

ANALISIS ENERGI DAN EKSERGI PENGERINGAN LAPISAN TIPIS TEMU PUTIH

Lamhot P. Manalu¹, Armansyah H. Tambunan², Leopold O. Nelwan²
& Agus R. Hoetman³

¹⁾ Pusat Teknologi Agroindustri – BPPT & Sekolah Pascasarjana IPB

²⁾ Dept. Keteknikan Pertanian Fateta IPB

³⁾ Kementrian Riset & Teknologi

ABSTRACT

This paper is concerned with the energy and exergy analyses of the thin layer drying process of temu putih (*Curcuma zedoaria* (Berg.) Rosc) at three different air temperatures (40, 50 and 60 °C) and air relative humidities (RH 20%, 40% and 60%) using a laboratory dryer. Using the first law of thermodynamics, energy analysis was carried to estimate the amounts of energy gained from air drying and the ratios of energy utilization. However, exergy analysis was accomplished to determine exergy losses and exergy efficiencies during the drying process by applying the second law of thermodynamics. The values of energy and exergy efficiencies were found to be in the range of 23.5 - 49.1% and 3.8-14.1% from 40 to 60 °C, respectively, while from RH 20% to 60% its values are 48.4-62.8% and 13.6-14.6%, respectively.

Key words : Energy, Exergy, Drying, Thermodynamic, *Curcuma zedoaria*

ABSTRAK

Kata kunci : Energi, Eksergi, Pengeringan, Termodinamika, Temu putih

1. PENDAHULUAN

Pengeringan merupakan proses pengeluaran air dari dalam bahan secara termal untuk menghasilkan produk kering. Pada saat suatu bahan dikeringkan terjadi dua proses secara bersamaan yaitu perpindahan energi dalam bentuk panas dan perpindahan air atau uap air di dalam bahan ke permukaan. Pengeringan sudah dikenal sejak dulu sebagai metode pengawetan produk bahan pertanian dan tanaman obat (jamu), faktor-faktor yang paling berpengaruh pada proses ini adalah suhu, kelembaban nisbi dan laju aliran udara pengering serta kadar air awal bahan (Corzo et al, 2008).

Pengeringan dikenal sebagai proses yang sarat dengan energi, untuk itu proses pengeringan berbagai bahan atau komoditi pertanian perlu dipelajari agar didapatkan proses yang efisien. Hal ini terkait dengan usaha konservasi energi yang sedang giat dilakukan dalam mengantisipasi semakin tingginya harga energi. Pada umumnya

metode pendekatan yang dipakai dalam menganalisis proses pengeringan selama ini didasarkan pada keseimbangan energi (hukum pertama termodinamika). Metode analisis ini hanya menunjukkan aliran energi dalam proses tetapi tidak memberikan gambaran bagaimana kualitas energi turun selama proses akibat terbentuknya entropi dan *irreversibilitas* (Graveland & Gisolf, 1998; Tambunan et al, 2006).

Untuk melihat bagaimana energi yang masuk ke dalam suatu sistem pengering telah digunakan secara optimal dari sisi kualitas energi, digunakan metode analisis berdasarkan hukum kedua termodinamika atau analisis eksergi. Eksergi diartikan sebagai kerja maksimum yang diperoleh atau kerja minimum yang dibutuhkan oleh sistem dari suatu aliran masa, panas atau kerja (Cengel & Boles, 2002). Analisis eksergi telah menjadi alat penting yang banyak digunakan dalam studi tentang desain, analisis dan optimasi suatu sistem termal pada beberapa tahun terakhir ini. Walaupun demikian, baru sedikit *papers* yang memakai pendekatan analisis eksergi pada proses pengeringan produk pertanian (Dincer & Sahin, 2004; Akpinar, 2004).

Temu putih atau *Curcuma zedoaria* (Berg.) Rosc. termasuk tanaman dalam suku Zingiberaceae, sebagaimana tanaman kunyit dan temu lawak yang sudah lebih dikenal. Tanaman ini termasuk tanaman obat dan digunakan sebagai bahan jamu, bagian tanaman yang digunakan adalah umbi akar (*rhizome*) yang diiris dan dikeringkan sebagai simplisia. Beberapa hasil penelitian menyatakan khasiat temuputih antara lain antimikroba, antidiare, kontraksi usus, imnostimulan, antioksidan dan juga antitumor.

Tujuan penelitian ini adalah mengkaji model termodinamika pengeringan lapisan tipis serta melakukan analisis energi dan eksergi pada proses pengeringan lapisan tipis simplisia temu putih.

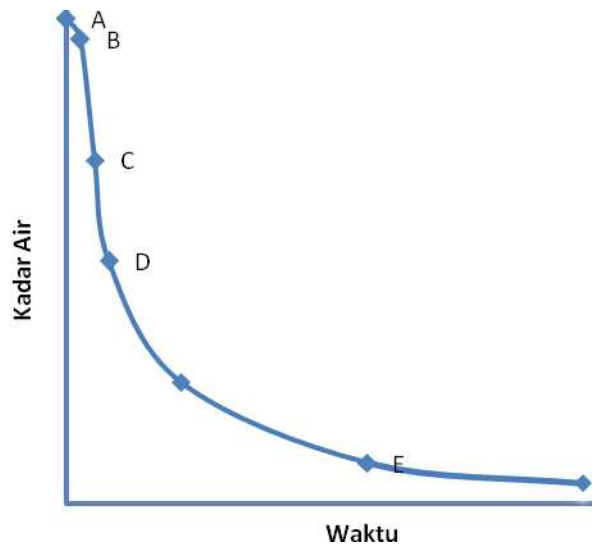
2. PENDEKATAN TEORITIK

2.1. Karakteristik Pengeringan Lapisan Tipis

Secara umum pengeringan menggambarkan suatu proses perpindahan air secara termal untuk menghasilkan produk kering. Brooker et al. (1981) menyatakan bahwa dalam proses pengeringan terjadi perpindahan (transfer) panas dan masa secara simultan. Pada saat suatu bahan dikeringkan terjadi dua proses secara bersamaan yaitu perpindahan energi dalam bentuk panas dari lingkungan ke bahan dan perpindahan air di dalam bahan ke permukaan sebagai akibat dari yang proses pertama.

