

jTEP

JURNAL KETEKNIKAN PERTANIAN

P-ISSN No. 2407-0475 E-ISSN No. 2338-8439

Vol. 4, No. 2, Oktober 2016



Publikasi Resmi
Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia
(Indonesian Society of Agricultural Engineering)
bekerjasama dengan
Departemen Teknik Mesin dan Biosistem - FATETA
Institut Pertanian Bogor



Jurnal Keteknikan Pertanian (JTEP) merupakan publikasi resmi Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia (PERTETA). JTEP terakreditasi berdasarkan SK Dirjen Penguatan Riset dan Pengembangan Kementerian Ristek Dikti Nomor I/E/KPT/2015 tanggal 21 September 2015. Selain itu, JTEP juga telah terdaftar pada Crossref dan telah memiliki Digital Object Identifier (DOI) dan telah terindeks pada ISJD, IPI, Google Scholar dan DOAJ. Sehubungan dengan banyaknya naskah yang diterima redaksi, maka sejak edisi volume 4 No. 1 tahun 2016 redaksi telah meningkatkan jumlah naskah dari 10 naskah menjadi 15 naskah untuk setiap nomor penerbitan, tentunya dengan tidak menurunkan kualitas naskah yang dipublikasikan. Jurnal berkala ilmiah ini berkiprah dalam pengembangan ilmu keteknikan untuk pertanian tropika dan lingkungan hayati. Jurnal ini diterbitkan dua kali setahun baik dalam edisi cetak maupun edisi *online*. Penulis makalah tidak dibatasi pada anggota **PERTETA** tetapi terbuka bagi masyarakat umum. Lingkup makalah, antara lain: teknik sumberdaya lahan dan air, alat dan mesin budidaya pertanian, lingkungan dan bangunan pertanian, energy alternatif dan elektrifikasi, ergonomika dan elektronika pertanian, teknik pengolahan pangan dan hasil pertanian, manajemen dan sistem informasi pertanian. Makalah dikelompokkan dalam **invited paper** yang menyajikan isu aktual nasional dan internasional, **review** perkembangan penelitian, atau penerapan ilmu dan teknologi, **technical paper** hasil penelitian, penerapan, atau diseminasi, serta **research methodology** berkaitan pengembangan modul, metode, prosedur, program aplikasi, dan lain sebagainya. Penulisan naskah harus mengikuti panduan penulisan seperti tercantum pada website dan naskah dikirim secara elektronik (*online submission*) melalui <http://journal.ipb.ac.id/index.php/jtep>.

Penanggungjawab:

Ketua Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia
Ketua Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, IPB

Dewan Redaksi:

Ketua : Wawan Hermawan (Institut Pertanian Bogor)
Anggota : Asep Sapei (Institut Pertanian Bogor)
Kudang B. Seminar (Institut Pertanian Bogor)
Daniel Saputra (Universitas Sriwijaya, Palembang)
Bambang Purwantana (Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta)
Y. Aris Purwanto (Institut Pertanian Bogor)
M. Faiz Syuaib (Institut Pertanian Bogor)
Salengke (Universitas Hasanuddin, Makasar)
Anom S. Wijaya (Universitas Udayana, Denpasar)

Redaksi Pelaksana:

Ketua : Rokhani Hasbullah
Sekretaris : Lenny Saulia
Bendahara : Hanim Zuhrotul Amanah
Anggota : Usman Ahmad
Dyah Wulandani
Satyanto K. Saptomo
Slamet Widodo
Liyantono
Sekretaris : Diana Nursolehat

Penerbit: Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia (PERTETA) bekerjasama dengan Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor.

Alamat: Jurnal Keteknikan Pertanian, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Kampus Institut Pertanian Bogor, Darmaga, Bogor 16680.
Telp. 0251-8624 503, Fax 0251-8623 026,
E-mail: jtep@ipb.ac.id atau jurnaltep@yahoo.com
Website: web.ipb.ac.id/~jtep atau <http://journal.ipb.ac.id/index.php/jtep>

Rekening: BRI, KCP-IPB, No.0595-01-003461-50-9 a/n: Jurnal Keteknikan Pertanian

Percetakan: PT. Binakerta Makmur Saputra, Jakarta

Ucapan Terima Kasih

Redaksi Jurnal Keteknikan Pertanian mengucapkan terima kasih kepada para Mitra Bebestari yang telah menelaah (*me-review*) Naskah pada penerbitan Vol. 4 No. 2 Oktober 2016. Ucapan terima kasih disampaikan kepada: Prof.Dr.Ir. Thamrin Latief, M.Si (Fakultas Pertanian, Universitas Sriwijaya), Prof.Dr.Ir. Ade M. Kramadibrata, (Fakultas Pertanian, Universitas Padjadjaran), Prof.Dr.Ir. Bambang Purwanto, MS (Jurusan Teknik Pertanian, Universitas Gadjah Mada), Prof.Dr.Ir. Tineke Madang, MS (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Prof.Dr.Ir. Sutrisno, M.Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Prof.Dr.Ir. Budi Indra Setiawan (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Siswoyo Soekarno, M.Eng (Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Brawijaya), Dr.Ir. Nugroho Triwaskito, MP (Prodi. Ilmu dan Teknologi Pangan, Universitas Muhammadiyah Malang), Dr.Ir. Lady Corrie Ch Emma Lengkey, M.Si (Fakultas Pertanian, Universitas Sam Ratulangi), Dr.Ir. Andasuryani, S.TP, M.Si. (Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Andalas), Dr. Yazid Ismi Intara, SP.,M.Si. (Fakultas Pertanian, Universitas Mulawarman), Dr. Ir. Supratomo, DEA (Fakultas Pertanian, Universitas Hasanuddin), Dr. Suhardi, STP.,MP (Jurusan Teknologi Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Hasanuddin), Dr.Ir. Desrial, M.Eng (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. I Dewa Made Subrata, M.Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Lilik Pujantoro, M.Agr (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. I Wayan Budiastira, M.Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Dyah Wulandani, M.Si (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Leopold O. Nelwan, M.Si (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Gatot Pramuhadi, M.Si (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Sugiarto (Departemen Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr. Ir. M. Yanuar J. Purwanto, MS (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Chusnul Arief, STP., MS (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr. Yudi Chadirin, STP.,M.Agr (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor).

Technical Paper

Simulasi Pengeringan Gabah pada Pengering *Spouted Bed* Dua Dimensi

Simulation of Paddy Drying on Two Dimensional Spouted Bed Dryer

Yusnita Oni Napitu, Departemen Teknik Mesin dan Bisosistem, Institut Pertanian Bogor .

Email: yusnita.napitu@gmail.com

Leopold Oscar Nelwan, Departemen Teknik Mesin dan Bisosistem, Institut Pertanian Bogor.

Email: lonelwan@yahoo.com

Dyah Wulandani, Departemen Teknik Mesin dan Bisosistem, Institut Pertanian Bogor.

