

# KOEFISIEN PERPINDAHAN PANAS PERMUKAAN BOLA DENGAN ALIRAN UDARA PAKSA DALAM PIPA

B. Rahardjo<sup>1)</sup>, B. Suratmo<sup>1)</sup> dan Sukarjo<sup>2)</sup>

## ABSTRACT

Handling and processing of agricultural products mostly consist of heat transfer. Commonly the heat process of agricultural products is conducted in closed systems with air forced circulation. The process of heat transfer is significantly controlled by the values of the coefficient of surface heat transfer. Therefore the objectives of the research were to determine the pertinent parameters affecting the coefficient of heat transfer of sphere in forced air circulation and then to develop the mathematical relationship of those parameters. The mathematical relationship was determined using dimensional analysis composing dimensionless numbers such as Nusselt, Reynolds and size ratio. The coefficient of surface heat transfer were determined by heat capacitance method and analytical approaches using samples of spheres made from copper and wood respectively. The results indicate that the relation of the dimensionless groups were significant. The coefficient of surface heat transfer appropriately can be expressed using the pertinent parameters.

**Kata kunci :** pindah panas, permukaan bola, aliran udara paksa

## PENDAHULUAN

Penanganan dan pengolahan agar hasil pertanian dapat dimanfaatkan lebih lanjut mencakup proses pemanasan dan pendinginan. Proses tersebut meliputi perpindahan panas dari partikel ke media pendingin atau sebaliknya dari media pemanas ke partikel dengan media yang dialirkan secara paksa. Sebagai proses perpindahan panas dengan aliran udara paksa maka koefisien perpindahan panas permukaan atau konveksi merupakan faktor pembatas. Peningkatan koefisien perpindahan panas permukaan tersebut dapat memperlancar dan mempercepat proses perpindahan panas dari atau ke partikel. Disamping itu pengetahuan tentang harga koefisien perpindahan panas permukaan dapat digunakan untuk memperkirakan lama proses perpindahan panas. Lama proses dapat dioptimalkan sehingga dapat menghemat energi operasi perpindahan panas dan menjaga kualitas produk sesuai dengan bakunya (Konjayan dan Daudini, 1993; Balasubramaniam dan Sastry, 1994; Beil dan Cornier, 1996; Halliday et al., 1996).

Penelitian pengukuran koefisien perpindahan panas permukaan dan hubungannya dengan kondisi udara lingkungan telah banyak dilakukan. Pengukuran koefisien perpindahan panas dilakukan dengan menggunakan metoda baku berdasarkan kapasitas panas terbagung. Sebagai sampel untuk metoda ini umumnya menggunakan model fisik berupa

bola logam. Namun kondisi logam sering dianggap tidak dapat mewakili kondisi permukaan buah. Beberapa jenis buah mempunyai bulu kulit sehingga akan mempengaruhi nilai koefisien perpindahan panas permukaan. Demikian juga adanya kulit buah yang tidak rata dapat mempengaruhi koefisien perpindahan panas permukaan dari hasil pengukuran dengan bola logam (Mohsenin, 1987; Lewis, 1987; Balasubramaniam dan Sastry, 1994; Rahardjo dkk, 1997).

Agar dapat menyertakan pengaruh kondisi permukaan buah berbentuk bola maka pengukuran dilakukan dengan pendekatan analitis. Dengan pendekatan analitis maka pengukuran suhu dapat dilakukan dengan partikel berbilangan Biot yang tinggi. Hasil penelitian oleh Tambunan (1997) dan Rahardjo dkk. (1997) menunjukkan bahwa hasil pengukuran dengan kedua metoda di atas tidak terdapat perbedaan yang nyata. Harga koefisien perpindahan panas permukaan dihasilkan dengan metoda pendekatan analitik memberikan harga yang sama dengan harga yang didapatkan dari cara baku dengan menggunakan bola tembaga.

Beberapa penelitian melaporkan hubungan koefisien perpindahan panas permukaan dengan sifat fluida media dan kondisi aliran. Perubahan koefisien perpindahan panas permukaan dan keterkaitannya dengan media dikemukakan dengan hubungan bilangan tak berdimensi Nusselt dan dengan bilangan Reynolds dan Prandtl. Beberapa penelitian melaporkan hubungan ketiga bilangan tak berdimensi tersebut dengan berbagai macam kondisi lingkungan. Namun umumnya penelitian tidak dikaitkan dengan aliran paksa dalam pipa (Konjayan dan Daudini, 1993; Balasubramaniam dan Sastry, 1994; Ramesh dan Rao, 1996; Sukarjo, 1997).

