

Technical Paper

PEMODELAN DAN SIMULASI PENGERINGAN JAGUNG PIPILAN DALAM PENGERING ROTARI TUMPUKAN***Mathematical Modelling and Simulation of Shelled Corn Drying Using Rotary Bed Dryer***Leopold O. Nelwan¹, I Nengah Suastawa², dan Sulikah³**Abstract**

A mathematical model of shelled corn drying has been developed in order to simulate the distribution of drying air temperature and humidity as well as the grain moisture content in a rotary bed dryer. The model was based on heat and mass balance of cylindrical packed bed of grain with airflow passing through the bed. Whenever the air relative humidity is higher than the equilibrium moisture content, it is assumed the condensation process will be occurred. Finite difference method with Euler scheme was used to perform the computation. The result showed that the model developed can predict the distribution of grain temperature and moisture content. The simulation conducted showed that there would be a wide variation of moisture content and temperature if mixing was not applied during the drying process. Mixing was significantly reduced the moisture content variation until a maximum of 0.8% w.b.

Keywords: rotary bed drying, mathematical model, simulation, corn drying

Diterima: 5 Februari 2008; Disetujui: 26 Juni 2008

Latar Belakang

Teknik simulasi merupakan salah satu metode yang penting dalam mendisain suatu sistem pengeringan dan juga dalam memperoleh teknik pengoperasian yang sesuai. Umumnya, simulasi pada pengeringan dilakukan berdasarkan model matematis yang dibangkitkan dari keseimbangan termal dan massa. Pada pengeringan konvektif – yaitu pengeringan yang menggunakan gas (udara) sebagai media pengeringan – perpindahan panas dan massa merupakan akibat interaksi dari udara pengering dan produk yang dikeringkan.

Akhir-akhir ini berbagai model matematis untuk pengeringan tumpukan telah digunakan dan dikembangkan oleh peneliti-peneliti untuk berbagai produk pertanian. Garreiro *et al* (2003) mengembangkan model untuk tumpukan tebal dengan menggunakan penyederhanaan perubahan panas pada biji untuk pengeringan gabah. Rumsey dan Thompson (1984) mengasumsikan suhu yang sama antara suhu biji dan suhu udara pengering untuk mensimulasi tumpukan tebal walnut dengan hasil yang cukup baik. Mata dan Duarte (2003) mengembangkan model untuk tumpukan tebal dengan memasukkan faktor shrinkage untuk mensimulasi pengeringan tumpukan tebal kacang

tunggak. Sitompul *et al* (2001) menggunakan model dua fase dimana untuk fase biji digunakan untuk setiap partikel (biji tunggal), sedangkan untuk udara digunakan elemen ke arah tebal tumpukan. Srivastava dan John (2001) mengembangkan model tumpukan tebal dengan asumsi kondisi unsteady state pada udara pengeringan. Pada model-model yang telah dikembangkan umumnya masih ditujukan untuk pengeringan pada tumpukan dimana elemen-elemen yang digunakan diasumsikan dalam bentuk lempeng datar.

Pada paper yang paralel dengan paper ini sebuah pengering rotari tumpukan yang telah didisain dan diuji. Prinsip kerja dari pengering tersebut adalah udara yang telah dipanaskan dialirkan melalui tumpukan jagung pipilan dalam drum silindris sedemikian rupa sehingga aliran udara mengalir ke radial ketika melalui tumpukan. Drum silindris tersebut dapat diputar untuk menciptakan efek pengadukan biji.

Tujuan penelitian ini adalah mengembangkan model pengeringan untuk memprediksi perubahan parameter-parameter pengeringan yang mencakup suhu dan kelembaban udara serta kadar air jagung pada pengeringan dengan menggunakan pengering tipe rotari tumpukan.