Email: dwulandani@yahoo.com

Abstract

A mathematical model developed by Nellist et al. (1987) was adopted in this continuous two dimensional spouted bed dryer (2DSB) configuration. The objective of this research was to predict air temperature, grain temperature, absolute humidity and moisture content during the drying process in 2DSB. In simulation, spouted bed was divided into two regions which were spout and downcomer regions. Air and grains in spout and downcomer were assumed to be moving with co- and counterflow principles. During experiments, drying air temperature at 80°C and different paddy initial moisture contents (at 41% db, 36% db and 30% db) were used. Based on data, the air temperature profiles in spout region showed that air temperature dropped significantly with the axial positions while downcomer regions resulted fluctuated value. The average deviation of the air temperature in the spout was less than 4.5% and within downcomer was less than 4.2%. Grain temperature and absolute humidity in spout region increased slowly whilst decreasing in steps in downcomer regions with axial position. The moisture content decreased both in spouted and downcomer regions. Moisture reduction in spout region was higher than downcomer regions because of the high air flow rate in spout region.

Keywords: *Mathematical model, moisture content, paddy, two dimensional spouted bed dryer*

Abstrak

Penelitian ini menggunakan model matematika yang dikembangkan oleh Nellist *et al.* (1987) untuk pengering *spouted bed* dua dimensi tipe kontinyu. Tujuan dari penelitian ini adalah menduga sebaran suhu udara, suhu gabah, kelembaban mutlak udara dan kadar air selama proses pengeringan. Pada proses simulasi, ruang pengering dibagi menjadi dua daerah yaitu daerah *spout* dan daerah *downcomer*. Udara dan bahan di daerah *spout* dan *downcomer* diasumsikan bergerak dengan prinsip aliran *co-* dan *counterflow*. Suhu udara yang digunakan selama pengujian adalah suhu 80°C dengan kadar air awal bahan yang berbeda-beda yaitu 41% bk, 36% bk dan 30% bk. Dari data pengujian menunjukkan bahwa suhu udara di daerah *spout* akan menurun secara signifikan terhadap posisi aksial ruang pengering tetapi pada daerah *downcomer* suhu udara bernilai fluktuatif. Nilai rata-rata deviasi pada pendugaan suhu udara daerah *spout* bernilai kurang dari 4.5% dan pada daerah *downcomer* deviasi bernilai kurang dari 4.2%. Suhu gabah dan kelembaban mutlak udara pada daerah *spout* menunjukkan bahwa nilai akan naik secara bertahap sementara untuk daerah *downcomer* nilai menurun secara bertahap terhadap posisi aksial. Penurunan kadar air menunjukkan bahwa untuk daerah *spout* dan daerah *downcomer* mengalami penurunan nilai. Penurunan kadar air daerah *spout* lebih besar dibandingkan daerah *downcomer* karena pada daerah *spout* laju aliran udara lebih besar.

Kata Kunci: Kadar air, model matematika, gabah, pengering *spouted bed* dua dimensi

Diterima: 07 Maret 2015; Disetujui: 13 Mei 2016

Latar Belakang

Pengering *spouted bed* awalnya dikembangkan untuk pengeringan gandum dengan kondisi *well-stirred* pada tahun 1954, sebagai metode pengeringan alternatif tumpukan terfluidisasi yang mengalami kondisi *bubbling* dan *slugging* selama pengeringan (Gisler 1983). Mathur dan Epstein (1974) mempelajari pengeringan biji-bijian pada pengering *spouted bed* tipe *conical-cylindrical* dengan saluran *inlet* udara yang kecil. Saluran *inlet* udara yang kecil dapat meningkatkan distribusi bahan dan udara di dalam pengering yang berimbas tingginya pindah massa dan panas yang terjadi selama proses pengeringan. Namun, tipe ini memiliki kekurangan yaitu tingginya penurunan tekanan jika dibandingkan dengan pengering tipe *fluidized bed* dan keterbatasan kapasitas pengeringan. Untuk meningkatkan kapasitas pengeringan, Mujumdar (1984) mengembangkan pengering *spouted bed* dua dimensi dan penambahan unit *draft plates* di bagian tengah ruang pengering sebagai solusi penurunan tekanan yang terlalu tinggi (Viswanathan et al. 1986).

Pengering *spouted bed* merupakan pengering dengan suhu tinggi. Keuntungan pengeringan ini adalah kapasitas pengeringan yang lebih besar karena rasio laju udara dengan massa dari produk dan besarnya laju kontak suhu dengan bahan dibandingkan pengeringan suhu rendah. Selain itu, pengering dengan *spouted bed* biasanya digunakan

sebagai pengering *two stage* yaitu pengering yang sebaiknya digunakan pada kadar air awal bahan 18–31% bb (basis basah) (Wiset et al. 2001). Pengering *two stage* memiliki keuntungan yaitu mengurangi kebutuhan energi karena peningkatan efisiensi udara dibandingkan dengan pengeringan kontinyu konvensional, kapasitas pengeringan semakin tinggi dan mutu produk pengeringan juga semakin tinggi (Wiset et al. 2001). Kondisi pada pengering *spouted bed* diasumsikan berupa kombinasi dari dua bentuk hidrodinamika yaitu transfer pneumatik pada daerah *spout* dan perpindahan bahan pada daerah *downcomer* (Madhiyanon et al. 2007).

Gabah baru panen umumnya memiliki kadar air berkisar 21 – 26% bb sehingga proses pengeringan dibutuhkan untuk menjaga kualitas gabah. Gabah yang berkualitas baik dapat dihasilkan jika alat pengering dikontrol untuk menjaga kadar air keluaran dalam batas yang dapat diterima. Simulasi dapat digunakan untuk menduga kondisi udara dan bahan di dalam ruang pengering selama proses pengeringan. Kualitas gabah dapat diketahui setelah dilakukan penggilingan dan dianalisis lebih lanjut yang dilaporkan dalam *paper* terpisah.

Tujuan penelitian ini adalah mengadopsi model pengeringan yang telah dikembangkan oleh Nellist et al. (1987) untuk menduga sebaran suhu udara, suhu bahan, kelembaban *absolute* udara dan kadar air bahan selama proses pengeringan. Menurut Nellist et al. (1987), model ini dapat digunakan untuk pengering tipe *co-* dan *counter flow* yang prinsip pengeringan sama dengan pengering *spouted bed*.

