

ANALISIS EKSERGI PENGERINGAN IRISAN TEMULAWAK

Exergy Analysis of Drying Process of *Curcuma xanthorrhiza* Slices

Lamhot Parulian Manalu¹, Armansyah Halomoan Tambunan²

¹Pusat Teknologi Agroindustri, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, Gd. 2 Lt. 10,
Jl. M. H. Thamrin 8 Jakarta 10340

²Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16002
Email: lpmanalu@yahoo.com, ahtambun@ipb.ac.id

ABSTRAK

Temulawak (*Curcuma xanthorrhiza* Roxb.) merupakan tanaman obat yang simplisianya digunakan sebagai bahan baku pembuatan jamu atau obat tradisional. Pengeringan merupakan proses utama dalam memproduksi simplisia. Untuk menganalisis efisiensi energi suatu proses pengeringan umumnya digunakan hukum termodinamika pertama yang menjelaskan tentang prinsip kekekalan energi. Akan tetapi teori ini mempunyai keterbatasan dalam mengukur penurunan kualitas energi. Untuk mengetahui apakah energi yang digunakan pada proses pengeringan sudah digunakan secara optimal dari sisi kualitas, digunakan hukum termodinamika kedua atau yang dikenal dengan analisis eksergi. Tujuan penelitian ini adalah menentukan efisiensi proses pengeringan lapisan tipis irisan temulawak dengan metode analisis energi dan eksergi. Dalam studi ini, metode analisis energi dan eksergi berdasarkan hukum termodinamika pertama dan kedua telah digunakan untuk menghitung rasio penggunaan energi dan besaran eksergi yang musnah (*exergy loss*), sehingga efisiensi proses pengeringan irisan temulawak dapat ditentukan secara akurat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi proses pengeringan mempengaruhi rasio penggunaan energi dan efisiensi eksergi pengeringan. Semakin tinggi suhu dan RH pengeringan maka rasio penggunaan energi semakin rendah dan efisiensi eksergi semakin tinggi. Efisiensi eksergi pengeringan temulawak bervariasi antara 96,5%-100% untuk selang suhu 50 °C hingga 70 °C pada RH 40% serta 82,3% - 100% untuk selang RH 20% hingga 40% pada suhu 50 °C.

Kata kunci: Pengeringan, energi, efisiensi eksergi, temulawak

ABSTRACT

Java turmeric (*Curcuma xanthorrhiza* Roxb.) is a medicinal plant used as raw material for making herbal medicine, its rhizome cut into slices and dried so called simplicia. Curcuma has a harvest moisture content is high enough to need a great energy for drying. Generally, the theory used to analyze the energy efficiency is the first law of thermodynamics that describes the principle of conservation of energy. However, this theory has limitations in measuring the loss of energy quality. To determine whether the energy used in the drying process has been used optimally in terms of quality, the second law of thermodynamics -known as exergy analysis- is used. The purpose of this study is to determine the efficiency of the thin layer drying of curcuma slices with exergy analysis. The results show that the process conditions affect the energy utilization ratio and exergy efficiency of drying. Exergy analysis method based on the second law of thermodynamics has been used to determine the amount of exergy destroyed so that the efficiency of the drying process can be determined more accurately. Exergy efficiency varies between 96.5%-100% for temperatures of 50 °C to 70 °C at 40% RH and 82.3% - 100% for 20% to 40% RH at 50 °C.

Keywords: Drying, energy, exergy efficiency, curcuma slices

PENDAHULUAN

Pengeringan adalah proses yang memerlukan banyak energi (Dincer dan Sahin 2004). Tingginya harga energi pada saat ini membuat upaya untuk meningkatkan efisiensi

penggunaan energi pada suatu proses semakin dibutuhkan. Umumnya teori yang digunakan untuk menganalisis efisiensi energi adalah hukum termodinamika pertama yang menjelaskan konsep kekekalan energi. Akan tetapi teori ini mempunyai keterbatasan dalam mengukur penurunan

kualitas energi akibat pembentukan entropi selama proses (Graveland dan Gisolf, 1998). Dalam menentukan efisiensi proses pengeringan utamanya lapisan tipis yang prosesnya diasumsikan bersifat adiabatik, nilai efisiensi yang dihitung bukanlah nilai efisiensi proses pengeringannya melainkan nilai efisiensi dari alat pengering.

Untuk mengetahui apakah energi yang masuk ke dalam suatu sistem pengering sudah digunakan secara optimal dari sisi kualitas, digunakan metode analisis berdasarkan hukum termodinamika kedua. Kaidah ini menyatakan bahwa selain memiliki kuantitas, energi juga memiliki kualitas. Besaran dari kualitas energi ini disebut eksergi (Ahern, 1980). Cengel dan Boles (2002) menyatakan bahwa eksergi yang merupakan suatu ukuran mutu atau nilai energi.

Analisis eksergi berdasarkan hukum kedua termodinamika memiliki dua kelebihan dibandingkan dengan metode keseimbangan panas dalam suatu sistem yang berhubungan dengan energi (*energy-related system*). Pertama, analisis eksergi memberikan pengukuran yang lebih akurat dari ketidakefisienan aktual suatu sistem serta lokasi terjadinya ketidakefisienan tersebut. Hal ini berlaku baik untuk sistem yang sederhana maupun yang rumit. Analisis eksergi juga memberikan ukuran efisiensi sistem sebenarnya untuk suatu sistem siklus kombinasi yang rumit atau sistem terbuka dimana metode keseimbangan panas memberikan nilai efisiensi yang tidak akurat (Ahern, 1980). Pada beberapa tahun terakhir ini analisis eksergi telah menjadi metode penting yang komprehensif dan mutakhir dalam studi tentang desain, analisis dan optimasi suatu sistem termal termasuk proses pengeringan produk pertanian (Dincer dan Sahin, 2004).

