

PENDINGINAN PARTIKEL BERBENTUK BOLA DALAM TUMPUKAN OLEH PENGUAPAN AIR PERMUKAAN DENGAN ALIRAN UDARA PAKSA DALAM PIPA

Budi Rahardjo*)

ABSTRACT

Fruits and other horticultural products are commonly harvested at high atmospheric temperatures. Since high temperatures significantly make the respiration rate increase and may reduce the quality of the products, the products are necessarily cooled as soon as possible. Accordingly the objectives of the studies were to develop models for estimating temperature distribution on spherical particles stacked in pipe and cooled by water surface evaporation. The temperature distributions on particles were based on the transient cooling on spheres. The temperature gradient along the pipe was related to the pipe size, particle size, particle position and air flow rate. Dimensional analysis was used to relate the particle average temperature to the pertinent parameters. The average temperature was calculated using the Heisler chart based on particle center temperature. The results indicate that the average temperatures of the particles can be estimated based on the pertinent parameters. The formulae of the exact solution of the transient heat transfer on spheres can be used to estimate the temperature of the particle during evaporative cooling.

Keywords : Adiabatic evaporation, evaporative cooling, particle cooling, tower cooling.

PENDAHULUAN

Suhu tinggi dapat dikatakan merupakan pemicu kerusakan produk pertanian segar. Pada umumnya hasil pertanian termasuk golongan produk mudah rusak (*perishable*). Produk tersebut dalam waktu singkat akan mengalami penurunan kualitas. Hasil pertanian pangan seperti halnya buah buahan dan sayuran umumnya dipanen pada pagi hari sampai siang pada saat lingkungan atmosfer bersuhu tinggi (35-42°C). Dengan suhu tinggi ini, respirasi bahan pangan akan berlangsung sangat cepat, akibatnya kualitas bahan pangan akan berkurang dengan cepatnya. Laju respirasi sangat dipengaruhi oleh suhu. Kenaikan suhu sekitar 10°C dapat melipatduakan laju respirasi. Karena itu pendinginan awal sebelum diproses lebih lanjut diperlukan untuk mengurangi laju respirasi sehingga dapat menekan laju kerusakan (Wills et al., 1978).

Pendinginan awal perlu dilakukan agar dapat segera menekan laju kerusakan akibat suhu panen yang tinggi. Pendinginan awal umumnya dilakukan terpisah dari pendinginan dalam penyimpanan. Beban pendinginan awal selalu lebih tinggi dari pada beban pendinginan selama dalam penyimpanan. Banyak cara dapat dilakukan untuk pendinginan awal. Pendinginan awal diantaranya dapat dilakukan dengan secara menghembuskan udara dingin,

dengan menyiram air dingin atau dengan menyiram air dan kemudian dihembus dengan udara. Pendinginan dengan media yang didinginkan memerlukan alat pendingin mekanis sebagai pendinginan awal. Pendinginan dengan penyiraman dan disertai dengan penghembusan udara adalah salah satu cara yang lebih sederhana dan relatif lebih murah. Pendinginan dengan penyiraman dan disertai dengan penghembusan udara dianggap paling sederhana. Namun informasi tentang perkiraan riwayat suhu produk terbatas (Brookley dan Hershey, 1988; Coulson dan Richardson, 1987; Foust et al., 1980; Geancoplis, 1983).

Dengan adanya usaha untuk peningkatan produksi pertanian hortikultura perlu adanya usaha peningkatan penanganan lepas panen untuk menjaga kualitas bahan pangan. Penelitian pasca panen hasil hortikultura telah banyak dilakukan dalam rangka memperpanjang umur simpan bahan pangan. Pendinginan awal dengan penyiraman air dan disertai dengan hembusan udara dipertimbangkan sebagai cara yang cocok untuk dikembangkan di Indonesia. Usaha tersebut perlu ditunjang dengan penelitian pendinginan partikel yang memadai.

Berdasarkan hal tersebut maka penelitian ini bertujuan untuk menentukan parameter penting dalam pendinginan partikel dalam tumpukan dengan penguapan air permukaan dalam pipa dan mengembangkan model hubungan antara sebaran dan rerata suhu didalam partikel dengan parameter penentu selama pendinginan. Dengan model yang ada akan dibandingkan antara suhu pengamatan dengan suhu hasil perkiraan dengan model yang ada.

