

SIMULASI KONSUMSI ENERGI PENGERINGAN JAGUNG PIPILAN PADA BERBAGAI SUHU DAN LAJU ALIRAN UDARA PENGERING

Leopold O. Nelwan

Departemen Teknik Mesin dan Biosistem Fateta IPB, Gedung Fateta IPB, PO Box 220, Bogor, lonelwan@yahoo.com

ABSTRAK

Terdapat beberapa faktor penting dari udara pengering yang mempengaruhi waktu pengeringan pada tumpukan biji-bijian di antaranya mencakup suhu, kelembaban dan laju aliran udara pengering. Di pihak lain, kombinasi ketiga faktor tersebut pada acuan kondisi (suhu dan kelembaban) udara lingkungan juga menentukan laju energi (daya) yang dibutuhkan, baik mekanik maupun termal. Dengan demikian, faktor-faktor tersebut secara bersama-sama akan menentukan total konsumsi energi pengeringan. Sebuah simulasi konsumsi energi untuk pengeringan jagung pipilan yang didasarkan pada model pengeringan tumpukan tebal yang dikembangkan oleh Bala (1999) yang dimodifikasi telah dilakukan pada berbagai suhu (35-55°C) dan laju aliran massa (0.05-0.1 kg/m²-s) udara pengering pada ketebalan tumpukan 0.5 m. Suhu udara lingkungan pada simulasi tersebut bervariasi dari 25-32°C akan tetapi rasio kelembabannya konstan yaitu 0.019 kg/kg u.k. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada peningkatan laju aliran udara akan memberikan konsumsi energi pengering per m² luasan produk meningkat untuk seluruh kondisi. Akan tetapi, suhu udara pengeringan akan memberikan peningkatan konsumsi energi pada suhu udara lingkungan yang tinggi sedangkan pada suhu udara lingkungan yang lebih rendah justru akan menurunkan konsumsi energi.

Kata kunci: simulasi, konsumsi energi, udara pengering, udara lingkungan, laju aliran massa

LATAR BELAKANG

Pengeringan pada produk-produk pertanian, merupakan proses yang umumnya mengkonsumsi energi lebih besar daripada tahapan-tahapan lain dari pascapanen. Oleh karena itu, penghematan energi pada proses pengeringan akan memberikan penghematan yang signifikan pada total konsumsi energi dari keseluruhan tahapan. Strumillo (1999) bahkan menyatakan bahwa hampir 25% dari total konsumsi energy di bidang industri secara keseluruhan di negara maju digunakan untuk pengeringan saja.

Pada jagung pipilan sebagaimana pada biji-bijian lainnya metode pengeringan tumpukan lazim digunakan. Pada metode ini, udara merupakan media yang umum digunakan untuk pengeringan. Beberapa faktor penting dari udara pengeringan yang menentukan waktu pengeringan di antaranya adalah suhu, kelembaban dan laju aliran baik secara total maupun dalam kecepatan superficialnya.

Pada kondisi udara lingkungan tertentu, ketiga faktor di atas juga menjadi penentu laju energi (daya) yang dikonsumsi oleh suatu sistem pengering tumpukan. Daya yang dikonsumsi ini mencakup daya termal yang ditentukan oleh ketiga faktor tadi dan daya mekanik yang terutama ditentukan oleh laju aliran, jenis produk yang dikeringkan dan ketebalan tumpukan.

