

## Analisis Energi dan Eksergi Modul Surya 50 WP Tipe Polikristalin

**Kapenga Tana Homba, Matheus M. Dwinanto\*, Dominggus G. H. Adoe**  
Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana  
Jl. Adi Sucipto, Penfui, Kupang, Nusa Tenggara Timur, 85001 Indonesia  
\*E-mail: matheus.dwinanto@staf.undana.ac.id

### Abstract

*In this modern era, electricity has become a basic necessity so it is very necessary to sustain people lives and encourage economic growth in a region. The solar photovoltaic module has been used as a power plant in remote area thereby increasing the electrification ratio. In its operation the solar photovoltaic module generates electrical energy and thermal energy from the intensity of the solar radiation absorbed. One type of the solar photovoltaic module that is widely used is polycrystalline. This paper aims to examine the energy and exergy analysis of 50 WP solar photovoltaic module polycrystalline type based on sunny weather conditions for 4 days in October 2019 in Kupang. Experimental data is used to calculate the output power, exergy input, thermal exergy, electrical exergy, exergy loss, energy efficiency and exergy efficiency of the system. Increased the intensity of the solar radiation will increase the output power and exergy input but result in the exergy loss greater than thermal exergy and electrical exergy. The module surface temperature has a great influence on exergy efficiency. Energy efficiency is relatively constant, ranging from 19.6% to 19.9%. In contrast, the exergy efficiency is quite fluctuating, ranging from 42.09% to 54.19%.*

**Keywords:** solar photovoltaic, polycrystalline, energy efficiency, exergy efficiency

### Abstrak

Di era modern ini, listrik telah menjadi kebutuhan dasar sehingga sangat diperlukan untuk menopang kehidupan masyarakat dan mendorong pertumbuhan ekonomi suatu daerah. Modul surya telah digunakan sebagai pembangkit listrik di daerah pelosok sehingga meningkatkan rasio elektrifikasi. Dalam pengoperasiannya modul surya menghasilkan energi listrik dan termal dari intensitas radiasi matahari yang diserap. Salah satu tipe modul surya yang banyak digunakan adalah *polikristalin*. Makalah ini bertujuan untuk mengkaji analisis energi dan eksergi pada modul surya 50 WP tipe *polikristalin* berdasarkan kondisi cuaca cerah selama 4 hari pada bulan Oktober 2019 di Kupang. Data eksperimen digunakan untuk menghitung daya luaran, masukan eksergi, eksergi termal, eksergi elektrik, kerugian eksergi, efisiensi energi dan efisiensi eksergi dari sistem tersebut. Meningkatnya intensitas radiasi matahari akan meningkatkan daya luaran dan masukan eksergi tetapi juga mengakibatkan kerugian eksergi yang lebih besar dibandingkan eksergi termal dan eksergi elektrik. Temperatur permukaan modul memiliki pengaruh yang besar terhadap efisiensi eksergi. Efisiensi energi relatif konstan, yaitu berkisar antara 19,6% sampai 19,9%. Sebaliknya efisiensi eksergi cukup fluktuatif yaitu berkisar antara 42,09% sampai 54,19%.

**Kata kunci:** modul surya, polikristalin, efisiensi energi, efisiensi eksergi

### 1. Pendahuluan

Modul surya telah banyak digunakan sebagai pembangkit energi listrik untuk rumah-rumah di daerah pelosok dan terpencil yang tidak terjangkau jaringan listrik PLN, sehingga dengan adanya listrik di daerah tersebut maka dapat meningkatkan minat baca dan belajar, taraf hidup, kesehatan, keamanan dan mempercepat warganya memperoleh informasi melalui media elektronik [1]. Dalam pengoperasiannya, radiasi matahari yang diterima oleh modul surya tidak hanya menghasilkan energi listrik tetapi juga energi termal yang sebagian terbuang ke lingkungan, sehingga analisis energi dan eksergi perlu dilakukan untuk mendapatkan informasi tentang kinerja termodinamika sistem tersebut secara lengkap [2].

