

**SIMULASI TEMPERATUR DAN PERFORMA MENGGUNAKAN  
ANSYS DAN MATLAB PADA PANEL PV DENGAN  
PENDINGINAN VAKUM**



SKRIPSI

Dibuat Untuk Memenuhi Persyaratan Menyelesaikan Pendidikan pada  
Jurusan Teknik Mesin Program Studi D-4 Teknik Pembangkit Energi di  
Politeknik Negeri Ujung Pandang

Oleh:

Naufal Putra Nabahan  
44219035

PROGRAM STUDI D-4 TEKNIK PEMBANGKIT ENERGI  
JURUSAN TEKNIK MESIN  
POLITEKNIK NEGERI UJUNG PANDANG  
MAKASSAR  
2023

## LEMBAR PENGESAHAN

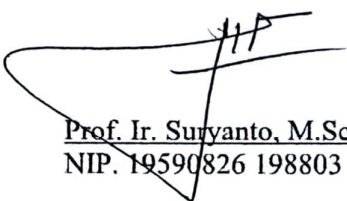
Skripsi ini dengan judul “Simulasi Temperatur dan Performa Menggunakan Ansys dan Matlab Pada Panel PV dengan Pendinginan Vakum” oleh Naufal Putra Nabahan NIM 44219035 telah diterima dan disahkan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Terapan Teknik pada Program Studi D-4 Teknik Pembangkit Energi Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang.


Makassar, 6 oktober 2023

Menyetujui,

Pembimbing I

Pembimbing II

  
Prof. Ir. Suryanto, M.Sc., Ph.D.  
NIP. 19590826 198803 1 002

  
Ir. Nur Hamzah, M.T., Ph.D.  
NIP. 19631111 199003 1 002

Mengetahui,

Koordinator Program Studi  
Teknik Pembangkit Energi




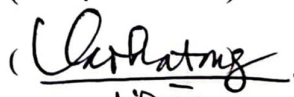


  
  
Chandra Buana, M.T.  
NIP. 19650319 199103 1 003

## HALAMAN PENERIMAAN

Pada hari ini, tim penguji laporan tugas akhir telah menerima hasil ujian sidang laporan tugas akhir oleh mahasiswa Naufal Putra Nabahan NIM 442 19 035 dengan judul “Simulasi Temperatur dan Performa Menggunakan ANSYS dan MATLAB Pada Panel PV dengan Pendinginan Vakum”.

Makassar, 6 Oktober 2023

Tim Penguji Ujian Laporan Tugas Akhir:

- |                                      |               |   |
|--------------------------------------|---------------|---|
| 1. Dr. Jumadi Tangko, M.Pd.          | Ketua         | (  )   |
| 2. Ir. Herman Nawir, M.T.            | Sekretaris    | (  )   |
| 3. Prof. Dr. Ir. Firman, M.T.        | Anggota I     | (  )   |
| 4. Marhatang, S.ST., M.T.            | Anggota II    | (  )  |
| 5. Prof. Ir. Suryanto, M.Sc., Ph.D.  | Pembimbing I  | (  )  |
| 6. Prof. Ir. Nur Hamzah, M.T., Ph.D. | Pembimbing II | (  ) |

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kehadirat Allah SWT karena berkat rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulisan skripsi ini yang berjudul “Simulasi Temperatur dan Performa Menggunakan ANSYS dan MATLAB pada Panel PV dengan Pendinginan Vakum” dapat diselesaikan dengan baik.

Skripsi ini merupakan hasil penelitian yang dilaksanakan mulai tanggal 16 Februari 2022 sampai dengan 28 Juli 2022 bertempat di Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang.

Dalam skripsi ini tidak sedikit hambatan yang penulis alami. Sehubungan dengan itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada semua pihak atas dukungan, bimbingan, perhatian dan motivasi yang telah diberikan kepada penulis, antara lain:

1. Kedua orang tua dan seluruh semua keluarga penulis yang tak henti-hentinya mendoakan dan memberikan dukungan kepada kami.
2. Bapak Ir. Ilyas Mansur, M.T selaku Direktur Politeknik Negeri Ujung Pandang
3. Bapak Dr. Ir. Syaharuddin Rasyid, M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang
4. Bapak Ir. Chandra Buana, M.T. Selaku Ketua Program Studi D-4 Teknik Pembangkit Energi Politeknik Negeri Ujung Pandang.
5. Bapak Prof. Ir. Suryanto, M.Sc., Ph.D. sebagai pembimbing I dan Bapak Ir. Nur Hamzah, M.T., Ph.D. sebagai pembimbing II yang telah meluangkan waktu dan kesempatannya untuk mengarahkan penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
6. Raihan Lutfianto dan Muhammad Rizky Pratama sebagai mentor Studi Independen Kampus Merdeka dalam ANSYS Finite Element Analysis (FEA) Learning Track yang telah membimbing dan membantu penulis menyelesaikan skripsi ini.
7. Segenap Dosen pada Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang, khususnya Dosen pada Program Studi Teknik Pembangkit Energi
8. Teman-teman Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang, khususnya teman-teman pada Program Studi Teknik Pembangkit Energi angkatan 2019 yang telah membantu dan memberi semangat bagi penulis dalam menjalani perkuliahan.
9. Semua pihak yang tidak sempat penulis sebutkan satu persatu yang telah ikut berpartisipasi hingga selesainya skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan. sehingga kami mengharapkan kritik dan saran yang sifatnya membangun untuk perbaikan di masa mendatang. Semoga tulisan ini bermanfaat. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Semoga Tuhan Yang Maha Esa senantiasa memberkati segala usaha dan kerja keras kita semua.

Makassar, 23 Agustus 2023



Naufal Putra Nabahan  
NIM: 442 19 035



## DAFTAR ISI

<b>SAMPUL</b> .....	<b>i</b>
<b>LEMBAR PERSETUJUAN</b> .....	<b>ii</b>
<b>HALAMAN PENERIMAAN</b> .....	<b>iii</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>iv</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>vi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>ix</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xii</b>
<b>DAFTAR ISTILAH, SIMBOL, SATUAN, ATAU SINGKATAN</b> .....	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	<b>xiv</b>
<b>SURAT PERNYATAAN</b> .....	<b>xv</b>
<b>RINGKASAN</b> .....	<b>xvi</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Ruang Lingkup Penelitian .....	3
1.4 Tujuan Penelitian .....	4
1.5 Manfaat Penelitian .....	4
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>5</b>
2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) .....	5
2.1.1 <i>Photovoltaic</i> .....	5
2.1.2 <i>Solar Charge Controller (SCC)</i> .....	17
2.1.3 Baterai .....	19
2.1.4 Inverter .....	21
2.2 Perpindahan Panas .....	22
2.2.1 Perpindahan Kalor secara Konduksi .....	22

2.2.2	Perpindahan Kalor secara Konveksi .....	24
2.2.3	Perpindahan Kalor secara Radiasi.....	25
2.3	Radiasi Terhadap <i>Real Surface</i> .....	27
2.3.1	<i>Reflectivity</i> .....	29
2.3.2	<i>Transmissivity</i> .....	31
2.3.3	<i>Absorptivity</i> .....	33
2.4	Teknik Vakum.....	34
2.5	Konveksi pada Panel Surya.....	35
2.5.1	Konveksi Paksa.....	35
2.5.2	Konveksi Alami .....	37
2.6	Konveksi pada Kondisi Vakum.....	38
2.7	Hukum Gay-Lussac.....	39
2.8	ANSYS.....	41
2.9	MATLAB .....	42
2.9.1	<i>Block PV Array</i> .....	43
<b>BAB 3</b>	<b>METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>45</b>
3.1	Tempat dan Waktu Penelitian .....	45
3.2	Perangkat Keras dan Perangkat Lunak Penelitian.....	45
3.2.1	Perangkat Keras ( <i>Hardware</i> ) .....	46
3.2.2	Perangkat Lunak ( <i>Software</i> ).....	48
3.3	Diagram Alir Penelitian .....	51
3.4	Tahap Persiapan Penelitian .....	51
3.4.1	Pembuatan <i>Draft</i> Geometri <i>Casing</i> dan Panel <i>PV</i> .....	52
3.4.2	Persiapan Parameter-Parameter Numerik Simulasi .....	53
3.5	Tahap Perencanaan <i>Casing</i> .....	64
3.6	Tahap Simulasi Penelitian.....	64
3.6.1	Membuat diagram skematik penelitian .....	65
3.6.2	Penginputan <i>Engineering Data</i> .....	65
3.6.3	Proses <i>Connection</i> .....	66
3.6.4	Proses <i>Meshing</i> .....	67

3.6.5	Penentuan <i>boundary condition</i> .....	69
3.6.6	<i>Solution</i> .....	74
3.7	Perhitungan Performa Panel <i>PV</i> menggunakan MATLAB.....	74
3.7.1	Menyiapkan <i>Block</i> untuk MATLAB Simulink.....	75
3.7.2	Menyusun <i>Block</i> simulasi Simulink.....	76
3.7.3	Memasukkan Parameter <i>Block PV Array</i> .....	77
3.7.4	Menjalankan Perhitungan MATLAB.....	78
<b>BAB 4</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>80</b>
4.1	Validasi Simulasi dari Eksperimen Aktual .....	80
4.2	Hasil Distribusi Temperatur .....	83
4.2.1	Hasil distribusi temperatur <i>casing</i> .....	83
4.2.2	Hasil distribusi temperatur isolator .....	84
4.2.3	Hasil distribusi temperatur panel <i>PV</i> .....	85
4.2.4	Hasil distribusi temperatur <i>PV cell</i> .....	86
4.3	Hasil Temperatur Berdasarkan Tekanan .....	87
4.4	Hasil Performa Listrik Panel <i>PV</i> .....	89
4.5	Perbandingan Performa dengan Sistem Pendinginan Lain .....	93
<b>BAB 5</b>	<b>PENUTUP.....</b>	<b>94</b>
5.1	Kesimpulan.....	94
5.2	Saran.....	94
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	<b>.....</b>	<b>96</b>
<b>LAMPIRAN</b>	<b>.....</b>	<b>99</b>

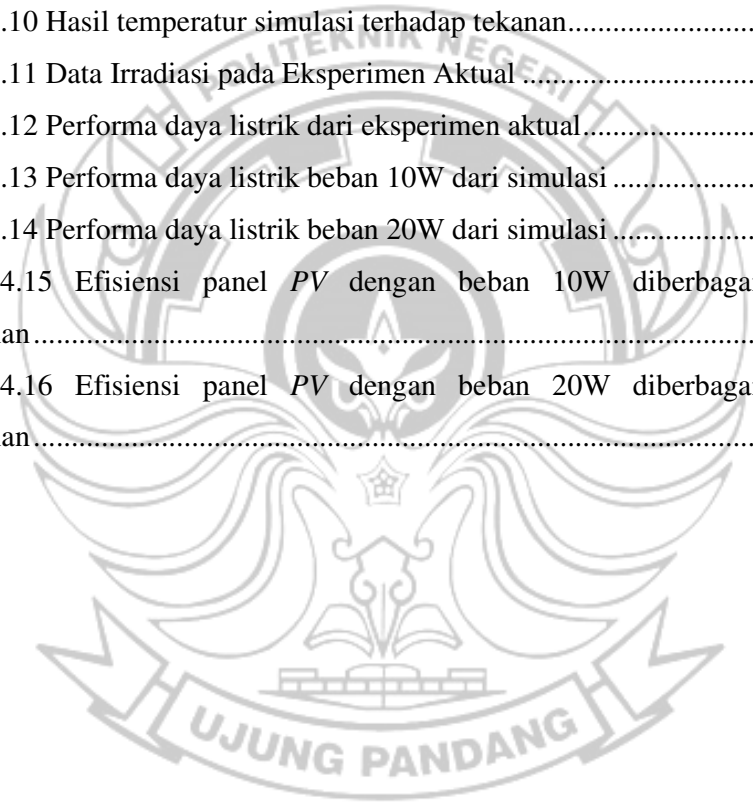


## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 (a) Silikon doping Fosfor dengan 1 elektron valensi dan (b) Silikon doping Fosfor saat konduksi .....	7
Gambar 2.2 (a) Silikon doping Boron dengan 1 elektron valensi dan (b) Silikon doping Boron saat konduksi.....	9
Gambar 2.3 <i>Monocrystalline</i> .....	10
Gambar 2.4 <i>Polycrystalline</i> .....	11
Gambar 2.5 <i>Thin Film Solar Cell</i> .....	12
Gambar 2.6 Kurva I-V Terhadap Radiasi Cahaya Matahari.....	13
Gambar 2.7 Kurva Arus – Tegangan .....	14
Gambar 2.8 Karakteristik Performa PV terhadap Suhu .....	15
Gambar 2.9 Diagram Pemodelan <i>Photovoltaic</i> .....	16
Gambar 2.10 <i>Solar Charger Controller</i> .....	18
Gambar 2.11 Bentuk fisik Baterai/aki.....	20
Gambar 2.12 Mekanisme perpindahan panas konduksi dalam fase yang berbeda dari suatu zat .....	23
Gambar 2.13 Perpindahan kalor konveksi dari sebuah plat .....	24
Gambar 2.14. Proses <i>absorption</i> , <i>reflection</i> , dan <i>transmission</i> yang terkait dengan media semitransparan.....	27
Gambar 2.15 Sudut datang radiasi dan sudut pantulan radiasi dengan <i>refractive index</i> pada medium yang berbeda .....	31
Gambar 2.16 Daerah tekanan positip dan daerah vakum.....	35
Gambar 2.17 Konduktivitas termal udara terhadap suhu.....	37
Gambar 2.18 Contoh tampilan hasil simulasi oleh ANSYS .....	41
Gambar 2.19 <i>Software MATLAB</i> .....	43
Gambar 2.20 (a) <i>Block PV Array</i> (b) model dari <i>Block PV Array</i> .....	44
Gambar 3.1 Laptop penelitian.....	46
Gambar 3.2 Laptop komputasi.....	47
Gambar 3.3 Panel PV Penelitian .....	48
Gambar 3.4 ANSYS 2023.....	49

Gambar 3.5 ANSYS DesignModeler .....	49
Gambar 3.6 MATLAB R2017b .....	50
Gambar 3.7 Diagram Alir Penelitian .....	51
Gambar 3.8 Draft rancangan desain <i>casing</i> dan <i>PV</i> .....	52
Gambar 3.9 Lapisan panel PV .....	53
Gambar 3.10 Distribusi radiasi matahari pada medium kaca .....	56
Gambar 3.11 Proses radiasi pada <i>casing</i> dan panel <i>PV</i> .....	56
Gambar 3.12 Geometri <i>Casing</i> dan <i>PV</i> .....	64
Gambar 3.13 <i>Project Schematic</i> penelitian.....	65
Gambar 3.14 Data teknik penelitian.....	66
Gambar 3.15 <i>Set-up Connection</i> dalam simulasi .....	66
Gambar 3.16 Hasil <i>mesh casing</i> .....	67
Gambar 3.17 Hasil <i>mesh</i> sel <i>PV</i> .....	68
Gambar 3.18 Hasil <i>mesh</i> panel <i>PV</i> .....	68
Gambar 3.19 kualitas <i>mesh</i> dari nilai <i>skewness</i> .....	69
Gambar 3.20 Input parameter konveksi <i>ambient</i> .....	70
Gambar 3.21 Input parameter konveksi vakum .....	71
Gambar 3.22 Input parameter radiasi ke lingkungan .....	71
Gambar 3.23 Input parameter radiasi antara permukaan kaca <i>casing</i> dan ETFE .	72
Gambar 3.24 Input parameter <i>heat flux</i> pada kaca <i>casing</i> .....	72
Gambar 3.25 Input parameter <i>heat flux</i> pada <i>casing</i> bagian atas.....	73
Gambar 3.26 Input parameter <i>heat flux</i> pada kaca panel <i>PV</i> .....	73
Gambar 3.27 Input parameter <i>heat flux</i> pada <i>PV cell</i> .....	74
Gambar 3.28 Memasukkan <i>block PV array</i> .....	75
Gambar 3.29 Memasukkan <i>block</i> data penelitian .....	76
Gambar 3.30 Gambar rangkaian <i>block</i> Simulink.....	77
Gambar 3.31 Memasukkan parameter <i>block PV array</i> .....	78
Gambar 4.1 Grafik hasil simulasi untuk validasi .....	81
Gambar 4.2 Selisih hasil temperatur simulasi dan eksperimen aktual.....	82
Gambar 4.3 Distribusi temperatur <i>casing</i> pada jam 12.10.....	83
Gambar 4.4 Distribusi temperatur <i>casing</i> pada jam 13.10.....	83

Gambar 4.5 Distribusi temperatur <i>casing</i> pada jam 15.00.....	84
Gambar 4.6 Distribusi temperatur isolator.....	84
Gambar 4.7 Distribusi panas kaca panel PV tekanan 1 bar normal pada (a) jam 12.10, dan (b) jam 15.00 .....	85
Gambar 4.8 Distribusi panas kaca panel PV tekanan 0,5 bar pada (a) jam 12.10, (b) jam 15.00 .....	85
Gambar 4.9 Distribusi panas <i>PV cell</i> tekanan 0,5 bar pada (a) jam 12.10, dan (b) jam 15.00.....	86
Gambar 4.10 Hasil temperatur simulasi terhadap tekanan.....	87
Gambar 4.11 Data Irradiasi pada Eksperimen Aktual .....	88
Gambar 4.12 Performa daya listrik dari eksperimen aktual.....	89
Gambar 4.13 Performa daya listrik beban 10W dari simulasi .....	90
Gambar 4.14 Performa daya listrik beban 20W dari simulasi .....	90
Gambar 4.15 Efisiensi panel <i>PV</i> dengan beban 10W diberbagai tekanan pendinginan.....	91
Gambar 4.16 Efisiensi panel <i>PV</i> dengan beban 20W diberbagai tekanan pendinginan.....	92



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Hubungan antara pengaruh tekanan terhadap <i>heat transfer coefficient</i>	39
Tabel 3.1 Spesifikasi Panel <i>PV</i> .....	47
Tabel 3.2. Urutan lapisan panel <i>PV</i> .....	53
Tabel 3.3 Parameter termal panel <i>PV</i> .....	54
Tabel 3.4. <i>Refractive index</i> untuk beberapa material .....	57
Tabel 3.5. Hasil analisis parameter termal .....	61
Tabel 3.6. Tabel parameter listrik panel <i>PV</i> .....	77
Tabel 3.7 Temperature coefficient untuk beberapa panel <i>PV</i> komersil .....	78
Tabel 4.1 Temperatur udara <i>real</i> vakum.....	81
Tabel 4.2 Peningkatan efisiensi panel <i>PV</i> .....	93



## DAFTAR ISTILAH, SIMBOL, SATUAN, ATAU SINGKATAN

Simbol	Satuan	Keterangan
I	Ampere	Arus listrik
V	Volt	Tegangan listrik
P	Watt	Daya
G	Watt/m <sup>2</sup>	Intensitas cahaya matahari
T	°C	Temperatur
NOCT	°C	<i>Nominal Operating Cell Temperature</i>
$\rho$	Tanpa dimensi	<i>Reflectivity</i>
$\tau$	Tanpa dimensi	<i>Transmissivity</i>
$\alpha$	Tanpa dimensi	<i>Absorptivity</i>
K	m <sup>-1</sup>	koefisien <i>extinction</i>
A	m <sup>2</sup>	Luas permukaan
$\eta$	%	Efisiensi
n	Tanpa dimensi	<i>refractive index</i>
Nu	Tanpa dimensi	<i>Nusselt number</i>
$Re_L$	Tanpa dimensi	Reynold Number
k	W/mK	Konduktivitas termal
h	W/m <sup>2</sup> K	<i>heat transfer coefficient / film coefficient</i>
v	m/s	Kecepatan
$\rho$	Kg/m <sup>3</sup>	Densitas
$\mu$	N.s/m <sup>2</sup>	Viskositas
L	m	Panjang
$Ra_L$	Tanpa dimensi	<i>Raleigh number</i>
Gr	Tanpa dimensi	<i>Grashof number</i>
Pr	Tanpa dimensi	<i>Prandtl number</i>
g	m/s <sup>2</sup>	Percepatan gravitasi
Cp	J/kg.K	Panas spesifik
$\beta, \theta$	°	Sudut

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 – Gambar geometri casing dan PV.....	99
Lampiran 2 – Data eksperimen aktual.....	102
Lampiran 3 – Parameter termal simulasi.....	104
Lampiran 4 – Distribusi temperatur simulasi.....	108
Lampiran 5 – Data temperatur simulasi.....	110
Lampiran 6 – Data listrik simulasi.....	114



## SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Lengkap : Naufal Putra Nabahan  
NIM : 442 19 035  
Program Studi : D4 Teknik Pembangkit Energi  
Tempat/Tanggal Lahir : Makassar/22 Februari 2001  
Alamat : Jalan Griya Syartini Residence No.2, Kel.  
Mannuruki, Kec. Tamalate, Kota Makassar

Dengan ini menyatakan:

A. Tugas Akhir / Skripsi yang berjudul:

“Simulasi Temperatur dan Performa Menggunakan Ansys dan Matlab Pada Panel *PV* dengan Pendinginan Vakum”

adalah benar disusun / dibuat oleh saya sendiri dan jika dikemudian hari diketahui berdasarkan bukti-bukti yang kuat ternyata Tugas Akhir / Skripsi tersebut dibuatkan oleh orang lain atau diketahui bahwa Tugas Akhir / Skripsi tersebut merupakan plagiat/mencontek/menjiplak hasil karya ilmiah orang lain, maka dengan ini saya siap menerima segala yang ditimbulkan berupa pembatalan/pencabutan Gelar Akademik dan siap mengulang kembali dari awal.