Ketika penggunaan udara dengan suhu yang tinggi, kelembaban yang rendah serta laju yang tinggi dapat menurunkan kebutuhan waktu pengeringan, daya yang dikonsumsi baik termal maupun mekanik menjadi lebih besar. Karena energi yang dikonsumsi merupakan perkalian dari daya yang dikonsumsi dan waktu pengeringan yang dibutuhkan maka peningkatan atau penurunan salah satu faktor di atas tidak dapat secara langsung disimpulkan meningkatkan atau menurunkan konsumsi energi. Pada umumnya para peneliti mendapatkan peningkatan suhu udara pengeringan bervariasi terhadap konsumsi energy, seperti Clark et al., (1968) memperoleh peningkatan konsumsi energy pada pengeringan gandum. Issacs and Muhlbauer dalam Brooker et al (1992) melakukan kajian pengeringan jagung dengan RH outlet yang konstan. Pada penelitian tersebut diperoleh bahwa konsumsi energi spesifik dari pengeringan akan menurun ketika suhu udara pengeringan meningkat untuk RH outlet yang sama. Kribs dan Spolek (1997) meneliti pengaruh suhu pengeringan terhadap konsumsi energi pada pengeringan barley. Dikatakan bahwa hal tersebut disebabkan oleh kemampuan penyerapan uap air oleh udara yang lebih tinggi pada suhu yang lebih tinggi. Konsumsi energi menurun 20% ketika pengeringan dilakukan pada suhu pengeringan 70°C dibandingkan pada suhu

63°C. Alibas (2007) juga memperoleh hasil yang serupa untuk pengeringan Nettle Leaves, dimana semakin tinggi suhu pengeringan konsumsi energi akan semakin rendah.

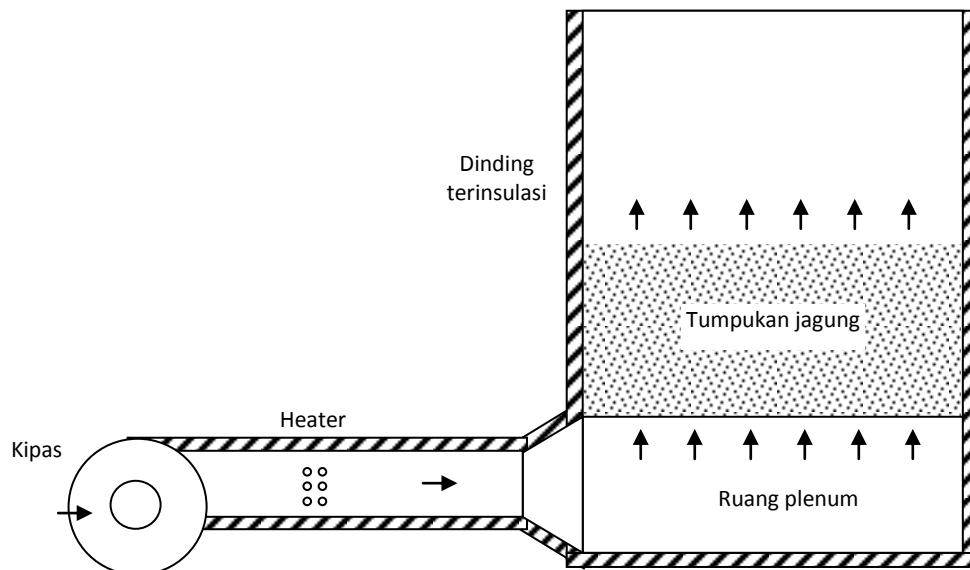
Dalam makalah ini, konsumsi energi untuk sistem pengering tumpukan untuk jagung pipilan dipelajari dengan menggunakan metode simulasi. Model yang digunakan untuk menentukan perubahan suhu dan kelembaban udara serta suhu dan kadar air biji dalam tumpukan merupakan model berdasarkan keseimbangan termal dan massa pada sistem pengering tumpukan yang dikembangkan oleh Bala (1999).

METODOLOGI

Model

Skema sistem pengeringan tumpukan jagung pipilan disajikan pada Gambar 1. Udara yang dialirkan dari lingkungan oleh kipas, dipanaskan oleh pemanas dan dialirkan menembus tumpukan biji-bijian.