Analisis energi didasarkan pada hukum pertama termodinamika sehingga tidak mempertimbangkan irreversibilitas sistem. Analisis eksergi didasarkan pada hukum kedua termodinamika yang mempertimbangkan irreversibilitas sehingga diketahui potensi kerja maksimum yang diperoleh dari energi yang dihasilkan atau yang dikonsumsi oleh sistem [3]. Eksergi dapat dengan jelas mengidentifikasi peningkatan efisiensi dan pengurangan kerugian termodinamika. Eksergi juga dapat mengidentifikasi manfaat energi dan ekonomi dari teknologi energi dengan lebih baik daripada analisis energi. Dengan demikian, eksergi memiliki peran penting dalam meningkatkan efisiensi sistem dan teknologi energi [4]. Hal ini yang mendorong beberapa peneliti melakukan analisis energi dan eksergi di modul surya pada dasawarsa ini.

Studi akumulasi partikel debu yang mengendap secara alamiah terhadap potensial listrik maksimum dari 3 tipe modul surya yaitu, *monokristalin*, *polikristalin*, dan *amorfos* telah dianalisis. Hasilnya menunjukkan bahwa partikel debu mengakibatkan timbulnya bayangan di permukaan modul sehingga mengakibatkan penurunan potensial listrik maksimum 6% untuk *monokristalin* dan *polikristalin* sedangkan untuk *amorfos* adalah 12% [5]. Evaluasi kinerja energi 3 tipe modul surya tersebut juga telah dilakukan selama musim dingin di Taxila, Pakistan. Hasilnya menunjukkan bahwa modul *monokristalin*, dan *polikristalin* menunjukkan kinerja yang lebih baik dalam kondisi radiasi tinggi. Modul surya *amorfos* juga menunjukkan kinerja yang baik dalam radiasi rendah karena karakteristik penyerapan cahaya yang lebih baik. Dengan demikian menunjukkan rasio kinerja rata-rata yang lebih tinggi. *Monokristalin* menunjukkan efisiensi energi rata-rata bulanan yang lebih tinggi dan lebih efisien [6]. Pengaruh sudut kemiringan terhadap efisiensi energi 3 tipe modul tersebut juga telah dianalisis berdasarkan iklim di Polandia. Disimpulkan bahwa pada musim panas sudut kemiringan terbaik untuk ketiga jenis modul surya tersebut adalah 35 – 45° sedangkan pada musim dingin adalah 65° [7].

Analisis energi modul surya tipe *monokristalin*, dan *polikristalin* juga telah dilakukan untuk mengetahui kinerja elektrik dalam kondisi laboratorium. Hasilnya menunjukkan bahwa *monokristalin* memiliki efisiensi 19,02% lebih tinggi dibandingkan polikristalin [8]. Analisis yang sama juga dilakukan untuk kondisi cuaca pada bulan Agustus di Bursa, Turki, dimana daya rata-rata yang dibangkitkan oleh *monokristalin* lebih tinggi 5,68% dibandingkan *polikristalin* sedangkan pada intensitas radiasi matahari maksimum, monokristalin menghasilkan daya lebih tinggi 8,69% [9]. Pada tahun yang sama, studi eksperimen di modul surya 50 WP dengan variasi sudut kemiringan panel surya mengikuti arah pergerakan matahari (10 - 45°), dan posisi horizontal telah dilakukan untuk menganalisis daya yang dihasilkan (analisis energi). Hasil studi ini menunjukkan bahwa modul surya dengan posisi mengikuti arah pergerakan matahari akan menghasilkan daya yang lebih besar dibandingkan dengan posisi horizontal [10].

Temperatur permukaan berpengaruh besar terhadap kinerja modul 36 WP, dan efisiensi eksergi dapat ditingkatkan bila kalor dapat dikeluarkan atau dibuang dari permukaan modul. Kerugian eksergi meningkatkan dengan meningkatnya temperatur modul, dan efisiensi eksergi lebih tinggi daripada efisiensi energi [11]. Evaluasi kinerja energi dan eksergi modul surya selama satu tahun pengukuran juga telah dilakukan berdasarkan iklim di India Utara. Evaluasi ini berdasarkan intensitas radiasi matahari dan kecepatan angin, dan ditemukan bahwa efisiensi energi dan eksergi lebih tinggi pada pagi dan sore hari dibandingkan dengan siang hari. Hal ini disebabkan oleh variasi temperatur modul sepanjang hari. Kinerja terbaik modul terjadi di bulan Februari. Efisiensi eksergi dalam beberapa bulan seperti Februari, Mei, Juni, September, Oktober, dan Desember telah ditemukan lebih tinggi daripada efisiensi energi, dan sebaliknya ditemukan pada sisa bulan yang lain [12].