Beberapa studi mengenai aspek termodinamika dari sistem pengeringan telah dilakukan. Midilli dan Kucuk (2003) melakukan analisis energi dan eksergi proses pengeringan dari biji kenari (*pistachio*) dengan menggunakan lemari pengering bertenaga surya. Dincer dan Sahin (2004) mengembangkan model baru untuk analisis eksergi pada proses pengeringan. Akpınar (2004) melakukan analisis energi dan eksergi proses pengeringan dari irisan paprika merah dalam pengering tipe konveksi. Akpınar dkk. (2005, 2006) menyajikan analisis energi dan eksergi proses pengeringan kentang dan labu dengan pengering tipe siklon (*cyclone type dryer*). Colak dan Hepbasli (2007) menyajikan analisis eksergi proses pengeringan lapisan tipis buah zaitun (*green olive*) dengan pengering rak. Corzo dkk. (2008) mempelajari analisis eksergi dan optimasi pengeringan lapisan tipis irisan buah *coroba*, sedangkan Aghbashlo dkk. (2008) tentang pengeringan skala semi-industri produk kentang. Akbulut dan Durmus (2010) dan Nazghelichi dkk. (2010) masing-masing mempelajari termodinamika pengeringan murbai dan wortel.

Temulawak (*Curcuma xanthorrhiza* Roxb.) termasuk tanaman dalam suku Zingiberaceae, dikenal dan banyak digunakan sebagai tanaman obat. Beberapa hasil penelitian menyatakan khasiat temulawak antara lain antimikroba, antidiare, kontraksi usus, imnostimulan, antioksidan dan juga antitumor (Masuda dkk., 1992; Hwang dkk., 2000; Choi dkk., 2005). Bagian tanaman yang dimanfaatkan adalah umbi akarnya (rhizome). Untuk menjadi bahan baku tanaman obat atau simplisia, umbi temulawak diiris dengan ketebalan 3-4 mm kemudian dikeringkan. sebagai simplisia. Kadar air rimpang temulawak saat dipanen berkisar 80-90% sehingga dibutuhkan banyak energi untuk proses pengeringannya mengingat kadar air akhir yang disyaratkan adalah 10% (Manalu dkk., 2009; Depkes, 2008). Untuk itu karakteristik pengeringan temulawak perlu dipelajari agar didapatkan proses yang efisien.

Tujuan penelitian ini adalah mengkaji sistem termodinamika pengeringan lapisan tipis, melakukan analisis energi dan eksergi pengeringan serta menentukan efisiensi proses pengeringan lapisan tipis simplisia temulawak.

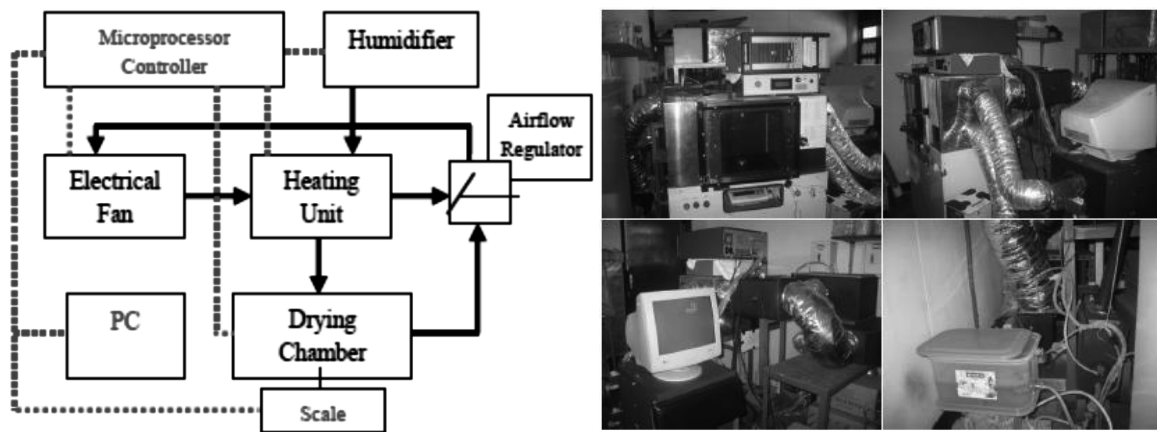
METODE PENELITIAN

Bahan

Bahan yang dipakai dalam penelitian ini adalah rimpang temulawak yang diperoleh dari Balai Penelitian Tanaman Rempah dan Obat di Bogor. Setelah dibersihkan dan dicuci, rimpang temulawak diiris dengan ketebalan 3-4 mm. Sebelum dikeringkan, irisan temulawak terlebih dulu direndam dalam air dengan suhu 95 °C (diblansir) selama 5 menit (Ertekin dan Yaldiz 2004) kemudian ditiriskan.

