

ANALISIS EKSERGI PENYIMPANAN PANAS UNTUK SISTEM PENGERING BERENERGI SURYA

Exergy Analysis on the Sensible Heat Storage for Solar Drying System

Armansyah H. Tambunan¹, Kamaruddin Abdullah², Binsar Nababan³

ABSTRACT

This paper is devoted to discuss the exergy analysis on the utilization of heat storage for a solar drying system. The heat was stored in the form of sensible heat using pebble bed as the medium. For the analysis, an exergy balance model was developed from the system's heat balance.

The results show that the minimum value of exergy destruction ratio was obtained within two hours after the process was started. The minimum ratio expresses the most effective operation of the storage system. Upon performing the simulation study, it was found that the number of transfer unit (NTU) influen the change in exergy destruction ratio, with an optimal value could be in the range of 0,5 to 0,8. Within the NTU range, the ratio of exergy destruction was found to be 0,85. It means that only 15% of the exergy gained from the solar collector can be transferred to the heat storage medium. The other part of the exergy could be transferred to the drying room or destructed during the process. In order to obtain a more comprehensive understanding on the exergy flow of the system, there necessary an exergy analysis on the drying system.

Keywords: *sensible heat storage, exergy destruction ratio, number of transfer unit, pebble bed*

Diterima: 24 Agustus 2006; Disetujui: 14 Nopember 2006

PENDAHULUAN

Kecenderungan peningkatan harga minyak dunia diperkirakan akan menjadi awal dari terjadinya krisis energi pada milenium ini. Di samping itu, kesadaran masyarakat dunia yang semakin tinggi terhadap terjadinya pencemaran lingkungan dan pemanasan global juga akan mendorong pengurangan penggunaan bahan bakar minyak (BBM) di masa yang akan datang. Hal ini sudah dimulai dengan ditandatanganinya

berbagai kesepakatan dunia, seperti Protokol Kyoto yang membatasi emisi gas-gas rumah kaca termasuk sebagai akibat penggunaan energi fosil seperti BBM, dan WSSD Yohannesburg yang mensyaratkan pembangunan berkelanjutan. Keadaan tersebut menyebabkan seluruh dunia mulai melirik ke penggunaan energi terbarukan sebagai pengganti energi fosil. Oleh sebab itu, era milenium ke tiga ini diperkirakan akan menjadi era energi terbarukan (Kamaruddin, 2005). Energi

^{1,2} Bagian Energi and Elektrifikasi Pertanian, Departemen Teknik Pertanian, Institut Pertanian Bogor

³ Mahasiswa Pascasarjana, IPB Bogor

surya, baik surya termal maupun surya listrik merupakan salah satu sumber energi terbarukan.

Penerapan energi surya memang sangat dipengaruhi lokasi maupun iklim setempat dimana energi tersebut dimanfaatkan. Di samping itu, intensitas energi surya (daya per satuan luas) yang relatif kecil menjadi kendala pemanfaatannya, khususnya pada pemanfaatan energi surya termal. Untuk itu, diperlukan berbagai strategi yang baik untuk mengoptimalkan penggunaannya. Salah satu di antaranya adalah dengan menerapkan sistem penyimpanan panas, baik panas sensibel maupun panas laten, pada sistem pemanfaatan energi surya termal. Sistem peredam energi ini dapat berfungsi sebagai peredam fluktuasi intensitas radiasi maupun untuk memperpanjang waktu penggunaan melebihi lama penyinaran surya.

Meskipun demikian, keraguan terhadap efektivitas penggunaan penyimpan panas pada sistem penerapan energi surya termal masih sering muncul. Untuk itu, diperlukan suatu analisis yang lebih baik untuk mendapatkan cara penerapan optimal sistem penyimpanan panas tersebut. Tulisan ini membahas kajian pemanfaatan sistem penyimpan panas yang diterapkan pada sistem pengering berenergi surya. Metoda analisis yang digunakan adalah analisis eksergi.

