

PENERAPAN ANALISIS EKSERGI DALAM BIDANG PERTANIAN

Armansyah H. Tambunan¹

ABSTRACT

The advantages of exergy analysis are: (1) it can be used in energy analysis generally with scientific validity, (2) using the equal scale for every form of energy and matters, and (3) possible for direct allocation. These advantages can be utilized in analyzing various agricultural activities, in its position as energy consumer as well as energy producer. This paper describes the general view of exergy analysis in agricultural activity with special concern in freezing process, and utilization of solar thermal storage to enhance the solar drying system of agricultural products.

Diterima: 7 Agustus 2007; Disetujui: 26 Agustus 2007

PENDAHULUAN

Keterkaitan pertanian dengan energi menjadi semakin erat, dimana pertanian harus berperan ganda sebagai pengguna sekaligus sebagai pemasok energi. Sebagai pengguna, pembangunan pertanian sangat tergantung pada ketersediaan energi, baik energi langsung yang diperlukan sejak pengolahan tanah hingga pengolahan hasilnya, maupun energi tidak langsung yang terkandung (*embedded*) dalam benih/bibit, pupuk, bahan kimiawi untuk pemeliharaan, dll. Intensitas penggunaan energi di bidang pertanian sangat tergantung pada tingkat modernisasi yang diterapkan dalam memacu produktivitas. Sementara sebagai penyedia, kecenderungan penggunaan bahan bakar biologik untuk menggantikan bahan bakar minyak (BBM) semakin meningkat, yang secara langsung sangat tergantung pada pembangunan pertanian.

Kecenderungan peningkatan harga minyak dunia yang terjadi belakangan ini

menunjukkan telah terjadinya "krisis energi", dan akan berdampak terhadap pembangunan pertanian, khususnya, bahkan pembangunan ekonomi pada umumnya. Sebagai jawaban terhadap hal tersebut, pemerintah mengeluarkan kebijakan energy nasional (KEN) melalui Peraturan Presiden No.5 Tahun 2006, serta Instruksi Presiden No.1 Tahun 2006 yang secara khusus mengatur tentang penggunaan bahan bakar biologik (menggunakan istilah bahan bakar nabati; BBN).

Istilah krisis energi, yang secara keliru digunakan akhir-akhir ini, sesungguhnya adalah "krisis eksergi", karena menurut Kaidah Termodinamika I energi bersifat kekal, sehingga tidak dapat diciptakan maupun dimusnahkan. Krisis eksergi merujuk pada penurunan daya-mampu energi, dan dapat terjadi karena eksergi adalah sesuatu yang tidak kekal dan dapat mengalami pengurangan setiap waktu (Moran, et al., 1988). Eksergi dapat dipahami melalui Kaidah Termodinamika II yang menjelaskan tentang arah

¹ Guru Besar pada Departemen Teknik Pertanian, Institut Pertanian Bogor

berlangsungnya proses secara spontan. Pemahaman yang baik tentang eksergi dapat memberi perspektif yang sangat berbeda mengenai ketersediaan dan konsumsi energi serta kenyataannya dalam perekonomian (Leites, 1995). Melalui pemahaman ini, konsep manajemen sisi penyediaan (*supply side management*) yang selama ini diterapkan dalam pengelolaan energi nasional seharusnya dapat beralih menjadi konsep manajemen sisi kebutuhan (*demand side management*). Konsep manajemen energi dari sisi kebutuhan lebih menekankan pada kegiatan konservasi dan diversifikasi penggunaan energi.

Demi keberlangsungan pembangunan pertanian itu sendiri serta untuk menjaga kelestarian lingkungan, maka diperlukan analisis yang tepat untuk menentukan kegiatan yang harus dilakukan, khususnya yang berkaitan dengan energi. Pada tulisan ini dipaparkan metoda analisis yang didasarkan pada kaidah termodinamika, yaitu analisis eksergi, dan bermanfaat untuk diterapkan dalam menganalisa kegiatan pertanian secara luas.