Pemodelan dilakukan berdasarkan keseimbangan termal dan massa. Model merupakan modifikasi model dari Bala (1997) yang disesuaikan untuk bentuk silindris. Untuk itu, model yang dikembangkan terdiri dari keseimbangan termal pada udara dalam tumpukan, tumpukan biji, keseimbangan uap air pada udara dalam tumpukan dan persamaan lapisan tipis biji. Selain itu penyesuaian juga dilakukan pada proses kondensasi, dimana Bala (1997) membuat kondensasi terjadi pada RH 98%. Pada penelitian ini, kondensasi didasarkan pada RH keseimbangan yang tercapai berdasarkan persamaan Henderson termodifikasi.



Gambar 1. Skema pengering tumpukan jaung pipilan

Keseimbangan uap air pada udara dalam tumpukan

Penambahan uap air ke udara pada pori-pori tumpukan yang berasal dari produk berlangsung ketika udara pengeringan melalui 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 terbawa oleh udara pengeringan. Secara matematis keseimbangan ini dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$0 = \frac{\partial}{\partial z} (G_a H) + \rho_d \frac{\partial M}{\partial \theta} \dots \quad [1a]$$

karena G_a konstan, maka:

dimana G_a adalah laju massa udara per satuan luas (kg/m^2), H adalah kelembaban mutlak ($\text{kg air}/\text{kg udara kering}$), z adalah ketebalan tumpukan (m), M adalah kadar air (%b.k), θ adalah waktu (detik).

Keseimbangan termal pada udara dalam tumpukan

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

$$0 = G_a \left(c_{p,a} + c_{p,s} H \right) \frac{\partial t_a}{\partial z} + \left(-\rho_d c_{p,s} \frac{\partial M}{\partial \theta} + h_{cv} \right) (t_a - t_g) \dots [2a]$$

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

$$0 = \frac{\partial}{\partial z} (G_a h) + h_{cv} (t_a - t_g) - \left(\rho_d c_{pw} \frac{\partial M}{\partial \theta} t_g + \rho_d \frac{\partial M}{\partial \theta} h_{fg} \right) \dots [2b]$$

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

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:

$$\rho_d (c_{pg} + c_{pw} M) \frac{\partial t_g}{\partial \theta} + \rho_d t_g c_{pw} \frac{\partial M}{\partial \theta} = h_{cv} (t_a - t_g) + \rho_d (h_{fg} + c_{ps} t_g) \frac{\partial M}{\partial \theta} \dots [3a]$$

atau ditulis sebagai:

$$\rho_d (c_{pg} + c_{pw} M) \frac{\partial t_g}{\partial \theta} = h_{cv} (t_a - t_g) + \rho_d (h_{fg} + (c_{ps} - c_{pw}) t_g) \frac{\partial M}{\partial \theta} \dots [3b]$$

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

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:

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

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

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

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

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

dimana ERH adalah kelembaban relatif keseimbangan udara (%) dan t adalah suhu ($^{\circ}\text{C}$).

Koefisien pindah panas volumetrik (h_{cv})

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

$$h_{cv} = 372.6 \left(\frac{G_a T_a}{P_{at}} \right)^{0.5217} \dots \dots \dots [7]$$

Panas laten penguapan air dari jagung (h_{fg})

Panas laten penguapan air dari jagung dinyatakan dalam persamaan (8):

