

MODEL HETEROGEN PENGERINGAN BUTIRAN JAGUNG DALAM UNGGUN DIAM

Istadi ⁽¹⁾ dan J.P. Sitompul ⁽²⁾

⁽¹⁾ Jurusan Teknik Kimia, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang, Semarang, 50239
E-mail: istadi@alumni.undip.ac.id

⁽²⁾ Jurusan Teknik Kimia, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha 10, Bandung, 40132
E-mail: johnner@termo.pauir.itb.ac.id

Ringkasan

Makalah ini mempelajari pemodelan dinamik dan simulasi model heterogen satu dimensi pengeringan butiran jagung dalam pengering unggun diam (deep-bed). Pemodelan pengeringan ini mempertimbangkan peristiwa perpindahan massa dan panas di dalam butiran maupun di udara pengering serta meninjau dispersi aksial di unggun, serta meninjau adanya gradien kadar air dan temperatur dalam butiran jagung. Persamaan-persamaan diferensial parsial yang terbentuk diselesaikan secara simultan dengan metode numerik beda hingga dengan algoritma Alternating Direction Implicit Method. Dinamika pengeringan butiran jagung, baik kelembaban, kadar air maupun temperatur dalam fasa udara pengering maupun fasa butiran dapat disimulasikan. Profil dinamika pengeringan hasil simulasi dibandingkan dengan data eksperimen yang diambil dari literatur yang tersedia untuk mendapatkan parameter-parameter model yang sesuai. Model ini dapat menggambarkan proses pengeringan butiran jagung dalam pengering unggun diam. Modifikasi parameter-parameter model dengan optimasi dilakukan untuk mendapatkan profil karakteristik pengeringan yang lebih mendekati eksperimen.

Abstract

This paper deals with one-dimensional dynamic modelling and simulation of deep -bed corn drying by two-phase model or heterogeneous model. The models consider mass and heat transfer process within grain and drying air phase. This model also considers moisture content and temperature gradient within grain. The coupled of partial differential equations developed, then solves numerically by finite difference with alternating direction implicit method algorithm. The dynamic models predict not only humidity and temperature of outlet drying air, but also grain moisture content and temperature. The simulated profiles are compared with experimental data, taken from available literature. The models can describe corn grain drying process in deep -bed dryer. However, the model parameters should be modified to get drying characteristic profiles that closed to the experimental data.

Keywords: heterogeneous model, simulation, deep-bed drying, corn grain drying

1. PENDAHULUAN

Jagung merupakan komoditas yang sangat penting disamping padi terutama di negara-negara agraris seperti Indonesia. Proses pengeringan memegang peranan penting dalam pengawetan bahan, baik di industri pertanian, obat-obatan, dan makanan, kaitannya dengan pengawetan bahan khususnya butiran jagung. Tujuan utama pengeringan butiran adalah untuk mengurangi kadar airnya sehingga kerusakan tidak terjadi sebelum digunakan. Jika butiran jagung yang akan disimpan tidak dikeringkan, maka bahan akan berubah sifat atau rusak akibat terjadinya pembusukan atau aktivitas mikroorganisme. Pengeringan butiran berkadar air tinggi, dapat dilakukan baik dalam waktu lama pada suhu udara pengering yang rendah

(misalnya pengeringan dengan memanfaatkan tenaga matahari) atau dalam waktu yang lebih pendek pada suhu yang lebih tinggi. Jika waktu yang dilakukan untuk pengeringan terlalu lama, dapat menyebabkan penjamuran dan pembusukan, apalagi jika dilakukan pada musim penghujan. Sebaliknya, temperatur yang terlalu tinggi bisa menyebabkan kerusakan baik secara fisik maupun kimia terhadap butiran tersebut, khususnya untuk bahan-bahan yang sangat sensitif terhadap temperatur.