Deskripsi Alat Pengering

Penelitian pengeringan dilakukan dengan menggunakan alat pengering terkontrol-terakuisisi (Gambar 1). Alat pengering ini dapat diatur pada kondisi suhu dan kelembaban nisbi (RH) yang diinginkan yaitu pada selang suhu 30-80 °C dan RH 20-90%. Pengontrolan kondisi pengeringan dilakukan dengan kontrol PID dengan akurasi suhu $\pm 1^\circ\text{C}$ dan RH $\pm 2\%$ sesuai dengan standar (ASABE, 2006). Sensor suhu dan RH menggunakan SHT15 Sensirion. Secara keseluruhan alat pengering dikontrol oleh mikroprosesor AVR Atmel. Alat ini dilengkapi juga dengan sistem humidifier 2000 W, sistem pemanas 2000 W, kipas elektrik dan dehumidifier. Kecepatan udara pengering yang melalui ruang pengering dikontrol secara manual dan diukur dengan menggunakan anemometer digital Kanomax dengan akurasi ± 0.1 m/s.



Gambar 1. Skema (kiri) dan gambar peralatan pengeringan laboratorium (kanan)

Prosedur Percobaan

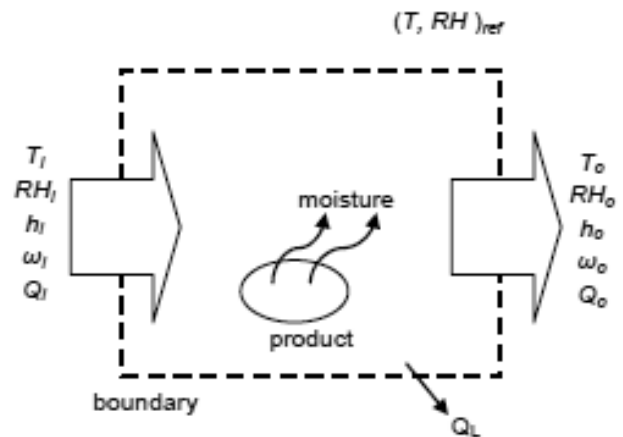
Percobaan pengeringan dilakukan pada tiga level suhu dan RH, yaitu suhu 50, 60 dan 70 °C pada RH konstan 20% dan pada RH 20%, 30%, dan 40% dengan suhu konstan 50 °C. Kecepatan aliran udara pengeringan dijaga konstan sekitar 0,9 m/detik. Kombinasi kondisi pengeringan ini menghasilkan laju massa udara (*mass flow rate*) pada selang 0,050 hingga 0,060 kg/detik. Berat awal sampel 150 gram.

Sebelum percobaan dimulai, alat pengering sudah dihidupkan satu jam sebelumnya untuk menstabilkan suhu dan kelembaban di ruang pengering (*drying chamber*) sesuai dengan kondisi percobaan yang diinginkan (Manalu dkk., 2009). Berat dan suhu bahan serta suhu dan kelembaban udara pengering dimonitor secara kontinu dan direkam datanya setiap 5 menit selama percobaan. Perubahan berat sampel diukur langsung secara otomatis dengan menggunakan timbangan merek AandD tipe GF-3000 (kapasitas 0-3000 g dan akurasi 0,01 g). Percobaan dihentikan setelah berat sampel konstan. Kadar air akhir percobaan ditentukan dengan mengeringkan sampel selama 24 jam pada suhu 103 ± 2 °C dengan memakai *oven* (Kashaninejad dkk., 2007).

Metode Analisis Energi dan Eksergi

Gambar 2 merupakan diagram atau skema sistem termodinamika percobaan pengeringan yang dilakukan. Proses pengeringan sampel temulawak sebagai bahan padat lembab (*moist solid*) pada penelitian ini dapat dikategorikan sebagai sistem terbuka (*open system*) atau disebut juga *control volume system* (Dincer dan Sahin 2004). Pada sistem tersebut, baik massa maupun energi dapat melewati batas (*boundary*) sistem (Cengel dan Boles 2002).

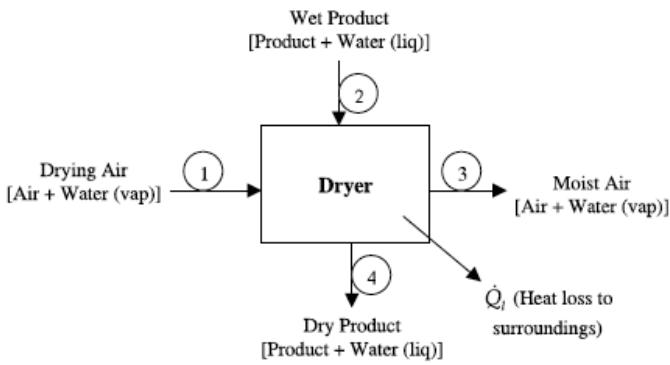
Sistem termodinamika pengeringan pada diatas dapat diuraikan dan dijelaskan secara lebih rinci dalam empat kondisi berikut (Gambar 3):



Gambar 2. Skema sistem pengeringan dengan *control volume system*

- Kondisi 1, berhubungan dengan masukan (input) udara pengering ke dalam sistem untuk mengeringkan sampel/ produk.
- Kondisi 2, berhubungan dengan produk yang dikeringkan dan air di dalam produk pada kondisi awal.
- Kondisi 3, berhubungan dengan luaran (output) udara lembab yang keluar dari sistem.
- Kondisi 4, berhubungan dengan produk yang dikeringkan dan air di dalam produk pada kondisi akhir.