Kadar air suatu bahan menunjukkan jumlah air yang dikandung dalam bahan tersebut, baik berupa air bebas maupun air terikat (Henderson dan Perry, 1976). Selama proses pengeringan, kadar air bahan mengalami penurunan, besarnya penurunan kadar air bahan tersebut berbeda-beda sesuai dengan banyaknya air yang diuapkan. Pada saat awal proses pengeringan terjadi penguapan air bebas dan penguapan selanjutnya terjadi pada air terikat.

Pada umumnya proses pengeringan terjadi dalam dua tahap laju pengeringan, yaitu laju pengeringan konstan dan laju pengeringan menurun (Gbr. 1). Laju pengeringan konstan terjadi karena gaya perpindahan air internal lebih kecil dari perpindahan uap air pada permukaan bahan (Brooker *et al*, 1981). Laju pengeringan konstan terjadi pada awal proses pengeringan yang kemudian diikuti oleh laju pengeringan menurun. Periode ini dibatasi oleh kadar air kritis (*critical moisture content*) (Henderson & Perry, 1976).



Gbr. 1. Kurva penurunan kadar air terhadap waktu

Besarnya laju pengeringan berbeda pada setiap bahan, penguapan air yang berada di permukaan bahan dipengaruhi oleh kondisi luar yaitu suhu, kelembaban, kecepatan udara pengering, luas permukaan terbuka dan tekanan. Sedangkan perpindahan air di dalam bahan dipengaruhi oleh keadaan fisik bahan, suhu dan kadar air. Setiap kondisi yang berpengaruh di atas dapat menjadi faktor pembatas pada laju pengeringan (Mujumdar & Menon, 1995).

Hall (1957) menyatakan bahwa pengeringan lapisan tipis adalah pengeringan bahan yang seluruh permukaan bahan dalam lapisan tersebut dapat menerima langsung aliran udara pengering. Pengeringan lapisan tipis didasarkan pada pengeringan bahan yang sepenuhnya terpapar aliran udara yang menyebabkan semua bahan dalam lapisan tersebut mengalami pengeringan secara seragam.

2.2. Sistem Termodinamika

Termodinamika didefinisikan sebagai ilmu dasar mengenai energi. Energi sendiri dapat dipandang sebagai kemampuan melakukan perubahan. Termodinamika berasal dari bahasa Yunani *therme* (berarti panas) dan *dynamis* (berarti tenaga), secara deskriptif diartikan sebagai usaha untuk mengubah panas menjadi tenaga (Cengel & Boles, 2002). Seiring dengan semakin terbatasnya sumber energi tak terbarukan, masalah penghematan atau konservasi sumber daya energi semakin ramai dibicarakan.

‘Penghematan energi’ adalah suatu terminologi yang tidak tepat walaupun telah digunakan secara luas. Penggunaannya cenderung membingungkan dan menyesatkan, karena istilah tersebut menyangkal prinsip kekekalan energi atau hukum termodinamika pertama. Penggunaan istilah eksergi dapat membantu menghilangkan makna ganda dari ‘penghematan energi’ secara rasional dan sekaligus menjadi istilah yang tepat dan sesuai dengan prinsip ilmiah (Rosen, 2002).

Hukum termodinamika pertama adalah salah satu kaidah alam yang paling mendasar yaitu prinsip kekekalan energi (*energy conservation principle*). Kaidah tersebut menyatakan bahwa energi dapat berubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya, tetapi jumlah total energinya tetap sama. Secara matematis dinyatakan bahwa jumlah energi dari suatu sistem sama dengan selisih antara energi masuk dan keluar.

$$\Delta E = E_{in} - E_{out} \quad (1)$$

Persamaan (1) dikenal sebagai persamaan keseimbangan energi. Hukum pertama termodinamika juga menyatakan bahwa energi merupakan suatu properti termodinamika (*thermodynamic property*) (Cengel & Boles, 2002).

Hukum termodinamika kedua menyatakan bahwa selain memiliki kuantitas, energi juga memiliki kualitas, dan suatu proses yang riil akan berlangsung pada arah kualitas energi yang semakin menurun. Jadi walaupun tidak ada kuantitas energi yang hilang, kualitas energi selalu berkurang selama proses. Besaran dari kualitas energi ini disebut eksergi. Bentuk persamaan umum eksergi atau disebut juga energi yang tersedia (*available energy*) pada suhu H dan suhu lingkungan T_0 (Ahern, 1980) adalah:

$$Ex_H = Q - T_0 \Delta s \quad (2)$$

Sistem termodinamika didefinisikan sebagai besaran atau ukuran sesuatu atau suatu area yang dipilih untuk dianalisis. Permukaan yang riil ataupun bersifat khayal yang memisahkan sistem dengan lingkungannya disebut dengan batas (*boundary*). Suatu sistem dapat dibedakan menjadi sistem tertutup (*closed system*) atau terbuka (*open system*), tergantung pada apakah sistem tersebut mengacu kepada kaidah massa-tetap (*fixed mass*) atau volume-tetap (*fixed volume*). Sistem terbuka yang dikenal juga sebagai volume terkontrol (*control volume system*) biasanya berhubungan erat dengan peralatan atau proses yang mempunyai aliran massa. Sistem aliran pada alat atau proses ini dapat dikaji dengan baik dengan memilih batas yang memenuhi prinsip volume terkontrol. Pada sistem ini baik massa maupun energi dapat melewati batas sistem tersebut (Cengel & Boles, 2002).