Penyimpanan produk-produk pertanian harus memenuhi beberapa persyaratan khusus kaitannya dengan proses penyimpanan dalam rangka mempertahankan kualitasnya, terutama persyaratan kandungan air, kelembaban udara (aktivitas air) dan

temperatur penyimpanan. Butiran jagung dengan kandungan air maksimal 15,5 % (bk) dapat disimpan paling lama 6 bulan, sedangkan butiran jagung dengan kandungan air bahan maksimal 13 % (bk) dapat disimpan lebih dari 6 bulan. Data-data tentang batas-batas penyimpanan bahan ini dapat dilihat di literatur [1].

Pada umumnya, ada dua mode pengering yaitu pengering *batch* dan pengering kontinu. Salah satu metode pengeringan adalah pengeringan butiran dengan pengering unggun diam (*deep bed*). Pada pengering jenis ini, proses pengeringan dianggap merupakan proses *batch*, dengan kadar air butiran, kelembaban udara pengering, temperatur udara dan butiran, berubah secara simultan terhadap waktu pengeringan.

Makalah ini menjelaskan tentang pemodelan dinamik dan simulasi satu dimensi proses pengeringan butiran khususnya jagung dalam pengering unggun diam. Selanjutnya, akan ditunjukkan beberapa karakteristik dinamika pengeringan butiran jagung seperti: profil temperatur dan kelembaban absolut udara keluar pengering, temperatur dan kandungan air rerata butiran sebagai fungsi waktu maupun posisi sepanjang unggun. Dari beberapa profil yang diperoleh dapat diperkirakan waktu pengeringan yang diperlukan untuk mencapai kandungan air butiran tertentu pada kondisi pengeringan tertentu.

2. PROSES PERPINDAHAN DALAM PENGERINGAN BUTIRAN

Bila butiran basah dikeringkan secara termal, maka akan terjadi dua proses simultan yang utama terjadi, yaitu: perpindahan panas dari udara pengering ke butiran untuk menguapkan air di permukaan butiran, yang selanjutnya terjadi konduksi panas ke dalam butiran, dan perpindahan internal air dari dalam ke permukaan butiran (difusi) yang selanjutnya terjadi penguapan ke udara pengering. Proses perpindahan ini pada kenyataannya lebih kompleks. Perpindahan cairan dalam bahan dapat disebabkan oleh tegangan permukaan (aliran kapiler), beda konsentrasi air (difusi cairan) dan difusi air di permukaan pori (difusi permukaan). Perpindahan uap dapat disebabkan oleh beda konsentrasi air (difusi uap) dan beda temperatur (difusi termal). Perpindahan cairan dan uap ini dapat juga disebabkan oleh beda tekanan total (aliran hidrodinamika) [2].

Perpindahan momentum juga terlibat dalam jenis pengering ini disebabkan adanya penurunan tekanan sepanjang aksial unggun akibat terjadinya friksi dengan butiran terjejal. Proses pengeringan ini memerlukan udara pengering dengan kelembaban yang lebih rendah daripada kelembaban udara kesetimbangan (*water activity*)

di permukaan butiran. Dalam hal ini udara pengering dengan kelembaban yang lebih rendah daripada harga aktivitas airnya dialirkan atau dihembuskan melewati permukaan butiran didalam unggun butiran. Perpindahan panas terjadi secara konveksi dari udara ke permukaan butiran dan selanjutnya secara konduksi di dalam butiran. Berkurangnya kandungan air dalam bahan ini disebabkan oleh perpindahan air dari dalam ke permukaan butiran secara difusi karena adanya perbedaan konsentrasi antara permukaan dan bagian dalam butiran yang selanjutnya terjadi penguapan air dari permukaan butiran ke udara pengering. Dalam hal-hal khusus, di lapisan batas permukaan butiran diasumsikan selalu terjadi kesetimbangan antara kandungan air butiran dan kelembaban udara [3,4].

3. PENGEMBANGAN MODEL PENGERINGAN BUTIRAN DALAM UNGGUN DIAM

Beberapa peneliti terdahulu telah menggambarkan proses pengeringan butiran di dalam unggun diam, dimana unggun dibagi menjadi beberapa lapisan tipis yang mengalami perubahan secara berurutan terhadap perubahan waktu, yang selanjutnya disebut model pengeringan lapisan tipis (*thin layer model*), baik secara eksperimen maupun teori [5,6,7]. Dalam hal ini, pengurangan kandungan air dalam unggun butiran dihitung rata-rata dalam satu unggun.