¹ Bagian Energi dan Elektrifikasi Pertanian, Departemen Teknik Pertanian Fateta IPB, Gedung Fateta IPB, PO Box 220, lonelwan@yahoo.com

² Bagian Teknik Mesin dan Budidaya Pertanian, Departemen Teknik Pertanian Fateta IPB, Gedung Fateta IPB, PO Box 220

³ Alumni Departemen Teknik Pertanian Fateta IPB, Gedung Fateta IPB, PO Box 220

tumpukan biji tersebut. Oleh karena itu, laju perubahan uap air pada udara dalam tumpukan merupakan penjumlahan dari laju penambahan uap air serta laju uap air masuk dan keluar dari tumpukan yang dibawa oleh udara pengeringan. Secara matematis keseimbangan ini dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$0 = \frac{\partial}{\partial r} (2s\pi r L G H) + \rho_a 2s\pi r L \frac{\partial M}{\partial \theta} \quad (1a)$$

atau dapat dituliskan sebagai:

$$0 = r G_s \frac{\partial H}{\partial r} + r H \frac{\partial G_s}{\partial r} + G_s H + \rho_a r \frac{\partial M}{\partial \theta} \quad (1b)$$

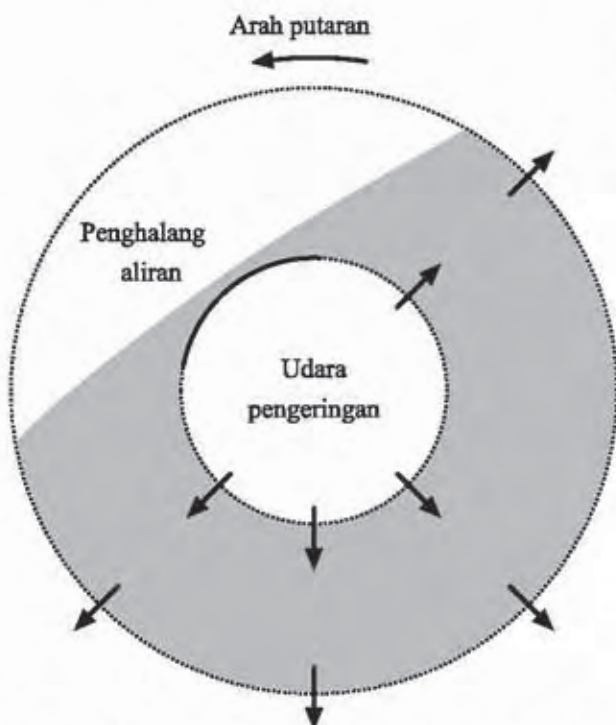
Karena $G_s = -r \frac{\partial G_s}{\partial r}$, maka

$$0 = G_s \frac{\partial H}{\partial r} + \rho_a \frac{\partial M}{\partial \theta} \quad (1c)$$

Dimana G_s adalah laju massa udara per satuan luas (kg/m^2), H adalah kelembaban mutlak (kg air/ kg udara kering), r adalah jarak ke arah radial (m), s adalah rasio antara keliling silinder dalam yang tertutup terhadap keliling lingkaran silinder dalam (-), L adalah panjang drum (m), M adalah kadar air (%b.k), adalah waktu (detik).

2. Keseimbangan termal pada udara dalam tumpukan

Interaksi termal yang berhubungan dengan udara dalam tumpukan dalam silinder pengering mencakup: panas yang dibawa aliran udara, perpindahan panas secara konvektif dengan biji serta perpindahan panas



Gambar 2. Aliran udara arah radial pada pengering (tampak arah sumbu putar)

sehubungan dengan perpindahan uap. Dengan asumsi gerakan aliran udara hanya terjadi pada arah jari-jari silinder dan udara dengan cepat mencapai keseimbangan maka persamaan keseimbangan termal pada udara dalam tumpukan dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$0 = \frac{\partial}{\partial r} (2s\pi r L G_s h) + h_{cv} 2s\pi r L (t_a - t_g) - \left(\rho_a c_{p,w} 2s\pi r L \frac{\partial M}{\partial \theta} t_s + \rho_a 2s\pi r L \frac{\partial M}{\partial \theta} h_{fg} \right) \quad (2a)$$

Dimana s adalah rasio antara keliling silinder dalam yang tertutup terhadap keliling lingkaran silinder dalam.

