

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

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

Ketidakkuratan 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.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang diangkat pada penelitian ini adalah :

1. Bagaimana pengaruh faktor lingkungan terhadap unjuk kerja eksergi PV ?
2. Bagaimana unjuk kerja eksergi sistem PV pada kondisi normal dan kondisi konveksi paksaan?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dibuat agar tidak menimbulkan kesalahan persepsi. Batasan masalah meliputi :

1. Penelitian dilakukan secara *true eksperimental* dengan melihat faktor lingkungan yang berpengaruh pada nilai efisiensi energi dan nilai eksergi panel PV.
2. Tidak dilakukan analisa mengenai karakteristik fotovoltaik.
3. Penelitian ini menggunakan 2 variasi pengamatan pada panel yang identik dengan memberikan perlakuan pada temperature panel/temperatur sel menggunakan dua keadaan yang mempengaruhi nilai eksergi disamping keluaran arus, tegangan dan radiasi matahari.
4. Melakukan penelitian pada PV secara *stand alone* yang tidak terhubung pada inverter maupun beban dengan membandingkan dua panel pada keadaan yang berbeda.
5. Keadaan pertama adalah kondisi normal dimana angin dibiarkan secara alami berhembus disekitar panel.
6. Keadaan kedua adalah konveksi paksaan yaitu mengatur kelajuan angin pada panel 2 dengan besaran yang ditentukan .

1.4 Tujuan Penelitian

Beberapa tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui pengaruh faktor lingkungan pada unjuk kerja eksergi PV.
2. Mengetahui unjuk kerja eksergi sistem PV pada kondisi normal maupun kondisi konveksi paksaan.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan data mengenai kinerja sistem fotovoltaik yang ditinjau berdasarkan efisiensi energi dan eksergi, sehingga dapat diaplikasikan dan dikembangkan oleh mahasiswa pada khususnya, dan masyarakat luas pada umumnya. Memberikan pengetahuan lebih tentang eksergi dan dampaknya.

1.6 Hipotesis

Hipotesis awal dari penelitian ini adalah nilai efisiensi eksergi PV menggunakan konveksi paksaan lebih baik dibandingkan nilai efisiensi eksergi PV kondisi normal.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tugas akhir ini dibagi dalam lima bab, yaitu :

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan mengenai latar belakang, tujuan, batasan masalah, manfaat penelitian dan sistematika penulisan.

BAB II : LANDASAN TEORI

Bab ini mengurai dasar teori penunjang yang berhubungan dengan penelitian dari tugas akhir. Tinjauan pustaka yang membahas tentang penelitian-penelitian sebelumnya.

BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisikan tentang metode penelitian secara keseluruhan dari masing-masing pencarian data penelitian dari tugas akhir.

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas hasil yang didapat selama penelitian dengan melakukan analisa dari hasil yang didapatkan selama penelitian

BAB V : PENUTUP

Membahas tentang kesimpulan dan saran berdasarkan hasil dan pembahasan yang dilakukan.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Beberapa penelitian terdahulu yang menjadi referensi pada penelitian ini adalah, P. D. Santoso (2012), yang berjudul Penentuan Karakteristik Panel Surya untuk Menghasilkan Daya Maksimum dengan Berbagai Faktor Pengukuran di Laboratorium Energi Baru Dan Terbarukan Universitas Mataram. Metode yang digunakan adalah eksperimen dengan cara mengukur parameter arus dan tegangan untuk menggambarkan karakteristik I-V panel PV. Disamping itu juga menganalisis pengaruh temperatur terhadap karakteristik panel PV. Karakteristik ditinjau dari beberapa faktor pengukuran pada dua panel PV yang berbeda. Hasil yang didapatkan dari penelitian ini adalah efisiensi 10,78 % untuk panel monokristal sedangkan panel surya jenis polikristal efisiensinya 7,71 %. Penelitian ini tidak membahas masalah eksergi pada panel PV.

Hamdani, Dkk (2011), dengan judul penelitian “Analisis Kinerja *Solar Photovoltaic Sistem* (SPS) Berdasarkan Tinjauan Efisiensi Energi dan Eksergi. Penelitian ini dilakukan dengan menganalisis *solar photovoltaic sistem* (SPS) didasarkan pada efisiensi energi dan eksergi, serta potensi peningkatan eksergi (*exergetic improvement potential*, IP) menggunakan data eksperimen (parameter lingkungan dan keluaran listrik SPS) untuk Kota Samarinda Kalimantan Timur. Hasil analisis yang diperoleh adalah 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%. Peneliti mengkondisikan keadaan dalam cakupan satu kota Samarinda yang pada kenyataannya parameter lingkungannya berbeda untuk tiap daerah walaupun dalam satu kota yang sama.

Sarhaddi, Dkk (2010), dengan judul penelitian “*Exergetic Performance Evaluation Of A Solar Fotovoltaik (PV) Array*”. Penelitian ini mengevaluasi kinerja dari PV *array* dengan menganalisis aspek energi dan eksergi pada

keluaran panel PV. Yang termasuk kedalam parameter keluaran panel PV *array* adalah temperatur, tegangan *open circuit*, tegangan *maksimum power point*, arus *maksimum power point*. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah dengan mensimulasikan hasil penelitian sebelumnya dari Barker dan Norton (2003). Hasil penelitian menunjukkan keadaan yang tidak jauh beda antara penelitian yang dilakukan secara eksperimen oleh barker dan Norton dengan simulasi numerik yang dilakukan menggunakan komputer. Dalam penelitian ini menerangkan parameter yang diteliti yaitu iklim, sistem operasi dan *design* PV memiliki pengaruh terhadap efisiensi eksergi.

Supriyanto, Dkk (2011), melakukan analisis terhadap eksergi panel PV berdasarkan spektrum panjang gelombang cahaya matahari. Metode yang digunakan ialah perhitungan menggunakan variasi panjang gelombang yang berada pada spektrum panjang gelombang antara 300 – 800 nm. 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 *irreversibility* yang berkaitan dengan eksergi yang hilang, akibat pengubahan bentuk menjadi bentuk eksergi lain, misalnya pemanasan panel yang akan dibuang ke lingkungan. parameter yang berpengaruh pada nilai eksergi disini adalah panjang gelombang dan tidak terkait dengan kondisi lingkungan.

Peneliti lainnya adalah Tanesab, (2007) yang meneliti tentang Pengaruh Peningkatan Intensitas Cahaya Matahari Terhadap Daya Keluaran panel fotovoltaik di Laboratorium Sistem Proteksi Politeknik Negeri Kupang, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh peningkatan intensitas cahaya matahari terhadap daya keluaran panel fotovoltaik. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah *true eksperimental*, analisis data secara statistik menggunakan analisis varian klasifikasi tunggal. Variabel bebasnya adalah intensitas cahaya sedangkan daya keluaran panel fotovoltaik merupakan variabel terikat. Hasil analisis menunjukkan peningkatan intensitas matahari mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap daya keluaran panel fotovoltaik dan dari hasil pengukuran diketahui bahwa peningkatan intensitas cahaya matahari meningkatkan daya

keluaran panel fotovoltaik sebesar 46 %. Penelitian yang dilakukan tersebut hanya bergantung pada intensitas matahari saja tetapi tidak memperhitungkan pengaruh lingkungan yang juga mempengaruhi daya keluaran panel. Metode yang digunakan terlalu sederhana dengan membandingkan satu variabel untuk satu variasi pengamatan.

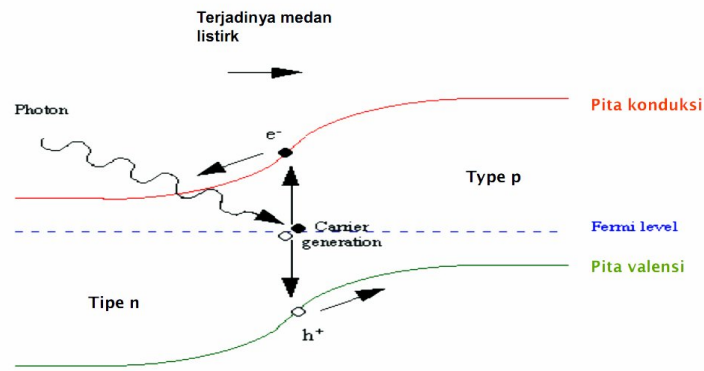
2.2 Landasan Teori

2.2.1 Fotovoltaik

- Prinsip Kerja Fotovoltaik (PV)

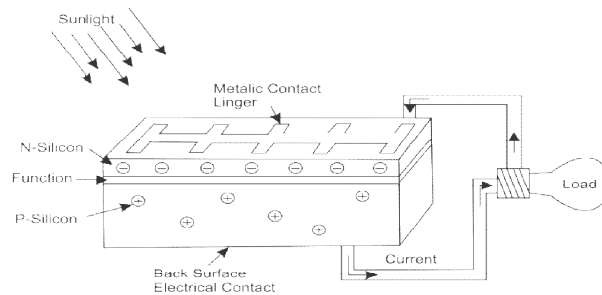
Menurut bahasa, kata *Photovoltaic* disingkat PV berasal dari bahasa Yunani *photos* yang berarti cahaya dan *volta* yang merupakan nama ahli fisika dari Italia yang menemukan tegangan listrik. Sel surya fotovoltaik merupakan alat yang dapat mengubah energi sinar matahari secara langsung menjadi energi listrik. Pada dasarnya sel tersebut merupakan dioda semi konduktor yang bekerja melalui proses khusus yang dinamakan proses tidak seimbang (*nonequilibriumprocess*) dan berlandaskan efek fotovoltaik (*photovoltaic effect*). (Abdul Kadir, 1995:369).

Sel surya merupakan salah satu produk teknologi fotovoltaik yang dikembangkan pada bahan semikonduktor (silikon *multikristal*, *monokristal* dan *amorf*), yang mampu menyerap gelombang elektromagnetik dan konversi energi cahaya (*photon*) menjadi energi listrik secara langsung. Prinsip dasar sel surya merupakan kebalikan dari *Light Emitting Diode (LED)* yang mengubah energi listrik menjadi cahaya, atau boleh dikatakan identik dengan sebuah dioda cahaya (*photodiode*) sambung p-n (*p-n junction*) dengan celah energi (*band gap*), (gambar 2.1). Ketika energi foton yang datang lebih besar dari celah energi ini, maka foton akan diserap oleh semikonduktor untuk membentuk pasangan *electron-hole* sebagai pembawa muatan (*carrier*). Selanjutnya elektron dan *hole* bergerak berturut-turut ke arah lapisan *n* dan *p*, sehingga timbul beda potensial dan arus yang dihasilkan oleh cahaya ketika kedua muatan melintasi daerah sambung p-n (*photocurrent*).



Gambar .2.1 Prinsip Dasar Sistem Fotovoltaik (sumber : Mintorogo, 2000)

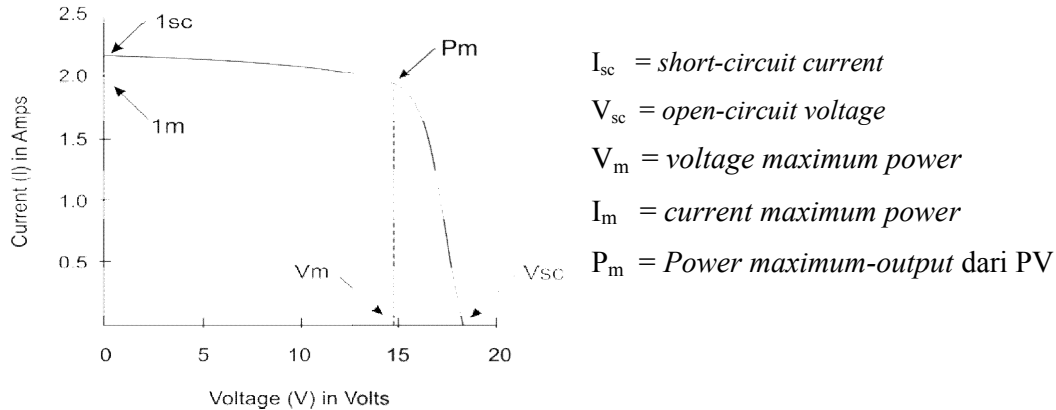
Bagian utama pengubah energi sinar matahari menjadi energi listrik adalah penyerap (*absorber*), meskipun demikian masing-masing lapisan juga sangat berpengaruh terhadap efisiensi dari sel surya. Sinar matahari terdiri dari bermacam-macam jenis gelombang elektromagnet, oleh karena itu penyerap disini diharapkan dapat menyerap sebanyak mungkin radiasi sinar yang berasal dari cahaya matahari.