$$\frac{h_{fg}}{h_{fgw}} = 1 + 0.8943 \exp(-0.1232M) \dots \quad [8]$$

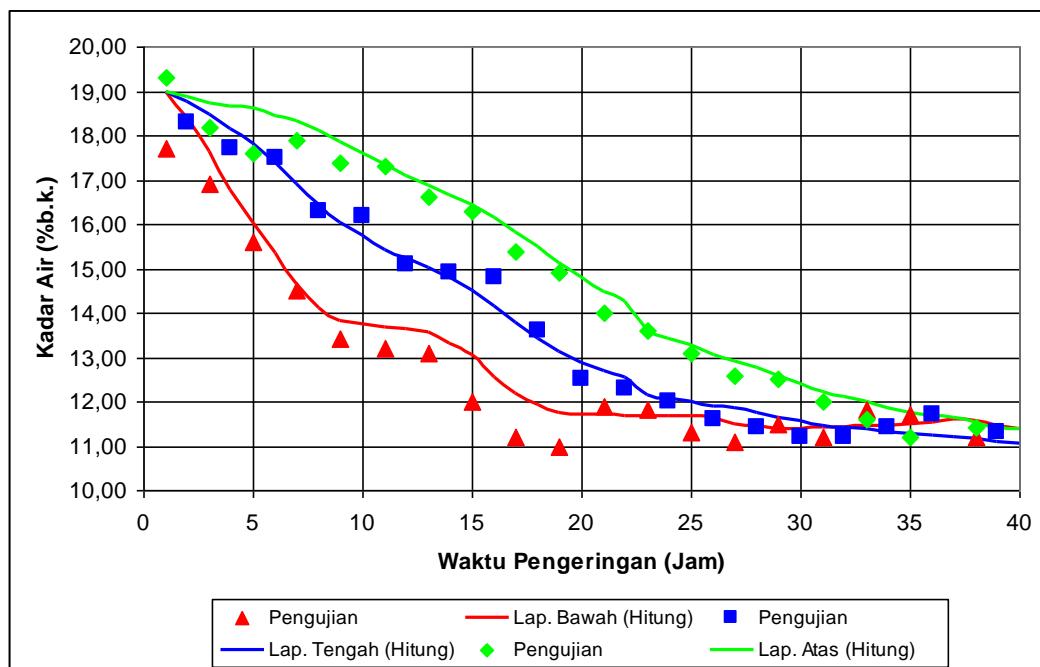
Dengan hfg_w merupakan panas laten penguapan air murni (kJ/kg air yang diuapkan).

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.

Verifikasi model

Model yang diuraikan di atas telah diverifikasi menggunakan data pengering tumpukan jagung pipilan untuk kondisi udara inlet yang berubah-ubah (Hendarto 2008; Nelwan, et al., 2008) sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 2. Secara umum penurunan kadar air hasil simulasi hampir sama dengan penurunan kadar air melalui pengujian. Pada lapisan bawah memiliki koefisien korelasi $R^2=0.967$, lapisan tengah 0.979, dan lapisan atas 0.9897.



Gambar 2. Verifikasi model

Simulasi

Persamaan 1c, 2b, 3b dan 4 diekspresikan dalam bentuk numerik menggunakan metode beda hingga Runge-Kutta. Udara pengering dan biji yang dikeringkan dalam tumpukan dibagi ke dalam 50 lapisan dengan tebal tumpukan 0.5 m. Perhitungan dilakukan dalam program Visual Basic versi 6.0.

Simulasi dilakukan untuk berbagai suhu udara lingkungan (21, 25, 29 dan 33°C), suhu udara pengeringan (35, 40, 45, 50 dan 55°C) serta laju aliran massa udara pengeringan (0.05, 0.075 dan 0.1 kg/s-m²). Kelembaban mutlak udara lingkungan digunakan nilai yang tetap untuk seluruh kondisi yaitu 0.019 kg/kg u.k. Pemilihan suhu dan laju aliran udara pengering didasarkan pada kebanyakan kondisi yang digunakan dalam pengeringan tumpukan (Brooker et al., 1992), sedangkan suhu dan kelembaban mutlak udara lingkungan berdasarkan pada kondisi normal di daerah tropis.