Penelitian ini akan mencakup masalah pendinginan secara pemindahan panas tak tunak (*transient heat transfer*). Pendinginan akan berlangsung secara adiabatik oleh penguapan air permukaan dengan aliran udara paksa (*forced convection*). Perpindahan panas dan perpindahan massa dipermukaan berlangsung bersamaan disertai dengan perpindahan panas tak tunak didalam partikel.

METODOLOGI

Teori. Pendinginan partikel oleh penguapan air dipermukaan berlangsung karena adanya penguapan air yang terdapat dipermukaan partikel. Jumlah panas yang dapat dipindahkan dari partikel akan sebesar jumlah panas yang dibutuhkan untuk penguapan air (Abbouda, 1992; 1992b; Furuta dan Hayakawa, 1992; Furuta et al., 1992; Hayakawa dan Furuta, 1992; Miktinac et al., 1992). Tetapan lapisan air permukaan δ adalah jauh lebih kecil dibandingkan dengan ukuran partikel maka lapisan air

*) Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Gadjah Mada Yogyakarta

dapat dianggap tidak akan merubah ukuran partikel. Demikian juga tebal lapis air δ sangat kecil sehingga massanya dapat diabaikan terhadap massa partikel sehingga pengaruh perubahan panas sensibel air dapat diabaikan.

Penguapan air permukaan akan berlangsung secara adiabatik. Media untuk pendingin dalam hal ini adalah air tersebut sendiri. Pada penguapan adiabatik maka suhu pendinginan akan berupa suhu basah udara pembawa uap air. Perubahan suhu basah air dapat dianggap kecil sehingga dapat dianggap konstan. Dengan asumsi dan kondisi tersebut maka perubahan suhu dalam partikel merupakan perpindahan panas tak tunak dengan suhu lingkungan berupa suhu basah udara. Pada pemindahan panas tak tunak dalam partikel tanpa ada pembangkitan energi, persamaan panas akan berupa persamaan berikut (Incropera dan DeWitt, 1988):

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \Delta^2 T \quad (1)$$

Kondisi batas di permukaan partikel adalah persamaan pemindahan panas konvektif dari media pendingin ke partikel yang dapat dikemukakan dengan persamaan berikut:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_f - T_m) \quad (2)$$

Penyelesaian persamaan (1) dan (2) untuk partikel beraturan berbentuk kubus, silinder dan bola banyak disajikan dalam pustaka (Incropera dan De Witt, 1988). Untuk partikel berbentuk bola dan dengan lama pendinginan yang cukup sehingga bilangan Fourier $Fo = (t/R^2) > 0.2$ maka suhu di titik pusat partikel akan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \theta_c &= \frac{T_c(t) - T_f}{T_c(0) - T_f} \quad (3) \\ &= \frac{4 \sin(\beta_1) - \beta_1 \cos(\beta_1)}{2\beta_1 - \sin(\beta_1)} \exp(-\beta_1^2 \frac{\alpha t}{R^2}) \\ &= C_1 \exp(-\beta_1^2 Fo) \end{aligned}$$

Konstan β_1 dalam persamaan (3) adalah akar pertama dari persamaan transidental sebagai berikut:

$$1 - \beta \cot(\beta) = B_1 = \frac{hR}{k} \quad (4)$$

Suhu di sembarang titik yang terletak berjarak r dari titik pusat bola akan dapat dikemukakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\theta_r = \frac{T_r(t) - T_f}{T_r(0) - T_f} = \theta_c \frac{\sin(\beta_1 \frac{r}{R})}{\beta_1 \frac{r}{R}} \quad (5)$$

Persamaan (5) merupakan penyelesaian persamaan (1) untuk menggambarkan riwayat suhu dalam partikel selama pendinginan. Parameter yang diperlukan untuk menggunakan persamaan (5) diatas merupakan sifat termis partikel. Sedangkan koefisien perpindahan panas permukaan h dalam persamaan (2) merupakan koefisien perpindahan permukaan dari air di permukaan ke partikel bola. Dengan kondisi tebal lapis air yang cukup kecil dan menempel erat dipermukaan maka harga h akan cukup besar sehingga harga bilangan Biot $Bi = hR/k$ dapat dianggap besar. Berdasarkan tersebut suhu permukaan akan sama dengan suhu air pendingin. Bilamana diperlukan harga nyata h dapat dicari dengan berdasarkan nisbah suhu seperti persamaan (5) untuk titik di permukaan dengan suhu titik tengah (Rahardjo dkk., 1998).

