

## ANALISIS KINERJA SOLAR PHOTOVOLTAIC SYSTEM (SPS) BERDASARKAN TINJAUAN EFISIENSI ENERGI DAN EKSERGI

DADAN HAMDANI<sup>‡</sup>, KADEK SUBAGIADA, LAMBANG SUBAGIYO

*Program Studi Fisika FMIPA Universitas Mulawarman Samarinda 75123  
Program Pengkajian dan Penerapan Energi Alternatif (P3EA) FMIPA Universitas Mulawarman, Samarinda 75123*

**Abstrak.** Dalam tulisan ini, telah dilakukan analisis *Solar Photovoltaic System* (SPS) didasarkan pada efisiensi energi dan eksergi, serta potensi peningkatan eksergetik (*exergetic improvement potential*, IP) menggunakan data eksperimen (parameter lingkungan dan keluaran listrik SPS) untuk Kota Samarinda Kalimantan Timur. Hasil analisis menunjukkan bahwa variasi jam-an untuk evaluasi efisiensi energi lebih tinggi dibandingkan efisiensi eksergi (4-12%). Oleh karena itu, efisiensi eksergi sistem rendah dan IP menjadi tinggi, sehingga hanya sekitar 4-12% eksergi radiasi yang digunakan sistem dan jangkauan perbaikan sistem tinggi.

*Kata kunci :* solar photovoltaic system, energi, exergi, peningkatan eksergetik

**Abstract.** Performances analysis of solar photovoltaic system (SPS) based on energy and exergy efficiencies. In this paper, analysis of solar photovoltaic system (SPS) based on efficiencies including energy and exergy and exergetic improvement potential (IP) using experimental data (environmental parameters and electrical output of SPS) for Samarinda East Kalimantan has been carried out. It is found that the hourly variation for SPS evaluation gives energy efficiency (12-35%) is higher than exergy efficiency (4-12%), respectively. Therefore, the exergy efficiency of the system would also be low and IP would be high, then only 4-12 % of the exergy radiation is used and scope for improvement in the existing system is high.

*Keywords :* solar photovoltaic system, energy, exergy, exergetic improvement

### 1. Pendahuluan

Keberadaan sumber energi Matahari sangat berlimpah, sehingga penerapan teknologi fotovoltaik (PV) untuk memenuhi kebutuhan energi listrik di daerah yang belum terjangkau jaringan listrik cukup potensial untuk dikembangkan [1]. Dalam pengoperasiannya, kinerja PV sangat dipengaruhi oleh kondisi klimatologi daerah setempat (suhu lingkungan dan radiasi Matahari) dan parameter listriknya (*short circuit current*, *open circuit voltage*, suhu sel PV, MPP, dan sebagainya) [2].

Kajian yang bersifat mendasar sangat diperlukan untuk dapat menjelaskan keterkaitan parameter-parameter tersebut terhadap Kinerja sistem PV. Evaluasi terhadap parameter energi sistem PV didasarkan pada hasil yang sudah dilakukan tidak cukup akurat dalam menjelaskan arah proses ketika panas ditransfer secara spontan ketika suhu meningkat, sehingga analisis terhadap parameter eksergi yang merupakan bentuk usaha maksimum sistem PV pada saat setimbang dengan lingkungannya perlu dilakukan dalam menjelaskan proses sistem secara detail [3,4,5].