Pada awalnya, analisis eksergi banyak dimanfaatkan untuk melakukan perancangan, simulasi, dan evaluasi kinerja suatu sistem termokimia. Keunggulan analisis eksergi adalah bersifat umum tetapi valid secara ilmiah, menggunakan skala yang sama untuk setiap bentuk energi dan materi, dan memungkinkan alokasi secara langsung. Karena keunggulan tersebut, belakangan ini analisis eksergi mulai banyak digunakan, dan dirasa sangat bermanfaat, untuk mengkaji efisiensi penggunaan energi pada suatu sektor produksi, seperti pertanian, bahkan efisiensi penggunaan energi di dalam suatu wilayah tertentu, seperti kota atau negara. Akan tetapi, kelemahan analisis eksergi adalah tidak mudah dalam mengomunikasikan hasil analisis tersebut, dan tulisan ini juga diharapkan dapat bermanfaat sebagai

sarana sosialisasi terhadap metoda analisis eksergi khususnya di bidang pertanian.

PENGERTIAN UMUM ANALISIS EKSERGI

Berdasarkan kaidah termodinamika I, energi adalah bersifat kekal sehingga tidak dapat diciptakan maupun dimusnahkan. Penggunaan energi, dalam konteks kekekalan energi ini, adalah pengubahan (konversi) suatu bentuk energi ke bentuk lainnya. Dalam hal ini, setiap bentuk energi dapat dianggap setara, misalnya energi mekanik dianggap sama dengan energi termal. Oleh sebab itu, istilah krisis energi sesungguhnya tidak dapat diterima karena jumlah energi akan selalu tetap, meskipun bentuknya telah berubah dan kemampuannya untuk dikonversi menjadi bentuk energi lainnya telah berkurang. Analisis mengenai perubahan daya mampu energi disebut dengan analisis eksergi.

Eksergi juga dikenal dengan istilah *available energy* (energi yang sedia untuk dimanfaatkan), tetapi akhir-akhir ini lebih dikenal dengan istilah *exergy* yang merupakan singkatan dari *extractable energy*, dan diadopsi menjadi eksergi dalam bahasa Indonesia. Istilah ini merujuk pada kenyataan bahwa masing-masing bentuk energi mempunyai mutu yang berbeda, sehingga energi yang dapat dimanfaatkan pun berbeda dari satu bentuk energi ke bentuk lainnya. Konversi energi dari bentuk energi A ke bentuk B dapat berlangsung spontan, sedangkan sebaliknya tidak berlangsung secara spontan. Misalnya, energi mekanik (gerak) dapat berubah menjadi termal secara spontan, karena gesekan, dll., tetapi konversi energi termal menjadi listrik berlangsung tidak spontan. Proses yang tidak berlangsung secara spontan adalah proses yang tak-mampu-balik, dan dicirikan dengan pembentukan

entropi. Pembentukan entropi ini menyebabkan perusakan (pemusnahan) eksergi, sehingga bentuk energi yang dihasilkan akan mempunyai mutu yang lebih rendah.

Disamping itu, termodinamika juga menjelaskan bahwa setiap proses akan berlangsung ke arah keseimbangan dengan lingkungannya. Oleh sebab itu, eksergi yang terkandung pada suatu sumber energi dipengaruhi oleh "jarak"nya dengan tingkat keseimbangan. Keadaan seimbang ini disebut sebagai *dead state* (atau *reference state*), dan energi yang terkandung pada sumber yang seimbang (*dead state*) tidak dapat dimanfaatkan lagi, atau dengan kata lain tidak mempunyai eksergi. Pada analisis termal dan proses pembangkitan energi, eksergi didefinisikan sebagai energi berguna yang sebanyak-banyaknya dapat diambil dari suatu sumber, atau yang sekurang-kurangnya harus tersedia agar suatu proses berlangsung. Secara matematis, kandungan eksergi suatu sistem dirumuskan sebagai selisih antara kandungan energinya dengan energi yang hilang akibat pembangkitan entropi (irreversibilitas) pada suhu referensinya (T_0), seperti persamaan di bawah, dengan ΔS adalah entropi yang terbangkitkan, X eksergi dan E energi.