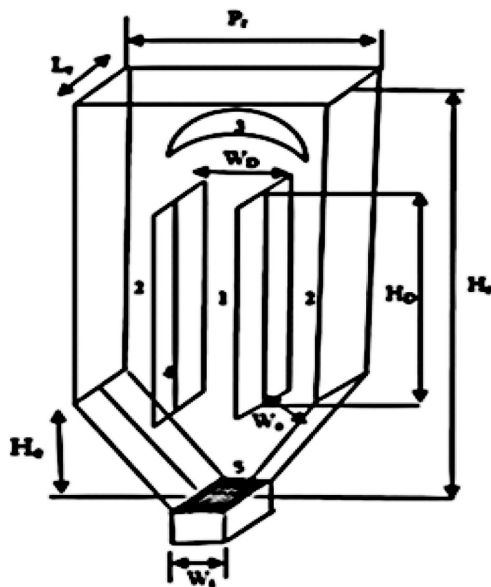
Bahan dan Metode

Bahan dan Alat

Bahan uji yang digunakan pada penelitian ini adalah gabah dengan kadar air awal 41%, 3 % dan 30% bk (basis kering). Instrumentasi pengujian alat adalah termokopel tipe T, sensor suhu LM35DZ, termometer bola basah dan bola kering untuk suhu lingkungan. Untuk pencatatan suhu digunakan *hybrid recorder* tipe dot dengan ketelitian alat ±0.05°C dan *data logger*. Anemometer tipe Kanomax model 3011 dengan ketelitian ±0.05 m/s digunakan untuk pengukuran kecepatan udara. Kadar air diukur dengan metode gravimetri (oven).

Spesifikasi Alat Pengering

Skema dan dimensi ruang pengering pada penelitian ini disajikan pada Gambar 1. Ruang pengering yang digunakan pada penelitian ini adalah *spouted bed* dua dimensi yang dilengkapi dengan *draft plates*. *Draft plates* (4) diharapkan dapat meningkatkan stabilitas udara yang disebarkan dan sirkulasi bahan di dalam ruang pengering. Di bagian dasar ruang pengering juga ditambahkan plat distributor (5) agar bahan tidak jatuh dan masuk ke daerah plenum. Ruang



Keterangan :	Dimensi :
1. Daerah <i>spout</i>	Hr = Tinggi ruang pengering : 0.5 m
2. Daerah <i>downcomer</i>	Lr = Lebar ruang pengering : 0.15 m
3. Reflektor	Pr = Panjang ruang pengering : 0.2 m
4. <i>Draft plates</i> (dp)	Hd = Tinggi <i>draft plates</i> : 0.2 m
5. Plat distributor	He = Jarak antara dp dan plat : 0.05 m
	Wi = Saluran inlet udara : 0.02 m
	Wd = Jarak <i>draft plates</i> = 0.03 m
	Wo = Jarak normal : 0.01 m

Gambar 1. Skema ruang pengering.

pengering dibagi menjadi dua daerah yaitu daerah *spout* (1) dan daerah *downcomer* (2). Daerah *spout* merupakan daerah yang berada diantara *draft plates* sedangkan daerah *downcomer* merupakan daerah di samping *draft plates*. Ruang pengering juga dilengkapi dengan reflektor (3) yang berfungsi mengembalikan bahan agar kembali ke daerah *downcomer*.

Percobaan

Percobaan dilakukan untuk melihat kinerja pengering dengan kadar air awal gabah yang berbeda. Bahan diletakkan di dalam hoper di atas ruang pengering dan dialirkan ke dalam ruang pengering dengan *screw feeder*. Skema alat pengering disajikan pada Gambar 2.

Massa *hold-up* gabah pada kondisi awal adalah 0.1 kg untuk setiap percobaan. Pengukuran kadar air gabah, suhu udara, suhu gabah dan kelembaban udara diukur setiap 10 menit. Titik pengukuran untuk validasi model berada pada ketinggian 8 cm, 12 cm, 18 cm dan 30 cm dari saluran *inlet* udara untuk daerah *spout* maupun *downcomer*. Kelembaban *outlet* ruang pengering diukur dengan termometer bola basah dan bola kering pada ketinggian 40 cm dari saluran *inlet* udara. Kelembaban udara masuk ruang pengering diukur di daerah plenum dengan termometer bola basah dan bola kering. Suhu *inlet* udara diatur pada suhu 80°C.

Model Pengeringan Spouted Bed Dua Dimensi

Model yang dikembangkan oleh Nellist *et al.* (1987) untuk pengeringan biji-bijian merupakan persamaan perpindahan panas dan massa. Tahap awal untuk mengembangkan persamaan adalah dengan menurunkan persamaan untuk mendeskripsikan perpindahan panas dan massa pada lapisan tipis pada waktu yang relatif kecil. Tumpukan bahan dibagi menjadi lapisan yang tipis dengan ketebalan (*dz*) dengan nilai kadar air tertentu (*M*) bergerak pada sumbu *z* dengan laju aliran udara (*G*) dan suhu udara (*T_a*) dan kelembaban mutlak (*H*) (Gambar 3). Dengan asumsi bahwa kehilangan panas hanya terjadi pada aliran udara, maka persamaan diferensial perubahan suhu udara selama waktu tertentu (*t*) dapat ditulis dengan persamaan :

$$\Delta T_a = \left(\frac{\delta T_a}{\delta t} \right) dt + \left(\frac{\delta T_a}{\delta z} \right) dz \tag{1}$$

Namun, dalam waktu yang relatif singkat maka perubahan suhu udara dan kelembaban mutlak udara akan lebih berpengaruh terhadap ketebalan tumpukan, sehingga dapat ditulis dengan notasi masing-masing $\left(\frac{\delta T_a}{\delta z} \right) dz$ dan $\left(\frac{\delta H}{\delta z} \right) dz$.

Sedangkan perubahan suhu gabah dan kadar air bahan akan berpengaruh lebih besar jika dihubungkan terhadap waktu, sehingga dapat ditulis dengan notasi masing-masing $\left(\frac{\delta T_g}{\delta t} \right) dt$ dan $\left(\frac{\delta M}{\delta t} \right) dt$. Hubungan antara suhu udara, suhu gabah,

kelembaban udara dan kadar air akan dinyatakan dalam empat persamaan.

1. Kesetimbangan kadar air (Nellist *et al.* 1987)
Perubahan massa air pada bahan sama dengan perubahan massa air di udara sehingga persamaan dapat ditulis :

$$\rho dz \left(- \frac{\delta M}{\delta t} \right) dt = G dt \left(\frac{\delta H}{\delta z} \right) dz \tag{2}$$

$$\rho \frac{dz}{G} \left(- \frac{\delta M}{\delta t} \right) = - \left(\frac{\delta H}{\delta z} \right) dz \tag{3}$$

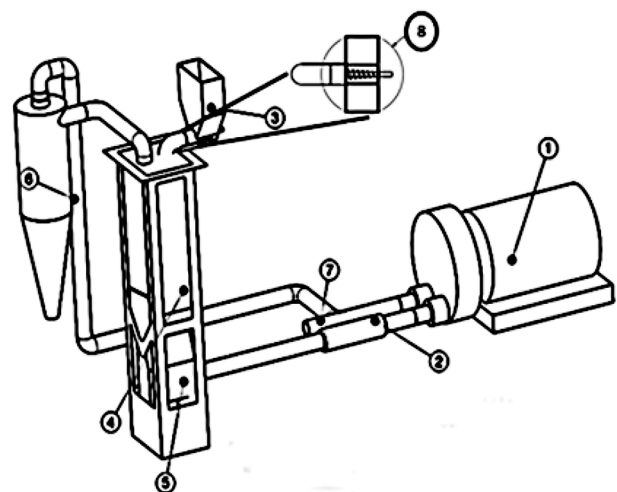
Persamaan (3) dapat ditulis dalam notasi numerik menjadi :

$$\rho \frac{dz}{G} \left(- \frac{\delta M}{\delta t} \right) = - \left(\frac{\delta H}{\delta z} \right) dz \tag{4}$$

Dalam hal ini ρ adalah *bulk density* bahan (kg/m^3), *H* adalah kelembaban mutlak udara (desimal), *z* adalah ketebalan (m), *G* adalah laju aliran per luas (kg/m^2s), *M* adalah kadar air (desimal bk) dan *t* adalah waktu (s).