3. BAHAN DAN METODE

3.1. Alat Pengering (*The Laboratory Dryer*)

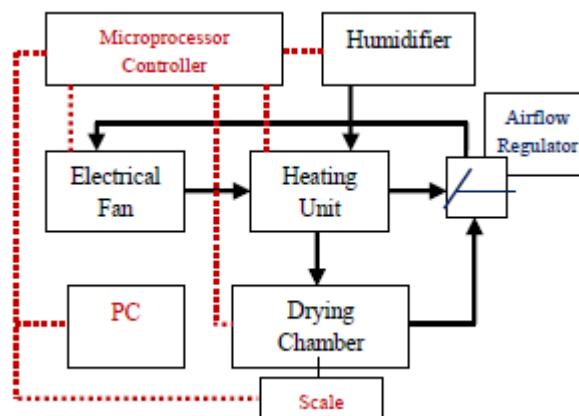
Penelitian dilakukan dengan menggunakan pengering terkontrol-terakuisisi bertempat di Laboratorium Energi dan Elektrifikasi Dept. TEP-IPB. Peralatan pengering dapat diatur pada kondisi suhu dan kelembaban nisbi (RH) yang diinginkan yaitu pada selang suhu 30 and 80 °C dan 20-90% RH. Pengontrolan Kondisi pengeringan dilakukan dengan kontrol PID dengan akurasi suhu ± 1 °C dan $\pm 2\%$ RH sesuai dengan ASAE Standar.

Secara keseluruhan alat pengering dikontrol oleh mikroprosesor AVR Atmel. Alat ini dilengkapi dengan sistim *humidifier* 2000 W, sistim pemanas 2000 W, sistim kontrol, kipas elektrik dan dehumidifier. Sensor suhu dan RH menggunakan SHT15 Sensirion, sedangkan ruang pengeringnya (*drying chamber*) berdimensi 40 cm × 40 cm × 40 cm.

Kecepatan udara pengering yang melalui ruang pengering dikontrol secara manual dan diukur dengan menggunakan anemometer digital Kanomax dengan akurasi ± 0.1 m/s. Perubahan berat sampel didalam ruang pengering diukur langsung secara otomatis pada selang waktu tertentu dengan menggunakan timbangan GF-3000 AandD dengan kapasitas 0–3000 g dan akurasi 0.01 g. Skema alat pengering terlihat pada Gbr. 2.

3.2. Bahan dan Percobaan

Irisan rimpang temu putih dikeringkan pada kombinasi suhu 40, 50 dan 60 °C dengan RH 20%, 40%, 60% dan 80% dengan menggunakan pengering lab di atas. Sampel diletakkan pada wadah sedemikian rupa dalam bentuk lapisan tipis. Tebal irisan sampel sekitar 3 mm dan berat sampel setiap pengeringan berkisar 150 gram. Sebelum dikeringkan, irisan temu putih terlebih dulu direndam dalam air dengan suhu 95 °C (diblansir) selama 5 menit (Ertekin & Yaldiz, 2004). Pada setiap percobaan, alat pengering dihidupkan sekitar satu jam sebelum dimulai untuk menstabilkan ruangan pengering sesuai dengan kondisi yang diinginkan. Berat sampel dan suhu serta kelembaban udara pengering dimonitor secara kontinu dan direkam datanya setiap 5 menit selama percobaan. 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 et al, 2003).



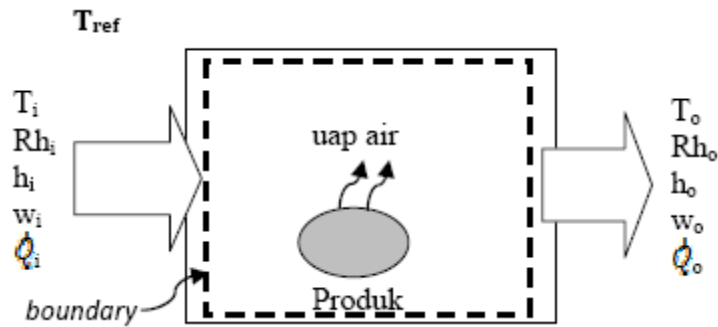
Gbr. 2. Skema alat pengering laboratorium

3.3. Metode Analisis Energi dan Eksergi Pengeringan

Untuk menelaah persamaan keseimbangan eksergi suatu proses pengeringan perlu digambarkan dahulu diagram atau skema sistem pengeringannya sehingga sistem termodinamikanya dapat ditentukan. Proses pengeringan bahan padat lembab (*moist solid*) seperti sampel temu putih pada penelitian ini sebagai mana yang ditunjukkan

pada Gbr. 3 dikategorikan sebagai sistem terbuka atau *control volume system* (Dincer & Sahin, 2004). Persamaan umum keseimbangan energi untuk sistem ini adalah (Bejan et al, 1996):

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \left(\dot{W}_{cv} - p_0 \frac{dV_{cv}}{dt}\right) + \sum_i \dot{m}_i e_i - \sum_e \dot{m}_e e_e - \dot{E}_D \quad (3)$$



