

## UNJUK KERJA EKSERGI SISTEM FOTOVOLTAIK (PV) DENGAN KONVEKSI PAKSAAN

Titin Utari<sup>1</sup>, Abdul Natsir<sup>2</sup>, Ni Made Seniari<sup>3</sup>

### ABSTRAK

Konsumsi energi yang terus meningkat mendorong pemerintah dalam merencanakan kebijakan untuk memprioritaskan upaya konservasi, diversifikasi dan hemat energi. Salah satu bentuk dari kebijakan tersebut adalah pengembangan fotovoltaik (PV), PV sebagai salah satu dari sumber daya energi terbarukan, tidak terpisahkan dari aspek lingkungan. Kajian mendasar tentang PV selama ini hanya terkait pada evaluasi terhadap parameter energi yang belum akurat menjelaskan keseluruhan proses mengenai konversi energi pada sistem.

Ketidak akuratan analisis energi terhadap sistem PV diantisipasi dengan mengembangkan konsep eksergi, yang memberikan informasi tentang energi yang hilang dari sistem, berkaitan dengan proses termodinamika yang terjadi pada sistem.

Efisiensi eksergi dapat ditingkat dengan menekan temperatur yang ada pada permukaan PV. Penelitian ini menggunakan perbandingan dari beberapa kondisi yang mempengaruhi temperatur PV. Kondisi pertama adalah kondisi normal, kondisi kedua adalah konveksi paksaan yang menggunakan kelajuan angin 2 m/s dan 4 m/s.

Hasil Efisiensi energi panel kondisi normal memiliki nilai lebih kecil dari efisiensi energi panel kondisi konveksi paksaan dengan kelajuan 2 m/s dan 4 m/s. Efisiensi energi panel kondisi normal sebesar 42-50% efisiensi energi panel kelajuan 2 m/s bernilai 45-51%, dan efisiensi energi panel kelajuan 4 m/s sebesar 60-80%.

**Kata kunci** : fotovoltaik, efisiensi, eksergi, energi.

### ABSTRACT

More consumption of energi encourages the government to make policy to prioritize conservation, diversification and energi saving. Photovoltaic (PV) as a renewable energi close to environment aspect. Theory of PV during this time just tells about evaluation parameter of energi. That is not accurate to explain the complete process of energi conversion in a PV sistem. Inaccurate of energi analyses will anticipated by developing exergy concepts. That will give information about energi losses of thermodynamic process generally occur in PV sistem.

The exergy efficiency can be improved if the heat can be removed from the PV array surface. This paper uses a method to remove high temperature by comparison of two conditions. First condition is the normal condition, the second condition is forced convection by giving air flow at 2 m/s. and 4 m/s.

The result shows that energi efficiency PV with normal condition less than energi efficiency PV with force convection . Energi efficiency of PV with normal condition is range between 42-50%,. energi efficiency of PV with airflow at 2 m/s is range between 45-51%, and energi efficiency of PV with air flow 4 m/s is range between 60-80%.

**Keyword** : efficiency, energi, exergy, photovoltaic.

### PENDAHULUAN

Konsumsi energi yang terus meningkat berdampak langsung pada pertumbuhan ekonomi, dibuktikan dengan peningkatan permintaan listrik di Indonesia seiring pertumbuhan ekonomi nasional, dengan perkiraan pertumbuhan mencapai 7,3% pertahun selama 10 tahun dari 2009-2019.

Kondisi ini mendorong pemerintah merencanakan kebijakan untuk memprioritaskan upaya konservasi, diversifikasi, dan hemat energi. Solusi untuk mengatasi kebutuhan energi yang meningkat dengan pesat adalah mencari

sumber energi terbarukan. Salah satu jenis sumber energi terbarukan adalah pembangkit listrik tenaga surya (PLTS). Dengan adanya peraturan presiden (PP) No. 4 tahun 2010 tentang percepatan pembangunan pembangkit tenaga listrik yang menggunakan energi terbarukan, dan peraturan menteri (Permen) ESDM No. 17 tahun 2013 tentang pembelian tenaga listrik oleh PLN dari PLTS, mempermudah implementasi dari pengembangan PLTS oleh pihak terkait. Pengembangan PLTS sebagai salah satu dari sumber daya energi terbarukan, tidak

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Mataram, Nusa Tenggara Barat Indonesia

terpisahkan dari aspek lingkungan (*Environment Aspect*). Hal ini berkaitan dengan eksergi, sehingga eksergi sangat dibutuhkan.

Eksergi berhubungan dengan ke-mampuan panel surya (fotovoltaik) yang belum optimal dalam mengubah energi matahari menjadi energi listrik. Kajian bersifat mendasar tentang fotovoltaik (PV) selama ini hanya terkait pada evaluasi terhadap parameter energi. Parameter energi meliputi keluaran listrik yang dihasilkan sistem PV, sehingga belum menjelaskan secara lengkap mengenai proses terjadinya perpindahan panas akibat kenaikan temperatur, oleh karena itu analisis terhadap parameter eksergi perlu dilakukan dalam menjelaskan proses konversi yang berlangsung.

Umumnya teori yang digunakan untuk menganalisis efisiensi energi adalah hukum I Termodinamika, yang berkaitan dengan konsep kekekalan energi. Teori ini mempunyai keterbatasan dalam mengukur penurunan kualitas energi akibat pembentukan entropi. (Graveland & Gisolf 1998). Ketidakakuratan analisis energi terhadap sistem PV diantisipasi dengan mengembangkan konsep eksergi (*exergy concepts*), berdasar pada analisis hukum II Termodinamika, yang memberikan informasi tentang energi yang hilang dari sistem dan berkaitan dengan proses-proses termodinamika yang terjadi pada sistem PV (Hepbasli, 2008, Rosen and Bulucea, 2009).