Konsumsi energi

Konsumsi energi mencakup dua bentuk yaitu energi termal dan energi mekanis. Energi termal (E_{therm}) merupakan energi yang dibutuhkan untuk pemanasan udara atau dinyatakan sebagai:

$$E_{therm} = G_a c_{pa} (t_a - t_{amb}) \Delta \theta [9]$$

Sedangkan energi mekanik (E_{mech}) merupakan energi untuk mengalirkan udara pengering melalui tumpukan biji selama pengeringan berlangsung atau dinyatakan sebagai:

ΔP merupakan *pressure drop* sepanjang tumpukan yang diperoleh dari *pressure drop per unit tebal* ($\Delta P/L$) untuk tumpukan jagung pipilan dinyatakan sebagai (Brooker et al., 1991) :

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{2.07 \times 10^4 (G_a / \rho_a)^2}{\ln(1 + 30.4 G_a / \rho_a)} \dots \dots \dots [11]$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perubahan suhu dan kadar air

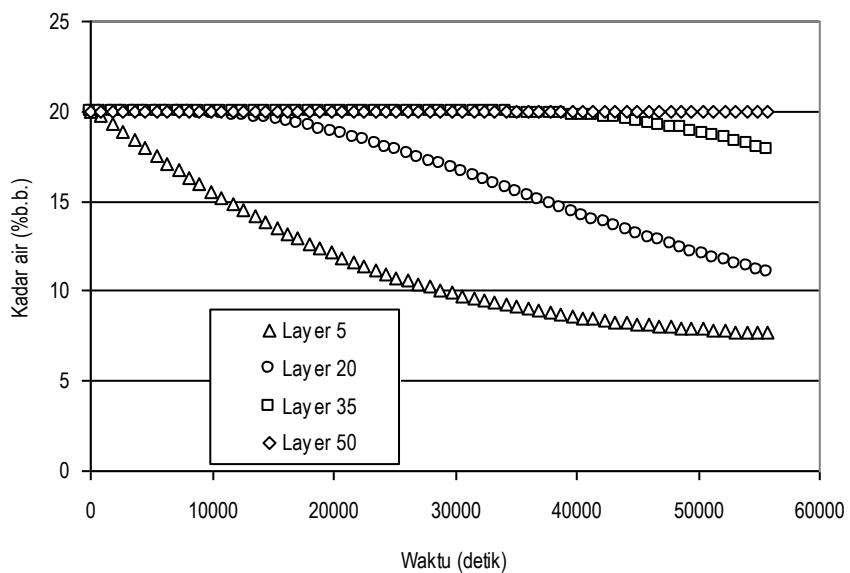
Gambar 3 dan 4 secara berturut-turut memperlihatkan perubahan suhu udara pengering dan kadar air jagung pipilan dalam tumpukan. Sehubungan dengan tidak adanya pergerakan biji dalam tumpukan, perbedaan suhu dan kadar air antar masing-masing lapisan terjadi selama berlangsungnya proses pengeringan. Pada lapisan pertama, yaitu lapisan yang kontak langsung dengan udara pengering yang masuk, suhu udara meningkat secara drastis dan sebaliknya kadar air menurun dengan cukup tajam. Akibat pelepasan panas sensibel dan terserapnya uap air dari biji, suhu udara akan menurun dan kelembabannya meningkat pada lapisan berikutnya. Penurunan kadar air dengan sendirinya berlangsung lebih lambat.

Laju aliran udara yang lebih besar akan mengakibatkan perbedaan suhu udara pengeringan dan kadar air antar lapisan menjadi lebih kecil serta waktu pengeringan yang lebih singkat (tidak ditunjukkan pada makalah ini). Hal ini disebabkan oleh perubahan kondisi udara yang melalui lapisan berikutnya lebih sedikit dibandingkan pada laju aliran udara yang rendah. Kebalikan dari laju aliran udara, peningkatan suhu udara pengeringan akan secara keseluruhan mempercepat waktu pengeringan, namun beda kadar air menjadi lebih besar. Hal ini merupakan akibat dari lapisan yang kontak dengan udara pengering akan mengalami pengeringan yang lebih cepat sedangkan pada lapisan berikutnya akibat dari uap air dari produk, suhu udara pengeringan akan menurun dan kelembabannya meningkat secara lebih signifikan.