Gbr. 3. Skema sistem pengeringan dengan *control volume system*

Metode yang digunakan pada analisis eksergi pengeringan berikut ini hanya didasarkan pada transfer panas atau suku pertama dari persamaan (3). Untuk menentukan perubahan eksergi yang terjadi pada sistem termal di atas maka disusun persamaan keseimbangan energi pada produk dan sistem secara keseluruhan. Persamaan keseimbangan energi pada produk:

$$hA(T_i - T_p) = mC_p \frac{dT_p}{dt} + \dot{m}_w h_{fg} \quad (4)$$

Persamaan keseimbangan energi seluruh sistem adalah :

$$\dot{Q}_i = hA(T_i - T_p) + \dot{Q}_o \quad (5)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (4) ke (5) maka

$$\dot{Q}_i = mC_p \frac{dT_p}{dt} + \dot{m}_w h_{fg} + \dot{Q}_o \quad (6)$$

Selanjutnya dari persamaan (6) disusun persamaan keseimbangan entropi :

$$\frac{\dot{Q}_i}{T_i} = \left(mC_p \frac{dT_p}{dt} + \dot{m}_w h_{fg}\right) \frac{1}{T_p} + \frac{\dot{Q}_o}{T_o} + \Delta s \quad (7)$$

Dari persamaan (6) dan (7) didapatkan persamaan keseimbangan eksergi pada suhu lingkungan (*dead state*) T_{ref} .

$$\dot{Q}_i \left(1 - \frac{T_{ref}}{T_i}\right) = \left(mC_p \frac{dT_p}{dt} + \dot{m}_w h_{fg}\right) \left(1 - \frac{T_{ref}}{T_p}\right) + \dot{Q}_o \left(1 - \frac{T_{ref}}{T_o}\right) - T_{ref} \Delta s \quad (8)$$

Ruas kiri persamaan di atas disebut sebagai eksergi yang masuk ke dalam sistem (*exergy inflow*), dimana besarnya energi ($\dot{Q}_i$) dapat dihitung dengan persamaan,

$$\dot{Q}_i = \dot{m}h \quad (9)$$

$\dot{m}$ adalah laju udara pengeringan (*air mass flow-rate*) sedangkan h adalah entalpi.

Untuk menghitung persamaan keseimbangan eksergi (8) di atas, perlu diperhatikan bahwa suhu produk (T_p) dan laju penguapan ($\dot{m}_w$) bervariasi menurut waktu. Nilai-nilai

tersebut dapat dihitung secara simultan melalui persamaan keseimbangan energi pada produk dengan persamaan pengeringan yang sudah ditentukan terlebih dahulu.

Persamaan (4) dapat disusun kembali menjadi

$$\dot{m}C_p \Delta T_p = hA(T_i - T_p) - \dot{m}_w h_{fg} \quad (10)$$

$$\dot{m}C_p dT_p/dt = hA(T_i - T_p) - \dot{m}_w h_{fg} \quad (11)$$

dengan menggunakan metode numerik beda hingga (*finite different*) persamaan di atas dapat ditulis sebagai:

$$\dot{m}C_p \frac{T_{p(i+\Delta t)} - T_{p(i)}}{\Delta t} = hA(T_i - T_{p(i)}) - \dot{m}_w h_{fg} \quad (12)$$

$$T_{p(i+\Delta t)} = T_{p(i)} + \frac{\Delta t}{\dot{m}C_p} [hA(T_i - T_{p(i)}) - \dot{m}_w h_{fg}] \quad (13)$$

Laju penguapan ($\dot{m}_w$) dihitung dengan persamaan berikut,

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_e) \quad (14)$$

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt) \quad (15)$$

$$\frac{dM}{dt} = -k(M_0 - M_e) \exp(-kt) \quad (16)$$

$$\dot{m}_w = (m_{\text{produk kering}})[-k(M_0 - M_e) \exp(-kt)] \quad (17)$$

k dan M_e masing-masing adalah konstanta pengeringan dan kadar air keseimbangan, perhatikan bahwa konstanta pengeringan (k) adalah juga bervariasi menurut suhu. Sebagai contoh konstanta pengeringan irisan rimpang temu putih bervariasi dari 0,0033 – 0,0312 menit⁻¹ pada rentang suhu 40-60° C.

Selanjutnya koefisien pindah panas h (W/m².K) dihitung berdasarkan persamaan pindah panas pada permukaan plat datar (Kreith & Black, 1980; Welty, 1974; Bird et al, 1960) sebagai berikut. Koefisien h merupakan fungsi dari bilangan Nusselt (Nu), sedangkan Nu sendiri merupakan fungsi dari bilangan Reynolds (Re) dan Prandtl (Pr).

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L} \quad (18)$$

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (19)$$

$$Re = \frac{LV_u \rho}{\mu} \quad (20)$$

dimana L adalah panjang bahan yang dilalui aliran udara, V_u kecepatan alir, ρ densitas dan μ viskositas. Pada aliran fluida yang mengalir sejajar dengan benda dan nilai $Re < 1 \times 10^4$, bilangan Nu dihitung dengan persamaan berikut:

$$Nu = 0.664 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (21)$$

sedangkan untuk aliran turbulen ($Re > 1 \times 10^4$), bilangan Nu dihitung dengan persamaan:

$$Nu = 0.036 Re^{4/5} Pr^{1/3} \quad (22)$$

Dincer dan Sahin (2004) mendefinisikan efisiensi eksergi pengeringan (*drying exergetic* = η_{ex}) sebagai ratio eksergi yang digunakan untuk pengeringan (*exergy investment*) terhadap eksergi yang disuplai ke dalam sistem (*exergy supplied*).