Model-model matematik yang telah dikembangkan oleh beberapa peneliti terdahulu menjelaskan tentang proses perpindahan panas dan massa dalam pengeringan butiran tipe konvektif (*convective drying*) [8]. Thompson mensimulasikan profil temperatur dan kandungan air butiran jagung pada pengering jenis unggun diam yang berdasarkan model lapisan tipis untuk satu dimensi dan tidak ada gradien konsentrasi di dalam butiran [6]. Gupta juga mempelajari karakteristik pengeringan dengan meninjau gradien interfase dan tidak ada gradien di dalam butiran pada pengering jenis yang sama [9]. Palancz mempelajari proses-proses perpindahan panas dan massa simultan antara fase gas dan padatan butiran yang dilakukan pada pengering jenis unggun tetap (*fixed bed dryer*), untuk partikel-partikel atau butiran-butiran yang mempunyai ukuran tidak terlalu besar, tetapi mempunyai tahanan difusi yang tinggi. Untuk menggambarkan tahanan perpindahan massa dan panas di butiran, dipakai model parameter terdistribusi Luikov yang diimplementasikan pada sebuah sel sederhana (*simple cell model*) [3]. Lopez mengembangkan model pengeringan butiran *hazelnut* dalam pengering jenis unggun diam, dengan menganggap unggun tersebut sebagai lapisan-lapisan tipis yang saling berurutan. Model-model tersebut dapat menggambarkan proses-proses pengeringan butiran yang ditinjau [7].

Abid mempelajari perpindahan panas dan massa secara simultan yang terjadi dalam pengeringan

butiran jagung pada pengering jenis unggun terfluidakan. Model-model pengeringan di dalam butiran yang dikembangkan oleh Abid adalah berdasarkan pada model Luikov [10]. Peneliti lainnya mempelajari model dinamik pengeringan butiran jagung pada pengering jenis unggun diam, berdasarkan pada fenomena lapisan tipis dengan menganggap tanpa adanya dispersi di fasa udara pengering (model aliran sumbat) dan tidak ada gradien intrafase dalam butiran secara menyeluruh. Namun demikian, gradien intrafase di dalam butiran jagung ditinjau dengan membagi butiran menjadi tiga bagian yaitu lapisan paling luar, lapisan tengah, dan lapisan dalam. Dalam hal ini, kandungan air dan temperatur bahan serbasama dalam setiap bagian [5].

Laju perpindahan panas dan massa eksternal pada proses pengeringan butiran dikendalikan oleh konveksi antara permukaan butiran dengan udara. Dalam hal ini ditinjau jika bilangan Biot (Bi) kecil ($Bi < 0,1$), misalnya untuk butiran yang relatif kecil. Jika bilangan Biot mempunyai harga yang besar dan/atau ukuran partikel relatif besar ($Bi > 0,1$), koefisien difusi dan konduksi yang rendah, maka tahanan perpindahan massa dan panas di bagian butiran tidak dapat diabaikan begitu saja untuk proses-proses yang transien [10,11]. Dalam hal ini laju perpindahan massa dan panas dikendalikan oleh difusi di dalam butiran. Perpindahan massa dan panas di dalam butiran dapat ditinjau berdasarkan pada model Luikov untuk menggambarkan proses difusi yang terjadi di dalam butiran [3,10].

Dalam penelitian ini dikembangkan model pengeringan butiran tipe unggun diam model dua fasa (*Two Phase Model*) atau biasa dinamakan Model Heterogen yaitu fasa udara pengering dan fasa butiran, dengan mempertimbangkan adanya dispersi (massa dan panas) aksial di unggun dan gradien konsentrasi (kandungan air dan temperatur) di dalam butiran [12].