B. Bahwa seluruh dokumen (copy ijazah, copy transkrip nilai) dan lain-lain sebagai persyaratan sidang adalah asli milik saya pribadi dan dapat saya pertanggungjawabkan keasliannya.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Makassar, 20 Agustus 2023

  
Naufal Putra Nabahan

## RINGKASAN

Pendinginan panel surya sangat penting untuk menjaga kinerja, efisiensi, dan umur panjang panel tersebut. Panel surya cenderung menghasilkan panas saat menyerap energi matahari. Tujuan dari Tugas Akhir ini untuk menggambarkan respons sistem teknik pendingin vakum yang merupakan sistem pendingin *passive cooling method* baru yang dapat mempertahankan suhu ideal sel *photovoltaic (PV)* pada kondisi optimum dapat disimulasikan dengan perhitungan numerik komputer sehingga memudahkan penelitian teknik pendingin vakum menjadi lebih dinamis diberbagai keadaan tekanan vakum.

Metode penelitian yang dilakukan menggunakan simulasi dengan *software* ANSYS untuk mendapatkan suhu panel dengan teknik pendinginan vakum dan MATLAB untuk menghitung performa daya panel. Untuk simulasi menghasilkan *output* yang akurat, diperlukan validasi dengan membandingkannya dengan eksperimen aktual yang telah dilakukan dalam penelitian (2022) Suryanto dan Firman dalam jurnal yang berjudul *The Vacuum Technique for Cooling PV Cell*.

Berdasarkan hasil simulasi penelitian yang dilakukan, terdapat sekitar kurang lebih 10% selisih *output* dari eksperimen aktual. Dengan tekanan vakum yang diterapkan untuk pendinginan mulai 0,9 bar sampai 0,1 bar. Pada tekanan 0,9 bar terdapat peningkatan efisiensi sebesar 5.82% untuk beban 10W dan peningkatan efisiensi sebesar 2.65% untuk beban 20W. Dengan tekanan 0.1 bar memberikan pendinginan yang lebih baik dengan peningkatan efisiensi sebesar 16.35% untuk beban 10W dan peningkatan efisiensi sebesar 18.68% untuk beban 20W.

**Kata Kunci:** Simulasi, pembangkit listrik, PLTS, panel surya, *photovoltaic*, pendinginan, vakum, ANSYS, MATLAB



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Indonesia sangat kaya akan energi terbarukan dengan potensi lebih dari 400.000 Mega Watt (MW), 50% diantaranya atau sekitar 200.000 MW adalah potensi energi surya. Sementara pemanfaatan energi surya sendiri saat ini baru sekitar 150 MW atau 0,08% dari potensinya (Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi, 2021). Padahal, Indonesia adalah Negara khatulistiwa yang seharusnya bisa menjadi panglima dalam pengembangan energi surya.

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan salah satu jenis pembangkit yang memanfaatkan kondisi alam yaitu kondisi radiasi matahari. Pembangkit yang memanfaatkan kondisi alam, menyebabkan energi listrik yang dihasilkan bersifat fluktuatif tergantung dari kondisi cuaca.

Telah banyak penelitian yang dilakukan untuk meningkatkan efisiensi daya pada panel surya pada PLTS. Sehingga hal tersebut dapat dijadikan referensi yang dapat diambil oleh masyarakat dan pemerintah dalam pengembangan energi matahari di Indonesia. (Tiyas & Widyartono, 2020)

Suhu panel surya yang meningkat ketika mendapatkan tingkat radiasi yang tinggi pada siang hari dapat menurunkan efisiensi sel *photovoltaic PV*. (Suryanto, 2022). Kenaikan Suhu mengakibatkan tegangan rangkaian terbuka (Voc) mengalami penurunan dan daya yang dihasilkan oleh panel surya menurun

sehingga kenaikan suhu pada panel surya juga berpengaruh pada efisiensi listrik panel surya. (Tiyas & Widyartono, 2020)

Sistem pendingin merupakan salah satu usaha untuk menghindari dampak tersebut. Selain berfungsi dalam peningkatan efisiensi, sistem pendingin membantu sistem untuk menghindari suhu permukaan yang berlebihan, yang dalam beberapa kasus dapat menyebabkan kerusakan panel. (Harahap & Suherman, 2021)

Terdapat dua metode pendinginan panel surya yaitu *active cooling method* dan *passive cooling method*. Kata *active* mengacu pada penggunaan energi listrik untuk melakukan sistem pendinginan. Sumber energi dapat berasal dari energi yang dihasilkan atau dipasok secara mandiri dari baterai atau sumber listrik alternatif. Sedangkan, kata *passive* berarti tidak ada sifat listrik yang digunakan dalam sistem pendingin. (Harahap & Suherman, 2021)

Teknik pendingin vakum merupakan sistem pendingin *passive cooling method* baru yang dapat mempertahankan suhu ideal sel *PV* pada kondisi optimum yaitu dengan penerapan teknik *casing* tekanan negatif dengan mengadopsi kondisi pegunungan yang dingin meskipun turun salju dan mendapat radiasi panas lebih banyak dibandingkan dengan daerah dataran rendah. (Suryanto, 2022)

Sehingga melalui simulasi ini, penulis dengan teknik pendinginan panel *photovoltaic (PV)* baru ini penulis mengambil judul skripsi “Simulasi Keadaan Temperatur dan Performa Panel *PV* yang Menggunakan Teknik Pendinginan

Vakum dengan Menggunakan ANSYS Dan MATLAB”. Dengan dilakukannya percobaan simulasi ini diharapkan dapat mengetahui perpindahan panas akibat pengaruh tekanan terhadap suhu *PV*, pengaruh perpindahan panas yang terjadi pada *casing* terhadap panel *PV* dan performa *PV* setelah menggunakan teknik pendinginan vakum dengan simulasi.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan di atas, maka dapat diambil rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana mengetahui kondisi temperatur panel *PV* di dalam ruang vakum menggunakan program ANSYS dari suatu desain *casing*?
2. Bagaimana mengetahui performa *PV* yang menggunakan teknik pendinginan vakum dalam menggunakan simulasi aplikasi MATLAB Simulink?

## 1.3 Ruang Lingkup Penelitian

Adapun ruang lingkup dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Simulasi ini dilakukan untuk meniru sebaik mungkin kondisi aktual dari teknik pendinginan vakum panel *PV* dengan aplikasi simulasi dengan memperhitungkan parameter-parameter dan nilai-nilai yang dianggap sesuai dengan kondisi aktualnya. Adapun faktor-faktor lain yang mempengaruhi kondisi aktual tapi karena keterbatasan aplikasi simulasi dimungkinkan faktor-faktor tersebut tidak diperhitungkan.

2. Simulasi ini dilakukan dengan bantuan beberapa aplikasi seperti ANSYS, MATLAB, dan Microsoft Excel untuk melakukan simulasi, desain, pengolahan data dan perhitungan.

#### **1.4 Tujuan Penelitian**

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dijelaskan di atas, maka tujuan yang ini dicapai adalah:

1. Mengetahui kondisi temperatur panel *PV* di dalam *casing* yang menggunakan teknik pendinginan vakum dengan program ANSYS.
2. Mengetahui performa *PV* yang menggunakan teknik pendinginan vakum menggunakan simulasi aplikasi MATLAB Simulink

#### **1.5 Manfaat Penelitian**

Adapun manfaat dari tugas akhir ini adalah:

1. Sebagai optimalisasi desain *casing* teknik pendinginan vakum panel *PV*.
2. Sebagai masukan untuk perusahaan terkait untuk pengembangan teknik pendinginan vakum panel *PV* secara komersil.
3. Dapat menjadi referensi mengenai teknik pendinginan panel *PV* metode baru yaitu teknik pendinginan vakum.
4. Dapat menjadi pengembangan penelitian bahan *casing* yang lebih andal khususnya mengenai pengembangan teknik pendinginan panel *PV* teknik vakum.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit listrik tenaga surya merupakan pembangkit listrik yang mengubah energi sinar matahari menjadi energi listrik. Pembangkit listrik tenaga surya ini menggunakan panel surya (*photovoltaic*) untuk menghasilkan energi listrik. Pada pembangkit listrik tenaga surya perangkat yang digunakan tidak hanya modul panel surya saja namun ada beberapa perangkat pendukung lainnya. Secara umum perangkat pelengkap PLTS terdiri dari *solar charge controller* (SCC), baterai, dan inverter.

Setiap perangkat memiliki fungsi masing-masing seperti *solar charge controller* (SCC) memiliki fungsi sebagai pengontrol pengisian baterai. Baterai memiliki fungsi sebagai perangkat penyimpan energi listrik. Inverter berfungsi sebagai perubah listrik DC ke AC, apabila terdapat beban AC maka perlu adanya inverter karena listrik yang dihasilkan dari panel surya adalah DC.

##### 2.1.1 *Photovoltaic*

*Photovoltaic* atau sel surya merupakan sebuah teknologi yang berfungsi sebagai alat pembangkit listrik untuk mengubah energi sinar matahari menjadi energi listrik. Pada umumnya, *photovoltaic* merupakan sebuah hamparan semi konduktor yang dapat menyerap foton dari sinar matahari dan mengubahnya menjadi listrik. *Photovoltaic* ini terdiri dari potongan-potongan silikon yang

sangat kecil dan dilapisi bahan kimia khusus untuk membentuk dasar dari sel surya.

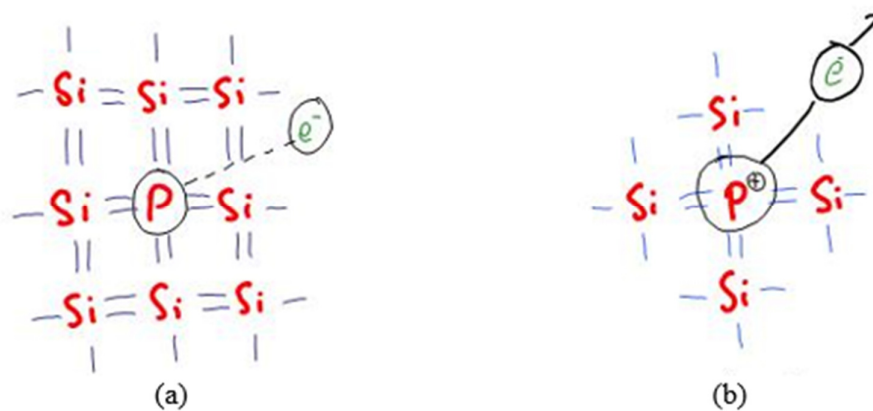
*Photovoltaic* bekerja dengan prinsip perpindahan elektron dan hole, dimana ketika sinar matahari mengenai lapisan sel surya, maka elektron akan terlepas dari atom silikon dan selanjutnya mengalir membentuk sirkuit listrik sehingga energi listrik dapat dibangkitkan. *Photovoltaic* didesain untuk mengubah cahaya menjadi energi listrik sebanyak-banyaknya dan dapat dibentuk secara seri atau paralel agar menghasilkan tegangan dan arus yang diinginkan. (Effendy & Ridho, 2021)

#### 2.1.1.1 Prinsip Kerja PV

Seperti diketahui, semi-konduktor silikon murni (intrinsik) merupakan isolator yang tidak bisa menimbulkan arus listrik. Namun ketika bahan silikon ini dicemari dengan bahan lain misalnya unsur Fosfor dan Boron melalui suatu proses yang disebut doping, maka semi-konduktor silikon ini menjadi konduktor yang bisa memberikan elektron bebas untuk menimbulkan aliran listrik. (Dayasurya, 2019)

Pengotor yang dipilih adalah yang dapat masuk kedalam struktur kristal dan menggantikan salah satu atomnya, meskipun atom pengotor tersebut memiliki struktur atom valensi yang berbeda. Untuk silikon, pengotor yang dipilih adalah unsur yang berasal dari grup III ataupun V pada tabel periodik. Untuk grup V, maka unsur yang paling sering digunakan untuk maksud ini adalah fosfor dan arsenik.

Sebagai contoh, apabila atom fosfor menggantikan atom silikon, empat elektron valensinya akan digunakan untuk membentuk ikatan kovalen dengan atom silikon didekatnya. Sementara itu elektron valensi kelima akan dengan bebas meloncat ke atom asalnya, yakni fosfor (Gambar 2.1a). Pada suhu ruangan, elektron ini akan memperoleh cukup energi thermal untuk memecah ikatan, dan lalu bebas bergerak disepanjang kristal dan akan meningkatkan arus elektron pada semikonduktor. Saat elektron ini berpindah ke pita konduksi, maka sebuah ion fosfor bermuatan positif akan terbentuk (Gambar 2.1b) (Computer & Electronics Journal, 2008).



Gambar 2.1 (a) Silikon doping Fosfor dengan 1 elektron valensi dan (b) Silikon doping Fosfor saat konduksi

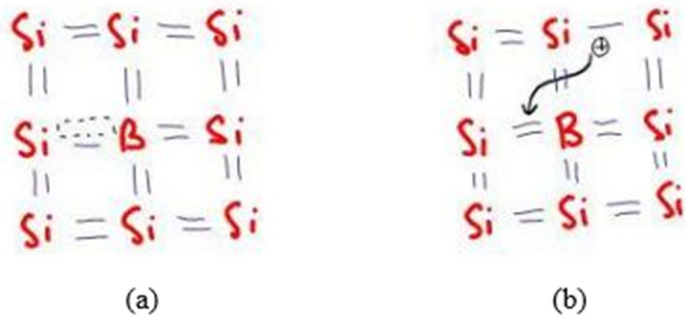
(sumber: <https://cnej.wordpress.com/2008/11/23/dasar-teori-semikonduktor-2/>)

Dalam kasus ini, atom fosfor bertindak sebagai pengotor pemberi (donor *impurities*) karena memberikan salah satu elektronnya untuk dibebaskan bergerak disepanjang kristal. Meskipun atom fosfor yang ditinggalkan akan bermuatan positif, tetapi atom tersebut tidak memiliki keleluasaan untuk bergerak didalam kristal dan tidak dapat menghasilkan arus. Karena itu, saat sebuah pengotor donor

ditambahkan pada semikonduktor, sebuah elektron bebas akan terbentuk tanpa diikuti pembentukan *hole*. Proses ini memperkenankan kita untuk mengatur konsentrasi elektron bebas didalam sebuah semikonduktor. Semikonduktor yang mengandung atom pengotor pemberi (donor) disebut semikonduktor tipe-n karena memiliki jumlah elektron yang lebih banyak dibanding *hole*.

Sedangkan untuk grup III, unsur yang paling sering digunakan adalah boron (memiliki tiga elektron valensi). Saat sebuah atom boron menggantikan sebuah atom silikon, ketiga elektron valensinya akan digunakan untuk membentuk ikatan kovalen dengan tiga atom silikon didekatnya (Gambar 2.4a). Karena pada struktur aslinya terdapat empat ikatan kovalen pada masing-masing atom, maka akan ada satu ikatan kovalen yang tidak terisi elektron. Hal ini berarti akan meninggalkan satu posisi yang terbuka. Pada suhu kamar, elektron-elektron valensi silikon terdekat memiliki cukup energi *thermal* untuk dapat berpindah ke posisi ini, dan dengan demikian akan menghasilkan sebuah *hole* lainnya (Gambar 2.5b). Atom boron dalam hal ini akan bermuatan negatif, tetapi tidak dapat bergerak bebas didalam kristal, dan sebaliknya menciptakan sebuah *hole* yang dapat meningkatkan arus *hole* pada semikonduktor. Semikonduktor yang mengandung atom pengotor penerima (*acceptor*) disebut juga semikonduktor tipe-p karena memiliki jumlah *hole* yang lebih banyak dibanding elektronnya (Computer & Electronics Journal, 2008).





Gambar 2.2 (a) Silikon doping Boron dengan 1 elektron valensi dan (b) Silikon doping Boron saat konduksi

(sumber: <https://cnej.wordpress.com/2008/11/23/dasar-teori-semikonduktor-2/>)

Pada dasarnya, sel surya yang berbasis semi-konduktor silikon cara kerjanya sama dengan perilaku sebuah dioda silikon. Dengan kata lain, sel surya silikon ada sebuah dioda yang besar. Sel surya *photovoltaic* terdiri dari wafer tipis lapisan silikon tipe-N (N = Negatif) yang dicemari unsur fosfor (phospor-doped) dan lapisan tebal silikon tipe-P (P = Positif) yang tercemar unsur Boron (boron-doped). Medan listrik timbul dekat permukaan atas sel dimana kedua lapisan P-N tersebut bersentuhan. Ketika photon sinar matahari menyentuh permukaan sel surya tersebut, medan listrik ini memberikan momentum dan pergerakan elektron bebas yang dirangsang oleh photon matahari, sehingga menimbulkan aliran arus ketika sel surya dihubungkan ke beban listrik (Dayasurya, 2019).

#### 2.1.1.2 Jenis-jenis *Photovoltaic*

Secara garis besar, jenis-jenis *photovoltaic* atau sel surya dibagi dalam 3 jenis yakni:

#### 2.1.1.2.1 *Monocrystalline*

Jenis sel surya ini terbuat dari batangan kristal silikon murni yang berbentuk pipih/tipis, dengan teknologi seperti ini maka akan dihasilkan kepingan sel surya yang identik satu sama lain dan memiliki kinerja tinggi. Jenis sel surya ini merupakan jenis sel surya yang paling efisien dibandingkan jenis sel surya lainnya, tetapi apabila ditempatkan pada pencahayaan kurang atau kondisi dimana langit berawan maka efisiensinya akan menurun secara drastis. Efisiensi yang dihasilkan dari panel surya jenis ini sekitar 15%-20%. Penggunaan kristal silikon murni pada sel surya ini menjadikan harga dari jenis sel surya lebih mahal dibandingkan dengan jenis sel surya yang lain di pasaran. Kelemahan dari jenis sel surya jenis ini adalah ketika disusun membentuk solar modul (panel surya) akan menyisakan banyak ruangan yang kosong, hal ini dikarenakan sel surya seperti ini umumnya memiliki bentuk segi enam atau bulat, tergantung dari bentuk batangan kristal silikonnya.