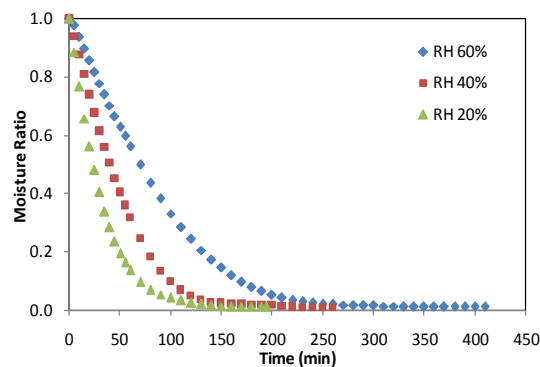
$$Exergy\ supplied = \dot{Q}_i \left(1 - \frac{T_{ref}}{T_i}\right) \quad (23)$$

$$Exergy\ investment = \left(m C_p \frac{dT_p}{dt} + \dot{m}_w h_{fg}\right) \left(1 - \frac{T_{ref}}{T_p}\right) \quad (24)$$

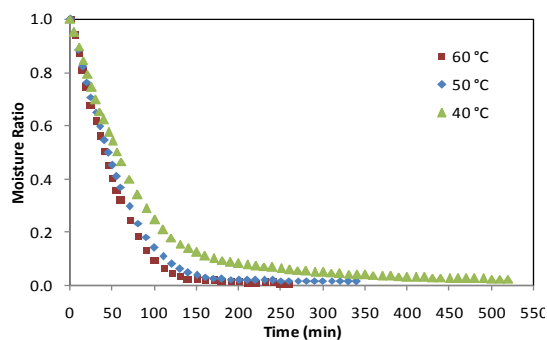
$$\eta_{ex} = \frac{exergy\ investment}{exergy\ supplied} \quad (25)$$

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

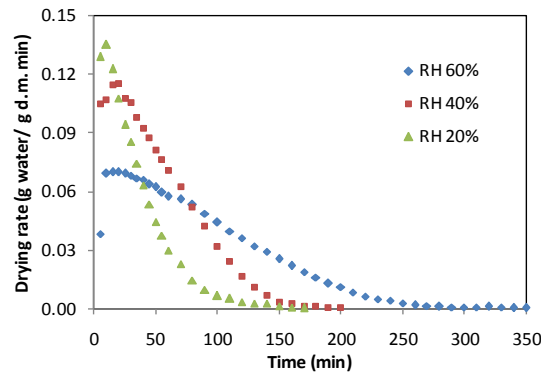
Plot data pengeringan lapisan tipis temu putih terlihat pada Gbr. 4 yang menunjukkan pengaruh kelembaban terhadap penurunan berat sampel pada suhu tetap, sedangkan Gbr. 5 menunjukkan pengaruh suhu pengeringan terhadap penurunan berat sampel pada RH tetap. Gbr. 6 menunjukkan pengaruh kelembaban terhadap laju pengeringan pada suhu tetap, sedangkan Gbr. 7 menunjukkan pengaruh suhu pengeringan terhadap laju pengeringan pada RH tetap. Baik suhu maupun RH mempunyai pengaruh terhadap laju pengeringan, semakin tinggi suhu dan semakin rendah RH maka laju pengeringan semakin tinggi. Pengeringan temu putih terjadi pada periode laju pengeringan menurun (the falling rate period), hal yang sama dilaporkan oleh Ahmed et al., (2001) untuk daun ketumbar (*coriander*), Doymaz (2005) untuk kacang okra dan Kashaninejad (2007) untuk kacang kenari hijau (*pistachio*).



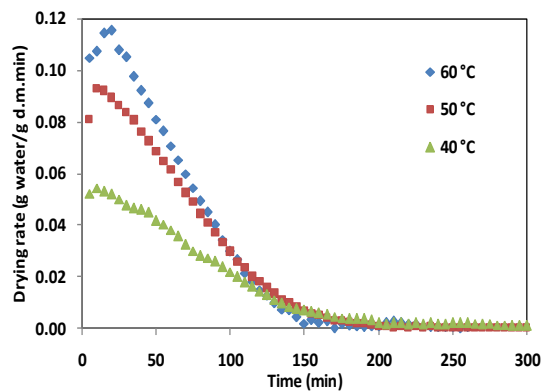
Gbr. 4. Kurva pengeringan temu putih pada suhu 60 °C



