

## KAJIAN EKSPERIMENTAL TERHADAP KONDUKTIVITAS DAN DIFUSIVITAS TERMAL BUAH SEMANGKA

Susanto Johanes<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Program Diploma Teknik Mesin, Universitas Gadjah Mada Yogyakarta

Masuk: 23 April 2012, revisi masuk: 11 Juni 2012, diterima: 5 Juli 2012

### ABSTRACT

*In the tropics, when the fruit is going to be cropped, the fruit temperature is same as the ambient temperature. It could reach more than 40 degree Celcius. One of the methods to make the fruit not easily damaged at the post-harvest is by applying the pre-cooling method. It aims to retard the respiration, minimize the vulnerability from the attack of micro-organisms, reduce the loss of water, and reduce the cooling load on the carrier and also the storage system. The fruit thermal conductivity and diffusivity values become the first important data to be recognized in order to determine the precooling time process to the desired temperature. The research is aimed to recognize the watermelon thermal conductivity and diffusivity values. Modeled as a ball shaped object, the watermelon is chilled in the cooler by natural convection. In the cooling process, the changing temperature in its fruit was recorded in the computer by using IC LM 35 sensors, every 5 minutes. The sensor was set in the ambient, on the fruit surface and in it's inside with five different radius. There were three of watermelon by weight as 2,590 kg, 3,925 kg and 5,195 kg had been observed. In this research, the calculation of the watermelon thermal conductivity and diffusivity was based on the thermal resistance and capacity formulation. By numerical method, the average value of watermelon thermal conductivity was calculated as 0,438 W/m°C. Meanwhile the average value of thermal diffusivity was calculated as  $1,137 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ .*

**Keywords:** pre-cooling, thermal conductivity, thermal diffusivity and watermelon

### INTISARI

Pada daerah tropika, sewaktu buah dipanen temperaturnya sama dengan temperatur lingkungan, yang bisa mencapai lebih dari 40 °C. Agar buah tidak mudah rusak, salah satu cara penanganan buah paska panen adalah dengan cara pendinginan-awal. Tujuan umum pendinginan-awal adalah untuk memperlambat respirasi, memperkecil kerentanan terhadap serangan mikro organisme, mengurangi kehilangan air, dan mengurangi beban pendinginan pada pengangkutan maupun sistem penyimpanan. Untuk menentukan lama proses pendinginan-awal sampai temperatur yang diinginkan, maka nilai konduktivitas dan difusivitas termal buah menjadi data awal yang penting untuk diketahui. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai konduktivitas termal ( $k$ ) dan difusivitas termal ( $\alpha$ ) buah semangka. Dengan pendekatan model dianggap berbentuk bola, buah semangka didinginkan di dalam kotak pendingin (*cooler*) secara konveksi alami. Selama mengalami proses pendinginan, perubahan temperatur pada buah tersebut direkam pada komputer menggunakan sensor IC LM 35 setiap interval waktu 5 menit. Sensor dipasang di sekitar buah, pada permukaan buah dan di dalam buah pada lima posisi jari-jari berbeda. Ada tiga buah semangka yang diteliti dengan berat masing-masing adalah 2,590 kg, 3,925 kg dan 5,195 kg. Pada penelitian ini, perhitungan nilai konduktivitas termal dan difusivitas termal buah semangka menggunakan formulasi kapasitas dan tahanan termal. Dengan menggunakan metode numerik beda hingga, diperoleh nilai rerata konduktivitas termal buah semangka sebesar 0,438 W/m°C. dan nilai rerata difusivitas termalnya  $1,137 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ .

**Kata kunci:** pendinginan awal, konduktivitas termal, difusivitas termal dan buah semangka

---

<sup>1</sup>kelikjohan@yahoo.co.id

## PENDAHULUAN

Penanganan yang baik terhadap produk hortikultura akan memberikan nilai tambah bagi para petani, pebisnis dan industri pengguna. Penyimpanan buah dalam bentuk segar dapat menghindarkan eksekusi suplai dan menjamin suplai pasar yang teratur (Pantastico, 1975). Menurut Akamine dan Kitagawa (1963) dalam Pantastico (1975), suhu tinggi merusak mutu simpan buah-buahan. Suhu tinggi hasil panen tidak dapat dihindarkan terutama apabila pemanenan terjadi di daerah tropika. Masalah yang sering dijumpai pada pemanenan buah-buahan di daerah tropis adalah suhu pada waktu panen. Sewaktu dipanen temperatur buah sama dengan temperatur lingkungan yang bisa mencapai lebih dari 40 °C.