$$X = E - T_0 \Delta S \quad [1]$$

ANALISIS EKSERGI DALAM BIDANG PERTANIAN

Setiap sistem biologik mengekstrak energi berguna dari lingkungannya, kemudian mengubahnya, menyimpannya, dan menggunakannya untuk proses-proses yang memerlukan energi, seperti kontraksi otot, pengangkutan substrat, dll. Dengan demikian, sistem biologik pada dasarnya dapat dilihat sebagai suatu sistem pengelolaan energi, yang disebut

disebut dengan bioenergetika. Dalam hal ini, energi berguna tersebut adalah eksergi, yang dapat termusnahkan sebagai akibat pembentukan entropi pada proses tak-dapat-balik (*irreversible*), dan dikonversi dari adenosine triphosphate (ATP). Pengelolaan energi ini dilakukan oleh zat hidup dengan cara mempertahankan gaya-gaya termodinamika, seperti gradient potensi elektrokimiawi, yang adalah sistem tak-seimbang. Demirel (2004) menunjukkan bahwa analisis eksergi dapat digunakan dalam bioenergetika dan sangat membantu dalam memahami dan menganalisa fenomena rumit yang terjadi pada pengelolaan energi pada zat biologik.

Dalam konteks budidaya, energi juga merupakan salah satu faktor produksi pertanian yang penting. Setiap tahap kegiatan produksi pertanian, sejak penyiapan lahan hingga pengolahan hasilnya, memerlukan energi. Kebutuhan energi ini dapat digolongkan pada energi langsung (*direct energy*), seperti penggunaan bahan bakar minyak untuk traktor, dan energi tidak langsung (*indirect energy*), seperti energi yang diperlukan untuk menghasilkan pupuk yang dapat dianggap sebagai kandungan energi pupuk tersebut. Tingkat modernisasi (industrialisasi) pertanian dapat dicirikan dengan intensitas penggunaan energinya. Indonesia, yang tahun-tahun terakhir ini telah berubah menjadi importir bersih (net importer) BBM, perlu lebih meningkatkan efektivitas penggunaan energi dalam usaha pembangunan pertaniannya. Penggunaan teknologi dan sistem produksi yang tepat diharapkan dapat meningkatkan efektivitas penggunaan energi, sambil tetap mempertahankan laju pembangunan pertanian.

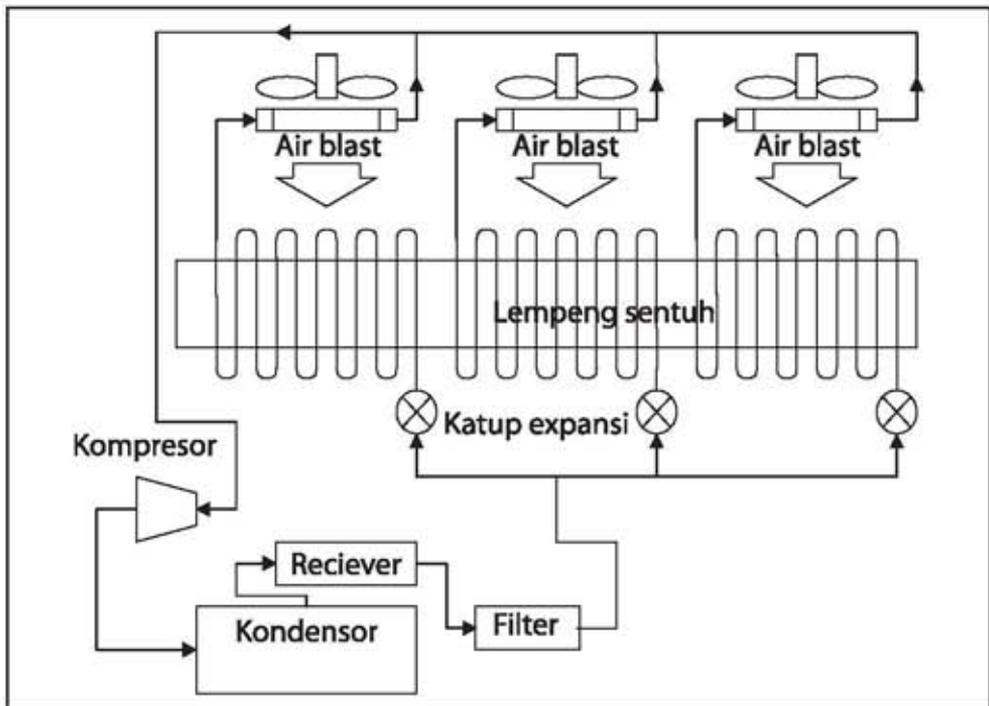
Ferreira (2003), berdasarkan hasil studinya, menyimpulkan bahwa metoda analisis eksergi dapat digunakan untuk membandingkan konfigurasi produksi