Dengan menggunakan persamaan (1c) maka melalui manipulasi matematis persamaan (2a) dapat ditulis menjadi:

$$0 = G_s (c_{p,a} + c_{p,s} H) \frac{\partial t_a}{\partial r} + \left(-\rho_a c_{p,s} \frac{\partial M}{\partial \theta} + h_{cv} \right) (t_a - t_g) \quad (2b)$$

dimana t_a adalah suhu udara pengering ($^{\circ}\text{C}$), t_g adalah suhu jagung ($^{\circ}\text{C}$), $c_{p,s}$ adalah panas jenis udara kering ($\text{kJ}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$), $c_{p,a}$ adalah panas jenis uap air ($\text{kJ}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$), r adalah jarak ke arah radial (m), adalah bulk density dari jagung (kg/m^3), h_{cv} adalah koefisien pindah panas volumetrik ($\text{kW}/\text{m}^3\cdot^{\circ}\text{C}$)

Jagung pipilan diasumsikan tercampur secara merata setelah proses pengadukan dilakukan. Dengan demikian kadar air setelah pencampuran dihitung dengan merata-ratakan kadar air di masing-masing lapisan.

3. Keseimbangan termal pada biji yang dikeringkan

Perubahan entalpi pada biji berbanding lurus dengan laju pindah panas konvektif ke biji dan panas yang disuplai untuk menguapkan air dari biji. Untuk masing-masing elemen volume dari tumpukan biji, maka persamaan keseimbangannya dapat dinyatakan sebagai:

$$\rho_d (c_{p,g} + c_{p,w} M) \frac{\partial t_g}{\partial \theta} + \rho_d t_g c_{p,w} \frac{\partial M}{\partial \theta} = h_{cv} (t_a - t_g) + \rho_d (h_{fg} + c_{p,w} t_g) \frac{\partial M}{\partial \theta} \quad (3a)$$

atau ditulis sebagai:

$$\rho_d (c_{p,g} + c_{p,w} M) \frac{\partial t_g}{\partial \theta} = h_{cv} (t_a - t_g) + \rho_d (h_{fg} + (c_{p,g} - c_{p,w}) t_g) \frac{\partial M}{\partial \theta} \quad (3b)$$

Dimana $c_{p,g}$ adalah panas jenis jagung ($\text{kJ}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$), $c_{p,w}$ adalah panas jenis air ($\text{kJ}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$), h_{fg} adalah panas laten penguapan air dari biji (kJ/kg).

4. Penurunan kadar air

Model pengeringan lapisan tipis diterapkan untuk menduga penurunan kadar air pada setiap lapisan. Dengan suhu dan kelembaban udara di sekitar biji, penurunan kadar air dapat dinyatakan sebagai:

$$\frac{dM}{d\theta} = -k(M - Me) \tag{4}$$

dimana k (konstanta pengeringan, 1/detik) yang digunakan untuk jagung adalah (Brooker, *et al*, 1991).

$$k = 0.54 \exp\left(\frac{-5023}{1.8T_g}\right) \tag{5}$$

sedangkan Me (kadar air keseimbangan, %b.k.) dari persamaan Henderson termodifikasi untuk jagung (Brooker, *et al*, 1991).

$$Me = \left[\frac{\ln(1 - ERH)}{-0.000086541t + 49.81} \right]^{\frac{1}{1.8634}} \tag{6}$$

dimana ERH adalah kelembaban relatif keseimbangan udara (%) dan t adalah suhu (°C)

5. Koefisien pindah panas volumetrik (h_{cv})

Koefisien pindah panas volumetrik untuk jagung dinyatakan dalam persamaan (7) (Bala, 1997):

$$h_{cv} = 372.6 \left(\frac{GT_a}{P_{at}} \right)^{0.5217} \tag{7}$$

6. Kondensasi

Saat udara dalam kondisi kelembaban yang cukup tinggi, maka kondensasi dapat terjadi. Bala (1997) memodelkan kondensasi terjadi ketika RH telah melebihi 98%. Pada penelitian ini, proses kondensasi diasumsikan terjadi ketika kelembaban relatif dari udara yang ada pada lapisan biji telah berada di atas RH keseimbangan dari lapisan biji tersebut. Perhitungan dilakukan dengan mencari suhu dan kelembaban mutlak udara pengering ketika proses kondensasi dimulai dalam satu garis suhu bola basah, dan kemudian selisih antara kelembaban mutlak hasil perhitungan dengan saat tersebut merupakan jumlah air yang terkondensasi pada biji.