Oleh karena itu maka tujuan penelitian ini adalah untuk mengembangkan model hubungan koefisien perpindahan panas permukaan pada bola pejal pada aliran paksa dalam pipa dan mencari hubungan empirisnya dengan perubah yang nyata berpengaruh. Hasil penelitian ini akan berguna untuk memperkirakan lama pemanasan ataupun pendinginan produk berbentuk bola dalam aliran paksa.

## METODOLOGI

### Landasan Teori

Koefisien perpindahan panas permukaan dapat dihitung berdasarkan proses perpindahan panas tak tunak dalam partikel. Koefisien tersebut didapatkan dari kelerengan nisbah riwayat suhu partikel dengan lama tenggang proses berlangsung. Pada kondisi dimana suhu dalam bola dapat dianggap sama dan merata dalam benda atau bilamana

<sup>1)</sup>Fakultas Teknologi Pertanian UGM

<sup>2)</sup>Alumni Fakultas Teknologi Pertanian UGM

bilangan Biot  $Bi < 0,1$  maka laju panas yang lolos lewat permukaan sama dengan laju perubahan panas yang terjadi dalam bola. Berdasarkan itu riwayat suhu partikel dikemukakan dengan persamaan kapasitor panas tergabung (*lumped capacitance method*) sebagai berikut (Incropera dan DeWitt, 1987; Mohsenin, 1987; Lewis, 1987):

$$\frac{T_p(t) - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = \exp\left(-\frac{hA}{\rho c_p V} t\right) \quad (1)$$

Dengan mengamati perubahan nisbah riwayat suhu partikel  $T_p(t)$  maka akan dapat dihitung koefisien perpindahan panas konveksi  $h$ . Metoda penentuan harga koefisien perpindahan panas konveksi  $h$  tersebut merupakan metoda baku untuk mengukur  $h$ .

Sedangkan untuk partikel berbentuk bola yang berukuran cukup besar atau bahan dengan nilai konduktivitas panas  $k$  kecil sehingga harga bilangan Biot  $Bi > 0,1$  maka akan terjadi gradien suhu dalam partikel. Riwayat suhu dalam partikel berbentuk bola di titik minat dapat dicari dengan pendekatan analitik distribusi suhu sebagai berikut:

$$\frac{T(r, t) - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \frac{\sin\left(\beta_n \frac{r}{R}\right)}{\beta_n \frac{r}{R}} \exp\left(-\beta_n^2 \frac{\alpha}{R^2} t\right) \quad (2)$$

Konstan  $C_n$  adalah faktor penyesuaian suhu di dalam bola untuk mencapai suhu lingkungan. Faktor tersebut dikemukakan sebagai berikut:

Faktor penyesuaian diatas ditentukan oleh besar bilangan Biot  $Bi$  yang dikemukakan sebagai akar  $\beta_n$  dari persamaan transidental. Persamaan transidental tersebut diberikan sebagai persamaan berikut:

$$C_n = \frac{4[\sin(\beta_n) - \beta_n \cos(\beta_n)]}{2\beta_n - \sin(2\beta_n)} \quad (3)$$

$$1 - \beta_n \cot(\beta_n) = Bi = \frac{hR}{k} \quad (4)$$

Pada proses perpindahan panas yang berlangsung untuk waktu yang cukup lama dimana harga bilangan Fourier  $F_0 = \alpha t/R^2 < 0,2$  maka perhitungan distribusi suhu dalam bola dapat dilakukan dengan menggunakan satu suku pertama persamaan (2). Untuk riwayat suhu di titik tengah  $r=0$  dengan satu suku pertama maka persamaan (2) dapat dikemukakan sebagai berikut:

$$\frac{T(0, t) - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = C_1 \exp\left(-\beta_1^2 \frac{\alpha}{R^2} t\right) \quad (5)$$

Dengan cara yang sama riwayat suhu dipermukaan  $r=R$  dengan berdasarkan satu suku pertama dapat dikemukakan sebagai berikut:

$$\frac{T(R, t) - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = C_1 \frac{\sin(\beta_1)}{\beta_1} \exp\left(-\beta_1^2 \frac{\alpha}{R^2} t\right) \quad (6)$$