PENDEKATAN TEORITIS

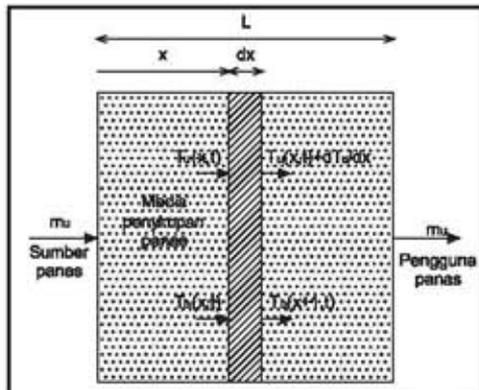
Energi surya dapat disimpan dalam bentuk energi panas, energi kimia, energi mekanis, dan lain-lain. Pemilihan media penyimpan dipengaruhi oleh keadaan alamiah proses yang akan dilakukan (Duffie and Beckman, 1980). Jika proses yang dilakukan adalah proses termal, maka penyimpanan dalam bentuk panas adalah yang paling efektif. Penyimpanan panas dapat dilakukan dalam bentuk

panas terasa (sensible) maupun panas laten.

Penyimpanan panas dapat dianggap sebagai penyimpanan eksergi, baik dalam bentuk panas sensible (akibat perubahan suhu) maupun dalam bentuk panas laten (akibat perubahan fase). Model analisis eksergi pada penyimpanan panas sensible dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 1. Meskipun dikembangkan untuk sistem penyimpanan panas sensibel, model ini dapat dengan mudah dimodifikasi dan diterapkan untuk penyimpanan panas laten atau kombinasi panas laten dan sensible. Model pada Gambar 1 menunjukkan sistem penyimpan panas yang terdiri atas ruang terisolasi yang berisi media penyimpanan panas. Panas dialirkan dari sumber panas dengan menggunakan koil dan dipindahkan untuk disimpan pada media penyimpan panas tersebut. Panas yang tidak terserap diambil kembali dari media peredam melalui perpindahan panas ke koil untuk dialirkan ke pengguna panas.

Berdasarkan model di atas, keseimbangan panas yang terjadi pada keseluruhan elemen sistem penyimpan panas adalah seperti berikut (Tambunan, 1986):

$$m_u c_u \frac{dT_u}{dx} = (1 - \epsilon) A_u \rho_b c_b \frac{dT_b}{dt} \quad [1]$$



Gambar 1. Model penyimpanan panas sensible menggunakan batu kerikil

Pertukaran panas yang terjadi antara batu kerikil sebagai media penyimpanan panas dengan udara adalah:

$$h_v A_u (T_u - T_b) = (1 - \varepsilon) A_u c_b \rho_b \frac{dT_b}{dt} \quad [2]$$

Pemecahan persamaan [1] dan [2] menghasilkan:

$$\frac{dT_u}{d(x/L)} = NTU(T_b - T_u) \quad [3]$$

dan

$$\frac{dT_b}{d\theta} = NTU(T_u - T_b) \quad [4]$$

dimana

$$NTU = \frac{h_v A_u L}{m_u c_u} \quad [5]$$

dan

$$\theta = \frac{m c_u}{\rho_b c_b (1 - \varepsilon) A_u L} t \quad [6]$$

Integrasi persamaan [3] sepanjang aliran udara yang melalui media penyimpanan panas ($x/L=0$ hingga $x/L=1$) akan menghasilkan persamaan yang menunjukkan rasio perbedaan suhu, yaitu:

$$\frac{T_{u,out} - T_b}{T_{u,in} - T_b} = \exp(-NTU) \quad [7]$$

$T_{u,out}$ dan T_b bersama-sama merupakan fungsi waktu (t), maka integrasi persamaan [4] dapat dimasukkan ke dalam persamaan [7] untuk menghasilkan:

$$\frac{T_b - T_{c,in}}{T_{b,0} - T_{c,in}} = \exp(-\theta y) \quad [8]$$

dimana $y = 1 - \exp(-NTU)$

Persamaan [7] dan [8] secara bersama-sama dapat digunakan untuk menduga perubahan suhu udara dan suhu batu kerikil pada setiap waktu.