2. Persamaan pindah panas (Nellist *et al.* 1987)
Pindah panas merupakan penjumlahan dari perubahan panas bahan dan entalpi penguapan kelembaban dikurangi dengan entalpi kelembaban sebelum penguapan. Secara matematis dapat ditulis dengan persamaan :

$$hS \Delta z \left[\left(T_a + \frac{1}{2} \Delta T_a - \left(T_g + \frac{1}{2} \Delta T_g \right) \right) \right] \Delta t = \rho \Delta z \cdot \Delta T_g (C_{pg} + C_{pl} M) + \rho \Delta z (-\Delta M) (L_g + C_{pw} T_a - C_{pl} T_g) \tag{5}$$



- Keterangan :
- | | |
|--------------------|----------------------------------------------------------------|
| 1. Blower | 6. Siklon |
| 2. Heater | 7. Saluran pencampur udara lingkungan dengan udara dari siklon |
| 3. Hoper | 8. <i>Screw feeder</i> |
| 4. Ruang pengering | |
| 5. Plenum | |

Gambar 2. Skema sistem pengering.

$$2(T_a - T_g) + \Delta T_a - \Delta T_g = \rho \frac{2}{hS} \frac{\Delta T_g}{\Delta t} (C_{pg} + C_{pl}M) - \rho \frac{2}{hS} \frac{\Delta M}{\Delta t} (L_g + C_{pw}T_a - C_{pl}T_g) \quad (6)$$

Persamaan (6) dapat disederhanakan menjadi :
 $A = 2(T_a - T_g); B = (C_{pg} + C_{pl}M); Y = (L_g + C_{pw}T_a - C_{pl}T_g)$

Sehingga persamaan (5) dapat ditulis menjadi :

$$\Delta T_a = -A + \Delta T_g \left(1 + \rho \frac{2}{hS} \frac{B}{\Delta t} \right) - \rho \frac{2}{hS} \frac{\Delta M}{\Delta t} Y \quad (7)$$

Dalam hal ini, hS adalah koefisien volumetrik pindah panas (kJ/m³sK), T_a adalah suhu udara (°C), T_g adalah suhu bahan (°C), t adalah waktu (s), C_{pg} adalah panas spesifik bahan (kJ/kgK), C_{pl} adalah panas spesifik air cair (kJ/kgK), C_{pw} adalah panas spesifik uap air (kJ/kgK), L_g adalah panas laten penguapan air di dalam bahan (kJ/kg).

3. Persamaan kesetimbangan panas (Nellist et al. 1987)

Persamaan kesetimbangan panas diturunkan untuk memperoleh suhu gabah selama proses pengeringan. Persamaan dapat ditulis menjadi :

$$E = C_{pa} + C_{pw} \left[H - \rho \frac{\Delta z}{G} \frac{\Delta M}{\Delta t} \right] \quad (8)$$

$$F = (C_{pw}T_a + L_a - C_{pl}T_g) \quad (9)$$

$$\Delta T_g = \frac{A + \rho \frac{\Delta M}{\Delta t} \left[\frac{2Y}{hS} + \frac{\Delta z F}{GE} \right]}{\left\{ 1 + \rho \frac{\Delta z}{\Delta t} \left[\frac{2B}{hS} + \frac{\Delta z}{GE} (B + C_{pl}\Delta M) \right] \right\}} \quad (10)$$

Dalam hal ini, ρ adalah bulk density bahan (kg/m³), M adalah kadar air bahan (desimal bk), t adalah waktu (s), C_{pa} adalah panas spesifik udara (kJ/kgK), C_{pw} adalah panas spesifik uap air (kJ/kgK), H adalah kelembaban mutlak udara (desimal), z adalah ketebalan tumpukan (m), T_a adalah suhu udara (°C), T_g adalah suhu gabah (°C), L_a adalah panas laten penguapan air (kJ/

kg) dan G adalah laju aliran per satuan luas (kg/m²s).

4. Laju pengeringan (Nellist et al. 1987)
 Persamaan diferensial kadar air yang hilang ΔM sebagai fungsi dari tiga faktor yaitu T_a, T_g dan H. Persamaan laju penurunan kadar air dapat dituliskan sebagai :

$$\Delta M = \frac{-k(M - M_e)\Delta t}{(1 + \frac{1}{2}k\Delta t)} \quad (11)$$

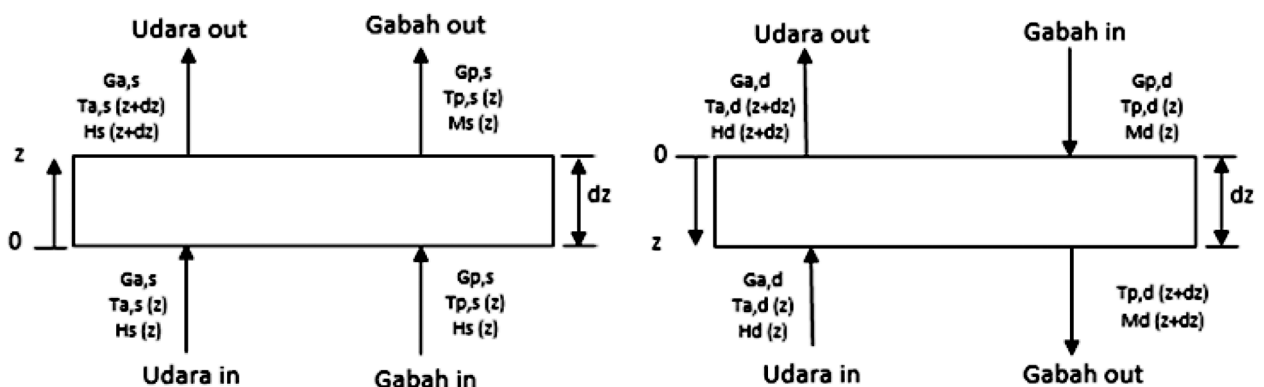
Dalam hal ini, k adalah konstanta pengeringan (1/s), M adalah kadar air gabah (desimal bk), M_e adalah kadar air kesetimbangan (desimal bk) dan t adalah waktu (s).