Tabel 1. Perbandingan efisiensi eksergi pembekuan daging sapi dengan berbagai pola tahapan suhu

T_{ma} (°C)	-25	-21	-10	-8	-8	-5	-5	-3
T_{mf} (°C)	-25	-21	-25	-21	-18	-18	-18	-15
T_{mb} (°C)	-25	-21	-25	-28	-26	-30	-30	-21
Kehilangan eksergi (kJ/kg)	26.31	30.04	21.55	23.29	18.69	23.66	15.22	17.28
Efisiensi eksergi total (%)	50.34	46.73	51.24	63.44	58.62	59.76	54.56	61.53
Daya terpakai (dalam kJ)	7200	8892	10332	7236	5760	6840	7920	5760

pertanian (misal, apakah lebih baik mempertahankan pertanian tradisional atau berkembang ke pertanian modern), dan bahkan sebagai kriteria seleksi untuk pemilihan jenis dan cara budidaya. Metoda analisis ini juga dapat digunakan untuk penentuan distribusi biaya pada sistem dengan parameter masukan yang bersifat *multiple use*, seperti air. Efisiensi eksergi merupakan faktor penting dalam pemilihan teknologi peralatan maupun pemilihan proses yang akan diterapkan.

Sebagai contoh adalah perancangan dan pengoperasian mesin pembeku untuk produk pangan dan hasil pertanian. Berbagai jenis mesin pembeku yang tersedia di pasar umumnya menerapkan suhu media yang tetap sepanjang proses pembekuan. Proses pembekuan dapat dibagi menjadi tiga tahap, yaitu tahap penurunan suhu dari suhu awal hingga suhu titik beku (tahap I), tahap perubahan fase (tahap II), dan tahap penurunan suhu dari suhu titik beku ke suhu akhir



Gambar 1. Rancangan sistem pembeku dengan suhu berbeda pada setiap tahap pembekuan

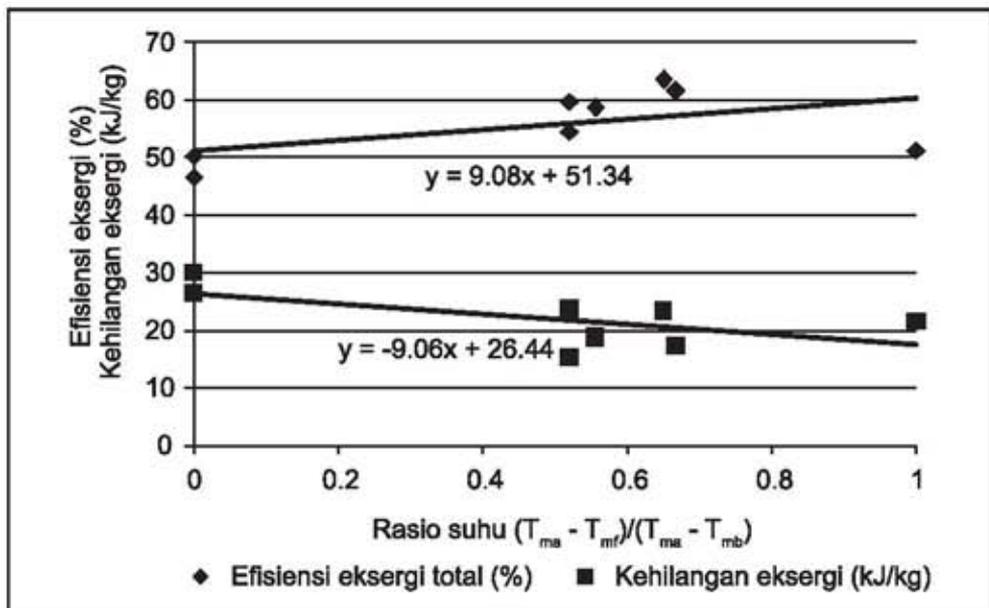
pembekuan (tahap III). Analisis eksergi menunjukkan bahwa pembekuan dengan suhu yang berbeda pada masing-masing tahap sepanjang proses pembekuan tersebut dapat meningkatkan efisiensi eksergi (Tambunan, et al., 2005).