Gambar 2.2 Diagram potongan sel surya (Sumber: Mintorogo, 2000)

Elektron dari pita konduksi dapat meloncat ke pita valensi ketika sambungan tersebut mengenai foton dengan energi tertentu. Ketika sinar matahari yang terdiri dari foton-foton jatuh pada permukaan bahan sel surya (*absorber*), foton foton tersebut akan diserap, dipantulkan atau dilewatkan begitu saja seperti terlihat pada gambar 2.2 dan hanya foton dengan tingkat energi tertentu yang akan membebaskan elektron dari ikatan atomnya sehingga mengalirkan arus listrik.

Pada gambar 2.3 dapat dilihat bahwa sel surya akan menghasilkan energi maksimum jika nilai V_m dan I_m juga maksimum. Sedangkan I_{sc} adalah arus listrik maksimum pada nilai tegangan = nol, I_{sc} berbanding langsung dengan tersedianya sinar matahari. V_{oc} adalah volt maksimum pada nilai arus = nol, V_{oc} naik secara logaritma dengan peningkatan sinar matahari, karakter yang memungkinkan sel surya untuk mengisi *accu* (Mintorogo, 2000).



Gambar 2.3 Keadaan sebuah sel surya beroperasi secara normal
(Sumber : Mintorogo, 2000)

- Faktor Pengoperasian Sel Surya

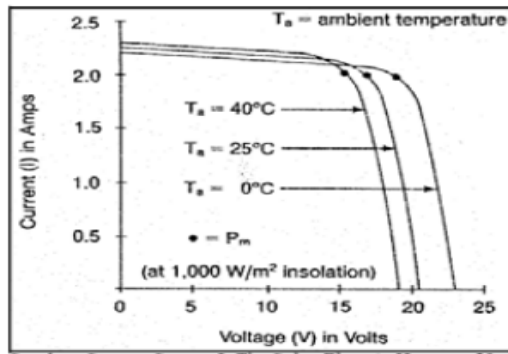
Nilai yang maksimum yang didapatkan selama pengoperasian sel surya sangat tergantung pada faktor berikut:

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*)

- a. *Ambient air temperatur*

Sebuah sel surya dapat beroperasi secara maksimum jika temperatur sel tetap normal (pada 25 °C). Kenaikan temperatur lebih tinggi dari temperatur normal pada sel surya akan melemahkan tegangan (V_{oc}). Pada gambar 2.4 setiap kenaikan temperatur sel surya 10°C (dari 25 °C) akan berkurang sekitar 0,4%

pada total tenaga yang dihasilkan atau akan melemah dua kali (2x) lipat. Untuk kenaikan temperatur sel per 10°C . Kecepatan tiup angin di sekitar lokasi PV array dapat membantu mendinginkan permukaan temperatur kaca-kaca PV array (Mintorogo, 2000).



Gambar 2.4. Effect of Cell Temperatur on Voltage (V)
(Sumber : Strong J., 1998)

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. (2.1) 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.

$$T_m = \frac{ST}{E_o} \cdot \{T_1 \cdot e^{b \cdot v} + T_2\} + T_{amb} \dots\dots\dots (2.1)$$

dimana:

- T_m = temperatur permukaan belakang panel, $^{\circ}\text{C}$.
- T_{amb} = temperatur sekitar (lingkungan/kamar), $^{\circ}\text{C}$.
- S_T = radiasi surya pada panel, W/m^2 .
- E_o = radiasi referensi, $1000 \text{ W}/\text{m}^2$.
- 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 :

$$T_{sel} = T_m + \frac{ST}{E_o} \cdot \Delta T \dots\dots\dots (2.2)$$

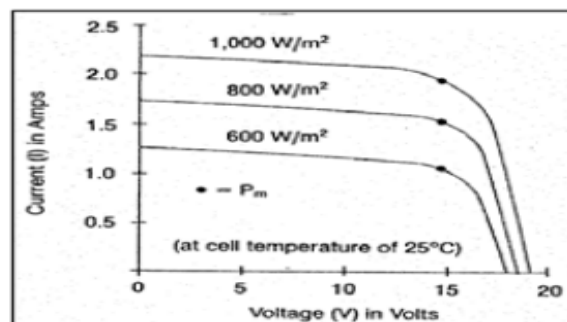
Tabel 2.1: Koefisien empiris untuk panel dan perkiraan temperatur sel, untuk dua tipe rancangan panel.

Tipe struktur panel	T_1 ($^{\circ}\text{C}$)	T_2 ($^{\circ}\text{C}$)	B	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)
Glass/cell/glass	25,0	8,2	-0,112	2
Glass/cell/Tedlar	19,6	11,6	-0,223	3

(D. L. King, J. A. Kratochvil, and W. E. Boyson : 1997).

b. Radiasi matahari

Radiasi matahari di bumi dan berbagai lokasi bervariasi, sangat tergantung keadaan spektrum solar ke bumi. Insulasi sinar matahari (*solar insulation*) akan banyak berpengaruh pada arus (I) sedikit pada tegangan (V) (lihat gambar 2.4).



Sumber : Strong, Steven J, *The Solar Electric House*, p.58

Gambar 2.5. Effect of Insolation Intensity on Current (I)

(Sumber : strong, Steven J, 1998)

c. Kecepatan angin bertiup

Kecepatan tiup angin disekitar lokasi larik sel surya dapat membantu mendinginkan permukaan temperatur kaca-kaca larik sel surya.

d. Keadaan atmosfer bumi

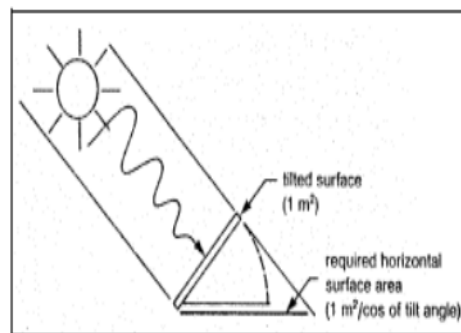
Keadaan atmosfer bumi berawan, mendung, jenis partikel debu udara, asap, uap air udara, kabut dan polusi sangat menentukan hasil maksimum arus listrik dari deretan sel surya.

e. Orientasi panel atau larik sel surya

Orientasi dari rangkaian sel surya (larik) ke arah matahari secara optimum adalah penting agar panel surya dapat menghasilkan energi maksimum. Sudut orientasi (*tilt angle*) dari panel surya juga sangat mempengaruhi hasil energi maksimum. Sebagai *guideline* untuk lokasi yang terletak di belahan utara *latitude*, maka panel surya sebaiknya diorientasikan ke selatan, orientasi ke timur atau barat walaupun juga dapat menghasilkan sejumlah energi, tetapi tidak akan mendapatkan energi matahari optimum.

f. Posisi letak sel surya (larik) terhadap matahari (*tilt angle*)

Mempertahankan sinar matahari jatuh ke sebuah permukaan panel sel surya secara tegak lurus akan mendapatkan energi maksimum $\pm 1000 \text{ W/m}^2$ atau 1kW/m^2 . Kalau tidak dapat mempertahankan ketegaklurusan antara sinar matahari dengan bidang fotovoltaik, maka ekstra luasan bidang panel sel surya dibutuhkan (bidang panel sel surya terhadap *sun altitude* yang berubah setiap jam dalam sehari).



Sumber : Strong, Steven J, *The Solar Electric House*, p.66

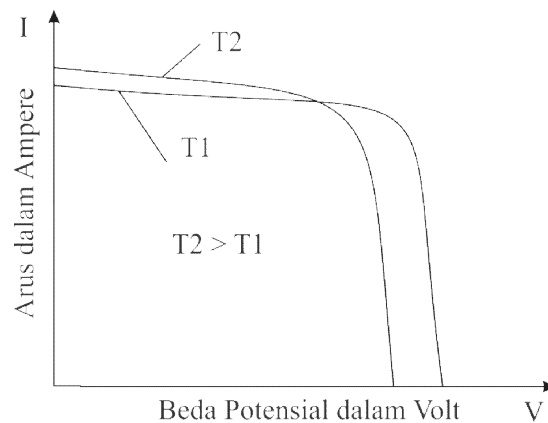
Gambar 2.6. Ekstra Luasan Panel Fotovoltaik dalam Posisi Datar.

(Sumber : strong, Steven J, 1998)

Panel sel surya pada Equator (*latitude* 0 derajat) yang diletakkan mendatar (*tilt angle* = 0) akan menghasilkan energi maksimum, sedangkan untuk lokasi dengan *latitude* berbeda harus dicarikan “*tilt angle*” yang optimum.

2.2.2. Pengaruh Temperatur Pada PV

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 2.7 berikut ini.



Gambar 2.7 Grafik perbedaan temperatur permukaan panel
(Wenham, 1995)

Dari grafik tersebut terlihat bahwa pada saat temperatur T1 naik menjadi T2, maka tegangan yang dihasilkan justru lebih rendah sedangkan arus listriknya hanya meningkat sangat sedikit. Dari aspek energi keluaran, Riffat & Gan (2001) mengungkapkan bahwa aliran udara yang mendinginkan sel PV akan meningkatkan kinerja PV. Ini sesuai dengan Wenham (1995) dan Sam (2005) yang menyatakan bahwa penurunan temperatur, menaikkan tegangan listrik, yang akhirnya menaikkan kinerja PV.

2.2.3 Sistem Termodinamika

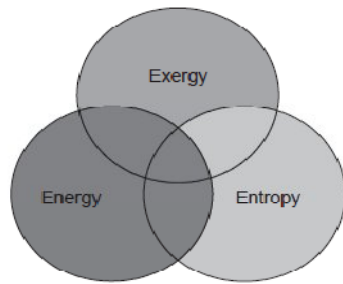
Termodinamika didefinisikan sebagai ilmu dasar mengenai energi. Energi sendiri dapat dipandang sebagai kemampuan melakukan perubahan. Termodinamika berasal dari bahasa Yunani *therme* (berarti panas) dan *dynamis* (berarti tenaga), secara deskriptif diartikan sebagai usaha untuk mengubah panas menjadi 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 ke dalam sistem melewati batas sistem. (Cengel & Boles 2002).

2.2.4 Kestimbangan 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.

Suatu sistem yang tidak mengalami perubahan keadaan disebut dalam keadaan seimbang (*equilibrium*). Suatu [sistem termodinamik](#) disebut berada dalam kesetimbangan termodinamik bila sistem tersebut berada dalam keadaan [setimbang mekanis](#), [setimbang termal](#) dan [setimbang secara kimia](#). Dalam kesetimbangan termodinamik, tidak ada kecenderungan untuk terjadi perubahan keadaan, baik untuk sistem maupun untuk lingkungannya.



Gambar 2.8 Hubungan antara energi, eksergi dan entropi

(Sumber : Ibrahim D. and March Rosen, 2007)

2.2.5 Perpidahan 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)

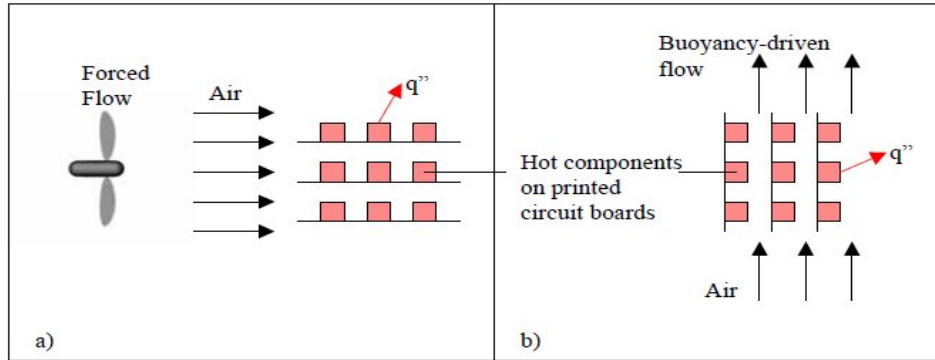
- Konduksi

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 didepan 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 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 2.9.



Gambar 2.9. Proses perpindahan panas konvektif (Sumber : Holman J.P, 1987)

a) konveksi paksaan b) konveksi bebas

Dari gambar terlihat bahwa konveksi paksaan di dialirkan melalui kipas yang menghembuskan angin yang mengalir pada *circuit board*. Sedangkan aliran yang terjadi pada konveksi bebas disebabkan karena adanya perbedaan densitas dan temperatur dari dua permukaan. Ketika udara mengalir pada permukaan benda yang panas, maka akan menaikkan temperatur dan mengurangi densitasnya. Untuk lebih jelasnya tentang nilai perpindahan panas konvektif dapat dilihat pada tabel.2.2.

Table 2.2 Pendekatan nilai koefisien perpindahan panas konvektif

Mode	H	
	W/m ²	Btu/h ft ² °F
Free convection ΔT= 30°C		
Vertical plate 0.3 m (1ft) high in air	4.5	0.79
Horizontal cylinder 5cm diameter in air	6.5	1.14
Horizontal cylinder 2 cm diameter in water	890	157
Forced convection		
Airflow at 2 m/s over 0.2 m square plate	12	2.1
Airflow at 35 m/s over 0.75 m square plate	75	13.2
Air at 2 atm flowing in 2.5 cm diameter tube at 10 m/s	65	11.4

Mode	H	
	W/m	Btu/h ft ² °F
Water 0.5 kg/s flowhigh 2.5 cm diameter tube	3500	6.6
Airflow across 5 cm diameter cylinder with Velocity of 50 m/s	180	32
Bolling Water		
In pool or container	2.500-35.000	110-6.200
Flowing in a tube		880-17.600
Condensation of water vapor		
Vertical surface	4.000-11.300	700-2.000
Outside horizontal tube	9.500-25.000	1.700-4.400

(Sumber : J.P. Holman, 1987)

2.2.6 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.