Persamaan (1c), (2b), (3b) dan (4) diekspresikan dalam bentuk numerik menggunakan metode beda hingga Euler. Udara pengering dan biji yang dikeringkan dalam tumpukan dibagi ke dalam 20 lapisan. Perhitungan dilakukan dalam program Visual Basic versi 6.0.

Hasil Dan Pembahasan

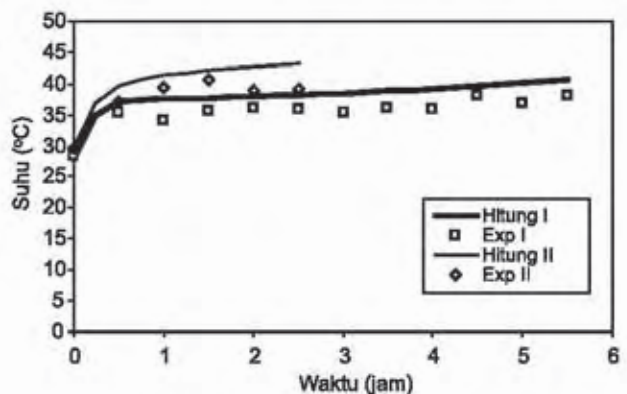
a. Perubahan suhu dan kadar air

Model yang digunakan pada studi ini terdiri dari persamaan *steady state* yaitu untuk keseimbangan termal dan kelembaban mutlak di udara pengering, dan *unsteady state* untuk perubahan suhu dan kadar air biji yang dikeringkan. Hal ini dilakukan dengan asumsi bahwa perubahan suhu dan kelembaban udara terjadi jauh lebih cepat dibandingkan perubahan suhu dan kadar air biji.

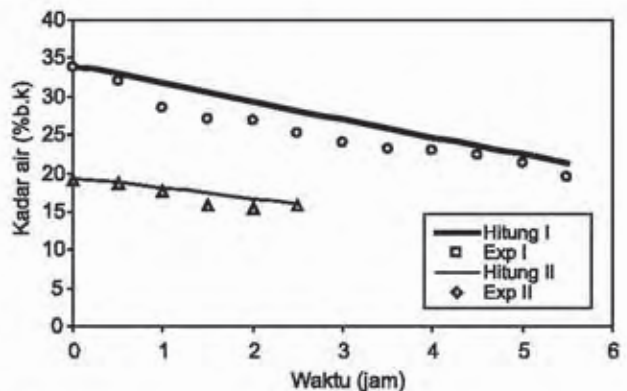
Gambar 3 dan 4 memperlihatkan perubahan suhu dan kadar air rata-rata antara hasil perhitungan dan data percobaan I dan II. Secara umum dapat dilihat

bahwa kurva hasil perhitungan dari model matematik yang dibangun mengikuti perubahan suhu dan kadar air hasil pengukuran, akan tetapi terdapat deviasi dimana baik suhu maupun kadar air hasil perhitungan sedikit berada di atas pengukuran. Perbedaan ini dapat terjadi sehubungan dengan adanya perbedaan antara asumsi aliran udara ke arah radial dengan arah aliran udara pada percobaan yang dilakukan. Pada daerah di dekat penghalang aliran (Gambar 2) sehubungan dengan tebal tumpukan yang lebih rendah, aliran udara menembus daerah tersebut dalam jumlah yang lebih besar dibandingkan dengan pada bagian lainnya. Di lain pihak kadar air hasil pengukuran lebih rendah dibandingkan dengan hasil perhitungan.