Persamaan keseimbangan entropi dapat disusun dari persamaan keseimbangan panas yang terjadi pada sistem sebagai berikut:

$$m_u c_u \frac{dT_u}{dx} \frac{1}{T_u} = (1 - \varepsilon) A_u \rho_b c_b \frac{dT_b}{dt} \frac{1}{T_b} + \Delta S_{gen} \quad [9]$$

Selanjutnya, persamaan keseimbangan eksergi dapat disusun dengan mengurangi persamaan keseimbangan energi terhadap perkalian antara suhu lingkungan dengan persamaan keseimbangan entropi, sebagai berikut:

$$m_u c_u \frac{dT_u}{dx} \left(1 - \frac{T_o}{T_u} \right) = (1 - \varepsilon) A_u \rho_b c_b \frac{dT_b}{dt} \left(1 - \frac{T_o}{T_b} \right) + T_o \Delta S_{gen} \quad [10]$$

Bagian kiri pada persamaan [10] adalah perubahan asupan eksergi ke dalam sistem, sedangkan kelompok pertama bagian kanan adalah perubahan transfer eksergi dan kelompok kedua adalah kehilangan eksergi. Dengan demikian, integrasi bagian kiri persamaan [10] di sepanjang pipa penukar panas pada sistem tersebut, dengan asumsi bahwa suhu keluar dapat mencapai suhu lingkungan (T_o), menghasilkan:

$$E_{in} = m_u c_u \left[(T_{u,in} - T_o) - T_o \ln \frac{T_{u,in}}{T_o} \right] \quad [11]$$

Rasio kehilangan eksergi terhadap asupan eksergi dapat diketahui dengan membagikan persamaan [10] terhadap persamaan [11],

$$\frac{m_u c_u \frac{dT_u}{dx} \left(1 - \frac{T_o}{T_u} \right)}{m_u c_u \frac{dT_u}{dx} \left(1 - \frac{T_o}{T_u} \right)} = \frac{(1 - \varepsilon) A_u \rho_b c_b \frac{dT_b}{dt} \left(1 - \frac{T_o}{T_b} \right) + T_o \Delta S_{gen}}{m_u c_u \frac{dT_u}{dx} \left(1 - \frac{T_o}{T_u} \right)}$$

sehingga:

$$n_{ex} = \frac{T_o \Delta S}{m_u c_u \frac{dT_u}{dx} \left(1 - \frac{T_o}{T_u} \right)} = 1 - \frac{(1 - \varepsilon) A_u \rho_b c_b \frac{dT_b}{dt} \left(1 - \frac{T_o}{T_b} \right)}{m_u c_u \frac{dT_u}{dx} \left(1 - \frac{T_o}{T_u} \right)} \quad [12]$$

atau,

$$N_{ex} = 1 - \frac{\left((T_b(t) - T_b(t-1)) - T_o \ln \frac{T_b(t)}{T_b(t-1)} \right)}{\theta \left[(T_{u,out} - T_{u,in}) - T_o \ln \frac{T_{u,out}}{T_{u,in}} \right]} \quad [13]$$