Setiap buah ketika dipanen masih aktif melakukan proses metabolisme termasuk respirasi didalamnya ditandai dengan adanya kenaikan temperatur dan timbulnya uap air di sekitar buah. Respirasi merupakan faktor biologis yang menyebabkan terjadinya perpindahan kalor pada bahan. Sebagian buah dan sayuran setelah pemanenan mempunyai laju respirasi tinggi dan kemudian menurun selang beberapa hari. Menurut Winarno (1981), respirasi akan terus berlangsung sampai bahan menjadi mati dan kemudian membusuk.

Salah satu cara untuk mengatasi hal tersebut biasanya dilakukan pendinginan awal, dengan maksud untuk menghilangkan panas produk setelah pemanenan, sebelum penyimpanan produk dilakukan.

Tujuan umum pendinginan adalah untuk memperlambat respirasi, memperkecil kerentanan terhadap serangan mikro organisme, mengurangi kehilangan air, dan mengurangi beban pendinginan pada kendaraan pengangkut maupun sistem penyimpanan.

*Pre-cooling* secara umum berarti pembuangan panas secepat mungkin dari dalam buah segar dan sayuran setelah pemanenan, Winarto (2007).

Metode pendinginan-awal yang umum dilakukan biasanya menggunakan metode konveksi alamiah/bebas dengan cara mencelupkan produk ke dalam air

yang ditampung dalam bak penampung dan sekaligus melakukan pencucian (Winarto, 2007). Cara ini kurang efektif karena pada media pendingin akan terjadi akumulasi kalor sehingga suhu media pendingin tersebut akan mengalami kenaikan.

Agar proses pendinginan buah dapat lebih efektif, maka dapat dilakukan dengan cara konveksi paksa, misalkan buah dilewatkan pada lorong dengan menggunakan sistem konveyor (ban berjalan), sembari didinginkan dengan pancaran air/fluida pendingin.

Untuk menentukan lama proses pendinginan awal (seperti kedua contoh di atas) sampai temperatur yang diinginkan, maka nilai konduktivitas dan difusivitas termal buah menjadi data awal yang penting untuk diketahui.

Atas dasar itu maka penulis melakukan kajian eksperimental terhadap konduktivitas dan difusivitas termal buah semangka, dengan cara mendinginkannya secara konveksi alami.

Setiyo, Y., (1995) melakukan penelitian berjudul Kajian terhadap konduktivitas dan difusivitas panas buah apel. Dalam penelitiannya dihasilkan nilai difusivitas panas buah apel antara  $1,3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  sampai dengan  $4,0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ , serta nilai konduktivitas termal antara  $0,233 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  sampai  $0,610 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ .

Winarto (2007), melakukan penelitian berjudul "Model matematika perpindahan panas pada pendinginan awal (*pre-cooling*) buah berbentuk bola pejal dengan penyemprotan air dingin-udara. Pada penelitian ini digunakan buah apel sebagai bahan uji cobanya.

Pada penelitian ini dilakukan percobaan pendinginan terhadap buah semangka, dengan asumsi bahwa buah semangka berbentuk bola, dengan material (bahan) homogen, dan temperatur awal terdistribusi merata.

Dengan menerapkan hukum I termodinamika pada aliran kalor konduksi dengan menggunakan metode tahanan termal dan formulasi kapasitas, maka setiap unsur volume dapat dipandang sebagai suatu node yang dihubungkan oleh tahanan termal ke unsur-unsur di sebelahnya. Jika energi dalam node i dapat dinyatakan dengan kalor spesifik

dan temperatur, maka laju perubahannya dinyatakan sebagai persamaan berikut (Holman, 1984) :

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \rho c \Delta V \frac{T_1^{P+1} - T_1^P}{\Delta t} \dots (1)$$

Kapasitas termal didefinisikan sebagai berikut :

$$C_i = \rho_i c_i \Delta V_i \dots \dots \dots (2)$$

Formulasi kapasitas-tahanan untuk neraca energi pada suatu node i adalah sebagai berikut.