Gambar 2.3 *Monocrystalline*  
(Sumber: [www.solarcellsurya.com](http://www.solarcellsurya.com))

#### 2.1.1.2.2 *Polycrystalline*

Jenis sel surya ini biasa juga dikenal sebagai *polysilicon* (p-Si) dan multi-kristal silikon (mc-Si), dan diperkenalkan di pasaran pada tahun 1981. Sel surya ini terbuat dari beberapa batang kristal silikon mentah yang dilebur dan kemudian dituangkan dalam cetakan yang berbentuk persegi. Penampilan jenis sel surya ini hampir mirip dengan *monocrystalline*, namun Kemurnian dari kristal silikonnya tidak semurni dibandingkan pada sel surya *monocrystalline*. Efisiensi yang dihasilkan dari panel surya jenis ini sekitar 13%-16%. Bentuknya yang persegi, ketika disusun membentuk panel surya akan rapat dan tidak akan ada ruangan kosong yang sia-sia seperti susunan pada panel surya *monocrystalline*. Dikarenakan harganya yang murah di pasaran, jenis sel surya ini yang paling banyak digunakan pada saat ini.

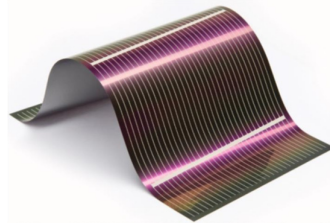


Gambar 2.4 *Polycrystalline*  
(sumber: [www.solarcellsurya.com](http://www.solarcellsurya.com))

#### 2.1.1.2.3 *Thin Film Solar Cell*

Jenis sel surya ini diproduksi dengan cara menambahkan satu atau beberapa lapisan material sel surya yang tipis ke dalam lapisan dasar. Sel surya jenis ini sangat tipis sehingga sangat ringan dan fleksibel, namun dalam efisiensinya masih

tergolong rendah yaitu hanya 5%. Teknologi produksi untuk sel surya jenis ini masih tergolong baru, sehingga masih banyak kemungkinan pengembangan di masa mendatang.



Gambar 2.5 *Thin Film Solar Cell*  
(sumber: materialdistrict.com)

#### 2.1.1.3 Karakteristik *Photovoltaic*

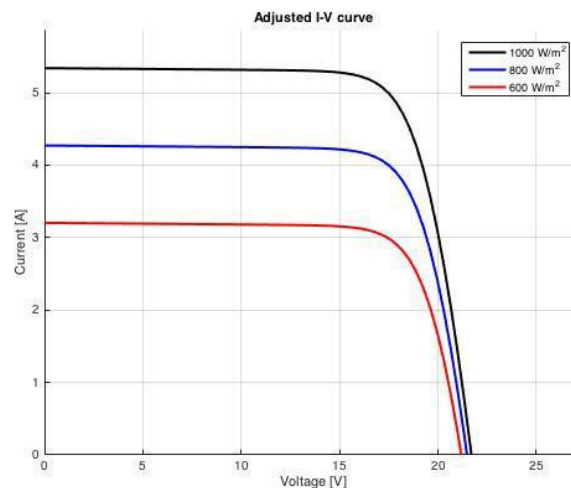
Semakin besar intensitas cahaya matahari yang masuk ke panel surya, maka arus yang dihasilkan akan semakin besar pula. Oleh karena itu faktor cuaca adalah salah satu hal penting, mengingat intensitas cahaya matahari ketika cuaca cerah dan mendung tidaklah sama. Sehingga dapat mempengaruhi kerja dari *photovoltaic* (Effendy & Ridho, 2021).

Dari faktor cuaca tersebut maka karakteristik *photovoltaic* dapat berubah-ubah tergantung dari parameter cuaca tersebut: Faktor cuaca dapat dibagi tersebut antara lain dapat mempengaruhi performa *photovoltaic*.

##### 2.1.1.3.1 Intensitas Cahaya Matahari

Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi kinerja dari *photovoltaic* itu sendiri sehingga membuat efisiensi dari alat ini menurun antara lain adalah radiasi dari matahari. Radiasi matahari ialah pancaran energi yang berasal dari proses thermonuklir yang terjadi di matahari. Pada umumnya yang tertera pada datasheet

panel surya pengujian yang dilakukan pada *standart test condition (STC)* yaitu nilai radiasi matahari sampai pada kisaran 1000 W/m<sup>2</sup>. Tetapi dalam prakteknya nilai tersebut tidak tercapai karena ada beberapa faktor yang mempengaruhi seperti posisi lintang, posisi matahari, keadaan cuaca, serta nilai radiasi matahari pada suatu lokasi tertentu. Berikut merupakan gambaran pengaruh radiasi terhadap panel surya

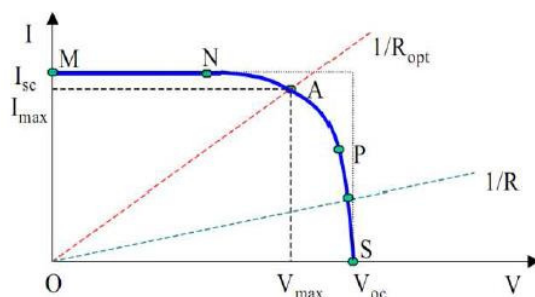


Gambar 2.6 Kurva I-V Terhadap Radiasi Cahaya Matahari  
(sumber: Universitas Muhammadiyah Malang, 2013)

Dari gambar kurva diatas terlihat jelas bahwa radiasi cahaya matahari sangat mempengaruhi kinerja dari panel surya tersebut, dimana ketika radiasi matahari tinggi jumlah energi foton yang diterima panel surya semakin banyak sehingga arus yang dihasilkanpun lebih besar.

#### 2.1.1.3.2 Penambahan beban

Karakteristik dari solar cell terdiri dari kurva arus-tegangan dan kurva tegangan-daya.

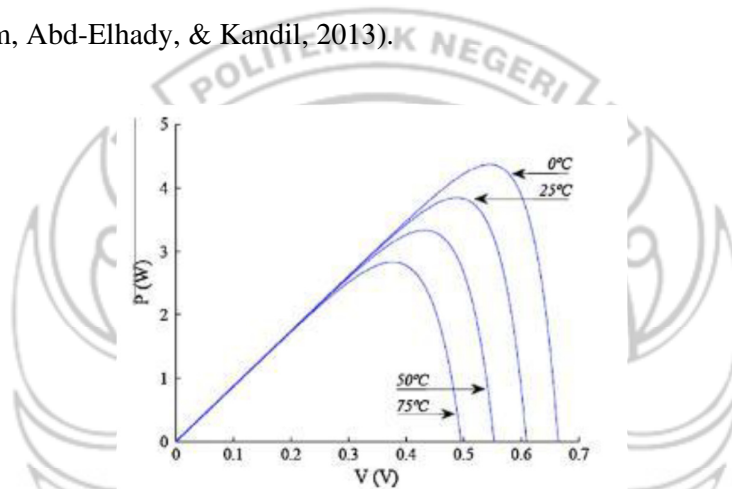


Gambar 2.7 Kurva Arus – Tegangan  
(sumber: Universitas Muhammadiyah Malang, 2013)

Gambar kurva diatas menunjukkan sel ketika dihubungkan dengan beban ( $R$ ) dimana beban memberi hambatan sebagai garis linear dengan garis  $I/V = 1/R$ . Jika beban yang diberikan kecil maka sel akan bekerja pada daerah kurva MN, dimana sel beroperasi sebagai sumber arus *short circuit*. arus short circuit merupakan arus maksimal pada solar cell dalam keadan tanpa beban. Sedangkan Jika beban yang diberikan besar maka sel akan bekerja pada daerah kurva PS, dimana sel beroperasi sebagai sumber tegangan *open circuit*. Tegangan *open circuit* merupakan tegangan maksimum yang dapat dicapai solar cell saat tidak adanya arus ( $I=0$ ). Dari kurva diatas juga menunjukkan bahwa beban yang optimal ( $1/R_{opt}$ ) beroperasi pada arus dan tegangan maksimum sehingga daya maksimum dapat tercapai, jadi jika beban lebih kecil dari beban optimal maka arus semakin besar tetapi tegangan menurun sehingga daya yang dihasilkan semakin meningkat mendekati daya maksimum. Sebaliknya jika beban lebih besar dari beban optimal maka arus semakin kecil tetapi tegangan meningkat sehingga daya yang dihasilkan semakin menurun menjauhi daya maksimum (Universitas Muhammadiyah Malang, 2013).

### 2.1.1.3.3 Temperatur Modul *Photovoltaic*

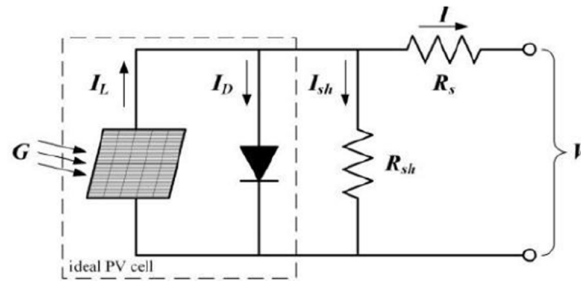
Salah satu parameter yang mempengaruhi karakteristik *photovoltaic* ialah suhu permukaan *photovoltaic*. Karakteristik efisiensi *photovoltaic* cenderung menurun dengan kenaikan suhu terutama pada saat radiasi matahari sangat besar (Suryanto, 2022). Penurunan efisiensi tersebut terjadi sekitar 0.25% to 0.5% setiap kenaikan suhu per derajat celsius tergantung pada material yang digunakan (Moharram, Abd-Elhady, & Kandil, 2013).



Gambar 2.8 Karakteristik Performa *PV* terhadap Suhu  
(Sumber: Rodrigues, EMG, dkk, 2011, Simulation of a solar cell considering single-diode equivalent circuit model)

### 2.1.1.4 Pemodelan Matematik *Photovoltaic*

*Photovoltaic* pada dasarnya adalah dioda semikonduktor yang dikenai cahaya matahari. *Photovoltaic* tersusun dari beberapa macam material semikonduktor yang disatukan. Pemodelannya dapat dilihat pada gambar di bawah.



Gambar 2.9 Diagram Pemodelan *Photovoltaic*  
 (Sumber: Suryanto, 2022, Experimental Study of the Negative Pressure Effect on Cooling Photovoltaic Cell)

Secara matematika, rangkaian *photovoltaic* dapat diformulakan sebagai berikut:

$$I = I_L - I_o \left( e^{\frac{V + I R_s}{V_T}} - 1 \right) - \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

Dimana,  $V_T = kT/q$  sebagai tegangan termal dengan T adalah temperatur *photovoltaic*, k adalah konstanta Boltzmann's, dan q adalah muatan elektron. Dari persamaan di atas dapat diketahui bahwa arus (I) berbanding terbalik dengan temperatur *photovoltaic* (T). Secara teoritis temperatur *photovoltaic* dapat diketahui dari persamaan berikut:

$$T = T_{amb} + (NOCT - 20)G/800 \quad (2.2)$$

Dimana T adalah temperatur *photovoltaic*,  $T_{amb}$  adalah temperatur udara sekitar, dan G adalah besar radiasi matahari dengan NOCT (*Nominal Operating Cell Temperature*) dapat dituliskan

$$NOCT = 20^\circ C + T_{rise} \quad (2.3)$$

Dimana Trise adalah temperatur saat matahari baru saja terbit.



Pada eksperimen aktual oleh peneliti menggunakan pengukuran presisi, ditemukan bahwa persamaan diatas terdapat error sebesar 5%. Efek temperatur *photovoltaic* juga berbeda tergantung material panelnya. Contohnya pada *polycrystalline* jika temperatur turun satu derajat Celcius, tegangan akan meningkat 0,12 V sehingga temperatur koefisiennya adalah 0,12V/°C. Sehingga dapat ditentukan

$$V_{OC,new} = [0,12[V/^{\circ}C] \times (25(^{\circ}C) - T_{amb}(^{\circ}C))] + V_{OC,rated}(V) \quad (2.4)$$

Dimana  $V_{OC,rated}$  merupakan tegangan rangkaian terbuka pada spesifikasi panel *PV* sebangkan  $V_{OC,new}$  adalah tegangan rangkaian terbuka baru yang disebabkan oleh perubahan temperatur *PV*.

Untuk efisiensi *PV* panel ( $\eta$ ) dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\eta = \frac{P_{max}}{G \times A} \quad (2.5)$$

Dimana  $P_{max}$  adalah daya maksimal yang dapat dihasilkan *PV*,  $G$  adalah radiasi sinar matahari, dan  $A$  adalah luas area dari *PV*.

### 2.1.2 *Solar Charge Controller* (SCC)

*Solar charge controller* (SCC) merupakan salah satu peralatan elektronika yang penting dalam rangkaian sistem pembangkit listrik tenaga surya. *Solar charge controller* (SCC) digunakan untuk melakukan pengisian arus DC ke baterai (*charge*) maupun pengeluaran arus DC dari baterai ke beban (*discharge*). SCC juga berfungsi untuk mengontrol kondisi baterai agar terhindar dari

*overcharging* (kelebihan pengisian) dan kelebihan tegangan dari panel surya/sel surya. Kelebihan tegangan dan pengisian akan mengurangi umur baterai. *Solar Charge Controller* (SCC) biasanya terdiri dari satu input (2 terminal) yang terhubung dengan output panel surya, satu output (2 terminal) yang terhubung dengan baterai, dan satu output (2 terminal) yang terhubung dengan beban (Tian, 2017)

*Solar Charge Controller* (SCC) terbagi menjadi dua jenis yaitu, *maximum power point tracking* (MPPT) dan *pulse width modulation* (PWM) dengan keunggulan masing-masing. SCC jenis MPPT baik digunakan untuk pemasangan panel surya berskala besar karena jika dilihat dari kualitas pengisian daya baterainya, jenis SCC ini lebih unggul dibandingkan dengan SCC jenis PWM. Untuk SCC jenis PWM baik digunakan untuk pemasangan panel surya yang berskala kecil, dikarenakan tegangan kerja PWM hanya mampu menyesuaikan dengan tegangan kerja baterai.



Gambar 2.10 *Solar Charger Controller*  
(sumber: [www.sanspower.com](http://www.sanspower.com))

*Solar charge controller* (SCC) memiliki dua tahapan kerja, yaitu tahap pertama adalah *charging mode* dan tahap kedua adalah *operation mode*. *Charging mode* merupakan kondisi saat mode pengisian baterai (*charging*) sedangkan

*operation mode* merupakan kondisi dimana saat penggunaan baterai ke beban.

Pada tahap *charging mode* SCC terdapat tiga metode yaitu:

1. Fase *bulk*, pada saat fase ini baterai akan diisi sesuai dengan tegangan *setup* yaitu antara 14,4-14,6 Volt dan arus diambil secara maksimum dari panel surya. Ketika baterai telah sesuai dengan tegangan *setup* maka selanjutnya beralih ke fase *absorption*.
2. Fase *absorption*, pada fase ini tegangan baterai akan dijaga sesuai dengan tegangan *bulk*, sampai *solar charge controller timer* (umumnya satu jam) telah tercapai, maka arus yang dialirkan ke baterai akan mengalami penurunan sampai kapasitas dari baterai penuh.
3. Fase *float*, pada fase ini baterai akan dijaga pada tegangan *float setting* (umumnya 13,4-13,7 Volt). Beban yang terhubung dengan baterai dapat menggunakan arus maksimum dari panel surya (Victron Energy, 2008).

### 2.1.3 Baterai

Baterai pada sistem pembangkit listrik tenaga surya mempunyai peranan sangat penting dan tidak dapat digantikan oleh sistem yang lain. Baterai merupakan komponen yang memiliki fungsi untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya sebelum dimanfaatkan untuk menyuplai beban.

Baterai memiliki beberapa jenis yang terdapat dipasaran yaitu jenis aki basah/konvensional, *hybrid* dan MF (*maintenance free*). Aki basah/konvensional merupakan komponen yang masih menggunakan asam sulfat H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dalam bentuk cair. Sedangkan aki MF (*maintenance free*) yang sering disebut juga aki

kering merupakan komponen yang asam sulfatnya sudah dalam bentuk gel/selai. Untuk hal posisi peletakannya baterai/aki kering lebih unggul dibandingkan dengan aki basah.

Baterai/aki yang sesuai untuk pemakaian PLTS adalah jenis baterai *deep cycle lead acid*, dimana muatan baterai jenis ini dapat dikeluarkan (*discharge*) secara terus menerus secara maksimal hingga mencapai kapasitas nominal. Besar kapasitas baterai juga harus mempertimbangkan seberapa banyak isi baterai akan dikeluarkan dalam sekali pengeluaran. Kapasitas baterai dinyatakan dalam satuan Amper-jam (Ampere-hours atau disingkat dengan Ah).



Gambar 2.11 Bentuk fisik Baterai/aki  
(sumber: [www.builder.id](http://www.builder.id))

*Depth of Discharge* (DoD) adalah penentuan batas kedalaman pengeluaran daya (*discharge*) yang terdapat pada baterai/aki tersebut. Kedalaman pengeluaran DoD 100%, pabrik baterai selalu memberi rating DoD baterai 80%, yang berarti bahwa hanya 80% dari energi yang tersedia yang dikeluarkan dan 20% tetap di cadangan. Waktu pengisian baterai selama 12 s/d 16 jam. Penentuan kapasitas baterai dapat menggunakan rumus sebagai berikut (Safrizal, 2017):

$$\text{Kapasitas Baterai (Ah)} = \frac{\text{Total Energi Beban Pemakaian Harian}}{\text{DoD} \times V_{dc}} \quad (2.6)$$

#### 2.1.4 Inverter

*Power inverter*, atau inverter, adalah merupakan konverter daya listrik yang mengubah arus searah (DC) menjadi *alternating current* (AC), AC dapat dikonversi pada setiap tegangan yang diperlukan dan frekuensi dengan penggunaan transformator, *switching*, dan kontrol sirkuit yang tepat. Inverter tidak memproduksi daya listrik sendiri, melainkan daya disediakan dari sumber arus searah (DC), yang merupakan input dari power inverter tersebut, dapat berupa batry atau akki. maupun dari sel Surya (*solar Cell*). Power inverter ini akan sangat bermanfaat, apabila di gunakan sebagai listrik cadangan, maupun sebagai listrik pada wilayah daerah, yang masih memiliki keterbatasan listrik AC. Karena dengan adanya *power inverter* ini, kita dapat menggunakan aki ataupun sel Surya, untuk menghidupkan peralatan pada keperluan rumah tangga, seperti Televisi, kipas angin, lampu, radio, kulkas, mesin cuci yang pada umumnya, masih selalu memerlukan sumber dari listrik AC, yang bertegangan 110 Volt AC ataupun 220 Volt AC (Wikipedia, 2023).

