

PENENTUAN KOEFISIEN PERPINDAHAN PANAS PERMUKAAN BOLA BERDASARKAN PENDEKATAN ANALITIK PERPINDAHAN PANAS TAK TUNAK

B. Rahardjo¹⁾, Suhargo¹⁾ dan H. Tambunan²⁾

ABSTRACT

The standard method to determine the coefficient of surface heat transfer on spheres is based on the lumped capacitance method using spherical particles with Biot number less than 0,1. However, most agricultural products with spherical shapes have Biot number greater than 0,1. Several analytical approaches are available to determine the temperature distribution within the spheres with higher Biot number. Accordingly, the objectives of this research were to determine the coefficient of surface heat transfer based on analytical approaches and to compare the values to that determined by the standard method. Samples were spheres made from wood for analytical approach and made from copper for lumped capacitance method. The results indicate that the values of the coefficient of surface heat transfer determined by both methods were significantly similar. The conductivity and the coefficient of surface heat transfer of spherical wood simultaneously can be determined using the analytical approaches for transient heat transfer on spheres.

PENDAHULUAN

Penanganan produk pertanian banyak melibatkan proses perpindahan panas baik berupa proses pengambilan panas (pendinginan) maupun berupa proses pemasokan panas (pemanasan). Pendinginan merupakan salah satu penanganan hasil pertanian selepas panen yang banyak diterapkan untuk memperpanjang umur simpan. Produk pertanian seperti misalnya buah umumnya dipanen pada siang hari pada suhu yang cukup tinggi sehingga untuk penyimpanannya perlu didinginkan terlebih dahulu. Untuk pemerkiraan lama kebutuhan proses pendinginan maupun proses pemanasan memerlukan pengetahuan sifat thermis produk pertanian baik berupa konduktivitas dan koefisien perpindahan panas permukaan (Beil dan Gornier, 1996; Ramesh dan Rao, 1996).

Metode baku untuk menentukan koefisien perpindahan panas permukaan atau konvektif adalah dengan menggunakan bola pejal berbilangan Biot kurang dari 0,1. Dengan angka Biot kecil tersebut maka suhu bola dapat dianggap merata sehingga riwayat suhu bola dapat dicari dengan metoda kapasitor panas tergabung. Sebagai model fisik bola dibuat dari bahan logam dengan angka konduktivitas tinggi seperti misalnya tembaga atau aluminium. Dari nisbah riwayat suhu bola logam akan dapat ditentukan angka koefisien perpindahan panas permukaan (Lewis, 1987; Mohsenin 1987; Peleg dan Bagley, 1983; Halliday et al., 1996).

Beberapa jenis produk pertanian seperti halnya buah berbentuk menyerupai bola. Secara teoritis koefisien perpindahan panas permukaan pada buah berbentuk bola akan sama dengan angka yang dicari dengan bola logam. Namun

beberapa kondisi permukaan produk pertanian sering tidak seideal permukaan bola logam. Beberapa jenis buah permukaannya diselubungi bulu buah sehingga akan mempengaruhi koefisien perpindahan panas permukaan. Beberapa jenis buah lainnya mempunyai permukaan yang tidak merata permukaan logam karena jenis kulit buahnya. Keadaan permukaan yang berbeda dengan permukaan logam maka kondisi tersebut sering diabaikan pengaruhnya terhadap harga koefisien perpindahan panas permukaan (Mohsenin, 1987).

Riwayat suhu pada partikel berbentuk bola dapat dicari berdasarkan pendekatan analitik penyelesaian distribusi suhu pada arah radial bola. Pendekatan analitik ini dapat digunakan untuk menghitung riwayat suhu pada bahan dengan bilangan Biot tinggi seperti halnya pada produk pertanian. Bentuk persamaan pendekatan analitik tidak sederhana yang berupa deret hitung. Namun untuk pengamatan dengan tenggang yang cukup lama pendekatan analitik dapat disederhanakan sebagai persamaan dengan satu suku. Dengan persamaan satu suku tersebut maka riwayat suhu di satu titik minat dapat dibandingkan dengan riwayat suhu di tempat lain untuk menentukan sifat thermis produk (InCropera dan DeWitt, 1988; Halliday et al., 1996).