$$q_i + \sum_j \frac{T_j^P - T_i^P}{R_{ij}} = C_i \frac{T_i^{P+1} - T_i^P}{\Delta t} \dots (3)$$

Apabila tidak terjadi pembangkitan kalor di dalam unsur volume, maka  $q_i$  sama dengan nol. Neraca energi pada kondisi batas konveksi (permukaan buah), berlaku:

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{\text{permukaan}} = h(T_w - T_{\infty}) \dots (4)$$

sedangkan pada pusat buah ( $r = 0$  cm) berlaku:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \dots \dots (5)$$

Untuk aliran kalor dalam arah radial yang terjadi pada bola berjari-jari dalam ( $r_i$ ) dan luar ( $r_o$ ), maka tahanan termal dinyatakan sebagai persamaan berikut.

$$R = \frac{r_o - r_i}{4\pi k r_i r_o} \dots \dots (6)$$

Untuk buah dan sayuran (bahan makanan dengan kandungan air tinggi), panas jenisnya (di atas titik beku) dapat ditentukan dengan persamaan Siebel, dalam Ashrae Handbook (1993) sebagai persamaan berikut:

$$c_p = 0,0335 \alpha + 0,84 \dots (7)$$

Untuk perpindahan kalor konveksi bebas (alami) yang terjadi pada bola, nilai koefisien perpindahan kalor konveksi rata-rata dicari dengan persamaan Yuge, T. dalam Kreith (1991), sebagai berikut :

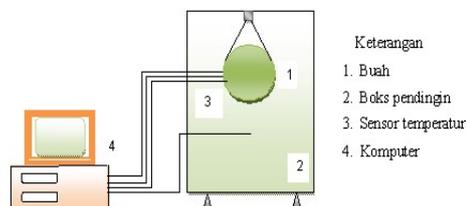
$$\overline{Nu}_D = 2 + 0,45(Gr_D Pr)^{\frac{1}{4}} \dots (8)$$

Difusivitas termal ( $\alpha$ ) merupakan fungsi konduktivitas termal ( $k$ ), panas-jenis ( $c_p$ ) dan rapat massa ( $\rho$ ), yang dinyatakan sebagai persamaan berikut :

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \dots (9)$$

Buah yang digunakan pada penelitian ini adalah semangka yang mempunyai klasifikasi berikut. Termasuk suku *Cucurbitacea*, dengan nama ilmiah *Citrullus Vulgaris Schard*, yang masuk tipe buah mentimun (*Pepo*). Ukuran buah tersebut dengan jari-jari rerata: 8,793 cm, 9,926 cm dan 10,977 cm, masing-masing dengan berat 2,590 kg, 3,925 kg dan 5,195 kg.

Gambar 1 adalah sketsa alat pendinginan buah yang digunakan pada penelitian ini.



**Gambar 1.** Sketsa Alat Pendinginan Buah

Pada penelitian ini, untuk mengetahui nilai konduktivitas dan difusivitas termal buah semangka, dilakukan dengan cara sebagai berikut. Buah semangka didinginkan di dalam ruang pendingin (*cooler*), sehingga terjadi perpindahan kalor konveksi alami. Fokus penelitian ini adalah pada studi konduktivitas dan difusivitas termal saja, tidak menyangkut metode *pre-cooling*. Sedangkan pemilihan modus perpindahan kalor konveksi alami didasarkan pada lebih simpelnya peralatan. Perubahan temperatur bagian semangka dalam arah radial (enam titik pada jari-jari berbeda) serta temperatur lingkungan konveksi ( $T_{\infty}$ ) diamati setiap interval waktu ( $\Delta t$ ) 5 menit.

Perubahan temperatur buah pada posisi jari-jari berbeda, selama proses pendinginan direkam oleh komputer. Sensor temperatur yang digunakan adalah IC LM 35, yang murah, namun keluaran yang dihasilkan linier terhadap perubahan temperatur. Sensor-sensor tersebut dipasang pada buah sebanyak enam lokasi dan satu sensor lagi untuk mendeteksi temperatur di sekitar buah ( $T_{\infty}$ ), seperti terlihat pada Gambar 5. Rapat massa buah semangka dicari

dengan cara menimbang buah tersebut dan mengukur volume air yang dipindahkannya, menggunakan gelas ukur. Kadar air yang terkandung dalam buah diukur dengan cara membandingkan berat basah dan setelah buah dikeringkan menggunakan oven.