Perubahan suhu yang cepat pada kira-kira 30 menit pertama dan diikuti dengan perubahan yang lambat pada saat setelahnya ditunjukkan oleh Gambar 3. Perubahan suhu ini berlangsung secara relatif cepat akibat terjadinya proses pemanasan pada biji dari suhu awalnya. Setelah itu terjadi perubahan gradien suhu yang nyata dimana peningkatan suhu biji menjadi lambat. Perubahan ini disebabkan oleh meningkatnya penguapan yang menyebabkan terjadinya kondisi yang mendekati *steady state* antara panas yang masuk ke biji secara konvektif dari udara dan panas yang meninggalkan biji bersama uap air. Perubahan gradien yang nyata tersebut terjadi pada



Gambar 3. Perubahan suhu rata-rata biji hasil perhitungan dan percobaan I dan II



Gambar 4. Perubahan kadar air rata-rata biji hasil perhitungan dan percobaan I dan II

Tabel 1. Nilai yang digunakan pada simulasi

Parameter	Nilai
Kadar air awal (%b.k.)	33.8
Suhu udara pengeringan (°C)	67
Kelembaban mutlak (gH ₂ O/kg udara kering)	26.5
Laju aliran udara (m ³ /detik)	0.06
Interval pengadukan (menit)	15
Tebal tumpukan (selisih antara jari-jari luar dan dalam drum) (m)	0.18

suhu kira-kira 36°C pada percobaan I dan 40°C pada percobaan II. Padahal, suhu udara pengering yang digunakan pada percobaan I lebih tinggi dibandingkan pada percobaan II. Perubahan yang demikian adalah akibat kadar air awal yang lebih tinggi pada percobaan I. Hal ini disebabkan oleh laju penguapan air yang lebih tinggi pada kadar air yang tinggi, sehingga sebagian panas lebih dimanfaatkan untuk penguapan daripada untuk meningkatkan suhu biji. Pada percobaan II, laju pengeringan secara umum lebih rendah sehingga kondisi dimana proses penguapan air berlangsung pada percobaan ini akan berlangsung pada suhu yang lebih tinggi. Setelah itu, gradien suhu kembali berubah menjadi sedikit lebih tinggi. Hal ini disebabkan oleh penurunan laju penguapan air. Ketika laju penguapan rendah, panas lebih banyak dimanfaatkan untuk meningkatkan suhu. Perubahan gradien tersebut tidak terlalu nyata pada percobaan II karena kadar air yang telah dicapai sudah cukup rendah. Selanjutnya, jika pengeringan diteruskan sampai kadar air keseimbangan pada kondisi udara masuk maka peningkatan suhu akan kembali menjadi lebih lambat sehubungan dengan suhu biji yang telah hampir sama dengan suhu udara pengeringnya.

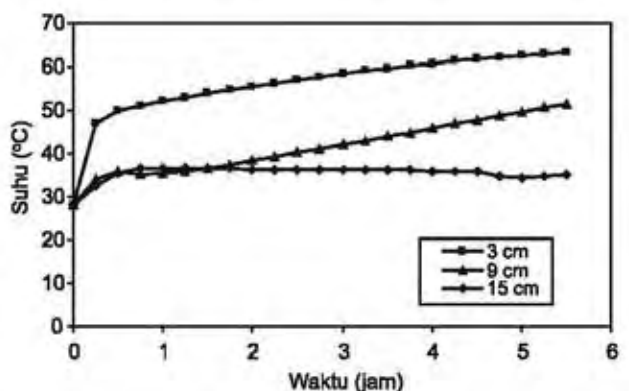
Perubahan kadar air untuk kedua percobaan diperlihatkan pada Gambar 4. Perubahan kadar air dalam basis kering memperlihatkan penurunan yang lambat pada awalnya. Proses pemanasan masih terjadi lebih dominan dibandingkan dengan proses penguapan pada tahap tersebut. Setelah itu kadar air menurun secara eksponensial akan tetapi dalam derajat yang sangat rendah sehingga menyerupai garis lurus. Pada pengeringan tumpukan, biji kontak dengan udara dalam jumlah yang terbatas, sehingga searah dengan aliran udara suhunya menurun sedangkan kelembabannya meningkat.

