



KAJIAN PROSES PENGERINGAN GABAH DENGAN PERANGKAT ANALISIS EKSERGI (ASSESSMENT FOR DRYING PROCESS OF PADDY USING EXERGY ANALYSIS)

Rosmeika, Teguh W. Widodo, Ana Nurhasanah, dan Harmanto

Balai Besar Pengembangan Mekanisasi Pertanian
Situgadung, P.O Box 2, Serpong 15310, Tangerang, Banten
Telp: 021-70936787
Email: bbpmektan@litbang.deptan.go.id.

Diterima : 8 Agustus 2011; Disetujui : 11 Oktober 2011

ABSTRAK

Analisis eksergi digunakan untuk mencapai penggunaan sumber energi yang lebih efektif karena mampu menentukan kehilangan energi pada setiap tahapan proses. Analisis eksergi pada proses pengeringan merupakan perangkat penting untuk desain, analisis dan optimasi sistem termal. Penggunaan energi pada proses pengeringan adalah untuk menguapkan lengas air dari dalam bahan ke permukaan bahan dan selanjutnya di serap oleh aliran udara dengan suhu dan kelembaban tertentu. Tujuan kajian ini adalah untuk menganalisis eksergi pada proses pengeringan gabah. Metode analisis yang dipergunakan adalah pendekatan teoritis dari sistem pengeringan dengan memformulasikan input dan output dari produk yang dikeringkan dan udara pengering kedalam persamaan keseimbangan eksergi. *Exergy inflow* dan *outflow* cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya waktu proses pengeringan, sedangkan *exergy flow rate* untuk air dalam gabah cenderung menurun karena ikatan molekul air dalam gabah yang semakin kuat. Eksergi destruksi pun mengalami penurunan sejak awal pengeringan, sedangkan efisiensi eksergi cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya waktu proses pengeringan, dengan rata-rata efisiensi eksergi sebesar 30,9%. Efisiensi eksergi ini dapat ditingkatkan dengan cara melakukan re-sirkulasi udara keluar dari pengering karena RH masih cukup rendah dan meningkatkan efisiensi panas dari tungku sekam.

Kata kunci: Analisis eksergi, proses pengeringan, tungku sekam, gabah

ABSTRACT

Exergy analysis is utilized to achieve more effective energy source utilization because of its ability to determine energy loss at every steps of process. Exergy analysis on drying process is an important tool for design, analysis and optimization of thermal system. Energy utilization on drying process is used to evaporate water moisture from inside kernel moves to the surface of paddy kernel and is absorbed by airflow at a certain temperature and relative humidity. The study was proposed to analyze the exergy of drying process for paddy. The method that was utilized for analyzing was theoretical approach of drying system by formulating input and output of the product that was dried and drying air into equations of exergy balances. Exergy inflow and outflow tend to increase by the time of drying process, whereas exergy flow rates for water inside paddy kernel tend to be decrease because the water molecule bonds inside paddy kernel is tighter. Moreover, exergy destruction also go down since of the beginning of drying process, whereas exergy efficiency tends to be increase as increasing of time of drying process, average of exergy efficiency was 30.9%. The result of exergy efficiency is able to be improved by recirculation of exhaust air from drying chamber because relative humidity (RH) was remain low, as well as by improving thermal efficiency of rice husk burner.

Key words: Exergy analysis, drying process, rice husk burner, paddy.

PENDAHULUAN

Pengeringan merupakan proses pindah panas dan massa dengan konversi kandungan air bahan menjadi uap air dan perpindahan uap

air tersebut ke udara. Panas harus dipindahkan ke bahan untuk proses penguapan dengan cara konveksi, radiasi, atau konduksi. Metode yang biasa digunakan pada pindah panas tersebut adalah konveksi dari udara ke bahan.

Pengeringan konveksi membutuhkan pemanasan udara untuk menurunkan kelembaban (RH) sehingga cukup untuk menyerap uap air dari bahan.