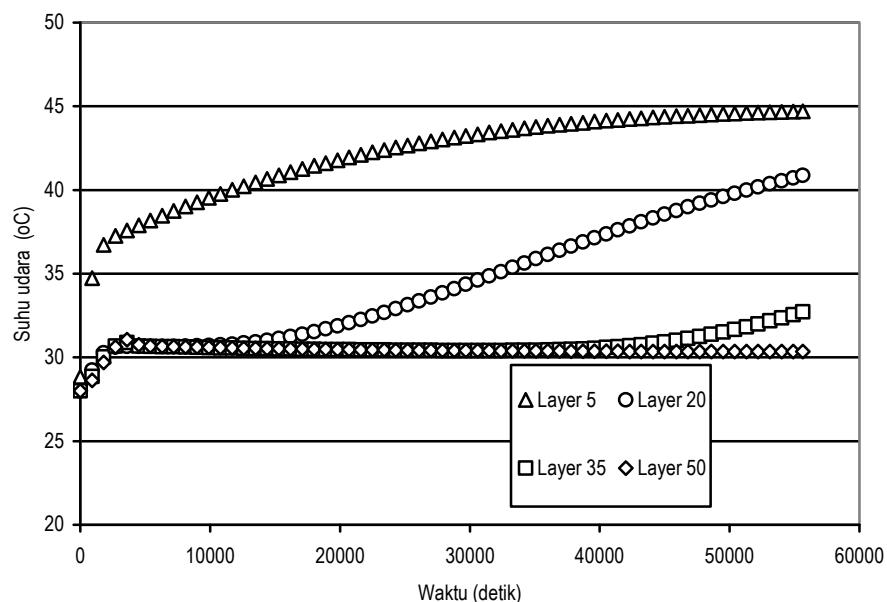
Waktu pengeringan

Waktu pengeringan dihitung dari kadar air rata-rata dalam tumpukan awal 20% sampai 14% b.b. Tabel 1 memperlihatkan waktu pengeringan yang dibutuhkan untuk berbagai suhu pengeringan dan laju aliran

udara. Dapat dilihat bahwa secara umum waktu pengeringan akan menurun sejalan dengan peningkatan laju aliran massa dan suhu udara pengeringan.



Gambar 3. Perubahan kadar air selama pengeringan, $G_a = 0.075$; $t_a = 45^\circ\text{C}$



Gambar 4. Perubahan suhu udara dalam tumpukan selama pengeringan, $G_a = 0.075$; $t_a = 45^\circ\text{C}$

Tabel 1. Waktu pengeringan untuk berbagai kondisi udara pengering (menit)