b. Simulasi pengeringan tanpa dan dengan pengadukan

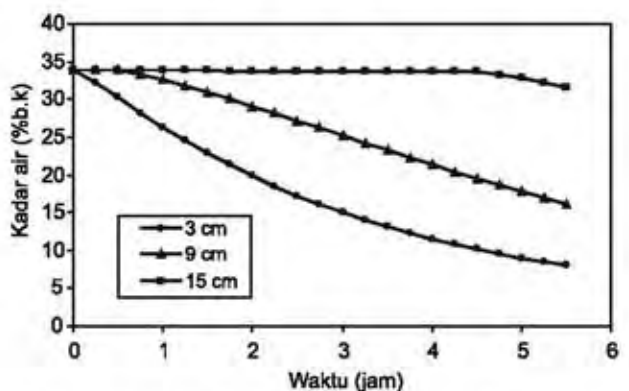
Hasil simulasi pengeringan jagung tanpa pengadukan untuk perubahan suhu dan kadar air dapat dilihat pada Gambar 5, 6, 7 dan 8. Data yang digunakan untuk simulasi disajikan pada Tabel 1. Simulasi dilakukan untuk melihat bagaimana pengadukan dapat menurunkan variasi kadar air

during the drying process.

Baik suhu maupun kadar air dari tumpukan biji sangat bervariasi bergantung pada jarak tumpukan dari dinding drum bagian dalam dimana udara pengering masuk ke tumpukan. Lapisan biji pada jarak 3 cm memperlihatkan kenaikan suhu dan penurunan kadar air yang paling cepat (Gambar 5 dan 6). Pada lapisan biji yang dekat dengan inlet aliran udara yang masuk ke dalam tumpukan, udara memiliki suhu yang masih tinggi dengan kelembaban mutlak yang rendah. Pindah panas secara konvektif dari udara ke biji yang terjadi menyebabkan suhu lapisan biji tersebut naik dengan cepat. Sejalan dengan arah aliran udara yang menjauhi inlet, jumlah uap air yang diterima oleh udara dari biji akan semakin bertambah akan tetapi panas sensibel secara kontinyu juga berpindah dari udara ke biji. Oleh karena itu, walaupun total kandungan panas relatif tetap, suhu udara akan menurun akibat kandungan panas sensibel udara yang menurun. Suhu lapisan biji yang belum kering akan sulit meningkat akibat masih berlangsungnya penguapan dalam jumlah yang besar. Sedangkan pada lapisan-lapisan yang jauh dari inlet aliran, peningkatan belum terjadi karena suhu udara di lapisan tersebut telah mengalami penurunan. Ketika suhu biji pada lapisan pada jarak 3 cm sudah melebihi 60°C, suhu biji pada jarak 15 cm masih berada pada suhu 35°C. Begitu pula ketika kadar air



Gambar 5. Hasil simulasi perubahan suhu biji tanpa pengadukan



Gambar 6. Hasil simulasi perubahan kadar air biji tanpa pengadukan

pada jarak 3 cm sudah berada di bawah 15% b.k., kadar air pada jarak 15 cm masih sama dengan kadar air awalnya. Selisih maksimum kadar air antara yang paling tinggi dan paling rendah ini mencapai 23.8% b.k. Kondisi yang demikian dapat menyebabkan menurunnya kualitas biji yang dikeringkan akibat tingginya suhu udara pengering pada satu posisi (dimana kadar air sudah rendah) dan akibat reaksi enzimatik dan mikroba pada posisi yang lain (dimana kadar air masih cukup tinggi pada suhu yang relatif tinggi).

Dengan menggunakan pengadukan, variasi suhu masih cukup lebar akan tetapi variasi kadar air dapat dipersempit (Gambar 7 dan 8). Variasi suhu lebih besar pada lapisan di dekat inlet aliran. Hal ini disebabkan oleh kadar air yang sedikit lebih rendah pada lapisan tersebut sehingga suhu udara dengan cepat meningkatkan suhu lapisan. Pada kadar air hal ini tidak terjadi dimana selisih maksimum dari kadar air antar lapisan hanya 0.8% dan terjadi pada awal pengeringan. Ini disebabkan oleh respon perubahan kadar air yang lebih lambat dibandingkan perubahan suhunya setelah pengadukan. Sejalan dengan waktu pengeringan, simpangan tersebut menurun. Dengan demikian, kadar air dari masing-masing lapisan menurun dalam selang yang aman,

dimana lapisan yang dekat dengan asal udara pengering tidak terjadi kondisi *overdrying* dan lapisan yang jauh sudah berada pada kondisi kadar air yang aman. Variasi kadar air juga terlihat semakin menurun sejalan dengan proses pengeringan sehubungan dengan kondisi udara yang semakin seragam.