Nisbah riwayat suhu permukaan terhadap riwayat suhu di titik tengah antara persamaan (6) dengan persamaan (5) menjadi persamaan sebagai berikut:

$$\frac{T(R, t) - T_\infty}{T(0, t) - T_\infty} = \frac{\sin(\beta_1)}{\beta_1} \quad (7)$$

Berdasarkan persamaan (7) dan (4) dapat dihitung harga bilangan Biot dan selanjutnya dapat dihitung koefisien perpindahan panas permukaan  $h$ . Idealnya hasil pengukuran koefisien perpindahan panas konveksi  $h$  dengan menggunakan penyelesaian analitik akan sama dengan hasil pengukuran menggunakan metoda kapasitor panas tergabung. Hasil pengukuran koefisien perpindahan panas permukaan pada bola dengan metoda kapasitas panas tergabung dan dengan metoda pendekatan analitik menghasilkan nilai yang sama (Tambunan, 1997 dan Rahardjo et. al. 1997).

Koefisien perpindahan panas permukaan  $h$  pada bola akan bervariasi tergantung pada sifat fisikawi fluida yaitu berupa viskositas fluida  $\mu_f$ , panas jenis  $c_{pf}$ , densitas fluida  $\rho_f$ , dan konduktivitas fluida  $k_f$ , kecepatan alir  $v$ , ukuran bola  $d_s$  dan ukuran pipa  $D_p$ . Hubungan tersebut secara matematis dapat dikemukakan sebagai berikut (Balasubramaniam dan Sastry, 1994; Sukarjo, 1997):

$$h = f(\mu_f, c_{pf}, \rho_f, k_f, v, d_s, D_p) \quad (8)$$

Hubungan tersebut dicari dengan metode analisis dimensi. Dalam hubungan tersebut terdapat delapan parameter utama dan terdapat empat ukuran. Berdasarkan teori pi maka akan terdapat empat kelompok bilangan tak berdimensi dan dihasilkan hubungan empiris sebagai berikut:

$$\frac{hD_p}{k_f} = f\left(\frac{\rho_f D_p v}{\mu_f}, \frac{c_{pf} \mu_f}{k_f}, \frac{d_s}{D_p}\right) \quad (9)$$

Masing masing kelompok bilangan tidak berdimensi pada persamaan di atas adalah bilangan Nusselt  $Nu$ , bilangan Reynolds  $Re$ , bilangan Prandtl  $Pr$  dan nisbah ukuran  $N_d$ . Bilangan Nusselt dan bilangan Reynolds dalam hal ini berdasarkan pada diameter pipa  $D_p$ . Sedangkan sifat fisikawi udara pada kisaran suhu penelitian tidak banyak berubah. Sehingga dengan demikian bilangan Prandtl  $Pr$  tidak banyak mengalami perubahan dapat dianggap konstan. Berdasarkan itu maka bilangan Prandtl dapat dihilangkan dari persamaan (9). Dengan menggunakan masing masing simbol bilangan maka didapatkan hubungan empiris sebagai berikut (Sukarjo, 1997):

$$Nu = K Re^a N_d^b \quad (10)$$

Dengan menggunakan operasi logaritma maka konstan K, a dan b dicari secara empiris dari hasil pengamatan dengan menggunakan regresi linier ganda.

### Sampel

Sampel untuk penelitian ini berupa bola yang dibuat dari kayu dan dari tembaga. Untuk pengamatan suhu dengan variasi kecepatan digunakan bola tembaga berdiameter 5 cm. Sedangkan untuk pengukuran suhu dengan variasi diameter digunakan bola tembaga berukuran 3, 4 dan 5 cm serta bola kayu berukuran 3, 4, 5, 6 dan 7 cm. Perhitungan koefisien perpindahan panas permukaan dengan pendekatan analitik dilakukan pada partikel bola dibuat dari kayu. Sedangkan untuk sampel bola dari tembaga penentuan koefisien perpindahan panas permukaan digunakan metoda kapasitor panas tergabung. Sifat fisikawi yang berupa densitas, panas jenis, konduktivitas dan difusitas panas untuk kayu serta tembaga diperlihatkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat fisikawi dan thermis sampel bola kayu dan tembaga yang digunakan dalam penelitian.