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengukur koefisien perpindahan panas permukaan bola pejal berdasarkan penyelesaian analitik perpindahan panas tak tunak dan kemudian membandingkan hasil pengukurannya dengan hasil pengukuran berdasarkan metoda kapasitor panas tergabung. Bilamana metoda pengukuran ini dapat diterapkan maka untuk penentuan koefisien perpindahan panas permukaan pada produk pertanian berbentuk bola dapat dilakukan secara langsung dengan mengukur distribusi suhu dalam produk.

METODOLOGI

Teori. Neraca kesetimbangan panas dalam partikel berbentuk bola pejal dapat dikemukakan dengan persamaan diferensial sebagai berikut:

$$r c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial}{\partial r} r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

Kondisi awal suhu untuk semua titik minat dianggap sama dan merata diseluruh bagian yaitu sebesar suhu awal T_0 ; atau sebagai berikut:

$$T(r,0) = T_a \quad (2)$$

Pada perpindahan panas dalam bola pejal tidak terjadi perpindahan panas yang melewati titik tengah $r=0$ sehingga

¹⁾ Fakultas Teknologi Pertanian UGM

²⁾ Alumni Fakultas Teknologi Pertanian UGM

tidak ada gradien suhu atau dapat dikemukakan secara matematis sebagai berikut:

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad (3)$$

Pada permukaan bola $r=R$ perpindahan panas yang terjadi mencapai keadaan setimbang dengan perpindahan panas permukaan yang dapat dikemukakan berdasarkan hukum Newton kedua yaitu:

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = h[T(R,t) - T_o] \quad (4)$$

Dengan kondisi dimana suhu dalam bola pejal dapat dianggap sama merata atau dimana harga bilangan Biot $Bi=hR/k \ll 0,1$ sehingga dapat dianggap tidak ada gradien suhu di arah radial. Berdasarkan anggapan tersebut maka panas yang lewat permukaan sama dengan perubahan panas total dalam bola atau:

$$\rho c_p V \frac{dT_p(t)}{dt} = hA [T_p(t) - T_o] \quad (5)$$

Penyelesaian persamaan diferensial diatas menghasilkan persamaan kapasitor panas tergabung (*lumped capacitance method*) sebagai berikut:

$$\frac{T_p(t) - T_o}{T_a - T_o} = \exp\left(-\frac{hA}{\rho c_p V} t\right) \quad (6)$$

Persamaan (6) digunakan untuk menentukan harga koefisien perpindahan panas partikel pejal terutama dengan dengan harga bilangan Biot $Bi < 0,1$. Dengan mengamati perubahan suhu partikel $T_p(t)$ dan mengukur sifat fisikawi partikel r dan c_p maka akan dapat dihitung koefisien perpindahan panas permukaan h . Metoda penentuan harga koefisien perpindahan panas permukaan tersebut merupakan metoda baku terutama untuk partikel.

Sedangkan untuk partikel yang berukuran besar atau bahan dengan nilai konduktivitas panas k kecil dimana harga bilangan Biot $Bi \gg 0,1$ maka akan terjadi gradien suhu dalam partikel. Penyelesaian persamaan diferensial (1) dengan kondisi awal persamaan (2) serta kondisi batas sebagai persamaan (3) dan (4) dihasilkan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{T(r,t) - T_o}{T_a - T_o} = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \frac{\sin(\beta_n \frac{r}{R})}{\beta_n \frac{r}{R}} \exp\left(-\beta_n^2 \frac{\alpha}{R^2} t\right) \quad (7)$$