Beberapa bentuk grafik telah dikembangkan berdasarkan persamaan (3), (4) dan (5) untuk mempermudah penggunaannya. Demikian juga suhu rerata pengamatan pada partikel dapat dihitung dengan menggunakan grafik Heisler (Henderson dan Perry, 1977) yaitu dengan membandingkan suhu di titik pusat dan suhu rerata. Perbandingan tersebut dapat dikemukakan sebagai persamaan berikut:

$$\left[\frac{T_{p,av}(t) - T_u}{T_{p,c}(t) - T_u} \right]_{Obsv} = \left[\frac{T_{p,av}(t) - T_u}{T_{p,c}(t) - T_u} \right]_{Heis} \quad (6)$$

Dengan mengangakan (*digitizing*) grafik Heisler, program komputer dapat dikembangkan untuk menghitung suhu rerata partikel (Rahardjo dan Sastry, 1992). Dengan metode interpolasi yang ada nilai antar titik yang ada dapat dihitung (Chappra dan Canale, 1988). Dengan menggunakan riwayat suhu rerata partikel panas yang dipindahkan dari partikel seperti ditunjukkan pada persamaan (5) dapat ditentukan dan dikaitkan dengan parameter pendinginan.

Pada pendinginan partikel dalam tumpukan, perpindahan panas akan berlangsung lebih cepat pada lapisan tempat masuk aliran udara dimana pemaksa perpindahan (*driving force*) masih tinggi dan akan menurun semakin dekat dengan tempat keluar aliran udara. Suhu terdingin yang dapat dicapai di permukaan partikel akan sama dengan suhu basah udara penghembus T_w . Perubahan suhu udara akan sebanding dengan perubahan kelembaban udara. Semakin jauh dari titik masuk kelembaban udara akan semakin mendekati kelembaban udara jenuhnya. Dengan demikian kelembaban udara penghembus sebagai fungsi letak partikel dapat dikemukakan sebagai berikut:

$$\frac{H_u(x) - H_w}{H_u(x=0) - H_w} = \exp(-k_x x) \quad (7)$$

Konstan c ditentukan oleh koefisien perpindahan massa. Makin cepat laju penguapan akan makin besar harga konstan tersebut. Suhu rerata partikel yang dihitung dengan menggunakan grafik Heisler seperti yang dikemukakan pada

persamaan (6). Dengan berdasarkan persamaan penyelesaian analitis perpindahan panas tak tunak maka suhu rerata partikel dapat dikemukakan sebagai berikut:

$$\frac{T_{p.av}(t) - T_w}{T_{p.av}(t=0) - T_w} = \exp(-\beta^2 \frac{\alpha t}{R^2}) \quad (8)$$

Konstan β merupakan akar fungsi transidental yang ditentukan oleh bilangan Biot partikel. Karena suhu rerata partikel terdingin yang dapat tercapai akan sebesar suhu basah udara T_w maka dengan menggunakan referensi tersebut suhu rerata partikel dicari berdasarkan persamaan (8).

Pengaruh letak terhadap nisbah suhu akan setara dengan kelembaban udara seperti dikemukakan persamaan (7). Penggabungan kedua persamaan (7) dan (8) untuk memperkirakan nisbah suhu rata rata partikel dapat dikemukakan sebagai berikut:

$$\frac{T_{p.av}(x,t) - T_w}{T_{p.av}(t=0) - T_w} = \exp(k_x x) \exp(-\beta^2 \frac{\alpha t}{R^2}) \quad (9)$$