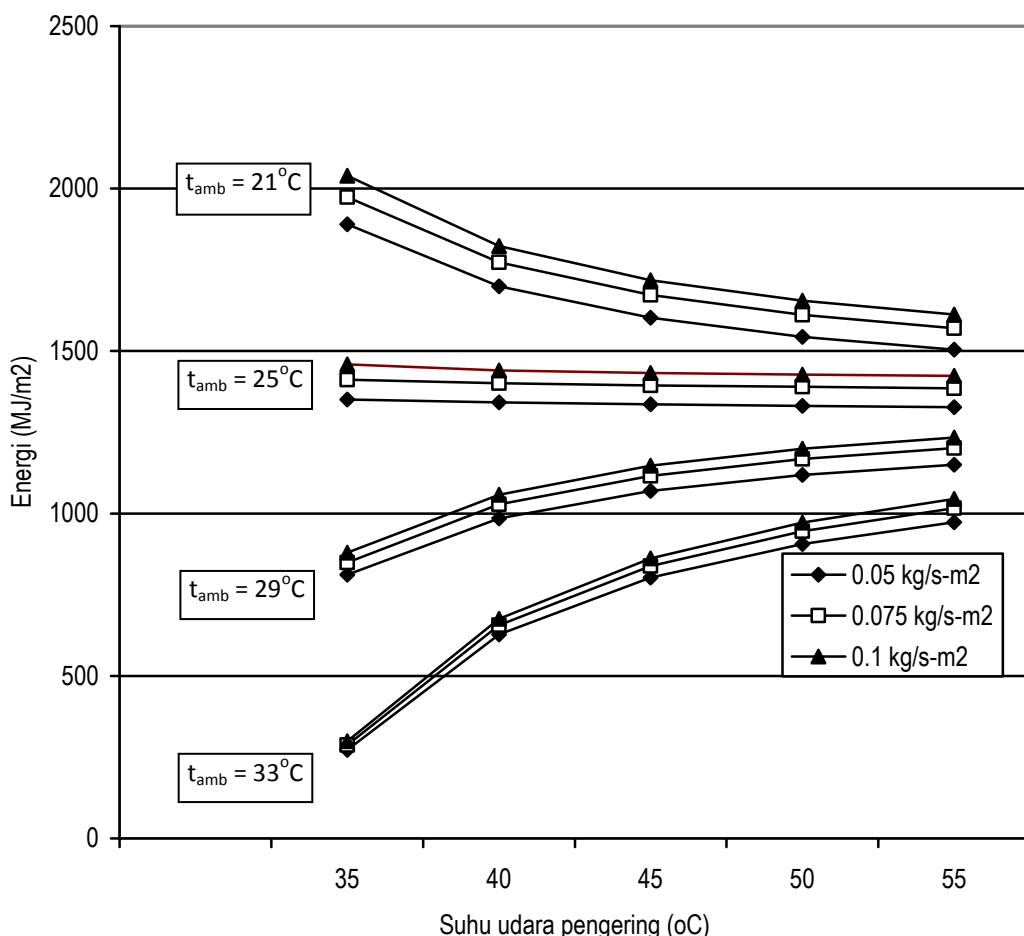
Suhu ($^\circ\text{C}$)	Laju aliran massa (kg/s-m^2)		
	0.05	0.075	0.1
35	2695.0	1874.0	1450.0
40	1786.5	1241.5	956.0
45	1334.5	927.5	714.0
50	1064.0	740.0	569.5
55	884.0	615.0	473.5

Konsumsi Energi

Gambar 5 memperlihatkan konsumsi energi total dari sistem pengering untuk berbagai suhu dan laju aliran massa udara pengering pada beberapa suhu lingkungan yang berbeda. Dapat dilihat bahwa walaupun peningkatan laju aliran massa udara mempercepat waktu pengeringan, peningkatan tersebut selalu memberikan konsumsi energi pengeringan yang meningkat pada seluruh kondisi suhu udara pengeringan dan lingkungan. Hal ini disebabkan terutama oleh kontribusi laju tersebut terhadap besarnya jumlah massa udara pengeringan yang harus dipanaskan. Akan tetapi kontribusi laju tersebut menurun pada suhu udara lingkungan yang relatif tinggi.

Hal yang cukup menarik adalah ternyata suhu udara pengeringan tidak selalu membuat konsumsi energi meningkat atau menurun. Pengaruh dari suhu udara lingkungan sangat besar. Pada suhu udara lingkungan yang relatif rendah (21°C) peningkatan suhu udara pengeringan akan membuat konsumsi energi menurun. Akan tetapi, pada suhu udara lingkungan yang relatif tinggi (29 dan 33°C), konsumsi energi pengeringan malah meningkat ketika suhu udara meningkat. Pada suhu udara lingkungan kira-kira 25°C , penurunan konsumsi energi terhadap suhu udara pengering hanya sedikit.