Untuk selanjutnya, perhitungan nilai konduktivitas dan difusivitas termal menggunakan metode numerik dengan program Excel.

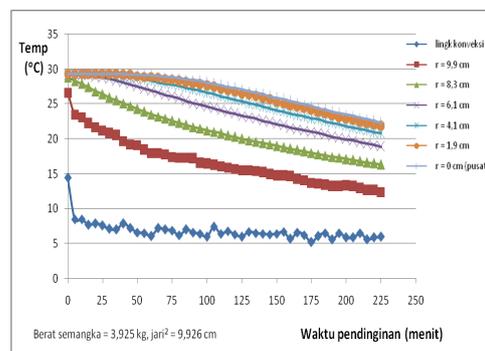
**PEMBAHASAN**

Tabel 1. Temperatur buah semangka (R = 9,926 cm), selama pendinginan

Wkt min	Temperatur (oC), pada jari-jari (cm)						
T?	0	1,9	4,1	6,1	8,3	9,9	
0	14,4	26,6	28,8	29,1	29,1	29,2	29,3
5	8,5	23,5	28,3	29,1	29,2	29,2	29,3
10	8,5	23,1	27,9	29,1	29,2	29,2	29,3
15	7,7	22,2	27,4	29,1	29,2	29,2	29,3
20	7,9	21,7	26,8	28,9	29,2	29,2	29,3
25	7,6	21,2	26,4	28,8	29,1	29,2	29,3
30	7,1	20,8	25,9	28,6	29,1	29,2	29,3
35	7,0	20,5	25,5	28,3	29,0	29,2	29,3
40	7,9	19,7	25,1	28,1	28,9	29,1	29,3
45	7,2	19,2	24,7	27,8	28,8	29,1	29,2
50	6,6	19,1	24,3	27,5	28,7	29,0	29,2
55	6,5	18,4	23,9	27,2	28,5	28,9	29,1
60	6,1	18,0	23,5	26,9	28,3	28,9	29,1
65	7,2	18,0	23,2	26,6	28,1	28,8	29,0
70	7,0	17,8	22,9	26,3	27,9	28,6	28,9
75	6,9	17,4	22,6	26,1	27,8	28,5	28,8
80	6,2	17,3	22,3	25,8	27,6	28,3	28,7
85	7,0	17,3	22,0	25,4	27,3	28,1	28,5
90	6,6	17,2	21,7	25,1	27,1	27,9	28,4
95	6,4	16,5	21,5	24,9	26,9	27,8	28,3
100	6,0	16,4	21,2	24,6	26,6	27,6	28,1
105	7,4	16,2	21,0	24,4	26,4	27,4	27,9
110	6,4	16,1	20,8	24,1	26,1	27,2	27,7
115	6,8	15,9	20,5	23,8	25,9	27,0	27,4
120	6,3	15,7	20,3	23,6	25,6	26,8	27,3
125	6,0	15,5	20,0	23,3	25,4	26,5	27,1
130	6,7	15,5	19,8	23,1	25,1	26,3	26,8
135	6,5	15,4	19,6	22,9	24,9	26,1	26,6
140	6,4	15,2	19,4	22,6	24,6	25,8	26,4
145	6,3	14,9	19,2	22,4	24,4	25,6	26,1
150	6,4	14,7	19,0	22,1	24,1	25,3	25,9
155	6,7	14,7	18,8	21,9	23,9	25,1	25,7
160	5,7	14,6	18,6	21,6	23,6	24,8	25,4
165	6,6	14,3	18,4	21,4	23,4	24,6	25,2
170	6,2	14,1	18,2	21,2	23,2	24,4	24,9
175	5,2	13,7	18,0	21,0	22,9	24,1	24,7
180	6,1	13,6	17,8	20,8	22,8	23,8	24,4
185	6,5	13,4	17,6	20,6	22,5	23,6	24,2
190	5,6	13,2	17,4	20,3	22,3	23,4	23,9
195	6,5	13,2	17,3	20,1	22,1	23,1	23,7
200	5,9	13,3	17,1	19,9	21,8	22,9	23,5
205	5,9	13,2	17,0	19,8	21,6	22,7	23,3
210	6,5	12,9	16,8	19,5	21,4	22,4	23,0
215	5,6	12,6	16,6	19,3	21,2	22,2	22,8
220	5,9	12,6	16,5	19,1	20,9	22,0	22,6
225	6,0	12,4	16,3	18,9	20,8	21,8	22,3