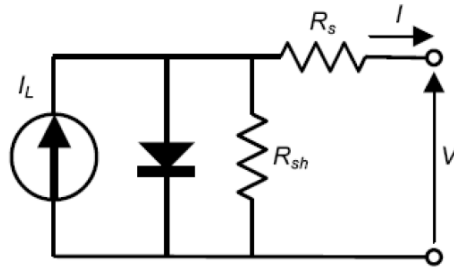
2.2.7 Energi

Energi adalah sesuatu yang dapat menghasilkan kerja, namun untuk menggambarkan sejauh mana energi yang hilang karena terjadinya suatu proses dari keadaan awal ke keadaan akhir diperhitungkan dengan kondisi irreversibilitas. Suatu proses yang ideal produksi entropinya sama dengan nol. Berdasarkan hukum I Termodinamika , hukum kekekalan energi, energi tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnahkan tetapi dapat dikonversi dari satu bentuk ke bentuk energi lainnya. Meskipun demikian hanya sebagian energi saja yang dapat digunakan untuk melakukan kerja. Potensi energi yang dapat

digunakan untuk melakukan kerja adalah eksergi sedangkan energi yang tidak dapat digunakan untuk melakukan kerja disebut *entropi*.

2.2.7.1 Analisis Energi

Fotovoltaik pada umumnya mempunyai hambatan seri dan hambatan *shunt* yang berpengaruh pada penurunan efisiensi, seperti ditunjukkan pada gambar 2.10



Gambar 2.10 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 dinyatakan dengan persamaan :

$$I = I_L - I_0 \left(\exp \left(\frac{V}{n_i V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V}{R_{sh}} = I_L - I_0 \left(\exp \left(\frac{V}{n_i V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V}{R_{sh}} \dots \quad (2.3)$$

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 (Ω), R_{sh} hambatan *shunt* sel PV (Ω), 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 :

$$V_t = \frac{k T_c}{q} \dots \dots \dots \quad (2.4)$$

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

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 μ_{Isc} koefisien temperatur *short circuit current* (I_{sc}) dan μ_{Voc} koefisien temperatur *open circuit voltage* (V_{oc}). Nilai I_{sc} dan V_{oc} ditentukan berdasarkan persamaan dengan meninjau parameter lingkungannya :

$$I_{sc} = I_{sc,ref} \frac{G}{G_{ref}} + \mu_{Isc} (T_c - T_{c,ref}) \dots\dots\dots (2.5)$$

$$V_{oc} = V_{oc,ref} + mV_t \ln \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) + \mu_{Voc} (T_c - T_{c,ref}) \dots\dots\dots (2.6)$$

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

$$\eta_{en} = \frac{V_{oc} \times I_{sc}}{A \times S_T} \dots\dots\dots (2.7)$$

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 panel PV (m^2).

2.2.7.2 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 :

$$\eta = \frac{\dot{E}_n}{S_T A} \dots\dots\dots (2.8)$$

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

$$\dot{E}_n = E_{el} + Q = V_{oc} I_{sc} + h_{ca} A (T_{sel} - T_{amb}) \dots \dots \dots (2.9)$$

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

$$h_{ca} = 5.7 + 3.8 v \dots \dots \dots (2.10)$$

dengan v kelajuan angin (m/s).

2.2.8 Eksergi

Saat menemukan sebuah sumber energi yang baru, misalnya, maka hal pertama yang diperhitungkan para ahli adalah berupa kira-kira energi yang terkandung dalam sumur tersebut. Informasi awal ini merupakan salah satu pertimbangan apakah akan dibuat suatu pembangkit tenaga atau tidak. Potensi kerja yang dapat diperoleh dari suatu sistem menjadi kerja bermanfaat ini disebut dengan *availability* atau *eksergi*.

Istilah *availability* dipopulerkan di USA oleh MIT School of Engineering pada sekitar 1940. Sedangkan istilah *eksergi* diperkenalkan di Eropa pada tahun 1950-an. Disini penulis menggunakan kata *availability* dan *eksergi* dengan makna yang sama dan dapat saling ditukar. Namun harus hati-hati karena beberapa penulis memberikan pengertian berbeda antara *eksergi* dan *availability*. *Eksergi* bukan merupakan jumlah kerja yang dihasilkan oleh suatu alat yang akan diteruskan ke instalasi lainnya, misalnya menggerakkan generator listrik. *Eksergi* merupakan batas kerja maksimum yang dapat dihasilkan oleh suatu sistem tanpa melanggar hukum termodinamika

Eksergi adalah sebuah sifat dan selalu dihubungkan dengan keadaan suatu sistem dan lingkungan. Sifat lingkungan diberi notasi subscript 0, misalnya T_0 . Sedangkan *eksergi* atau *availability* dari suatu sistem diberi symbol A . tetapi karena *availability* atau *eksergi* terdapat pada sistem tertutup dan terbuka maka untuk membedakannya digunakan pula dua symbol yang berbeda. symbol ϕ adalah *eksergi* untuk sistem tertutup sedang ψ untuk sistem terbuka. Suatu sistem

yang berada dalam keadaan setimbang dengan lingkungan mempunyai eksergi nol dan disebut keadaan *dead state*.

2.2.8.1 Analisis Eksergi

Efisiensi hukum I dan II Termodinamika adalah sering disebut efisiensi energi dan efisiensi eksergi. Efisiensi eksergi biasanya lebih rendah dari efisiensi energi, karena *irreversibilities* dari proses penghancuran beberapa eksergi masukan. Analisis eksergi adalah metodologi yang menggunakan prinsip konservasi energi (yang terkandung dalam hukum I Termodinamika) bersama-sama dengan non-konservasi prinsip entropi (diwujudkan dalam hukum II) untuk analisis, desain dan peningkatan energi serta sistem lainnya. Metode eksergi berguna untuk meningkatkan penggunaan energi efisiensi sumber daya, untuk mengkuantifikasi lokasi, jenis dan besaran limbah dan kerugian. Secara umum, efisiensi lebih bermakna dievaluasi dengan eksergi daripada analisis energi, karena efisiensi Eksergi terkait ukuran dari pendekatan ideal. Oleh karena itu, analisis eksergi mengidentifikasi margin yang tersedia untuk merancang sistem energi yang lebih efisien dengan mengurangi inefisiensi. (March A. rosen, 2009)

Analisis eksergi, karakteristik lingkungan referensi harus ditentukan sepenuhnya. Hal ini biasanya dilakukan dengan menentukan temperatur, tekanan dan komposisi kimia dari lingkungan referensi. Hasil analisis eksergi adalah relatif terhadap entropi yang terbentuk. Lingkungan referensi dalam sebagian besar aplikasi adalah model setelah lingkungan sebenarnya. eksergi sistem adalah nol ketika berada dalam kesetimbangan dengan lingkungan referensi. Hubungan antara eksergi dan lingkungan menyebabkan beberapa implikasi yang berkenaan terhadap dampak lingkungan.

2.2.8.2 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 :

$$\psi = \frac{\dot{E}x}{\dot{E}x_{solar}} \dots\dots\dots (2.11)$$

$\dot{E}x$ (W) menyatakan eksergi Fotovoltaik dan $\dot{E}x_{solar}$ (W) menyatakan eksergi matahari.

$$\dot{E}x = V_m I_m + \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{sel}}\right) [h_{ca}A (T_{sel} - T_{amb})] \dots\dots\dots (2.12)$$

$$\dot{E}x_{solar} = \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{solar}}\right) S_{\Gamma}A \dots\dots\dots (2.13)$$

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 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 :

$$IP = (1 - \psi) (\dot{E}x_{masuk} - \dot{E}x_{keluar}) \dots\dots\dots (2.14)$$

BAB III METODELOGI PENELITIAN

3.1. Metode Penelitian

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah *true eksperimental* dengan mengukur parameter yang berkaitan dengan efisiensi eksergi panel PV.

3.2. Objek dan Waktu Penelitian

Objek pada penelitian adalah panel fotovoltaik. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Energi Baru dan Terbarukan Fakultas Teknik Universitas Mataram. Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Maret hingga Mei 2013. Waktu pengukuran dimulai dari pukul 09.00 sampai pukul 17.00 Wita

3.3 Alat dan Bahan Penelitian

Beberapa alat penunjang dibutuhkan untuk pengambilan data dalam penelitian dan digunakan dalam menganalisis kinerja eksergi panel fotovoltaik. Adapun alat-alat yang digunakan adalah sebagai berikut :

1. Panel PV monokristal Produk SHARP ND-T065M1 dengan spesifikasi sebagai berikut :

$$P_{\max} = 65 \text{ Watt}$$

$$V_{OC} = 22 \text{ Volt}$$

$$I_{SC} = 4,05 \text{ Ampere}$$

$$V_{mpp} = 17,5 \text{ Volt}$$

$$I_{mpp} = 3,72 \text{ Ampere}$$

$$\text{Maximum sistem Voltage} = 600 \text{ Volt}$$

$$\text{Over-current Protection} = 7,5 \text{ Ampere}$$

$$\text{Jenis panel surya} = \text{Monokristal}$$

$$\text{Luas sel surya} = 36 \text{ sel (15,5 cm x 7,8 cm)}$$

$$= 4352.4 \text{ cm}^2$$

$$= 0.43524 \text{ m}^2$$

Luas panel surya	= 78,5 cm x 67 cm
	= 5259.5 cm ²
	= 0.52595 m ²
Temperatur normal	= 25°C

2. *Thermometer*.
3. *Digital Clamp meter/ Tang Ampere* untuk mengukur nilai arus hubung dan tegangan hubung terbuka
4. *Pyranometer* dan yang terhubung ke datalogger dan seperangkat komputer sebagai media perekam data.
5. *Charge controller* dengan sebagai berikut :
 - Input* = 12 V
 - Output* = 12/24 V
6. Baterai penyimpanan dengan spesifikasi sebagai berikut :
 - Voltage* = 12 V, 105 Ah
 - Nominal float voltage* = 2,27 ± 0,02 V/ cell at 25°C
7. Anemometer portabel.
8. Multimeter.

3.3. Langkah-Langkah 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.

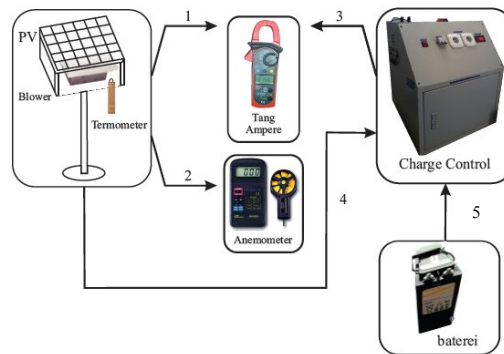
2. Pengumpulan Data

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 3.1 dibawah ini :



Gambar 3.1 ilustrasi alur pengujian

Keterangan :

1. Mengukur parameter V_{oc} dan I_{sc} dari panel PV
2. Mengukur kelajuan angin dari *blower* yang bernilai konstan 2 m/s dan 4 m/s
3. Mengukur parameter V_m dan I_m 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 ± 1.5 m di tempat penelitian, yang arah dan orientasi sudut terhadap matahari telah ditetapkan sebesar 30° 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 (S_T)
- Kelajuan angin (v)

7. Menghitung nilai T_{sel} (temperatur sel) dengan menggunakan perhitungan temperatur belakang panel menggunakan persamaan 2.1 dan 2.2.

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 2.10.
 - Menghitung laju energi yang dihasilkan oleh panel PV dengan menggunakan persamaan 2.9.
 - Menghitung efisiensi energi yang dihasilkan dengan menggunakan persamaan 2.8.
- Perhitungan efisiensi eksergi
 - Menghitung nilai eksergi yang dihasilkan oleh panel PV dengan menggunakan persamaan 2.12.
 - Menghitung besar eksergi matahari yang diperoleh dari hasil pengukuran menggunakan persamaan 2.13.
 - Menghitung efisiensi eksergi menggunakan persamaan 2.11.
- Melakukan perhitungan nilai *improvement potensial eksergi* (IP) untuk melihat laju nilai pemusnahan eksergi yang dihasilkan dengan menggunakan persamaan 2.14.