Analisis kinerja secara eksperimen juga telah dilakukan untuk mengevaluasi efisiensi energi dan eksergi di modul surya 300 WP yang dipasang di Poornima University, Jaipur, India. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa efisiensi energi bervariasi antara 9% hingga 14,41% dan efisiensi eksergi berkisar antara 45,80% hingga 68,16%. Temperatur modul memiliki pengaruh yang cukup besar terhadap efisiensi energi dan eksergi, dan dapat ditingkatkan dengan menghilangkan kalor dari permukaan modul. Kalor bisa dihilangkan dengan bantuan air atau udara lingkungan [13]. Metode yang sama juga telah dilakukan di modul surya 80 WP tipe *monokristalin* berdasarkan kondisi langit cerah dan berawan pada bulan Maret 2018 di Senegal. Namun, hasil yang ditemukan berbeda dimana efisiensi eksergi lebih kecil daripada efisiensi energi [14].

Pada tahun 2019, analisis ini diterapkan di modul 260 WP tipe *polikristalin* berdasarkan kondisi cuaca selama tahun 2018 di Baghdad, Irak. Hasil studi ini menunjukkan bahwa efisiensi energi lebih besar daripada efisiensi eksergi selama pengujian berlangsung [15]. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja energi dan eksergi modul surya 50 WP tipe *polikristalin* berdasarkan kondisi cuaca cerah pada bulan Oktober 2019 di kota Kupang.

## 2. Material dan metode penelitian

Spesifikasi modul surya yang digunakan dalam penelitian ini disajikan dalam Tabel 1 dan studi eksperimental ini dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin, Program Studi Teknik Mesin, FST, Universitas Nusa Cendana Kupang, dengan waktu pengambilan data selama 4 hari, yaitu 21 – 24 Oktober 2019.

### 2.1 Analisis Energi

Daya luaran elektrik modul surya hasil pengukuran dinyatakan oleh persamaan berikut [2]:

$$P_{el} = V \cdot I \quad (1)$$

dengan :

$P_{el}$  : daya luaran elektrik hasil pengukuran (W)

$V$  : tegangan luaran hasil pengukuran (volt)

$I$  : arus luaran hasil pengukuran (ampere)

Efisiensi energi modul surya hasil pengukuran dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut [11]:

$$\eta_E = \frac{V \cdot I}{G \cdot A} \quad (2)$$

dengan:

G : radiasi matahari hasil pengukuran (W/m<sup>2</sup>)

A : luas permukaan modul surya (m<sup>2</sup>)

**Tabel 1.** Spesifikasi modul surya

Modul Surya	
<i>Modul Type</i>	SP-50-P36
<i>Rated Max Power (Pmax)</i>	50W
<i>Curret at Pmax ( Imp)</i>	2.85A
<i>Voltage at Pmax (Vmp)</i>	17.6V
<i>Short- Circuit Current (Isc)</i>	3.04A
<i>Open Circuit Voltage (Voc)</i>	22.5V
<i>Dimension (mm)</i>	700 × 510 × 30
<i>Number of Cells</i>	36
<i>Max. System Voltage</i>	700V
<i>Temperature Range</i>	-45°C ~ +80°C
<i>All Technichal Data at Standard Test Condition</i>	
AM = 1,5 E = 1000 W/m <sup>2</sup> T <sub>C</sub> = 25°C	

## 2.2 Analisis Eksergi

Analisis eksergi mencakup pertimbangan kualitas atau kapabilitas energi. Keseimbangan eksergi di modul surya dapat dituliskan sebagai [2]:

$$EX_{in} = EX_{out} + EX_{loss} \tag{3}$$

dengan:

EX<sub>in</sub> : eksergi masuk (W)

EX<sub>out</sub> : eksergi luaran (W)

EX<sub>loss</sub> : kerugian eksergi (W)

Eksergi masuk modul surya hanya mencakup eksergi intensitas radiasi matahari yang dinyatakan oleh persamaan:

$$EX_{in} = G A \left[ 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{T_a}{T_s} \right) + \frac{1}{3} \left( \frac{T_a}{T_s} \right)^4 \right] \tag{4}$$

dengan:

T<sub>a</sub> : temperatur sekitar (K)

T<sub>s</sub> : temperatur matahari (K)