Analisis termodinamika pengeringan ini dilakukan berdasarkan hukum termodinamika pertama dan kedua yang mencakup prinsip keseimbangan massa, energi dan eksergi. Selain itu karena proses ini berlangsung secara psikrometrik volume kontrol (Burghardt dan Harbach 1993), maka persamaan-persamaan psikrometrik juga digunakan dalam perhitungan sifat-sifat udara (pengeringan).



Gambar 3. Skema input-output proses pengeringan (Dincer dan Sahin 2004)

Neraca Massa

Persamaan keseimbangan massa dalam ruang pengering sebagai suatu sistem volume terkontrol (*control volume system*) mencakup tiga komponen berikut yaitu produk yang dikeringkan, udara dan air/uap air yang ada di dalam fluida pengering dan produk. Selanjutnya, neraca massa pada kondisi *steady-state* dari tiga komponen tersebut adalah (Dincer dan Sahin 2004):

$$\text{Produk : } (\dot{m}_p)_2 = (\dot{m}_p)_4 = \dot{m}_p \quad (1)$$

$$\text{Udara : } (\dot{m}_a)_1 = (\dot{m}_a)_3 = \dot{m}_a \quad (2)$$

$$\text{Air : } \omega_1 \dot{m}_a + (\dot{m}_w)_2 = \omega_3 \dot{m}_a + (\dot{m}_w)_4 \quad (3)$$

Neraca Energi

Neraca energi pada kondisi *steady-state* untuk seluruh sistem dirumuskan berdasarkan kaidah energi yang masuk sama dengan energi yang keluar:

$$\dot{m}_a h_1 + \dot{m}_p (h_p)_2 + (\dot{m}_w)_2 (h_w)_2 = \dot{m}_a h_3 + \dot{m}_p (h_p)_4 + (\dot{m}_w)_4 (h_w)_4 + \dot{Q}_i \quad (4)$$

dimana

$$h_1 = (h_a)_1 + \omega_1 (h_v)_1 \approx (h_a)_1 + \omega_1 (h_g)_1 \quad (5)$$

$$h_3 = (h_a)_3 + \omega_3 (h_g)_3 \quad (6)$$

Entalpi udara pengering dihitung dengan persamaan berikut (Heldman dan Singh, 1981):

$$h_a = c_{pa} (T - T_{ref}) + \omega h_{fg} \quad (7)$$

$$h_a = (1.004 + 1.88\omega)(T - T_{ref}) + \omega h_{fg}$$

Laju pindah panas karena penguapan mengikuti persamaan (Syahrul dkk., 2002) berikut:

$$\dot{Q}_{ev} = \dot{m}_v h_{fg} \quad (8)$$

• Besarnya laju aliran masa penguapan air simplisia (\dot{m}_v) selama selang waktu Δt dihitung dengan membagi selisih bobot dengan selang waktu tersebut.

Pada sistem pengeringan lapisan tipis ini, besaran penggunaan energi (*energy utilization*, EU) adalah sama dengan energi penguapan:

$$EU = \dot{Q}_{ev} \quad (9)$$

Rasio penggunaan energi (*energy utilization ratio*, EUR) dihitung berdasarkan rasio energi penguapan terhadap energi untuk pemanasan udara pengering (selisih entalpi udara masuk dan keluar sistem, lihat Gambar 2) sebagai berikut:

$$EUR = \frac{\dot{Q}_{ev}}{\dot{m}_a (h_{ai} - h_{a0})} \quad (10)$$

Neraca Eksergi

Eksergi masuk, keluar dan yang hilang ke/dari ruang pengering dianalisis berdasarkan hukum kedua termodinamika. Dasar perhitungan untuk analisis eksergi ruang pengering adalah menghitung nilai eksergi dalam keadaan mantap (*steady state*) (Akpinar dkk., 2006; Corzo dkk., 2008; Midili dan Kucuk 2003). Dincer dan Sahin (2004) menyusun persamaan keseimbangan eksergi sebagaimana persamaan input-output untuk *energy balance* sebagai berikut:

$$\dot{m}_a e_1 + \dot{m}_p (e_p)_2 + (\dot{m}_w)_2 (e_w)_2 = \dot{m}_a e_3 + \dot{m}_p (e_p)_4 + (\dot{m}_w)_4 (e_w)_4 + \dot{E}_q + \dot{E}_d \quad (11)$$

Untuk menentukan eksergi spesifik pada kondisi 1 digunakan pendekatan dengan melihat sifat termodinamika udara lembab (*humid air*) pengeringan sebagai campuran gas ideal antara udara kering dan uap air (Shukuya dan Hammache 2002). Dengan demikian eksergi spesifik (e_1) udara pengeringan *-as a humid air mixture-* pada kondisi 3 adalah,

$$e_1 = (C_{pa} + \omega_1 C_{pv})(T_1 - T_0 - T_0 \ln \frac{T_1}{T_0}) + R_a T_0 \left\{ (1 + 1.608\omega_1) \ln \left(\frac{1 + 1.608\omega_0}{1 + 1.608\omega_1} \right) + 1.608\omega_1 \ln \left(\frac{\omega_1}{\omega_0} \right) \right\} \quad (12)$$