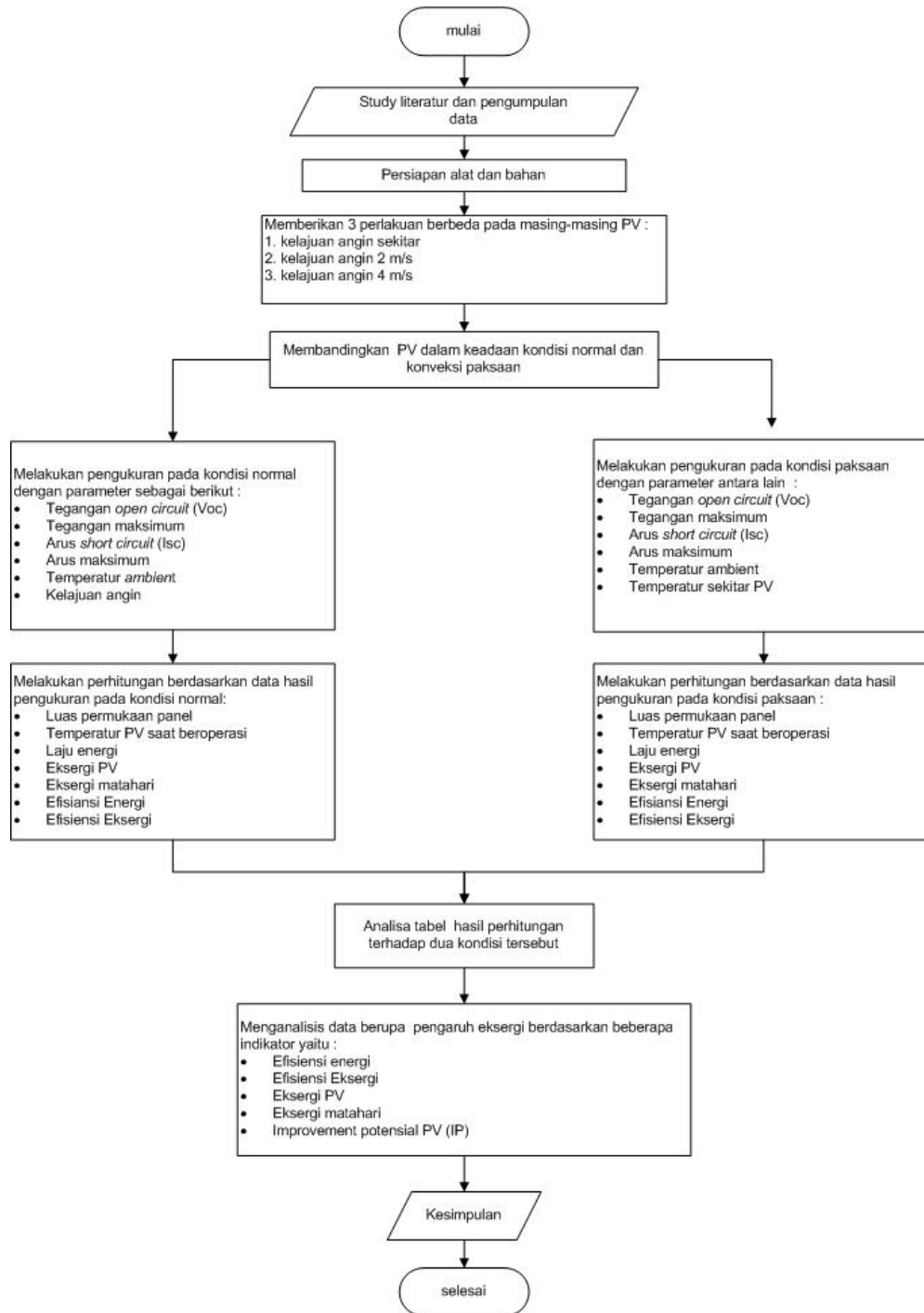
9. Analisis Data

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 (η), efisiensi eksergi (η_{ex}) serta nilai *improvement potensial* (IP) yang dihasilkan.

10. Menarik Kesimpulan.

3.4 Diagram Alir



Gambar 3.2 Diagram alir penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Parameter Pengukuran

Analisa parameter pengukuran didapatkan dari proses perhitungan. Data perhitungan diperoleh dari pengukuran parameter yang dilakukan terhadap panel surya dengan tujuan untuk mengetahui efisiensi eksergi dari panel surya. Penelitian dilakukan pada dua panel surya dengan kondisi yang berbeda. Kondisi pertama adalah kondisi normal (tanpa perlakuan) dan kondisi kedua adalah konveksi paksaan dengan mengatur kelajuan angin 2 m/s dan 4 m/s. Parameter-parameter yang menjadi acuan pengukuran adalah temperatur panel, temperatur lingkungan, intensitas radiasi surya, tegangan, arus dan kelajuan angin.

4.1.1 Data parameter pengukuran

Data pengukuran diperoleh melalui pengujian langsung terhadap obyek penelitian di lapangan. Data pengukuran meliputi parameter yang menjadi acuan pengukuran. Data pengukuran dipergunakan sebagai data awal untuk membantu proses perhitungan dari efisiensi eksergetik panel, sehingga diketahui pemusnahan eksergi dan eksergi yang dimanfaatkan oleh panel tersebut. data pengukuran yang didapatkan selama penelitian tercantum pada tabel 4.1 dan tabel 4.2

Table 4.1 Nilai tegangan *open circuit* dan arus *short cicuit*

Waktu (Jam)	Normal		2 m/s		4 m/s	
	V _{oc} (V)	I _{sc} (A)	V _{oc} (V)	I _{sc} (A)	V _{oc} (V)	I _{sc} (A)
09.00	18.90	2.70	19.20	2.60	20.10	2.48
10.00	18.78	3.08	19.37	2.98	20.10	2.87
11.00	19.10	3.20	19.30	3.15	20.07	3.05
12.00	19.10	3.26	19.66	3.20	20.08	2.98
13.00	19.09	2.98	19.69	2.50	20.00	2.30
14.00	18.77	2.20	19.54	1.80	19.78	1.75
15.00	17.86	1.10	19.00	1.30	19.00	0.80
16.00	18.00	1.50	18.76	1.20	18.89	1.10

Tabel 4.2 Nilai tegangan maksimum dan arus maksimum panel PV

Waktu (Jam)	Normal		2 m/s		4 m/s	
	V _m (V)	I _m (A)	V _m (V)	I _m (A)	V _m (V)	I _m (A)
09.00	12,98	2,00	13,00	1,80	13,00	1,75
10.00	13,87	2,61	14,00	2,69	13,45	2,54
11.00	14,32	2,53	14,36	2,07	13,20	2,00
12.00	14,47	2,48	15,54	2,20	13,20	1,98
13.00	14,00	1,82	14,93	1,70	13,45	1,66
14.00	13,13	0,87	13,14	1,97	13,46	0,75
15.00	12,89	0,53	13,03	0,83	13,20	0,40
16.00	13,00	0,54	13,08	0,80	13,09	0,30

4.1.2 Perbandingan data pengukuran dan perhitungan

Membandingkan antara hasil perhitungan dengan hasil pengukuran menggunakan persamaan 2.5 dan persamaan 2.6. Untuk memvalidasi data hasil pengukuran yang telah dilakukan. Data spesifikasi panel yang dibutuhkan untuk melakukan perhitungan tertera pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Spesifikasi panel fotovoltaik

Parameter Panel Surya	Keterangan
Panel PV	Monokristal SHARP ND-T065M1
P _{max}	65 Watt
V _{OC}	22 Volt
I _{SC}	4,05 <i>Ampere</i>
V _{mpp}	17,5 Volt
I _{mpp}	3,72 <i>Ampere</i>
μ_{Isc} (koefisien temperatur arus)	1.2 m A/ ⁰ C (F. sarhaddi,2010)

μ_{voc} (koefisien temperatur tegangan)	-0.077 V/ ⁰ C (F, sarhaddi,2010)
Parameter Panel Surya	Keterangan
G	Berdasarkan data pengukuran
G_{ref}	1000 W/m ²
T_c	Berdasarkan data pengukuran
$T_{c\ ref}$	25 ⁰ C

- Perhitungan tegangan *open circuit*

Mencari nilai tegangan terminal V_t dengan menggunakan persamaan 2.4 dimana K adalah konstanta boltzman bernilai $1,38 \times 10^{-23}$ (JK⁻¹) dan q adalah muatan coulomb bernilai $0,16 \times 10^{-18}$ C

$$\begin{aligned}
 V_t &= \frac{kT_c}{q} \\
 &= \frac{1,38 \times 10^{-23} \times 46,91}{0,16 \times 10^{-18}} \\
 &= 4,0457184 \text{E-}39
 \end{aligned}$$

Nilai V_t disubstitusikan ke persamaan 2.6 dengan N_s jumlah sel yang tersusun seri sejumlah 36 sel, n_i faktor ideal diode 0.7 Si, dan $m = N_s n_i$.

$$\begin{aligned}
 V_{oc} &= V_{oc,ref} + mV_t \ln \frac{G}{G_{ref}} + \mu_{voc} (T_c - T_{c,ref}) \\
 &= 22 + 36 \cdot 0.7 \cdot 4,0457184 \text{E-}39 \ln (451,90/1000) + (-0.077) \cdot (46.91 - 25) \\
 &= 19,31 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Dari perhitungan tersebut diperoleh tabel 4.3 perbandingan tegangan ukur dan tegangan hitung pada berbagai variasi kelajuan yaitu normal, 2 m/s, dan 4 m/s. data selengkapnya dapat dilihat pada **Lampiran E**.

Tabel 4.4 Perbandingan nilai tegangan ukur dan tegangan hitung

Waktu (Jam)	Normal		2 m/s		4 m/s	
	V _{oc} ukur (V)	V _{oc} (V)	V _{oc} ukur (V)	V _{oc} (V)	V _{oc} ukur (V)	V _{oc} (V)
09.00	18.90	19.31	19.20	19.64	20.10	20.78
10.00	18.78	18.88	19.37	20.26	20.10	20.29
11.00	19.10	19.29	19.30	19.67	20.07	19.72
12.00	19.10	18.81	19.66	19.19	20.08	20.26
13.00	19.09	18.94	19.69	19.39	20.00	20.37
14.00	18.77	19.28	19.54	19.57	19.78	19.70
15.00	17.86	18.23	19.00	19.28	19.00	19.23
16.00	18.00	18.58	18.76	18.61	18.89	18.66

- Perhitungan arus *short circuit*

Mencari nilai arus hitung dengan spesifikasi berdasarkan keterangan tabel 4.2 dengan menggunakan persamaan 2.5.

$$I_{sc} = I_{sc,ref} \frac{G}{G_{ref}} + \mu_{Isc} (T_c - T_{c,ref})$$

$$= 4.05 * (451.90/1000) + 0.0012 (46.91-25)$$

$$= 1.85 \text{ A}$$

Data selanjutnya dapat dilihat pada tabel 4.5. selengkapnya terlampir pada **Lampiran E.**

Tabel 4.5 Perbandingan nilai arus ukur dan arus hitung

Waktu (Jam)	Normal		2 m/s		4 m/s	
	I _{sc} ukur (A)	I _{sc} (A)	I _{sc} ukur (A)	I _{sc} (A)	I _{sc} ukur (A)	I _{sc} (A)
9.00	2.70	1.86	2.60	1.85	2.48	1.85
10.00	3.08	2.83	2.98	2.39	2.87	2.39
11.00	3.20	3.26	3.15	3.05	3.05	3.05
12.00	3.26	3.25	3.20	3.25	2.98	2.93
13.00	2.98	2.85	2.50	2.84	2.30	2.67

14.00	2.20	2.09	1.80	2.09	1.75	2.09
15.00	1.10	0.69	1.30	0.69	0.80	0.69
16.00	1.50	1.64	1.20	1.64	1.10	1.64

4.1.3 Perhitungan Temperatur Panel

Untuk mengetahui nilai efisiensi eksergi dari panel surya maka langkah pertama adalah menghitung nilai temperatur sel dan menghitung temperatur belakang modul terlebih dahulu menggunakan persamaan 2.1 dan persamaan 2.2. Parameter pengukuran yang dibutuhkan sebagai data awal tercantum pada Tabel 4.4. untuk data pengukuran selengkapnya terlampir pada **Lampiran D**.