Eksergi luaran di modul surya dapat dihitung sebagai:

$$EX_{out} = EX_{th} + EX_{elec} \tag{5}$$

dengan:

EX<sub>th</sub> : eksergi termal (W)

EX<sub>elec</sub> : eksergi elektrik (W)

Eksergi termal dinyatakan sebagai rugi kalor dari permukaan modul ke lingkungan yang dihitung menggunakan persamaan berikut [16]:

$$EX_{th} = Q \left[ 1 - \frac{T_a}{T_m} \right] \tag{6}$$

dengan Q adalah kalor yang dilepaskan ke lingkungan sekitar, yaitu

$$Q = UA (T_m - T_a) \tag{7}$$

dan T<sub>a</sub> dan T<sub>m</sub> adalah temperatur lingkungan sekitar (K) dan temperatur modul (K).

Koefisien rugi kalor menyeluruh modul mencakup rugi perpindahan kalor konveksi dan radiasi, dan dihitung menggunakan persamaan:

$$U = h_{conv} + h_{rad} \tag{8}$$

Koefisien perpindahan kalor konveksi dihitung menggunakan persamaan berikut [17]:

$$h_{conv} = 2,8 + 3,0 V_w \tag{9}$$

Koefisien perpindahan kalor radiasi dihitung menggunakan persamaan berikut [2]:

$$h_{rad} = \epsilon \sigma (T_{sky} + T_m) (T_{sky}^2 + T_m^2) \tag{10}$$

dengan temperatur langit efektif adalah:

$$T_{sky} = T_a - 6 \tag{11}$$

Temperatur modul dapat dihitung dengan berdasarkan nilai NOCT, yaitu:

$$T_m = T_a + (NOCT - 20) \cdot \frac{G}{800} \tag{12}$$

Eksergi elektrik merupakan daya luaran elektrik modul surya, yaitu:

$$Ex_{elec} = V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF \tag{13}$$

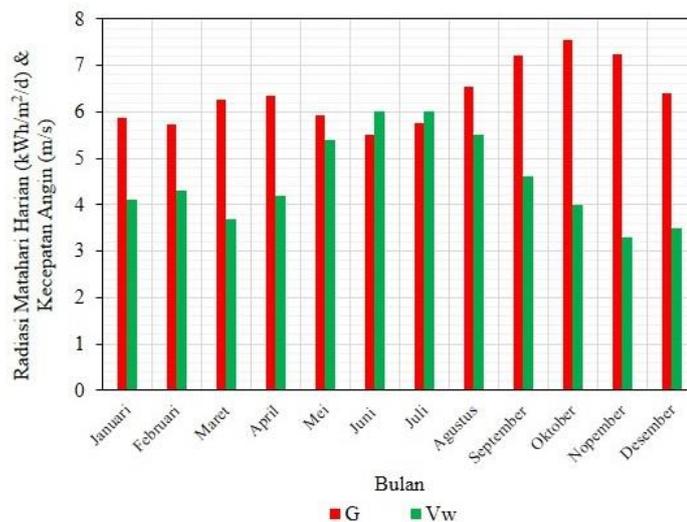
Tabel 2. menyajikan parameter-parameter masukan untuk analisis eksergi.

**Tabel 2.** Parameter masukan untuk analisis

Parameter Masukan	Nilai
NOCT (Nominal operating cell temperature)	41°C
Konstanta Stefan Boltzmann ( $\sigma$ )	$5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
Emisivitas modul ( $\epsilon$ )	0,9
Temperatur matahari	5777 K