Pengering *spouted bed* diasumsikan bergerak dengan dua tipe aliran yaitu *co-flow* untuk daerah *spout* (Gambar 3a) dan *counter-flow* untuk daerah *downcomer* (Gambar 3b) (Madhiyanon et al. 2007). Untuk simulasi kondisi pengeringan di daerah *spout*, posisi *inlet* gabah dan *inlet* udara berada pada posisi yang sama sehingga persamaan (4), (7), (10) dan (11) dapat langsung digunakan.

Untuk simulasi daerah *downcomer*, kondisi awal diasumsikan dengan posisi udara masuk dan gabah masuk berada pada posisi yang sama sehingga kondisi pengeringan dari lapisan 0 (udara masuk) sampai lapisan n diketahui (bahan masuk). Kondisi pada lapisan n (pada bagian udara keluar) ditulis kembali sebagai lapisan (n-1). Proses ini dilakukan diulangi kembali sampai ke daerah udara masuk sehingga diperoleh kondisi pada daerah *downcomer*. Tabel 1 menyajikan konstanta dan persamaan yang digunakan pada simulasi dan Tabel 2 menyajikan kondisi yang digunakan selama proses simulasi.

Pendugaan Kadar Air Pengering Tipe Kontinyu

Pendugaan kadar air pengering tipe kontinyu dapat menggunakan model yang telah dikembangkan oleh Zahed dan Epstein (1992). Kesetimbangan massa yang terjadi pada tumpukan untuk pengumpanan secara kontinyu dengan kadar air awal yang sama (M₀), laju aliran massa bahan



Gambar 3. Skema aliran bahan dan udara di dalam ruang pengering pada satu lapisan.

Tabel 1. Persamaan dan parameter yang digunakan pada simulasi.

Variabel	Nilai	Satuan	Sumber
C_{pa}	1,005	J/kgK	O'Collaghan <i>et al.</i> (1971)
C_{pv}	1,883	J/kgK	O'Collaghan <i>et al.</i> (1971)
C_{pg}	1,300	J/kgK	O'Collaghan <i>et al.</i> (1971)
C_{pl}	4,187	J/kgK	O'Collaghan <i>et al.</i> (1971)
ρ	$552 + 282 M$	kg/m^3	Laithong (1987)
k	$139.3 \exp (-4426/(T_a+273.2))$	1/s	O'Collaghan <i>et al.</i> (1971)
L_t	2,500,000	J/kg	O'Collaghan <i>et al.</i> (1971)
L_g	$L_t (1+23 \exp (-40))$	J/kg	Gallaghan (1951)
Me	$[\ln(1-RH)/(c_1 T_{abs})^{1/c_2}]/10$ $c_1 = -3,146 \times 10^{-6}$; $c_2 = 2,464$	kg/kg	Laithong (1987)
h	$7.144 \times 10^4 (G_a(T_a+273.2)/P)^{0.601}$	W/m^3K	Boyce (1965)

Tabel 2. Kondisi yang digunakan saat simulasi.

Variabel	Percobaan 1	Percobaan 2	Percobaan 3
G_{gs} (kg/sm ²)	0.0758	0.0758	0.0758
G_{as} (kg/sm ²)	5.99	5.99	5.99
G_{gd} (kg/sm ²)	0.0744	0.0744	0.0744
G_{ad} (kg/sm ²)	2	2	2
M_o (%bk)	41	36	30
T_a (°C)	80	80	80
T_{go} (°C)	26	29	32
\dot{m}_{in} (kg/jam)	3	3	3
H (kg/kg)	0.022	0.022	0.022

kering \dot{m}_B dan komposisi kadar air produk \bar{M} dapat ditulis dengan persamaan :

$$\dot{m}_A(Y - Y_i) = \dot{m}_B(M_o - \bar{M}) \tag{12}$$

Dalam hal ini \dot{m}_A adalah laju aliran massa udara kering (g/menit), Y adalah kelembaban udara *outlet* (g uap air/g udara kering), Y_i adalah kelembaban udara *inlet* (g uap air/g udara kering) dan M_o adalah kadar air gabah yang diumpankan (g/g).

Jika aliran bahan di dalam ruang pengering diasumsikan berpindah dengan prinsip *plug flow*, maka nilai kadar air rata-rata bahan (\bar{M}) pada proses *batch* selama waktu tinggal ($\bar{t} = m_B/\dot{m}_B$) akan bernilai sama dengan kadar air rata-rata bahan (\bar{M}) pada proses kontinyu. Namun, jika bahan tidak diasumsikan bergerak mengikuti prinsip pengeringan *plug flow* maka nilai komposisi akhir produk dapat dihitung dengan persamaan :

$$\bar{M} = \int_0^\infty \bar{M}(\theta)E(\theta)d\theta \tag{13}$$

Dimana : $\theta = t/\bar{t}$. Dalam hal ini t adalah waktu (menit) dan \bar{t} adalah waktu tinggal rata-rata bahan yaitu m_B/\dot{m}_B , m_B adalah massa *hold-up* bahan kering (g), \dot{m} adalah laju aliran massa bahan (g/menit), \bar{M} adalah volume rata-rata kadar air masing-masing

gabah (g/g), $E(\theta)$ adalah fungsi distribusi bahan keluar dan \bar{M} adalah volume rata-rata kadar air (g/g).

Fungsi distribusi keluaran bahan ($E(\theta)$) memiliki relasi terhadap distribusi waktu selama proses pengeringan ($I(\theta)$) yang dapat ditulis dengan persamaan :

$$E(\theta) = - dI(\theta) / d\theta \tag{14}$$

Jika diasumsikan bahwa pencampuran bahan di dalam *spouted bed* terjadi secara sempurna, maka persamaan (14) dapat ditulis menjadi :

$$E(\theta) = I(\theta) = \exp(-\theta) \tag{15}$$

Jika diasumsikan pencampuran bahan terjadi secara baik namun tidak sempurna di dalam *spouted bed*, maka distribusi waktu selama proses pengeringan ($I(\theta)$) dapat ditulis menjadi :

$$I(\theta) = \exp [- (\theta - 0.1)/0.92] \tag{18}$$

Sehingga persamaan (14) dapat ditulis menjadi :

$$E(\theta) = (1/0.92) \exp [- (\theta - 0.1)/0.92] \tag{17}$$

Persamaan (15) atau (17) dapat digunakan sebagai nilai $E(\theta)$ dalam persamaan (13) dimana sisi sebelah kanan persamaan dapat diintegrasikan secara numerik. Ketika persamaan (17) digunakan, maka konstanta waktu penundaan 0.1 akan dieliminasi untuk nilai θ yang lebih kecil dari 0.1 sehingga persamaan (11) dapat dituliskan dengan persamaan :

$$\bar{M} = (1/0,92) \left\{ \int_0^{0,1} \bar{M}(\theta) \exp(-\theta/0,92) d\theta + \int_{0,1}^\infty \bar{M}(\theta) \exp[-(\theta - 0,10)/0,92] d\theta \right\} \tag{18}$$