Dalam pemodelan ini dilakukan beberapa asumsi antara lain: tidak ada pengkerutan partikel selama pengeringan, butiran dianggap memiliki ukuran dan sifat-sifat fisik yang serbasama (isotropik), perpindahan air di dalam butiran hanya ke arah radial saja secara difusi, dinding pengering dianggap adiabatik, di permukaan butiran selalu terjadi kesetimbangan, densitas dan panas jenis tetap selama pengeringan, tidak ada perpindahan panas konduksi antar butiran, koefisien dispersi aksial dan difusivitas air di dalam butiran dianggap konstan terhadap kadar air dan temperatur butiran, konduktivitas termal di butiran dan di udara konstan [7,9,13].

Persamaan model neraca massa dan energi di fasa udara pengering adalah:

$$\frac{\partial(\rho_a Y)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{a \text{ eff}} \frac{\partial(\rho_a Y)}{\partial z} \right) - \frac{\partial(U_z(\rho_a Y))}{\partial z} + a \left(\frac{1-\varepsilon_b}{\varepsilon_b} \right) k_m (Y^* - Y) \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_a (C_{p_a} + Y C_{p_v}) T_b)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{a \text{ eff}} \frac{\partial T_b}{\partial z} \right) - \frac{\partial(U_z(\rho_a (C_{p_a} + Y C_{p_v}) T_b))}{\partial z} - a \left(\frac{1-\varepsilon_b}{\varepsilon_b} \right) (h(T_b - T_p) + k_m(Y^* - Y) \Delta H_v) \quad (2)$$

Sedangkan persamaan model neraca massa dan energi di fasa butiran adalah:

$$\frac{\partial(\rho_p X)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 D_{p \text{ eff}} \rho_p \frac{\partial X}{\partial r} \right) + \frac{\delta}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 D_{p \text{ eff}} \rho_p \frac{\partial T_p}{\partial r} \right) \quad (3)$$

$$\rho_p C_{p_p} \frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{\lambda_{p \text{ eff}}}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T_p}{\partial r} \right) - \zeta \rho_p \varepsilon_p \Delta H_v \frac{\partial X}{\partial t} \quad (4)$$

ζ dalam persamaan ini menyatakan faktor konversi fasa, berharga 1 jika fasa uap yang berdifusi dan berharga 0 jika fasa cairan yang berdifusi.

Persamaan-persamaan tersebut dapat diselesaikan dengan beberapa kondisi awal dan batas. Kondisi-kondisi awal untuk persamaan diferensial tersebut adalah:

$$Y(0,z) = Y_o; T_b(0,z) = T_{bo}; X(0,r) = X_o; T_p(0,r) = T_{po}$$

Kondisi-kondisi batas di bagian masukan dan keluaran unggun adalah:

$$Y(t,0) = Y_i; T_b(t,0) = T_{bi}; \left. \frac{\partial Y}{\partial z} \right|_{(t,L)} = 0; \left. \frac{\partial T_b}{\partial z} \right|_{(t,L)} = 0$$

Kondisi-kondisi batas di bagian pusat butiran, dengan menganggap bahwa butiran berbentuk bola, adalah:

$$\left. \frac{\partial X}{\partial r} \right|_{(t,0)} = 0; \left. \frac{\partial T_p}{\partial r} \right|_{(t,0)} = 0$$

sedangkan kondisi-kondisi batas di permukaan butiran adalah:

$$-\rho_p D_{p \text{ eff}} \left. \frac{\partial X}{\partial r} \right|_{(t,RP)} = k_m (Y^* - Y) \quad (5)$$

atau

$$X|_{(t,RP)} = X^* \quad (6)$$

$$-\lambda_{p \text{ eff}} \left. \frac{\partial T_p}{\partial r} \right|_{(t,RP)} = h(T_p - T_b) + k_m \Delta H_v (Y^* - Y) \quad (7)$$

Sedangkan untuk menentukan kelembaban udara di permukaan butiran yang setimbang dengan kandungan air butiran (Y) dapat digunakan persamaan korelasi kandungan air setimbang (EMC) yang diusulkan oleh Thompson [13].