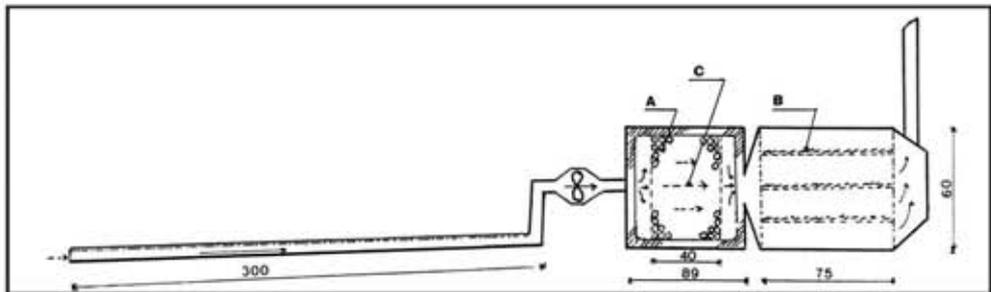
PROSEDUR PERCOBAAN

Percobaan dilakukan pada system pengering berenergi surya dengan bantuan media penyimpan panas sensible (Gambar 2). Media penyimpan panas yang digunakan adalah tumpukan batu kerikil (*pebble bed*) bediameter rata-rata $4,4 \pm 0,3$ cm yang ditumpuk pada suatu kotak berisolasi. Densitas tumpukan adalah 2717 kg/m^3 sedangkan porositas tumpukan kerikil adalah 0.45 (Tambunan, 1986).

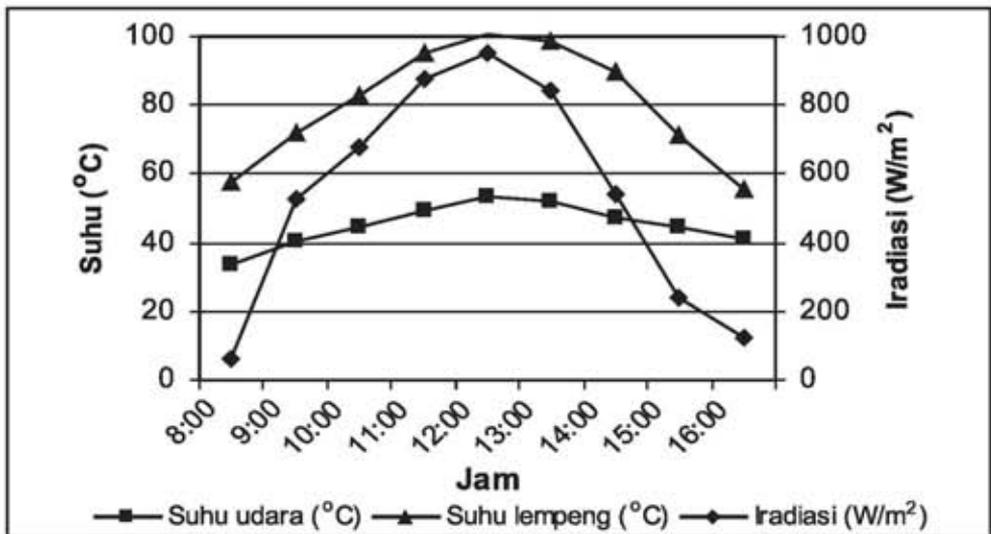
Udara dipanaskan oleh kolektor datar dan dialirkan ke penyimpan panas dengan menggunakan kipas. Sejumlah panas dari udara yang melewati

tumpukan batu kerikil dipindahkan ke kerikil dan sisanya mengalir ke lemari pengering untuk mengeringkan *chip* ketela pohon. Saat iradiasi surya yang diterima oleh kolektor datar tidak memadai, maka udara akan mengambil kembali panas dari tumpukan kerikil dan dibawa ke lemari pengering.

Kinerja mesin diuji dengan mengukur suhu lempeng kolektor, udara masuk dan keluar kolektor, udara pengering, dan suhu tumpukan kerikil di tiga posisi searah gerak aliran udara. Analisis eksergi dilakukan dengan model keseimbangan eksergi seperti dijelaskan pada pendekatan teoritis.