Efisiensi energi PV merupakan rasio antara energi yang dibangkitkan oleh sistem PV dan total radiasi Matahari yang sampai di permukaan PV, sehingga hanya energi listrik yang dibangkitkan oleh PV yang ditinjau, sedangkan parameter lainnya seperti suhu lingkungan, suhu sel PV, komponen potensial kimia dan kapasitas panasnya tidak diperhitungkan [6]. Ketidakuratan analisis

---

<sup>‡</sup> email : hamdani.dadan@yahoo.co.id

energi terhadap sistem PV diantisipasi dengan mengembangkan konsep eksergi (*exergy concepts*) didasarkan pada analisis Hukum II Termodinamika yang dapat memberikan informasi tentang energi yang hilang dari sistem yang berkaitan dengan proses-proses termodinamika yang terjadi pada sistem PV [7,8]. Efisiensi eksergi dinyatakan sebagai selisih dari energi listrik dan energi panas dalam bentuk usaha maksimum yang dilakukan oleh sistem termodinamika ketika menuju proses reversibel mengarahkan sistem ke keadaan setimbang dengan lingkungannya [9].

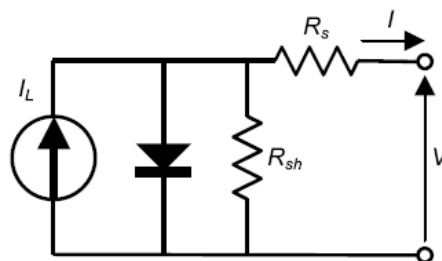
Beberapa penelitian yang pernah dilakukan terkait dengan analisis sistem PV berdasarkan tinjauan analisis energi dan eksergi dalam meningkatkan kinerjanya yang dinyatakan dengan keluaran listrik sistem PV, diantaranya membahas tentang tinjauan teoritis efisiensi konversi energi Matahari berdasarkan analogi proses fotosintesis dan fotokimia dari tinjauan proses termodinamika [10], kajian teoritis tentang limitasi termodinamika pada efisiensi konversi energi Matahari berdasarkan konsep entropi [11], modifikasi sistem PV dengan menambahkan lapisan kaca di atas modul PV untuk mereduksi suhu dan mengalirkan udara pada celah keduanya [12], kajian pengaruh posisi lintang (*latitude*) dan kondisi klimatologinya terhadap keluaran PV berdasarkan tinjauan analisis energi [13], kajian efisiensi eksergi pada sistem PV array berdasarkan tinjauan klimatologi, konfigurasi sistem PV, sifat termal dan komponen potensial kimia [6], kajian tentang efisiensi energi dan eksergi pada sistem hibrid PV/T dipelajari untuk meningkatkan efisiensi daya keluaran sistem PV [4]. Kajian penerapan sistem PV untuk daerah terpencil dan terisolir sudah dilakukan melalui perancangan dan implementasi sistem *Stand Alone PV System* (SAPS) yang berorientasi pada prototipe generator listrik bertenaga Matahari [14] dan kajian tentang peningkatan efisiensi PV *array* didasarkan pada evaluasi Kinerja eksergetik untuk pengoptimalan sistem dengan melakukan analisis terhadap parameter-parameter yang mempengaruhi Kinerja sistem [5].

Dalam tulisan ini akan dibahas suatu tinjauan terhadap kinerja *Solar Photovoltaic System* (SPS) berdasarkan tinjauan efisiensi energi dan eksergi, serta *Improvement Factor* (IP) eksergetik SPS yang didasarkan pada selisih eksergi yang masuk dan keluar sistem.

## 2. Analisis Solar Photovoltaic System (SPS)

### 2.1. Analisis energi

Fotovoltaik pada umumnya mempunyai hambatan parasitik seri dan hambatan *shunt* yang berpengaruh pada penurunan efisiensi, seperti ditunjukkan pada gambar 1 [15].



Gambar 1. Model dioda tunggal untuk rangkaian ekuivalen PV.