Hasil analisis ini telah dimanfaatkan untuk perancangan mesin pembeku jenis terowongan dengan tiga tingkat suhu, seperti ditunjukkan pada Gambar 1 bagian kanan (Mustopa, et al., 2007). Pada tahap awal, proses pembekuan tidak memerlukan suhu media pembeku yang terlalu rendah karena suhu bahan yang masih tinggi. Perbandingan antara pembekuan dengan suhu media tetap dan suhu media bertahap menunjukkan adanya peningkatan efisiensi eksergi yang signifikan (Tabel 1), yang juga berdampak pada efisiensi penggunaan energi. Mesin pembeku hasil rancangan ini disebut dengan mesin pembeku eksergetik.

Untuk dapat melihat lebih jelas hubungan antara suhu media pembeku dengan kehilangan eksergi, dapat

didefinisikan suatu suhu tak-berdimensi seperti pada persamaan [2]. Suhu tak-berdimensi tersebut menyatakan rasio beda suhu media pembeku antara tahap I dan II dengan antara tahap II dan III. Berdasarkan Gambar 2 diketahui bahwa suhu tak-berdimensi berbanding terbalik secara linier dengan kehilangan eksergi dan berbanding lurus secara linier dengan efisiensi eksergi. Dengan demikian, pengendalian suhu media pembeku pada tahap I, dengan mempertahankan suhu media pada tahap II dan tahap III, dapat mengurangi kehilangan eksergi dan meningkatkan efisiensi eksergi. Grafik ini dapat digunakan untuk penentuan suhu media pada tahap I (T_{ma}) jika suhu media tahap II (T_{mf}) dan suhu media tahap III (T_{mb}) diketahui. Suhu media tahap II ditentukan berdasarkan laju pembekuan yang diharapkan, sedangkan suhu media tahap III ditentukan berdasarkan suhu akhir bahan beku yang diharapkan.

$$T' = \frac{T_{ma} - T_{mf}}{T_{ma} - T_{mb}} \quad [2]$$



Gambar 2. Hubungan antara rasio suhu dengan efisiensi eksergi dan kehilangan eksergi