Gambar 2. Skema mesin pengering berenergi surya dengan penyimpanan panas sensibel (A: kerikil; B: bahan yang dikeringkan; C: aliran udara)



Gambar 3. Sebaran iradiasi surya dan suhu pengumpul panas (lempeng dan udara) hasil pengukuran

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Kinerja Penyimpan Panas

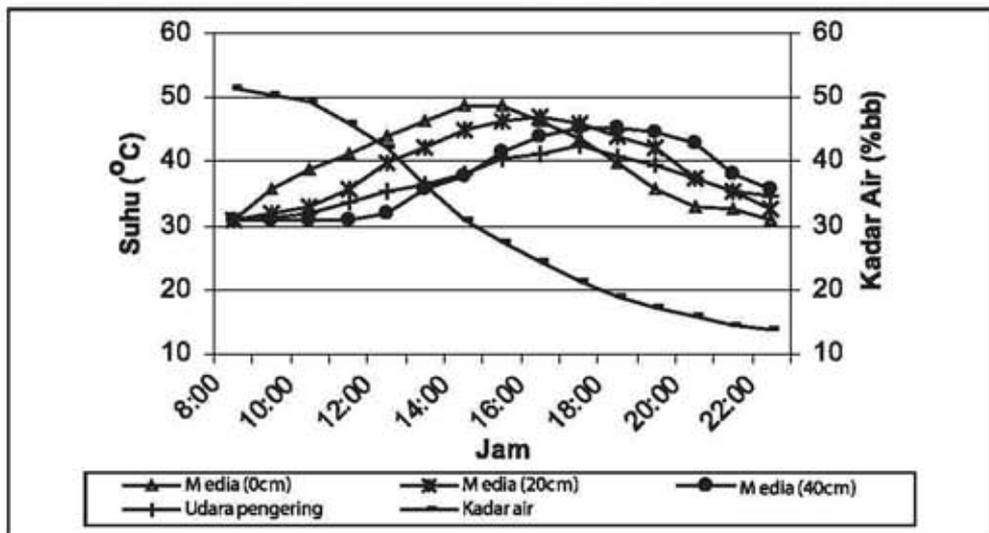
Hasil pengukuran iradiasi surya, suhu lempeng kolektor, dan suhu udara keluar dari kolektor selama pengukuran (jam 08:00-16:00) ditunjukkan pada Gambar 3. Kondisi cuaca yang cerah (Tambunan, 1986) menyebabkan hasil pengukuran iradiasi surya dan suhu mengikuti pola sinusoidal. Iradiasi puncak terjadi pada jam 12:00 dengan nilai 949.6 W/m², sedangkan iradiasi terendah terjadi pada jam 16:00 dengan nilai 120,8 W/m². Konversi iradiasi surya oleh lempeng kolektor menghasilkan suhu lempeng pada kisaran 55,6 °C – 100,4 °C dan suhu udara keluar dari kolektor pada kisaran 33,8 °C – 53,3 °C.

Hasil pengukuran suhu media penyimpan panas (tumpukan batu kerikil), suhu udara pengering, dan kadar air *chip* singkong yang dikeringkan dapat dilihat pada Gambar 4. Suhu udara pengering berkisar pada 30,8 °C – 42,5 °C, sedangkan kadar air akhir mencapai 13,6 %(bb) dari kadar air awal 51,5 %(bb).

Efek penyimpanan panas terhadap proses pengeringan dapat dilihat dari

perpanjangan waktu pengeringan, yaitu selama 4 jam, dari waktu penyinaran surya efektif. Sebagaimana disebutkan di atas, iradiasi surya pada jam 16:00 adalah 120,8 W/m² dan dianggap tidak memadai untuk proses pengeringan. Meskipun demikian suhu udara pengering yang diperoleh di ruang pengering pada jam tersebut masih mencapai 44,0 °C, dan bahkan masih mengalami peningkatan ke 45,2 °C hingga jam 18:00. Pada jam 20:00, suhu udara pengering masih mencapai 34,8 °C, sehingga masih dianggap layak untuk proses pengeringan.