Persamaan model dioda tunggal yang digunakan untuk menggambarkan arus operasional yang dihasilkan modul PV dinyatakan dengan persamaan [2,15]:

$$I = I_L - I_0 \left( \exp \left( \frac{V + IR_s}{N_s n_i V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} = I_L - I_0 \left( \exp \left( \frac{V + IR_s}{m V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

dengan  $I_L$  arus yang dibangkitkan cahaya (A),  $I_0$  arus jenuh balik pada sambungan dioda p-n (A),  $R_s$  hambatan seri pada sel PV ( $\Omega$ ),  $R_{sh}$  hambatan *shunt* sel PV ( $\Omega$ ),  $N_s$  jumlah sel yang tersusun seri,  $n_i$  faktor ideal dioda, dan  $m = N_s n_i$  parameter tunggal dan  $V_t$  tegangan termal (V) yang dinyatakan sebagai :

$$V_t = \frac{kT_c}{q} \quad (2)$$

dengan  $T_c$  temperatur sel (K),  $k$  konstanta Boltzmann ( $JK^{-1}$ ) dan  $q$  muatan elektron (C). Hambatan *shunt* atau hambatan paralel  $R_{sh}$  menunjukkan arus yang bocor (*leakage*) pada sambungan p-n dioda, dimana nilainya untuk PV modul silikon sekitar  $0.1 - 10 \Omega m^2$  [15].

Produksi energi dari sistem PV ditentukan berdasarkan estimasi arus dan tegangan yang dihasilkan modul PV, dimana daya keluaran PV tergantung pada karakteristik teknis dan parameter lingkungan [16]. Oleh karena itu, model PV meliputi parameter listrik pada kondisi standar dan  $\mu_{I,SC}$  koefisien temperatur *short circuit current*,  $I_{SC}$  dan  $\mu_{V,OC}$  koefisien temperatur *open circuit voltage*,  $V_{OC}$ . Nilai  $I_{SC}$  dan  $V_{OC}$  ditentukan berdasarkan persamaan dengan meninjau parameter lingkungannya [5]:

$$I_{SC} = I_{SC,ref} \frac{G}{G_{ref}} + \mu_{I,SC} (T_c - T_{c,ref}) \quad (3)$$

$$V_{OC} = V_{OC,ref} + m V_t \ln \left( \frac{G}{G_{ref}} \right) + \mu_{V,OC} (T_c - T_{c,ref}) \quad (4)$$

Berdasarkan definisi, efisiensi konversi PV dinyatakan sebagai rasio antara energi keluaran yang dihasilkan (energi listrik) terhadap energi Matahari yang sampai dipermukaan PV, sehingga efisiensi energi maksimum dinyatakan sebagai :

$$\eta_{en} = \frac{V_{OC} \times I_{SC}}{A \times S_T} \quad (5)$$

dengan  $V_{OC}$  (V) menyatakan open circuit voltage,  $I_{SC}$  short circuit current (A),  $S_T$  radiasi global Matahari jam-an ( $W/m^2$ ), dan  $A$  luas permukaan modul PV ( $m^2$ ).

## 2.2. Analisis efisiensi SPS

### 2.2.1. Analisis efisiensi energi

Berdasarkan definisi, efisiensi energi SPS dinyatakan sebagai rasio energi total (termal dan elektrik) terhadap energi matahari yang jatuh pada permukaan antara energi keluaran yang dihasilkan (energi listrik) terhadap energi matahari yang sampai dipermukaan PV [16]:

$$\eta = \frac{\dot{E}_n}{S_T A} \quad (6)$$

dalam hal ini  $\dot{E}_n$  menyatakan laju energi (W) yang dinyatakan sebagai jumlah energi listrik dan energi termal yang dihasilkan oleh SPS. Ungkapan untuk laju energi dinyatakan sebagai:

$$\dot{E}_n = E_{el} + Q = V_{OC} I_{SC} + h_{ca} A (T_{sel} - T_{amb}) \quad (7)$$

dengan  $T_{sel}$  suhu sel ( $^{\circ}C$ ),  $T_{amb}$  suhu ambient ( $^{\circ}C$ ), serta  $h_{ca}$  koefisien transfer panas konvektif yang dinyatakan [18]:

$$h_{ca} = 5.7 + 3.8v \tag{8}$$

dengan  $v$  kelajuan angin (m/s).