Beberapa eksergi yang hilang pada sistem, tidak terlepas dari kondisi lingkungan yang mempengaruhi sistem tersebut. Oleh karena itu efisiensi tidak hanya terkait dengan konsep energi namun terkait pula pada konsep eksergi. Temperatur mempunyai pengaruh yang sangat besar pada efisiensi eksergi PV.

Efisiensi eksergi dapat ditingkat dengan menekan temperatur yang ada pada permukaan PV (F. sarhaddi, 2010). Metode yang digunakan adalah metode eksperimen, dengan menekan suhu pada permukaan PV yang berpengaruh pada nilai efisiensi eksergi PV. Dilakukan perbandingan dari dua keadaan yang mempengaruhi temperatur PV. Keadaan pertama adalah kondisi normal dimana angin yang digunakan secara alami berasal dari lingkungan sekitar, tidak ditentukan besar lajunya.

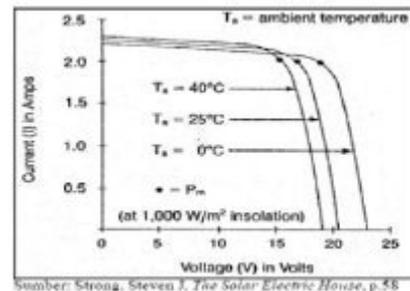
Keadaan lainnya adalah kondisi paksaan dimana kelajuan angin ditetapkan besarnya. Beberapa wacana tersebut mendasari dilakukannya penelitian tentang unjuk kerja eksergi sistem fotovoltaik (PV) dengan konveksi paksaan.

Menurut bahasa, kata *Photovoltaic* disingkat PV berasal dari bahasa Yunani *photos* yang berarti cahaya dan *volta* yang merupakan

nama ahli fisika dari Italia yang menemukan tegangan listrik. Sel surya fotovoltaik merupakan alat yang dapat mengubah energi sinar matahari secara langsung menjadi energi listrik. Pada dasarnya sel tersebut merupakan dioda semi konduktor yang bekerja melalui proses khusus yang dinamakan proses tidak seimbang (*nonequilibrium process*) dan berlandaskan efek fotovoltaik (*photovoltaic effect*). (Abdul Kadir, 1995:369).

**Faktor Pengoperasian Sel Surya.** Nilai yang maksimum yang didapatkan selama pengoperasian sel surya sangat tergantung pada faktor berikut:

1. *ambient air temperatur*
2. radiasi sinar matahari (*insolation*)
3. kecepatan angin bertiup
4. keadaan atmosfer bumi
5. orientasi panel atau *array PV*
6. posisi letak sel surya (*array*) terhadap matahari (*tilt angle*)



Gambar 1 Effect of Cell Temperatur on Voltage (V) (Sumber : Strong J., 1998)

**Pengaruh Temperatur Pada PV.** Kinerja panel sebenarnya harus terkait dengan temperatur sel di dalam panel, yang biasanya lebih hangat dari permukaan belakang. Perbedaan temperatur antara sel dan permukaan belakang (DT) tergantung pada tingkat radiasi matahari, jenis dan ketebalan bahan yang digunakan untuk media panel. Persamaan. (1) memberikan hubungan sederhana antara panel belakang temperatur permukaan dan temperatur sel. Tabel 2.1 memberikan parameter yang ditemukan untuk memberikan kesepakatan yang baik dengan temperatur diukur untuk dua jenis panel yang berbeda.

$$T_m = \frac{S_T}{\epsilon_b} \cdot T_1 \cdot \epsilon_b + T_2 + T_{amb} \dots\dots\dots (1)$$

- dimana:
- $T_m$  = temperatur permukaan belakang panel, °C.
  - $T_{amb}$  = temperatur sekitar lingkungan/kamar, °C.
  - $S_T$  = radiasi surya pada panel, W/m<sup>2</sup>.

$E_o$  = radiasi referensi, 1000 W/m<sup>2</sup>.

$V$  = kecepatan angin

$T_1$  = koefisien empiris yang menentukan batas atas temperatur pada batas kecepatan angin yang rendah.

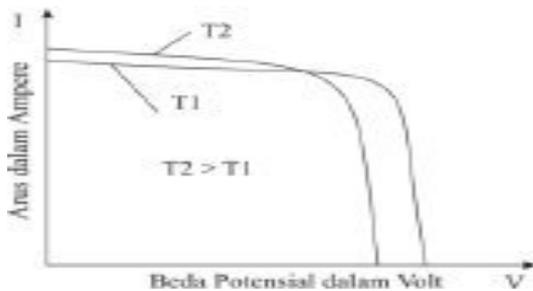
$T_2$  = koefisien empiris yang menentukan batas bawah temperatur pada kecepatan angin yang tinggi.

$b$  = koefisien empiris yang menentukan tingkat bahwa temperatur panel turun dengan meningkatnya kecepatan angin.

Sehingga temperatur panel surya adalah

$$T_{sel} = T_m + ST_{E_o} \cdot \Delta T \dots\dots\dots (2)$$

Pengaruh panas panel PV pada daya keluaran dan kondisi termal, pada umumnya panel PV dirancang dengan temperatur kerja nominal sel (*Nominal Operating Cells Temperatur-NOCT*) tertentu. Pada temperatur kerja lebih tinggi atau lebih rendah dari NOCT, kinerja panel PV akan menurun (Jimenez, 2008). Di daerah tropis lembab, temperatur permukaan panel PV hampir selalu di atas NOCT. Menurut Wenham (1995) dan Jimenez (2008), penurunan kinerja panel PV akibat peningkatan temperatur permukaan panel. Dijelaskan dengan grafik pada Gambar 2.berikut ini.



Gambar 2 Grafik perbedaan temperatur permukaan panel (Wenham, 1995)

**Sistem Termodinamika.** Termodinamika didefinisikan sebagai ilmu dasar mengenai energi. Energi sendiri dapat dipandang sebagai kemampuan melakukan perubahan.