Sedangkan eksergi spesifik pada kondisi 3 adalah,

$$e_3 = (C_{pa} + \omega_3 C_{pv})(T_3 - T_0 - T_0 \ln \frac{T_3}{T_0}) + R_a T_0 \left\{ (1 + 1.608\omega_3) \ln \left(\frac{1 + 1.608\omega_0}{1 + 1.608\omega_3} \right) + 1.608\omega_3 \ln \left(\frac{\omega_3}{\omega_0} \right) \right\} \quad (13)$$

Eksergi spesifik untuk produk dan air di dalam produk dihitung dengan mengacu pada persamaan berikut:

$$e = C_p \left(1 - \frac{T_0}{T_p} \right) T_p \quad (14)$$

Eksergi spesifik penguapan:

$$e_{ev} = \dot{Q}_{ev} \left(1 - \frac{T_0}{T_{ev}} \right) \quad (15)$$

Efisiensi eksergi didefinisikan sebagai rasio eksergi yang dapat dimanfaatkan (exergy investment) dari sistem pengeringan terhadap eksergi yang masuk kedalam sistem (Corzo dkk., 2008):

$$\eta_{ex} = \frac{\text{Exergy inflow} - \text{Exergy loss}}{\text{Exergy inflow}} \quad (16)$$

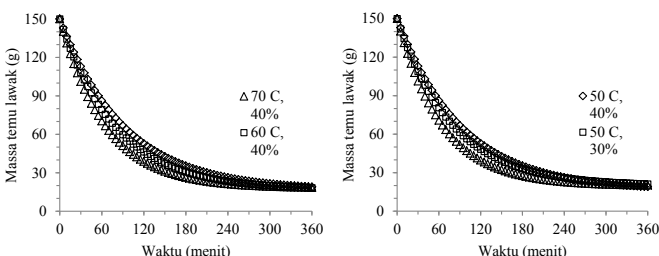
$$\text{Exergy loss} = \text{Exergy inflow} - \text{Exergy outflow} \quad (17)$$

Pada studi ini analisis termodinamika sistem pengeringan temulawak dilakukan dengan mengacu pada kondisi lingkungan $T_0 = 303 \text{ K}$ ($30 \text{ }^\circ\text{C}$) dan $RH_0 70\%$ sebagai kondisi referensi (*dead state*).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kinetika Pengeringan

Kinetika pengeringan lapisan tipis irisan temulawak dalam tampilan kurva perubahan massa terhadap waktu pada berbagai level suhu dan RH udara pengeringan disajikan dilihat pada Gambar 4. Berat awal irisan temulawak 150 gram dan berat sampel hingga akhir pengeringan berkisar 20,19-16,88 gram. Penurunan berat bahan terjadi secara cepat pada saat awal pengeringan kemudian semakin melambat mendekati akhir pengeringan. Dari gambar tersebut terlihat bahwa penurunan massa temulawak semakin cepat dengan meningkatnya suhu dan menurunnya RH pengeringan. Laju pengeringan yang berlangsung cepat di saat awal pengeringan disebabkan masih tingginya kadar air bahan yang membuat gradien tekanan uap air bahan terhadap lingkungannya cukup besar sehingga migrasi air dari dalam bahan ke luar juga tinggi, dan kemudian semakin melambat pada akhir

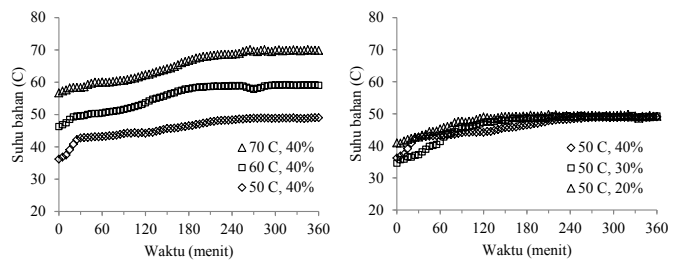


Gambar 4. Perubahan massa temulawak terhadap waktu pada berbagai suhu dan RH

proses pengeringan. Suhu dan RH pengeringan berpengaruh terhadap laju pengeringan dan kadar air keseimbangan temulawak (Manalu dkk., 2012).

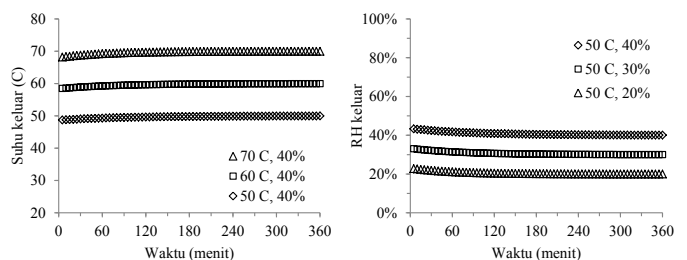
Analisis Energi dan Eksergi Pengeringan Temulawak

Untuk menghitung persamaan keseimbangan energi pada sistem termodinamika pengeringan ini perlu diketahui perubahan suhu bahan serta suhu dan RH udara yang keluar dari sistem. Gambar 5 memperlihatkan perubahan suhu bahan selama pengeringan.