Tabel 1 adalah salah satu hasil pengamatan perubahan temperatur buah semangka (berat 3,925 kg), pada jari-jari 0 (pusat buah); 1,9; 4,1; 6,1; 8,3 dan 9,9 cm (permukaan buah), serta temperatur lingkungan konveksi, selama buah tersebut mengalami pendinginan konveksi alami. Hasil pengamatan tersebut disajikan juga dalam bentuk kurva, yaitu Gambar 2. Hasil pengamatan dua buah semangka lainnya disajikan pada Gambar 3 dan Gambar 4.

Pada Tabel 1 atau Gambar 2, 3 &4, terlihat bahwa nilai temperatur pendinginan (lingkungan konveksi) berfluktuasi, hal ini karena pengaruh seting *cut-in/cut-out* thermostat pada cooler.

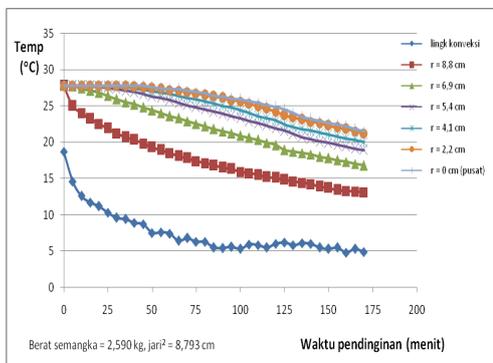


Gambar 2. Sejarah temperatur pendinginan buah semangka (berat 3,925 kg, jari-jari rerata 9,926 cm)

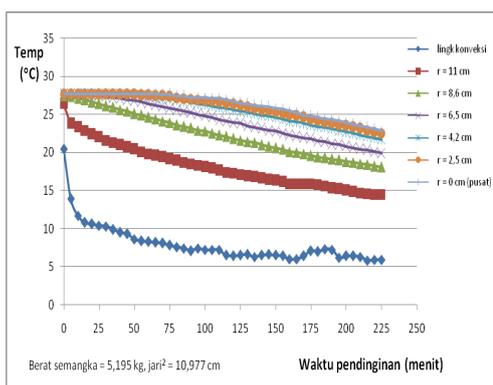
Pada Gambar 2, 3 & 4 terlihat bahwa pada awal pendinginan, bagian tepi buah (permukaan) mengalami laju pendinginan yang terbesar, kemudian menurun pada akhir pendinginan. Hal ini dipengaruhi oleh besarnya gradien temperatur pada permukaan buah, yang mengakibatkan internal energi bagian tersebut cepat menurun.

Besarnya koefisien perpindahan kalor konveksi alami yang diperoleh dari persamaan (8) adalah merupakan nilai rerata. Berdasarkan hasil penelitian perpindahan kalor konveksi alami pada silinder panas horizontal (hampir sama dengan bola), menunjukkan bahwa foto interferensi yang menggambarkan medan suhu di sekelilingnya, nilainya semakin besar, dimulai dari posisi permukaan bawah menuju ke atas. Hal ini akan mengakibatkan nilai koefisien perpindahan

kalor konveksi alami lokal pada arah tersebut berbeda, semakin ke atas nilainya semakin kecil (Kreith, 1991).



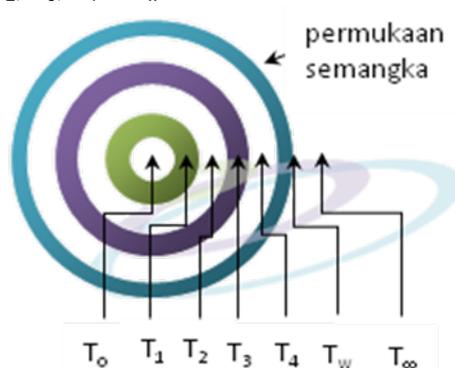
Gambar 3. Sejarah temperatur pendinginan buah semangka (berat 2,590 kg, jari-jari rerata 8,793 cm)