Gbr. 5. Kurva pengeringan temu putih pada RH 40%

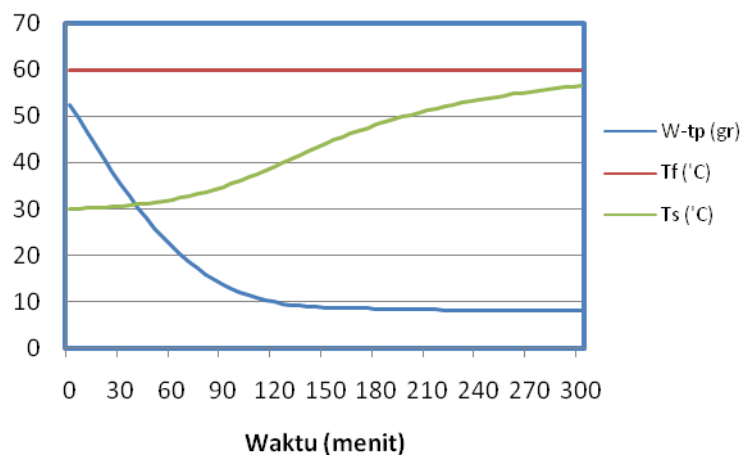


Gbr. 6. Pengaruh RH terhadap laju pengeringan pada suhu 60 °C

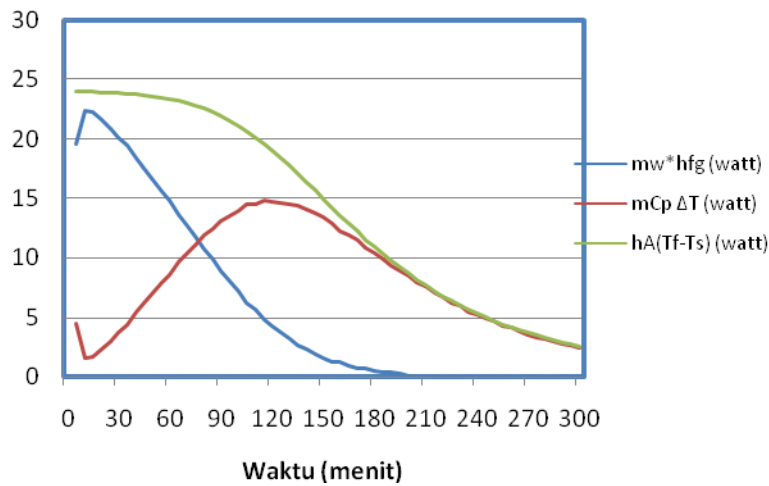


Gbr. 7. Pengaruh suhu terhadap laju pengeringan pada RH 40%

Suhu bahan (T_p atau T_s) dihitung dengan menggunakan persamaan (13) dan data pengeringan sampel untuk setiap percobaan. Pada Gbr. 8 dapat dilihat perubahan suhu bahan pada suhu udara pengeringan 60 °C, seiring dengan meningkatnya waktu pengeringan suhu bahan semakin meningkat sampai mendekati suhu pengeringan. Sedangkan Gbr. 9 memperlihatkan kurva nilai pindah panas yang terjadi dalam proses pengeringan lapisan tipis temu putih yang merupakan visualisasi dari persamaan (4).



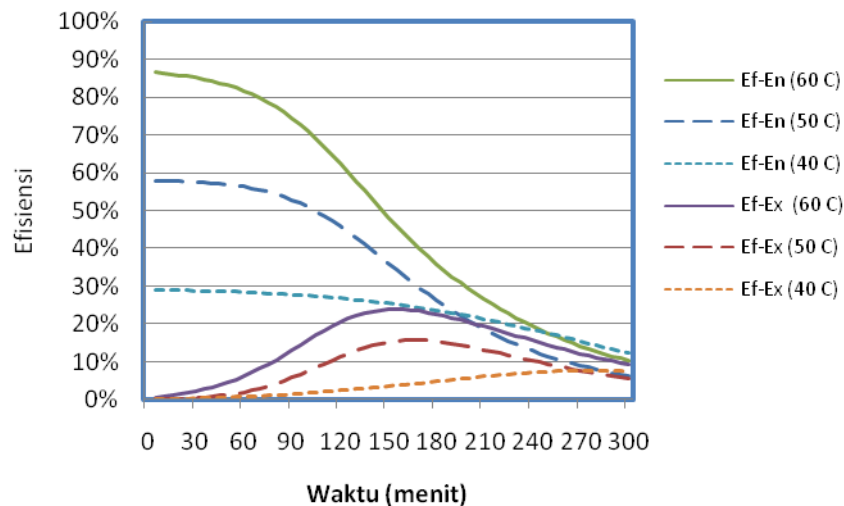
Gbr. 8. Grafik perubahan berat (W-tp) dan suhu sampel (Ts) pada suhu pengeringan (Tf) 60° C



Gbr. 9. Grafik pindah panas pada pengeringan temu putih pada 60 °C

Dari pengukuran dan perhitungan didapatkan efisiensi energi dan eksergi pengeringan lapisan tipis temu putih pada berbagai tingkat suhu terhadap waktu pengeringan, grafiknya disajikan pada Gbr. 10. Efisiensi energi (*energy utilization ratio*) semakin menurun dengan meningkatnya waktu, sedangkan efisiensi eksergi mengalami peningkatan hingga pertengahan pengeringan dan kemudian menurun dengan meningkatnya waktu. Hal yang sama dilaporkan oleh Corzo et al (2008) pada proses pengeringan irisan buah *coroba* (sejenis palma) (Gbr. 11).

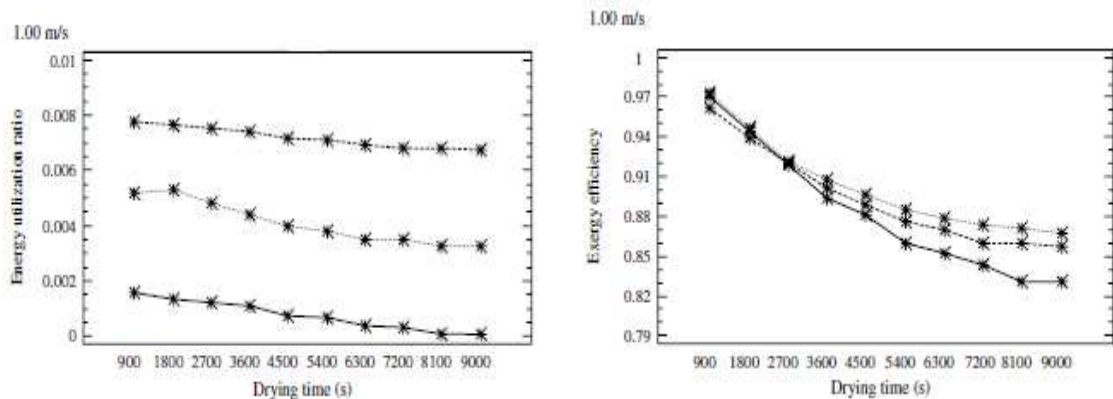
Efisiensi energi dan eksergi (total) selama 300 menit pengeringan untuk suhu 60, 50 dan 40 °C terlihat pada Tabel 1 dan profilnya disajikan pada Gbr. 12. Baik efisiensi energi maupun eksergi semakin meningkat dengan meningkatnya suhu pengeringan.