Padi, seperti biji-bijian lainnya, harus dikeringkan untuk mencapai kadar kesetimbangan sekitar 13-14%, untuk mempertahankan kualitas selama penyimpanan dan penggilingan. Pada saat dipanen, padi atau gabah umum mempunyai kadar air berkisar 25 % atau lebih. Pada kadar air seperti ini intensitas pernapasan gabah masih sangat tinggi. Intensitas pernapasan yang masih tinggi ini akan dapat menghasilkan panas dan air, sehingga memungkinkan terjadinya pertumbuhan cendawan yang beresiko terjadinya kerusakan karena pembusukan gabah.

Mengeringkan gabah sampai pada kadar air kesetimbangan (13 – 14 %) bertujuan untuk meminimalkan degradasi fisik dan kimia akibat aktivitas dari mikroorganisme, serangga, dan respirasi butir gabah itu sendiri. Perkembangan mikroorganisme akan menyebabkan kerusakan hanya dalam hitungan hari apabila gabah dibiarkan pada tingkat kadar air lebih dari 20 % (Esmay et al., 1979).

Analisis eksergi telah menjadi alat penting yang banyak digunakan dalam studi tentang desain, analisis, dan optimasi suatu system termal pada beberapa tahun terakhir. Akan tetapi, pemakaian metode eksergi untuk menganalisis proses pengeringan produk pertanian masih belum banyak dilakukan (Dincer dan Sahin, 2004 dalam Manalu et al. 2010).

Eksergi merupakan potensi kerja maksimal dalam bentuk materi atau energi dalam berinteraksi dengan lingkungannya. Analisis eksergi didasarkan pada hukum termodinamika kedua yang menyatakan bahwa proses termodinamika selalu tidak ideal sehingga terjadi penurunan kualitas energi. Analisis eksergi mempunyai kelebihan bila dibandingkan dengan analisis energi, diantaranya adalah: lebih teliti dalam menentukan energi yang hilang dalam proses maupun yang dibuang ke udara, dan dapat menentukan kualitas energi (Sugiyono, 2000).

Eksergi secara umum didefinisikan sebagai energi minimum yang diperlukan agar suatu proses dapat berlangsung, atau energi maksimum yang dapat diperoleh dari suatu sumber energi (Bejan et al. 1996; Russell dan Adebisi, 1993). Eksergi diistilahkan juga sebagai *available energy* karena menyatakan jumlah energi yang dapat dimanfaatkan. Pernyataan ini

didasarkan pada hukum termodinamika kedua yang menjelaskan bahwa setiap proses akan berlangsung secara spontan ke arah kesetimbangan dengan lingkungannya. Oleh sebab itu, kondisi lingkungan dapat dianggap sebagai *dead state* karena segala sesuatu yang telah mencapai keadaan *dead state* tidak dapat berubah lagi secara spontan. Dengan kata lain, energi yang terkandung pada suatu sistem yang berada pada keadaan *dead state* tidak dapat dimanfaatkan lagi. Maka berdasarkan hukum tersebut, beda kandungan energi suatu sistem pada kondisi tertentu dengan kandungan energi pada kondisi *dead state* adalah jumlah energi yang dapat dimanfaatkan (*available energy*).

Perubahan yang terjadi pada sistem menyebabkan mutu dari energi yang dimanfaatkan pun fluktuatif. Perubahan mutu energi yang terjadi dapat diukur dengan menggunakan konsep eksergi. Analisis eksergi digunakan untuk mencapai penggunaan sumber energi yang lebih efektif karena mampu mengetahui besarnya energi yang dapat dimanfaatkan pada setiap tahapan proses. Analisis ini didasarkan pada hukum termodinamika pertama dan kedua karena memperhitungkan irreversibilitas (ketidakmampubalikkan) dalam sistem. Informasi tersebut dapat digunakan untuk mendesain sistem baru yang lebih efisien energi ataupun untuk meningkatkan efisiensi pada sistem yang sudah ada, sehingga sangat penting untuk menentukan seberapa tepat energi yang digunakan (Bejan et al. 1996).