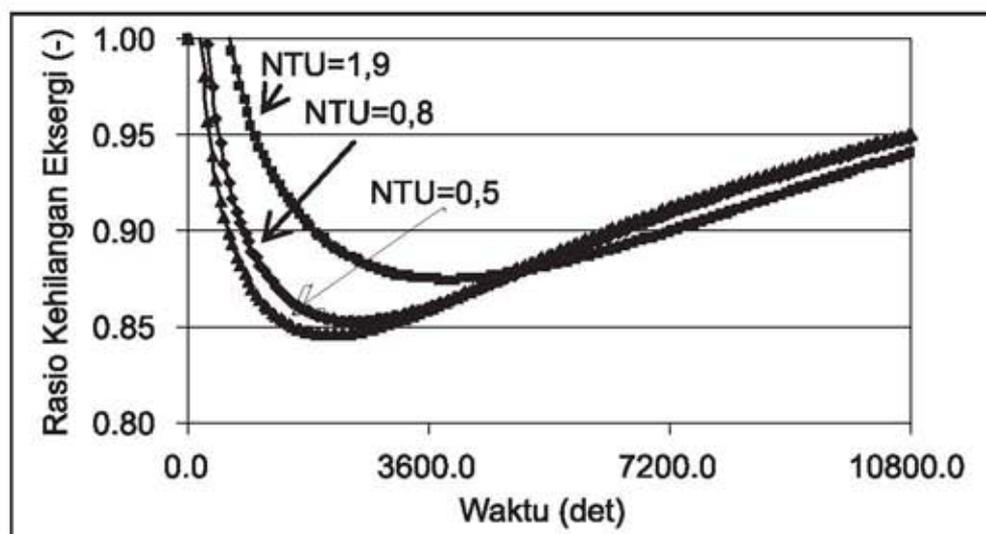
PEMANFAATAN EKSERGI LINGKUNGAN DAN ENERGI TERBARUKAN

Era bahan bakar minyak akan mendekati babak akhir, yang diperkirakan akan terjadi pada generasi berikut, sehingga penggunaan bentuk-bentuk energi lain, seperti energi terbarukan, harus segera dikembangkan. Dalam terminologi eksergi, energi terbarukan (*renewable energy*) adalah bentuk pemanfaatan eksergi yang tersedia di lingkungan. Sebagai contoh, eksergi yang terkandung pada udara bergerak (tenaga bayu) atau aliran air (tenaga air) dapat dimanfaatkan sebagai penggerak atau diubah menjadi listrik, atau pemanfaatan panas radiasi surya, dan lain-lain. Pemanfaatan eksergi lingkungan bersifat terbarukan, relatif bersih dan bebas emisi, sehingga ramah terhadap lingkungan. Akan tetapi, ketersediaan eksergi lingkungan sangat dipengaruhi oleh kondisi dan dinamika lingkungan itu sendiri, sehingga selalu terjadi fluktuasi penyediaan baik terhadap waktu maupun

terhadap ruang. Untuk itu, diperlukan strategi yang tepat untuk dapat memanfaatkannya secara optimum. Pemanfaatan eksergi lingkungan lebih efektif jika didekati dari sisi penggunaannya (*demand side approach*), dan sering dilakukan secara hibrid dengan bentuk energi lainnya.

Salah satu contoh penggunaan eksergi alamiah pada proses penanganan hasil pertanian adalah pengering berenergi surya. Berbagai jenis pengering berenergi surya dapat dirancang-bangun, baik dengan sistem efek rumah kaca, maupun menggunakan pengumpul panas. Untuk menanggulangi sifat alamiah radiasi surya yang tidak merata (fluktuatif), seringkali diperlukan pemanas tambahan (*hybrid*) atau sistem penyimpanan panas sehingga proses pengeringan dapat berlangsung dengan suhu yang lebih merata dan waktu yang lebih panjang dari lama penyinaran surya.

Hasil analisis eksergi terhadap penyimpanan panas surya secara sensible pada sistem pengering berenergi surya (Gambar 3) menunjukkan bahwa



Gambar 3. Pengering berenergi surya dengan system penyimpanan panas sensible (atas), dan simulasi perubahan rasio kehilangan eksergi terhadap waktu pada berbagai nilai NTU (bawah) (Tambunan, et al., 2006)

titik minimum rasio kehilangan eksergi terjadi pada kisaran dua jam pertama proses penyimpanan dengan besaran yang lebih tinggi pada nilai NTU (*number of transfer unit*) yang lebih tinggi (Tambunan, et al., 2006). Selama kurun waktu 2 jam tersebut, rasio kehilangan eksergi yang terjadi adalah 0,85, sehingga hanya 15 persen eksergi masuk yang dapat disimpan pada sistem. Hasil ini dapat dimanfaatkan untuk perancangan bangunan sistem penyimpanan panas yang lebih efektif untuk digunakan pada sistem pengering berenergi surya.