Sepertihalnya pada persamaan (5), pengaruh letak dalam persamaan (9) merupakan "lag time" nisbah suhu untuk mencapai nol seiring dengan bertambahnya waktu. "Lag time" akan dipengaruhi oleh kecepatan aliran udara penghembus dan kerapatan atau jumlah partikel. Makin tinggi kecepatan aliran udara dan makin jarang partikel yang didinginkan akan makin kecil "lag time" nya. Dengan menggunakan bilangan Reynolds berdasarkan ukuran pipa, nisbah jejari R partikel dengan jejari L pipa dan nisbah letak x dengan jejari L pipa riwayat suhu partikel dalam tumpukan dapat dimodelkan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{T_{p.av}(x,t) - T_w}{T_{p.av}(t=0) - T_w} = \exp[k_x Re^m (\frac{R}{L})^n (\frac{x}{L}) - \beta^2 \frac{\alpha t}{R^2}] \quad (10)$$

Suhu yang dikemukakan dengan persamaan (10) merupakan suhu rerata partikel. Untuk mencari suhu terpanas dalam partikel atau suhu titik pusat partikel dicari dengan menggunakan grafik Heisler seperti yang dikemukakan dengan persamaan (6). Demikian juga untuk mengetahui suhu di sembarang titik minat dalam partikel dapat dicari berdasarkan persamaan (5).

Sampel. Sampel untuk penelitian berupa bola yang dibuat dari kayu. Ukuran bola kayu terdiri 5 macam ukuran beragam berdiameter 2,4,6,8 dan 10 cm. Kayu pembuat bola adalah kayu jati yang terdapat di pasaran lokal. Sifat thermis kayu diperlihatkan pada Tabel 1.

Table 1. Sifat thermis dan fisikawi kayu untuk bola.

Uraian sifat fisikawi kayu	Besaran
Densitas ρ , kg/m ³	780
Panas jenis c_p , kJ/kg C	2,4
Konduktivitas k , W/m C	0,239
Difusitas panas a , m ² /s	1,28 10 ⁻⁷

Peralatan. Peralatan untuk penelitian berupa tabung tegak dari pralon yang dilengkapi dengan penghembus udara (blower). Rangkaian ini dilengkapi dengan pengukur suhu (thermocouple) di sampel dan di aliran udara (basah dan kering), pengukur kecepatan alir udara, manometer, sprayer dan pompa sirkulasi air atau pembasahan sampel selama pendinginan.

Pengukuran suhu. Suhu partikel diukur di titik tengah dan dipermukaan partikel. Letak partikel dipilih di tiga lokasi, di dasar tumpukan, di tengah dan di puncak tumpukan. Suhu udara diukur suhu kering dan suhu basah ditempat udara masuk dan keluar dari sistem. Suhu air diukur di tempat penampungan dan di titik sebelum penyemprot. Pengukur suhu digunakan thermocouple yang dilengkapi dengan penayang digital dengan 6 saluran.

Prosedur penelitian. Bola dibasahi dengan air terlebih dahulu. Suhu diukur di titik tengah dan permukaan. Untuk pengukuran riwayat suhu dalam tumpukan dilakukan dengan menumpuk bola kayu kedalam pipa penghembus dengan tinggi tumpukan sekitar 50 cm. Data meliputi riwayat suhu partikel, riwayat suhu kering dan suhu basah udara pendingin. Peubah meliputi tinggi tumpukan, kecepatan alir udara dan ukuran partikel. Program komputer dibuat untuk menghitung suhu rerata partikel dengan data pengukuran dan dari grafik Heisler yang diangkakan.

Analisis data. Hubungan peubah seperti dikemukakan dengan persamaan (7), (8) dan (9) dianalisis dengan analisis dimensi. Analisis data dilakukan dengan analisis regresi linear dengan program statistik yang ada (QPro, Borland).

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Penguapan air pada permukaan bola secara adiabatik dapat menurunkan suhu bola. Dengan menggunakan partikel berupa bola kayu, suhu bola dapat mendingin mencapai suhu basah udara. Pengamatan riwayat suhu bola dilakukan dengan secara pengamatan pada satu bola yang didinginkan dengan penguapan air permukaan. Riwayat suhu terpanas atau suhu di titik pusat partikel yang berupa bola kayu diperlihatkan pada Gambar (1). Pola riwayat suhu ini seperti halnya perpindahan panas tak tunak pada bola dengan suhu terdingin disekitar suhu basah udara. Dengan menggunakan grafik Heisler seperti dikemukakan persamaan (6) maka suhu rerata partikel dapat dihitung.