Efek lain yang dapat dilihat dari penggunaan system penyimpan panas pada pengeringan ini adalah adanya kelambatan peningkatan suhu udara pengering di awal proses (pagi hari). Suhu udara pengering hanya meningkat dari 30,8 °C pada jam 08:00 ke 31,8 °C pada jam 10:00, meskipun suhu udara yang keluar dari kolektor suhu mencapai 44,3 °C pada jam tersebut. Dari data ini dapat dilihat bahwa pada awal proses hampir seluruh panas yang dibawa oleh udara dari kolektor diserap oleh media penyimpan panas. Hal ini menyebabkan



Gambar 4. Sebaran suhu media penyimpan panas, suhu udara pengering dan kadar air selama pengukuran

pelambatan laju pengeringan di pagi hari, meskipun dapat dikompensasi dengan perpanjangan waktu pengeringan di malam hari. Untuk mendapatkan efektivitas penyimpanan panas yang lebih baik, maka diperlukan analisis eksergi sehingga proses pengendalian dapat dilakukan dengan optimal.

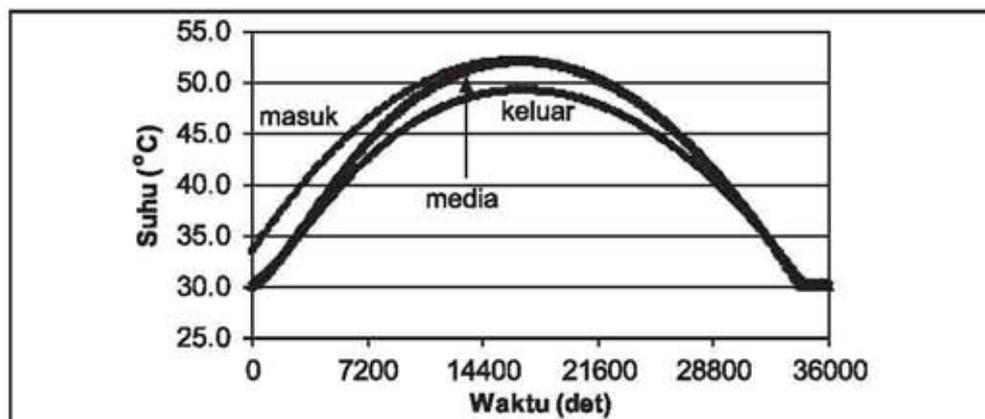
2. Analisa Eksergi Penyimpanan Panas

Hasil simulasi penyimpanan panas sensible pada tumpukan batuan dengan menggunakan model keseimbangan energi ditunjukkan pada Gambar 5. Suhu udara masuk ke sistem penyimpanan panas diperoleh dari regresi suhu udara hasil pengukuran. Suhu udara keluar dari penyimpan panas diperoleh dari persamaan 3, sedangkan suhu media diperoleh dari persamaan 4. Dari gambar tersebut terlihat bahwa suhu media akan mencapai suhu udara masuk setelah 4 jam penyimpanan. Sementara itu, baik suhu udara masuk, keluar (suhu udara pengering) maupun suhu media menjadi sama setelah 8 jam proses.

Efektivitas penyimpanan panas pada media penyimpan dapat dinyatakan dalam rasio kehilangan eksergi terhadap asupan eksergi ke dalam sistem penyimpan. Peningkatan rasio kehilangan eksergi (N_{eks}) menunjukkan terjadinya

penurunan efektivitas penyimpanan panas. Gambar 6 menunjukkan hasil simulasi perubahan rasio kehilangan eksergi selama waktu tak-berdimensi (θ) pada berbagai nilai *number of transfer unit* (NTU). Gambar tersebut menunjukkan pola penurunan rasio yang dilanjutkan dengan peningkatan setelah mencapai titik minimum tertentu. Titik minimum rasio menunjukkan saat terjadinya transfer eksergi maksimal dari udara pembawa panas ke media penyimpan panas. Rasio yang sama pada absis waktu sebenarnya diberikan pada Gambar 7, yang menunjukkan bahwa titik minimum rasio berada pada kisaran dua jam pertama proses penyimpanan. Selama waktu tersebut, hampir seluruh panas yang di bawa oleh udara dapat diserap oleh penyimpan panas sehingga suhu udara yang memasuki lemari pengering (udara pengering) tidak dapat meningkat dari suhu lingkungan.