##### 2.1.4.1 Inverter On-grid

Inverter jaringan atau dikenal juga sebagai inverter *PV* atau *on-grid inverter* adalah komponen elektronik daya yang mengonversi tegangan DC dari larik modul fotovoltaik menjadi tegangan AC baik untuk pemakaian langsung atau untuk menyimpan kelebihan daya ke dalam baterai. Serupa dengan *solar charge controller* (SCC), perangkat ini juga dilengkapi dengan MPPT (*maximum power point tracker*) untuk mengoptimalkan daya yang ditangkap dari larik modul

fotovoltaik. Karena inverter ini tidak dapat beroperasi tanpa tegangan dan frekuensi jaringan, inverter baterai harus tetap dalam kondisi operasional dan menjaga bank baterai tetap pada *state of charge* baterai yang ditetapkan. Pada kasus khusus dimana tersedia tegangan jaringan, inverter akan melakukan sinkronisasi dengan tegangan dan frekuensi jaringan agar dapat bergabung dengan jaringan tersebut dan mengirimkan daya yang telah dikonversi ke jaringan AC (Ramadhani, 2018)

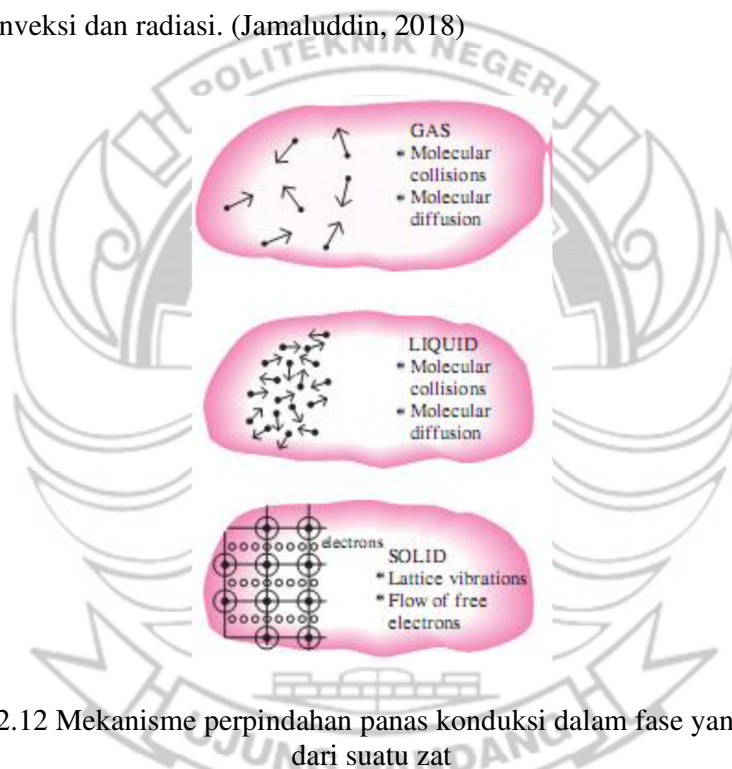
## **2.2 Perpindahan Panas**

Perpindahan panas merupakan ilmu untuk meramalkan perpindahan energi dalam bentuk panas yang terjadi karena adanya perbedaan suhu di antara benda atau material (J.P Holman, 1994). Dalam proses perpindahan energi tersebut tentu ada kecepatan perpindahan panas yang terjadi, atau yang lebih dikenal dengan laju perpindahan panas. Maka ilmu perpindahan panas juga merupakan ilmu untuk meramalkan laju perpindahan panas yang terjadi pada kondisi-kondisi tertentu. Perpindahan kalor dapat didefinisikan sebagai suatu proses berpindahnya suatu energi (kalor) dari satu daerah ke daerah lain akibat adanya perbedaan temperatur pada daerah tersebut. Ada tiga bentuk mekanisme perpindahan panas yang diketahui, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. (Universitas Medan Area, 2016)

### **2.2.1 Perpindahan Kalor secara Konduksi**

Konduksi panas adalah perpindahan energi panas antara dua benda yang saling bersentuhan. Menurut Cengel (2003), perpindahan panas konduksi dapat terjadi dalam padatan, cairan, atau gas. Dalam gas dan cairan, konduksi

disebabkan oleh tabrakan dan difusi dari molekul selama gerak acak mereka. Sedangkan dalam padatan, hal ini terjadi karena kombinasi dari getaran molekul dalam kisi dan transportasi energi oleh elektron bebas seperti dijelaskan oleh gambar di bawah. Konduksi adalah satu-satunya mekanisme dimana panas dapat mengalir dalam zat padat yang tidak dapat tembus cahaya. Konduksi penting dalam fluida, tetapi di dalam medium yang bukan padat biasanya tergabung dengan konveksi dan radiasi. (Jamaluddin, 2018)



Gambar 2.12 Mekanisme perpindahan panas konduksi dalam fase yang berbeda dari suatu zat

(Cengel, 2003, *Heat Transfer, A Practical Approach*)

Menurut Holman (2010), perpindahan panas konduksi didasari oleh Hukum Fourier yang dapat dinyatakan dengan persamaan di bawah:

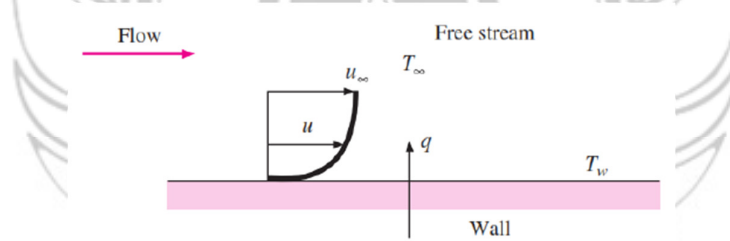
$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.7)$$

Dimana:

- $q$  = laju aliran panas (Watt)
- $k$  = konduktivitas panas bahan ( $W/m^{\circ}C$ )
- $A$  = luas permukaan pindah panas ( $m^2$ )
- $\partial T/\partial x$  = gradien suhu ke arah perpindahan panas ( $^{\circ}C$ ).

### 2.2.2 Perpindahan Kalor secara Konveksi

Sebuah plat logam panas yang ditempatkan di depan sebuah kipas angin akan lebih cepat menjadi dingin dibandingkan jika hanya dibiarkan di udara diam saja. Kita sebut bahwa kalor dikonveksi keluar dan kita sebut prosesnya sebagai perpindahan kalor konveksi.



Gambar 2.13 Perpindahan kalor konveksi dari sebuah plat  
(Holman, 2010, *Perpindahan Kalor*)

Konveksi sendiri didefinisikan sebagai perpindahan panas yang disertai dengan perpindahan massa atau molekul zat yang dipanaskan. Konveksi terjadi karena adanya perbedaan kecepatan fluida bila suhunya berbeda, yang tentunya akan berakibat pada perbedaan berat jenis (berat tiap satuan volume). Pada proses konveksi, perpindahan panas disertai dengan perpindahan massa medianya, dan media konveksi adalah fluida. Perpindahan panas konveksi juga merupakan perpindahan panas antara suatu permukaan padat dan suatu fluida. Umumnya



konveksi hanya terjadi pada zat cair ataupun gas (fluida). Menurut Holman (2010), besarnya laju aliran panas konveksi dapat dihitung dengan persamaan pendinginan Newton sebagai berikut:

$$q = h A (T_w - T_\infty) \quad (2.8)$$

dimana:

- q = laju aliran panas (Watt)
- h = koefisien perpindahan panas konveksi ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )
- A = luas penampang perpindahan panas ( $m^2$ )
- $T_w - T_\infty$  = perbedaan suhu antara suhu permukaan yang dipanasi dengan suhu fluida di lokasi yang ditentukan ( $^\circ C$ ).

### 2.2.3 Perpindahan Kalor secara Radiasi

Berbeda dengan perpindahan panas secara konduksi dan konveksi, dimana perpindahan panas terjadi melalui suatu perantara, perpindahan panas secara radiasi sama sekali tidak memerlukan zat perantara. Dengan kata lain, perpindahan panas secara radiasi dapat terjadi melalui ruang hampa. Sifat-sifat perpindahan panas secara radiasi sama dengan sifat-sifat gelombang elektromagnetik atau seperti sinaran. Sebagai contoh adalah perpindahan panas dari matahari ke bumi.

Pada proses radiasi, energi termal diubah menjadi energi radiasi. Energi ini termuat dalam gelombang elektromagnetik, khususnya daerah inframerah dengan

panjang gelombang 700 nm - 100  $\mu$ m. Energi radiasi berubah menjadi energi termal saat berinteraksi dengan gelombang elektromagnetik. Untuk benda hitam, radiasi termal yang dipancarkan per satuan waktu per satuan luas pada temperatur mutlak T (K atau  $^{\circ}$ R) dirumuskan pada persamaan sebagai berikut.

$$E = e\sigma T^4 \quad (2.9)$$

dimana  $\sigma$  adalah konstanta Stefan-Boltzmann dengan nilai  $5.67 \times 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup> dan e adalah emitansi ( $0 \leq e \leq 1$ ).

Perpindahan panas secara radiasi terjadi melalui gelombang dari suatu zat ke zat lainnya. Proses ini pada hakikatnya terjadi dengan perantaraan foton dan juga gelombang elektromagnet. Semua bahan pada suhu mutlak tertentu akan menyinari sejumlah energi panas tertentu. Semakin tinggi suhu bahan tadi maka semakin tinggi pula energi panas yang disinarkan.

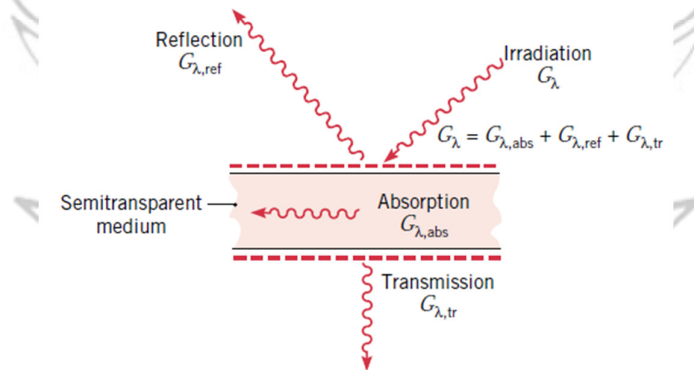
Proses radiasi adalah fenomena permukaan, sebagian akan dipantulkan, dan sebagian akan menembus bahan dan terus keluar. Sehingga perpindahan panas radiasi akan selalu melibatkan suatu bentuk fisik permukaan bahan. Benda hitam adalah bahan yang dianggap sempurna untuk proses radiasi. Seperti halnya penyinaran oleh cahaya lampu, maka akan ada daerah yang tidak dapat disinari oleh lampu tersebut secara sempurna. Oleh karena itu, dalam radiasi juga dikenal suatu faktor bentuk. (Jamaluddin, 2018)

### 2.3 Radiasi Terhadap *Real Surface*

Irradiasi total  $G$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) adalah radiasi yang mencakup seluruh spektrum dan dapat dievaluasi dari Persamaan 2.10 (Incropera, Frank P & dkk, 2007). Pada bagian ini dipertimbangkan proses yang dihasilkan dari intersepsi radiasi ini oleh medium padat dan semitransparan (atau cair).

$$G = \int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda \quad (2.10)$$

Pada umumnya, irradiasi berinteraksi pada media semitransparan, seperti fluida air atau kaca. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.18 untuk komponen irradiasi, sebagian dari radiasi ini dapat dipantulkan (*reflection*), diserap (*absorption*), dan diteruskan (*transmission*). Dari keseimbangan radiasi pada medium, berikut ini: (Incropera, Frank P & dkk, 2007)



Gambar 2.14. Proses *absorption*, *reflection*, dan *transmission* yang terkait dengan media semitransparan

(Incropera, Frank P & dkk. 2007. Fundamentals of Heat and Mass transfer Sixth Edition)

$$G_{\lambda} = G_{\lambda,ref} + G_{\lambda,abs} + G_{\lambda,tr} \quad (2.11)$$

Dimana:

$G_{\lambda}$  = irradians yang datang ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$G_{\lambda,ref}$  = radiasi yang terpantul/*reflection* ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$G_{\lambda,abs}$  = radiasi yang terserap/*absorption* ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$G_{\lambda,tr}$  = radiasi yang diteruskan/*transmission* ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

Dari persamaan yang telah dipaparkan pada Persamaan 2.11 tentang kesetimbangan radiasi, didapatkan Persamaan 2.12 (Incropera, Frank P & dkk, 2007) sebagai berikut:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (2.12)$$

Dimana:

$\alpha$  = *absorptivity*

$\rho$  = *reflectivity*

$\tau$  = *transmissivity*

Untuk medium semitransparan, seluruh proses radiasi terjadi sehingga berlaku persamaan 2.12.

Untuk medium buram (*opaque*), dimana tidak ada radiasi yang diteruskan dan hanya proses absorpsi dan pantulan yang terjadi sehingga berlaku persamaan 2.13.

$$\rho + \alpha = 1 \quad (2.13)$$

Untuk medium *full-transparent* hanya proses radiasi yang diteruskan terjadi sehingga berlaku persamaan 2.14.

$$\tau = 1 \quad (2.14)$$

### 2.3.1 Reflectivity

*Reflectivity* adalah properti yang menentukan fraksi dari radiasi datang yang dipantulkan oleh permukaan. Namun, definisi spesifiknya dapat mengambil beberapa bentuk yang berbeda, karena properti tersebut secara inheren bersifat dua arah. Artinya, selain bergantung pada arah datangnya radiasi, juga bergantung pada arah radiasi yang dipantulkan. Untuk menghindari komplikasi ini perlu perhitungan secara eksklusif dengan reflektifitas yang mewakili rata-rata terintegrasi di atas belahan bumi yang terkait dengan radiasi yang dipantulkan dan oleh karena itu tidak memberikan informasi mengenai arah distribusi radiasi ini (Incropera, Frank P & dkk, 2007). Fraksi ini dapat dihitung melalui persamaan 2.15.

$$\rho = \frac{G_{ref}}{G} \quad (2.15)$$

Dimana:

$\rho$  = *reflectivity*

$G_{ref}$  = radiasi yang terpantul (W/m<sup>2</sup>)

$G$  = irradiansi yang datang (W/m<sup>2</sup>)

Sedangkan untuk *reflectivity* pada medium semi-transparan. Untuk permukaan halus, Fresnel telah menurunkan persamaan untuk pantulan radiasi pada persamaan 2.18 (Duffie & Beckman, 2013).

$$r_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (2.16)$$

$$r_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (2.17)$$

$$r = \frac{G_{ref}}{G} = \frac{r_{\perp} + r_{\parallel}}{2} \quad (2.18)$$

Dimana:

$r_{\perp}$  = komponen pantulan tegak lurus

$r_{\parallel}$  = komponen pantulan sejajar (paralel terhadap *plane*)

$\theta_1$  = sudut datang radiasi

$\theta_2$  = sudut pantulan radiasi

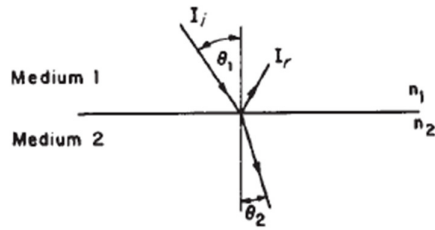
Sudut  $\theta_1$  dan  $\theta_2$  terkait dengan refractive index oleh hukum Snell pada persamaan 2.16 (Duffie & Beckman, 2013), sehingga persamaannya menjadi Persamaan 2.19

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.19)$$

Dimana:

$n_1$  = komponen pantulan tegak lurus

$n_2$  = komponen pantulan sejajar (paralel terhadap *plane*)



Gambar 2.15 Sudut datang radiasi dan sudut pantulan radiasi dengan *refractive index* pada medium yang berbeda  
(Duffie & Beckman. 2013. *Solar Engineering of Thermal Processes*)

Untuk radiasi pada sudut  $\theta_1$  dan  $\theta_2$  adalah nol, maka Persamaan 2.16 dan 2.17 dapat digabung menjadi persamaan 2.20 (Duffie & Beckman, 2013).

$$r = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (2.20)$$

Jika satu media adalah udara (yaitu, refractive index hampir satu), Persamaan 2.20 menjadi Persamaan 2.21 (Duffie & Beckman, 2013).

$$r(0^\circ) = \left( \frac{n - 1}{n + 1} \right)^2 \quad (2.21)$$

### 2.3.2 Transmissivity

Meskipun perhitungan pada medium semitransparan terhadap radiasi datang merupakan masalah yang rumit, hasil yang masuk akal seringkali dapat diperoleh melalui penggunaan transmissivitas *hemispherical* yang didefinisikan dalam Persamaan 2.22 (Incropera, Frank P & dkk, 2007).

$$\tau = \frac{G_{tr}}{G} \quad (2.22)$$

Dimana:

$\tau$  = transmissivity

$G_{tr}$  = radiasi yang diteruskan ( $W/m^2$ )

$G$  = irradiansi yang datang ( $W/m^2$ )

Persamaan untuk transmitansi dengan penyederhanaan pada Persamaan 2.25 menjadi Persamaan 2.26 (Duffie & Beckman, 2013) pada sudut  $0^\circ$  ialah:

$$\tau_a = \exp\left(-\frac{KL}{\cos \theta_2}\right) \quad (2.23)$$

$$\tau_r(0^\circ) = \frac{1 + r(0^\circ)}{1 + 3(r(0^\circ))} \quad (2.24)$$

$$\tau = \frac{\tau_a(1 - r_\perp)^2}{1 - (r_\perp \tau_a)^2} = \tau_a \frac{1 - r_\perp}{1 + r_\perp} \left[ \frac{1 - r_\perp^2}{1 - (r_\perp \tau_a)^2} \right] \quad (2.25)$$

$$\tau \cong \tau_a \tau_r \quad (2.26)$$

Dimana:

$\tau_a$  = transmissivity dengan *absorption loss*

$\tau_r$  = transmissivity dengan *reflection loss*

$K$  = koefisien *extinction*

$L$  = panjang/ketebalan medium (m)

$\theta_2$  = sudut datangnya radiasi

Untuk kaca, nilai  $K$  bervariasi dari kira-kira  $4 \text{ m}^{-1}$  untuk kaca "water white" (yang tampak putih jika dilihat dari tepi) hingga kira-kira  $32 \text{ m}^{-1}$  untuk kaca



dengan kandungan besi oksida (tepi kehijauan kehijauan) yang tinggi (Duffie & Beckman, 2013).

### 2.3.3 Absorptivity

*Absorptivity* adalah sifat yang menentukan fraksi iradiasi yang diserap oleh suatu permukaan. Penentuan properti ini dipengaruhi oleh intensitas radiasi dan arah spektral dalam  $\theta$  oleh permukaan (Incropera, Frank P & dkk, 2007). Fraksi ini dapat dihitung melalui persamaan 2.27.

$$\alpha = \frac{G_{absorp}}{G} \quad (2.27)$$

Dimana:

$\alpha$  = absorptivity

$G_{absorp}$  = radiasi yang terserap ( $W/m^2$ )

$G$  = irradiasi yang datang ( $W/m^2$ )

Sedangkan pada penyerapan radiasi dalam medium semi-transparan sebagian dijelaskan oleh hukum Bouguer, yang didasarkan pada asumsi bahwa radiasi yang diserap sebanding dengan intensitas lokal dalam medium dan jarak ( $x$ ) yang ditempuh radiasi dalam medium (Duffie & Beckman, 2013):

$$dl = -IK dx \quad (2.28)$$

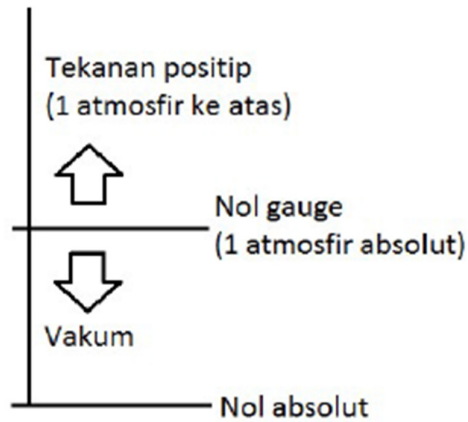
dimana  $K$  adalah konstanta proporsionalitas, koefisien *extinction*, yang dianggap konstan dalam spektrum matahari.