Tabel 4.6 Pengukuran intensitas matahari, temperatur sekitar modul dan kelajuan angin

Waktu (Jam)	S _T (W/m ²)	E _o (W/m ²)	Normal	2 m/s	4 m/s
			T _α (°C)	T _α (°C)	T _α (°C)
09.00	451,90	1000	31,00	29,00	29,00
10.00	583,10		32,00	30,00	29,00
11.00	670,60		37,00	35,00	32,00
12.00	711,90		42,00	40,00	39,00
13.00	691,90		41,00	38,00	37,00
14.00	683,10		37,00	36,00	35,00
15.00	113,10		32,00	31,00	30,00
16.00	399,40		32,00	31,00	30,00

-
- Perhitungan nilai T_{sel} untuk kondisi normal

Perhitungan dibawah ini menggunakan persamaan 2.1 dan 2.2. Spesifikasi tipe struktur panel *glass/cell/glass*. T₁ = 25 °C. T₂ = 8.2 °C. b = -0.112. dan ΔT = 2°C dan kelajuan angin bertiup = 0 m/s (berdasarkan Tabel 2.1)

$$T_m = \frac{ST}{E_o} \cdot \{T_1 \cdot e^{b \cdot v} + T_2\} + T_\alpha$$

$$T_m = \frac{451,90}{1000} \cdot \{25 \cdot e^{-0.112 \cdot 0} + 8,2\} + 31$$

$$T_m = 46 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Dimana nilai T_m disubtitusikan untuk mendapatkan temperatur panel (T_{sel})

$$T_{sel} = T_m + \frac{ST}{E_o} \cdot \Delta T$$

$$T_{sel} = 46 + \frac{451,90}{1000} \cdot 2$$

$$T_{sel} = 46,91 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Perhitungan nilai T_{sel} untuk kelajuan 2 m/s

Perhitungan dibawah ini menggunakan persamaan 2.1 dan 2.2 dengan spesifikasi tipe struktur panel *glass/cell/glass*. $T_1 = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$. $T_2 = 8.2 \text{ } ^\circ\text{C}$. $b = -0.112$. dan $\Delta T = 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ dan kelajuan angin bertiup = 0 m/s (berdasarkan Tabel 2.1)

$$T_m = \frac{ST}{E_o} \cdot \{T_1 \cdot e^{b \cdot v} + T_2\} + T_\alpha$$

$$T_m = \frac{451,90}{1000} \cdot \{25 \cdot e^{-0.112 \cdot 2} + 8,2\} + 29$$

$$T_m = 41,74 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Dimana nilai T_m disubstitusikan untuk mendapatkan temperatur panel (T_{sel})

$$T_{sel} = T_m + \frac{ST}{E_o} \cdot \Delta T$$

$$T_{sel} = 41,74 + \frac{451,90}{1000} \cdot 2$$

$$T_{sel} = 42,64 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Perhitungan nilai T_{sel} untuk kelajuan 4 m/s

Perhitungan dibawah ini menggunakan persamaan 2.1 dan 2.2 dengan spesifikasi tipe struktur panel *glass/cell/glass*. $T_1 = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$. $T_2 = 8.2 \text{ } ^\circ\text{C}$. $b = -0.112$. dan $\Delta T = 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ dan kelajuan angin bertiup = 0 m/s (berdasarkan Tabel 2.1)

$$T_m = \frac{ST}{E_o} \cdot \{T_1 \cdot e^{b \cdot v} + T_2\} + T_\alpha$$

$$T_m = \frac{451,90}{1000} \cdot \{25 \cdot e^{-0.112 \cdot 4} + 8,2\} + 29$$

$$T_m = 39,92 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Dimana nilai T_m disubstitusikan untuk mendapatkan temperatur panel (T_{sel})

$$T_{sel} = T_m + \frac{ST}{E_o} \cdot \Delta T$$

$$T_{sel} = 39,92 + \frac{451,90}{1000} \cdot 2$$

$$T_{sel} = 40,83 \text{ } ^\circ\text{C}$$

dengan:

T_m = temperatur permukaan belakang panel. $^\circ\text{C}$.

T_α = temperatur sekitar (lingkungan/kamar). $^\circ\text{C}$.

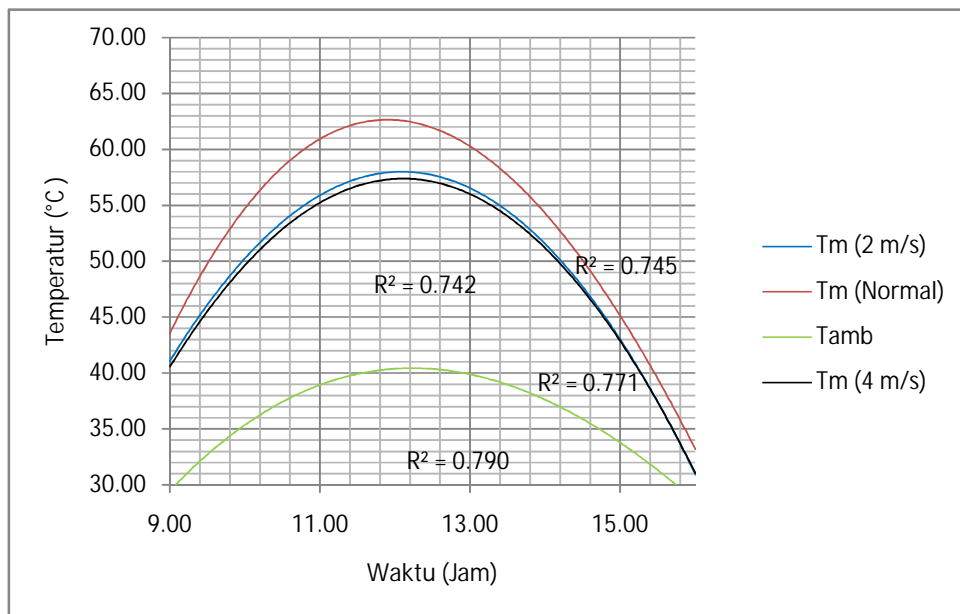
S_T = radiasi surya pada panel. W/m^2 .

E_o = radiasi referensi. $1000 \text{ W}/\text{m}^2$.

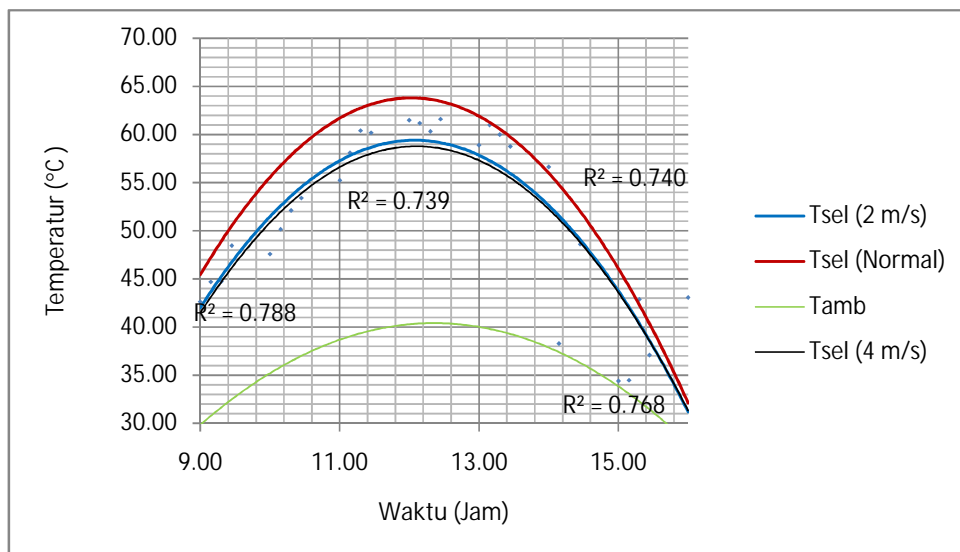
V = kelajuan angin

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

Hasil perhitungan temperatur panel dapat terlihat pada grafik perbandingan 4.1 dan data selengkapnya terlampir pada **Lampiran D**.



Gambar 4.1.a. Grafik perbandingan temperatur belakang panel (T_m) dengan tempetaratur *ambient* (T_{amb})antara PV 1 dan PV 2 .



Gambar 4.1 b. Grafik perbandingan temperatur sel (T_{sel}). temperatur lingkungan (T_{amb}) antara PV 1 dan PV 2

Dari grafik 4.1.a, 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 2.1 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) besar dan suhu sekitar modul (T_a) maka grafik akan mengalami peningkatan. Terlihat pada pukul 12.00 Wita, T_m bernilai 65,05 °C, pada panel dengan kondisi normal dengan nilai R^2 adalah 0,740. Nilai R^2 menunjukkan bahwa kecocokan data pengujian dengan garis trend polynomial. Semakin besar nilai R^2 (kisaran 0-1) maka semakin cocok antara data dengan trend yang terbentuk.

Grafik 4.1.b, dimana nilai T_{sel} panel konveksi paksa lebih kecil dari panel kondisi normal. Jika kedua grafik perbandingan disandingkan terlihat perbedaan nilai antara T_m dan T_{sel} . Nilai T_m lebih rendah dibandingkan nilai T_{sel} , berdasarkan persamaan 2.2 nilai T_{sel} tertinggi yaitu 66,47 °C pada panel kondisi normal sedangkan nilai T_{sel} terendah 34,96 °C pada panel dengan kelajuan 4 m/s. Semakin besar laju angin pada panel akan menurunkan nilai temperatur panel. Perbedaan nilai T_{sel} , T_m , dan T_{amb} dikarenakan proses konversi yang terjadi pada panel PV menimbulkan energi panas. Nilai T_{sel} biasanya selalu lebih tinggi dibandingkan nilai T_m dan T_{amb} .

4.1.4 Perhitungan Laju Energi Dari Panel Surya

Untuk mengetahui nilai efisiensi eksergi panel maka perlu mencari laju energi dari panel surya. Selain data temperatur dibutuhkan pula data lain yaitu data tegangan *open circuit* dan *arus short circuit* data tegangan panel yang terdapat pada table 4.1. Perhitungan laju energi panel meliputi :

- Laju energi panel kondisi normal

Diketahui nilai V_{oc} adalah 18,90 V. I_{sc} adalah 2,70 A. luas panel (A) adalah 0,5034 m². T_{sel} adalah 46,91 °C. dan T_{amb} adalah 31,00 °C

- Menghitung nilai koefisien transfer panas (h_{ca}) yang disubstitusikan pada perhitungan laju energi PV menggunakan persamaan 2.10 :

$$\begin{aligned}h_{ca} &= 5,7 + 3,8 v \\ &= 5,7 + 3,8 * 0 \\ &= 5,70 \text{ W/m}^2\end{aligned}$$

- Menghitung laju energi yang dihasilkan dengan menggunakan persamaan 2.9 :

$$\begin{aligned}\dot{E}_n &= E_{el} + Q = V_{oc} I_{sc} + h_{ca} A (T_{sel} - T_{amb}). \\ &= 18,90 * 2,70 + 5,70 (46,91 - 31,00) \\ &= 100,61 \text{ W}\end{aligned}$$

- Menghitung efisiensi energi yang dihasilkan dengan menggunakan

persamaan 2.8 : $\eta = \frac{\dot{E}_n}{S T A}$

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{100,61}{239,68} \\ &= 0,42\end{aligned}$$

- Laju energi panel dengan kelajuan angin 2 m/s

Diketahui V_{oc} adalah 19,20 V. I_{sc} adalah 2,60 A. luas panel (A) adalah 0,5034 m². T_{sel} adalah 42,64 °C. dan T_{amb} adalah 33 °C

- Mencari nilai koefisien transfer panas (h_{ca}) :

$$\begin{aligned}h_{ca} &= 5,7 + 3,8 v \\ &= 5,7 + 3,8 * 2 \\ &= 12,3 \text{ W/m}^2\end{aligned}$$

- Menghitung laju energi yang dihasilkan oleh sistem PV dengan menggunakan persamaan 2.9 :

$$\begin{aligned}\dot{E}n &= E_{el} + Q = V_{oc} I_{sc} + h_{ca} A (T_{sel} - T_{amb}). \\ &= 19,20 * 2,60 + 12,3 * 0,53 (42,64 - 31) \\ &= 124,94 \text{ W}\end{aligned}$$

- Menghitung efisiensi energi yang dihasilkan dengan menggunakan persamaan

$$\begin{aligned}2.8 : \quad \eta &= \frac{\dot{E}n}{STA} \\ &= \frac{124,94}{239,69} \\ &= 0,52\end{aligned}$$

- Laju energi panel dengan kelajuan angin 4 m/s
Diketahui V_{oc} adalah 20,10 V. I_{sc} adalah 2,48 A. luas panel (A) adalah 0,5034 m^2 . T_{sel} adalah 42,64 $^{\circ}C$. dan T_{amb} adalah 33 $^{\circ}C$
- Mencari nilai koefisien transfer panas (h_{ca}):

$$\begin{aligned}h_{ca} &= 5,7 + 3,8 v \\ &= 5,7 + 3,8 * 4 \\ &= 20,9 \text{ W}/m^2\end{aligned}$$

- Menghitung laju energi yang dihasilkan oleh sistem PV dengan menggunakan persamaan 2.9 :

$$\begin{aligned}\dot{E}n &= E_{el} + Q = V_{oc} I_{sc} + h_{ca} A (T_{sel} - T_{amb}). \\ &= 20,10 * 2,48 + 20,9 * 0,53 (40,83 - 31) \\ &= 158,79 \text{ W}\end{aligned}$$

- Menghitung efisiensi energi yang dihasilkan dengan menggunakan persamaan

$$\begin{aligned}2.8 : \quad \eta &= \frac{\dot{E}n}{STA} \\ &= \frac{158,79}{239,69} \\ &= 0,66\end{aligned}$$

Untuk data perhitungan selengkapnya dapat dilihat pada tabel 4.2 berikut ini perhitungan selengkapnya dapat dilihat pada **Lampiran D**.