Gambar 5. Perubahan suhu temulawak selama pengeringan pada berbagai suhu dan RH

Gambar 6 memperlihatkan data pengukuran suhu dan RH udara yang keluar dari sistem pengeringan, data tersebut digunakan untuk menghitung nilai energi dan eksergi *outflow*. Tabel 1 menampilkan besaran energi dan eksergi udara pengeringan yang masuk (*inflow*) ke dalam sistem Karena energi dan eksergi *inflow* besarnya konstan (karena suhu dan RH udara masuk konstan) maka perubahan besaran energi dan eksergi di dalam sistem selama pengeringan dapat dihitung.



Gambar 6. Suhu udara keluar dari ruang pengeringan pada RH dan suhu masuk tetap

Tabel 1. Besaran *energy* dan *exergy inflow* pada berbagai kombinasi suhu dan RH

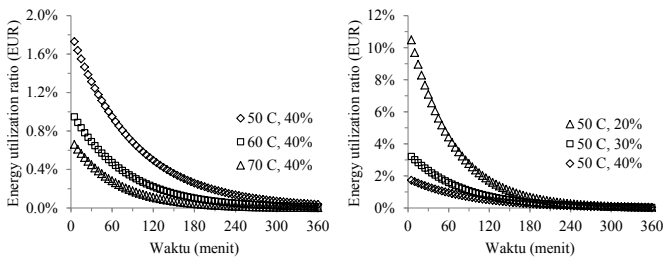
T ($^\circ\text{C}$)	RH (%)	Energy (J/s)	Exergy (J/s)
50	40	7 832	68,08
60	40	11 119	235,90
70	40	15 633	581,13
50	20	5 428	40,74
50	30	6 630	43,03
50	40	7 832	68,08

Tabel 2. Penggunaan energi dan eksergi untuk penguapan selama 4 dan 6 jam pengeringan

Suhu, RH	Selama 4 jam pengeringan		Selama 6 jam pengeringan	
	Evaporation heat (kJ)	Evaporation exergy (kJ)	Evaporation heat (kJ)	Evaporation exergy (kJ)
70 °C, 40%	303,63	27,33	310,08	28,08
60 °C, 40%	301,58	19,68	313,50	20,71
50 °C, 40%	296,94	12,11	314,30	13,13
50 °C, 30%	298,00	10,87	309,52	11,55
50 °C, 20%	304,76	14,06	310,98	14,44

Pada Tabel 2 disajikan besaran penggunaan energi dan eksergi untuk penguapan air bahan (*evaporation heat* dan *evaporation exergy*) yang dihitung dengan metode penjumlahan langsung selama 4 dan 6 jam pengeringan temulawak.

Kurva rasio penggunaan energi (EUR) pada Gambar 7 memperlihatkan bahwa efisiensi penggunaan energi semakin menurun seiring bertambahnya waktu hingga mendekati nol. Hal ini sejalan dengan kinetika laju pengeringan dimana jumlah air yang diuapkan pada awal proses pengeringan masih banyak dan semakin sedikit menjelang rasio penggunaan energi juga dipengaruhi oleh kondisi suhu dan RH pengeringan, semakin tinggi suhu dan RH pengeringan, maka rasio penggunaan energi semakin rendah dan sebaliknya, atau dikatakan bahwa EUR berbanding terbalik dengan tingkat suhu dan RH pengeringan. Hasil yang sama dilaporkan oleh Akpinar (2004) dan Akpinar dkk. (2005) dalam studi tentang pengaruh suhu pengeringan terhadap rasio penggunaan energi.

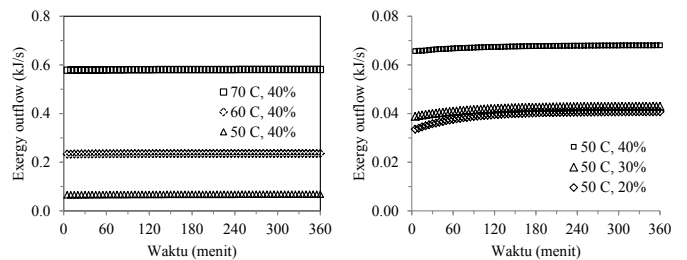


Gambar 7. Rasio penggunaan energi terhadap waktu pengeringan pada RH dan suhu tetap

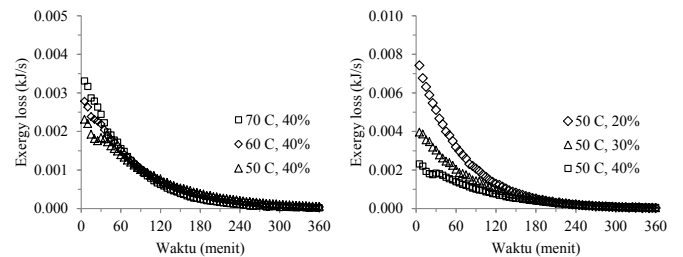
Exergy Loss

Eksergi yang meninggalkan sistem (*exergy outflow*) dapat dilihat pada Gambar 8. Kurva eksergi keluar semakin tinggi dengan meningkatnya waktu pengeringan, nilainya mendekati besarnya eksergi masuk. Hal ini menunjukkan bahwa beban pengeringan dalam sistem semakin kecil. Eksergi yang keluar dari sistem masih cukup tinggi sehingga masih dapat dimanfaatkan, hal ini dapat diaplikasikan untuk pengeringan rak yang terdiri dari beberapa lapisan.

