

ANALISIS EKSERGI MODUL PV BERDASARKAN SPEKTRUM PANJANG GELOMBANG CAHAYA MATAHARI

Dadan Hamdani^{1,a)}, Lambang Subagiyo^{2,b)}

¹Program Studi Fisika FMIPA Universitas Mulawarman

Jl. Barong Tongkok No.4 Kampus Gn. Kelua Samarinda 75123

²Program Studi Pendidikan Fisika FKIP Universitas Mulawarman

Jl. Muara Pahu Kampus Gn. Kelua Samarinda 75123

E-mail: ^{a)}d.hamdani1973@gmail.com, ^{b)}subagiyo.pplhunmul@gmail.com

Abstrak

Kinerja modul PV dapat dianalisis dengan menggunakan metode energi dan eksergi didasarkan pada spektrum panjang gelombang sinar matahari yang memperhitungkan pengaruh potensial kimia dalam bentuk energi dan eksergi fotonik mengacu pada energi fotonik yang sampai pada modul PV selama pengujian (09:00 – 15:00). Berdasarkan metode ini, efek panjang gelombang sinar matahari pada spektrum sinar tampak (300 – 800 nm) berpengaruh pada kinerja PV dan hasil evaluasi menunjukkan bahwa energi fotonik lebih besar dibanding eksergi fotonik akibat sifat irreversibel pada proses sebenarnya.

Kata-kata kunci: energi dan eksergi, spektrum panjang gelombang, modul PV, fotonik, irreversibel

Abstract

PV modul performance can be evaluated in terms both energy and exergy based on wavelengths spectrum of the sun method, which take into account the contribution of chemical potential in term photonic energy and exergy corresponding to photonic energy of a PV module during tested (09:00 – 15:00). Based on this method, it is found that effect of wavelength of visible spectrum (300 – 800 nm) is essential on the PV performance and as the result of this evaluation is photonic energy higher than photonic exergy due to the irreversibilities of the real process.

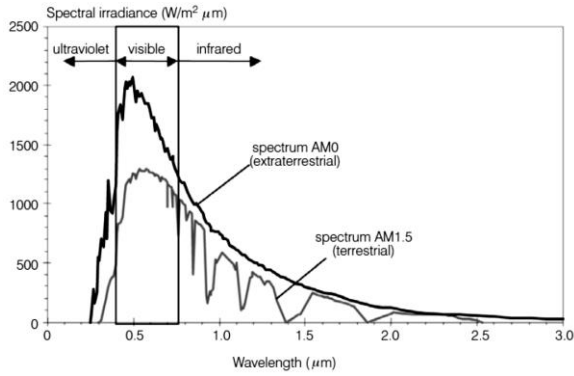
Keywords : energy and exergy, wavelengths spectrum, PV module , photonic, irreversibilities

1. Pendahuluan

Energi matahari terbentuk dari pusat matahari, ketika atom hidrogen berfusi menjadi bentuk helium melalui proses fusi nuklir. Energi yang diemisikan dari permukaan matahari dan diinterceptkan (diterima) oleh bumi diperkirakan sekitar 1.73×10^{14} kW, dimana rasionya terdiri dari 9 % radiasi ultraviolet (200 – 400 nm), 41 % radiasi cahaya tampak/visible (400 – 700 nm), dan 50 % radiasi infra merah/infrared (700 – 3000 nm), seperti ditunjukkan pada gambar 1. Jumlah daya yang diterima pada bagian atas atmosfer bumi relatif konstan dan diperkirakan sekitar 1368 kW/m^2 , nilai ini disebut konstanta matahari [Kalogirou, 2009].

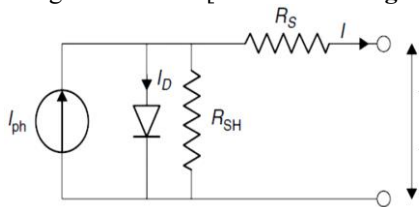
Fotovoltaik (PV) merupakan devais berbasis teknologi semikonduktor dengan kemampuan mengubah cahaya matahari yang mengenai permukaan modul PV menjadi energi listrik secara langsung. Ketika energi matahari dalam bentuk foton mengenai bahan semikonduktor, maka foton tersebut akan dipantulkan,