Dari Persamaan 2.23 tentang *transmissivity* dengan *absorption loss*, maka *absorptivity* dapat dihitung melalui persamaan 2.29 (Duffie & Beckman, 2013):

$$\alpha = 1 - \tau_a \quad (2.29)$$

## 2.4 Teknik Vakum

Kata “vakum” berasal dari bahasa Latin “*vacuo*”, yang berarti “kosong”. Dalam prakteknya, tidak ada ruang yang benar-benar kosong di alam ini atau tidak ada kondisi vakum sempurna (ideal). Dengan demikian, vakum adalah kondisi ruangan yang sebagian dari udara dan gas lainnya telah dikeluarkan sehingga tekanan di dalam ruangan tersebut di bawah tekanan atmosfer. Dengan kata lain, vakum berarti ruangan yang mempunyai kandungan kerapatan gas (partikel, atom dan molekul) atau tekanan gas yang tersebut lebih rendah dibandingkan kondisi di atmosfer. Jadi kondisi vakum adalah kondisi tekanan gas di dalam ruangan di bawah tekanan atmosfer. Gambar di bawah menunjukkan daerah tekanan positif yaitu daerah tekanan 1 (satu) atmosfer ke atas dan daerah vakum yaitu daerah tekanan di bawah tekanan atmosfer hingga mencapai nol absolut atau tekanan negatif jika didasarkan tekanan atmosfer. Kondisi vakum dapat dinyatakan dengan tekanan didasarkan tekanan absolut maupun kevakuman. Tekanan absolut yaitu tekanan yang diukur dari kondisi nol absolut yang biasa dinyatakan dalam Torr, mbar (milibar) atau  $N/m^2$  (newton.m<sup>2</sup> atau pascal). Pengukuran kevakuman (vakum) didasarkan dari tekanan 1 atmosfer absolut atau nol gauge (nol terukur) yang biasa juga dinyatakan dalam Torr, mbar atau  $N/m^2$ . (Suprpto & Widodo, 2017)



Gambar 2.16 Daerah tekanan positif dan daerah vakum  
(Ir. Suprpto, 2017, *Pengenalan Teknologi Vakum*)

## 2.5 Konveksi pada Panel Surya

Berdasarkan referensi Dr. Saud T. Al-Jadir, Ph.D. dalam *Power Engineering Sciences* pada kursus di situs *Udemy* berjudul “*ANSYS Thermal Analysis Course of Solar PV Module (2023)*”, rugi konveksi pada permukaan panel surya ada dua yaitu konveksi paksa dan konveksi alami, dimana pada simulasi ini pada permukaan *casing*.

Persamaan untuk gabungan konveksi (*mixed convective coefficient*) mendapatkan nilai Nusselt *number* sebagai berikut:

$$Nu_{mix}^3 = Nu_{forced}^3 + Nu_{natural}^3 \quad (2.30)$$

### 2.5.1 Konveksi Paksa

Nusselt *number* merupakan parameter perpindahan panas konveksi yang terjadi di permukaan benda. Nusselt *number* didefinisikan sebagai berikut (Incropera, Frank P & dkk, 2007):

$$Nu = \frac{h \cdot L}{k} \quad (2.31)$$

Dimana:

Nu = Nusselt *number*

h = heat transfer coefficient/film coefficient ( $W/m^2K$ )

L = panjang permukaan (m)

k = konduktivitas termal fluida (W/mK)

Nusselt *number* pada bidang permukaan rata untuk konveksi paksa yaitu (Dr. Saud T. Al-Jadir, 2023):

$$Nu_{forced} = \frac{h_{forced} \cdot L}{k} = 0,13Re_L^{0,703}(1 + \sin \beta)^{0,38} \quad (2.32)$$

Dimana:

$Re_L$  = Bilangan Reynold

$\beta$  = sudut bidang permukaan terhadap sumbu horizontal

Dengan bilangan reynold,  $Re_L$  pada persamaan 2.33 (Incropera, Frank P & dkk, 2007) yaitu:

$$Re_L = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} \quad (2.33)$$

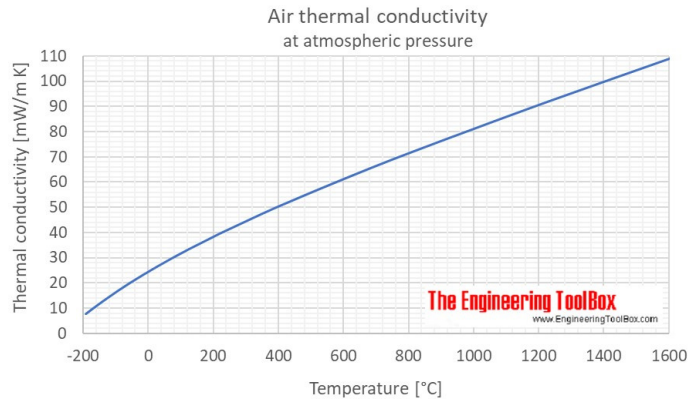
Dimana:

$\rho$  = density ( $kg/m^3$ )

v = kecepatan fluida (m/s)

L = panjang linear fluida (m)

$\mu$  = viskositas (N.s/m<sup>2</sup>)



Gambar 2.17 Konduktivitas termal udara terhadap suhu  
(Sumber: www.engineeringtoolbox.com)

## 2.5.2 Konveksi Alami

Nusselt *number* pada bidang permukaan rata untuk konveksi alami yaitu (Dr. Saud T. Al-Jadir, 2023):

Pada sudut  $\beta$  lebih kecil atau sama dengan  $45^\circ$ , Nusselt *number* yang berlaku adalah:

$$Nu_{natural} = \frac{h_{natural} \cdot L}{k} = 0,7386 Ra_L^{0,1826} (1 + \cos \beta)^{-0,4575} \quad (2.34)$$

dan pada sudut  $\beta$  lebih besar dari  $45^\circ$ , Nusselt *number* yang berlaku adalah:

$$Nu_{natural} = \frac{h_{natural} \cdot L}{k} = 5,4412 Ra_L^{0,1102} (1 + \cos \beta)^{-0,085} \quad (2.35)$$

dimana:

$Ra_L$  = Raleigh *number*

Dengan Raleigh *number* didefinisikan dalam Persamaan 2.36 yaitu:

$$Ra_L = Gr \cdot Pr \quad (2.36)$$

dimana:

$Gr$  = Grashof *number*

$Pr$  = Prandtl *number*

Dengan Grashof *number* dan Prandtl *number* didefinisikan dalam Persamaan 2.37 dan 2.38 yaitu:

$$Gr = g \cdot \left( \frac{1}{(T_s + T_a)} \right) \cdot (T_s - T_a) \cdot L^3 \cdot \frac{\rho^2}{\mu^2} \quad (2.37)$$

$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{k} \quad (2.38)$$

dimana:

$g$  = percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )

$T_s$  = asumsi suhu permukaan maksimal (K)

$T_a$  = suhu udara (K)

$L$  = panjang permukaan (m)

$C_p$  = panas spesifik (J/kg.K)

## 2.6 Konveksi pada Kondisi Vakum

Natural konveksi memiliki banyak manfaat sebagai mekanisme perpindahan panas. Dalam beberapa kasus laju perpindahan panas itu penting dan sangat penting untuk memprediksinya. Berbagai efek parameter pada laju perpindahan

panas dan dengan mempertimbangkan hal ini, dapat meningkatkan perhitungan kami. Jelas bahwa konveksi disebabkan oleh variasi densitas molekul fluida. Udara yang mengelilingi spesimen memiliki kepadatan molekul yang berhubungan dengan tekanannya. Jadi, jelas bahwa berbagai tekanan menyebabkan perpindahan panas konveksi yang berbeda. Gaya relasi ini penting untuk diamati (Saidi & Abardeh, 2010). Hubungan relasi antara pengaruh tekanan terhadap *heat transfer coefficient* dapat dilihat pada tabel dibawah:

Tabel 2.1 Hubungan antara pengaruh tekanan terhadap *heat transfer coefficient*

Temp (C) ↓	Pressure (Pa) →	18	1000	10000	43000	88500	110000	150000	185000	220000
		40	$h_{conv}$	0.86	1.78	4.35	7.02	9.01	9.73	10.06
	$h_r$	6.27	6.27	6.27	6.27	6.27	6.27	6.27	6.27	6.27
50	$h_{conv}$	1.70	3.12	6.16	9.27	11.90	12.84	13.72	14.87	16.36
	$h_r$	6.59	6.59	6.59	6.59	6.59	6.59	6.59	6.59	6.59
60	$h_{conv}$	2.56	4.14	7.40	10.54	13.36	14.47	15.61	16.72	17.98
	$h_r$	6.92	6.92	6.92	6.92	6.92	6.92	6.92	6.92	6.92
70	$h_{conv}$	3.16	4.74	7.99	11.44	14.17	15.62	16.37	17.80	18.85
	$h_r$	7.27	7.27	7.27	7.27	7.27	7.27	7.27	7.27	7.27
80	$h_{conv}$	3.47	5.11	8.44	11.70	14.67	15.83	16.59	18.32	19.35
	$h_r$	7.63	7.63	7.63	7.63	7.63	7.63	7.63	7.63	7.63
90	$h_{conv}$	3.60	5.30	8.56	12.01	14.95	16.14	16.92	18.47	19.64
	$h_r$	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
100	$h_{conv}$	3.51	5.24	8.52	11.99	15.06	16.16	17.02	18.48	19.80
	$h_r$	8.39	8.39	8.39	8.39	8.39	8.39	8.39	8.39	8.39

Sumber: Saidi & Abardeh. 2010. Air Pressure Dependence of Natural-Convection Heat Transfer

## 2.7 Hukum Gay-Lussac

Hukum Gay-Lussac dapat merujuk kepada salah satu dari dua hukum kimia yang dikemukakan oleh kimiawan Prancis Joseph Louis Gay-Lussac. Keduanya berhubungan dengan sifat-sifat gas.

Hukum Perbandingan Volume (Gay-Lussac) yaitu volume gas-gas yang bereaksi dan volume gas-gas hasil reaksi yang diukur pada suhu dan tekanan yang sama berbanding sebagai bilangan bulat dan sederhana.

Pada 1802, Gay-Lussac menemukan bahwa:

“Tekanan dari sejumlah tetap gas pada volume yang tetap berbanding lurus dengan temperaturnya dalam kelvin”

Secara matematis dapat dinyatakan

$$P \propto T \quad (2.39)$$

Atau

$$\frac{P}{T} = k \quad (2.40)$$

dimana:

P = tekanan gas.

T = temperatur gas (dalam Kelvin).

k = sebuah konstanta.

Hukum ini dapat dibuktikan melalui teori kinetik gas, karena temperatur adalah ukuran rata-rata energi kinetik, di mana jika energi kinetik gas meningkat, maka partikel-partikel gas akan bertumbukan dengan dinding/wadah lebih cepat, sehingga meningkatkan tekanan.(Wikipedia, 2022)

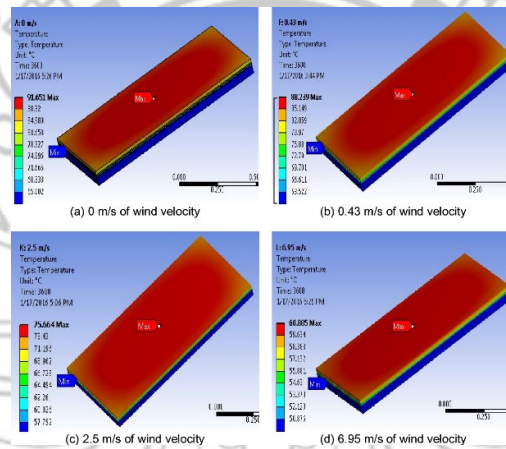
Hukum Gay-Lussac dapat dituliskan sebagai perbandingan dua gas:



$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \text{ atau } P_1 T_2 = P_2 T_1 \quad (2.41)$$

## 2.8 ANSYS

ANSYS merupakan *software* yang umum digunakan oleh para insinyur untuk melakukan simulasi struktur fisika, dinamika fluida, getaran, perpindahan panas, dan elektromekanik. Ansys juga menjadi *software* yang cukup sering digunakan untuk simulasi tegangan dan analisis modal dari suatu struktur atau komponen.



Gambar 2.18 Contoh tampilan hasil simulasi oleh ANSYS  
(Sumber: Leow Wai Zhe, 2016, *Investigation of Solar Panel Performance Based on Different Wind Velocity Using ANSYS Software*)

ANSYS adalah sebuah *software* analisis elemen hingga dengan kemampuan menganalisa dengan cakupan yang luas untuk berbagai jenis masalah. ANSYS mampu memecahkan persamaan differensial dengan cara memecahnya menjadi elemenelemen yang lebih kecil. Pada awalnya program ini bernama STASYS (*Structural Analysis System*), kemudian berganti nama menjadi ANSYS yang ditemukan pertama kali oleh Dr. John Swanson pada tahun 1970.

ANSYS merupakan tujuan utama dari paket permodelan elemen hingga untuk secara numerik memecahkan masalah mekanis yang berbagai macam. Masalah yang ada termasuk analisa struktur statis dan dinamis (baik linear dan non-linear), distribusi panas dan masalah cairan, begitu juga dengan ilmu bunyi dan masalah elektromagnetik. (Darmansyah, 2016)

## 2.9 MATLAB

MATLAB adalah sebuah bahasa dengan (*high-performance*) kinerja tinggi untuk komputasi masalah teknik. Matlab mengintegrasikan komputasi, visualisasi, dan pemrograman dalam suatu model yang sangat mudah untuk pakai dimana masalah-masalah dan penyelesaiannya diekspresikan dalam notasi matematika yang familiar. Penggunaan Matlab meliputi bidang-bidang:

1. Matematika dan Komputasi
2. Pembentukan Algorithm
3. Akusisi Data
4. Pemodelan, simulasi, dan pembuatan prototipe
5. Analisa data, explorasi, dan visualisasi
6. Grafik Keilmuan dan bidang Rekayasa



Gambar 2.19 *Software* MATLAB  
(Sumber: Wikipedia, 2022)

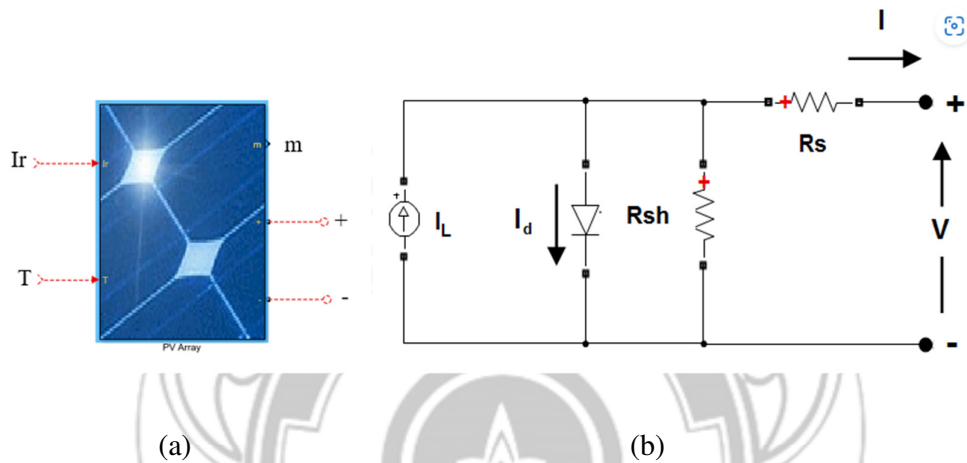
MATLAB merupakan suatu sistem interaktif yang memiliki elemen data dalam suatu *array* sehingga tidak lagi kita dipusingkan dengan masalah dimensi. Hal ini memungkinkan kita untuk memecahkan banyak masalah teknis yang terkait dengan komputasi, khususnya yang berhubungan dengan matrix dan formulasi vektor, yang mana masalah tersebut merupakan momok apabila kita harus menyelesaikannya dengan menggunakan bahasa level rendah seperti Pascall, C dan Basic.

Dalam lingkungan perguruan tinggi teknik, Matlab merupakan perangkat standar untuk memperkenalkan dan mengembangkan penyajian materi matematika, rekayasa dan kelimuan. Di industri, MATLAB merupakan perangkat pilihan untuk penelitian dengan produktifitas yang tinggi, pengembangan dan analisisnya. (Universitas Negeri Yogyakarta)

### 2.9.1 *Block PV Array*

*Block PV Array* mengimplementasikan *array* modul fotovoltaik (*PV*). *Array* dibangun dari rangkaian modul yang dihubungkan secara paralel, setiap rangkaian terdiri dari modul yang dihubungkan secara seri. Blok ini memungkinkan untuk memodelkan modul *PV* yang Anda tentukan.

*Block PV Array* merupakan model lima parameter yang menggunakan sumber arus yang dihasilkan oleh radiasi matahari ( $I_L$ ), dioda, resistor seri ( $R_s$ ), dan resistor *shunt* ( $R_{sh}$ ) untuk mewakili karakteristik I-V yang bergantung pada radiasi dan suhu dari modul. (MathWorks, Inc., 2022)



Gambar 2.20 (a) *Block PV Array* (b) model dari *Block PV Array*  
 (Sumber: <https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/pvarray.html>)

## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

Penelitian ini dilakukan dengan melakukan pendekatan meniru sebaik mungkin kondisi aktual dari eksperimen yang dilakukan dalam artikel ilmiah (2022) oleh Suryanto & Firman yang berjudul "*The Vacuum Technique for Cooling PV Cell*". Model simulasi dirancang untuk mereplikasi kondisi eksperimental yang terdapat dalam penelitian tersebut, termasuk faktor-faktor seperti suhu, radiasi, tekanan, dan model geometri yang digunakan dalam eksperimen. Dengan memanfaatkan simulasi, penelitian ini berupaya untuk menggambarkan respons sistem pendingin sel surya menggunakan teknik vakum agar lebih dinamis dan menghemat biaya eksperimen.

#### **3.1 Tempat dan Waktu Penelitian**

Tempat pelaksanaan penelitian dilaksanakan di Laboratorium Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Ujung Pandang. Waktu penelitian dan pengerjaan Tugas Akhir ini akan dilaksanakan selama 6 bulan mulai bulan Februari 2023 sampai dengan bulan Juli 2023.

#### **3.2 Perangkat Keras dan Perangkat Lunak Penelitian**

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan analisis numerik dengan bantuan perangkat lunak komputer (*software*) untuk melihat hasil secara virtual, temperatur *PV* di dalam *casing* yang dikondisikan vakum. Perangkat keras dan perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian simulasi temperatur dan

performa panel *pv* yang menggunakan teknik pendinginan vakum adalah sebagai berikut:

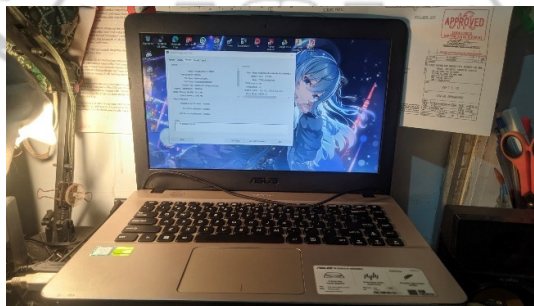
### 3.2.1 Perangkat Keras (*Hardware*)

Adapun perangkat keras yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

#### 3.2.1.1 Laptop

Spesifikasi laptop yang digunakan untuk melakukan desain dan *set-up* pada *software* ANSYS dan merangkai model Simulink MATLAB serta melakukan olah data pada data percobaan dan data hasil percobaan, adalah sebagai berikut:

*Processor* : Intel Core i3-6006U Kabylake @2 GHz (4CPUs)  
*GPU* : Nvidia Geforce 920MX 2 GB  
*RAM* : 4 GB (DDR4)  
*OS* : Windows 10 Professional 64bit



Gambar 3.1 Laptop penelitian

Adapun spesifikasi perangkat keras laptop yang digunakan untuk melakukan komputasi-komputasi *software* berat yang memerlukan spesifikasi yang memadai untuk mendapatkan *result* yang akurat, yaitu sebagai berikut:

*Processor* : Intel® Core™ i9-12900H processor (24MB cache, up to 5.00Ghz, 14 cores)

*GPU* : NVIDIA® GeForce® RTX 3060 with 6GB of GDDR6

*RAM* : 16 GB (DDR5)

*OS* : Windows 11 Professional 64bit



Gambar 3.2 Laptop komputasi

### 3.2.1.2 Panel PV

Spesifikasi panel PV yang digunakan dalam penelitian ini ialah

Tabel 3.1 Spesifikasi Panel PV

Spesifikasi Panel PV (STC)	
Manufaktur	ST SOLAR
Bahan	Si-Mono
Maximum Power (Pmax)	100 Wp
Maximum Power Current (Imp)	5.480 A

Maximum Power Volyage (Vmp)	18.24 V
Open Circuit Voltage (Voc)	21.8 V
Short Circuit Current (Isc)	5.81 A
Length	760 mm
Width	680 mm
Thickness	30 mm



Gambar 3.3 Panel *PV* Penelitian

### 3.2.1.3 *Casing*

Spesifikasi *casing* yang akan digunakan secara singkat perlu memenuhi kriteria berikut:

- 1) Kaca dengan ketebalan 3 mm
- 2) Bahan material *casing* dalah bahan yang rigid dan kedap terhadap fluida
- 3) Bahan insulasi dan *support* Panel *PV* merupakan bahan insulasi panas yang baik

### 3.2.2 Perangkat Lunak (*Software*)

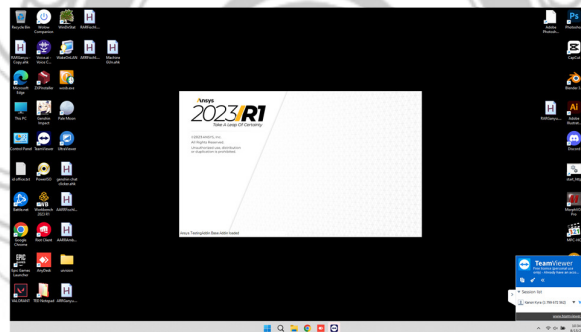
Adapun perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:



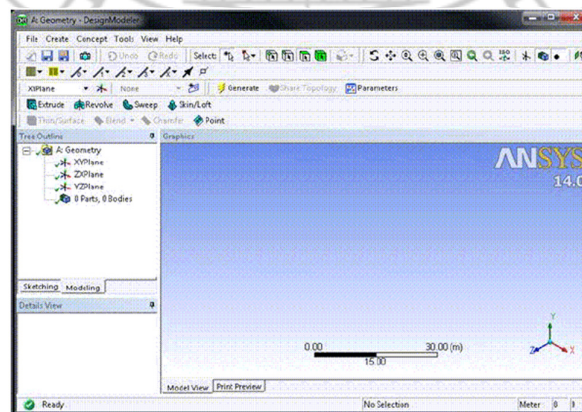
### 3.2.2.1 ANSYS 2023

ANSYS adalah sebuah *software* analisis elemen hingga (*finite element*), bisa dipakai untuk melakukan analisis mekanika benda tegar, analisis fluida, dan analisis perpindahan panas. Terintegrasi dengan ANSYS DesignModeler yang dirancang untuk digunakan sebagai editor geometri model CAD yang ada.