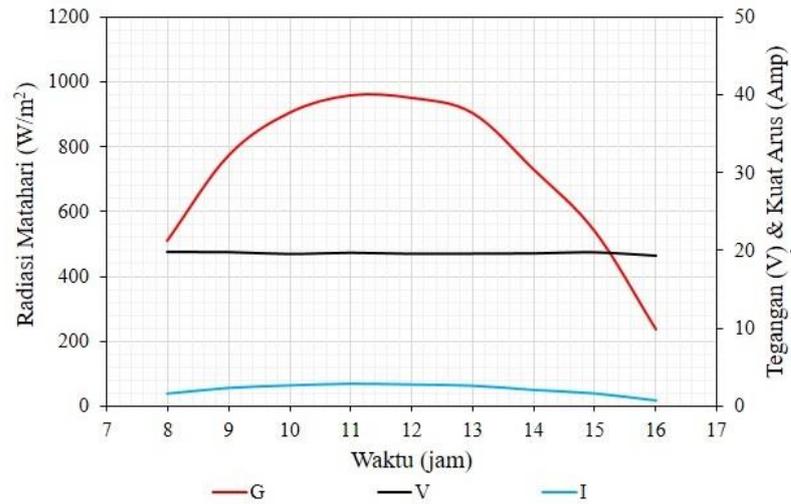
### 3. Hasil dan Pembahasan

Nilai eksergi di modul surya sangat dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari dan kecepatan angin. Nilai intensitas radiasi matahari dan kecepatan angin rata-rata di kota Kupang selama tahun 2019 disajikan pada Gambar 1. Data ini diperoleh dari *RETScreen Expert*, dan terlihat bahwa nilai rata-rata terbesar intensitas radiasi matahari terjadi pada bulan Oktober, yaitu  $7,54 \text{ kWh/m}^2/\text{s}$  sedangkan terkecil terjadi pada bulan Juni, yaitu  $5,52 \text{ kWh/m}^2/\text{s}$ . Untuk kecepatan angin rata-rata terbesar terjadi pada bulan Juni dan Juli, yaitu  $6 \text{ m/s}$  sedangkan terkecil terjadi pada bulan November, yaitu  $3,3 \text{ m/s}$ .



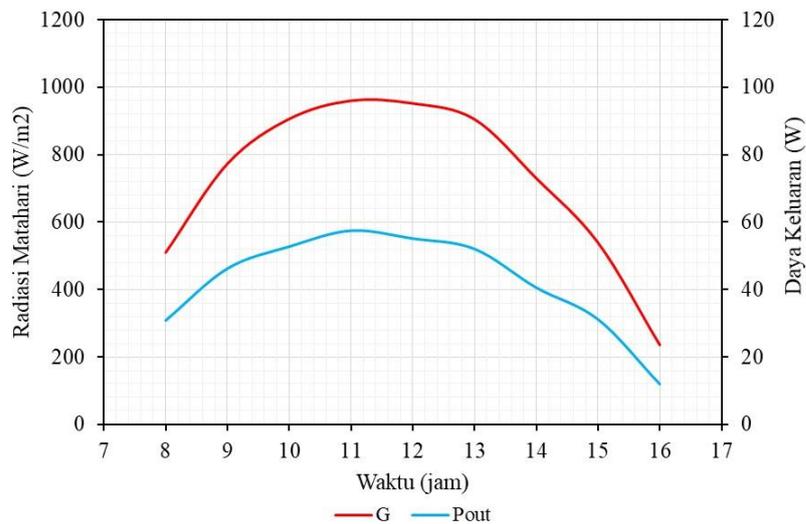
**Gambar 1.** Intensitas radiasi matahari dan kecepatan angin rata-rata di kota Kupang selama tahun 2019.

Gambar 2 menyajikan variasi intensitas radiasi matahari terhadap tegangan dan kuat arus rata-rata yang dihasilkan modul surya selama penelitian. Pada gambar ini terlihat bahwa intensitas radiasi matahari sangat berpengaruh terhadap kuat arus yang dihasilkan di mana semakin besar intensitas radiasi matahari maka kuat arus yang dihasilkan juga akan semakin besar. Nilai kuat arus terbesar yang dihasilkan terjadi pada pukul 11:00 yaitu 2,92 ampere sedangkan nilai terkecil terjadi pada pukul 16:00 yaitu 0,62 ampere. Nilai tegangan yang dihasilkan modul surya relatif konstan, yaitu berkisar antara 19,31 – 19,77 volt dengan intensitas radiasi matahari berkisar antara  $236,6 - 960,4 \text{ W/m}^2$ .