**2.2.2. Analisis efisiensi eksergi**

Efisiensi eksergi didefinisikan sebagai perbandingan eksergi dari sistem SPS terhadap eksergi dari radiasi matahari yang jatuh pada permukaan modul PV dinyatakan dalam bentuk [5,17] :

$$\psi = \frac{\dot{E}x}{\dot{E}x_{solar}} \tag{9}$$

dengan  $\dot{E}x$  (W) menyatakan eksergi SPS dan  $\dot{E}x_{solar}$  (W) menyatakan eksergi matahari :

$$\dot{E}x = V_m I_m + \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{sel}}\right) [h_{ca} A (T_{sel} - T_{amb})] \tag{10}$$

$$\dot{E}x_{solar} = \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{solar}}\right) S_T A \tag{11}$$

dimana  $V_m$  dan  $I_m$  menyatakan tegangan (V) dan arus yang diamati (A) yang dihasilkan SPS dan disimpan pada baterai, serta  $T_{solar}$  menyatakan suhu matahari (5777 K).

Analisis eksergi yang masuk (radiasi matahari) dan eksergi keluar (SPS), selanjutnya dinyatakan sebagai bentuk peningkatan potensial eksergetik (*the exergetic improvement potential*, IP) dalam bentuk efisiensi eksergi [18] :

$$IP = (1 - \psi) (\dot{E}x_{masuk} - \dot{E}x_{keluar}) \tag{12}$$

**3. Pengujian Eksperimental SPS**

Sistem eksperimen dan layout SPS terdiri dari modul PV polikristalin 10 W produksi SunLink dan sistem sensor parameter lingkungan, seperti ditunjukkan pada gambar 2 dan 3. Data karakteristik listrik modul PV yang digunakan dalam validasi ini ditunjukkan pada Tabel 1. Ketika radiasi matahari sampai pada permukaan PV akan terjadi proses konversi menjadi energi listrik dan panas. Interaksi foton pada sel PV menyebabkan terjadinya peningkatan suhu yang berakibat pada penurunan efisiensi ketika pemanasan terjadi, sehingga untuk menjaga agar efisiensi konversi tetap pada kondisi optimum, maka suhu modul PV harus dipertahankan pada kondisi optimumnya. Dalam pengujian, proses pendinginan modul PV terjadi melalui konveksi alami dengan membuat rongga untuk melewatkan aliran udara (angin) pada bagian bawah modul.

**Tabel 1.** Karakteristik Type SL010-12

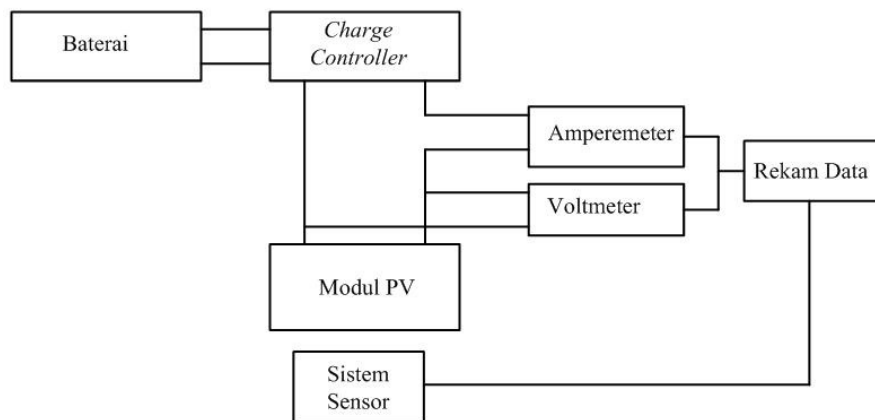
$P_{max}$ (W)	10
$I_{mp}$ (A)	0.59
$V_{mp}$ (V)	16.8
$I_{sc}$ (A)	0.68
$V_{oc}$ (V)	21.0
NOCT	$47 \pm 2$ $^{\circ}C$

All technical data at standard test condition AM = 1.5 E = 1000 W/m<sup>2</sup> Tc = 25  $^{\circ}C$

Pengujian keluaran listrik (arus dan tegangan) SPS diukur menggunakan *digital clamp meter*, suhu sel PV dan suhu lingkungan menggunakan termometer termokopel digital, pengukuran aliran udara (angin) di atas permukaan PV diukur menggunakan anemometer digital, serta pengukuran radiasi matahari digunakan *solar power meter digital* yang dirata-ratakan dalam satu jam.