Number of transfer unit (NTU) merupakan satuan yang menyatakan perbandingan antara kapasitas volumetric penyerapan panas oleh media penyimpan terhadap kapasitas panas udara yang melaluinya (persamaan 5). Pada simulasi di atas, perubahan NTU diperoleh dari perubahan laju aliran udara pembawa panas. Peningkatan laju aliran udara akan

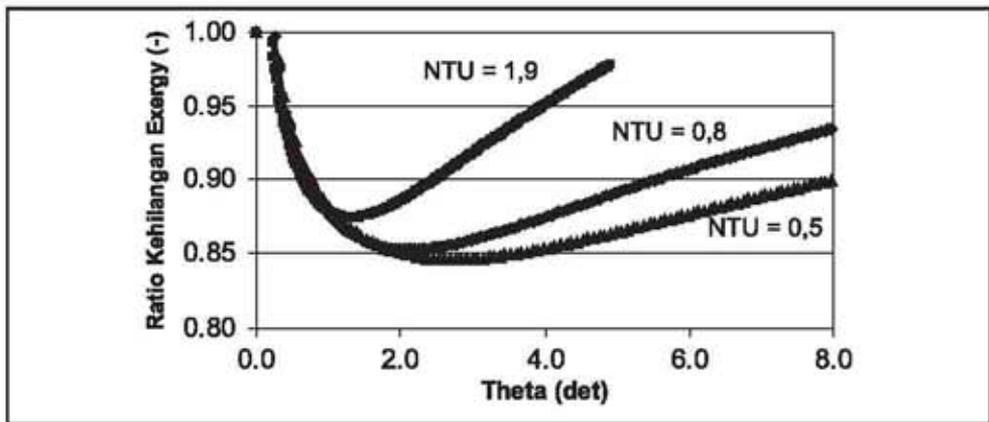


Gambar 5. Simulasi perubahan suhu udara masuk, keluar dan suhu media penyimpan panas selama proses penyimpanan

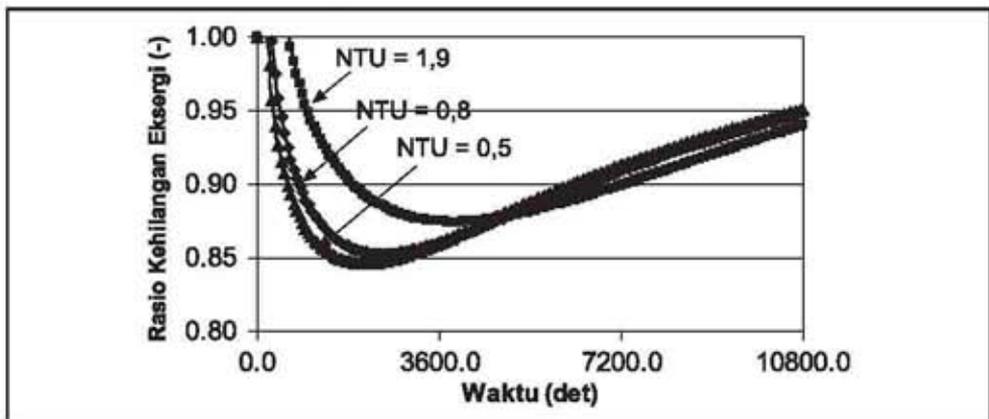
menyebabkan peningkatan kapasitas panas udara dan menurunkan NTU. Dari Gambar 5 terlihat bahwa nilai minimum rasio kehilangan eksergi untuk NTU lebih tinggi berlangsung pada waktu termodifikasi yang lebih singkat dari pada NTU lebih rendah. Selanjutnya, rasio kehilangan eksergi untuk NTU lebih tinggi kembali ke nilai satu dengan laju lebih cepat dibandingkan NTU lebih rendah. Fenomena sebaliknya berlaku jika menggunakan dimensi waktu sebenarnya, yang dapat dipahami karena waktu termodifikasi merupakan perkalian waktu dengan rasio kapasitas panas udara terhadap kapasitas panas media

penyimpan.