Termodinamika berasal dari bahasa Yunani *therme* (berarti panas) dan *dynamis* (berarti tenaga), secara deskriptif diartikan sebagai usaha untuk mengubah panas menjadi tenaga. Suatu sistem termodinamika dapat dibedakan menjadi sistem tertutup (*closed sistem*) atau terbuka (*open sistem*), energi dalam bentuk kerja dan kalor serta massa dapat keluar masuk sistem atau dapat melintasi boundary. Volume dimana massa mengalir biasanya konstan tergantung pada apakah sistem tersebut

mengacu kepada kaidah massa-tetap (*fixed mass*) atau volume-tetap (*fixed volume*). Pada sistem tertutup, yang dapat keluar-masuk adalah energi dalam bentuk panas atau kerja, massa tidak. Volume tidak harus konstan tetapi massa harus tetap. Pada sistem terbuka yang dikenal juga sebagai volume terkontrol (*control volume sistem*), energi dan massa dapat keluar atau masuk kedalam sistem melewati batas sistem. (Cengel & Boles 2002).

**Kesetimbangan Sistem.** Karakteristik yang menentukan sifat dari sistem disebut properti (*property*) sistem, seperti tekanan  $P$ , temperatur  $T$ , volume  $V$ , massa  $m$ . Suatu sistem dapat berada pada suatu kondisi yang tidak berubah, apabila masing-masing jenis properti sistem tersebut dapat diukur pada semua bagiannya dan tidak berbeda nilainya. Kondisi tersebut disebut sebagai keadaan (*state*) tertentu dari sistem, dimana sistem mempunyai nilai properti yang tetap. Apabila propertinya berubah, maka keadaan sistem tersebut disebut mengalami perubahan keadaan

**Perpindahan Panas**

- **Radiasi.** Radiasi adalah perpindahan panas tanpa melalui suatu perantara, contohnya adalah yang terjadi pada matahari, intensitas radiasi matahari akan berkurang oleh penyerapan dan pemantulan oleh atmosfer saat sebelum mencapai permukaan bumi. (J.P Holman, 1987)
- **Konduksi.** Panas mengalir secara konduksi dari benda yang bertemperatur tinggi ke benda yang bertemperatur rendah. Proses perpindahan kalor secara konduksi bila dilihat secara atomik merupakan pertukaran energi kinetik antar molekular (atom) dimana partikel yang energinya lebih rendah menumbuk partikel yang energinya lebih tinggi. (Sugeng A, 2005)

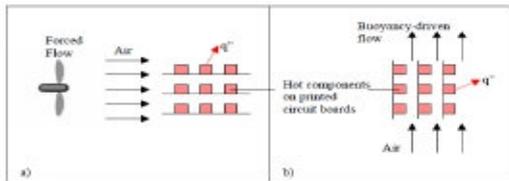
**Konveksi.** Sebuah plat logam panas cepat menjadi dingin apabila ditempatkan di depan sebuah kipas angin dibandingkan jika hanya dibiarkan begitu saja.

Proses yang terjadi itu adalah proses perpindahan panas konvektif. Proses perpindahan panas secara konveksi terdiri dari dua jenis yaitu konveksi alami dimana konveksi terjadi pada aliran bebas (aliran angin alami dari lingkungan sekitar) kondisi

konveksi alami disebut juga kondisi dioda p-n (A), RS hambatan seri pada sel PV (A), RSh hambatan *shunt* sel PV (A), NS jumlah sel yang tersusun seri, ni faktor ideal dioda, dan  $m = Ns / ni$  parameter tunggal dan  $Vt$  tegangan termal (V) yang dinyatakan sebagai :

$$Vt = \frac{kT}{q} \dots\dots\dots (3)$$

normal. (tanpa perlakuan) dan konveksi paksaan terjadi bila mendapat aliran paksaan (misalnya kelajuan angin yang bersumber dari peralatan seperti fan, blower dan sebagainya. Besaran kelajuan tergantung dari besar angin yang di alirkan dari blower). Ilustrasi konveksi alami dan paksaan terlihat pada gambar 3



Gambar 3. Proses perpindahan panas konvektif  
Sumber : Holman J.P, 1987  
a) konveksi paksaan b) konveksi bebas

**Perbedaan Energi dan Eksergi.** Secara garis besar perbedaan energi dan eksergi adalah sebagai berikut :

1. Energi tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnahkan, tetapi dapat berubah wujud, sedangkan. Eksergi pada sistem dapat berkurang bahkan musnah.
2. Perhitungan energi sesuai dengan hukum termodinamika pertama, sedangkan eksergi sesuai dengan hukum termodinamika kedua.
3. Eksergi berhubungan langsung dengan kemampuan alat atau mesin dalam memanfaatkan energi yang tersedia.

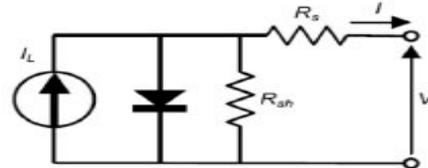
Dengan TC temperatur sel (OC), k konstanta Boltzmann (JK-1) dan q muatan elektron (C). Hambatan *shunt* atau hambatan paralel (RSh) adalah arus yang bocor (*leakage*) pada sambungan p-n dioda, dimana nilainya untuk PV panel silikon sekitar 0.1 – 10\_m2 Produksi energi dari sistem PV ditentukan berdasarkan estimasi arus dan tegangan yang dihasilkan panel PV, dimana daya keluaran PV tergantung pada karakteristik teknis dan parameter lingkungan. Oleh karena itu, model PV meliputi parameter listrik pada kondisi standar dan  $\mu$  ISC koefisien temperatur *short circuit current* (ISC) dan  $\mu$ VOC koefisien temperatur *open circuit voltage* (VOC). Nilai ISC dan VOC ditentukan berdasarkan persamaan dengan meninjau parameter lingkungannya :

$$Isc = Isc,ref + \mu Isc (Tc - Tc,ref) \dots\dots\dots (4)$$

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

$$Voc = Voc,ref + mVt \ln ST + \mu voc (Tc - Tc,ref) \dots\dots (5)$$

**Energi.** Fotovoltaik pada umumnya mempunyai hambatan seri dan hambatan *shunt* yang berpengaruh pada penurunan efisiensi, seperti ditunjukkan pada gambar 4



Gambar 4 Model dioda tunggal untuk rangkaian ekivalen PV (Sumber : De Soto, W., 2004).