diabsorpsi atau ditransmisikan, dimana untuk elektron valensi atom yang mengabsorpsi foton akan mengalami penambahan energi dan akan melompat ke pita konduksi sebagai elektron bebas. Efek fotovoltaik dihasilkan dari absorpsi foton cahaya matahari pada daerah hubungan p–n yang menghasilkan pasangan elektron-hole (lubang), akibat timbulnya medan listrik pada daerah hubungan p–n tersebut menyebabkan timbul beda potensial akibatnya akan terjadi pemisahan muatan listrik, dimana elektron akan bergerak ke daerah tipe–n dan hole akan bergerak ke daerah tipe–p. Jika keduanya disambungkan dan dihubungkan dengan beban, maka akan terjadi aliran arus listrik selama cahaya Matahari mengenai permukaan hubungan p–n [Wenham, et.al, 2007 ; Kalogirou, 2009].



Gambar 1 Spektrum matahari pada AM0 dan AM1.5.

Analisis terhadap unjuk kerja sel PV menunjukkan bahwa daya keluaran dan efisiensi bergantung pada suhu sel dan irradiansi matahari. Gambar 2 menunjukkan rangkaian ekuivalen untuk sebuah sel PV. Dalam keadaan tidak disinari (*darkness*), sel photovoltaic tidak aktif dan bekerja sebagai sebuah dioda, yaitu hubungan p – n yang tidak menghasilkan arus dan tegangan. Jika dihubungkan dengan sebuah *external supply* dapat membangkitkan arus I_D yang disebut sebagai arus dioda [Celik and Acikgoz, 2007].



Gambar 2 Model sel PV satu diode

Model sel PV digambarkan sebagai suatu rangkaian dioda tunggal (*single exponential*), dimana model matematika untuk rangkaian ekuivalen ini dinyatakan dalam bentuk [Celik and Acikgoz, 2007 ; Sarhaddi, et.al, 2010] :

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

dimana I_L arus yang dibangkitkan oleh cahaya (A), I_0 arus jenuh balik dioda p – n (A), R_s hambatan seri sel PV (Ω), R_{sh} hambatan shunt sel PV (Ω), N_s Jumlah sel yang tersusun seri, n_i faktor ideal dioda, dan V_T tegangan termal yang bergantung pada suhu sel (V).

Ketidakkurასian analisis 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 [Hepbasli, 2008, Rosen and Bulucea, 2009]. Hukum kedua termodinamika terkait dengan

entropi yang menyatakan bahwa total entropi dari suatu sistem termodinamika terisolasi cenderung untuk meningkat seiring dengan meningkatnya waktu, mendekati nilai maksimumnya. 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 [Radziemska, 2009].

Dalam tulisan ini akan ditinjau pengaruh parameter lingkungan, yaitu irradiansi matahari terhadap kinerja PV dengan melakukan analisis yang didasarkan pada tinjauan energi dan eksergi dalam bentuk energi fotonik spektrum cahaya matahari yang sampai pada permukaan modul PV.

2. Metode Penelitian

A. Skema Eksperimen Pengujian Modul PV

Pengujian eksperimen melalui pengukuran kinerja PV dilakukan secara *outdoor* yang dimulai pukul 09.00 – 15.00 waktu setempat (Wilayah Samarinda, 116°15' 36" -117°24'16" BT dan 0°21'18" -1° 09'16" LS). Skema eksperimen pada pengujian PV terdiri dua buah modul PV Monokristalin Shinyoku (2 x 50 W dengan luasan sekitar 0,88 m²) yang dihubungkan secara seri yang diintegrasikan dengan kolektor udara berupa saluran yang dilengkapi dengan plat logam untuk menyerap udara panas yang bergerak di bagian bawah modul PV, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.

Irradiansi matahari diukur menggunakan Solar Power Meter TM206, sensor suhu digunakan Termometer Termokopel digital Lutron TM-903A *four channels* untuk mengukur suhu modul PV, suhu bagian belakang modul PV, suhu udara masuk (*inlet*) dan suhu udara keluar (*outlet*). Pengukuran suhu lingkungan digunakan termometer raksa yang diletakkan pada bagian atas modul PV. Pengukuran keluaran listrik digunakan *Digital Clamp Meter*, diantaranya arus keluaran modul PV (I_{sc}), tegangan keluaran modul PV (V_{oc}), arus yang tersimpan pada baterai (I_m), dan tegangan baterai (V_m).