Kesimpulan

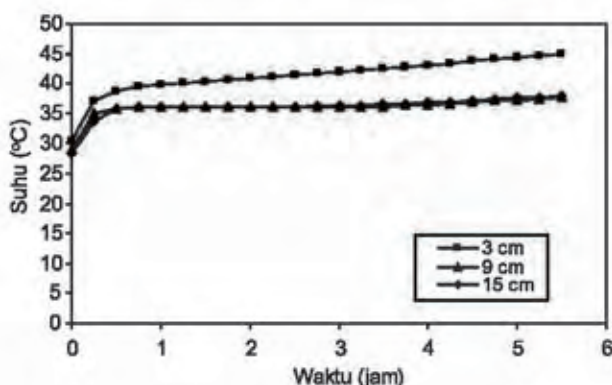
Model yang dikembangkan pada penelitian ini telah dapat memprediksi perubahan suhu dan kadar air jagung yang dikeringkan pada pengering rotari tumpukan baik pada kadar air awal tinggi (33.8% b.k) maupun pada kadar air awal rendah (19%b.k.). Berdasarkan hasil simulasi pengadukan dengan interval 15 menit dapat mencegah terjadinya *overdrying* pada lapisan dekat inlet udara dan terhambatnya penurunan kadar air pada lapisan yang jauh dari sumber aliran. Selisih kadar air antar lapisan dapat diturunkan sampai maksimum 0.8%.

Ucapan Terimakasih

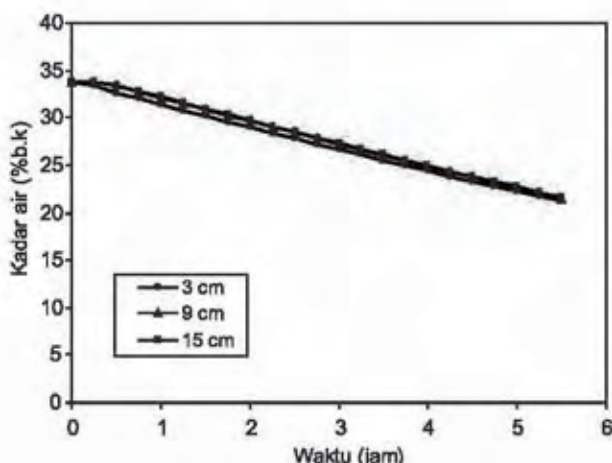
Ucapan terimakasih disampaikan kepada Hibah Program Kemitraan AMIn Unit tahun 2007 yang telah membiayai penelitian ini.

Daftar Pustaka

Bala, B.K. 1997. *Drying and Storage of Cereal Grains*. Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd. New Delhi.
 Brooker, D.B., F.W. Bakker-Arkema, dan C.W. Hall. 1973. *Drying Cereal Grain*. The AVI Publishing Company, Inc. Westport, Connecticut.
 Garreiro, J.M., S. Kahan, B. Zecchi, P. Gerla, L. Clavijo and A. Rodríguez. 2001. A simple model for rice grains in a deep-bed dryer. 4th Mercosur Congress on Process Systems Engineering Mata, M.E and Duarte, M.E. 2003. Drying Simulation Theory of the Cowpea Considering the Grains Shrinkage. *Revista Brasileira De Produtos Agroindustrials*, Campina Grande, V.5, N.2, P.179-185, 2003
 Rumsey, T. and Thompson, J. 1984. Ambient Air Drying of English Walnuts. *Transactions of The ASAE* 1984, 27(3), p.p. 942-945.
 Srivastava V.K. and J. John. 2002. Deep bed grain drying modeling. *Energy Conversion and Management* 43 (2002) 1689-1708.
 Sitompul, J.P.; Istadi, I.; Widiasta, I.N. *Modelling and Simulation of Deep Bed Grain Dryers*. *Drying Technology* 2001, 19(2), 269-280.



Gambar 7. Hasil simulasi perubahan suhu biji dengan pengadukan



Gambar 8. Hasil simulasi perubahan kadar air biji dengan pengadukan