Aplikasi ANSYS DesignModeler adalah pemodel solid berbasis fitur parametrik yang dirancang agar dapat secara intuitif dan cepat mulai menggambar sketsa 2D, memodelkan bagian 3D, atau mengunggah model CAD 3D untuk *reprocessing* analisis teknis.



Gambar 3.4 ANSYS 2023



Gambar 3.5 ANSYS DesignModeler

### 3.2.2.2 MATLAB Simulink

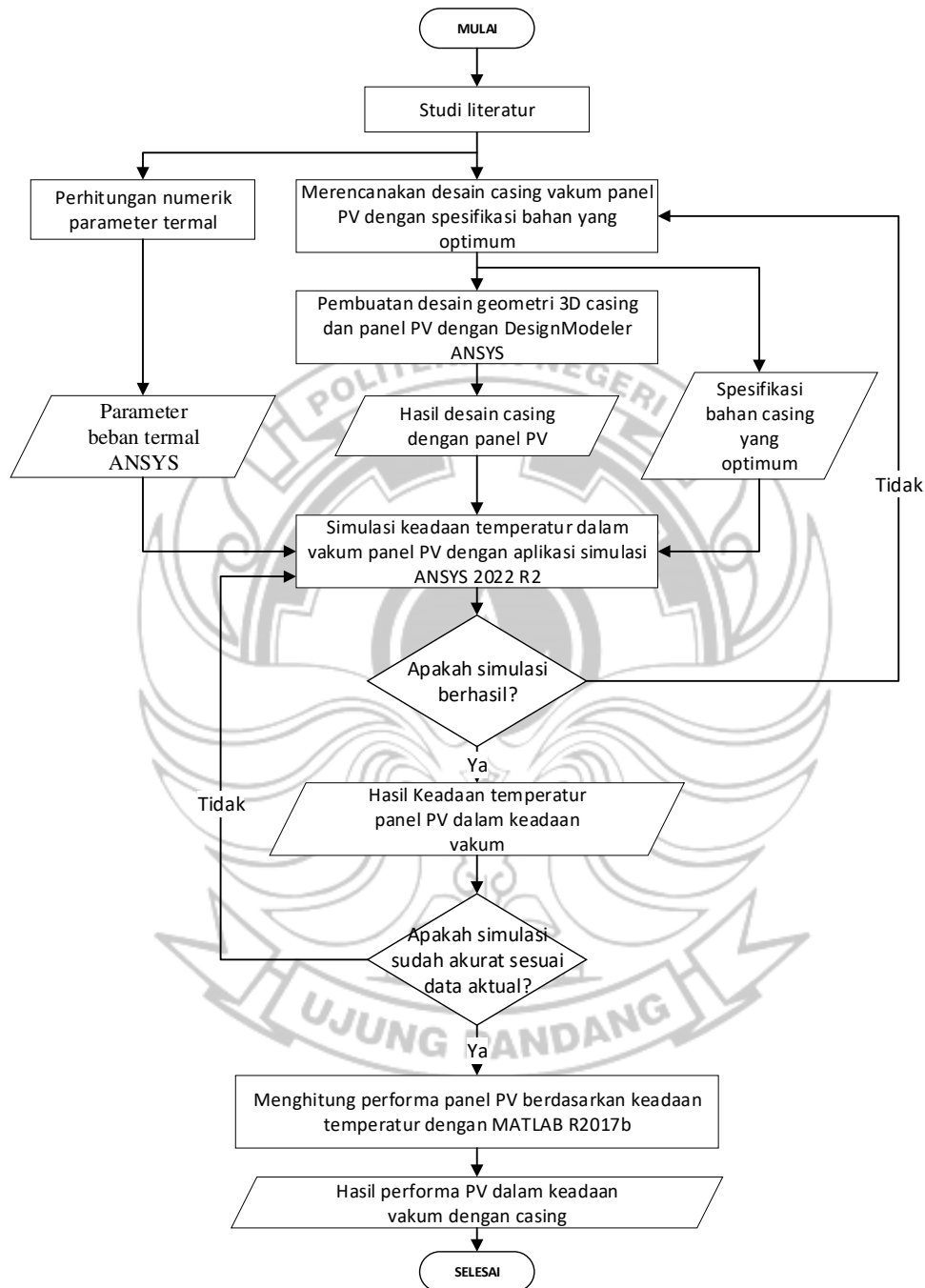
Matlab atau yang biasa kita sebut dengan Matrix Laboratory yaitu sebuah program untuk menganalisis dan mengkomputasi data numerik, dan Matlab juga merupakan pemrograman matematika lanjutan, yang dibentuk dengan dasar pemikiran yang menggunakan sifat dan bentuk matriks.

Pada metode Numerik, analisis rumus yang digunakan tidak menjadi kendala akan tetapi lebih di titik beratkan pada berbagai parameter yang diperlukan menggunakan rumus yang ada untuk menemukan solusi. *Software* ini akan digunakan untuk membantu masalah numerik. Kelebihan *software* ini dibandingkan dengan alat hitung lainnya yaitu *software* MATLAB dapat membantu visualisasi grafik dan perhitungan dinamis.



Gambar 3.6 MATLAB R2017b

### 3.3 Diagram Alir Penelitian



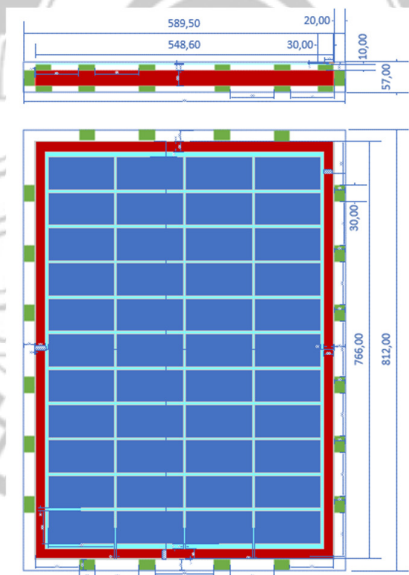
Gambar 3.7 Diagram Alir Penelitian

### 3.4 Tahap Persiapan Penelitian

Pada tahap ini, penelitian dimulai dengan langkah awal yaitu studi literatur dan pengumpulan referensi literatur terkait penelitian dan penyediaan perangkat keras dan perangkat lunak penelitian yang mendukung simulasi penelitian. Setelah itu penelitian dapat dilanjutkan ke langkah selanjutnya.

#### 3.4.1 Pembuatan *Draft Geometri Casing dan Panel PV*

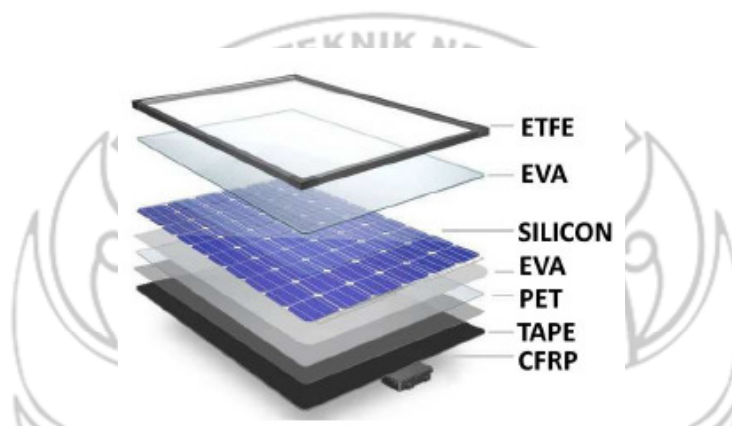
Desain *casing* dan *PV* direncanakan sesuai dengan spesifikasi fisik dari perangkat keras *PV* aktual dan *casing* yang mendukung *PV* tersebut. Pada perancangannya menggunakan *software* ANSYS DesignModeler 2023 dimulai dari perancangan *PV*, *casing* dan isolasi *casing-PV*.



Gambar 3.8 Draft rancangan desain *casing* dan *PV*

Casing mengisolasi termal panel *PV* menggunakan isolator panas (styrofoam) dengan dimensi 3x1x1cm sebanyak 12 buah pada sisi panjang panel *PV* dan sebanyak 8 buah pada sisi lebar panel *PV* pada 3 sisi frame panel *PV* yaitu sisi samping, atas, dan bawah.

Perencanaan panel *PV* akan menggunakan konfigurasi lapisan panel *PV* dengan urutan sebagai berikut:



Gambar 3.9 Lapisan panel *PV*

(Sumber: Pavlovic, Ana. 2021. Thermal Behavior of Monocrystalline Silicon Solar Cells...)

Tabel 3.2. Urutan lapisan panel *PV*

Layer	Function	Material
1 <sup>st</sup>	FrontSheet	ETFE
2 <sup>nd</sup>	Encapsulant	EVA
3 <sup>rd</sup>	Solar Cell	Silicon
4 <sup>th</sup>	Encapsulant	EVA
5 <sup>th</sup>	Backsheet	PET
6 <sup>th</sup>	Adhesive	Tape
7 <sup>th</sup>	Support	CFRP

(Sumber: Pavlovic, Ana. 2021. Thermal Behavior of Monocrystalline Silicon Solar Cells...)

### 3.4.2 Persiapan Parameter-Parameter Numerik Simulasi

Tahap ini merupakan tahap persiapan untuk data input numerik untuk simulasi berasal dari referensi dan literatur, mencakupi hal-hal sebagai berikut:

### 3.4.2.1 Parameter termal material

Parameter termal material mengacu pada sifat-sifat termal suatu material yang mempengaruhi konduktivitas termal dan kapasitas termal material tersebut. Konduktivitas termal menggambarkan kemampuan material untuk menghantarkan panas, sedangkan kapasitas termal menunjukkan jumlah panas yang dapat disimpan oleh material. Parameter-parameter ini penting dalam analisis termal pada *software* ANSYS saat beroperasi dalam kondisi termal yang berubah-ubah. Dengan memahami parameter termal material, dapat dilakukan pemilihan yang tepat dalam desain casing dan panel *PV* agar memenuhi kebutuhan aplikasi termal yang diinginkan.

Tabel 3.3 Parameter termal panel *PV*

Material	Thickness (mm)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Specific heat (J/kgK)	Thermal conductivity (W/mK)
ETFE	0,28	1730	1172	0,24
EVA	0,20	945	2090	0,35
Silicon cells	0,15	2330	700	148
PET	0,20	1350	1275	0,275
CFRP	2,00	1490	1130	6,83
Tape	0,14	1012	2000	0,19

(Sumber: Pavlovic, Ana. 2021. Thermal Behavior of Monocrystalline Silicon Solar Cells...)

Sedangkan untuk parameter termal material untuk casing akan menggunakan data dari ANSYS GRANTA *Materials Data* yang sudah *include* dalam *software* Ansys.

### 3.4.2.2 Parameter sumber panas

Parameter sumber panas mengacu pada karakteristik dan sifat panas yang dihasilkan oleh sumber energi tertentu. Sumber panas ini dapat berupa radiasi matahari, udara sekitar, refleksi sinar matahari, dan sumber panas lainnya yang dapat mempengaruhi suhu pada suatu sistem atau komponen. Parameter sumber panas meliputi intensitas, distribusi, dan durasi panasnya.

Sumber panas ini berasal dari data percobaan dalam referensi “Suryanto & Firman. 2023. *The Vacuum Technique for Cooling PV Cell*” yaitu besar irradiasi matahari dan temperatur lingkungan selama 5 jam (11.40-15.00 WITA). Detail data percobaan dijabarkan lebih lanjut pada halaman lampiran 2.

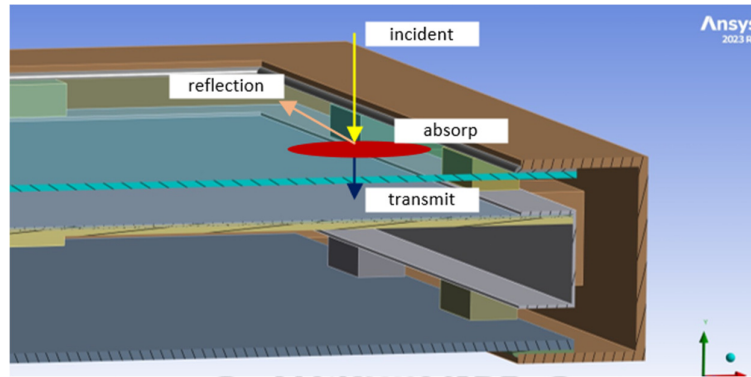
### 3.4.2.3 Perhitungan *heat transfer* oleh irradiasi matahari

Berdasarkan Persamaan 2.11 tentang keseimbangan energi radiasi, perlu dianalisis besar panas yang akan diserap material dari energi radiasi matahari baik pada medium *opaque*, semitransparan, dan *fulltransparent*.

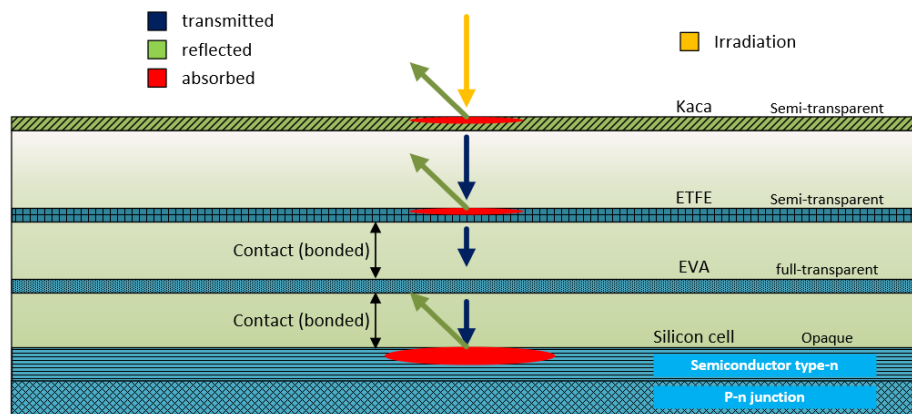
Pada simulasi ini, dimodelkan irradiasi matahari datang pada sudut bidang normal dari material yang akan dikenai radiasi dengan urutan dan sifat materialnya sebagai berikut:

- |  |                            |
|--|----------------------------|
| 1) Kayu ( <i>casing</i> )                | ( <i>opaque</i> )          |
| 2) Kaca <i>casing</i>                    | (Semitransparan)           |
| 3) ETFE (kaca <i>PV</i> )                | (Semitransparan)           |
| 4) EVA ( <i>Ethylene Vinyl Acetate</i> ) | ( <i>fulltransparent</i> ) |

5) *Silicon cells* (opaque)



Gambar 3.10 Distribusi radiasi matahari pada medium kaca



Gambar 3.11 Proses radiasi pada casing dan panel PV

3.4.2.3.1 Kayu

Material kayu memiliki *refractive index* sebesar 1,56-1,57 berdasarkan tabel

3.4. Sehingga dengan Persamaan 2.21 maka *reflectivity* dapat dihitung sebesar:

Pada arah sudut datang radiasi 0°:

$$\rho(0^\circ) = \left(\frac{n - 1}{n + 1}\right)^2 = \left(\frac{0,57}{2,57}\right)^2 = 0,05$$

Maka, berdasarkan keseimbangan energi pada material *opaque*, maka



$$\rho + \alpha = 1$$

$$\alpha = 1 - 0,05 = 0,95$$

### 3.4.2.3.2 Kaca casing

Berdasarkan dari rancangan casing pada tahap sebelumnya dan Tabel 3.3, didapatkan nilai-nilai berikut:

$$L = 3 \text{ mm} = 0,003 \text{ m (tebal kaca)}$$

$$K = 32 \text{ m}^{-1}$$

$$\theta_2 = 0^\circ$$

$$n = 1,526$$

Tabel 3.4. *Refractive index* untuk beberapa material

Material	Refractive index, n
Glass [1]	1,526
Wood [2]	1,56-1,57

(Sumber: [1] Duffie & Beckman. 2013. *Solar Engineering of Thermal Processes*)

(Sumber: [2] Juttula, H. & Mäkynen, A. J. 2012. *Determination of Refractive Index of Softwood...*)

Maka dapat dihitung besaran parameter *transmissivity*, *reflectivity*, dan *absorptivity* dari kaca casing.

Refleksi radiasi dapat dihitung menggunakan rumus pada Persamaan 2.21 pada sudut  $0^\circ$ , maka

$$\rho(0) = \left( \frac{n - 1}{n + 1} \right)^2 = \left( \frac{0,526}{2,526} \right)^2 = 0,0434$$

Sehingga *transmissivity* dengan rugi refleksi dapat dihitung menggunakan rumus pada Persamaan 2.24.

$$\tau_r(0) = \frac{1 + r(0)}{1 + 3(r(0))} = \frac{1 + 0,0434}{1 + 3(0,0434)} = 0,92$$

Dan *transmissivity* dengan rugi absorpsi panas dapat dihitung menggunakan rumus pada Persamaan 2.23.

$$\tau_a = \exp\left(-\frac{KL}{\cos \theta_2}\right) = \exp\left(-\frac{(32)(0,003)}{\cos 0^\circ}\right) = 0,91$$

Maka *transmissivity*-nya menurut Persamaan 2.26 sebesar:

$$\tau \cong \tau_a \tau_r = (0,91)(0,92) = 0,84$$

Dari nilai  $\tau_a$  maka dapat dihitung *absorptivity* menggunakan rumus pada Persamaan 2.29.

$$\alpha = 1 - \tau_a = 1 - 0,91 = 0,09$$

Berdasarkan kesetimbangan radiasi pada Persamaan 2.12 pada medium semitransparan, dapat dihitung *reflectivity* sebesar:

$$\rho = 1 - \tau - \alpha = 1 - 0,84 - 0,09 = 0,07$$

#### 3.4.2.3.3 ETFE (kaca PV)

Berdasarkan Tabel 3.2 dan analisis pada kaca *casing* diketahui:

$$L = 0,28 \text{ mm}$$

$$K = 32 \text{ m}^{-1}$$

$$\theta_2 = 0^\circ$$

$$n = 1,526$$

Menggunakan analisis yang sama pada sub-bab 3.4.2.3.1 *Kaca casing*, didapatkan hasil sebagai berikut:

$$\tau = 0,92$$

$$\alpha = 0,01$$

$$\rho = 0,08$$

#### 3.4.2.3.4 EVA (*Ethylene Vinyl Acetate*)

EVA adalah singkatan dari *Ethylene Vinyl Acetate* yang berfungsi sebagai bahan laminasi dari *PV cell* mencegah kelembapan dan debu. Digunakan juga untuk membuat *PV cell* terlindungi diantara kaca dan lapisan *backsheets* sehingga efek *impact* dan guncangan dapat direduksi. Selain itu juga berfungsi mengisolasi listrik *PV cell* dari komponen lain. Kekurangan dari EVA yaitu tidak *UV-resistant* sehingga dibutuhkan kaca pelindung untuk lapis pelindung dari cahaya UV (Sinovoltaics, 2023).