Pemerintah Indonesia merencanakan pemanfaatan bahan bakar nabati (biofuel) sebesar 5% pada tahun 2025, yang peraturan penyediaan dan pemanfaatannya dituangkan pada Inpres No. 1 tahun 2006. Bahan bakar nabati (BBN) digolongkan sebagai energi terbarukan dan bersifat netral terhadap emisi karbon. Meskipun demikian, tingkat keterbarukan (*degree of renewability*) BBN tersebut sangat tergantung pada jenis biomassa yang digunakan dan proses produksi yang diterapkan. Studi yang dilakukan oleh Dewulf (2005) menunjukkan bahwa produksi bioetanol dari jagung lebih bersifat terbarukan dibandingkan dengan produksi biodisel dari *rapeseed* maupun kedelai, sementara produksi biodisel dari *rapeseed* lebih terbarukan dibandingkan dari kedelai. Hal ini dijelaskan melalui analisis eksergi terhadap proporsi asupan energi tak-terbarukan dan terbarukan untuk menghasilkan masing-masing jenis sejak penyediaan bibit hingga produksi BBN tersebut. Dengan demikian, rencana pemerintah Indonesia untuk mengembangkan jarak pagar (*Jathropa curcas*) sebagai bahan baku produksi biodisel perlu didasari secara ilmiah dengan menerapkan analisis eksergi. Disamping itu, pemilihan teknologi konversi dalam penerapan jenis energi terbarukan lainnya juga perlu dikaji berdasarkan metoda analisis tersebut.

PENUTUP

Keunggulan analisis eksergi adalah bersifat umum tetapi valid secara ilmiah, menggunakan skala yang sama untuk setiap bentuk energi dan materi, dan memungkinkan alokasi secara langsung. Keunggulan ini dapat dimanfaatkan untuk mengkaji berbagai kegiatan pertanian, baik dalam posisinya sebagai pengguna energi maupun sebagai pemasok bahan baku energi. Penerapan analisis eksergi pada proses pembekuan dan pemanfaatan sistem penyimpanan termal surya untuk meningkatkan efektivitas pengering berenergi surya.

UCAPAN TERIMAKASIH

Sebagian dari data yang digunakan pada tulisan ini merupakan hasil penelitian Hibah Penelitian Tim Pascasarjana (HPTP) yang dibiayai oleh Direktorat Pembinaan Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat, Ditjen Pendidikan Tinggi, Departemen Pendidikan Nasional, tahun anggaran 2006-2008

PUSTAKA

- Demirel, Y., 2004, Exergy use in bioenergetics, *Int. J. Exergy*, Vol. 1, No. 1, pp.128-146.
- Dewulf, J., H. van Langenhove, B. Vande Velde, 2005, Exergy based efficiency and renewability assessment of biofuel production, *Environmental Sci Technol*, Vol. 39(10), 3878-82
- Ferreira, O.C., 2003, Exergetic analysis of the agricultural production system, diakses tanggal 4 Juni 2007.
- Gaos, Y.S., A.H. Tambunan, K. Abdullah, Prawoto, 2007, Analisis energy dan sebaran suhu pada gasifier unggun tetap, *Teknik Pertanian*, Vol. 21(2), pp.157-166

- Inpres No. 1, 2006 "Penyediaan dan Pemanfaatan Bahan Bakar Nabati (Biofuel) sebagai Bahan Bakar Lain", Jakarta, Indonesia
- Mustofa, D.K., A.H. Tambunan, S.T. Soekarto, Radite, PAS., 2007, Pengaruh suhu media pembeku terhadap efisiensi eksergi dan laju pembekuan, J. Teknik Pertanian, Vol. 21(2), pp.145-156
- Tambunan, A.H., K. Abdullah, B. Nababan, 2006, Analisis Eksergi Penyimpanan Panas untuk Sistem Pengering Berenergi Surya, J. Teknik Pertanian, Vol. 20(3), pp.235-242
- Tambunan, A.H., S. Priyanto, A.D. Angraheni, 2005, Karakteristik dan analisis eksergi pembekuan ikan patin dan ayam broiler, J. Teknik Pertanian, Vol. 17(3), p. 32-42