Hasil dan Pembahasan

Hasil Simulasi Sebaran Suhu Udara Daerah Spout dan Downcomer

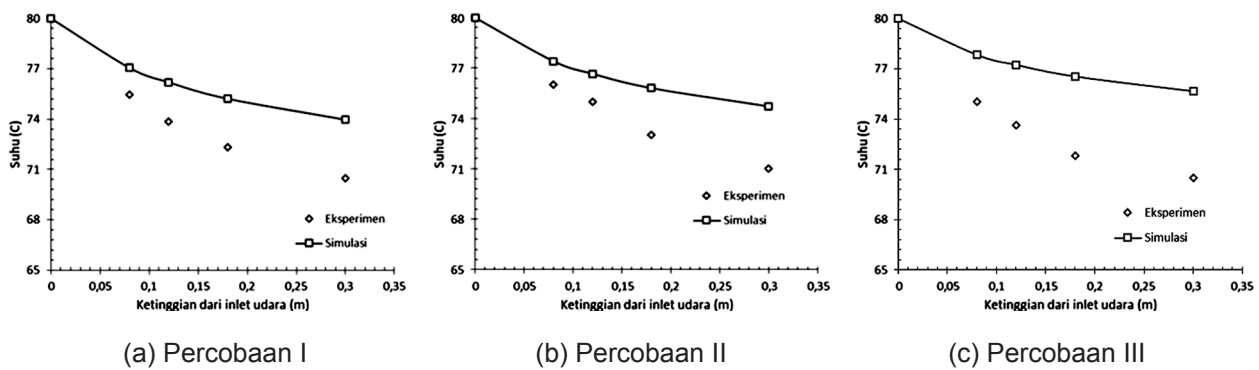
Gambar 4 (a), (b) dan (c) menyajikan data sebaran suhu udara rata-rata eksperimen dan simulasi pada daerah *spout* selama proses pengeringan. Penurunan suhu udara dari ketinggian 0.08 m ke 0.3 m mempresentasikan jumlah panas yang dikonsumsi untuk mengurangi kadar air bahan selama proses pengeringan. Dari grafik dapat dilihat bahwa suhu udara menurun terhadap ketinggian ruang pengering. Penurunan suhu yang paling besar terjadi pada ketinggian 0 m – 0.08 m dari bawah yaitu daerah sirkulasi bahan dari *downcomer* ke daerah *spout*. Menurut Freitas dan Freire (1997), laju sirkulasi pada bagian ini dapat bernilai 10 kali lebih cepat dibandingkan laju bahan yang masuk ruang pengering. Laju sirkulasi yang cepat akan meningkatkan laju udara sehingga laju penguapan kadar air bahan akan meningkat sehingga penurunan suhu pada daerah tersebut akan lebih besar dibandingkan wilayah yang lain. Penurunan suhu pada ketinggian selanjutnya tidak terlalu signifikan karena perbedaan suhu gabah dengan udara pengering tidak terlalu tinggi sehingga mengurangi laju pindah panas konvektif.

Dari grafik dapat dilihat bahwa data hasil simulasi belum mempresentasikan data eksperimen dengan baik. Hal ini terjadi karena pada simulasi, kadar air yang digunakan merupakan kadar air awal gabah

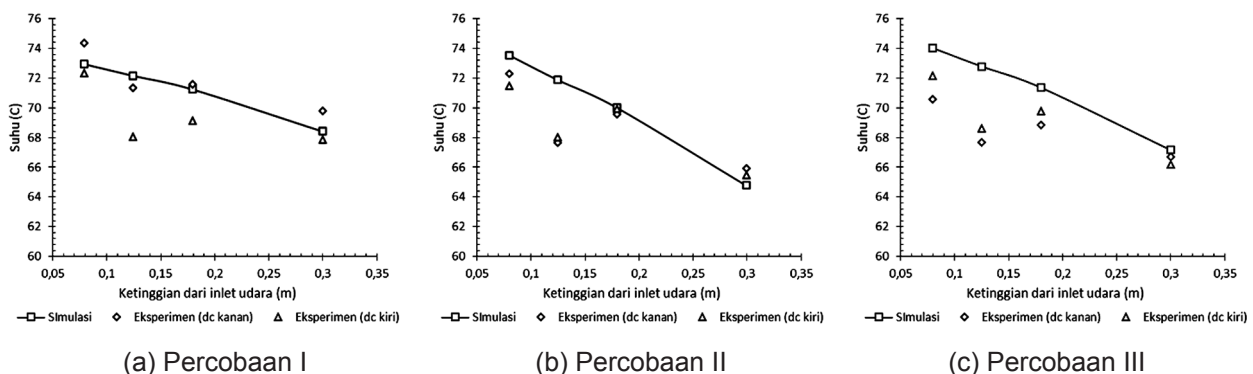
yang masuk ke dalam ruang pengering yang seharusnya kadar air yang digunakan merupakan kadar air yang keluar dari daerah *downcomer* yang belum dimodelkan secara matematika. Persentasi *error* pada daerah *spout* pada masing-masing percobaan adalah 2.84% untuk percobaan pertama, 2.62% untuk percobaan kedua dan 4.45% untuk percobaan ketiga.

Pada Gambar 5 (a), (b) dan (c) disajikan suhu udara rata-rata simulasi dan eksperimen pada daerah *downcomer*. Sebaran suhu udara di daerah *downcomer* bernilai fluktuatif. Suhu udara pada ketinggian 0 – 0.08 m memiliki suhu yang paling tinggi karena posisi ini masih dekat dengan *inlet* udara. Selanjutnya pada ketinggian 0.08 – 0.12 m suhu udara mengalami penurunan. Hal ini disebabkan oleh penumpukan bahan ketika proses pengujian. Penumpukan gabah mengakibatkan udara akan terperangkap di dalam tumpukan gabah sehingga proses pindah panas antara bahan dan udara terjadi lebih cepat dan suhu udara akan menurun dari ketinggian 0 – 0.08 m.

Setelah posisi 0.08 – 0.12 m, suhu udara akan naik kembali. Hal ini dapat disebabkan oleh dua faktor yaitu pada ketinggian 0.12 – 0.18 m tidak terdapat tumpukan gabah dan juga suhu udara dari daerah *spout* akan tersebar dan memasuki daerah *downcomer*. Suhu udara akan menurun kembali pada posisi 0.18 – 0.3 m karena pada daerah ini udara telah mengandung uap air yang diperoleh dari pengeringan gabah.



Gambar 4. Validasi suhu udara pengering daerah *spout*.



Gambar 5. Validasi suhu udara pengering daerah *downcomer*.

Tabel 3. Persentasi error suhu udara data hasil simulasi dan eksperimen.

Percobaan	Rataan persentasi <i>error</i> suhu udara (%)		
	<i>Spout</i>	<i>Downcomer</i> kanan	<i>Downcomer</i> kiri
I	2.84	1.39	2.71
II	2.62	2.59	2.44
III	4.45	4.18	3.12

Tabel 4. Data kadar air keluar dari ruang pengering simulasi dan eksperimen

Percobaan	Simulasi (% bk)	Eksperimen (% bk)
I	28.7	23.0
II	25.2	24.8
III	21.5	21.3

Data hasil simulasi juga belum mempresentasikan dengan baik data yang sama dengan data eksperimen. Hal ini terjadi karena pada model belum diperhitungkan pindah panas pada dinding *draft plates*. Persentasi *error* data hasil simulasi dan eksperimen suhu udara disajikan pada Tabel 3.