Gambar 3 Skema pengujian modul PV (100 W_p)

B. Evaluasi Parameter Energi Fotonik

Energi satu foton dari radiasi Matahari yang sampai di permukaan sel PV dinyatakan dalam hubungan :

$$E_{n_f}(\lambda) = \frac{hc}{\lambda} \tag{2}$$

dimana h menyatakan konstanta Planck = 6.626×10^{-34} J.s, ν frekuensi foton (s^{-1}), c kelajuan cahaya = $2,998 \times 10^8$ ms⁻¹, dan λ panjang gelombang spektrum cahaya matahari (nm). Berdasarkan energi foton yang sampai pada permukaan modul PV, maka analisis terhadap energi dan eksergi modul PV didasarkan pada energi fotonik dinyatakan dalam persamaan (3 – 8) [Joshi, et.al, 2009 ; Rusirawan and Farkas, 2011] :

$$N_f = \left(\frac{4,4 \times 10^{21}}{1367} \right) G \tag{3}$$

$$\dot{E}_{n_f}(\lambda) = E_{n_f}(\lambda) N_f A \tag{4}$$

$$\dot{E}_{n_{PotKimia}} = \dot{E}_{n_f}(\lambda) \left(1 - \frac{T_C}{T_S} \right) \tag{5}$$

$$T_C = T_{Amb} + \frac{G}{0,8} (NOCT - 20^o) \tag{6}$$

$$\dot{E}x_{PotKimia} = \eta_{pc} \dot{E}_{n_{PotKimia}} \tag{7}$$

$$\eta_{pc} = \frac{VI}{GA} \tag{8}$$

dimana N_f menyatakan jumlah foton yang sampai pada permukaan modul PV per satuan waktu per satuan luas ; $\dot{E}_{n_f}(\lambda)$ menyatakan energio fotonik yang sampai pada permukaan modul PV (W) ; $\dot{E}_{n_{PotKimia}}$ menyatakan energi fotonik yang tersedia atau potensial kimia (W) ; $\dot{E}x_{PotKimia}$ menyatakan laju eksergi yang tersedia dari potensial kimia (W) ; T_S menyatakan suhu permukaan matahari (5777 K) ; T_{Amb} menyatakan suhu lingkungan ;

T_C menyatakan suhu sel PV ; η_{pc} menyatakan efisiensi konversi PV ; V menyatakan tegangan keluaran PV (V) ; I menyatakan arus keluaran PV (A) ; G menyatakan irradiansi matahari (W/m²) dan A luasan modul PV (m²).

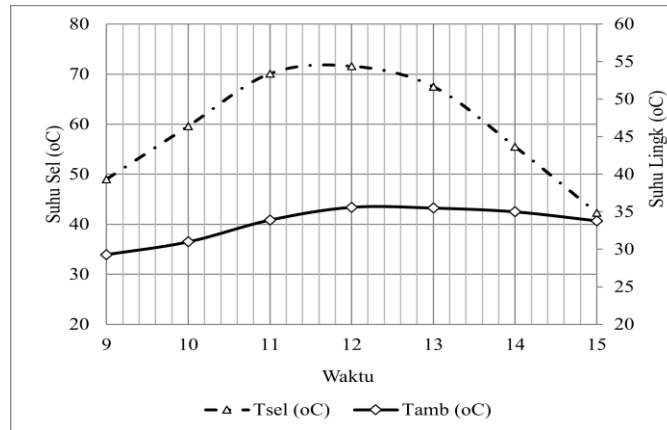
3. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengujian modul PV dilakukan pada Tanggal 10 Maret 2015 di Laboratorium Energi Alternatif FMIPA Universitas Mulawarman Samarinda dari pukul 09:00 – 15:00 waktu setempat dengan kondisi udara cerah berawan. Hasil pengujian kinerja modul PV ditunjukkan pada Tabel 1. Berdasarkan Teori Kuantum, cahaya matahari dapat dianggap sebagai suatu paket energi berupa foton yang memiliki energi yang bergantung pada frekuensi atau warna cahaya.