Uraian sifat fisikawi	Satuan	Kayu <sup>1)</sup>	Tembaga <sup>2)</sup>
Densitas	kg/m <sup>3</sup>	650	8933
Panas jenis	J/kg°C	2207	385
Konduktivitas	W/m°C	0,148	401
Difusitas panas	m <sup>2</sup> /s x 10 <sup>6</sup>	10,3	117

Sumber : <sup>1)</sup> Tambunan (1997)

<sup>2)</sup> Incropera dan deWitt (1985)

### Peralatan

Peralatan untuk mengukur koefisien perpindahan panas konveksi dengan aliran udara paksa dilakukan pada sistem aliran udara tertutup. Sistem aliran udara dengan paksa dibuat dari pipa pralon berdiameter 8,5 cm. Sirkulasi udara dilengkapi dengan blower dan pemanas. Pemanas dapat memanasi sirkulasi udara sampai sekitar 55°C. Pengukur suhu berupa kabel termokopel jenis copper-constantan. Blower yang digunakan mempunyai kemampuan untuk menghembuskan udara dengan kecepatan berkisar antara 2 - 8 m/s

### Kondisi udara

Penelitian dilakukan pada kondisi suhu kamar sekitar 28°C dengan udara pada RH sekitar 87-89%. Suhu udara pemanas berkisar sekitar 55°C. Sifat fisikawi udara pada suhu tersebut disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Sifat fisikawi dan thermis udara pemanas pada suhu 50°C.

Uraian sifat fisikawi dan thermis udara	Satuan	Kuantitas <sup>*)</sup>
Densitas, $\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1,095
Viskositas, $\mu$	kg/ms	19,514 x 10 <sup>-6</sup>
Konduktivitas, k	W/m°C	0,028

Sumber : <sup>\*)</sup> Incropera dan DeWitt (1988).

### Prosedur penelitian

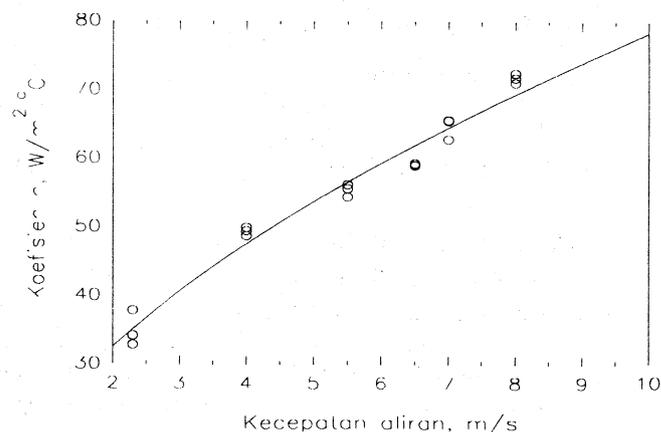
Sampel bola kayu dan bola tembaga pada awalnya dibiarkan dalam ruangan terbuka pada suhu kamar sekitar 28°C. Untuk sampel kayu termokopel pengukur suhu dipasang di titik tengah bola, setengah jari luar bola dan di permukaan. Sedangkan untuk sampel bola tembaga termokopel dipasang dengan mengebor tembaga dengan kedalaman sekitar setengah jari jari. Suhu pada awalnya diamati setiap 1/2 menit kemudian dengan interval 1 dan 2 menit sampai suhu dalam bola mendekati suhu udara pemanas atau hampir mendekati konstan. Perlakuan meliputi variasi kecepatan rata rata aliran udara dan diameter bola. Kecepatan alir udara divariasikan berkisar dari 2 - 8 m/s dengan 6 macam kecepatan. Sedangkan ukuran bola divariasikan dengan diameter 3, 4, 5, 6, dan 7 cm.

### Analisis data

Koefisien perpindahan panas permukaan pada bola tembaga dihitung berdasarkan metoda kapasitas thermis tergabung. Sedangkan koefisien perpindahan panas permukaan pada bola kayu ditentukan dengan menggunakan pendekatan analitik. Nisbah riwayat suhu di titik tengah dengan riwayat suhu di permukaan bola digunakan untuk menghitung difusitas panas bola kayu. Kelerengan nisbah riwayat suhu di titik tengah dicari dengan regresi linier menggunakan program komputer yang ada (QPro, Borland). Analisis untuk menghitung harga Biot dan untuk menentukan harga koefisien perpindahan panas permukaan dilakukan berdasarkan pencarian akar fungsi dengan metoda Newton-Raphson (Chapra dan Canole, 1988).

### HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Perhitungan koefisien perpindahan panas permukaan dengan variasi kecepatan dilakukan dengan menggunakan riwayat suhu pada bola tembaga. Berdasarkan kelerengan persamaan (10) dan berdasarkan sifat thermis tembaga maka harga koefisien perpindahan panas permukaan dapat ditentukan. Koefisien perpindahan panas permukaan yang didapatkan dalam pengukuran dengan variasi kecepatan diperlihatkan pada Gambar 1.



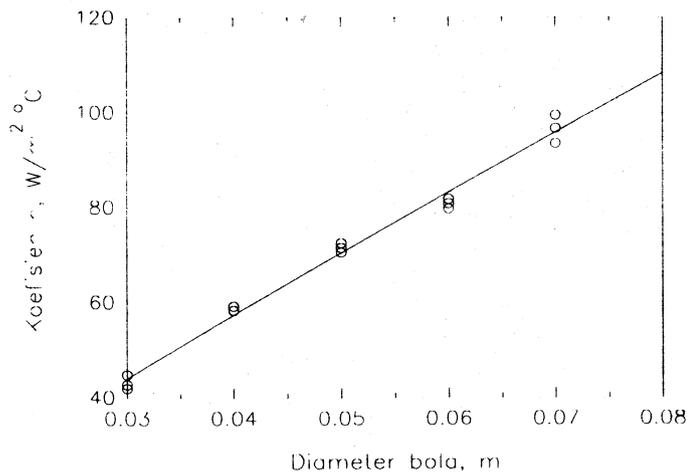
Gambar 1. Koefisien perpindahan panas permukaan dengan variasi kecepatan alir udara rata rata.

Pada gambar tersebut nampak bahwa kenaikan kecepatan alir  $v$  akan menaikkan koefisien perpindahan panas permukaan  $h$ . Dari gambar tersebut juga nampak bahwa hubungan tersebut tidak linier. Dengan menggunakan bilangan Nusselt untuk koefisien perpindahan panas permukaan dan dengan bilangan Reynolds untuk menyatakan kecepatan aliran udara hubungan tersebut dapat dikemukakan seperti persamaan (10). Dari analisis regresi linier didapatkan hubungan kedua bilangan tak berdimensi sebagai berikut:

$$Nu = 0,671 Re^{0,55} \quad (11)$$

Koefisien determinan dari hasil regresi didapatkan  $r^2=0,97$  yang menunjukkan bahwa hubungan kedua bilangan tak berdimensi cukup baik. Demikian juga koefisien perpindahan panas permukaan cenderung bertambah tinggi dengan semakin bertambahnya ukuran bola diameter  $d$ .

Penentuan koefisien perpindahan panas permukaan pada berbagai diameter digunakan dua macam bola yaitu bola tembaga dan bola kayu. Untuk penentuan harga koefisien perpindahan panas permukaan dengan bola tembaga dilakukan sama dengan pada perlakuan kecepatan. Sedangkan pada bola kayu berdasarkan nisbah riwayat suhu dipermukaan dan riwayat suhu di titik tengah dicari harga akar persamaan transidental (7). Kemudian dengan kelerengan perubahan riwayat suhu di titik tengah didapatkan harga koefisien perpindahan panas permukaan. Gambar 2 memperlihatkan hubungan koefisien perpindahan panas permukaan  $h$  dengan diameter bola  $d$ .



Gambar 2. Koefisien perpindahan panas permukaan dengan variasi diameter bola.