Sifat material dari EVA didefinisikan ideal yaitu *fulltransparent* maka menurut persamaan kesetimbangan radiasinya di Persamaan 2.14.

$$\tau = 1$$

### 3.4.2.3.5 Silicon cells

Sifat material dari Silicon cells adalah *opaque*, sehingga berlaku Persamaan 2.13. Berdasarkan referensi Dr. Saud T. Al-Jadir, Ph.D. dalam *Power Engineering Sciences* pada kursus di situs *Udemy* berjudul “ANSYS Thermal Analysis Course of Solar PV Module (2023)”, *reflectivity* pada Silicon cells adalah 0,03.

$$\rho + \alpha = 1$$

$$\alpha = 1 - 0,03 = 0,97$$

Kemudian dengan memperhitungkan kesetimbangan energi akibat konversi radiasi matahari ke listrik, maka nilai panas yang akan timbul ialah:

$$Q = G_{radiasi} - P_{listrik}$$

Dimana:

$Q$  = panas yang dihasilkan

$G_{radiasi}$  = radiasi yang dikenai ( $W/m^2$ )

$P_{listrik}$  = daya listrik per satuan luas ( $W/m^2$ )

Dengan  $P_{listrik}$  merupakan fraksi besaran radiasi yang diubah menjadi listrik sedangkan fraksi sisanya akan diabsorpsi menjadi panas. Luas total dari *PV cells silicon* (44 *cell*) berdasarkan pengukuran aktual yaitu  $0,32 \text{ m}^2$ .

$$P_{listrik} = \frac{V \times I}{\text{Total luasan PV cells}}$$

Besar panas yang diserap material-material model dari radiasi matahari yang akan dilakukan selama 5 jam pembebanan sinar matahari dapat dilihat pada halaman lampiran.

Tabel 3.5. Hasil analisis parameter termal

Sifat \ Material	Kayu/casing (Opaque)	Kaca (Semi-transparent)	ETFE (Semi-transparent)	EVA (Fulltransparent)	Silicon cells (Opaque)
Absorptivity ( $\alpha$ )	0.95	0.09	0.01	-	0.93
Reflectivity ( $\rho$ )	0.05	0.07	0.08	-	0.03
Transmissivity ( $\tau$ )	-	0.84	0.92	1	-

#### 3.4.2.4 Konveksi udara lingkungan

Casing berada pada lingkungan luar dengan kontak langsung dengan udara luar. Berdasarkan referensi Dr. Saud T. Al-Jadir, Ph.D. dalam *Power Engineering Sciences* pada kursus di situs *Udemy* berjudul “*ANSYS Thermal Analysis Course of Solar PV Module (2023)*”, rugi konveksi pada permukaan panel surya ada dua yaitu konveksi paksa dan konveksi alami, maka besar konveksi gabungan akan dihitung sebagai berikut:

Menurut data BMKG kota Makassar tentang analisis arah dan kecepatan angin pada bulan Juli 2022. Kecepatan angin rata-rata sebesar 2.16 knots atau 4 km/jam. Sehingga jika dikonversi ke dalam meter per sekon adalah 1,1 m/s.

Dan parameter udara didapatkan:

$$T_a = 36,1^\circ\text{C} = 309.25 \text{ K}$$

$$\rho = 1.142 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 1.84 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$$

$$k = 0.027 \text{ W/m.K}$$

$$C_p = 1005.78 \text{ J/kg.K}$$

(Sumber: Al-Jadir, Saud T., 2023, ANSYS *Thermal Analysis Course of Solar PV Module*)

#### 3.4.2.4.1 Konveksi paksa

Berdasarkan parameter di atas, dapat ditentukan bilangan reynold,  $Re_L$  dengan persamaan 2.33 dengan panjang casing 0,8 m

$$Re_L = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} = \frac{1,142 \cdot 1,1 \cdot 0,8}{1.84 \times 10^{-5}} = 55293.8$$

Casing dipasang pada sudut  $\beta$  yaitu  $25^\circ$  maka:

$$Nu_{forced} = 0,13 Re_L^{0,703} (1 + \sin \beta)^{0,38} = 320.79$$

Sehingga besar *heat transfer coefficient* pada konveksi paksa adalah

$$Nu_{forced} = \frac{h_{forced} \cdot L}{k}$$

$$h_{forced} = \frac{Nu_{forced} \cdot k}{L} = \frac{320,79 \cdot 0,027}{0,8} = 10.64 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

#### 3.4.2.4.2 Konveksi alami

Berdasarkan parameter di atas dapat ditentukan Grashof *number* dan Prandtl *number* maka digunakan Persamaan 2.37 dan 2.38 dengan  $T_a$  dengan nilai  $36,1^\circ\text{C}$  dan  $T_s$  dengan nilai  $50^\circ\text{C}$ .

$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{k} = \frac{1005,78 \cdot 1.84 \times 10^{-5}}{0,027} = 0.689$$

$$Gr = g \cdot \left( \frac{1}{\frac{(T_s + T_a)}{2}} \right) \cdot (T_s - T_a) \cdot L^3 \cdot \frac{\rho^2}{\mu^2} = 884800960.5$$

Maka nilai *Raleigh number* berdasarkan persamaan 2.36:

$$Ra_L = Gr \cdot Pr = 884800960,5 \times 0.689 = 609228521.6$$

Casing dipasang pada sudut  $\beta$  yaitu  $25^\circ$  maka berlaku Persamaan 2.34:

$$Nu_{natural} = 0,7386 Ra_L^{0,1826} (1 + \cos \beta)^{-0,4575} = 39.87$$

Sehingga besar *heat transfer coefficient* pada konveksi paksa adalah

$$Nu_{natural} = \frac{h_{natural} \cdot L}{k}$$

$$h_{forced} = \frac{Nu_{natural} \cdot k}{L} = \frac{39,87 \cdot 0,027}{0,8} = 1.32 \text{ W/m}^2 \cdot K$$

#### 3.4.2.4.3 Konveksi gabungan

Gabungan dari konveksi paksa dan konveksi natural dari sebuah permukaan digunakan Persamaan 2.30:

$$Nu_{mix}^3 = Nu_{forced}^3 + Nu_{natural}^3$$

$$Nu_{mix} = (Nu_{forced}^3 + Nu_{natural}^3)^{\frac{1}{3}} = (320,79^3 + 39,87^3)^{\frac{1}{3}} = 320.8$$

Sehingga besar *heat transfer coefficient* pada konveksi gabungan adalah

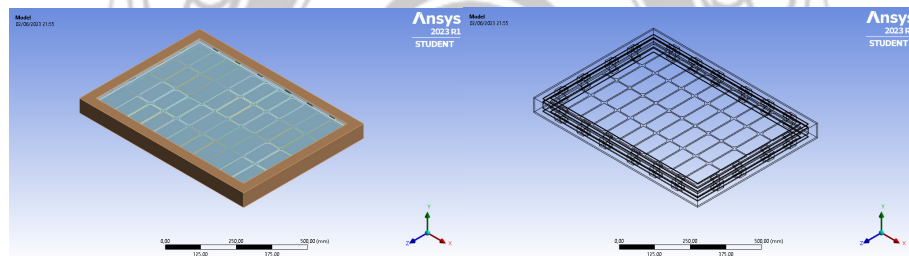
$$Nu_{mix} = \frac{h_{mix} \cdot L}{k}$$

$$h_{mix} = \frac{Nu_{mix} \cdot k}{L} = \frac{320.8 \cdot 0,027}{0,8} = 10.64 \text{ W/m}^2 \cdot K$$

### 3.5 Tahap Perencanaan *Casing*

Model *part* yang perlu didesain mencakup model panel *PV* dan *casing*, model *casing* harus didesain sedemikian rupa sehingga memiliki kemampuan untuk menjaga keadaan dalam *casing* tetap vakum, mencegah udara luar untuk masuk sehingga mengurangi tingkat kevakumannya dan dapat mengisolasi panas terhadap panas dari lingkungan.

Model geometri dibangun menggunakan ANSYS DesignModeler dengan merujuk perencanaan *PV* dan *casing* pada Gambar 3.8 dengan dimensi yang telah ditentukan menyesuaikan pengukuran aktual dan perencanaan ukuran *casing*.



Gambar 3.12 Geometri *Casing* dan *PV*

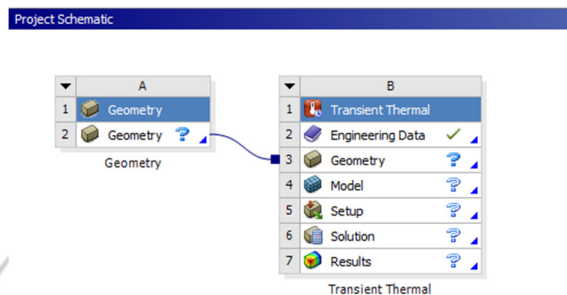
### 3.6 Tahap Simulasi Penelitian

Setelah tahap desain selesai, tahap selanjutnya adalah tahap simulasi penelitian. Tahap ini melibatkan pemodelan dan simulasi kinerja panel *PV* dan *casing* dengan menggunakan *software* ANSYS. Dalam tahap simulasi ini, model panel *PV* dan *casing* akan diproses dengan kondisi vakum dan sumber panas untuk memperoleh informasi tentang distribusi panas pada permukaan panel *PV*.



### 3.6.1 Membuat diagram skematik penelitian

Pada Ansys workbench 2023, diperlukan dua buah skematik yaitu “geometri” dimana berisi data geometri dan “*transient thermal*” sebagai analisis *thermal transient* yang akan dilakukan seperti pada Gambar 3.13.



Gambar 3.13 *Project Schematic* penelitian

### 3.6.2 Penginputan *Engineering Data*

*Engineering Data* berisi parameter data teknik material-material (panel PV) yang akan mendefinisikan karakteristik termal material pada simulasi. Parameter-parameter yang telah ada diinput dengan memperhatikan unit satuannya dan digunakan data literatur yang berasal dari eksperimen sebelumnya.

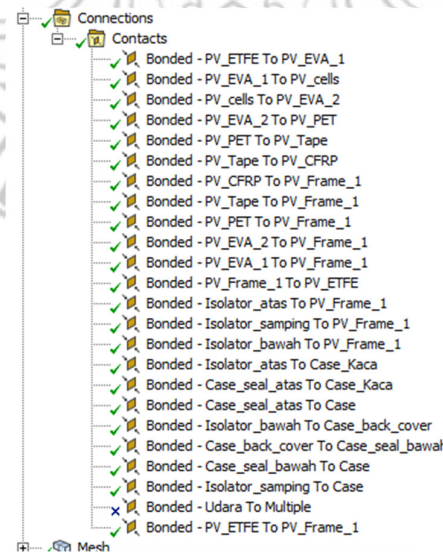
Sedangkan untuk material lain (material *casing*) menggunakan data teknik dari data *library* ANSYS GRANTA. Dalam hal ini, jika diperlukan, parameter material harus diperbaiki agar hasil simulasi sesuai dengan kondisi aplikasi nyata.

Properties of Outline Row 8: ETFE				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	1730	kg m <sup>-3</sup>	
4	Isotropic Thermal Conductivity	0,24	W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	
5	Specific Heat Constant Pressure, C <sub>p</sub>	1172	J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	

Gambar 3.14 Data teknik penelitian

### 3.6.3 Proses *Connection*

*Connection* dalam konteks ANSYS merujuk pada proses menghubungkan berbagai komponen atau bagian dalam sebuah simulasi. Hal ini penting untuk memodelkan interaksi dan respons yang realistis antara elemen-elemen yang terlibat. Jenis *contact* yang digunakan adalah *contact bonded*. Metode *connection* yang tepat memungkinkan kita untuk memodelkan interaksi fisik yang benar antara komponen, termasuk transfer panas antara elemen-elemen yang berbeda. Hal ini memungkinkan untuk mengetahui jalur *connection* tiap bagian. Sehingga memungkinkan untuk analisis yang lebih akurat dan relevan dalam simulasi.

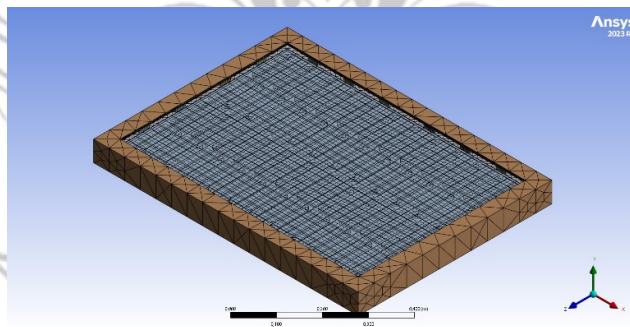


Gambar 3.15 *Set-up Connection* dalam simulasi

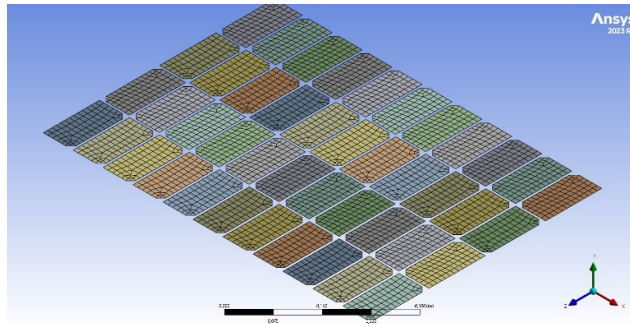
#### 3.6.4 Proses *Meshing*

Dalam tahap *meshing* komponen geometri, *software* ANSYS akan membuat jaringan elemen yang membentuk model panel *PV* dan *casing*, dengan memperhatikan detail geometri dan properti material.

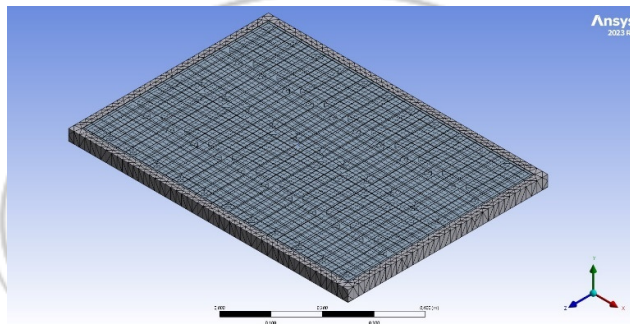
Proses *meshing* bertujuan untuk membagi *solution domain* menjadi bagian bagian yang lebih kecil yang disebut dengan *cell*. Keakuratan dan perhitungan tergantung dari dan ukuran serta struktur *cell*. Proses perhitungan yaitu melalui iterasi diantara *cell-cell* dalam *mesh*. Jumlah pembagian *mesh* ini nantinya akan menentukan keakuratan dari hasil komputasi numerik yang dilakukan. Semakin halus hasil *meshing* maka hasil komputasi numerik akan semakin akurat, namun waktu proses komputasi numerik akan menjadi lebih lama.



Gambar 3.16 Hasil *mesh casing*



Gambar 3.17 Hasil *mesh* sel PV



Gambar 3.18 Hasil *mesh* panel PV

*Mesh skewness* adalah salah satu parameter yang digunakan untuk mengukur kualitas elemen-elemen dalam sebuah *mesh* atau jaringan elemen pada simulasi numerik. Parameter ini menggambarkan sejauh mana elemen-elemen dalam *mesh* mendekati bentuk idealnya, yaitu segitiga atau segiempat yang simetris. Semakin rendah nilai *mesh skewness*, semakin baik kualitas *mesh* yang dihasilkan. Dari hasil *meshing* yang didapatkan, nilai *skewness* yang dihasilkan adalah 0,5564.

Value of Skewness	Cell Quality
1	degenerate
0.9 — <1	bad (sliver)
0.75 — 0.9	poor
0.5 — 0.75	fair
0.25 — 0.5	good
>0 — 0.25	excellent
0	equilateral

Gambar 3.19 kualitas *mesh* dari nilai *skewness*  
(Sumber: ANSYS inc. 2010. ANSYS Meshing User's Guide)

Nilai *skewness* yang didapatkan sudah bisa dikatakan bagus dan cukup secara keseluruhan, hal ini karena geometri dari *casing* dan *object of interest* atau object yang ingin dianalisis yaitu terutama panel PV mempunyai kualitas *mesh* yang berbeda dimana *mesh* panel PV memiliki nilai elemen yang lebih banyak. Serta nilai ini optimum untuk waktu proses komputasi numerik yang efisien.

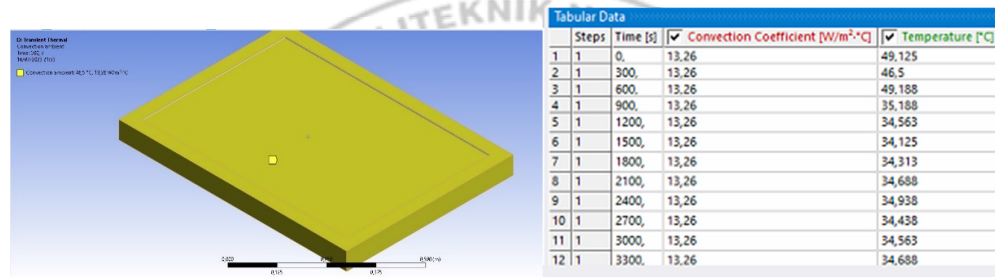
### 3.6.5 Penentuan *boundary condition*

*Boundary condition* atau kondisi batas adalah informasi atau batasan yang diberikan pada suatu sistem atau domain dalam analisis simulasi numerik. Dalam konteks analisis *transient* termal pada panel PV, *boundary condition* menggambarkan bagaimana panas berinteraksi pada sistem, seperti aliran perpindahan panas konveksi dan radiasi, beban sumber panas, atau kondisi termal lainnya yang dapat mempengaruhi distribusi panas dalam sistem.

Beban sumber panas meliputi pengaruh suhu lingkungan dan radiasi dari sinar matahari. Informasi ini sangat penting karena mempengaruhi hasil analisis suhu panel PV dan *casing* selama proses simulasi.