Konstan C_n merupakan faktor "keterlambatan" suhu di titik minat untuk mencapai suhu lingkungan. Keterlambatan tersebut ditentukan oleh posisi letak titik minat, ukuran partikel, laju perpindahan panas lewat permukaan dan penyebaran panas dalam partikel atau dikemukakan sebagai berikut:

$$C_n = \frac{4[\sin(\beta_n) - \beta_n \cos(\beta_n)]}{2\beta_n - \sin(2\beta_n)} \quad (8)$$

Dimana β_n merupakan akar persamaan transidental dari harga bilangan Biot sebagai berikut:

$$1 - \beta_n \cot(\beta_n) = Bi = \frac{hR}{k} \quad (9)$$

Untuk tenggang t proses perpindahan panas yang cukup lama sehingga harga bilangan Fourier $Fo = at/R^2 > 0,2$ maka perhitungan distribusi suhu dalam bola dapat disederhanakan dengan cukup menggunakan suku pertama persamaan (7). Berdasarkan persamaan (7) dengan satu suku pertama maka suhu di titik tengah $r=0$ dapat dikemukakan sebagai berikut:

$$\frac{T(0,t) - T_o}{T_a - T_o} = C_1 \exp\left(-\beta_1^2 \frac{\alpha}{R^2} t\right) \quad (10)$$

Demikian juga riwayat suhu di permukaan $r=R$ dengan menggunakan satu suku pertama dapat dikemukakan sebagai berikut:

$$\frac{T(R,t) - T_o}{T_a - T_o} = C_1 \frac{\sin(\beta_1)}{\beta_1} \exp\left(-\beta_1^2 \frac{\alpha}{R^2} t\right) \quad (11)$$

Berdasarkan nisbah riwayat suhu di permukaan terhadap riwayat suhu di titik tengah atau antara persamaan (11) dengan persamaan (10) didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{T(R,t) - T_o}{T(0,t) - T_o} = \frac{\sin(\beta_1)}{\beta_1} \quad (12)$$

Hasil dari persamaan (12) diatas akan berupa suatu konstan. Dengan menggunakan nisbah riwayat suhu di permukaan dan riwayat suhu di pusat bola maka akan dihasilkan harga β_1 . Demikian pula berdasarkan riwayat suhu di titik tengah maka laju perubahan suhu dikemukakan sebagai berikut:

$$\ln\left[\frac{T(0,t) - T_o}{T_a - T_o}\right] = \ln(C_1) - \left(\beta_1^2 \frac{\alpha}{R^2}\right) t \quad (13)$$

Dengan menggunakan harga kelerengan $\beta_1^2 a/R^2$ hubungan nisbah suhu dengan waktu seperti pada persamaan (13), ukuran partikel bola R dan harga β_1 hasil persamaan (12) maka harga difusitas panas a atau $k/\rho c_p$ akan dapat ditentukan. Dari hasil tersebut bilamana harga densitas ρ dan panas jenis c_p dapat ditentukan maka konduktivitas panas k dapat dicari. Selanjutnya dengan persamaan (12) dan (9) dapat dihitung harga bilangan Biot dan kemudian dapat dihitung koefisien perpindahan panas permukaan h . Idealnya hasil pengukuran koefisien perpindahan panas permukaan h dengan menggunakan penyelesaian analitik akan sama dengan hasil pengukuran menggunakan metoda kapasitor panas tergabung.

menggunakan penyelesaian analitik akan sama dengan hasil pengukuran menggunakan metoda kapasitor panas terdabung.

Sampel. Untuk pengukuran suhu dan perhitungan dengan pendekatan analitik digunakan partikel berupa bola dibuat dari kayu. Sedangkan sampel untuk metoda kapasitor terdabung digunakan bola dibuat dari tembaga. Diameter masing masing sampel adalah 3, 4 dan 5 cm. Densitas, panas jenis, konduktivitas dan difusitas panas pada kayu diukur, sedangkan sifat fisikawi tembaga didapatkan dari pustaka. Sifat fisikawi kedua bahan tersebut ditunjukkan pada Tabel 1.