Menurut Bejan et al. (1996) entropi merupakan bagian dari energi yang mengalami perubahan wujud dan tidak mampu melakukan kerja. Dincer dan Cengel (2001) menyatakan bahwa penjelasan mengenai perbedaan nyata antara proses *reversible* (mampu balik) dan *irreversible* (ketidakmampuan balik) dikenalkan pertama kali melalui konsep entropi, dan hukum kedua termodinamika menyatakan bahwa setiap proses nyata berlangsung secara *irreversible*. Ketika sebuah sistem terisolasi, peningkatan energi akan nol, sehingga entropi akan naik dikarenakan proses *irreversible* dan kemungkinan akan mencapai nilai maksimumnya dan terjadi kesetimbangan termodinamika.

Dincer dan Cengel (2001) menjelaskan bahwa analisis eksergi berdasarkan hukum termodinamika pertama dan kedua. Tujuan utama analisis eksergi adalah untuk mengidentifikasi penyebab dan menghitung secara tepat kehilangan atau kemusnahan eksergi. Namun, terkadang masih ada yang



salah menafsirkan antara keduanya, oleh karena itu diperlukan perbandingan untuk menjelaskan perbedaan diantara keduanya.

Berdasarkan permasalahan dilakukan penelitian untuk analisis eksergi pada proses pengeringan gabah.

BAHAN DAN METODE

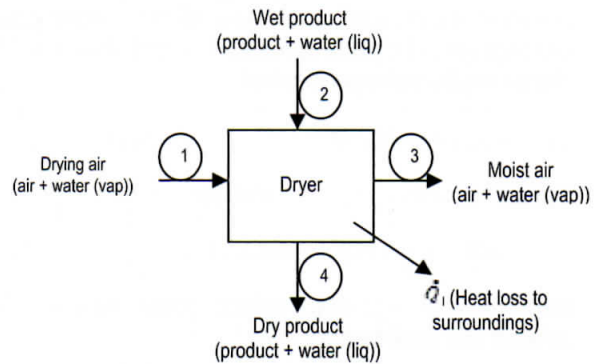
Bahan

Bahan analisis adalah data dari proses pengeringan gabah yang dilakukan menggunakan pengering tipe bak datar berbahan bakar sekam. Gabah dikeringkan sebanyak 3000 kg pada kondisi suhu udara lingkungan rata-rata 28,9°C, kelembaban (RH) udara lingkungan rata-rata 68,1%, laju pengeringan 1,42% per jam, dikeringkan dari kadar air awal sebesar 22,2% menjadi 13,6%, dan laju aliran massa udara pengering sebesar 6.880,72 kg/jam (Harmanto *et al.*, 2006). Data suhu dan RH selama proses pengeringan dapat dilihat pada Tabel 2.

Metode

Metode analisis adalah dengan pendekatan teoritis seperti pada skema dari sistem pengeringan diilustrasikan dengan input dan output pada Gambar 1, di mana terdapat empat interaksi utama (Dincer dan Rosen, 2007):

1. Input udara pengeringan ke ruang pengeringan untuk mengeringkan produk.
2. Input produk lembab untuk dikeringkan dalam ruangan pengering.
3. Output udara lembab setelah kandungan air menguap dari produk.
4. Output produk kering, dengan kadar air berkurang ke tingkat yang diinginkan.



Gambar 1. Skema proses pengeringan

Persamaan Kesetimbangan Eksergi (Dincer dan Rosen, 2007)

Kesetimbangan eksergi untuk keseluruhan sistem dapat dituliskan sebagai berikut:

$$m_a ex_1 + m_p(ex_p)_2 + (m_w)_2(ex_w)_2 \\ = m_a ex_3 + m_p(ex_p)_4 + (m_w)_4(ex_w)_4 \\ + Ex_q + Ex_d \quad \dots\dots\dots (1)$$

Eksergi spesifik untuk udara terdiri dari eksergi termal, mekanik, dan kimia, dapat ditulis sebagai berikut:

$$ex = [(C_p)_a + \omega (C_p)_w](T - T_0 - T_0 \ln(T/T_0)) + \\ (1 + 1.608\omega) R_a T_0 \ln(P/P_0) + R_a T_0 \\ \{ (1 + 1.608\omega) \ln[(1 + 1.608\omega_0)/ \\ (1 + 1.608\omega)] + 1.608\omega \ln(\omega/\omega_0) \} \quad \dots\dots\dots (2)$$