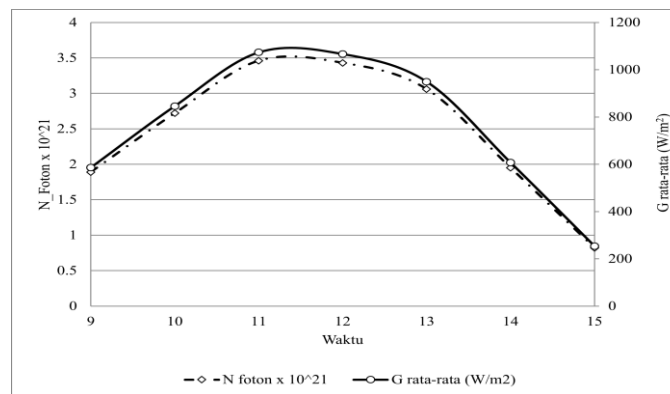
Ketika mencapai permukaan modul PV, foton akan berinteraksi dengan materi, sehingga elektron valensi atom yang mengabsorpsi foton akan mengalami penambahan energi dan akan melompat ke pita konduksi sebagai elektron bebas. Interaksi ini secara langsung menyebabkan peningkatan suhu sel PV yang bergantung pada intensitas dan lama penyinaran yang berpengaruh pada efisiensi konversi yang dihasilkan. Pada pengujian dalam lingkungan sebenarnya, peningkatan suhu sel tidak hanya disebabkan oleh interaksi foton dengan sel PV, tetapi juga dipengaruhi oleh suhu lingkungannya. Peningkatan irradiansi dan suhu lingkungan menyebabkan suhu sel PV naik, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.

Tabel 1 Hasil pengujian kinerja modul PV Tanggal 10 Maret 2015 (rata-rata tiap jam)

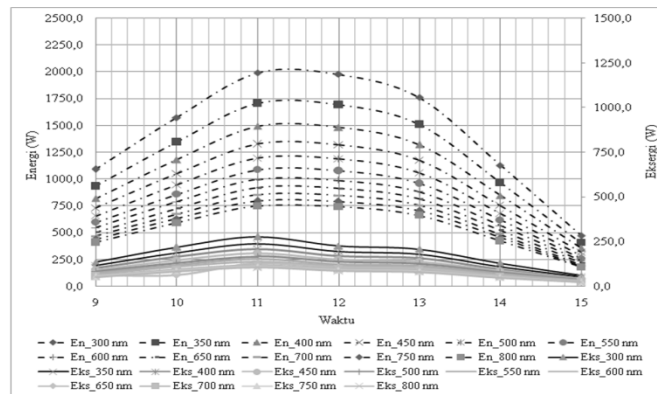
Waktu	V _{OC} (V)	V _b (V)	I _{SC} (A)	I _b (A)	Suhu (°C)		G (W/m ²)
					T _{Lingk}	T _{Sel}	
09:00	19,3	10,6	3,3	3,0	29,3	49,0	585,8
10:00	19,2	10,5	5,4	4,9	31,0	59,6	846,1
11:00	18,6	9,0	6,9	6,4	33,9	70,1	1073,5
12:00	18,4	10,0	5,5	5,1	35,6	71,6	1066,5
13:00	18,8	9,0	4,8	4,3	35,5	67,5	949,6
14:00	18,1	8,6	3,3	2,7	35	55,5	607,1
15:00	18,5	12,1	1,5	1,0	33,8	42,3	253,3



Gambar 4 Perubahan suhu sel PV akibat kondisi lingkungan pada saat pengujian



Gambar 5 Jumlah foton yang sampai pada permukaan modul PV per satuan luas per satuan waktu (1/m²s) yang berkorelasi dengan irradiansi matahari G.



Gambar 6 Variasi energi dan eksergi fotonik dalam satu hari pengamatan terhadap spektrum panjang gelombang cahaya (variasi antara 300 – 800 nm)

Jumlah foton yang sampai pada permukaan PV tergantung pada irradiansi G, dimana makin besar intensitas matahari, maka jumlah foton yang sampai untuk dikonversi menjadi listrik juga semakin besar. Hasil pengamatan yang dilakukan menunjukkan irradiansi maksimum dalam hari pengamatan tercatat sekitar 1073,5 W/m² pada pukul 11.00 yang berkorelasi dengan jumlah foton yang sampai sekitar

3,46 x 10²¹ buah/m²s dan irradiansi minimum tercatat sekitar 253,3 W/m² pada pukul 15.00 yang berkorelasi dengan jumlah foton yang sampai pada permukaan modul sekitar 8,2 x 10²⁰ buah/m²s, seperti ditunjukkan pada Gambar 5.