Peralatan. Peralatan untuk mengukur koefisien perpindahan panas permukaan digunakan model sirkulasi udara tertutup terbuat dari pipa pralon berdiameter 8,5 cm. Sirkulasi dilengkapi dengan blower dan pemanas. Pemanas dapat memanasi sirkulasi udara sampai sekitar 55°C. Pengukur suhu berupa kabel thermokopel jenis copper-constantan.

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

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

Sumber: ¹⁾Tambunan (1997)

²⁾Incropera dan DeWitt (1985)

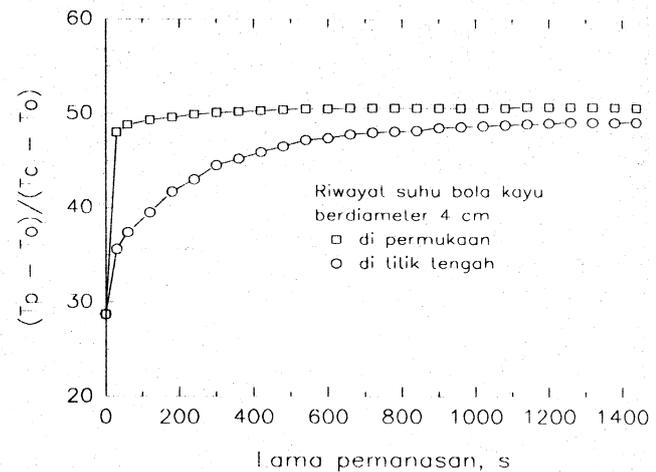
Prosedur penelitian. Sampel bola kayu pada awalnya dibiarkan dalam ruangan terbuka pada suhu kamar sekitar 28°C. Termokopel pengukur suhu dipasang di titik tengah bola, setengah jari luar bola dan di permukaan. Pertama blower dan suhu pemanas dijalankan beberapa lama sampai suhu udara mencapai suhu konstan sekitar 50°C kemudian sampel ditempatkan di aliran udara. Suhu pada sampel pada awalnya diamati setiap 1/2 menit kemudian diamati dengan interval 1 menit dan 2 menit. Pengamatan dilakukan sampai suhu mendekati konstan udara pemanas. Kecepatan aliran udara dijaga sekitar 8 m/detik. Pengukuran dilakukan dengan pengulangan tiga kali.

Analisis data. Nisbah riwayat suhu di titik tengah dengan riwayat suhu di permukaan bola digunakan untuk menghitung difusitas panas bola. Regresi linier nisbah riwayat suhu untuk mencari kelerengan pada bola kayu dan bola tembaga dicari dengan program komputer yang ada (QPro, Borland). Analisis untuk menghitung harga Biot dan untuk menentukan harga koefisien perpindahan panas permukaan dilakukan berdasarkan pencarian akar fungsi transidental dengan metoda Newton-Raphson (Chapra dan Canole, 1988).

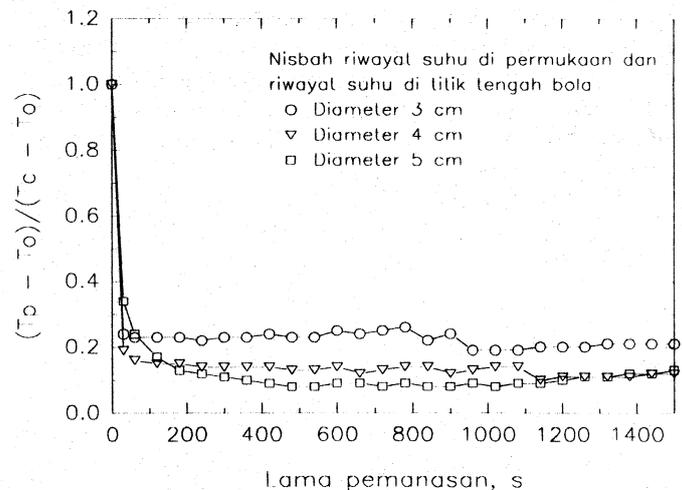
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Antara perubahan suhu pada bola kayu di permukaan dan di titik tengah akan selalu terjadi perbedaan. Gambar 1 memperlihatkan salah satu contoh riwayat suhu di permukaan dan di titik tengah pada bola kayu berdiameter 4 cm. Idealnya