Gambar 4. Sejarah temperatur pendinginan buah semangka (berat 5,195 kg, jari-jari rerata 10,977 cm)

Atas dasar pernyataan di atas, maka pada penelitian ini, nilai koefisien konveksi yang digunakan dalam perhitungan adalah koefisien pada posisi arah horizontal dari pusat, agar nilai ini sama atau mendekati nilai rerata untuk seluruh permukaan bola (buah). Untuk itu pada penelitian ini pemasangan sensor temperatur dimulai dari pusat, kemudian pada jari-jari berbeda dan permukaan buah, pada arah radial serta horizontal, dan berakhir pada posisi lingkungan buah (*ambient*), seperti terlihat pada Gambar 5. Asumsi lainnya adalah mengabaikan terjadinya respirasi. Perhitungan nilai konduktivitas termal dilakukan dengan menggunakan metode numerik. Bola di-

bagi menjadi beberapa bagian yaitu terdiri dari satu elemen (unsur volume) berupa bola dan lima elemen berupa kulit bola, dengan asumsi masing-masing elemen, temperturnya diwakili oleh  $T_0$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$  &  $T_w$ .



Gambar 5. Posisi sensor/temperatur pada buah semangka ( $T_0$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$  &  $T_w$ ) dan *ambient* ( $T_\infty$ )

Ada tiga kriteria persamaan keseimbangan energi guna menyelesaikan perhitungan numerik tersebut, yaitu :

Pada elemen berbentuk bola, total energi yang menuju elemen tersebut adalah kalor konduksi berasal dari elemen berbentuk kulit bola di luarnya, besarnya sama dengan kenaikan internal energinya.

Pada elemen berbentuk kulit bola (interior), total energi yang menuju elemen tersebut adalah kalor konduksi berasal dari elemen sekelilingnya, besarnya sama dengan kenaikan internal energinya.

Pada elemen berbentuk kulit bola (eksterior), berbatasan dengan lingkungan konveksi, total energi yang menuju elemen tersebut adalah kalor konduksi dari elemen berbentuk kulit bola sebelah dalamnya dan kalor konveksi, besarnya sama dengan kenaikan internal energinya.

Dengan menerapkan persamaan keseimbangan energi yang sesuai untuk masing-masing elemen, nilai konduktivitas termal dihitung untuk setiap tambahan interval waktu. Cacah nilai konduktivitas termal yang diperoleh berbeda-beda untuk setiap elemen yang berbeda. Hal ini tergantung dari posisi elemen (biasanya elemen bagian dalam cacahnya lebih sedikit) dan tingkat kestabilan proses.

Hasil perhitungan nilai rerata konduktivitas termal yang diperoleh dari ke-tiga buah semangka tersebut adalah sebesar 0,438 W/m°C. Perhitungan tersebut menghasilkan deviasi standar ( $\sigma$ ) sebesar 0,191 W/m°C, dengan varian ( $\sigma^2$ ) sebesar 0,036 (W/m°C)<sup>2</sup>. Sedangkan nilai rerata difusivitas termal, sesuai persamaan (9) diperoleh sebesar 1,137x10<sup>-7</sup> m<sup>2</sup>/s.

Dari hasil penelitian ini menunjukkan bahwa nilai konduktivitas termal rerata buah semangka sedikit lebih besar bila dibandingkan dengan harga tengah buah apel, hasil penelitian Setiyo, Y. (1996), yaitu antara 0,233 sampai 0,610 W/m°C. Hal ini dapat difahami karena kandungan air pada buah apel lebih sedikit dibandingkan dengan buah semangka. Dengan demikian hasil penelitian ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan, yaitu tentang bahan makanan dengan kandungan air. Berdasarkan *Mawell-Eucken equation* (Ashrae Handbook, 1993) menunjukkan bahwa nilai konduktivitas termal bahan (di atas titik beku) tersebut, naik dengan bertambahnya kandungan air, demikian juga dengan bertambahnya temperatur.

Dari uraian di atas maka dapat disimpulkan juga bahwa nilai difusivitas termal buah semangka sedikit lebih besar dibandingkan dengan buah apel, karena nilai difusivitas termal berbanding lurus dengan nilai konduktivitas termal, menurut persamaan (9). Di samping itu, nilai panas jenis buah semangka lebih besar dibanding buah apel, sesuai persamaan (7), atau menurut Ashrae Handbook (1993), serta rapat massa buah semangka lebih besar dibanding buah apel.