Suhu terdingin yang dapat dicapai umumnya sedikit lebih rendah daripada suhu basah terukur dengan sling thermometer. Suhu basah yang dapat dicapai dalam pendinginan oleh penguapan air di permukaan secara adiabatik dapat mencapai sekitar 25,4 C. Suhu ini sedikit lebih rendah dari pada suhu basah yang diukur dengan sling thermometer yang rerata selama percobaan sekitar 26,5-27,0 C. Hal ini mungkin dikarenakan adanya perbedaan kecepatan udara penghembus dengan kecepatan pemutar sling thermometer. Untuk percobaan pendinginan sampe bola dibiarkan mencapai suhu sekitar 34 - 37 C dengan secara menempatkan dalam ruang pemanas (oven). Sampe dibiarkan cukup lama dalam ruang pemanas agar mencapai suhu merata di seluruh partikel.

Riwayat suhu titik tengah partikel selama pendinginan dengan penguapan air permukaan diperlihatkan pada Gambar 1. Riwayat suhu rerata partikel dapat diduga dengan menggunakan persamaan (6). Untuk pendinginan partikel bola berdiameter 4 cm dan pengembusan dengan kecepatan udara rerata sekitar 0.11 m/s didapat hubungan sebagai berikut:

$$\frac{T_{p,av}(x,t) - T_w}{T_p(t=0) - T_w} = \exp(0,005x) \exp(-0,00152t) \quad (11)$$

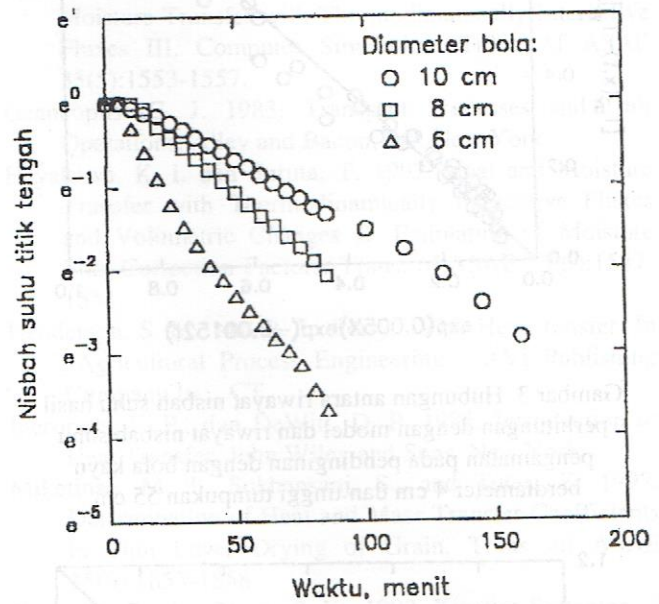
Hasil regresi persamaan (11) menghasilkan koefisien determinasi yang baik ($r^2=0.963$). Diagram acak antara nisbah suhu hasil pengamatan dengan nisbah suhu hasil perhitungan diperlihatkan pada Gambar (3). Demikian juga untuk perubahan diameter dan kecepatan penghembusan udara menghasilkan hubungan yang baik antara riwayat suhu rerata dengan letak dan lama pendinginan.

Konstan gradien distribusi nisbah suhu agaknya dipengaruhi oleh koefisien perpindahan panas dan laju kecepatan penguapan. Seperti halnya koefisien perpindahan panas, gradien nisbah suhu dipengaruhi oleh kecepatan penghembusan udara dan diameter partikel. Dari perhitungan dengan persamaan (5) didapatkan bilangan Biot sampel berkisar antara 50-160. Bilangan Biot ini cukup besar sehingga asumsi bahwa suhu permukaan partikel akan sama dengan suhu air dapat dibenarkan. Untuk partikel dengan bilangan Biot sebesar tersebut akar pertama β_1 persamaan transidental seperti dikemukakan dengan persamaan (4) berkisar antara 3,08 - 3,12. Kenaikan bilangan Biot lebih lanjut tidak akan menambah nilai akar fungsi transidental tersebut. Berarti dengan bilangan Biot yang cukup tinggi akar pertama persamaan transidental β_1 tidak bervariasi cukup besar. Sehingga karenanya dapat diambil rerata sebesar $\beta_1=3,1$ untuk diterapkan pada persamaan (11). Analisis riwayat suhu di titik tengah seperti yang diperlihatkan pada Gambar (1) dan (2) memperlihatkan akar pertama persamaan transidental β_1 berkisar antara 2,78 - 3,13. Hasil ini tidak berbeda jauh dengan rerata terhitung berdasarkan bilangan Biot partikel. Berdasarkan hasil pengamatan riwayat suhu rerata untuk semua data pendinginan didapatkan hasil regresi sebagai berikut:

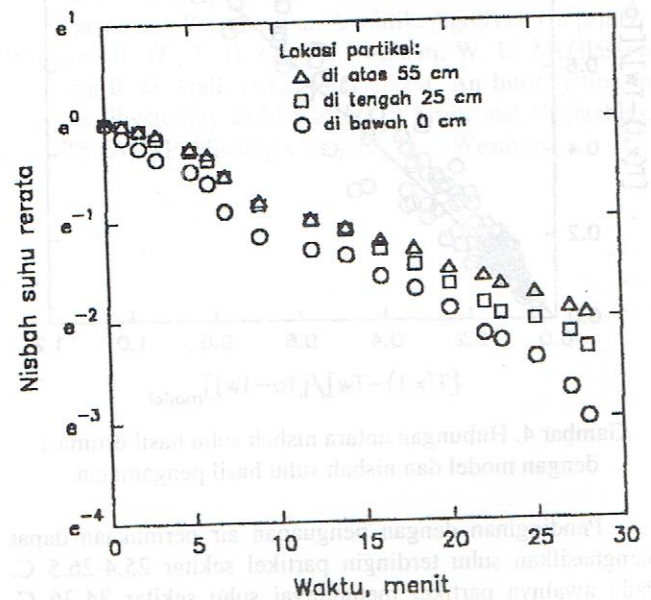
$$\frac{T_{p,av}(x,t) - T_w}{T_p(0) - T_w} = \exp[1,24x10^{-6} Re^{0,72} (\frac{R}{L})^{0,26} (\frac{x}{L}) - 3,1^2 \frac{\alpha}{R^2}] \quad (12)$$

Hasil regresi antara nisbah suhu dihitung dengan persamaan (12) tersebut dengan nisbah suhu hasil pengamatan dengan variasi letak, kecepatan aliran udara penghembus dan diameter bola sampel di dapatkan koefisien korelasi $r^2=0.923$.

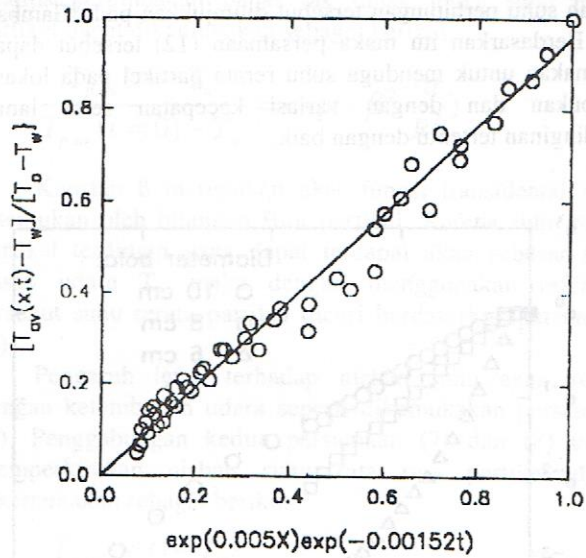
Diagram acak antara nisbah suhu observasi dengan nisbah suhu perhitungan tersebut ditunjukkan pada Gambar (4). Berdasarkan itu maka persamaan (12) tersebut dapat digunakan untuk menduga suhu rerata partikel pada lokasi tumpukan dan dengan variasi kecepatan serta lama pendinginan tertentu dengan baik.