Tabel 2. Data Suhu dan RH Pengeringan Gabah

No	Waktu	Lingkungan		Suhu Inlet (Plenum) (°C)	Suhu Ruang Pengering (°C)	Suhu Outlet (°C)
		Suhu (°C)	RH (%)			
1	14:30	32,0	61	47	34	33,0
2	15:30	31,0	65	43	34	33,0
3	16:30	28,0	69	44	39	36,9
4	17:30	28,0	69	44	40	39,0
5	18:30	27,8	71	45	41	39,0
6	19:30	27,6	71	45	40	39,0
7	20:30	27,6	71	45	40	39,2
Rata-rata		28,9	68,1	49,0	44,7	37,0

Sumber: Harmanto *et al.* (2006)

Pada sistem pengeringan ini, perbedaan tekanan dianggap tidak ada ($P=P_0$) sehingga eksergi spesifik pada kondisi 1 (Lihat Gambar 1) dapat ditulis sebagai berikut:

$$ex_1 = [(C_p)_a + \omega_1(C_p)_v](T_1 - T_0 - T_0 \ln(T_1/T_0) + R_a T_0 \{(1 + 1.608\omega_1)/\ln[(1 + 1.608\omega_0)/(1 + 1.608\omega_1)] + 1.608\omega_1 \ln(\omega_1/\omega_0)\} \dots (3)$$

dan eksergi spesifik udara pada kondisi 3 adalah sebagai berikut:

$$ex_3 = [(C_p)_a + \omega_3(C_p)_v](T_3 - T_0 - T_0 \ln(T_3/T_0) + R_a T_0 \{(1 + 1.608\omega_3)/\ln[(1 + 1.608\omega_0)/(1 + 1.608\omega_3)] + 1.608\omega_3 \ln(\omega_3/\omega_0)\} \dots (4)$$

Eksergi spesifik untuk kandungan air dapat ditulis sebagai berikut:

$$ex_w = [h_f(T) - h_g(T_0)] + v_f [P - P_g(T)] - T_0 [s_f(T) - s_g(T_0)] - T_0 R_v \ln \Phi_0 \dots (5)$$

Konservasi massa pada udara pengeringan:

$$m_{a1} = m_{a3} \dots (6)$$

Konservasi massa pada uap air:

$$m_{a1}\omega_1 + m_w = m_{a3}\omega_3 \dots (7)$$

Laju aliran eksergi karena kehilangan panas dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\dot{E}_{x_q} = \dot{m}_a ex_{q1} \dots (8)$$

Keseimbangan eksergi dapat ditulis sebagai berikut:

$$\sum_{in} Ex = Ex_d + \sum_{out} Ex \dots (9)$$

sehingga eksergi destruksi:

$$Ex_d = Ex_1 + Ex_w - Ex_3 \dots (10)$$

Efisiensi eksergi berdasarkan hukum termodinamika ke dua:

$$\psi = \frac{Ex_3}{Ex_1 + Ex_w}$$

$$\psi = \frac{Ex_3}{Ex_1 + Ex_w} \dots (11)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis eksergi pada pengeringan didasarkan pada data yang diperoleh dari penelitian Harmanto *et al.* (2006) dengan kondisi lingkungan dan udara pengeringan yang berubah-ubah menurut waktu (Tabel 2).

Parameter yang digunakan untuk melakukan analisis dicari menggunakan *Psychrometric Chart* dan Tabel Uap, dapat dilihat pada Tabel 3. Dari hasil penelitian Harmanto *et al.* (2006) diketahui bahwa rata-rata laju aliran massa udara pengeringan adalah sebesar 6.880,72 kg/jam atau 1.9113 kg/s. Laju aliran massa udara tersebut diasumsikan tetap selama proses pengeringan. Berdasarkan persamaan (6) dan (7) didapatkan laju aliran massa uap air selama proses pengeringan seperti terlihat pada Tabel 4.