Tabel 4.7 Nilai koefisien konvektif transfer panas, laju energi dan efisiensi energi

Waktu (jam)	Normal			2 m/s			4 m/s		
	h_{ca} (W/m^2)	En (W)	H	h_{ca} (W/m^2)	En (W)	η	h_{ca} (W/m^2)	En (W)	η
09.00	5,70	100,61	0,42	12,3	124,94	0,52	20,9	158,79	0,66
10.00	5,70	119,9	0,39		158,50	0,51		226,86	0,73
11.00	6,46	140,73	0,40		176,89	0,50		255,78	0,72
12.00	6,84	157,11	0,42		194,41	0,50		266,38	0,71
13.00	10,26	172,59	0,48		163,05	0,44		246,74	0,67
14.00	7,22	13,51	0,36		159,33	0,44		232,80	0,64
15.00	19,00	52,23	0,87		34,88	0,58		48,01	0,80
16.00	13,68	105,35	0,50		93,94	0,44		136,66	0,65

4.1.4 Perhitungan Parameter Eksergi

Perhitungan parameter eksergi dilakukan untuk mengetahui unjuk kerja eksergi panel sistem PV. Dalam melakukan perhitungan parameter eksergi dibutuhkan data awal parameter pengukuran yang tertera pada tabel 4.2. Perhitungan parameter eksergi meliputi :

- Parameter eksergi panel kondisi normal

Diketahui nilai V_m adalah 12,98 V. I_m adalah 2,00 A. luas panel (A) adalah 5034 m^2 . h_{ca} adalah 5,70 W/m^2 . T_{sel} adalah 46,91 $^{\circ}C$. dan T_{amb} adalah 31,00 $^{\circ}C$

– Menghitung nilai eksergi yang dihasilkan oleh panel PV dengan menggunakan persamaan 2.12 :

$$\begin{aligned} \dot{E}_X &= V_m I_m + 1 - \frac{T_{amb}}{T_{sel}} [h_{ca} \cdot A (T_{sel} - T_{amb})] \\ &= 12,98 * 2,00 + 1 - \frac{31,00}{46,91} [5,70 \cdot 0,53(46,91 - 31,00) \end{aligned}$$

$$= 42,27 \text{ W}$$

- Menghitung besar eksergi matahari yang diperoleh dari hasil pengukuran menggunakan persamaan 2.13 :

$$\begin{aligned} \dot{E}x_{solar} &= \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{surya}}\right) S_T A \\ &= \left(1 - \frac{31,00}{5504}\right) 239,68 \\ &= 238,34 \text{ W} \end{aligned}$$

- Menghitung efisiensi eksergi menggunakan persamaan 2.11 :

$$\begin{aligned} \psi &= \frac{Ex}{Ex_{solar}} \\ &= \frac{42,27}{238,34} \\ &= 0,18 \end{aligned}$$

- Melakukan perhitungan nilai *improvement potensial eksergi* disingkat IP untuk melihat laju nilai pemusnahan eksergi yang dihasilkan dengan menggunakan persamaan 2.14 :

$$\begin{aligned} IP &= (1 - \psi) (\dot{E}x_{masuk} - \dot{E}x_{keluar}) \\ &= (1 - 0,18) (238,34 - 42,27) \\ &= 161,30 \text{ W} \end{aligned}$$

- Parameter eksergi panel dengan kelajuan 2 m/s
Diketahui nilai V_m adalah 13,00 V. I_m adalah 1,80 A. luas panel (A) adalah $0,5034 \text{ m}^2$. W/m^2 . T_{sel} adalah $42,64 \text{ }^\circ\text{C}$. dan T_{amb} adalah $29 \text{ }^\circ\text{C}$
- Menghitung nilai eksergi yang dihasilkan oleh sistem PV dengan menggunakan persamaan 2.12 :

$$\begin{aligned} \dot{E}x &= V_m I_m + 1 - \frac{T_{amb}}{T_{sel}} [h_{ca} A (T_{sel} - T_{amb})] \\ &= 13,00 * 1,80 + 1 - \frac{31,00}{42,64} [12 * 0,53 (42,64 - 31,00)] \\ &= 43,62 \text{ W} \end{aligned}$$

- Menghitung besar eksergi matahari yang diperoleh dari hasil pengukuran

menggunakan persamaan 2.13 :

$$\begin{aligned}\dot{E}x_{solar} &= \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{solar}}\right) S_T A \\ Ex_{solar} &= \left(1 - \frac{31}{5504}\right) 239,68 \\ &= 238,34 \text{ W}\end{aligned}$$

- Menghitung efisiensi eksergi menggunakan persamaan 2.11 :

$$\begin{aligned}\psi &= \frac{Ex}{Ex_{solar}} \\ &= \frac{43,62}{238,34} \\ &= 0,18\end{aligned}$$

- Melakukan perhitungan nilai *improvement potensial eksergi* disingkat IP untuk melihat laju nilai pemusnahan eksergi yang dihasilkan dengan menggunakan persamaan 2.14 :

$$\begin{aligned}IP &= (1 - \psi) (\dot{E}x_{masuk} - \dot{E}x_{keluar}) \\ &= (1 - 0,18) (238,34 - 43,62) \\ &= 159,08 \text{ W}\end{aligned}$$

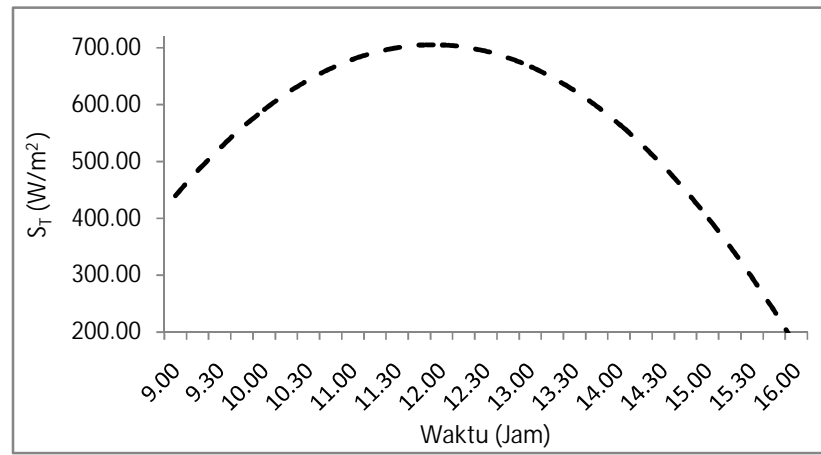
Hasil selengkapnya untuk perhitungan nilai eksergi PV dapat dilihat pada tabel 4.5 dan terlampir pada **Lampiran D**.

Tabel 4.8 Nilai eksergi solar, eksergi panel, efisiensi eksergi dan IP

Waktu (Jam)	Normal				2 m/s				4 m/s			
	Ex (W)	Ex _{solar} (W)	Ψ	IP (W)	Ex (W)	Ex _{solar} (W)	Ψ	IP (W)	Ex (W)	Ex _{solar} (W)	ψ	IP (W)
09.00	42,27	238,34	0,18	161,30	43,62	238,34	0,18	159,08	48,97	238,34	0,21	150,46
10.00	60,45	307,48	0,20	198,46	70,20	307,48	0,23	183,11	88,79	307,48	0,29	242,95
11.00	66,94	353,30	0,19	232,10	68,06	353,30	0,19	230,28	89,00	353,30	0,25	302,47
12.00	68,57	374,71	0,18	250,12	73,50	374,71	0,20	242,13	89,61	374,71	0,24	324,26
13.00	67,85	364,25	0,19	241,19	59,95	364,25	0,16	254,22	83,42	364,25	0,23	321,72
14.00	45,89	359,88	0,13	273,95	69,15	359,88	0,19	234,87	74,66	359,88	0,21	339,97
15.00	9,53	59,64	0,16	42,10	11,89	59,64	0,20	38,3	8,06	59,64	0,14	49,55
16.00	30,65	210,61	0,15	153,77	28,53	210,61	0,14	157,41	32,46	210,61	0,15	202,83

4.2 Pengaruh Intensitas Radiasi Surya Terhadap Efisiensi Eksergi Panel

Intensitas radiasi surya yang dipancarkan ke bumi selalu berubah-ubah sehingga membawa pengaruh besar pada keluaran panel surya. Data intensitas radiasi surya pada pengujian ini diambil menggunakan *pyranometer* yang dihubungkan ke sebuah komputer sebagai media penyimpanan data dengan menggunakan *HOBOWare Pro*. Waktu pengukuran ditetapkan pada pukul 9.00 hingga pukul 16.00 Wita.



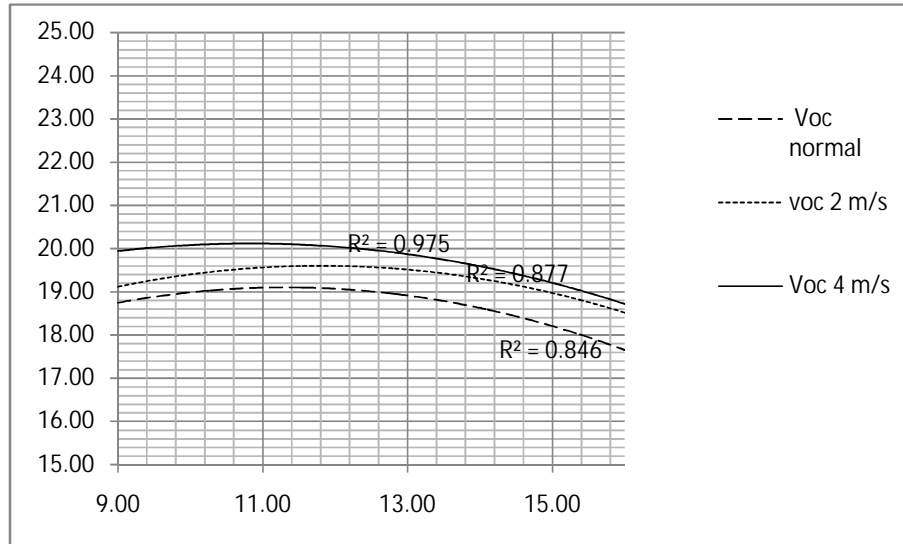
Gambar 4.2 Grafik pengaruh intensitas radiasi surya terhadap waktu

Dari gambar 4.2 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 intensitas juga mempengaruhi parameter lain dari efisiensi eksergi yaitu temperatur, tegangan dan arus terlihat dari gambar 4.1-gambar 4.4. Semakin tinggi nilai radiasi semakin meningkat nilai temperatur yang mengakibatkan menurunnya nilai tegangan dan meningkatnya nilai arus yang berpengaruh pada hasil efisiensi eksergi panel.

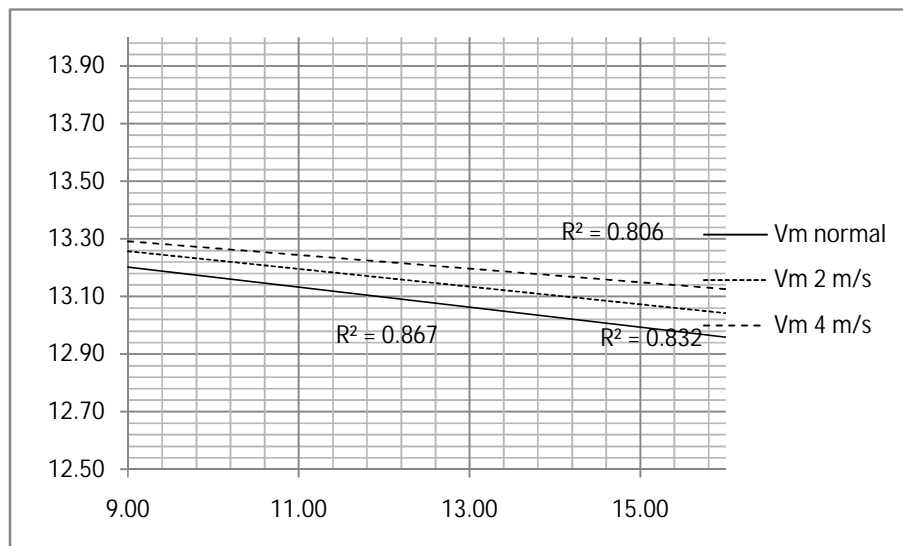
4.3 Pengaruh Tegangan Terhadap Efisiensi Energi Dan Eksergi

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.

yaitu : kondisi normal, kondisi kelajuan 2 m/s dan kondisi kelajuan 4 m/s. Nilai dari tiap kondisi dapat dilihat dari tabel 4.1 dan 4.2. Dari tabel tersebut diperoleh grafik yang ditunjukkan oleh gambar 4.3.a dan 4.3.b.