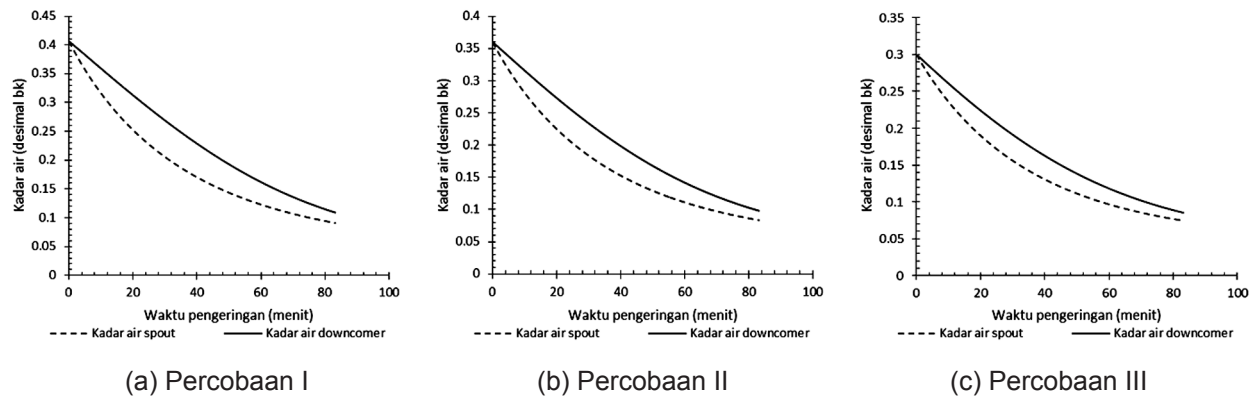
Hasil Simulasi Penurunan Kadar Air Gabah

Gambar 6 menyajikan hasil simulasi kadar air selama proses pengeringan. Dari grafik dapat

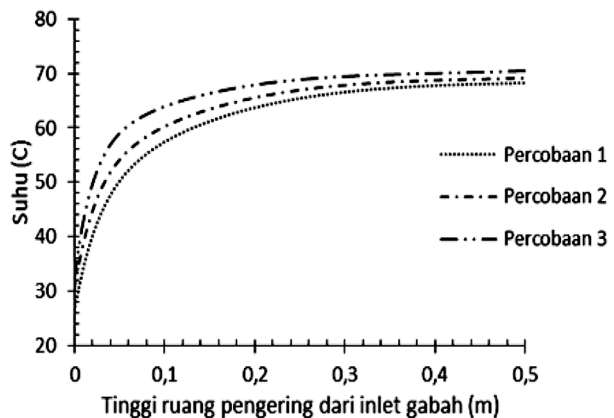
dilihat bahwa penurunan kadar air untuk daerah *spout* lebih cepat dibanding daerah *downcomer*. Hal ini terjadi karena laju aliran massa udara daerah *downcomer* lebih rendah dibandingkan di daerah *spout* sehingga energi yang tersedia untuk proses pengeringan bahan lebih kecil dibandingkan pada daerah *spout*. Sedangkan penurunan kadar air di daerah *downcomer* diakibatkan oleh panas yang terakumulasi di dalam gabah yang dijadikan sebagai sumber panas internal untuk menguapkan air pada permukaan gabah, kemudian air permukaan akan diangkat oleh udara pengering yang berada di wilayah *downcomer* sehingga gabah akan lebih dingin ketika bersirkulasi pada daerah *downcomer*. Validasi kadar air tidak dilakukan karena model yang digunakan dalam simulasi menggunakan hubungan antara kadar air terhadap waktu yang biasa digunakan untuk pengeringan *batch*. Pada pengering tipe kontinyu, model pendugaan kadar air hanya diuji pada satu waktu saja karena kadar air yang keluar dari ruang pengering umumnya bernilai sama. Model yang digunakan adalah model Zahed dan Epstein (1992) dan akan dibahas pada sub-bab selanjutnya.

Hasil Simulasi Sebaran Suhu Gabah

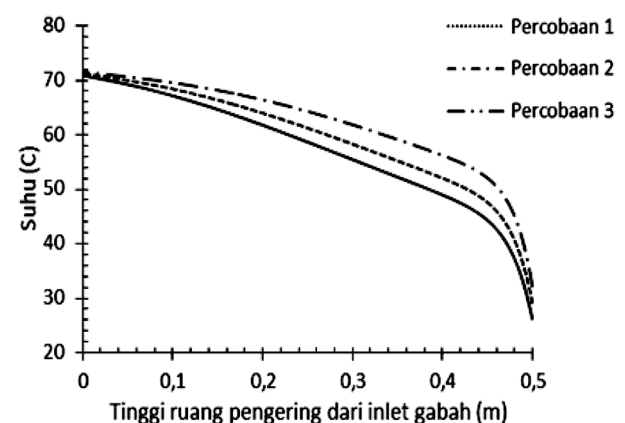
Pada penelitian ini, suhu gabah tidak diukur selama proses pengeringan. Namun, suhu gabah dapat diprediksi dengan simulasi secara numerik



Gambar 6. Simulasi kadar air selama proses pengeringan.



Gambar 7. Suhu gabah daerah *spout*.



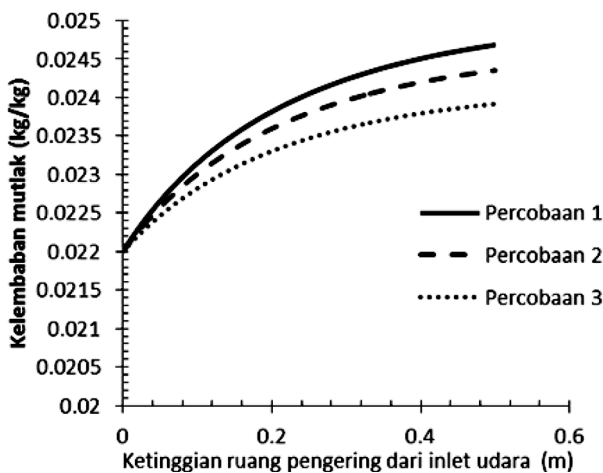
Gambar 8. Suhu gabah daerah *downcomer*.

dengan persamaan yang dikembangkan oleh Nellist et al. (1987). Suhu gabah pada daerah *spout* disajikan pada Gambar 7. Dari grafik dapat dilihat bahwa suhu gabah akan naik secara perlahan dan kemudian suhu konstan. Kenaikan suhu gabah disebabkan oleh besarnya nilai pindah panas akibat perbedaan suhu yang besar antara udara dan gabah. Suhu gabah keluaran dari daerah *spout*, dijadikan kondisi *inlet* bagi daerah *downcomer*.