Hal tersebut menunjukkan bahwa perancangan sistem penyimpan panas sangat tergantung pada nilai NTU dan rasio kapasitas panas udara terhadap kapasitas panas media penyimpan. Kecenderungan gambar di atas menunjukkan bahwa NTU optimal berada pada kisaran 0,5 hingga 0,8 untuk rancangan sistem penukar panas yang digunakan. Pada kondisi tersebut, rasio kehilangan eksergi yang terjadi adalah 0,85, yang menunjukkan bahwa hanya 15 persen eksergi masuk yang dapat disimpan pada sistem tersebut. Sisa eksergi tersebut dapat ditransfer ke lemari



Gambar 6. Simulasi perubahan rasio kehilangan eksergi terhadap waktu termodifikasi pada berbagai nilai *number of transfer unit* (NTU)



Gambar 7. Simulasi perubahan rasio kehilangan eksergi terhadap waktu sebenarnya pada berbagai nilai *number of transfer unit* (NTU)

pengering atau hilang ke lingkungan. Untuk melihat efisiensi sistem secara keseluruhan perlu dilakukan analisis eksergi pada sistem pengering.

KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil yang diperoleh dari kajian ini adalah sebagai berikut:

1. Titik minimum rasio kehilangan eksergi berada pada kisaran dua jam pertama proses penyimpanan
2. Simulasi menunjukkan bahwa NTU optimal berada pada kisaran 0,5 hingga 0,8 untuk rancangan sistem penukar panas yang digunakan. Pada kondisi tersebut, rasio kehilangan eksergi yang terjadi adalah 0,85, sehingga hanya 15 persen eksergi masuk yang dapat disimpan pada sistem tersebut.
3. Untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai kehilangan eksergi yang terjadi pada sistem, perlu dilakukan analisis eksergi pada sistem pengering

Notasi:

- A_u : luas perpindahan panas antara udara dan permukaan kerikil (m^2)
 c : kapasitas panas jenis ($kJ/kg.K$)
 h_v : koefisien perpindahan panas volumetrik ($kW/m^3.K$)
 L : panjang media penyimpan pada arah aliran udara (m)
 m : laju aliran massa udara (kg/s)
 N : rasio kehilangan eksergi keseluruhan (-)
 q : laju perpindahan panas (kW)
 s : entropi (kJ/kg)
 T : suhu ($^{\circ}C$)
 ϵ : massa jenis (kg/m^3)
: porositas (-)

Subskrip:

- u : udara
b : batu
o : lingkungan

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada DIKTI melalui Hibah Pascasarjana No. 077/D3/N/2005 atas bantuan biaya penelitian yang diberikan

PUSTAKA

- Hollands, K.G.T., 1981, Rock Bed Thermal Storage, in Solar Energy Conversion II, A.F. Janzen and R.K. Swartman (ed.), Pergamon Press, Canada
Kamaruddin, A., 2005, Pengembangan Energi Terbarukan di Indonesia, Jurnal Teknik Pertanian, Vol. 19(2).
Jesch.L.H & Greeves.T.M., 1981, Solar Energi Storage in Forced Stratification Tangks, International Conference on Energi Storage Brighton.UK, BHRA Fluid Engineering.
Samudra, W., 1982, Rancangan dan Uji Teknis Alat Pengering Energi Surya dengan Gudang Penyimpan Panas, Skripsi, Fakultas Teknologi Pertanian, IPB, Bogor
Seki, N., S. Fukusako, and H. Inaba, 1978, Transient Characteristic of Vertical Porous Heat Storage, in Solar Energy-International Progress, T.N. Vezirogen (ed), Pergamon Press, NY, USA
Sukhame, S.P., 1984. Solar Energy Principle of Thermal Collection and Storage, Indiana Institute of Technology, Bombay, Tata Mc Graw-Hill Publishing Company
Tambunan, A.H., 1986, Pendugaan dan Pengujian Karakteristik Sistem Pengering Berenergi Surya dengan Gudang Penyimpan Panas, Skripsi, Fakultas Teknologi Pertanian IPB