Persamaan model dioda tunggal yang digunakan untuk menggambarkan arus operasional yang dihasilkan panel PV. Arus yang dibangkitkan cahaya (A),  $I0$  arus jenuh balik pada sambungan dengan VOC (V) menyatakan *open circuit voltage*,  $ISC$  *short circuit current* (A),  $ST$  radiasi global matahari jam-an ( $W/m^2$ ), dan  $A$  luas permukaan panel PV ( $m^2$ ).

**Efisiensi Energi.** Dalam menilai suatu PV bekerja dengan baik atau tidak, serta menentukan kualitasnya adalah tergantung pada efisiensi yang dihasilkan oleh PV tersebut. Apabila PV memiliki efisiensi yang baik, maka daya yang dihasilkan akan maksimal dan rugi-rugi akan semakin kecil.

PV dengan efisiensi yang tinggi dan rugi-rugi yang kecil inilah yang bisa dikatakan PV yang baik. Berdasarkan definisi, efisiensi energi fotovoltaik 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 :

$$\eta = \frac{En}{STA} \dots\dots\dots (6)$$

Dalam hal ini  $En$  menyatakan laju energi (W) yang dinyatakan sebagai jumlah energi listrik dan energi termal yang dihasilkan oleh PV. Ungkapan untuk laju energi dinyatakan sebagai :

$$En = Eel + Q = Voc Isc + hca A (Tsel - Tamb) \dots\dots (7)$$

dengan  $Tsel$  temperatur sel (OC),  $Tamb$  temperatur *ambient* (OC), serta  $hca$  koefisien transfer panas konvektif yang dinyatakan :

$hca = 5.7 + 3.8 v \dots\dots\dots (8)$   
 dengan  $v$  kelajuan angin (m/s).

**Efisiensi Eksergi.** Efisiensi eksergi didefinisikan sebagai perbandingan eksergi dari panel PV terhadap eksergi dari radiasi matahari yang jatuh pada permukaan panel PV dinyatakan dalam bentuk :

$$Ex = Vm Im + 1 \left( \frac{Tamb}{Tsel} \right) [ hcaA (Tsel - Tamb) \dots\dots (9)$$

$$E_{solar} = (1 - \frac{Tamb}{T_{solar}}) STA \dots\dots\dots (10)$$

Dimana  $Vm$  dan  $Im$  menyatakan tegangan (V) dan arus yang diamati (A) yang dihasilkan PV dan disimpan pada baterai, serta  $Tsolar$  menyatakan temperatur matahari (5777 K). Analisis eksergi yang masuk (radiasi matahari) dan eksergi keluar, selanjutnya dinyatakan sebagai bentuk peningkatan potensial eksergi (*the exergetic improvement potential, IP*) dalam bentuk efisiensi eksergi :

$$IP = (1\psi) (\dot{E}X_{masuk} \dot{E}X_{keluar}) \dots\dots\dots (11)$$

**METODE PENELITIAN**

Proses penelitian yang akan dilaksanakan adalah sebagai berikut :

1. Studi Literatur. Mencari informasi yang berhubungan dengan masalah yang dibahas dari berbagai media informasi (internet), dan mencari data tentang spesifikasi alat yang digunakan pada penelitian.
2. Pengumpulan Data, Data merupakan faktor utama dalam penelitian. Metode pengumpulan data yang digunakan pada penelitian yaitu metode eksperimen lapangan. Data-data yang dibutuhkan dalam penelitian ini sebagai berikut :
  - Data primer, data hasil pengukuran yang meliputi : data intensitas matahari, kelajuan angin, temperatur, tegangan *open circuit*, tegangan maksimum, arus *short circuit* dan arus maksimum
  - Data sekunder, data spesifikasi peralatan yang digunakan.
3. Melakukan persiapan dan kalibrasi terhadap alat ukur yang ada.
  - Persiapan alat-alat yang digunakan untuk pengujian seperti : panel surya, *Amperemeter*, *voltmeter*, baterai penyimpan, *digital clamp meter* dan *termometer*.
  - Pengkalibrasian alat ukur *Amperemeter* dan *voltmeter* sesuai dengan skala pengukuran yang diinginkan.
  - Persiapan alat pendukung faktor pengukuran panel surya seperti seperangkat komputer sebagai penyimpan data intensitas matahari

dari *pyranometer* dan kecepatan angin dari *wind speed*.