Selisih antara eksergi masuk dengan keluar adalah merupakan besaran eksergi musnah (*exergy loss*), kurvanya diplotkan pada Gambar 9, Shukuya dan Hammache (2002) menyebutnya dengan *exergy destruction* atau *exergy consumed*. Pada gambar tersebut terlihat bahwa konsumsi eksergi tinggi pada awal pengeringan dan semakin turun dengan bertambahnya waktu pengeringan. Hal ini dikarenakan pada awal pengeringan kadar air bahan masih tinggi sehingga diperlukan eksergi lebih banyak untuk penguapan air dan pemanasan bahan, kecenderungan ini sejalan dengan penggunaan energi.



Gambar 8. Exergy outflow sebagai fungsi dari waktu pengeringan



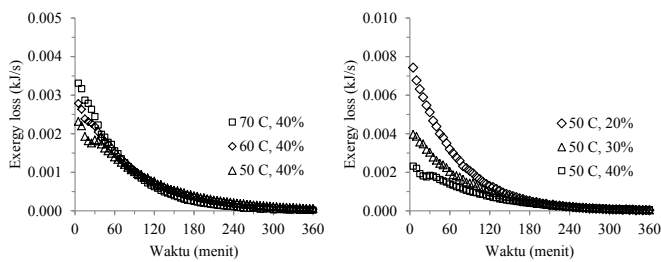
Gambar 9. Exergy loss sebagai fungsi dari waktu pengeringan

Efisiensi Eksergi Pengeringan

Efisiensi eksergi pengeringan temulawak yang dihitung berdasarkan persamaan 16 disajikan pada Gambar 10. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa efisiensi eksergi semakin tinggi pada suhu dan RH yang lebih tinggi. Mendekati akhir pengeringan, efisiensi eksergi mendekati nilai satu yang berarti eksergi yang keluar dari sistem hampir sama dengan

eksergi yang masuk ke dalam sisitem. Ini dapat terjadi karena tidak ada ada lagi air yang diuapkan dari bahan akibat telah dicapainya kadar air keseimbangan produk. Hal yang sama disampaikan oleh Akpinar dkk. (2006) pada studi pengeringan buah apel, demikian juga Akpinar (2004) untuk paprika merah dan Midilli dan Kucuk (2003) untuk buah kenari.

Nilai efisiensi eksergi selama proses pengeringan bervariasi antara 96,5%-100% pada selang suhu 50 hingga 70 °C (RH 40%) serta 82,3% - 100% pada selang RH 20% hingga 40% (suhu 50°C). Sedangkan efisiensi eksergi rata-rata selama empat dan enam jam pengeringan dapat dilihat pada Tabel 3. Selama waktu pengeringan tersebut efisiensi eksergi bervariasi antara 95,1 - 99,9% dan 96,6% - 100% masing-masing untuk 4 dan 6 jam pengeringan.



Gambar 10. Kurva efisiensi eksergi pada berbagai suhu (kiri) dan RH (kanan)

Tabel 3. Efisiensi eksergi rata-rata selama 4 dan 6 jam pengeringan

Suhu, RH	Efisiensi eksergi	
	Rata-rata dalam 4 jam	Rata-rata dalam 6 jam
70 °C, 40%	99,9%	100,0%
60 °C, 40%	99,6%	99,7%
50 °C, 40%	98,7%	99,1%
50 °C, 30%	96,9%	97,8%
50 °C, 20%	95,1%	96,6%

KESIMPULAN

Analisis energi dan eksergi berbasis sistem terbuka telah digunakan untuk menghitung rasio penggunaan energi, eksergi musnah (*exergy loss*) dan efisiensi eksergi pengeringan irisan temulawak. Kondisi proses pengeringan mempengaruhi rasio penggunaan energi dan efisiensi eksergi pengeringan. Semakin tinggi suhu dan RH pengeringan maka rasio penggunaan energi semakin rendah dan efisiensi eksergi semakin tinggi.

Efisiensi eksergi pengeringan temulawak bervariasi antara 96,5%-100% untuk selang suhu 50 hingga 70 °C pada RH 40% serta 82,3% - 100% untuk selang RH 20% hingga 40% pada suhu 50°C. Adapun efisiensi eksergi rata-rata

selama empat dan enam jam pengeringan bervariasi antara 95,1 - 99,9% dan 96,6% - 100%, untuk masing-masing lama pengeringan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, Institut Pertanian Bogor dan Riset Hibah Kompetensi Kementerian Pendidikan Nasional Indonesia atas bantuan dana dan fasilitas penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

Aghbashlo, M., Kianmehr, M.H. dan Arabhosseini, A. (2008). Energy and exergy analyses of thin-layer drying of potato slices in a semi-industrial continuous band dryer. *Drying Technology* **26**: 1501-1508.

Ahern, J.E. (1980). *The Exergy Method of Energy Systems Analysis*. John Wiley and Son, New York.

Akbulut, A. dan Durmus, A. (2010). Energy and exergy analyses of thin layer drying of mulberry in a forced solar dryer. *Energy* **35**: 1754-1763.

Akpinar, E.K. (2004). Energy and exergy analyses of drying of red pepper slices in convective type dryer. *International Journal of Heat and Mass Transfer* **31**(8): 1165-1176.

Akpinar, E.K., Midilli, A. dan Bicer, Y. (2006). The first and second law analyses of thermodynamic of pumpkin drying process. *Journal of Food Engineering* **72**(4): 320-331.