Suhu udara pengering yang lebih tinggi akan menurunkan waktu pengeringan secara signifikan (Tabel 1). Bila suhu udara lingkungan rendah, suku ($t_a - t_{amb}$) pada persamaan (9) menjadi besar sehingga peningkatan t_a membuat peningkatan ($t_a - t_{amb}$) kurang signifikan. Peningkatan suku ($t_a - t_{amb}$) tersebut lebih rendah dibandingkan dengan penurunan waktu pengeringan, oleh karena itu, ketika waktu pengeringan menurun maka konsumsi energi juga akan menurun. Namun demikian pada suhu udara lingkungan yang relatif tinggi suku ($t_a - t_{amb}$) tersebut menjadi lebih kecil, sehingga peningkatan t_a membuat peningkatan ($t_a - t_{amb}$) lebih signifikan. Akibatnya peningkatan suku ($t_a - t_{amb}$) tersebut lebih tinggi dibandingkan dengan penurunan waktu pengeringan sehingga konsumsi energi pengeringan meningkat sejalan dengan peningkatan t_a .



Gambar 5. Konsumsi energi pengeringan total pada berbagai suhu dan laju aliran massa udara pengering serta suhu udara lingkungan

Dengan demikian, jika waktu pengeringan bukan menjadi pertimbangan utama pemilihan suhu udara pengering menjadi sangat penting pada kondisi udara lingkungan tertentu dalam rangka usaha penghematan konsumsi energi. Pada suhu udara lingkungan yang rendah, pemilihan suhu udara pengeringan yang lebih tinggi lebih disarankan karena berarti melakukan dua hal penghematan sekaligus yaitu waktu proses dan konsumsi energi.

KESIMPULAN

Peningkatan laju aliran massa udara pengeringan mengakibatkan peningkatan konsumsi energi pengeringan pada berbagai suhu udara lingkungan dan udara pengeringan, namun pengaruhnya menurun pada suhu udara lingkungan yang lebih tinggi. Sebaliknya, pengaruh suhu udara pengering pada selang 35 – 55°C bergantung pada suhu udara lingkungan. Pada suhu udara lingkungan yang lebih rendah (21°C) konsumsi energi pengeringan akan menurun. Akan tetapi pada suhu udara lingkungan yang lebih tinggi (yaitu 29 dan 33°C), peningkatan suhu udara pengeringan justru akan meningkatkan konsumsi energi pengeringan. Pada suhu udara lingkungan kira-kira 25°C, penurunan konsumsi energi terhadap suhu udara pengering hanya sedikit. Peningkatan atau penurunan konsumsi energi total tersebut menjadi lebih besar ketika suhu udara lingkungan lebih jauh dari kira-kira 25°C akibat kontribusi selisih suhu udara pengering dan udara lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alibas, I. Energy Consumption and Colour Characteristics of Nettle Leaves during Microwave, Vacuum and Convective Drying. *Biosystems Engineering* (2007) 96 (4), 495–502
- Brooker, D.B., F.W. Bakker-Arkema, and C.W. Hall. 1993. Drying and Storage of Grains and Oilseeds
- Bala, B.K. 1997. Drying and Storage of Cereal Grains. Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd. New Delhi.
- Clark, R. G., W. J. Lamond. Drying Wheat in Two Foot Beds. II : Energy Consumption. *J. Agric. Eng. Res.* (1968) 13 (3) 245-248.
- Hendarto, D., 2008. Studi Implementasi Sistem Kendali On-Off pada In Store Dryer (ISD) untuk Komoditas Jagung. Tesis. Program Pascasarjana IPB Bogor.
- Nelwan, L.O., Dyah W., Raffi P. Teguh W.W., F.X. Lilik T.M., Deni H., Diswandi N. 2008. Pengembangan Alat Pengering Efek Rumah Kaca (ERK)-Hybrid dan *In-Store Dryer* (ISD) Terintegrasi untuk Biji-Bijian Skala Komersial. Laporan Penelitian KKP3T.
- Strumillo, C., P.L. Jones and Romuald Zylla. 1995. Energy Aspects in Drying *in* Mujumdar, A.S. (ed.). *Handbook of Industrial Drying*. Marcel Dekker, Inc., New York.