4. Mengatur posisi PV sesuai dengan posisi yang telah ditentukan (*fixed tilt*), dengan melakukan perbandingan pada dua PV yang dikondisikan berbeda dan menghubungkan peralatan sesuai layout pengujian panel PV seperti gambar 5



Gambar 5. ilustrasi alur pengujian  
 Keterangan:

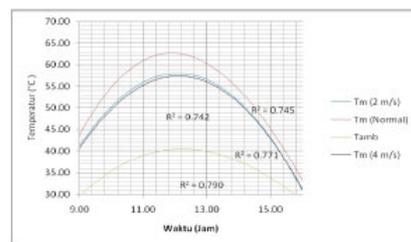
1. Mengukur parameter  $Voc$  dan  $Isc$  dari panel PV
2. Mengukur kelajuan angin dari *blower* yang bernilai konstan 2 m/s dan 4 m/s
3. Mengukur parameter  $Vm$  dan  $Im$  dari melalui *charge controller* dari daya yang tersimpan ke baterai
4. Daya dari PV yang dialirkan ke *charge controller*
5. Daya yang tersimpan pada Baterai dibatasi oleh *charge controller*
5. Membagi perlakuan menjadi dua kondisi yaitu:
  - Kondisi normal menempatkan panel yang berpenyangga  $\pm 1.5$  m di tempat penelitian, yang arah dan orientasi sudut terhadap matahari telah ditetapkan sebesar 30o menghadap utara. Angin yang berhembus pada panel berasal dari lingkungan sekitar panel, sehingga diperlukan alat bantu penghitung kecepatan angin (*anemometer* digunakan untuk mengukur kelajuan angin sekitar panel yang berfluktuasi).
  - Kondisi paksaan yaitu mengatur kelajuan angin 2 m/s dan 4 m/s . Kelajuan 2 m/s dan 4 m/s diperoleh dari angin yang berhembus pada blower yang ada di bawah permukaan panel. Blower digunakan untuk menghembuskan aliran paksaan pada sisi bawah permukaan PV. Ruang penempatan blower terbuat dari box kayu yang di tutupi oleh lapisan plastik (lapisan plastik bertujuan agar udara dari blower tidak dipengaruhi oleh

- udara sekitar panel), udara yang masuk dari sisi bawah panel keluar melalui salah satu sisi box yang dibuat sebagai outlet dari udara tersebut. Jarak antara permukaan blower dengan permukaan bawah PV sebesar 1 cm. Jarak tersebut juga berfungsi sebagai saluran udara dibawah permukaan panel. Kelajuan angin 4 m/s didapatkan dengan memberikan laju kipas angin pada sisi inlet PV.
6. Melakukan pengukuran untuk mendapatkan data sekunder yang ada di lapangan berupa parameter lingkungan yang mempengaruhi nilai efisiensi eksergi dan energi yaitu :
    - Tegangan *open circuit* ( $V_{oc}$ )
    - Tegangan *maksimum* ( $V_m$ )
    - Arus *short circuit* ( $I_{sc}$ )
    - Temperatur *ambient* ( $T_{amb}$ )
    - Temperatur sel PV ( $T_{sel}$ )
    - Radiasi matahari ( $ST$ )
    - Kelajuan angin ( $v$ )
  7. Menghitung nilai  $T_{sel}$  (temperatur sel) Dengan menggunakan perhitungan temperatur belakang panel menggunakan persamaan 1 dan 2.
  8. Pengolahan Data Setelah data didapatkan data primer maupun sekunder, maka dilakukan pengolahan data dengan melakukan perhitungan dari data yang telah diperoleh. Perhitungan yang dilakukan antara lain :
    - Menghitung luas permukaan panel yang beroperasi
    - Perhitungan efisiensi energi :
      - Menghitung nilai koefisien transfer panas ( $h_{ca}$ ) menggunakan persamaan 8
      - Menghitung laju energi yang dihasilkan oleh panel PV dengan menggunakan persamaan 7
      - Menghitung efisiensi energi yang dihasilkan dengan menggunakan persamaan 6
    - Perhitungan efisiensi eksergi:
      - Menghitung nilai eksergi yang dihasilkan oleh panel PV dengan menggunakan persamaan 9
      - Menghitung besar eksergi matahari yang diperoleh dari hasil pengukuran menggunakan persamaan 10
      - Menghitung efisiensi eksergi menggunakan persamaan  $\psi = Ex$
    - Melakukan perhitungan nilai *improvement potensial eksergi* (IP) untuk melihat laju nilai pemusnahan eksergi yang dihasilkan dengan menggunakan persamaan 11
  9. Analisis Data Pada analisis data akan dilakukan dalam beberapa tahapan yaitu:

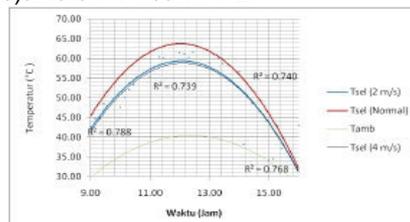
- Membuat membuat tabel data hasil pengukuran tegangan, arus, temperatur dan kelajuan angin dalam selang waktu penelitian secara kondisi normal maupun konveksi paksaan.
- Melakukan perhitungan nilai efisiensi energi dan nilai efisiensi eksergi pada dua perlakuan yaitu kondisi normal dan konveksi paksaan.
- Analisis perbandingan hasil perhitungan dan pengukuran antar dua perlakuan tersebut
- Analisis efisiensi eksergi panel fotovoltaik dengan melihat indikator performansi PV dan daya yang dibangkitkan yaitu efisiensi energi ( $\eta$ ), efisiensi eksergi ( $\psi$ ) serta nilai *improvement potensial* (IP) yang dihasilkan.

## 10. Menarik Kesimpulan.

### HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 6. Grafik perbandingan temperatur belakang panel ( $T_m$ ) dengan temperatur *ambient* ( $T_{amb}$ ) antara PV 1 dan PV 2.