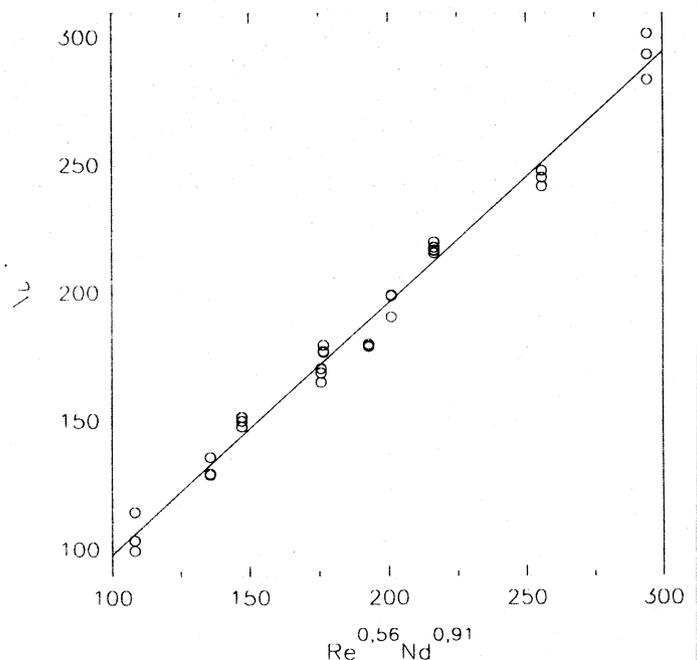
Hubungan antara bilangan Nusselt dengan nisbah ukuran  $Nd$  berdasarkan persamaan (10) didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$Nu = 347,6 Nd^{0,915} \quad (12)$$

Analisis regresi linier didapatkan koefisien determinan  $r^2=0,98$  yang berarti terdapat hubungan yang cukup baik antara kedua bilangan tak berdimensi tersebut. Penggabungan hasil regresi persamaan (11) dan persamaan (12) merupakan hubungan langsung antara bilangan Nusselt dengan kedua bilangan tak berdimensi Reynolds dan nisbah ukuran  $Nd$ . Hasil regresi linier ganda hubungan tersebut seperti dikemukakan dengan persamaan (10) sebagai berikut:

$$Nu = 0,983 Re^{0,56} Nd^{0,91} \quad (13)$$

Hasil analisis regresi ganda didapatkan koefisien determinan  $r^2=0,98$  yang menunjukkan adanya keterkaitan nyata antara ketiga bilangan tak berdimensi tersebut. Kedua pangkat bilangan tak berdimensi Reynolds dan nisbah ukuran hasil analisis regresi ganda tidak berbeda nyata dengan hasil regresi tunggalnya. Konstan pangkat untuk bilangan Reynolds yang dihasilkan dari penelitian ini tidak banyak berbeda dengan hasil penelitian terdahulu. Hasil penelitian oleh Whitaker (1972) memberikan angka sebesar 0,5. Gambar 3 menunjukkan perubahan bilangan Nusselt dengan gabungan bilangan Reynolds dan angka Nisbah Ukuran.



Gambar 3. Perubahan bilangan Nusselt dengan gabungan bilangan Reynolds dan angka Nisbah Ukuran.

Hasil regresi persamaan (13) dapat diubah sebagai hubungan langsung antara koefisien perpindahan panas

permukaan dengan parameter penentunya. Dengan menggunakan parameter yang ada maka persamaan (13) dapat dikemukakan sebagai berikut:

$$h = 1484v^{0,56} D_p^{-1,35} d_s^{0,91} \quad (14)$$

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa koefisien perpindahan panas permukaan dapat dihubungkan dengan parameter penentunya berupa kecepatan, ukuran pipa dan partikelnya. Penelitian ini masih terbatas pada partikel tunggal. Dalam penggunaan praktis pendinginan atau pemanasan berlangsung dengan partikel jamak dalam tumpukan. Kondisi ini akan mempengaruhi besar koefisien perpindahan panas permukaan. Demikian juga pada proses yang menggunakan kondisi udara dengan kelembaban udara yang bervariasi maka kelembaban ini akan mempengaruhi harga koefisien perpindahan panas permukaan.

## KESIMPULAN

Koefisien perpindahan panas permukaan pada bola dengan aliran paksa dalam pipa dipengaruhi oleh kecepatan alir, diameter bola dan diameter pipa. Hubungan tersebut dapat dikemukakan secara empiris sebagai hubungan antara bilangan Nusselt dengan bilangan Reynolds dan nisbah ukuran. Sifat fisikawi udara dipengaruhi oleh kelembaban udara sehingga kelembaban ini akan menentukan besaran bilangan Reynolds dan Prandtl. Oleh karena itu perlu dikaji lebih lanjut hubungan antara koefisien perpindahan panas permukaan dengan kelembaban udara. Untuk penerapan dalam proses pendinginan partikel masih perlu diteliti lebih lanjut pengaruh tumpukan partikel dan kondisi udara.