Suhu gabah daerah *downcomer* disajikan pada Gambar 8. Dari grafik dapat dilihat bahwa suhu gabah mengalami penurunan ketika menjauhi saluran *inlet* ruang pengering. Hal ini sejalan dengan penurunan suhu udara yang semakin menurun terhadap ketinggian aksial ruang pengering. Pada posisi 0.4 – 0.5 m merupakan posisi dimana gabah masuk sehingga pada posisi tersebut suhu gabah masih rendah. Namun pada posisi selanjutnya yaitu dari posisi 0 – 0.4 m suhu gabah dan suhu udara secara perlahan akan mengalami kondisi kesetimbangan dan selanjutnya akan bernilai konstan seperti pola pada daerah *spout*.

Hasil Simulasi Sebaran Kelembaban Mutlak Udara

Pada penelitian ini, kelembaban mutlak udara tidak diukur selama proses pengeringan. Namun, kelembaban mutlak dapat diprediksi dengan simulasi secara numerik dengan persamaan yang dikembangkan oleh Nellist et al. (1987). Pada Gambar 9 disajikan perubahan kelembaban mutlak udara pada setiap pengujian di daerah *spout*. Kelembaban mutlak dipengaruhi oleh perubahan suhu udara atau perubahan tekanan selama proses pengeringan. Dari grafik dapat dilihat bahwa nilai kelembaban mutlak akan semakin tinggi terhadap ketinggian aksial ruang pengering dimana *inlet* udara sebagai titik awal. Hal ini disebabkan oleh suhu udara yang semakin rendah dan kandungan jumlah air di dalam udara semakin tinggi karena laju pengeringan bahan yang terjadi selama proses



Gambar 9. Kelembaban mutlak udara daerah *spout*.

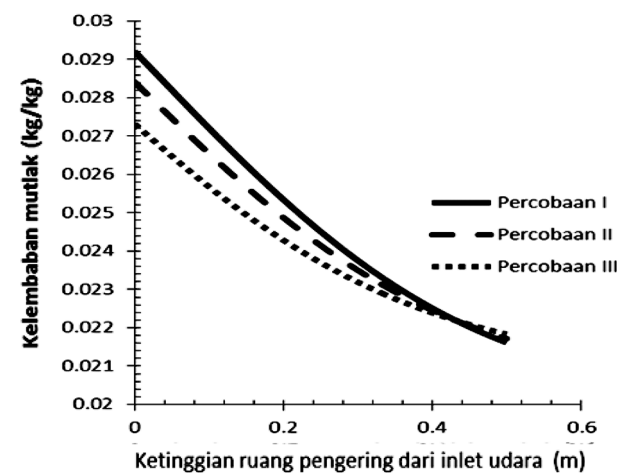
pengeringan. Pada Gambar 10 disajikan perubahan kelembaban mutlak udara pada setiap percobaan di daerah *downcomer*. Kelembaban mutlak udara pada daerah *downcomer* akan menurun terhadap *inlet* udara. Hal ini disebabkan semakin mendekati *inlet* udara, maka kelembaban udara akan semakin rendah.

Pendugaan Kadar Air Gabah pada Pengering Tipe Kontinyu

Data hasil pendugaan kadar air yang keluar dari pengering *spouted bed* tipe kontinyu disajikan pada Tabel 4. Nilai hasil simulasi percobaan pertama tidak mendekati nilai yang sebenarnya namun pada percobaan kedua dan ketiga nilai pendugaan kadar air hampir senilai dengan eksperimen. Nilai pendugaan pada percobaan pertama tidak sama dengan nilai aktual dapat disebabkan oleh penentuan parameter waktu tinggal gabah selama proses pengeringan. Pada penelitian ini, penentuan waktu tinggal bahan di dalam ruang pengering dengan membagi laju pengumpanan dengan massa bahan awal di dalam ruang pengering. Sementara penentuan waktu tinggal bahan dapat menggunakan beberapa persamaan seperti persamaan Levenspiel.

Simpulan

Model matematika yang dikembangkan oleh Nellist et al. (1987) telah digunakan untuk memprediksi sebaran suhu udara, suhu gabah dan kadar air selama proses pengeringan. Dari nilai persentasi *error* suhu udara, nilai *error* yang paling besar terjadi di daerah *spout* pada perlakuan ketiga yaitu sebesar 4.45% dan nilai persentasi *error* yang kecil berada pada wilayah *downcomer* kanan yaitu sebesar 1.39%. Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor yaitu aliran bahan di dalam *spouted bed* dua dimensi tidak bersirkulasi sama



Gambar 10. Kelembaban mutlak udara daerah *downcomer*.

dengan tipe pengering *co-* ataupun *counter flow* pada umumnya dan parameter yang digunakan belum mempresentasikan kondisi sebenarnya dalam proses pengeringan.

Saran

Pada penelitian selanjutnya perlu dikembangkan model matematika yang menduga kadar air yang keluar dari daerah *downcomer* dan masuk ke daerah *spout* sehingga model yang dihasilkan lebih valid.

Daftar Pustaka

- Boyce, D.S. 1965. Grain moisture and temperature changes with position and time during through drying. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 10:333-341.
- Freitas, L.A.P., J.T. Freire. 1997. Experimental study on the dynamics of a draft tube spouted bed with continuous solids feeding. *Brazilian Journal Chemical Engineering*. 4(3):269-280.
- Gallaghan, G.L. 1951. A method of determining the latent heat of agricultural crops. *Journal Agricultural Engineering*. 32(1):34-38.
- Gisler, P.E. 1983. The spouted bed technique – discovery and early study at NRC. *Canadian Journal Chemical Engineering*. 267-268.
- Laithong, C. 1987. Study of thermo-physical properties of rough rice. M. Sc. Thesis. King Mongkut's Institute of Technology Thonburi. Thailand.
- Madhiyanon, T., S. Somchart, T. Warunee. 2007. A Mathematical model for continuous drying of grains in a spouted bed dryer. *Drying Technology: An International Journal*. 587-614.
- Nellist, M.E., R.D. Whitfield, J.A. Marchant. 1987. Computer simulation and control of grain drying, in J.A., Clark., K. Gregson dan R.A. Saffell. *Computer applications in Agricultural Environments*. UK. p 127-142.
- O'Collaghan, J.R., D.J. Menzies dan P.H. Bailey. 1971. Digital simulation of agricultural drier performance. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 16:223-244.
- Viswanathan, K., M.S. Lyall, Raychaudhuri. 1986. Agricultural grains spouted bed drying. *Canadian Journal Chemical Engineering*. 64:223-232.
- Wiset, L., G. Szrednicki, R. Driscoll, C. Nimmuntavin dan P. Siwapornrak. 2001. Effects of High Temperature Drying on Rice Quality. *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development*. Manuscript FP 01 003.
- Zahed, AH., N. Epstein. 1992. Batch and continuous spouted bed drying of cereal grains : the thermal equilibrium model. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 70(5):945-953.

Halaman ini sengaja dikosongkan