Spektrum cahaya yang dipancarkan oleh matahari meliputi jangkauan panjang gelombang yang cukup lebar, dimana untuk kasus yang ditinjau spektrum

panjang gelombang hanya berada pada kisaran (300 – 800 nm) yang berkaitan dengan daerah spektrum cahaya tampak (*visible*), sedangkan untuk spektrum di luar daerah panjang gelombang tersebut, yaitu < 300 nm (UV) dan > 800 nm (infra merah) tidak dibahas dalam tulisan ini. Hal ini disebabkan spektrum cahaya dengan panjang gelombang di luar cahaya tampak kurang efektif untuk mampu menghasilkan elektron bebas yang dapat menghasilkan energi listrik [Wenham, et.al, 2007].

Analisis energi dan eksergi modul PV didasarkan pada hasil perhitungan dengan menggunakan variasi panjang gelombang yang berada pada spektrum panjang gelombang antara 300 – 800 nm. Hasilnya ditunjukkan pada Gambar 6 yang merepresentasikan variasi energi fotonik (potensial kimia) dan eksergi yang berkaitan dengan energi fotonik modul PV dalam satu hari pengamatan. Pengaruh panjang gelombang cahaya matahari dalam daerah spektrum cahaya tampak akan menyebabkan nilai energi (potensial kimia) dan eksergi (laju eksergi yang tersedia dari potensial kimia) menjadi besar untuk panjang gelombang cahaya kecil ($\lambda = 300$ nm).

Hasil analisis menunjukkan bahwa energi fotonik modul PV lebih besar dari eksergi fotonik, hal ini berkaitan dengan proses *irreversibilitas* yang berkaitan dengan keadaan sebenarnya dari sistem konversi yang memperhitungkan eksergi yang hilang selama proses, misalnya pemanasan modul yang akan dibuang ke lingkungan.

4. Simpulan

Analisis energi dan eksergi modul PV didasarkan pada energi fotonik sangat dipengaruhi oleh spektrum panjang gelombang cahaya yang sampai pada permukaan modul PV dan berkorelasi langsung dengan intensitas penyinaran matahari yang berkaitan dengan jumlah foton yang terlibat dalam proses konversi. Hasil analisis menunjukkan bahwa energi dan eksergi fotonik bernilai tinggi untuk panjang gelombang pendek, selain itu dengan meninjau proses sebenarnya yang terjadi selama proses konversi energi fotonik selalu lebih besar dari eksergi fotonik hal ini disebabkan karena proses *irreversibilitas* yang berkaitan dengan eksergi yang hilang akibat perubahan menjadi bentuk eksergi lain, misalnya pemanasan modul yang akan dibuang ke lingkungan.

Ucapan Terimakasih

Disampaikan kepada Saudara Gatot Aprianto dan Saudara Triyono Widadi yang telah banyak meluangkan waktu dalam membantu melakukan *setting* peralatan dan pengambilan data lapangan.

Daftar Acuan

- [1]. 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), pp.1–15.
- [2]. 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), pp. 593–661.
- [3]. A S. Joshi, I. Dincer and B V. Reddy, Thermodynamic assessment of photovoltaic systems. *Solar Energy*, 83 (2009), pp. 1139-1149.
- [4]. S. Kalogirou, *Solar Energy Engineering : Processes And Systems*, Elsevier's Science & Technology (2009).
- [5]. E. Radziemska, Performance analysis of photovoltaic-thermal integrated system, *Hindawi Publishing Corporation Journal of Thermodynamics* Volume 2009.
- [6]. M A. Rosen and C A. Bulucea, Using exergy to understand and improve the efficiency of electrical power technologies, *Entropy*, 11 (2009), pp. 820-835.
- [7]. D. Rusirawan and I. Farkas, Exergetic assessment of polycrystalline and amorphous photovoltaic modules in different methods. *Synergy in the Technical Development of Agriculture and Food Industry (Synergy 2011)* Godollo, Hungary 9 – 15 October 2011.
- [8]. F. Sarhaddi, F., S. Farahat, H. Ajam, and A. Behzadmehr. Exergetic performance evaluation of a solar photovoltaic (PV) Array, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(3) (2010), pp. 502-519.
- [9]. S R. Wenham, M A. Green., M E. Watt and R. Corkish, *Applied Photovoltaic*, 2nd edition ARC Centre for Advanced Silicon Photovoltaics and Photonics (2007).