## DAFTAR SIMBUL

A	=	luas permukaan, m <sup>2</sup>
Bi	=	bilangan Biot, hR/k
C	=	konstan penyelesaian analitik perpindahan panas pada bola
c <sub>p</sub>	=	panas jenis, J/kg°C
D <sub>p</sub>	=	diameter pipa, m
d <sub>s</sub>	=	diameter bola pejal, m
Fo	=	bilangan Fourier, at/R <sup>2</sup>
h	=	koefisien perpindahan panas permukaan, W/m <sup>2</sup> °C
k	=	konduktivitas panas, W/m°C
Nu	=	bilangan Nusselt hd <sub>s</sub> /k <sub>f</sub>
Pr	=	bilangan Prandtl m <sub>f</sub> c <sub>pf</sub> /k <sub>f</sub>
R	=	jari jari luar bola, m
Re	=	bilangan Reynolds r <sub>f</sub> D <sub>p</sub> v/m <sub>f</sub>
r	=	peubah jari jari, m
T	=	suhu, °C
t	=	tenggang atau waktu, s
V	=	volume partikel, m <sup>3</sup>
v	=	kecepatan rata rata alir fluida, m/s
α	=	difusitas panas k/rc <sub>p</sub> , m <sup>2</sup> /s
β	=	akar fungsi transidental

μ = viskositas, kg/ms

ρ = densitar, kg/m<sup>3</sup>

### Huruf bawah

0 = awal

f = fluida

n = bilangan cacah 1, 2, 3, . . . ., ∞

p = partikel dengan Bi ≤ 0,1

s = pejal

∞ = lingkungan atau luar

## PUSTAKA

- Balasarmaniam, V. M. dan S. K. Sastry. 1994. Liquid to Particle Coefficient Heat Transfer in Non Newtonian Carrier Fluid during Continuous Flow. *J. of Food Eng.* 23(2):165-187.
- Beil, A. L. dan G. Cornier. 1996. Improvement of Heat Transfer During Low Temperature Pasteurization Processes. *J. of Food Eng.* 27(4):409-422.
- Chapra, S. C. dan R. P. Canole. 1988. Numerical Method for Engineers. McGraw Hills, Inc. New York.
- Halliday, P. J., R. Parker, R. B. Piggot, A. C. Smith dan D. C. Steer. 1996. Estimation of the Thermal Contact Resistance Between Potato Granules and Steel. *J. of Food Eng.* 28(3-4):262-270.
- Incropera, F. P. dan D. P. DeWitt. 1985. Introduction to Heat Transfer. John Wiley and Sons. New York.
- Konjayan, A., dan J. D. Daudini. 1993. Heat and Mass Transfer at the surface of Elliptical Cylinders Placed in a Turbulent Air Flow. *J. of Food Eng.* 20(4):339-367.
- Lewis, M. J. 1987. Physical Properties of Foods and Food Processing Systems. Ellis Horward, London.
- Mohsenin, N. N. 1987. Physical Properties of Foods and Agricultural Materials. Gordon and Breach. New York.
- Rahardjo, B., Suhargo dan H. Tambunan. (1997). Penentuan Koefisien Perpindahan Panas Permukaan Bola Berdasarkan Pendekatan Analitik Perpindahan Panas tak Tunak. *AgriTech (in print)*
- Ramesh, M. N., dan P. N. S. Rao. 1996. Development and Performance Evaluation of a Continous Rice Cooker. *J. of Food Eng.* 27(4):389-396.
- Sukarjo. 1997. Koefisien Perpindahan Panas Konveksi Bola Pejal pada Aliran Udara Paksa dalam Pipa. Skripsi (tidak dipublikasikan). Fak. Teknologi Pertanian UGM. Yogyakarta.
- Tambunan, H. 1997. Koefisien Perpindahan Panas Konveksi Paksa pada Bola Pejal didalam Pipa dengan Metode Analitik dan Kapasitor Tergabung. Skripsi (tidak dipublikasikan). Fak. Teknologi Pertanian UGM. Yogyakarta.
- Whiteker, S. 1972. Forced Convection Heat Transfer Correlation for Flow in Pipe, Flat Plate, Single Cylinder,