Gambar 7 Grafik perbandingan temperatur sel ( $T_{sel}$ ) dengan temperatur lingkungan ( $T_{amb}$ ) antara PV 1 dan PV 2

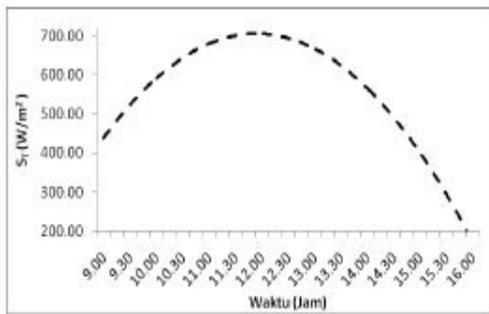
Dari grafik gambar 6 dan 7 temperatur permukaan belakang modul ( $T_m$ ), yang dihasilkan oleh konveksi paksaan dengan kelajuan angin 2 m/s dan 4 m/s lebih kecil dibandingkan temperatur panel kondisi normal, dikarenakan temperatur belakang panel yang diatur tetap dengan kelajuan angin 2 m/s dan 4 m/s. Semakin besar nilai kelajuan angin menyebabkan penurunan temperatur permukaan belakang panel sehingga nilai  $T_m$  (4 m/s) lebih kecil dari  $T_m$  lainnya, dengan nilai  $T_{amb}$  yang sama. Peningkatan nilai  $T_{amb}$  sejalan dengan peningkatan  $T_m$ .

Semakin besar  $T_{amb}$  maka semakin besar pula  $T_m$ . Berdasarkan persamaan 1 grafik mulai meningkat pada pukul 09.00-

13.00 PM, nilai intensitas radiasi surya berpengaruh pada peningkatan grafik, semakin besar nilai intensitas radiasi surya ( $S_T$ ) dan suhu sekitar modul ( $T_a$ ) semakin besar maka grafik akan mengalami peningkatan.

**Pengaruh Intensitas Radiasi Surya Terhadap Efisiensi Eksergi Panel.** Dari gambar 8 terlihat nilai intensitas surya Nilai intensitas menjadi salah satu faktor penentu efisiensi eksergi yang dihasilkan panel.

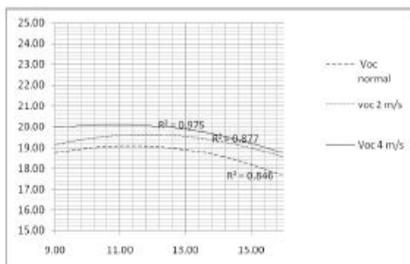
Terlihat dari grafik bahwa intensitas tertinggi terdapat pada pukul 11.00-14.00 Wita. Nilai



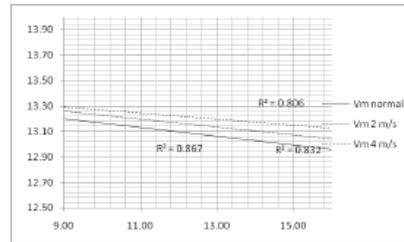
Gambar 8 Grafik pengaruh intensitas radiasi surya terhadap waktu

intensitas juga mempengaruhi parameter lain dari efisiensi eksergi yaitu temperatur, tegangan dan arus terlihat dari gambar 7 dan 8 gambar 9. semakin tinggi nilai radiasi semakin meningkat nilai temperatur yang mengakibatkan menurunnya nilai tegangan dan meningkatnya nilai arus yang berpengaruh pada hasil efisiensi eksergi panel

**Pengaruh Tegangan Terhadap Efisiensi Energi dan Eksergi.** Tegangan yang dihasilkan oleh panel surya memiliki nilai yang berbeda, dan berpengaruh pada nilai efisiensi eksergi dan energi. Besar kecilnya nilai tegangan dipengaruhi oleh perlakuan yang diberikan pada masing-masing panel.



Gambar 9. Perbandingan tegangan *open circuit* pada panel kondisi normal dan panel konveksi paksa

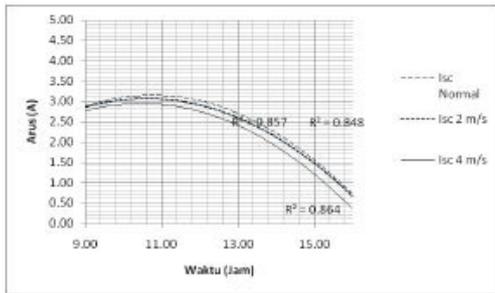


Gambar 10 Perbandingan tegangan maksimum pada panel kondisi normal Dan panel konveksi paksa

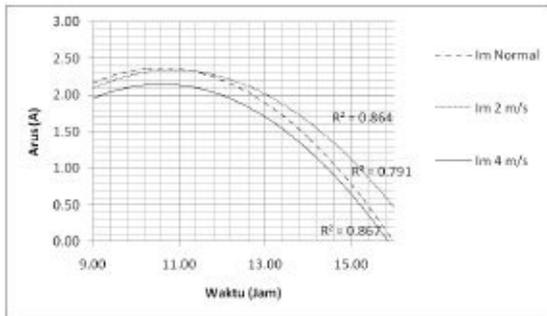
Grafik yang ditunjukkan gambar 9 terlihat nilai tegangan *open circuit* ( $V_{oc}$ ) dengan konveksi paksa mempunyai nilai yang lebih besar dibandingkan nilai tegangan dengan kondisi normal. Terlihat bahwa grafik mengalami peningkatan, terjadi pada pukul 09.00 – 14.00 PM, dan berangsur menurun pada pukul 14.00 – 16.00 PM. Kenaikan tegangan diakibatkan pengaruh intensitas radiasi yang tinggi, terjadi pada pukul 09.00-14.00 dan mulai berkurang pada pukul 14.00-16.00 PM. Selain itu temperatur juga berpengaruh pada peningkatan nilai tegangan ukur. Nilai temperatur pada kondisi normal lebih besar dibandingkan dengan temperatur pada kondisi konveksi paksaan.