Gambar 4.3.a Perbandingan tegangan *open circuit* pada panel kondisi normal dan panel konveksi paksa



Gambar 4.3.b Perbandingan tegangan maksimum pada panel kondisi normal dan panel konveksi paksa

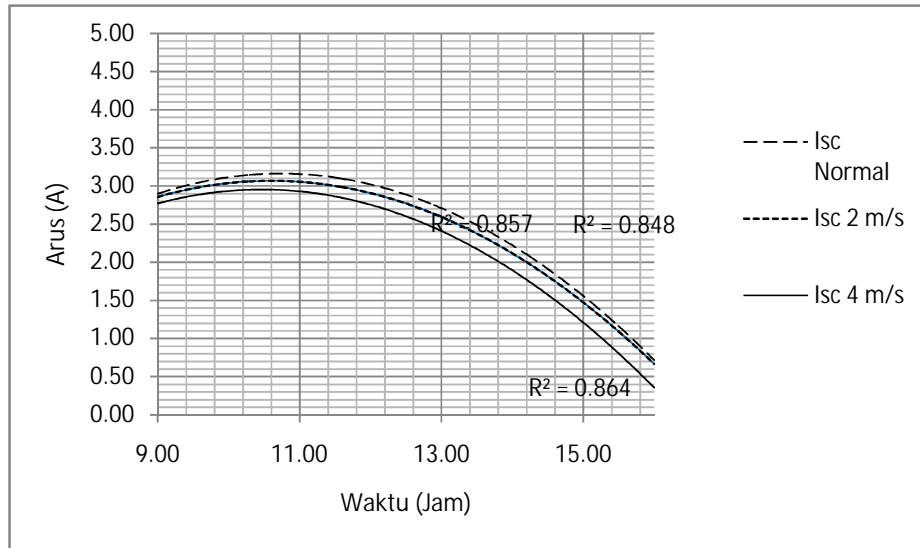
Pada gambar 4.3.a terlihat nilai tegangan open circuit (V_{oc}) dengan konveksi paksa mempunyai nilai yang lebih besar dibandingkan nilai tegangan dengan kondisi normal. Terlihat bahwa grafik mengalami peningkatan, terjadi pada pukul 09.00 – 14.00 PM, dan berangsur menurun pada pukul 14.00 – 16.00 PM. 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 – 10 $^{\circ}C$, maka tegangan input menurun dan bernilai 18-19 $^{\circ}C$.

Dari grafik 4.3.b 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 paksaan dinaikan lagi menjadi 4 m/s, maka nilai V_m akan cenderung naik menjadi 19 – 21 $^{\circ}C$. Dapat disimpulkan bahwa tegangan terukur yang dihasilkan oleh panel PV mengalami penurunan seiring peningkatan temperatur pada pukul 11.00 AM. Selain itu kecepatan anginpun berpengaruh pada penurunan nilai tegangan, semakin besar nilai kecepatan angin, maka semakin kecil nilai temperatur dan nilai penurunan tegangan cenderung mengecil. Nilai V_m konveksi paksaan umumnya lebih kecil dibandingkan dengan V_m kondisi normal.

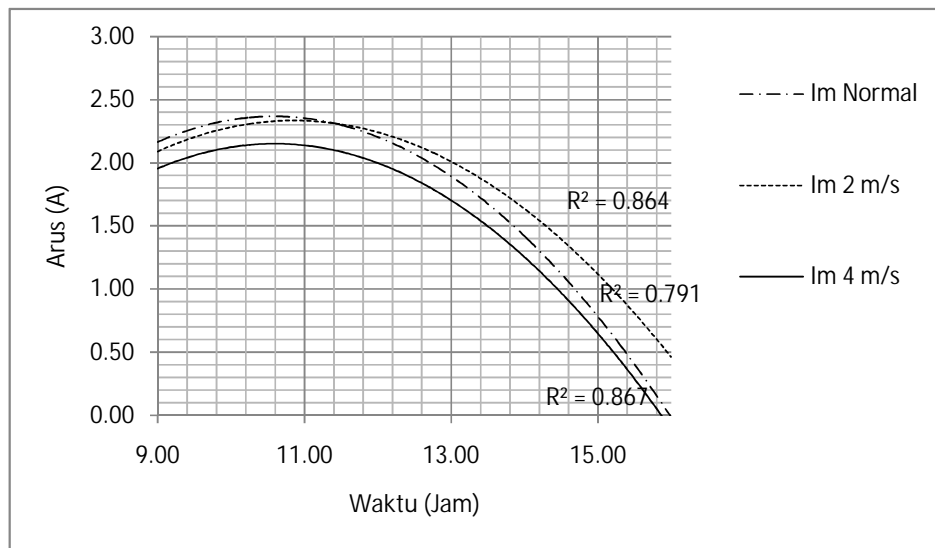
4.5 Pengaruh Arus Terhadap Efisiensi Energi Dan Eksergi Pada

Arus yang dihasilkan oleh panel surya memiliki nilai yang berbeda, dan berpengaruh pada nilai efisiensi eksergi dan energi. Besar kecilnya nilai arus dipengaruhi oleh perlakuan yang diberikan pada masing–masing yaitu : kondisi normal, kondisi kelajuan 2 m/s dan kondisi kelajuan 4 m/s. Nilai dari tiap kondisi

dapat dilihat dari tabel 4.1 dan 4.2. dan diperoleh grafik seperti pada gambar 4.4.a dan 4.4.b.



Gambar 4.4.a Perbandingan arus *short circuit* pada panel kondisi normal dan panel konveksi paksa



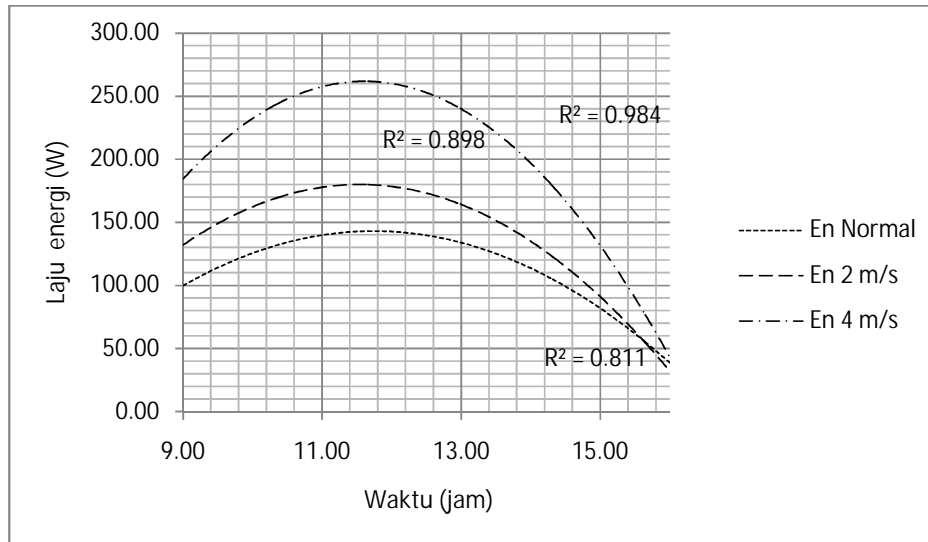
Gambar 4.4.b Perbandingan arus maksimum pada panel kondisi normal dan panel konveksi paksaan

Dari gambar 4.4.a 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 4.4.a dan grafik 4.4.. I_{sc} pada kondisi normal bernilai 2,70 A, I_{sc} konveksi paksaan 2 m/s bernilai 2,60 dan I_{sc} konveksi paksaan 4 m/s adalah 2.48 A. dapat disimpulkan bahwa kecepatan angin mempunyai pengaruh pada penurunan nilai arus semakin besar kecepatan angin maka semakin besar pula nilai arus panel PV. Arus input (I_{sc}) berkorelasi dengan intensitas energi matahari yang sampai ke permukaan panel dan arus output (I_m) akan diregulasikan untuk disimpan ke baterai.

Hal serupa berlaku juga pada grafik 4.4.b terlihat bahwa perbedaan arus maksimum (I_m) kondisi normal lebih kecil dari arus maksimum (I_m) konveksi paksaan. Nilai I_m kondisi normal adalah 2,61 A, I_m konveksi paksaan 2 m/s adalah 2,69 A, dan I_m konveksi paksaan 4 m/s adalah 1.75 A. Hal ini I_m kondisi normal lebih besar dari I_m konveksi paksaan. Semakin besar konveksi paksa arus cenderung semakin mengecil, dikarenakan kelajuan angin mempengaruhi kenaikan temperatur yang mengakibatkan kenaikan arus pada masing-masing panel PV. arus *short circuit* (I_{sc}) memiliki nilai yang lebih besar dari arus output atau arus maksimum (I_m).

4.5 Pengaruh Nilai Laju Energi Panel

Nilai laju energi mempengaruhi besar efisiensi energi yang dihasilkan oleh panel. Laju energi adalah banyaknya energi yang dihasilkan persatu-satuan waktu. Efisiensi energi adalah perbandingan antara laju energi dengan intensitas matahari dikali dengan luas permukaan panel. Dari tabel 4.7 maka diperoleh gambar 4.5 tentang perbandingan laju energi panel pada tiap kondisi



Gambar 4.5 Perbandingan laju energi panel kondisi normal dan konveksi paksaan

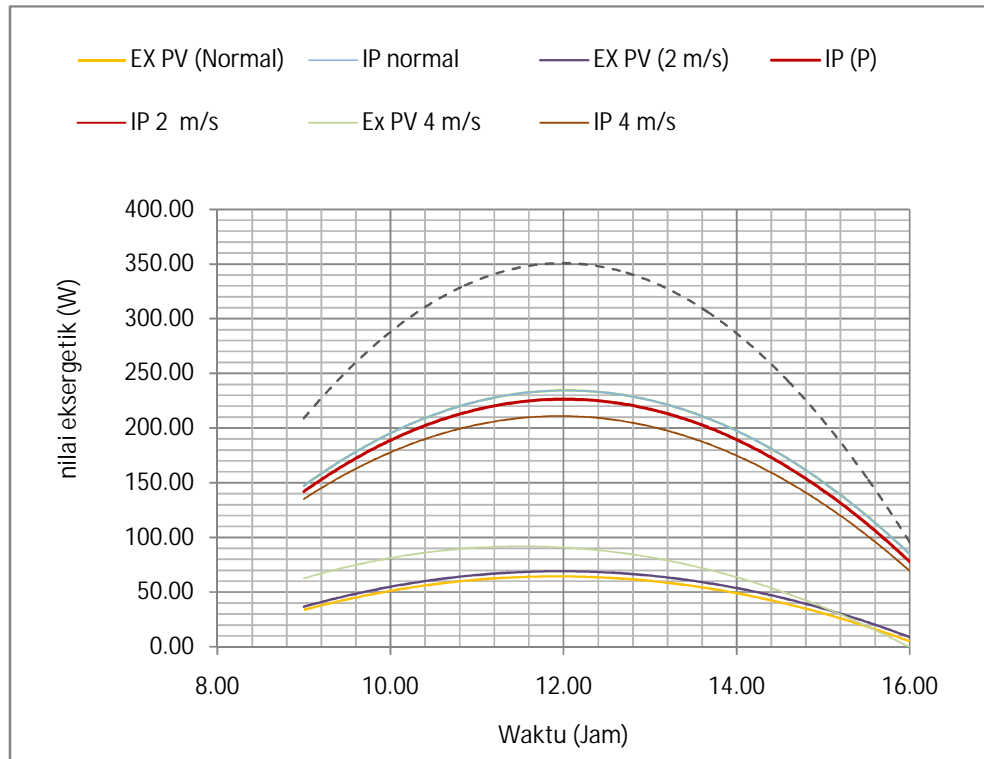
Pada gambar 4.5 menunjukkan hasil perhitungan laju energi PV yang diperoleh menggunakan persamaan 2.9 yaitu $En = V_{oc} + I_{sc} + h_{ca} \cdot A \cdot (T_{sel} - T_{amb})$. Dari persamaan tersebut dapat diketahui bahwa laju energi dipengaruhi oleh parameter arus *short circuit*, tegangan *open circuit*, suhu sel, suhu lingkungan, dan nilai koefisien transfer panas konvektif (h_{ca}), semakin besar nilai h_{ca} maka semakin besar pula nilai laju energi.