nisbah kedua riwayat suhu tersebut akan berupa konstan sesuai dengan persamaan (12). Gambar 2 memperlihatkan nisbah riwayat suhu di permukaan dengan riwayat suhu di titik tengah pada bola kayu berdiameter 3, 4 dan 5 cm. Nisbah riwayat suhu tersebut bervariasi dan cenderung bertambah besar saat suhu titik tengah mendekati suhu udara pemanas. Kecenderungan tersebut terjadi mungkin dikarenakan perbedaan suhu keduanya semakin kecil sehingga nisbahnya semakin besar. Oleh karena itu kisaran yang digunakan untuk menghitung β_1 berdasarkan persamaan (12) dipilih antara lama pemanasan 200 s sampai dengan 1200 s dimana harga tersebut relatif konstan. Hasil perhitungan $\sin(\beta_1)/\beta_1$ diperlihatkan pada Tabel 2. Selanjutnya dengan menggunakan metoda Newton-Rapson untuk mencari akar persamaan transidental maka harga β_1 dapat dicari (Tabel 2).



Gambar 1. Riwayat suhu di permukaan bola dan di titik tengah bola kayu dengan diameter 4 cm.



Gambar 2. Nisbah riwayat suhu di titik tengah bola dengan dengan riwayat suhu di permukaan bola dengan diameter 3, 4, dan 5 cm.

Tabel 2. Sifat thermis bola kayu hasil perhitungan berdasarkan metoda pendekatan analitik dan pembandingannya dengan hasil pengukuran pada bola tembaga berdasarkan metoda kapasitas tergabung.

Parameter	Satuan	Diameter bola, cm		
		3	4	5
Kelerengan riwayat suhu titik tengah bola kayu	1/s	0,0031	0,0019	0,0014
$\sin(\beta_1)/\beta_1$	-	0,237	0,140	0,091
β_1	rad	2,505	2,748	2,876
Difusitas, $r \times 10^7$	m^2/s	1,12	1,02	1,06
Konduktivitas, k	$W/m^\circ C$	0,161	0,147	0,152
Biot, Bi	-	4,385	7,614	11,588
Koefisien, h analitik	$W/m^2^\circ C$	44,72 (2,151)	58,25 (1,835)	70,92 (2,387)
Kelerengan riwayat suhu bola tembaga	1/s	0,00273	0,00258	0,00249
Koefisien, h kapasitas	$W/m^2^\circ C$	46,86 (0,916)	59,04 (1,354)	71,85 (1,874)

Catatan: Angka dalam kurung () adalah baku simpang.

Riwayat suhu di titik tengah bervariasi tergantung pada ukuran diameter bola. Gambar 3 memperlihatkan nisbah riwayat suhu titik tengah pada bola kayu berdiameter 3, 4 dan 5 cm. Dengan menggunakan persamaan (13) maka dapat ditentukan kelerengan perubahan suhu di titik tengah bola kayu. Kelerengan masing masing bola kayu diperlihatkan pada Tabel 2. Semakin besar ukuran bola kayu akan semakin kecil kelerengan perubahan riwayat suhu di titik tengah. Dengan menggunakan harga kelerengan masing masing bola dan akar β_1 dari perhitungan dengan persamaan (12) dan berdasarkan persamaan (13) maka dapat ditentukan harga difusitas panas a untuk masing masing bola kayu (Tabel 2). Difusitas panas ini merupakan sifat thermis bahan bola kayu dan tidak akan dipengaruhi ukuran fisiknya sehingga idealnya sama untuk semua ukuran bola.