Hasil analisis eksergi pengeringan gabah dapat dilihat pada Tabel 5. Hasil analisis tersebut menunjukkan bahwa besaran eksergi, baik eksergi yang masuk ke dalam sistem pengering, eksergi di dalam sistem pengering, maupun eksergi yang ke luar dari sistem pengering berubah-ubah menurut kondisi suhu dan RH pada saat proses pengeringan berlangsung. Rata-rata eksergi spesifik yang masuk ke sistem pengering adalah sebesar 0,4218 kJ/kg dihitung menggunakan persamaan (3), rata-rata eksergi spesifik di dalam sistem pengering adalah sebesar 53,1375 kJ/kg dihitung menggunakan persamaan (5), dan rata-rata eksergi spesifik yang keluar dari sistem pengering adalah sebesar 0,1826 kJ/kg dihitung menggunakan persamaan (4). Selisih antara eksergi yang masuk dengan eksergi keluar merupakan besaran *exergy loss*. Rata-rata *exergy loss* adalah sebesar 0,2392 kJ/kg. *Exergy loss* disebut juga *exergy consumed* (Shukuya dan Hammache, 2002).

Laju aliran eksergi (*exergy flow rate*) rata-rata yang masuk ke sistem pengering adalah sebesar 0,8062 kW, rata-rata *exergy flow rate* di dalam sistem pengering adalah sebesar 0,3295 kW, dan rata-rata *exergy flow rate* yang keluar dari sistem pengering adalah sebesar 0,3490 kW. Dengan menggunakan persamaan (10) didapatkan rata-rata eksergi destruksi sebesar 0,7867 kW (Tabel 5). Eksergi destruksi merupakan potensi kerja yang terbuang selama proses berlangsung sebagai hasil dari irreversibilitas (Çengel dan Boles, 2007).



Tabel 3. Parameter untuk menghitung eksergi pengeringan gabah dihitung dengan menggunakan *Psychometric chart* dan Tabel Uap.

waktu	Lingkungan					Input			Output			Ruang Pengeri		
	T_0 (K)	ϕ_0	ω_0	h_g (kJ/kg)	s_g (kJ/kg.K)	T_1 (K)	ϕ_1	ω_1	T_3 (K)	ϕ_3	ω_3	T_w (K)	h_f (kJ/kg)	s_f (kJ/kg.K)
14:30	305	0.61	0.0182	2560	8.4140	320	0.27	0.0182	306	0.74	0.0238	307	142.38	0.4913
15:30	304	0.65	0.0185	2558.2	8.4343	316	0.34	0.0185	306	0.7	0.0225	307	142.38	0.4913
16:30	301	0.69	0.0164	2552.7	8.4959	317	0.28	0.0164	309.9	0.49	0.0193	312	163.27	0.5587
17:30	301	0.69	0.0164	2552.7	8.4959	317	0.28	0.0164	312	0.42	0.0185	313	167.45	0.5721
18:30	300,8	0,71	0,0169	2552,34	8,5001	318	0,28	0,0169	312	0,44	0,0193	314	171,38	0,5854
19:30	300,6	0,71	0,0168	2551,98	8,5043	318	0,275	0,0168	312	0,43	0,0192	313	167,45	0,5721
20:30	300,6	0,71	0,0168	2551,98	8,5043	318	0,275	0,0168	312,2	0,42	0,019	313	167,45	0,5721

Tabel 4. Laju Aliran Massa

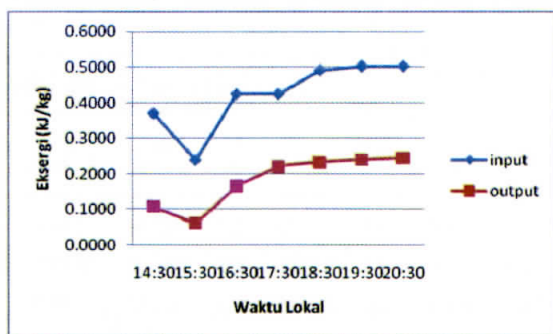
waktu	$\dot{m}_w$ (kg/s)	$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a3}$ (kg/s)
14:30	0,0107	1,9113
15:30	0,0076	1,9113
16:30	0,0055	1,9113
17:30	0,0040	1,9113
18:30	0,0046	1,9113
19:30	0,0046	1,9113
20:30	0,0042	1,9113