**Gambar 2.** Intensitas radiasi matahari vs tegangan dan kuat arus.

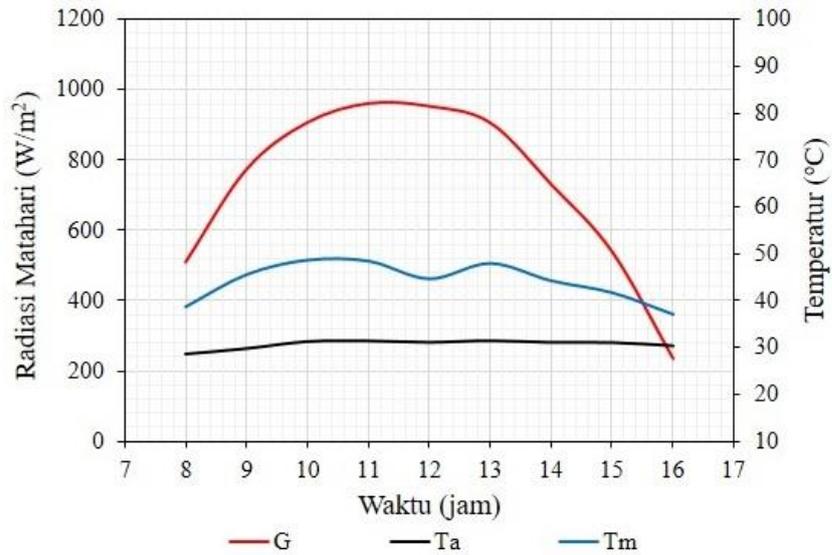
Daya keluaran modul surya lebih dipengaruhi oleh kuat arus yang dibangkitkan dan Gambar 3 menyajikan variasi intensitas radiasi matahari terhadap daya keluaran modul surya, dan bentuk grafiknya mengikuti intensitas radiasi matahari di mana semakin besar intensitas radiasi matahari perbedaan antara keduanya semakin besar. Nilai daya keluaran tertinggi dihasilkan pada pukul 11:00 sedangkan terendah pada pukul 16:00.



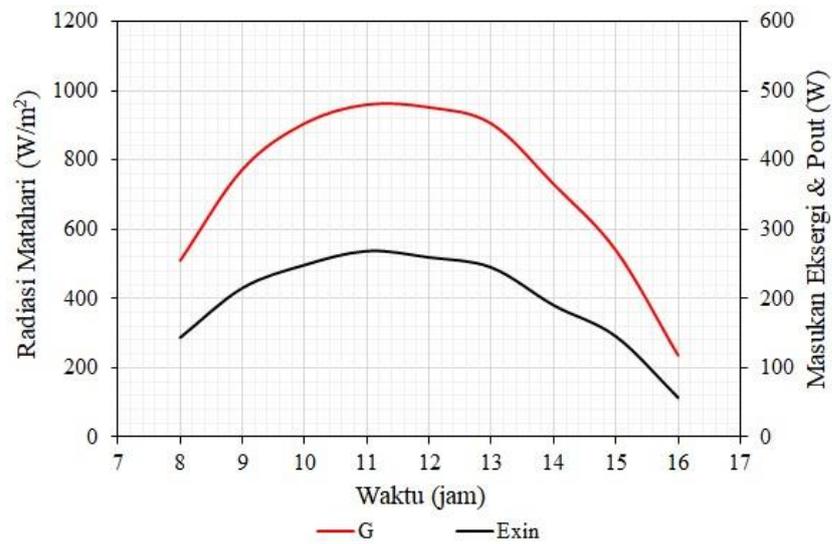
**Gambar 3.** Intensitas radiasi matahari vs daya keluaran.

Variasi intensitas radiasi matahari terhadap temperatur lingkungan, dan temperatur permukaan modul surya disajikan pada Gambar 4. Kecepatan angin sangat berpengaruh pada temperatur permukaan modul sehingga akan mempengaruhi koefisien perpindahan kalor konveksi antara permukaan modul dan udara lingkungan. Selama penelitian ini, kecepatan angin bervariasi antara 0,4 – 1,2 m/s. Hal ini yang mengakibatkan temperatur permukaan modul fluktuatif, di mana nilai tertinggi pada pukul 10:00, yaitu 48,55°C dan terendah pada pukul 16:00, yaitu 36,95°C.