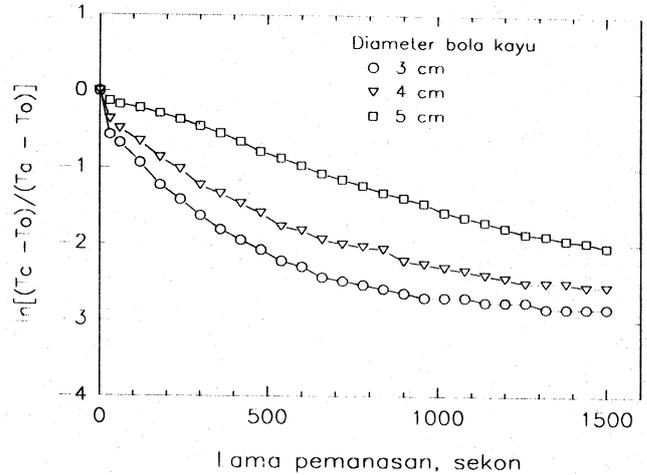
Dengan menggunakan harga densitas r dan panas jenis c_p partikel kayu maka konduktivitas k kayu dapat ditentukan. Harga yang didapatkan dari masing masing bola tidak ada

beda yang nyata pada sekitar $0,15 W/m^\circ C$. Harga tersebut sesuai dengan hasil pengukuran dengan menggunakan alat ukur konduktivitas (Tabel 1). Konduktivitas panas pada kayu berkisar antara $0,16 W/m^\circ C$ untuk kayu keras dan $0,12 W/m^\circ C$ untuk kayu lunak (Incropera dan DeWitt, 1985).

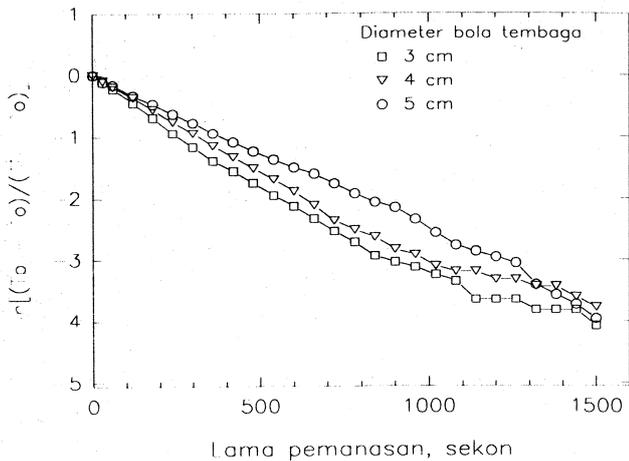
Dengan menggunakan harga β_1 yang telah didapatkan dan dengan menggunakan persamaan (9) maka dapat dicari harga bilangan Biot Bi masing masing bola (Tabel 2). Dengan menggunakan hasil perhitungan konduktivitas panas k diatas dan dengan menggunakan masing masing ukuran bola R maka dapat ditentukan harga koefisien perpindahan permukaan h (Tabel 2).

Sebagai pembanding maka koefisien perpindahan panas permukaan h juga dicari dengan metoda baku berdasarkan metoda kapasitor panas tergabung menggunakan bola tembaga berdiameter 3, 4 dan 5 cm. Gambar (4) memperlihatkan nisbah riwayat suhu bola tembaga yang menerima pemanasan seperti sampel bola kayu. Kelerengan masing masing diameter bola tembaga diperlihatkan pada Tabel (2). Dengan menggunakan sifat fisik tembaga yaitu densitas dan panas jenis (Tabel 1) maka dapat dihitung harga koefisien perpindahan panas permukaan h seperti diperlihatkan pada Tabel 2.