$$p_w = 100 \exp \left[27,0214 - \left(\frac{6887}{T_b} \right) - 5,31 \ln \left(\frac{T_b}{273,16} \right) \right] \quad (8)$$

$$p_{ws} = \Phi p_w \quad (9)$$

$$Y^* = 0,622 \frac{p_{ws}}{P - p_{ws}} \quad (10)$$

Hubungan kandungan air setimbang untuk butiran jagung [13] adalah:

$$\Phi = 1 - \exp\left(-8,6541 \times 10^{-5} (100X^*)^{1,8634} (T_b - 273,16 + 49,81)\right) \quad (11)$$

4. PENYELESAIAN MODEL MATEMATIK SECARA NUMERIK

Sistem persamaan diferensial parsial untuk neraca massa dan panas (persamaan (1) sampai (4)) bersama-sama dengan kondisi awal dan batas diselesaikan dengan metode numerik beda hingga (*finite difference*) dengan algoritma *Alternating Direction Implicit Method* (ADIM) yang diaplikasikan untuk sistem persamaan diferensial transien satu dimensi dengan model dua fasa.

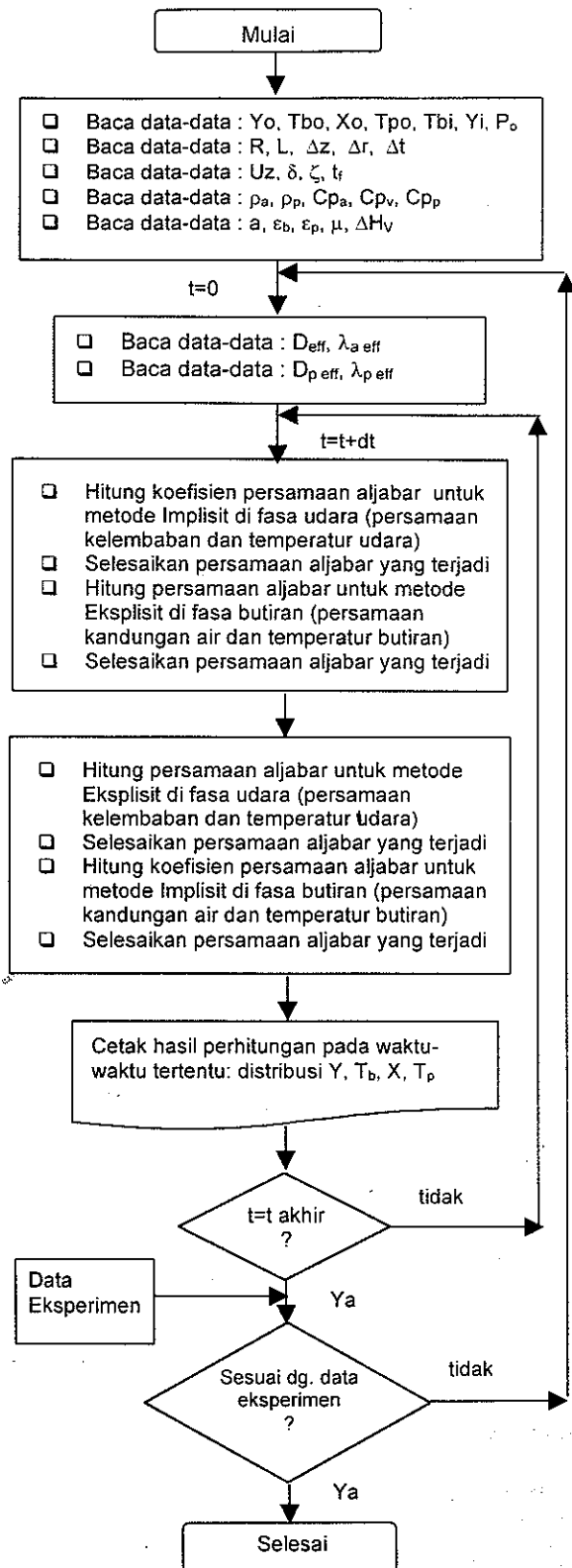
Diskritisasi suku spasial untuk masing-masing fasa adalah dengan menggunakan skem beda pusat (*central difference scheme*), sedangkan diskritisasi terhadap suku waktu dengan menggunakan skem beda mundur (*backward difference scheme*). Untuk interval waktu pertama ($1\Delta t$), dilakukan perhitungan dengan mengimplementasikan metode implisit di fasa udara dan eksplisit di fasa butiran, sedangkan untuk interval waktu kedua ($2\Delta t$) dengan implisit di fasa butiran dan eksplisit di fasa udara. Untuk interval waktu ketiga ($3\Delta t$) dilakukan perhitungan seperti pada interval waktu pertama, dan interval waktu keempat ($4\Delta t$) seperti pada interval waktu kedua, begitu seterusnya untuk interval-interval waktu selanjutnya. Prosedur ini dilanjutkan hingga dicapai keadaan tunak atau bahan mencapai kandungan air diinginkan. Untuk setiap interval waktu akan diperoleh sistem persamaan linier yang membentuk matrik *tridiagonal* dari metode implisit yang dapat diselesaikan dengan subrutin iteratif *Tridiagonal Matrix (TDMA)* [12,14].