**Gambar 2** Modul PV dengan kemiringan untuk validasi eksperimental SPS



**Gambar 3.** Layout pengujian eksperimental SPS.

#### 4. Hasil dan Pembahasan

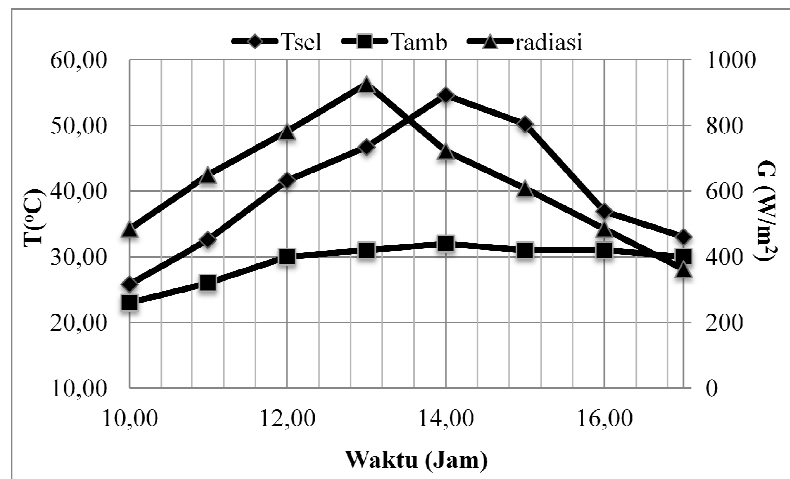
Pengujian eksperimental SPS dilakukan pada Tanggal 18 Mei 2011 di Laboratorium Energi Alternatif FMIPA Universitas Mulawarman Samarinda secara *stand alone* dan *off grid* dari pukul 10:00 – 17:00 WITA dengan kondisi udara cerah berawan. Hasil pengujian kinerja SPS ditunjukkan pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Hasil pengujian kinerja SPS Tanggal 18 Mei 2011

Waktu	V <sub>OC</sub>	V <sub>m</sub>	I <sub>SC</sub>	I <sub>m</sub>	Suhu (°C)		S <sub>T</sub> (W/m <sup>2</sup> )	Kelajuan angin (m/s)
	(V)	(V)	(A)	(A)	T <sub>sel</sub>	T <sub>Amb</sub>		
10:00	16,10	12,30	0,26	0,20	25,80	23,00	485	0,1
11:00	16,70	12,70	0,38	0,32	32,60	26,00	649	0,2
12:00	16,50	12,80	0,49	0,41	41,60	30,00	782	0,3
13:00	16,30	13,00	0,57	0,54	46,70	31,00	926	0,1
14:00	16,30	13,10	0,45	0,42	54,60	32,00	722	0,4
15:00	16,70	13,30	0,40	0,36	50,20	31,00	608	0,2
16:00	15,90	13,10	0,25	0,19	36,90	31,00	485	0,4
17:00	15,10	12,90	0,14	0,08	33,00	30,00	362	0,1