Kenaikan temperatur yang terlalu besar dari temperatur normal menyebabkan penurunan tegangan. Jika tegangan normal untuk tegangan input ( $V_{oc}$ ) kisaran 19-20 Volt, kemudian terjadi kenaikan temperatur lingkungan ( $T_{amb}$ ) dari 2–100°C, maka tegangan input menurun dan bernilai 18-19 °C. Dari grafik 10 dapat diketahui bahwa terdapat perbedaan nilai tegangan output ( $V_m$ ) antara kondisi normal dengan kondisi konveksi paksaan. Jika tegangan input normal kisaran 18- 19 V, dan pada konveksi paksaan kecepatan angin diatur menjadi 2 m/s maka  $V_m$  akan bernilai 18-20 V, ketika kecepatan angin pada konveksi paksa dinaikan lagi menjadi 4 m/s, maka nilai  $V_m$  akan cenderung naik menjadi 19 – 21 °C. Dapat disimpulkan bahwa tegangan terukur yang dihasilkan oleh panel PV mengalami penurunan seiring peningkatan temperatur pada pukul 11.00 AM.

**Pengaruh Arus Terhadap Efisiensi Energi Dan Eksergi Pada Panel.** Dari gambar 11 terlihat perbedaan antara arus *short circuit* ( $I_{sc}$ ) kondisi normal dan konveksi paksaan.  $I_{sc}$  kondisi normal mempunyai nilai yang lebih besar dibandingkan  $I_{sc}$  konveksi paksaan. jika disandingkan antara grafik 11 dan 12.



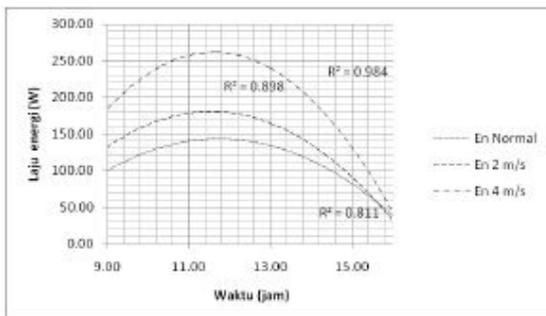
Gambar 11 Perbandingan arus short circuit pada panel kondisi normal dan panel konveksi paksa



Gambar 12 Perbandingan arus maksium pada panel kondisi normal dan panel konveksi paksaan

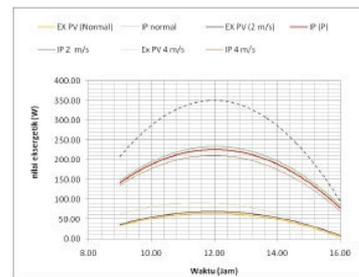
Isc pada kondisi normal bernilai 2,70 A, Isc konveksi paksaan 2 m/s bernilai 2,60 dan Isc konveksi paksaan 4 m/s adalah 2.48 A. Dpt disimpulkan bahwa kecepatan angin mempunyai pengaruh pada penurunan nilai arus semakin besar kecepatan angin maka semakin besar pula nilai arus panel PV. Arus input (Isc) berkorelasi dengan intensitas energi matahari yang sampai ke permukaan panel dan arus output (Im) akan diregulasikan untuk disimpan ke baterai.

**Pengaruh Nilai Laju Energi Panel.** Pada gambar 13 menunjukkan hasil perhitungan laju energi PV yang diperoleh menggunakan persamaan 2.9 yaitu  $E_n = V_{oc} + I_{sc} + h_{ca} \cdot A \cdot (T_{sel} - T_{amb})$ . Dari persamaan tersebut dapat diketahui bahwa laju energi dipengaruhi oleh parameter arus short circuit, tegangan open circuit, suhu sel, suhu lingkungan, dan nilai koefisien transfer panas konvektif ( $h_{ca}$ ), semakin besar nilai  $h_{ca}$  maka semakin besar pula nilai laju energi.



Gambar 13 Perbandingan laju energi panel kondisi normal dan konveksi paksaan

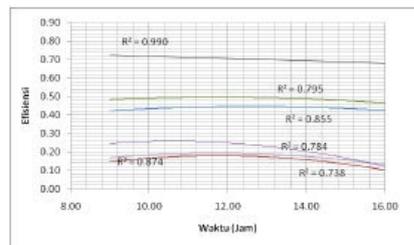
**Pengaruh Nilai Eksergi Panel.** Pada gambar 14 menunjukkan hasil perhitungan *improvement potential* ( $I_p$ ) PV yang diperoleh menggunakan persamaan 11 yaitu  $I_p = (1 - \psi) (\dot{E}_{xmasuk} - \dot{E}_{xkeluar})$  yang menyatakan aliran eksergi yang masuk (radiasi matahari) dan keluar dari panel PV. Dari persamaan tersebut dapat diketahui nilai pemusnahan eksergi yang terjadi selama proses konversi energi foton menjadi energi listrik. Faktor yang turut mempengaruhi nilai  $I_p$  adalah eksergi. Dimana eksergi PV dan eksergi surya dipengaruhi oleh parameter arus maksimum, tegangan maksimum, suhu sel dan suhu lingkungan.



Gambar 14 Perbandingan eksergi panel kondisi normal dan panel konveksi paksa

**Perbandingan Efisiensi Energi Dan Eksergi Panel.** Hasil perhitungan yang ditunjukkan pada Gambar 15, dimana efisiensi energi pada panel dengan kondisi normal bernilai 42-50 %, untuk panel konveksi paksaan dengan kelajuan angin 2 m/s bernilai 45-51%, sedangkan pada panel konveksi paksaan dengan kelajuan 4 m/s bernilai 60-80%. Dengan hal itu memperlihatkan bahwa konveksi paksaan berpengaruh pada kenaikan nilai efisiensi energi akibat adanya kenaikan nilai eksergetik panel.

Kenaikan nilai eksergetik menyebabkan efisiensi eksergi panel meningkat. Peningkatan efisiensi eksergi mempengaruhi nilai efisiensi energi secara langsung.