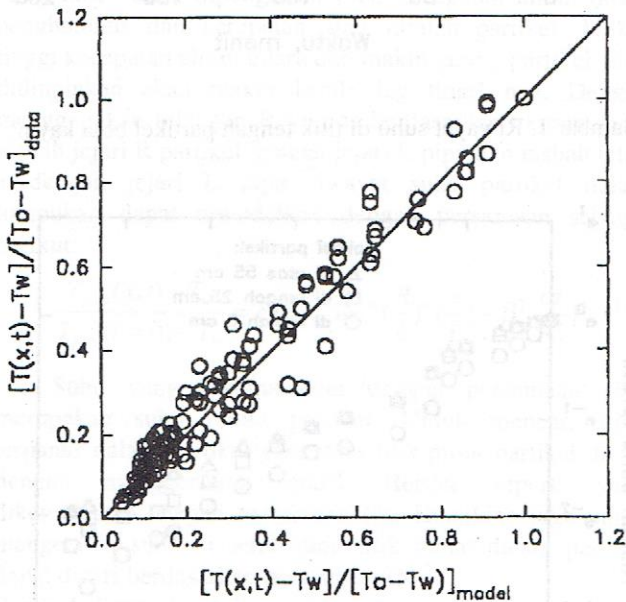
Gambar 1. Riwayat suhu di titik tengah partikel bola kayu.



Gambar 2. Laju perubahan suhu rerata partikel berdasarkan letak dari dasar tumpukan.



Gambar 3. Hubungan antara riwayat nisbah suhu hasil perhitungan dengan model dan riwayat nisbah suhu pengamatan pada pendinginan dengan bola kayu berdiameter 4 cm dan tinggi tumpukan 55 cm.



Gambar 4. Hubungan antara nisbah suhu hasil estimasi dengan model dan nisbah suhu hasil pengamatan.

Pendinginan dengan penguapan air permukaan dapat menghasilkan suhu terdingin partikel sekitar 25,4-26,5 C. Pada awalnya partikel mempunyai suhu sekitar 34-36 C. Pendinginan tersebut cukup bermanfaat sebagai pendinginan awal hasil pertanian. Pendinginan tersebut berlangsung relatif cepat. Persamaan hasil regresi (12) tersebut berdasarkan suhu rerata partikel dengan sifat fisikawi yang homogen di seluruh partikel. Untuk penerapan pada hasil pertanian yang berbentuk mendekati bola masih diperlukan

penelitian lebih lanjut. Buah hasil pertanian dapat diasumsikan berbentuk bola dengan volume yang sama dengan produk tersebut. Namun umumnya produk hasil pertanian tersusun dari beberapa macam bahan tak homogen (kulit, daging dan biji) dan dengan sifat fisikawi yang berbeda. Dengan kondisi tersebut maka distribusi dan suhu rerata produk pertanian tersebut tidak dapat dihitung dengan penyelesaian pasti (exact) perpindahan panas tak tunak maupun dengan grafik Heisler. Kiranya dengan menggunakan metoda beda hingga (finite difference) dapat dicari analogi grafik Heisler. Hasil perhitungan tersebut dapat digunakan untuk menghubungkan suhu rerata partikel dengan suhu setiap lapis pada buah atau hasil pertanian berbentuk bola lainnya. Bilamana hubungan suhu rerata tersebut dapat diformulasikan, maka persamaan hasil regresi (12) dapat digunakan untuk menduga suhu rerata hasil pertanian berbentuk bola dan selanjutnya dihubungkan dengan suhu di setiap lapis.

KESIMPULAN

Perubahan suhu titik tengah partikel karena pendinginan penguapan air dapat dikemukakan seperti halnya penyelesaian perpindahan panas tak tunak. Distribusi suhu rerata setiap partikel dalam tumpukan dapat dikemukakan dengan model eksponensial dari bilangan Fourier. Riwayat suhu partikel dalam pendinginan dengan penguapan adiabatik dapat dikemukakan dengan model eksponensial seperti halnya penyelesaian perpindahan panas tak tunak dengan akar persamaan transidental rerata sebesar 3,1. Pengaruh letak, kecepatan udara dan ukuran partikel merupakan faktor penentu "lag time" yang dapat dikemukakan dengan bilangan Reynolds, nisbah diameter partikel-pipa dan tinggi letak dalam tumpukan. Masih perlu diuji coba penerapannya pada hasil pertanian berbentuk bola.