**4.1. Kinerja SPS**

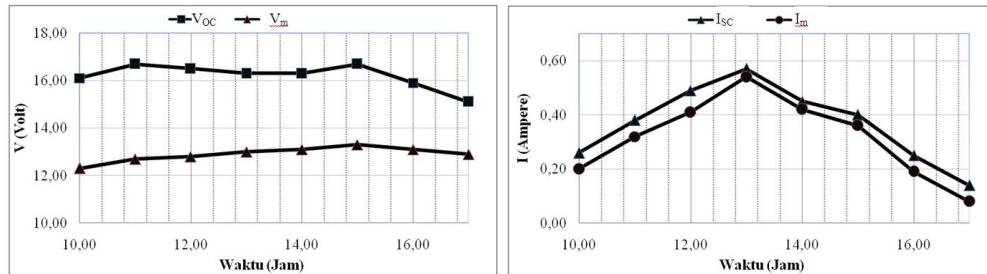
Gambar 4 menunjukkan hasil pengamatan terhadap parameter lingkungan yang sangat berkorelasi dengan kinerja SPS, yaitu suhu sel PV, suhu lingkungan, dan radiasi matahari dalam selang waktu pengamatan. Kecenderungan yang terjadi dari hasil pengamatan menunjukkan bahwa perubahan suhu relatif sama, baik suhu lingkungan maupun suhu sel PV. Radiasi matahari rata-rata setiap jam mencapai nilai maksimum pada pukul 13.00 dan cenderung berkurang seiring dengan bertambahnya waktu.



**Gambar 4.** Pengukuran suhu dan radiasi matahari terhadap waktu yang dilakukan tanggal 18 Mei 2011

Pengujian terhadap kinerja SPS dinyatakan dalam parameter listrik yang berkaitan dengan perubahan parameter lingkungan (suhu sel, suhu lingkungan dan radiasi matahari). Gambar 5 menunjukkan tegangan dan arus keluaran modul PV sebelum melewati regulator (V<sub>in</sub> dan I<sub>in</sub>), arus dan tegangan setelah melewati regulator (V<sub>out</sub> dan I<sub>out</sub>) dalam selang waktu pengamatan. Tegangan terukur yang dihasilkan oleh modul PV mengalami penurunan seiring dengan peningkatan suhu sel, dimana tegangan input yang dihasilkan modul PV sekitar 15 – 16 V dan tegangan output berkaitan

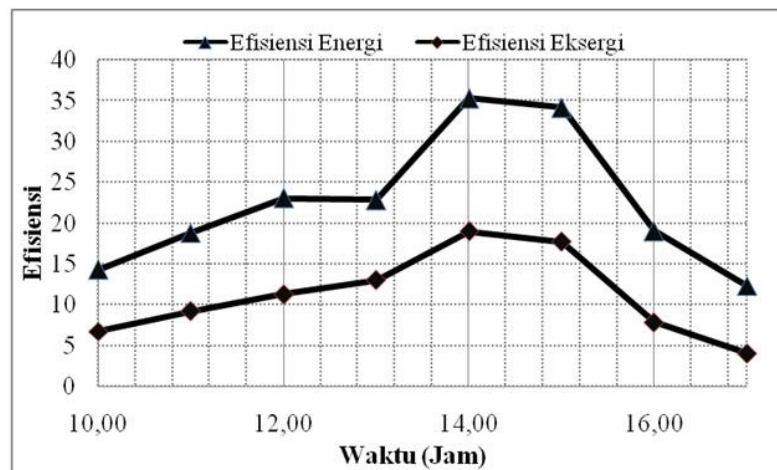
dengan tegangan operasional baterai pada saat proses pengisian (*charge*) terjadi. Arus input berada pada kisaran 0.14 – 0.57 A yang berkorelasi dengan intensitas radiasi matahari yang sampai dipermukaan modul dan arus output yang dihasilkan SPS akan diregulasikan untuk disimpan ke baterai (proses pengisian) dan cenderung lebih kecil dari arus input (Tabel 2).