### KESIMPULAN

Beberapa hal yang dapat disimpulkan dari hasil penelitian ini, adalah sebagai berikut: Hasil perhitungan nilai rerata konduktivitas termal buah semangka adalah sebesar 0,438 W/m°C, dengan deviasi standar ( $\sigma$ ) sebesar 0,191 W/m°C, dan varian ( $\sigma^2$ ) sebesar 0,036 (W/m°C)<sup>2</sup>. Nilai rerata difusivitas termal sebesar 1,137x10<sup>-7</sup> m<sup>2</sup>/s.

Nilai konduktivitas dan difusivitas termal buah semangka sedikit lebih besar bila dibandingkan dengan buah apel.

### Daftar Notasi

$a$	= kandungan air, %
$\alpha$	= difusivitas termal, m <sup>2</sup> /s
$\beta$	= koefisien muai panas, 1/°C $= \frac{\rho_{00}-\rho}{\rho(T-T_{00})}$
$C_i$	= kapasitas termal unsur volume node i, J/°C
$c_i$	= panas jenis untuk node i, J/kg °C
$c_p$	= panas jenis, J/kg °C
$D$	= diameter bola (semangka), m
$E$	= internal energy, J
$Gr_D$	= Bilangan Grashof $= \frac{\rho^2 g \beta \Delta T D^3}{\mu^2}$
$g$	= percepatan gravitasi, m/s <sup>2</sup>
$h$	= koefisien perpindahan kalor konveksi, W/m <sup>2</sup> °C
$k$	= konduktivitas termal, W/m °C
$\mu$	= viskositas dinamik, Ns/m <sup>2</sup>
$Nu_D$	= Bilangan Nusselt $= \frac{h D}{k}$
$Pr$	= Bilangan Prandtl $= \frac{c_p \mu}{k}$
$\rho$	= rapat massa, kg/m <sup>3</sup>
$q_i$	= laju pembangkitan kalor pada node i, W
$R$	= tahanan termal, °C/W
$R_{ij}$	= tahanan termal antar unsur volume, °C/W
$r_i$	= jari-jari dalam, m
$r_o$	= jari-jari luar, m
$T$	= temperatur, °C
$T_w$	= temperatur permukaan buah, °C
$T_\infty$	= temperatur kotak pendingin (cooler)/lingkungan konveksi, °C
$\Delta T$	= beda temperatur, °C
$t$	= waktu, s
$\Delta t$	= tambahan waktu, s
$\Delta V$	= unsur volume, m <sup>3</sup>

### Subskrip

$D$	= menunjukkan bentuk bola
$n$	= posisi ke n
$n+1$	= posisi ke n+1
$n-1$	= posisi ke n-1
$i$	= node yang ditinjau
$j$	= node sekitar

Superskrip

$p$  = menunjukkan waktu

$p+1$  = setelah tambahan waktu

#### DAFTAR PUSTAKA

Ashrae Handbook, 1993, *Fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta

Holman, J.P., 1993, *Perpindahan Kalor*, Erlangga, Jakarta.

Kreith, F., 1991, *Prinsip-prinsip Perpindahan Panas*, Erlangga, Jakarta.

Pantastico, E.B., 1993, *Fisiologi Pasca Panen Penanganan dan Pemanfaatan Buah-buahan dan Sayur-sayuran di Daerah Tropika dan Sub tropika*. Gadjah Mada University Press. Yogyakarta.

Pitts, D.R., Sissom, L.E., 1983, *Theory and Problem of Heat Transfer*, Asian Student Edition

Setiyo, Y., Kajian terhadap Konduktivitas dan Difusivitas Panas Buah Apel, *Majalah Ilmiah Teknologi Pertanian*, Vol. 2, No. 2, 1996

Winarno, 1981, *Fisiologi Pasca Panen*, Sastra Hudaya, Yogyakarta

Winarto dan Bastaman Syah, 2007, Model Matematika Perpindahan Panas Pada Pendinginan Awal (Pre-Cooling) Buah Berbentuk Bola Pejal Dengan Penyemprotan Air Dingin Udara, *Media Teknik*, No. 4, Tahun XXIX, Edisi November 2007