Tabel 5. Hasil analisis eksergi

waktu	Analisis Eksergi								
	ex_1 (kJ/kg)	ex_3 (kJ/kg)	ex_w (kJ/kg)	ex_{loss} (kJ/kg)	$\dot{E}x_1$ (kW)	$\dot{E}x_3$ (kW)	$\dot{E}x_w$ (kW)	$\dot{E}x_d$ (kW)	ψ
14:30	0,3704	0,1087	68,3040	0,2617	0,7080	0,2078	0,7311	1,2313	0,1444
15:30	0,2395	0,0618	59,2236	0,1777	0,4577	0,1181	0,4528	0,7923	0,1298
16:30	0,4246	0,1669	51,1564	0,2577	0,8115	0,3189	0,2835	0,7762	0,2912
17:30	0,4246	0,2211	51,3030	0,2035	0,8115	0,4225	0,2059	0,5949	0,4153
18:30	0,4902	0,2334	47,2745	0,2568	0,9369	0,4461	0,2169	0,7076	0,3867
19:30	0,5017	0,2412	47,3505	0,2605	0,9589	0,4609	0,2172	0,7151	0,3919
20:30	0,5017	0,2453	47,3505	0,2564	0,9589	0,4688	0,1991	0,6892	0,4049
Rata-rata	0,4218	0,1826	53,1375	0,2392	0,8062	0,3490	0,3295	0,7867	0,3092

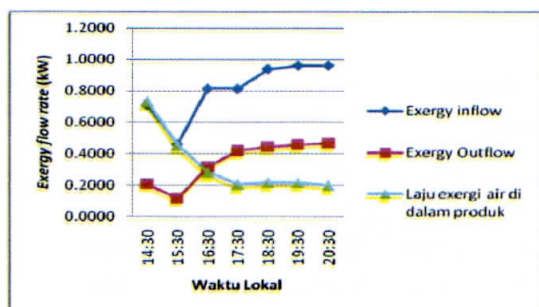
Dari Gambar 2 dapat dilihat bahwa eksergi spesifik yang masuk dan keluar dari sistem pengering cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya waktu proses pengeringan, meskipun pada awal proses sempat menurun. Hal ini disebabkan karena

pada awal proses pengeringan, pembakaran tungku belum stabil. Eksergi spesifik yang cenderung meningkat disebabkan karena terdapat akumulasi panas di ruang plenum yang disuplai oleh tungku secara kontinyu sejak awal proses pengeringan.