Dari tabel tersebut nampak bahwa harga koefisien perpindahan panas permukaan h yang didapatkan dengan pendekatan analitik tidak ada beda nyata dengan hasil pengukuran menggunakan metoda baku. Berdasarkan tabel tersebut juga nampak bahwa koefisien perpindahan panas permukaan h dipengaruhi oleh ukuran bola, semakin besar diameter bola semakin besar pula harga h . Namun hal itu bukan merupakan minat dalam penelitian ini sehingga tidak dicari keterkaitan antara keduanya.



Gambar 3. Riwayat suhu di titik tengah bola kayu dengan diameter 3, 4, dan 5 cm.



Gambar 4. Riwayat suhu di titik tengah bola terbuat dari logam tembaga dengan diameter 3, 4, dan 5 cm.

Koefisien perpindahan panas permukaan untuk partikel berbentuk bola berbilangan Biot tinggi dapat dicari dengan menggunakan pendekatan analitik. Cara tersebut bila dibandingkan dengan metoda baku mungkin dipandang kurang praktis karena memerlukan dua riwayat suhu di permukaan dan di titik tengah bola. Namun kondisi permukaan produk pertanian sangat bervariasi dan tidak mudah untuk dibuat model fisiknya. Pada metoda baku partikel yang digunakan berupa bola logam dengan permukaan yang relatif halus dan rata. Dengan cara ini maka pengaruh kondisi permukaan sulit untuk diturunkan. Sedangkan pada metoda dengan menggunakan pendekatan analitik maka pengaruh kondisi permukaan dapat diperhitungkan. Disamping itu dengan pengukuran riwayat suhu di dua tempat maka sekaligus dapat dicari harga konduktivitas panas bola, sifat termis yang diperlukan untuk perhitungan proses panas dalam produk pertanian.

KESIMPULAN

Koefisien perpindahan panas permukaan bola dengan harga bilangan Biot yang tinggi dapat dicari dengan menggunakan pendekatan analitik perpindahan panas tak tunak. Hasil pengukuran yang didapatkan tidak ada perbedaan nyata dengan hasil pengukuran menggunakan metoda kapasitor panas terdistribusi. Metoda pendekatan analitik dapat digunakan untuk menentukan koefisien perpindahan panas permukaan produk pertanian secara langsung sehingga dengan demikian kondisi permukaan bola tidak perlu diabaikan. Disamping itu dengan menggunakan pendekatan analitik dapat juga dicari harga konduktivitas bahan. Dengan mengukur riwayat suhu di permukaan dan riwayat suhu di titik tengah bola maka kedua sifat termis bola dapat ditentukan secara bersamaan.

SIMBUL

- A = luas permukaan, m^2
- Bi = bilangan Biot, hR/k
- C = konstan penyelesaian analitik perpindahan panas pada bola
- c_p = panas jenis, $J/kg^\circ C$
- Fo = bilangan Fourier, at/R^2
- h = koefisien perpindahan panas permukaan, $W/m^2^\circ C$
- k = konduktivitas panas, $W/m^\circ C$
- r = peubah jari jari, m
- R = jari jari luar bola, m
- T = suhu, $^\circ C$
- t = tenggang atau waktu, s
- α = difusitas panas $k/\rho c_p$, m^2/s
- β = akar fungsi transidental
- ρ = densitar, kg/m^3

Huruf bawah

- a = awal
- n = bilangan cacah 1, 2, 3, ..., ∞
- p = partikel untuk bola dengan $Bi \leq 0,1$
- r = permukaan untuk bola dengan $Bi > 0,1$
- o = udara pemanas, lingkungan atau luar

PUSTAKA

- 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.
- 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.
- Peleg, M dan E. B. Bagley. 1983. Physical Properties of Foods. Avi Publishing Company, Inc. Westport.
- 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.
- Tambunan, H. 1997. Koefisien Perpindahan Panas Konveksi Paksa pada Bola Pejal didalam Pipa dengan Metode Analitik dan Kapasitor Terdistribusi. Skripsi (tidak dipublikasikan). Fak. Teknologi Pertanian UGM. Yogyakarta.