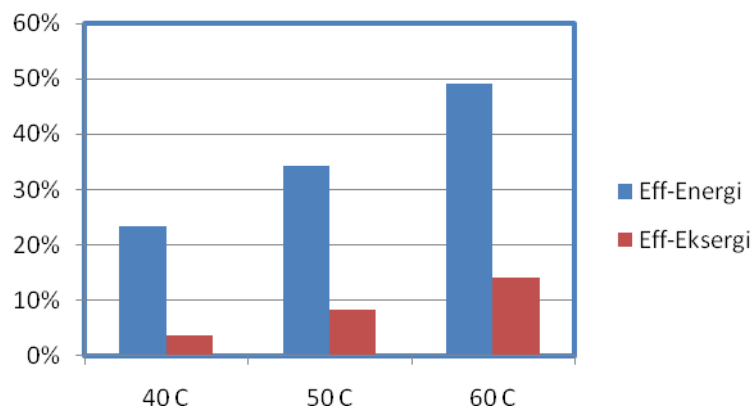
Gbr. 10. Variasi efisiensi energi (Ef-En) dan eksergi pengeringan temu putih pada berbagai tingkat suhu dengan kelembaban tetap

Tabel 1. Efisiensi energi dan eksergi pengeringan (total) selama 300 menit berdasarkan suhu

Suhu Pengeringan	Efisiensi Energi	Efisiensi Eksergi
40° C	23.5%	3.8%
50° C	34.2%	8.4%
60° C	49.1%	14.1%



Gbr. 11. Variasi energy utilization ratio (kiri) dan efisiensi eksergi (kanan) pada berbagai suhu pengeringan [(-) 71 °C; (- -) 82 °C; (..) 93 °C] (Corzo et al, 2008)



Gbr. 12. Profil efisiensi energi dan eksergi pengeringan (total) selama 300 menit pada berbagai suhu dan RH tetap

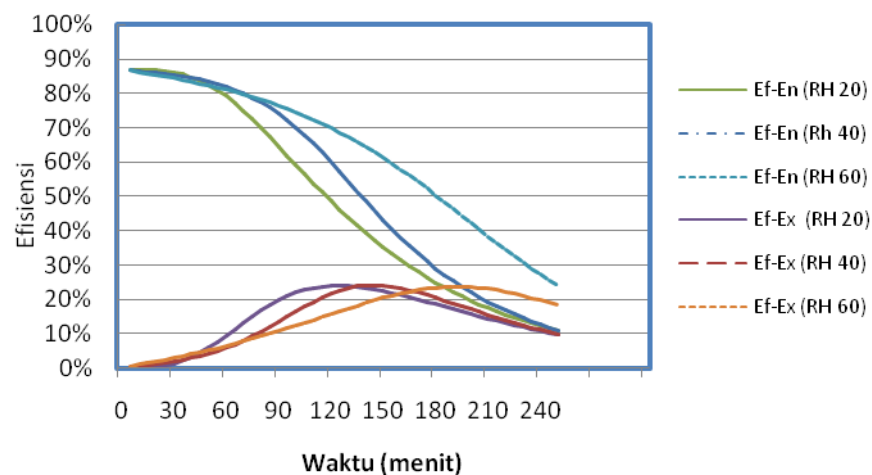
Pengaruh kelembaban nisbi terhadap efisiensi energi dan eksergi pengeringan lapisan tipis temu putih disajikan pada Gbr. 13. Efisiensi energi (*energy utilization ratio*) semakin menurun dengan meningkatnya waktu, sedangkan efisiensi eksergi juga mengalami peningkatan hingga pertengahan pengeringan dan kemudian menurun dengan meningkatnya waktu sebagaimana pengaruh suhu terhadap efisiensi eksergi.

Efisiensi energi dan eksergi (total) selama 300 menit pengeringan untuk RH 20%, 40% dan 60% terlihat pada Tabel 2 sedangkan profilnya disajikan pada Gbr. 14. Efisiensi

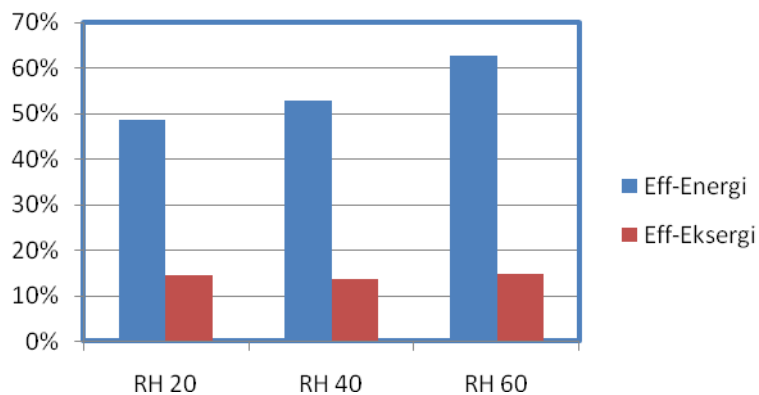
energi semakin meningkat dengan meningkatnya RH udara pengeringan, sedangkan efisiensi eksergi menunjukkan kecenderungan tidak terpengaruh oleh RH udara pengeringan.