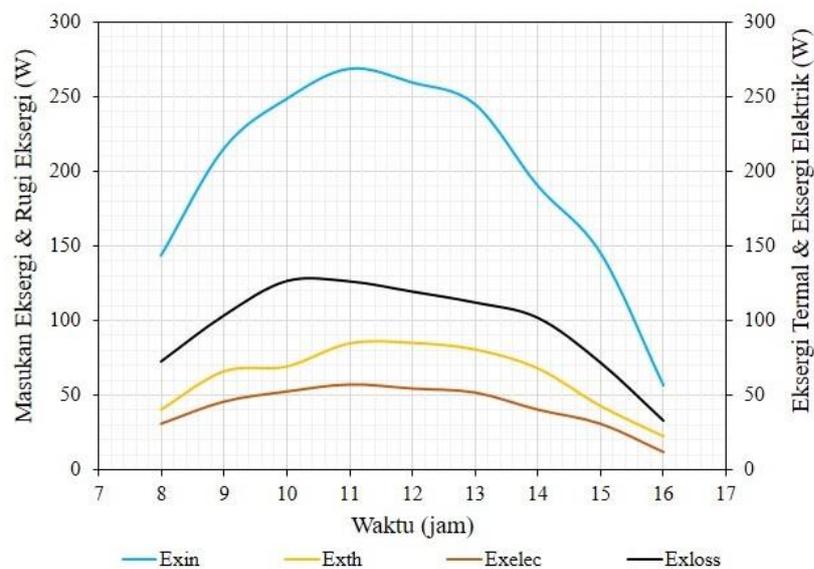
Gambar 5 menyajikan variasi intensitas radiasi matahari terhadap masukan eksergi di modul surya. Bentuk grafik masukan eksergi mengikuti intensitas radiasi matahari, dan semakin besar intensitas radiasi matahari maka semakin besar perbedaan antara keduanya. Masukan eksergi di modul surya akan diekstrak menjadi eksergi termal dan eksergi elektrik. Pada Gambar 6 terlihat bahwa masukan eksergi yang diekstrak menjadi eksergi termal dan eksergi elektrik selama penelitian ini adalah ±33,21% dan ±21,40%. Terdapat rugi eksergi yang tidak dapat dihindari akibat ireversibilitas di dalam modul surya dan nilainya ±45,39%.



**Gambar 4.** Intensitas radiasi matahari vs temperatur lingkungan, dan temperatur modul.

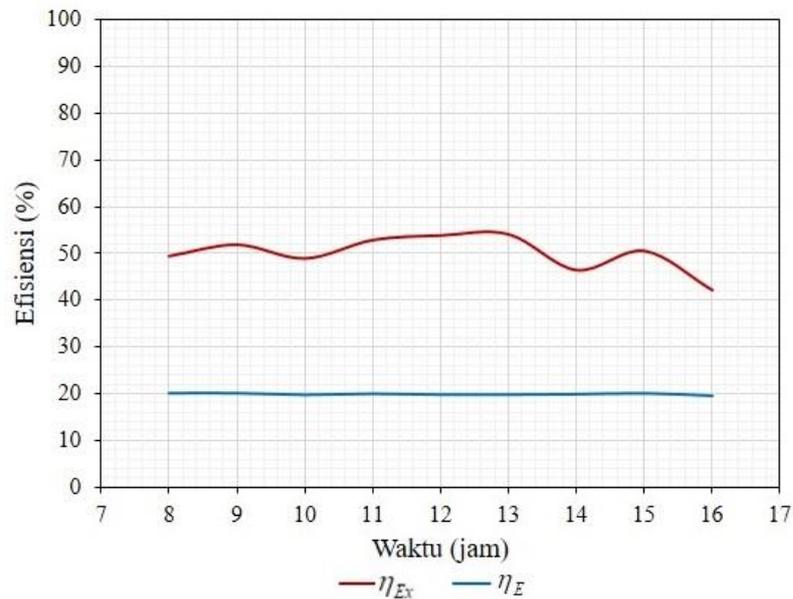


**Gambar 5.** Radiasi matahari vs masukan eksergi.



**Gambar 6.** Masukan eksergi, rugi eksergi, eksergi termal, dan eksergi elektrik.

Gambar 7 menyajikan efisiensi eksergi dan energi yang dihasilkan modul surya. Pada gambar ini terlihat bahwa efisiensi energi relatif konstan selama penelitian dan nilainya berkisar antara  $\pm 19,6 - 19,98\%$ . Berbeda dengan efisiensi eksergi yang nilainya cukup fluktuatif, yaitu berkisar antara  $\pm 42,09 - 54,19\%$ .



Gambar 7. Efisiensi eksergi dan energi

#### 4. Kesimpulan

Selama waktu penelitian ini, terlihat bahwa meningkatnya intensitas radiasi matahari akan meningkatkan daya luaran dan masukan eksergi tetapi mengakibatkan kerugian eksergi yang lebih besar dibandingkan eksergi termal dan eksergi elektrik yang dihasilkan. Temperatur permukaan modul memiliki pengaruh yang besar terhadap efisiensi eksergi tetapi tidak berpengaruh terhadap efisiensi energi. Efisiensi energi relatif konstan yaitu berkisar antara 19,6% sampai 19,9%. Sebaliknya efisiensi eksergi cukup fluktuatif yaitu berkisar antara 42,09% sampai 54,19%.