Gambar 5. Pengukuran tegangan dan arus SPS terhadap waktu yang dilakukan tanggal 18 Mei 2011

#### 4.2. Analisis Efisiensi Energi dan Eksergi SPS

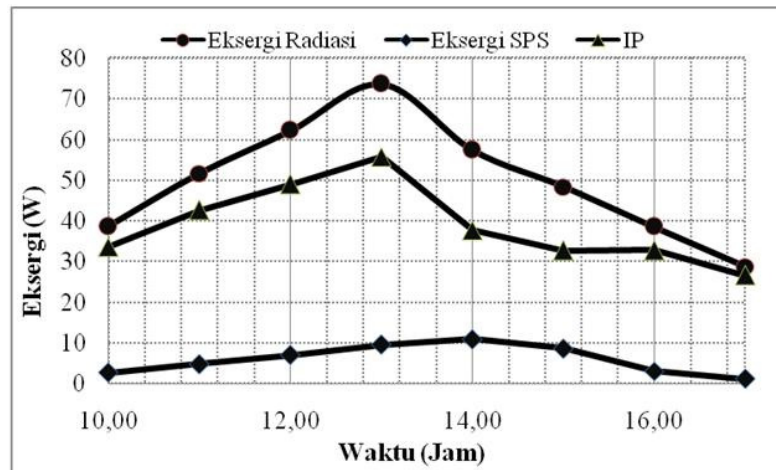
Dengan mengacu pada data hasil pengujian SPS (Tabel 2) di Kota Samarinda dan persamaan (6-11), maka efisiensi energi dan eksergi dapat dihitung. Hasil perhitungan efisiensi energi dan eksergi SPS dalam setiap jam pengamatan ditunjukkan pada Gambar 6, dimana efisiensi energi (12-35%) lebih besar dibandingkan efisiensi eksergi (4-12%). Efisiensi eksergi maksimum terjadi pada pukul 14.00 dengan energi matahari yang digunakan menjadi usaha yang bermanfaat sekitar 12%, sedangkan efisiensi eksergi minimum (4%) terjadi pukul 17.00 yang berkaitan dengan rendahnya radiasi matahari yang diterima sistem. Proses pendinginan SPS dilakukan menggunakan konveksi alami, yaitu aliran udara yang dilewatkan melalui saluran pada bagian bawah modul PV.



Gambar 6. Variasi efisiensi energi dan eksergi SPS dalam tiap jam pengamatan

Gambar 7 menunjukkan hasil perhitungan *improvement potential* (IP) SPS yang diperoleh menggunakan persamaan (12) yang menyatakan aliran eksergi yang masuk (radiasi matahari) dan keluar SPS. Eksergi radiasi matahari bervariasi antara 27 W (minimum) pada pukul 17:00 sampai 70 W (maksimum) pada pukul 13:00, IP bervariasi antara 25 W (minimum) sampai 56 W (maksimum) masing-masing pada pukul 17:00 dan 13:00, sedangkan eksergi SPS bervariasi antara

1 W (minimum) pada pukul 17:00 sampai 7 W (maksimum) pada pukul 14:00. Secara umum, IP bergantung pada selisih eksergi yang masuk ke dalam sistem dan eksergi yang keluar sistem, dimana makin besar selisih eksergi memberikan gambaran tentang eksergi yang hilang (*exergy destruction*) dalam sistem [17]. Dengan kata lain, hasil pengujian yang dilakukan menunjukkan bahwa aliran eksergi yang masuk (radiasi matahari) sekitar 4-12% yang diubah menjadi usaha yang bermanfaat oleh SPS.



Gambar 7. Variasi eksergi SPS, eksergi radiasi matahari dan *improvement potential* SPS dalam tiap jam pengamatan

## 5. Kesimpulan

Data pengamatan kinerja SPS yang meliputi data lingkungan yang berupa suhu sel, suhu lingkungan, intensitas matahari, kelajuan angin dan keluaran listrik modul PV digunakan dalam menganalisis dan menghitung efisiensi energi dan eksergi sistem. Hasil analisis menunjukkan bahwa efisiensi eksergi selalu lebih kecil dibandingkan efisiensi energi. Hal ini sangat realistis karena berkaitan dengan jumlah usaha optimum yang dihasilkan oleh SPS. Peningkatan potensi yang dinyatakan dalam bentuk aliran eksergi yang masuk dan keluar SPS menunjukkan bahwa hanya sekitar 4-12% energi matahari dalam pengujian ini yang dimanfaatkan menjadi usaha yang berguna dan sisanya akan hilang dalam sistem.

## Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian Pada Masyarakat (DP2M) DIKTI yang telah mendanai Penelitian Fundamental dengan Nomor Kontrak : 240a/H17.16/PG/2011 Tanggal 19 April 2011.

## Daftar Pustaka

1. M. Z. Hossain, A. K. M. Islam, and D.G. Infield, "PV-Wind hybrid system modelling for remote rural applications", *ISESCO Science and Technology Vision* 3 (2007), 59-64.
2. A. N. Celik and N. Acikgoz, "Modeling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four- and five-parameter models", *Applied Energy* 84 (2007), 1-15.



3. R. Petela, "An approach to the exergy analysis of photosynthesis", *Solar Energy* 82 (2008), 311-328.
4. A. S. Joshi, I. Dincer, and B. V. Reddy, "Thermodynamic assessment of photovoltaic systems", *Solar Energy* 83 (2009) 1139-1149.
5. F. Sarhaddi, S. Farahat, H. Ajam, A. Behzadmehr, "Exergetic performance evaluation of a solar photovoltaic (PV) array", *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4 (2010), 502-519.
6. A. D. Sahin, I. Dincer, and M. A. Rosen, "Thermodynamic analysis of solar photovoltaic cell systems", *Solar Energy Materials & Solar Cells* 91 (2007), 153-159.
7. A. Hepbasli, "A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12 (2008), 593-661.
8. M. A. Rosen and C. A. Bulucea, "Using exergy to understand and improve the efficiency of electrical power technologies", *Entropy* 11 (2009), 820-835.
9. E. Radziemska, "Performance analysis of photovoltaic-thermal integrated system", *International Journal of Photoenergy* 2009 (2009), 732093-732098.
10. T. Markvart and P. T. Landsberg, "Thermodynamics and reciprocity of solar energy conversion", *Physica E*. 14 (2002), 71-77.
11. P. Würfel. Thermodynamic limitations to solar energy conversion. *Physica E.*, 14 (2002) 18-26.
12. D. Infield, L. Mei, and U. Eicker. Thermal performance estimation of ventilated PV facades. *Solar Energy*, 76(1-3) (2004) 93-98.
13. V. Badescu, "Simple optimization procedure for silicon-based solar cell interconnection in a series parallel PV module", *Energy Conversion and Management* 47 (2006), 1146-1158.
14. D. Hamdani, Sudrajat, M. Thamrin, Daniel, "Penerapan stand alone photovoltaic system (SAPS) untuk back up energi listrik : peluang dan tantangan pengembangan energi terbarukan di Kalimantan Timur", Laporan Penelitian, Lembaga Penelitian Universitas Mulawarman (tidak dipublikasikan) (2009).
15. S. R. Wenham, M. A. Green, M. E. Watt, and R. Corkish. *Applied Photovoltaic*, 2<sup>nd</sup> edition ARC Centre for Advanced Silicon Photovoltaics and Photonics, Australia (2007).
16. R. A. Messenger and J. Ventre. *Photovoltaic Systems Engineering*, Second Edition, CRC Press LLC Boca Raton (2005).
17. A. S. Joshi, I. Dincer, and B. V. Reddy" Analysis of energy and exergy efficiencies for hybrid PV/T systems", *Int. J Low-Carbon Technologies* 6 (2011), 64-69.
18. G. N. Tiwari and S. Dubey, *Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications*, The Royal Society of Chemistry, Thomas Graham House, Science Park, Milton Road, Cambridge CB4 0WF, UK (2010).