Secara lengkap algoritma metode komputasi untuk penyelesaian sistem persamaan diferensial parsial satu dimensi arah aksial untuk Model Dua Fasa dapat dilihat pada Gambar 1.

5. HASIL DAN PEMBAHASAN

Parameter-parameter yang digunakan untuk simulasi dari model-model di atas diberikan dalam Tabel 1. Ketinggian unggun adalah 0,16 m. Validasi model dilakukan dengan membandingkannya dengan data-data percobaan yang tersedia di literatur [5].

Hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar 2 sampai Gambar 3 untuk kondisi pengeringan tertentu. Gambar 2 menunjukkan kurva dinamika kelembaban udara keluar pengering sebagai



Gambar 1. Algoritma Komputasi Satu Dimensi untuk Model Dua Fasa

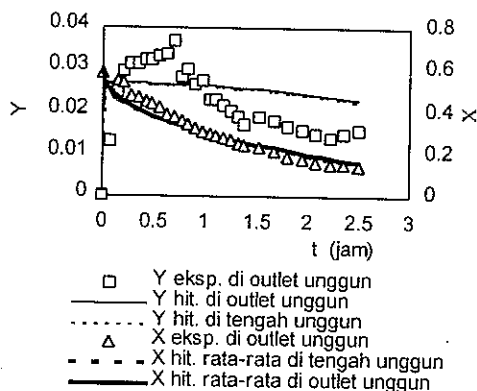
fungsi waktu dan dinamika kandungan air butiran sebagai fungsi waktu, serta sebagai fungsi posisi aksial unggun. Setelah pengeringan berjalan beberapa saat, maka kelembaban udara keluar

unggun menjadi rendah karena semakin berkurangnya jumlah air yang diuapkan.

Tabel 1. Data parameter-parameter yang digunakan untuk simulasi

Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
Y_o	0,012	$D_{a\text{ eff}}$	$2,52 \times 10^{-8}$
T_{bo}	373	$D_{p\text{ eff}}$	$7,85 \times 10^{-11}$
X_o	0,58	$\lambda_{p\text{ eff}}$	$4,59 \times 10^{-2}$
T_{po}	293	$\lambda_{a\text{ eff}}$	$6,5 \times 10^{-1}$
U_i	0,42	δ	0,08
a	850	ε_b	0,35
C_{pa}	1012	ε_p	0,45
C_{pv}	2030	ρ_a	1,057
C_{pp}	1122	ρ_p	1350

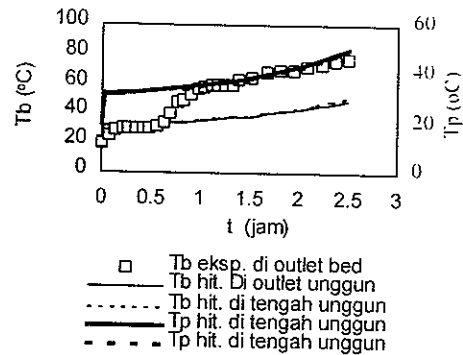
Gambar 3 menunjukkan kurva dinamika temperatur udara keluar pengering (unggun) sebagai fungsi waktu dan dinamika temperatur butiran tersimulasi sebagai fungsi waktu untuk berbagai posisi aksial unggun. Dari Gambar 3 terlihat bahwa temperatur udara keluar pengering semakin besar dengan semakin kecilnya air yang dapat diuapkan.