Tabel 2. Efisiensi energi dan eksergi pengeringan selama 250 menit berdasarkan RH

RH Pengeringan	Efisiensi Energi	Efisiensi Eksergi
20%	48.4%	14.4%
40%	52.9%	13.6%
60%	62.8%	14.6%



Gbr. 13. Variasi efisiensi energi dan eksergi pengeringan temu putih pada berbagai tingkat kelembaban dan suhu tetap



Gbr. 14. Profil efisiensi energi dan eksergi pengeringan selama 300 menit pada berbagai kelembaban nisbi dan suhu tetap

5. KESIMPULAN

- 1) Sistem termodinamika pada percobaan ini termasuk kedalam *open system* atau *control volume system*. Persamaan yang disusun telah dapat menghitung efisiensi eksergi pengeringan temu putih berdasarkan keseimbangan panas.
- 2) Suhu udara pengeringan mempengaruhi efisiensi energi maupun eksergi pengeringan. Semakin tinggi suhu udara pengeringan, efisiensi energi dan efisiensi eksergi pengeringan juga semakin tinggi. Efisiensi energi tertinggi dalam penelitian ini terjadi pada suhu 60 °C.
- 3) Kelembaban nisbi (RH) udara pengeringan mempengaruhi efisiensi energi, semakin tinggi RH udara pengeringan maka efisiensi energi semakin tinggi. Sedangkan efisiensi eksergi menunjukkan kecenderungan tidak terpengaruh oleh RH udara pengeringan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahern, J.E. (1980). *The Exergy Method of Energy Systems Analysis*. John Wiley & Sons, New York.
- Ahmed, J., U.S. Shivhare and G. Singh. (2001). *Drying Characteristics and Product Quality of Coriander Leaves*. Trans IchemE. 79(2001): 103-106
- Akpınar, E.K. (2004). *Energy and Exergy Analyses of Drying of Red Pepper Slices in a Convective Type Dryer*. International Communications in Heat and Mass Transfer, 31(8), 1165–1176.
- Akpınar, E.K., A. Midilli and Y. Bicer. (2006). *The First and Second Law Analyses of Thermodynamic of Pumpkin Drying Process*. Journal of Food Engineering, 72(4), 320–331.
- Bejan, A. (1996). *Entropy Generation Minimization*. CRC Press, Boca Raton, New York.
- Bejan, A., G. Tsatsaronis and M. Moran. (1996). *Thermal Design & Optimization*. John Wiley & Sons, New York.
- Bird, R.B., W.E. Stewart and E.N. Lightfoot. (1960). *Transport Phenomena*. John Wiley & Sons, New York.
- Brooker, D.B., F.W. Bakker-Arkema and C.W. Hall. (1981). *Drying Cereal Grains*. The AVI Pub. Co., Inc., Westport, Connecticut.
- Burghardt, M.D. and J.A. Harbach. (1993). *Engineering Thermodynamics*, 4th edition. Cornell Maritime Press, Centreville, Maryland.
- Cengel, Y.A. and M.A. Boles. (2002). *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 4th edition. Mc-Graw Hill, Boston-Toronto.
- Corzo, O., Bracho, N., Vasquez, A. and A. Pereira. (2008). *Energy and Exergy Analysis of Thin Layer Drying of Coroba Slices*. Journal of Food Engineering, 86, 151–161.
- Dincer, I. and A.Z. Sahin. (2004). *A New Model for Thermodynamic Analysis of a Drying Process*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 47(4), 645–652.

- Doymaz, I. (2005). *Drying Characteristics and Kinetics of Okra*. Journal of Food Engineering, 69(2005): 275–279.
- Ertekin, C. and O. Yaldiz. (2004). *Drying of Eggplant and Selection of Suitable thin Layer Drying Model*. Journal of Food Engineering, 63(2004): 349–359.
- Graveland, A.J.G.G. and E. Gisolf. (1998). *Exergy Analysis: An Efficient Tool Process Optimization and Understanding*. Computers Chem. Engng. Vol. 22, Suppl. pp. 5545-5552.
- Hall, C.W. (1957). *Drying Farm Crops*. Agricultural Consulting Associate Inc., Michigan.
- Henderson, B.M. and R.L. Perry. (1976). *Agricultural Process Engineering*. AVI Pub. Co. Inc., Westport, Connecticut.
- Kashaninejad, M., L.G. Tabil, A. Mortazavi and A. Safekordi. (2003). *Effect of Drying Methods on Quality of Pistachio Nuts*. Drying Technology, 21(2003) (5), 821–838.
- Kashaninejad, M., A. Mortazavi, A. Safekordi L.G. Tabil. (2007). *Thin-layer Drying Characteristics and Modelling of Pistachio Nuts*. Journal of Food Engineering, 78(2007): 98–108.
- Liley, P.E. (2002). *Flow Exergy of Moist Air*, Research letter. Exergy International Journal, 2(2002), 55–57.
- Midilli, A. and H. Kucuk. (2003). *Energy and Exergy Analyses of Solar Drying Process of Pistachio*. Energy, 28(6), 539–556.
- Mujumdar, A.S. and A.S. Menon. (1995). *Drying of Solid : Principles, Classification, and Selection of Dryers*. In Arun S. Mujumdar (ed.). Handbook of Industrial Drying, 2nd ed. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Rosen, M.A. (2002). *Clarifying Thermodynamic Efficiencies and Losses via Exergy*, an International Journal 2 (2002), 3-5.
- Tambunan, A.H., Kamaruddin Abdullah & Nababan, B. (2006). *Analisis Eksergi Penyimpanan Panas untuk Sistem Pengeri Berenergi Surya*. Jurnal Keteknik Pertanian, Vol. 20, No. 3 Des 2006: 235-242.
- Welty, J.R. (1974). *Engineering Heat Transfer*. John Wiley & Sons, New York.