Akpinar, E.K., Midilli, A. dan Bicer, Y. (2005). Energy and exergy of potato drying process via cyclone type dryer. *Energy Conversion and Management* **46**(15/16): 2530-2552.

ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers) (2006). *ASABE Standard: Thin-Layer Drying of Agricultural Crops*. ASABE, St. Joseph, Michigan.

Burghardt, M.D. dan Harbach, J.A. (1993). *Engineering Thermodynamics*, 4th edn. Cornell Maritime Press, Centreville, Maryland.

Cengel, Y.A. dan Boles M.A. (2002). *Thermodynamics: an Engineering Approach*, 4th edn. Mc-Graw Hill, Boston.

Choi, M.A., Kim, S.H., Chung, W.Y., Hwang, J.K. dan Park, K.K. (2005). Xanthorrhizol, a natural sesquiterpenoid from *Curcuma xanthorrhiza*, has an anti-metastatic potential in experimental mouse lung metastasis model. *Biochemical and Biophysical Research Communications* **326**: 210-217.

- Colak, N. dan Hepbasli, A. (2007). Performance analysis of drying of green olive in a tray dryer. *Journal of Food Engineering* **80**(4): 1188-1193.
- Corzo, O., Bracho, N., Vasquez, A. dan Pereira, A. (2008). Energy and exergy analyses of thin layer drying of coroba slices. *Journal of Food Engineering* **86**: 151-161.
- Depkes (Departemen Kesehatan) (2008). *Farmakope Herbal Indonesia*, Edisi I. Departemen Kesehatan Republik Indonesia, Jakarta.
- Dincer, I. dan Sahin, A.Z. (2004). A new model for thermodynamic analysis of a drying process. *International Journal of Heat and Mass Transfer* **47**(4): 645-652.
- Ertekin, C. dan Yaldiz, O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering* **63**: 349-359.
- Graveland, A.J.G.G. dan Gisolf, E. (1998). Exergy analysis: an efficient tool process optimization and understanding. *Computers Chemical Engineering* **22**: 5545-5552.
- Heldman, D.R. dan Singh, R.P. (1981). *Food Process Engineering*, 2nd edn. The AVI Pub., Westport Connecticut.
- Hwang, J.K., Shim J.S. dan Pyun, Y.R. (2000). Antibacterial activity of Xanthorrhizol from *Curcuma xanthorrhiza* against oral pathogens. *Fitoterapia* **71**: 321-323.
- Kashaninejad, M., Mortazavi, A., Safekordi, A. dan Tabil, L.G. (2007). Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. *Journal of Food Engineering* **78**: 98-108.
- Manalu, L.P., Tambunan, A.H. dan Nelwan, L.O. (2012). Penentuan kondisi proses pengeringan temu lawak untuk menghasilkan simplisia standar. *Jurnal Dinamika Penelitian Industri BIPA* **23**(2): 99-106.
- Manalu, L.P., Tambunan, A.H., Nelwan, L.O. dan Hoetman, A.R. (2009). The thin layer drying of temuputih herb. *Proceedings of The 6th Asia-Pacific Drying Conference (ADC2009)*, Bangkok, Thailand, October **19-21**: 402-409.
- Masuda, T., Isobe, J., Jitoe, A. dan Nakatani, N. (1992). Antioxidative curcuminoids from rhizomes of *Curcuma xanthorrhiza*. *Phytochemistry* **13**: 3645-3647.
- Midilli, A. dan Kucuk, H. (2003). Energy and exergy analyses of solar drying process of pistachio. *Energy* **28**(6): 539-556.
- Nazghelichi, T., Kianmehr, M.H. dan Aghbashlo, M. (2010). Thermodynamic analysis of fluidized bed drying of carrot cubes. *Energy* **35**: 4679-4684.
- Shukuya, M. dan Hammache, A. (2002). Introduction of the concept of exergy. *Paper Presented in The Low Exergy Systems For Heating And Cooling of Buildings, Finland: IEA, Supl* **37**: 1-41.
- Syahrul, S., Hamdullahpur, F. dan Dincer, I. (2002). Exergy analysis of fluidized bed drying of moist particles. *Exergy* **2**: 87-98.

NOMENKLATUR

- C_p panas jenis (specific heat, kJ/kg.K)
 E Energy (kJ)
 \dot{E} Energy rate (kJ/s)
 EU Energy Utilization (kJ/s)
 EUR Energy Utilization Ratio
 e eksergi spesifik (specific exergy, kJ/kg)
 h entalpi (specific enthalpy, kJ/kg)
 \dot{m} laju aliran massa (mass flow rate, kg/s)
 \dot{Q} laju pindah panas (rate of heat transfer, kJ/s)
 R konstanta gas (gas constant, kJ/kg.K)
 RH kelembaban nisbi (relative humidity)
 T suhu (temperature, K)
 t waktu (detik)
 η efisiensi
 ω rasio kelembaban (humidity ratio of air, kg/kg dry air)

Subskrip

- 0 kondisi lingkungan (reference, dead state)
 $1,2,3,4$ kondisi 1, 2, 3, 4 (Gambar 3)
 a udara (air)
 d musnah (destruction)
 ev penguapan (evaporation)
 ex eksergi (exergy)
 fg vaporization
 g saturated vapor state
 i masuk (in)
 l hilang (loss)
 o keluar (out)
 p produk (product)
 q heat transfer related
 ref reference, dead state
 v uap (vapor)
 w air (water)