Gambar 2. Dinamika kelembaban udara keluar unggun dan kandungan air butiran sepanjang waktu dan perbandingan dengan data-data eksperimen dari literatur [5]

Gambar 2 juga memperlihatkan profil dinamika kandungan air butiran jagung rerata selama waktu pengeringan. Kadar air butiran semakin kecil karena terjadinya difusi air di dalam butiran dan penguapan di permukaan, demikian seterusnya hingga tercapai kadar air yang diinginkan. Penurunan kadar air bahan cukup besar pada saat-saat awal pengeringan (sampai $\pm 1,5$ jam) dan cukup kecil pada saat menjelang akhir pengeringan (1,5-2,5 jam). Dari grafik terlihat bahwa untuk mencapai kadar air butiran 0,15 kg air/kg butiran kering diperlukan waktu pengeringan kurang lebih 2 - 3 jam untuk kadar air butiran mula-mula 0,58 kg air/kg butiran kering.

Gambar 3 juga memperlihatkan dinamika temperatur rerata butiran jagung tersimulasi selama waktu pengeringan.



Gambar 3. Dinamika temperatur udara keluar unggun dan temperatur butiran sepanjang waktu dan perbandingan dengan data-data eksperimen [5]

Untuk memperoleh profil simulasi dari model-model pengeringan ini yang lebih mendekati data eksperimen, dilakukan optimasi untuk menentukan parameter-parameter perpindahan dalam pengeringan unggun diam, seperti: koefisien dispersi air aksial, difusivitas air di dalam butiran, konduktivitas termal unggun, dan konduktivitas termal butiran. Dengan cara ini diharapkan akan diperoleh model matematis yang dapat menggambarkan proses pengeringan sebenarnya.

6. KESIMPULAN

Model heterogen pengeringan butiran yang dikembangkan dalam penelitian ini dapat dipakai untuk mensimulasikan karakteristik pengeringan butiran jagung dalam unggun diam satu dimensi. Model yang diperoleh diharapkan dapat melengkapi model-model pengeringan sebelumnya, dalam hal pengembangan teknologi pengeringan butiran khususnya pengeringan butiran-butiran hasil pertanian dan perkebunan. Model satu dimensi ini dapat merupakan langkah awal untuk pengembangan model pengeringan yang lebih komprehensif dan multidimensi.

Dengan model ini, dapat disimulasikan bahwa untuk menurunkan kadar air butiran jagung dari kadar air mula-mula 0,58 kg air/kg butiran kering hingga 0,15 kg air/kg butiran kering, diperlukan waktu pengeringan 2 sampai 3 jam.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Dewan Riset Nasional atas dana penelitian yang diberikan melalui proyek RUT VII (Riset Unggulan Terpadu).

DAFTAR DAN ARTI LAMBANG

a	luas permukaan butiran spesifik per satuan volume bed ($\text{m}^2 \text{m}^{-3}$)
A	luas penampang bed (m^2)
cp_a	panas jenis gas ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
cp_v	panas jenis uap air ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
cp_p	panas jenis butiran ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
$D_{a \text{ eff}}$	koefisien dispersi aksial efektif ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
$D_{p \text{ eff}}$	difusivitas efektif di dalam butiran ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
$\lambda_{p \text{ eff}}$	konduktivitas termal efektif dalam butiran ($\text{J m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{K}^{-1}$)
$\lambda_{a \text{ eff}}$	konduktivitas termal efektif di udara ($\text{J m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{K}^{-1}$)
h	koefisien perpindahan panas ($\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{K}^{-1}$)
k_m	koefisien perpindahan massa ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
P	tekanan total (Pa)
p_w	tekanan parsial uap air (Pa)
p_{ws}	tekanan parsial uap air di permukaan butiran pada keadaan jenuh (Pa)
r	koordinat spasial arah radial untuk butiran, (m)
t	waktu (s)
T_b	temperatur udara pengering (K)
T_p	temperatur butiran (K)
U_z	kecepatan linier interstitial gas (m s^{-1})
Y	kelembaban udara pengering (kg air / kg udara kering)
X	kadar air butiran (kg air / kg butiran kering)
z	koordinat spasial arah aksial bed (m)
Δr	ukuran langkah arah radial (m)
Δz	ukuran langkah arah aksial (m)
Δt	ukuran langkah waktu (time step-size) (s)
ΔH_v	panas penguapan air (J kg^{-1})
δ	koefisien termomigrasi (K^{-1})
ϵ_b	porositas bed
ϵ_p	porositas butiran
ρ_a	densitas udara pengering (kg m^{-3})
ρ_p	densitas butiran (kg m^{-3})
Φ	kelembaban relatif