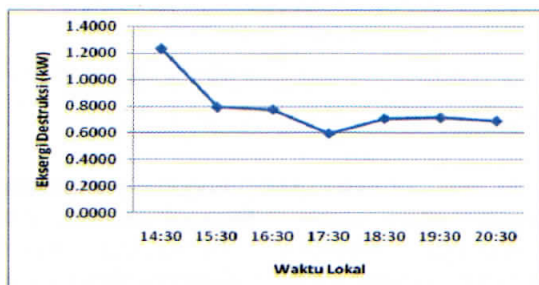


Gambar 2. Grafik eksergi spesifik pada proses pengeringan gabah

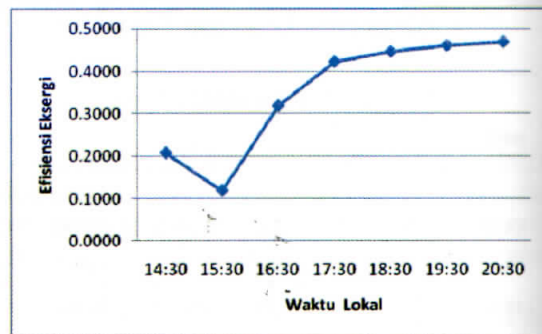
Seperti halnya eksergi spesifik, laju aliran eksergi saat masuk dan keluar dari sistem pengering cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya waktu proses pengeringan. Sedangkan laju aliran eksergi untuk air di dalam produk (gabah) mengalami penurunan, karena kandungan air dalam gabah yang semakin berkurang dan ikatan molekul air di dalam gabah yang semakin kuat seiring dengan bertambahnya waktu proses pengeringan (Gambar 3). Dari Gambar 4 dapat dilihat bahwa eksergi destruksi cenderung menurun seiring dengan bertambahnya waktu proses pengeringan.



Gambar 3. Grafik laju aliran eksergi



Gambar 4. Grafik eksergi destruksi



Gambar 5. Grafik efisiensi pengeringan gabah

Gambar 5 menunjukkan bahwa efisiensi eksergi pada proses pengeringan gabah cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya waktu proses pengeringan. Hal ini karena selama proses pengeringan, energi yang tersedia dalam ruang pengering meningkat seiring dengan bertambahnya waktu pengeringan, sebaliknya kadar air gabah menurun seiring dengan waktu. Rata-rata efisiensi eksergi adalah sebesar 30,92% (Tabel 5). Efisiensi ini dapat ditingkatkan, salah satunya dengan cara melakukan re-sirkulasi udara keluar dari pengering karena RH nya masih cukup rendah.

KESIMPULAN

Exergy inflow dan *outflow* cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya waktu proses pengeringan, sedangkan *exergy flow rate* untuk air dalam gabah cenderung menurun karena ikatan molekul air dalam gabah yang semakin kuat. Eksergi destruksi pun mengalami penurunan sejak awal pengeringan, sedangkan efisiensi eksergi cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya waktu proses pengeringan, dengan rata-rata efisiensi eksergi sebesar 30,92%. Efisiensi eksergi ini dapat ditingkatkan dengan cara melakukan re-sirkulasi udara keluar dari pengering karena RH masih cukup rendah.

DAFTAR PUSTAKA

- Bejan A, G. Tsatsaronis, and M Moran. 1996. *Thermal Design and Optimization*. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA. Hal. 113-159.



- Cengel, YA, and M.A. Boles. 2007. *Thermodynamics: An Engineering Approach Sixth Edition (SI Units)*. New York: McGraw-Hill.
- Dincer I, and YA. Cengel. 2001. *Energy, Entropy, and Exergy Concepts and Their Roles in Thermal Engineering*. Entropy 3:116-149.
- Dincer I, and MA. Rosen. 2007. *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development*. Elsevier.
- Esmay M, Soemangat, Eriyanto, Phillips A. 1979. *Rice Postproduction Technology in The Tropics*. East-West Food Institute. The University Press of Hawaii. Honolulu, Hawaii.
- Harmanto, N. Ana, T.W. Widodo, dan Joko Wiyono. 2006. *Modifikasi Tungku Sekam untuk Mesin Pengering Terintegrasi dengan Penggilingan Padi*. Laporan Akhir. Balai Besar Pengembangan Mekanisasi Pertanian. Serpong.
- Manalu, LP, AH. Tambunan, LO. Nelwan, and AR. Hoetman. 2010. *Analisis Termodinamika Pengeringan Lapisan Tipis Simplisia Temu Putih*. Sekolah Pascasarjana IPB Bogor.
- Russell, LD, and GA. Adebisi. 1993. *Classical Thermodynamics*. Saunders College Publishing. Philadelphia. USA.
- Shukuya, M, and A. Hammache. 2002. *Introduction of the Concept of Exergy. In: Paper Presented in The Low Exergy System for Heating and Cooling of Buildings*. IEA ANNEX37. Finland. pp. 1-41.
- Sugiyono, A. 2000. *Studi Pendahuluan untuk Analisis Energi-Exergi Kota Jakarta*. Laporan Teknis. Direktorat Teknologi Konversi dan Konservasi Energi. Deputi Bidang Teknologi Informasi, Energi, Material dan Lingkungan. BPPT. Jakarta.