Pada grafik menjelaskan bahwa laju energi panel dengan kelajuan 4 m/s lebih besar dibandingkan laju energi lainnya hal ini berkaitan dengan nilai h_{ca} yang dihitung. Dari persamaan 2.10 yaitu $h_{ca} = 5.7 + 3.8 \cdot V$, pada persamaan tersebut terlihat bahwa faktor yang mempengaruhi nilai h_{ca} adalah kelajuan angin, oleh karena itu besar kecilnya nilai h_{ca} tergantung pada besar kecilnya kelajuan angin yang diterima oleh permukaan panel. Selain itu nilai V_{oc} dan I_{sc} juga berpengaruh pada besarnya laju energi yang dihasilkan panel. Ketika V_{oc} dan I_{sc} mengalami peningkatan karena adanya peningkatan intensitas radiasi matahari maka nilai laju energi juga mengalami peningkatan. Peningkatan laju energi terjadi dari pukul 09.00-12.00 Wita yang memiliki nilai berkisar 100-150W untuk kelajuan normal sedangkan untuk kondisi konveksi paksaan dengan kelajuan 2 m/s bernilai 120-200 W dan untuk kelajuan 4 m/s memiliki nilai 150-260W. dari data yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa laju energi terbaik diperoleh dari

nilai tegangan dan arus yang tinggi, kelajuan angin yang kencang dan intensitas yang tinggi pula. Nilai laju energi mempengaruhi besar efisiensi energi yang dihasilkan oleh panel.

4.6 Pengaruh Nilai Eksergi Panel

Dari tabel 4.8 maka diperoleh gambar 4.6 tentang perbandingan eksergi panel pada tiap kondisi



Gambar 4.6 Perbandingan eksergi panel kondisi normal dan panel konveksi paksa

Pada gambar 4.5 menunjukkan hasil perhitungan *improvement potential* (IP) PV yang diperoleh menggunakan persamaan 2.14 yaitu $IP = (1 - \psi) (\dot{E}x_{masuk} - \dot{E}x_{keluar})$ 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 IP adalah eksergi. Dimana eksergi PV dan

eksergi surya dipengaruhi oleh parameter arus maksimum, tegangan maksimum, suhu sel dan suhu lingkungan.

Peningkatan nilai IP dikarenakan eksergi radiasi yang besar sedangkan eksergi PV yang kecil. Misalkan, Eksergi radiasi matahari pada pukul 09.00 AM adalah 240 W, sedangkan eksergi PV pada pukul 09.00 adalah 44 W dan nilai efisiensi eksergi sebesar 0,18 W. jika parameter tersebut disubstitusikan pada persamaan 2.14 maka diperoleh IP sebesar 161,30 W. dan pada pukul 12.00 PM IP semakin meningkat, dikarenakan nilai eksergi surya yang juga meningkat, karena nilai intensitas radiasi surya yang semakin besar. nilai IP cenderung menurun pada pukul 12.00-16.00 PM. Intensitas radiasi surya yang menurun, menyebabkan nilai eksergi solar menurun sehingga nilai IP menjadi kecil. Nilai IP terkecil terjadi pada pukul 15.45 PM yaitu 84,26 W dengan intensitas radiasi surya sebesar 201,90 W/m²

Pada grafik terlihat bahwa eksergi PV kondisi normal memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan dengan eksergi PV konveksi paksaan, dengan nilai eksergi masukan yang sama. nilai eksergi PV kondisi normal berkisar 10 W - 66 W, panel dengan kelajuan 2 m/s bernilai 11 W – 72 W, dan panel dengan kelajuan 4 m/s bernilai 8 W – 94 W. Sedangkan IP pada panel kondisi normal memiliki nilai yang lebih besar dari IP panel kondisi paksaan, disebabkan oleh proses pemusnahan eksergi saat terjadinya konversi yang berkaitan dengan adanya pembentukan entropi.

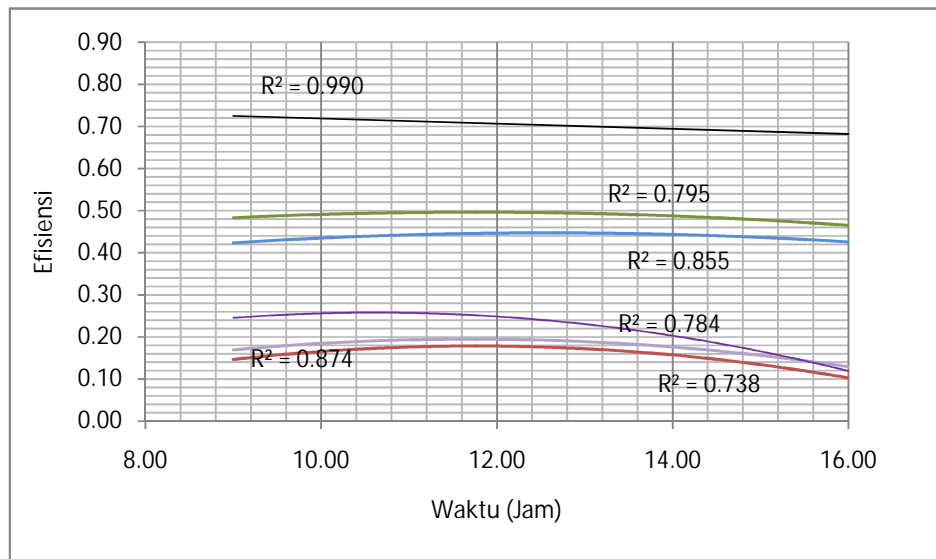
Pemusnahan eksergi pada PV dengan kelajuan angin 2 m/s lebih kecil karena adanya perlakuan yang diberikan untuk menekan kenaikan temperatur yang berpengaruh pada kinerja PV. Ketika kelajuan angin ditambahkan menjadi 4 m/s maka pemusnahan eksergipun cenderung lebih mengecil dibandingkan eksergi kondisi normal dan eksergi dengan kelajuan angin 2 m/s.

Pada kenyataannya eksergi merupakan bagian dari energi yang hilang saat melakukan konversi energi. Terlihat dari grafik bahwa eksergi surya dengan kondisi normal sama dengan eksergi surya dengan konveksi paksaan ini dikarenakan jumlah eksergi masukan yang diterima diperoleh dari sumber yang sama, hanya dalam satu waktu pada dua perlakuan berbeda.

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. Dengan kata lain, hasil pengujian yang dilakukan menunjukkan bahwa aliran eksergi yang masuk (radiasi matahari) sekitar 5- 15% yang diubah menjadi usaha yang bermanfaat oleh PV.

4.6 Perbandingan Efisiensi Energi Dan Eksergi Panel

Perbandingan efisiensi energi dan efisiensi eksergi dapat dilihat pada tabel 4.4 dan tabel 4.5. dari tabel tersebut diperoleh gambar grafik 4.6



Gambar 4.6 Perbandingan efisiensi energi dan eksergi

Dengan mengacu pada data hasil pengukuran tabel 4.1 hingga 4.4 Maka efisiensi energi dan eksergi dapat dihitung. Hasil perhitungan efisiensi energi dan eksergi PV dalam setiap jam pengamatan tertera pada table 4.5 dan ditunjukkan pada Gambar 4.6, 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.

Secara teori efisiensi energi selalu lebih besar dibandingkan efisiensi eksergi, dikarenakan adanya pembetulan entropi yang mengakibatkan pemusnahan eksergi, pada saat proses pengkonversian berlangsung. pemusnahan eksergi mengakibatkan penurunan kualitas energi. Sehingga dalam kenyataannya energi cahaya yang tersalurkan tidak sepenuhnya diubah menjadi energi. Adanya proses *irreversibility* itulah yang menyebabkan energi cahaya yang diubah menjadi energi listrik berusaha untuk memperoleh keadaan setimbang yaitu keadaan yang sama dengan kondisi acuanya. Untuk memperoleh keadaan yang sama dengan kondisi acuan tidaklah mudah karena ada faktor lingkungan yang mempengaruhi kesetimbangan tersebut. Dalam mengukur besar usaha yang dikeluarkan sistem digunakanlah eksergi.

Efisiensi eksergi untuk kondisi normal 11% -19%, untuk panel dengan kelajuan angin 2 m/s adalah 11% - 22% dan untuk panel dengan kelajuan 4 m/s adalah 11-29% %. Efisiensi eksergi maksimum terjadi pada pukul 12.00 sedangkan efisiensi eksergi minimum terjadi pada pukul 16.00 Wita. Rendahnya efisiensi berkaitan dengan rendahnya intensitas radiasi surya yang diterima sistem. Proses pendinginan PV dilakukan dengan memberikan kelajuan angin 2 m/s dan 4 m/s pada permukaan bawah panel. Semakin besar nilai kelajuan angin dengan intensitas radiasi surya yang besar, akan membuat nilai efisiensi energi semakin besar karena nilai efisiensi eksergi yang cenderung naik.

Nilai kelajuan angin yang besar menyebabkan temperatur panel tidak meningkat secara drastis, arus tidak meningkat drastis, ataupun terjadinya penurunan tegangan yang signifikan. eksergi yang dihasilkan dan dimanfaatkan lebih besar yang diperoleh dari eksergi masukan yang diterima. Temperatur yang meningkat secara spontan memungkinkan kehilangan eksergi dalam proses pengkonversian energi matahari menjadi energi listrik. Dari hasil grafik dapat disimpulkan bahwa panel dengan konveksi paksaan 4 m/s memiliki nilai efisiensi yang lebih baik dibandingkan panel lainnya.

BAB V

PENUTUP

5.1 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 diperoleh dari data – data penelitian sebagai berikut :
 - Efisiensi eksergi dapat ditingkat dengan menekan temperatur yang ada pada permukaan PV. Temperatur yang tinggi (40 °C-60 °C) tidak diinginkan pada sistem PV. 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 °C, 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
 - Intensitas radiasi surya menjadi salah satu penentu kenaikan temperatur dan nilai eksergi panel. Semakin tinggi intensitas radiasi surya maka nilai temperatur akan semakin meningkat. Nilai intensitas tertinggi adalah 715.60 W/m² pada pukul 12.45 PM
 - Kelajuan angin mempengaruhi nilai eksergi panel, semakin besar laju angin yang berhembus disekitar panel maka semakin besar pula nilai eksergi dari panel tersebut. Untuk panel dengan kelajuan angin 4 m/s memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan panel dengan kelajuan angin 2 m/s.
2. Kinerja panel fotovoltaik dipengaruhi dari beberapa parameter yaitu IP, eksergi PV, eksergi solar dan efisensi. Panel 4m/s memiliki kinerja lebih baik dibanding panel lainnya. Ditunjukkan dari data 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 sebesar 42-50%, efisiensi energi panel kelajuan 2 m/s bernilai 45-51%, dan efisiensi energi panel kelajuan 4 m/s sebesar 60-80%, selama selang waktu pengamatan.
- 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 aelang waktu pengamatan.

5.2 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.
2. Diharapkan bagi mahasiswa yang ingin melakukan penelitian pengembangan dari skripsi ini, dapat menambahkan variasi kelajuan angin dan metode penurunan temperatur PV yang lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahern JE. 1980. *The Exergy Method of Energy Systems Analysis*. New York : John Wiley & Sons.
- Cengel Yunus A and Boles Michael A. 2010. 7th edition. *Thermodynamics An Engineering Approach*. McGraw-Hill : Science Engineering Math
- De Soto, W., 2004. pp. 20-74, Chapter 2-3. *Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance*, M.S.thesis, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison.
- 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 Energy Environment 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 System (SPS) Berdasarkan Tinjauan Efisiensi Energi Dan Eksergi* 14 – 22
- Hepbasli, A. 2008. *A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12 : 593–661
- King, D.L., Boyson, W. E. dan Kratochvil, J.A. 2002. *Analysis of Factors Influencing the Annual Energy Production of Photovoltaics Sistem*. Proc. 29th IEEE Photovoltaic Specialist Conf., New Orleans, pp. 1356-1361.
- Mintorogo, Danny Santoso. 2000. Journal DIMENSI. vol. 28. no. 2, December *Application Photovoltaic Cells Strategies in Dwellings and Commercial Buildings*. Petra Christian University
- Sahin, A.D., I. Dincer and M.A. Rosen, 2007. *Thermodynamic analysis of solar photovoltaic cell systems*. *Solar Energy 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

- Sarhaddi, F., Farahat, S., Ajam, H., Behzadmehr, A. 2010. *Exergetic 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 System*. Associated, Inc of Harvard: Massachusetts.
- Supriyanto. Dkk. 2011. Volume 2. Nomor 10. *Analisis Eksergi modul PV Berdasarkan Spektrum Panjang Gelombang Cahaya Matahari*. Mulawarman scientifie. Samarinda : FMIPA Universitas Mulawarman.
- Tanesab. 2007. *Pengaruh Peningkatan Intensitas Cahaya Matahari Terhadap Keluaran Panel Fotovoltaik di Laboratorium Sistem Proteksi Politeknik Negeri Kupang*. Kupang : Politeknik Negeri kupang
- Tiwari G.N. and Swapnil Dubey. 2010. *Fundamental of Photovoltaic Moduls and Their Application*. Rsc Energy Series No. 2. New Delhi India : Centre for energy studies, Indian institute of technology (IIT) Delhi
- Yunus Asyari Darami. 2009. *Diktat Kuliah Perpindahan Panas darn Massa*. Jakarta : Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Darma Persada