DAFTAR LAMBANG

Simbol

- A = Luas permukaan, m².
- Bi = Bilangan Biot, hr/k.
- c_p = Panas jenis partikel, J/kg.
- D = Diameter partikel, m
- Fo = Bilangan Fourier, at/R².
- h = Koefisien perpindahan panas permukaan partikel, W/m² C.
- k = Konduktivitas panas partikel, W/m C.
- k_x = Konstant perubahan panas sesuai dengan jarak letak partikel.
- m = Bilangan konstan.
- n = Bilangan konstan.
- r = Jejari atau jarak dari titik pusat, m.
- R = Ukuran partikel, jejari luar bola atau silinder, m.
- Re = Bilangan Reynolds, rRU/m.
- t = Waktu, s.
- T = Suhu, °C.
- U = Kecepatan alir, m/s.

Huruf Yunani.

- α = Diffusitas panas partikel, k/Rcp.
 β = Akar persamaan transcendental $1 - \beta \cot(\beta) = Bi$.
 δ = Tebal lapisan air, m.
 Θ = Nisbah suhu, $[T(t) - Ta]/[T(t=0) - Ta]$.
 ρ = Massa jenis partikel, kg/m³.

Huruf bawah

- av = Rerata.
c = Titik tengah.
f = Air permukaan.
p = Partikel bola.
r = Titik berjejari r.
u = Udara luar.

DAFTAR KEPUSTAKAAN

- Abbouda, S. K., Chung, D. S., Seib, P. A., dan Song, A. 1992. Heat and Mass Transfer in Stored Milo. Part I. Heat transfer model. Trans. of ASAE 35(5):1569-1573.
- Abbouda, S. K., Seib, P. A., Chung, D. S., dan Song, A. 1992. Heat and Mass Transfer in Stored Milo. Part II. Mass transfer model. Trans. of ASAE 35(5):1575-1580.
- Brodkey, R. S., dan Hershey, H. C. 1988. Transport Phenomena. A Unified Approach. McGraw Hill Book Company. New York.
- Chappra, S. C., dan Canale, R. P. 1988. Numerical Methods for Engineers. McGraw Hill Book Company. New York.
- Coulson, J. M., dan Richardson, J. F. 1987. Chemical Engineering. Vol. I. (SI Units). Pergamon Press. New York.
- Foust, A. S., Wenzel, L. A., Clump, C. W., Maus, L., Andersen, L. B. 1980. Principles of Unit Operations. John Wiley and Sons. New York.
- Furuta, T dan Hayakawa, K. I. 1992. Heat and Moisture Transfer with Thermodynamically Interactive Fluxes I. Mathematical Model Development and Numerical Solution. Trans. of ASAE 35(5):1537-1546.
- Furuta, T., Tsukada, T. dan Hayakawa, K. I. 1992. Heat and Moisture Transfer with Thermodynamically Interactive Fluxes III. Computer Simulation. Trans. of ASAE 35(5):1553-1557.
- Geancopolis, C. J. 1983. Transport Processes and Unit Operations. Alley and Bacon, Inc. New York.
- Hayakawa, K. I. dan Furuta, T. 1992. Heat and Moisture Transfer with Thermodynamically Interactive Fluxes and Volumetric Changes II. Estimation of Moisture Flux Correction Factors. Trans. of ASAE 35(5):1547-1551.
- Henderson, S. M., and R. L. Perry. 1976. Heat transfer. In "Agricultural Process Engineering.", AVI Publishing Company Inc., CT.
- Incropera, F. P., dan DeWitt, D. P. 1985. Introduction to Heat Transfer. John Wiley and Sons. New York.
- Miketinac, M. J., Sokhansanj, S., and Tutek, Z. 1992. Determination of Heat and Mass Transfer Coefficients in Thin Layer Drying of Grain. Trans. of ASAE 35(6):1853-1858.
- Rahardjo, B., dan Sastry, S. K., 1992. Kinetics Softening of Potato Tissue During Cooking. J. Food and Bioproduct Proc. Eng.
- Rahardjo, B., Suhargo dan H. Tambunan. 1997. Pengukuran Koefisien Perpindahan Panas Permukaan Berdasarkan Persamaan Penyelesaian Analitik. AgriTech (In print).
- Wills, R. B. H., T. H. Lee, D. Graham, W. B. McGlasson dan E. G. Hall. 1982. Postharvest. An Intorduction to the Physiology and Handling of Fruits and Vegetables. The AVI Publishing Company Inc., Westport.