#### Ucapan Terima Kasih

Terima kasih disampaikan kepada Kepala Laboratorium Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana yang telah membantu dalam penelitian ini.

#### Daftar Pustaka

- [1] Dwinanto, M.M., Jacob, Y.M.Y., 2018, "Social Impact of Installing Solar Home Systems with Energy Saving Lights in Dusun Niskolen", Prosiding SNTTM XVII: 44–47.
- [2] Sudhakara, K., Srivastava, T., 2013, "Energy and Exergy Analysis of 36 W solar Photovoltaic Module", International Journal of Ambient Energy, 35(1): 51–57.
- [3] Dwinanto, M.M., Prajitno., Suhanan., 2017, "Exergy Analysis of a Dual-Evaporator Refrigeration Systems," AIP Conference Proceedings, 1788(1): 030011.
- [4] Bulucea, C.A., Rosen, M.A., 2009, "Using Exergy to Understand and Improve the Efficiency of Electrical Power Technologies", Entropy, 11: 820–835.
- [5] Cabanillas, R.E., Munguia, H., 2011, "Dust Accumulation Effect on Efficiency of Si Photovoltaic Modules", Journal of Renewable and Sustainable Energy, 3(4): 043114.
- [6] Ali, H.M., Ali, M., Bashir, M.A., Khalil, S., Siddiqui, M., 2014, "Comparison of Performance Measurement of Photovoltaic Modules during Winters Months in Taxila, Pakistan", 3: 1–8.
- [7] Majdak, M., 2017, "Variability of Photovoltaic Panels Efficiency Depending on the Value of the Angle of Their Inclination Relative to the Horizon," E3S Web of Conferences, 13: 03001.
- [8] Dobrzanski, L.A., Drygała, A., Szczęsna, M., Szindler, M., 2013, "Electrical Properties Mono & Polycrystalline Silicon Solar Cells", Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 59(2): 67–74.
- [9] Tascioglu, A., Taskin, O., Vardar, A., 2016, "A Power Case Study for Monocrystalline and Polycrystalline Solar Panels in Bursa City, Turkey", International Journal of Photoenergy, 2016: 752–759.
- [10] Diniardy, E., Mukti, S.H., Ramadhan, A.I., 2016, "Analisis Desain Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Kapasitas 50 WP," Jurnal Teknik, 37(2): 59–63.

- [11] Khare, M., Shukla, A., Shukla, K.N., 2015, “*Experimental Exergetic Performance Evaluation of Solar PV Module*,” International Journal of Scientific and Research Publication, 5(1): 1–9.
- [12] Kumar, A., Pandey, A.K., Pant, P.C., Sastry, O.S., Tyagi, S.K., 2015, “*Energy and Exergy Performance Evaluation of a Typical Solar Photovoltaic Module*”, Thermal Science, 19(2): S625–S636.
- [13] Rawat, P., 2017, “*Exergy Performance Analysis of 300 WP Solar Photovoltaic Module*”, International Journal of Engineering Sciences & Research Technology, 6(3): 381–390.
- [14] Bouhamady, S., El Bah, M., Ndiaye, D., Kobor, D., Sidibba, A., 2018, “*Energy and Exergy Analysis of a Solar Photovoltaic Module Performance under the Sahelian Environment*,” International Journal of Physical Sciences, 13(12): 196–205.
- [15] Kareem, F.A., 2019, “*Energy and Exergy Analysis of a Solar Photovoltaic Performance in Baghdad*,” Journal of Mechanical Engineering Research & Developments (JMERE), 42(2): 44–49.
- [16] Abu-Hamdeh, N., Alnefaie, K.A., Bayrak, F., Öztöp, H.S., 2017, “*A Review on Exergy Analysis of Solar Electricity Production*”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 74: 755–770.
- [17] Watmuff, J.H., Charters, W.W.S., Proctor, D., 1977, “*Solar and Wind Induced External Coefficients for Solar Collectors*,” Cooperation Mediterranee pour l’Energie Solaire, 2: 56.