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Hellevang, K.J., "Grain Drying", <http://ndsueext.nodak.edu/extpubs/plantsci/smgrains/ae701-1.htm>, (1994).
- [2]. Brooker, D.B., F.W. Bakker-Arkema and C.W. Hall, 1978, *Drying Cereals Grains*, Westport, CN: AVI Publishing Co., Inc.
- [3]. Palancz, B., "Modelling and Simulation of Heat and Mass Transfer in A Packed Bed of Solid Particles Having High Diffusion Resistance", *Comp. and Chem. Eng.*, **9**(6), 567-581, (1985).
- [4]. Mujumdar, A.S. dan A.S. Menon, "Drying of Solids: Principles, Clasification and Selection of Dryers", *HandBook of Industrial Drying*, 2nd ed., Editor: Mujumdar, A.S., Marcel Dekker, Inc., New York, 1-39, (1995).
- [5]. Courtois, F., "Dynamic Modelling of Drying to Improve Processing Quality of Corn", *PhD Thesis*, ENSIA-INRA, Massy, France <http://www.ensia.inra.fr/~courtois/papers/PhD/PhD.html>, (1997).
- [6]. Thompson, T.L., R.M. Peart, dan G.H. Foster, "Mathematical Simulation of Corn Drying - A New Model", *Trans. of The ASAE*, **11**(4), 582-586, (1968).
- [7]. Lopez, A., M.T. Pique, dan A. Romero, "Simulation on Deep Bed Drying of Hazelnuts", *Drying Technology*, **16** (3-5), 651-665, (1998).
- [8]. Parry, J.L., "Mathematical Modelling and Computer Simulation of Heat and Mass Transfer in Agricultural Grain Drying: A Review", *J. Agric. Eng. Res.*, **32**, 1-29, (1985).
- [9]. Gupta, K.L., "Mathematical Simulation of Deep Bed Grain Drying", *PhD Thesis*, Queen's University, Kingston, (1973).
- [10]. Abid, M., R. Gibert, dan C. Laguerie, "An Experimental and Theoretical Analysis of The Mechanisms of Heat and Mass Transfer During The Drying of Corn Grains in a Fluidized Bed", *Int. Chem. Eng.*, **30**(4), 632-642, (1990).
- [11]. Marinos-Kouris, D. dan Z.B. Maroulis, "Transport Properties in The Drying of Solids", dalam *HandBook of Industrial Drying*, 2nd ed., Editor: Mujumdar, A.S., Marcel Dekker, Inc., New York, 113-159, (1995).
- [12]. Sitompul, J.P., Istadi dan I. N. Widiasta, "Modelling and Simulation of Deep Bed Grain Dryers", *Proceedings of Asian Australian Drying Conference 1999*, Bali, Indonesia, pp. 188-195, (1999).
- [13]. Zahed, A.H. and Epstein, N., "Batch and Continuous Spouted Bed Drying of Cereal Grains . The Thermal Equilibrium Model", *Can. J. of Chem. Eng.*, **70** (October), 945-953, (1992).
- [14]. Davis, M.E. "Numerical Methods and Modelling for Chemical Engineers", halaman 212-214, John Wiley & Sons, Inc., New York., (1984).