Gambar 15 Perbandingan efisiensi energi dan eksergi

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Efisiensi eksergi panel surya dipengaruhi oleh temperatur, intensitas radiasi surya, dan kelajuan angin. Pengaruh yang diberikan Peningkatan temperatur terjadi seiring peningkatan intensitas radiasi matahari. Hasil yang diperoleh dari pengukuran masing-masing panel adalah :
  - a. Panel kondisi normal memiliki nilai temperatur sel berkisar antara 46 – 66 oC, tegangan yang dihasilkan 18-19 V.
  - b. Panel kondisi kelajuan 2 m/s memiliki nilai temperatur sel berkisar antara 42-61°C, tegangan yang dihasilkan 19-20 V
  - c. Panel kondisi kelajuan 4 m/s memiliki nilai temperatur sel berkisar antara 40-60°C, tegangan yang dihasilkan 19-21 V
2. Kinerja panel fotovoltaik dipengaruhi dari beberapa parameter yaitu IP, eksergi PV, eksergi solar dan efisiensi. Panel 4m/s memiliki kinerja lebih baik dibanding panel lainnya. Ditunjukkan dari data yang diperoleh sebagai berikut :
  - a. IP panel kondisi normal memiliki nilai lebih besar dari IP panel kondisi konveksi paksaan dengan kelajuan 2 m/s dan 4 m/s. IP panel kondisi normal sebesar 159,60 W, IP panel kelajuan 2 m/s 152 W dan IP panel kelajuan 4 m/s sebesar 150 W pada pukul 09.00 AM
  - b. Eksergi PV panel kondisi normal memiliki nilai lebih kecil dari eksergi PV panel kondisi konveksi paksaan dengan kelajuan 2 m/s dan 4 m/s. eksergi PV panel kondisi normal sebesar 10W – 66 W, eksergi PV panel kelajuan 2 m/s berkisar 11 W – 72 W, dan eksergi PV panel kelajuan 4 m/s sebesar 8 W – 94 W, selama selang waktu pengamatan.
  - c. Efisiensi energi panel kondisi normal memiliki nilai lebih kecil dari efisiensi energi panel kondisi konveksi paksaan dengan kelajuan 2 m/s dan 4 m/s. Efisiensi energi panel kondisi normal
  - d. Efisiensi eksergi panel kondisi normal memiliki nilai lebih kecil dari efisiensi eksergi panel konveksi paksaan dengan kelajuan 2 m/s dan 4 m/s. Efisiensi eksergi panel kondisi normal sebesar 11- 19%, efisiensi eksergi panel kelajuan 2 m/s 11-22%, dan efisiensi eksergi panel kelajuan 4 m/s sebesar 11-29%, selama selang waktu pengamatan.

## SARAN

1. Untuk pengembangan dari skripsi ini diberikan saran bagi instansi terkait yang ingin membangun PLTS agar mengoptimalkan kinerja PV dengan melakukan pemilihan lokasi terbaik bagi pembangunan PV di daerah setempat yang mempertimbangkan beberapa faktor lingkungan yang berpengaruh pada eksergi seperti intensitas matahari. Kelajuan angin dan temperatur udara di sekitar wilayah tersebut.
3. Diharapkan bagi mahasiswa yang ingin melakukan pengembangan penelitian dari tugas akhir, dapat menambahkan variasi kelajuan angin dan metode penurunan temperatur PV lainnya

## DAFTAR PUSTAKA

- Ahern JE. 1980., "The Exergy Method of Energi Systems Analysis", New York : John Wiley & Sons.
- Dincer I, Sahin AZ. 2004. "A new model for thermodynamic analysis of a drying process". International Journal of Heat and Mass Transfer 47(4):645–652.
- Dincer Ibrahim, Rosen march. 2007. , "Exergy Energi Enviroment and Suitable Development". Elsevier : University of Ontario Institute of Technology In Oshawa Canada
- H. dadan, s kadek, s lambang. 2011. No.02. , "Analisis Kinerja Solar Photovoltaic Sistem (SPS) Berdasarkan Tinjauan Efisiensi Energi Dan Eksergi," 14 – 22
- Hepbasli, A. 2008. , "A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energi resources for a sustainable future, Renewable and Sustainable Energi," Reviews 12 : 593–661
- King, D.L., Boyson, W. E. dan Kratochvil, J.A. 2002. , "Analysis of Factors Influencing the Annual Energi Production of Photovoltaics Sistem." Proc. 29th IEEE Photovoltaic Specialist Conf., New Orleans, pp. 1356-1361.
- Mintorogo, Danny Santoso. 2000. , "Application Photovoltaic Cells Strategies in Dwellings and Commercial Buildings. Petra Christian University Journal DIMENSI. vol. 28. no. 2, December
- Sahin, A.D., I. Dincer and M.A. Rosen, 2007., "Thermodynamic analysis of solar photovoltaic cell systems. Solar Energi Materials & Solar Cells", 91: 153-159.

- Santoso dwi P. 2012. "Penentuan Karakteristik Panel Surya Untuk Menghasilkan Daya Maksimum Dengan Berbagai Faktor Pengukuran Di Laboratorium Energi Baru Dan Terbarukan Universitas Mataram.," skripsi S1. Fakultas Teknik Elektro Universitas Mataram : Mataram
- Cengel yunus A and Boles Michael A. 2010. 7th edition. "Thermodynamics An Engineering Approach". McGraw-Hill : Science Engineering Math
- De Soto, W., 2004. "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance, pp. 20-74, Chapter 2-3. M.S. thesis, "Solar Energi Laboratory, University of Wisconsin-Madison.
- Sarhaddi, F., Farahat, S., Ajam, H., Behzadmehr, A. 2010. "Energetic performance evaluation of a solar photovoltaic (PV) Array," *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(3): 502-519
- Steven J. Strong and William Scheller. 1987. "The Solar Electric House A Design Manual for Home Scale Photovoltaic Power Sistem." Associated, Inc of Harvard: Massachusetts.