empiris data pengujian yang didapat adalah (bilangan $Sc \approx 0,7$):

$$Sh = 0,0012 \cdot Re^{1,06} Sc^{0,4}$$

- Model perpindahan panas tanpa perpindahan massa kurang tepat digunakan dalam perpindahan panas yang melibatkan perpindahan massa.

Daftar Pustaka

- [1] Chen, X. D., Sean, X.Q., Lin A, Guohua Chen b, *On The Ratio of Heat to Mass Transfer Coefficient for Water Evaporation and Its Impact Upon Drying Modeling*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 45 (2002) 4369–4372.
- [2] Chen, Fang C., Gao, Zhiming, *An Analysis Of Black Liquor Falling-film Evaporation*, International Journal of Heat and Mass Transfer 47 (2004) 1657–1671.
- [3] Mujumdar, A. S., *Innovation in Thermal Drying Technologies and Future R&D Needs*, The 14th International Symposium on Transport Phenomena, Bali, Indonesia, 2003, pp.
- [4] Chen, X. D., *Heat-Mass Transfer and Structure Formation During Drying of Single Food Droplets*, Journal of Drying Technology, 22(1 & 2) (2004) 179–190.
- [5] Fisenko S.P., Brin, A.A., Petruichik, A.I., *Evaporative Cooling of Water in a Mechanical Draft Cooling tower*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 47 (2004) 165–177.
- [6] Frydman, A., et. al. , *Comparison of Superheated Steam and Air Operated Spray Dryers Using Computational Fluids Dynamics*, Journal of Drying Technology, 16(7) (1998) 1305-1338.
- [7] Fyhr, C., Kemp, I. C., *Comparison of Different Drying Kinetics Models for Single Particles*, Journal of Drying Technology, 16(7) (1997) 1339-1369.

- [8] Islam, Md. Raisul, et. al., *Simplified Models for Coupled Heat and Mass Transfer in Falling-film Absorbers*, International Journal of Heat and Mass Transfer 47 (2004) 395–406.
- [9] Kosasih E.A., *Akibat Penerapan Analogi Perpindahan Massa dan Perpindahan Panas untuk Permukaan Sferik serta Simulasi Pengujian*, Seminar Terbatas Departemen Teknik Mesin, 2004.
- [10] Kosasih, E. A., “*Koreksi terhadap Model Film Stagnan untuk Penguapan Tetesan Air*”, Jurnal Teknologi, FTUI, No. 2, Tahun XX, Juni 2006. (dalam proses pencetakan).
- [11] Silva, M. A., Nebra, S. A., *Numerical Simulation of Drying in A Cyclone*, Journal of Drying Technology, 15(6-8) (1997) 1731-1741.
- [12] Bird R. B. et al., *Transport Phenomena*, second ed., John Wiley & Sons, New York, 2003 pp.681, 689.
- [13] Walton, D. E., *The Evaporation of Water Droplets. A Single Droplet Drying Experiment*, Journal of Drying Technology, 22(3), pp. 431-456, 2004.
- [14] Kadja, M., Bergeles, G., *Modelling of Slurry Droplet Drying*, Journal of Applied Thermal Engineering, 23, pp. 829–84, (2003).