### 3.6.5.1 Konveksi lingkungan

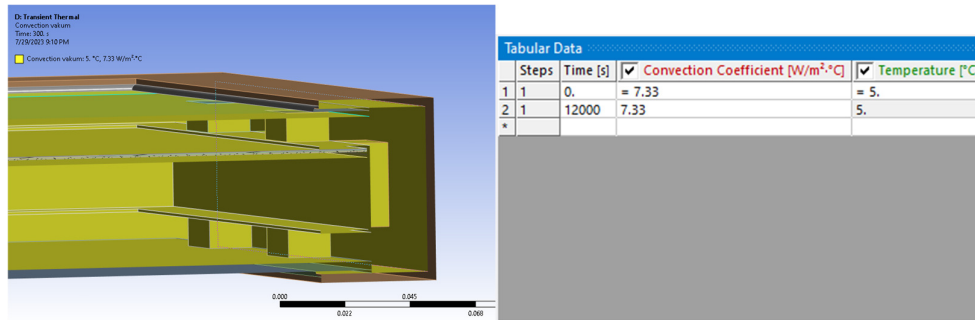
Kondisi konveksi didefinisikan pada seluruh permukaan luar casing, dengan dua parameter termal yang dibutuhkan yaitu *convection coefficient* dan temperatur udara lingkungan. Nilai *convection coefficient* dapat diambil pada subbab 3.4.2.4.3 sedangkan temperatur udara lingkungan diambil dari data percobaan aktual pada halaman lampiran 2.



Gambar 3.20 Input parameter konveksi *ambient*

### 3.6.5.2 Konveksi dalam casing (vakum)

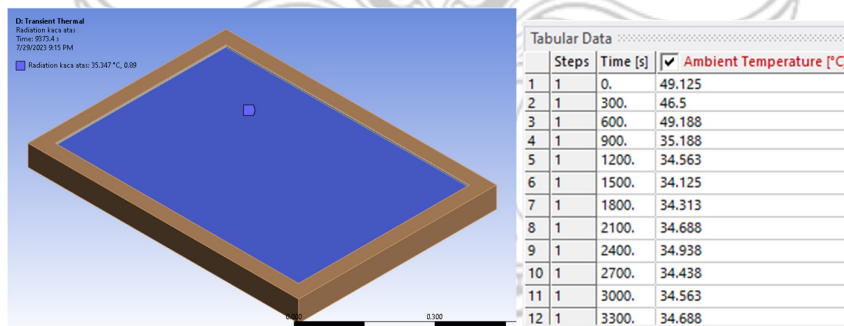
Kondisi konveksi didefinisikan pada seluruh bagian dalam casing mencakup seluruh permukaan luar panel *PV*, dengan dua parameter termal yang dibutuhkan yaitu *convection coefficient* dan temperatur udara lingkungan. Nilai *convection coefficient* dapat diambil pada subbab 2.6 sedangkan temperatur udara vakum dilakukan teknik *trial and error* untuk mengetahui besar suhu udara *real* yang sesuai pada percobaan aktualnya.



Gambar 3.21 Input parameter konveksi vakum

### 3.6.5.3 Radiasi ke lingkungan

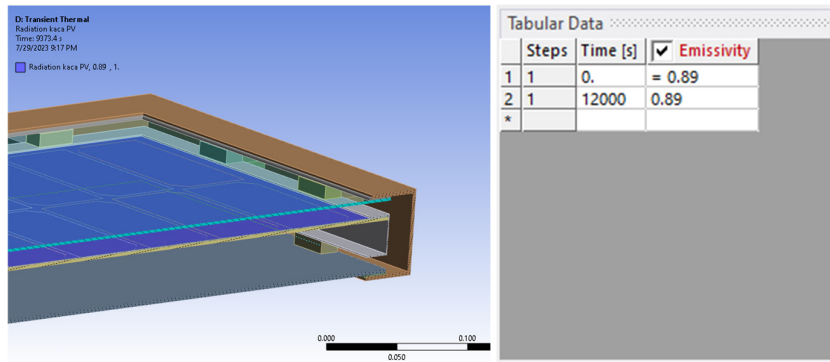
Kondisi radiasi didefinisikan pada permukaan luar kaca *casing*, dengan parameter termal yang dibutuhkan yaitu *emissivity*. *Emissivity* kaca bernilai 0,89 (Pavlovic, Fragassa, Bertoldi, & Mikhnych, 2021) dan *Ambient Temperature* diambil dari data percobaan aktual pada halaman lampiran 2.



Gambar 3.22 Input parameter radiasi ke lingkungan

### 3.6.5.4 Radiasi antar permukaan

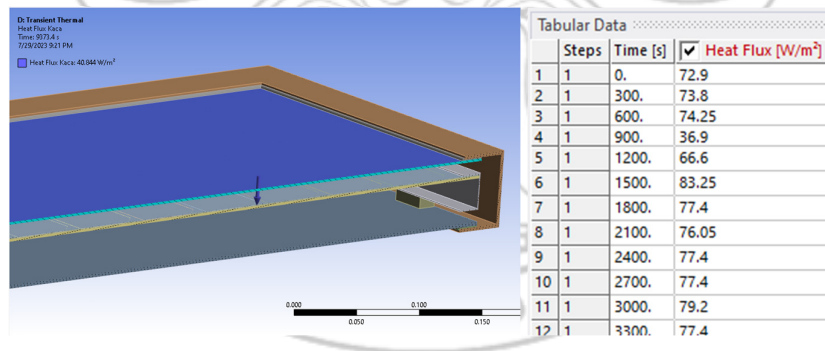
Kondisi radiasi didefinisikan pada permukaan dalam kaca *casing* dan kaca panel *PV* yang saling berhadapan dengan parameter termal yang dibutuhkan yaitu *emissivity*. *Emissivity* kaca bernilai 0,89 (Pavlovic, Fragassa, Bertoldi, & Mikhnych, 2021).



Gambar 3.23 Input parameter radiasi antara permukaan kaca casing dan ETFE

### 3.6.5.5 Heat flux pada kaca casing

Kondisi *Heat flux* didefinisikan pada seluruh permukaan kaca *casing* bagian luar, dengan parameter termal yang dibutuhkan yaitu besar panas yang di-*absorp* dari radiasi matahari. Besar *Heat flux* yang diterapkan disajikan pada halaman lampiran 3.



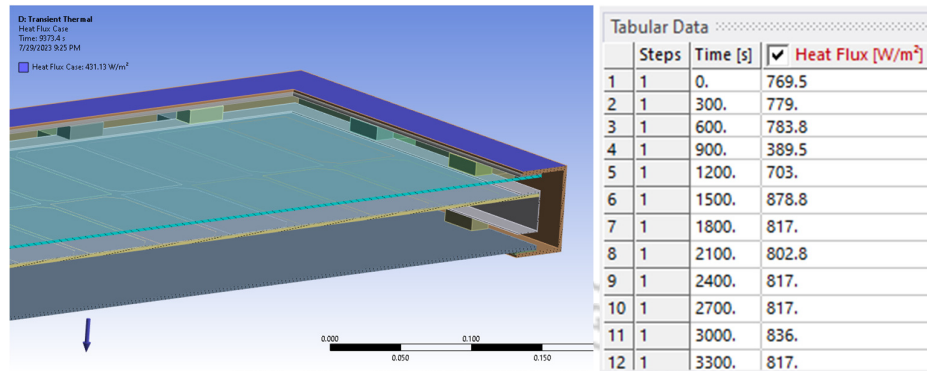
Gambar 3.24 Input parameter *heat flux* pada kaca casing

### 3.6.5.6 Heat flux pada casing bagian atas

Kondisi *Heat flux* didefinisikan pada permukaan atas *casing* bagian luar, dengan parameter termal yang dibutuhkan yaitu besar panas yang di-*absorp* dari



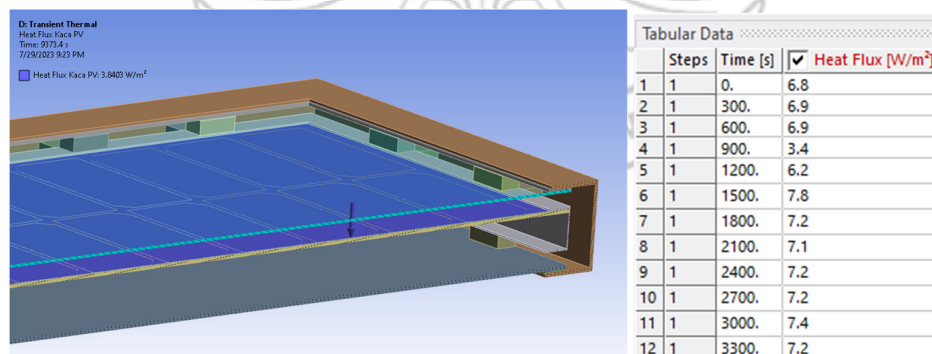
radiasi matahari. Besar *Heat flux* yang diterapkan disajikan pada halaman lampiran 3.



Gambar 3.25 Input parameter *heat flux* pada casing bagian atas

### 3.6.5.7 *Heat flux* pada kaca panel PV

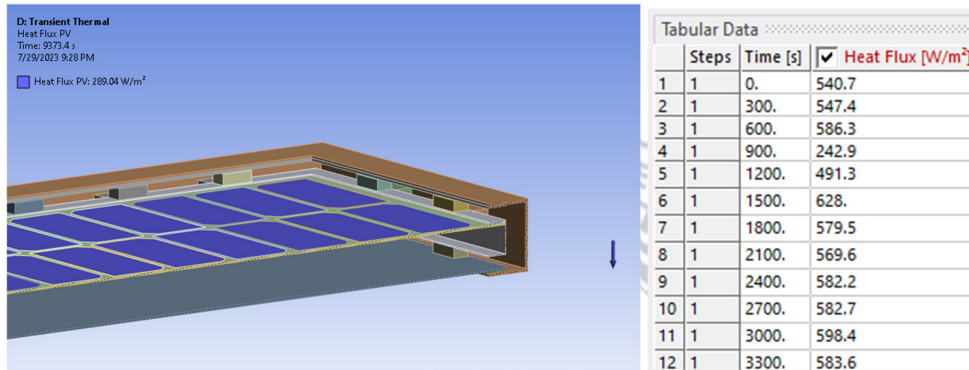
Kondisi *Heat flux* didefinisikan pada seluruh permukaan kaca panel PV bagian luar, dengan parameter termal yang dibutuhkan yaitu besar panas yang di-*absorp* dari radiasi matahari. Besar *Heat flux* yang diterapkan disajikan pada halaman lampiran 3



Gambar 3.26 Input parameter *heat flux* pada kaca panel PV

### 3.6.5.8 Heat flux pada silicon cell

Kondisi *Heat flux* didefinisikan pada seluruh permukaan *PV cell*, dengan parameter termal yang dibutuhkan yaitu besar panas yang di-*absorp* dari radiasi matahari. Besar *Heat flux* yang diterapkan disajikan pada halaman lampiran 3



Gambar 3.27 Input parameter *heat flux* pada *PV cell*

### 3.6.6 Solution

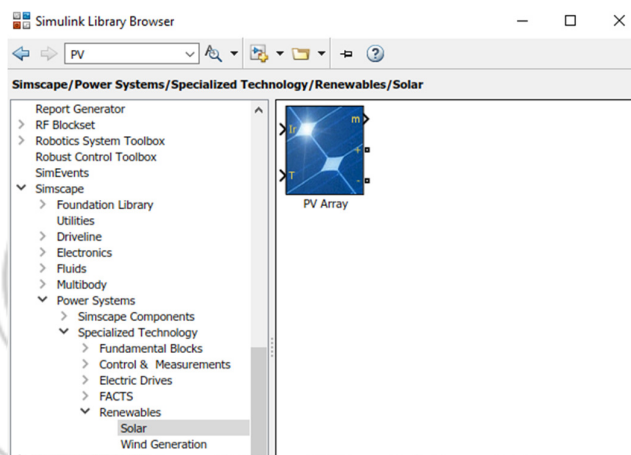
Tahap terakhir adalah *Solution*. *Solution* adalah proses simulasi yang dilakukan ansys untuk mendapatkan parameter yang diinginkan. Dalam penelitian ini, parameter yang ingin didapatkan adalah distribusi panas pada panel *PV* dan pengaruh *casing* terhadap panel *PV* dengan perhitungan menggunakan *software* ANSYS.

## 3.7 Perhitungan Performa Panel *PV* menggunakan MATLAB

Tahap selanjutnya adalah perhitungan performa panel *PV* dengan MATLAB Simulink. Dalam hal ini, perlu dimasukkan data hasil simulasi suhu permukaan *PV* oleh Ansys.

### 3.7.1 Menyiapkan *Block* untuk MATLAB Simulink

Pada tahap ini dibutuhkan sebuah *block* yang mempresentasikan kerja panel *PV*. Untuk menambah *block* ini perlu membuka panel *Simulink Library Browser*, pada *list* *Simscape*→*Power Systems*→*Specialized Technology*→*Renewables*. Kemudian *drag block* untuk memasukkan *block* ke Simulink.

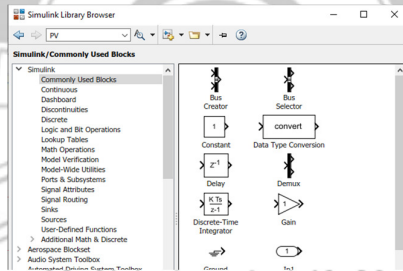


Gambar 3.28 Memasukkan *block PV array*

Kemudian memasukkan *block* lainnya sebagai input data dari *block PV* dan *block* untuk output dari *block PV*, *block* yang diperlukan untuk mengukur performa PV yaitu:

- 1) *Clock*, berfungsi untuk memberikan informasi waktu
- 2) *1-D Lookup Table*, berfungsi untuk menyimpan data dalam bentuk plot X-Y
- 3) *Series RLC Load*, berfungsi sebagai *dummy load*
- 4) *Ground*, berfungsi sebagai titik tegangan nol rangkaian listrik

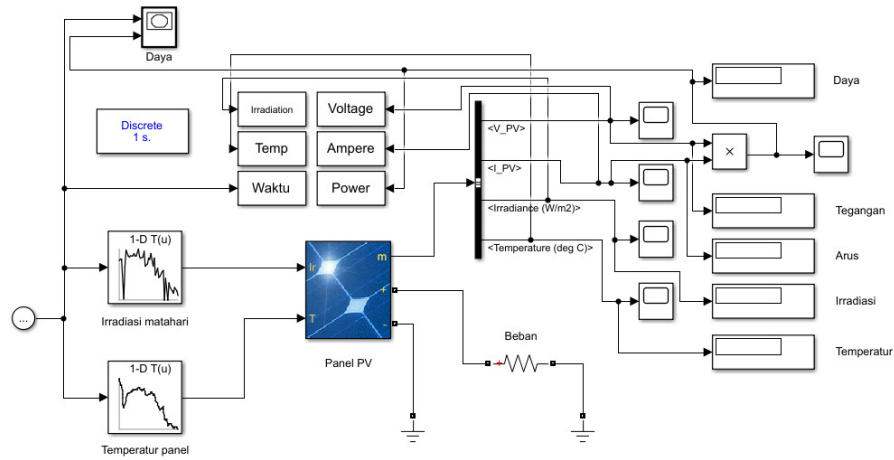
- 5) *Bus Selector*, berfungsi untuk memparalelkan data input *bus*
- 6) *Powergui*, berfungsi untuk menjalankan simulasi daya listrik
- 7) *Product*, berfungsi untuk melakukan operasi matematika
- 8) *Scope* dan *display*, berfungsi untuk menampilkan nilai *output*
- 9) *XY Graph*, berfungsi untuk menampilkan nilai *output* dalam bentuk grafik
- 10) *To workplace*, berfungsi untuk mengekspor data *output* ke data yang dapat diolah



Gambar 3.29 Memasukkan *block* data penelitian

### 3.7.2 Menyusun *Block* simulasi Simulink

Setelah menyiapkan *Block* yang diperlukan, kemudian disusun seperti pada Gambar 3.30:



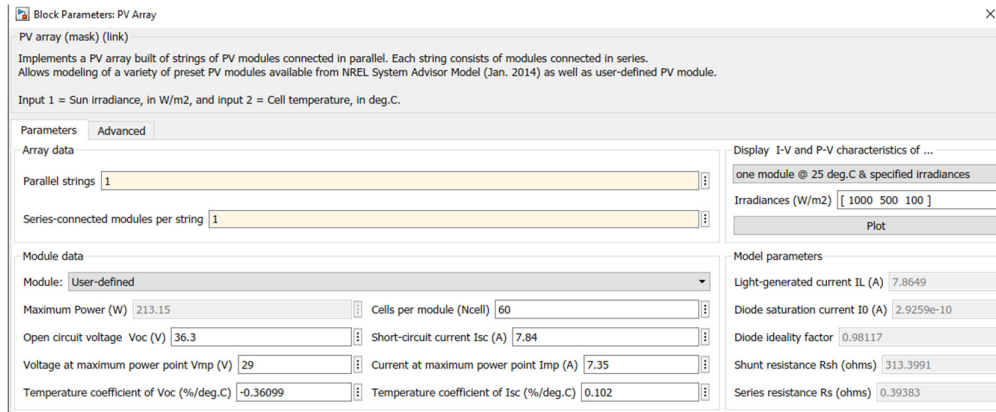
Gambar 3.30 Gambar rangkaian *block* Simulink

### 3.7.3 Memasukkan Parameter *Block PV Array*

Pada bagian ini perlu mengatur *block PV array* sesuai dengan *PV* yang digunakan untuk simulasi:

Tabel 3.6. Tabel parameter listrik panel *PV*

Parallel strings	1
Series-connected modules per string	1
Cells per module (Ncell)	44
Open circuit voltage $V_{oc}$ (V)	21.8
Short-circuit current $I_{sc}$ (A)	5.81
Voltage at maximum power point $V_{mp}$ (V)	18.24
Current at maximum power point $I_{mp}$ (A)	5.48
Temperature coefficient of $V_{oc}$ (%/deg.C)	-0.323
Temperature coefficient of $I_{sc}$ (%/deg.C)	0.037



Gambar 3.31 Memasukkan parameter *block PV array*

Nilai untuk *Temperature coefficient* untuk Voc dan Isc diambil dari tabel 3.7 untuk tipe panel PV yang sesuai, yaitu *monocrystalline silicon* (Mono C-Si) dengan besar daya yang terdekat yaitu 75Wp.

Tabel 3.7 Temperature coefficient untuk beberapa panel PV komersil

Type of PV Module	Module peak output (Wp)	Temperature coefficient (%/°C)			Average temperature coefficient of power (%/°C)
		Temperature coefficient			
		current	voltage	power	
Mono C-Si	10	0,044	-0,337	-0,440	-0,446
	74	0,025	-0,336	-0,479	
	40	0,034	-0,336	-0,455	
	75	0,037	-0,323	-0,428	
Multi C-Si	12	0,029	-0,359	-0,483	-0,387
	75	0,031	-0,267	0,356	
	75	0,059	-0,369	-0,506	
	12	0,036	-0,291	-0,372	
	50	0,046	-0,264	-0,346	
	50	0,033	-0,291	-0,396	

(Sumber: Dash & Gupta. 2015. Effect of Temperature on Power Output from Different...)

### 3.7.4 Menjalankan Perhitungan MATLAB

Sebelum menjalankan perhitungan, perlu mengoneksikan blok-blok yang telah ditambahkan sesuai dengan aliran yang sesuai. Kemudian klik *Run* atau F5

untuk menjalankan perhitungan. Hasil perhitungan dapat dilihat dalam bentuk grafik dan tabel berupa plot tegangan, arus, dan daya terhadap waktu.



## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Validasi Simulasi dari Eksperimen Aktual

Validasi simulasi dari eksperimen aktual merupakan langkah penting dalam memastikan bahwa hasil simulasi numerik sesuai dengan realitas di lapangan. Dalam proses validasi ini, hasil simulasi yang telah diperoleh dari model matematika atau numerik dibandingkan dengan data eksperimen yang diperoleh dari pengukuran atau percobaan fisik yang sebenarnya. Validasi ini bertujuan untuk menguji keakuratan dan validitas model serta memastikan bahwa simulasi dapat menggambarkan fenomena fisik dengan tepat. Jika hasil simulasi cocok dengan data eksperimen, maka model dan simulasi tersebut dianggap valid dan dapat digunakan sebagai simulasi yang lebih dinamis. Namun, jika terdapat perbedaan signifikan antara hasil simulasi dan data eksperimen, maka model dan simulasi tersebut perlu dikoreksi atau diperbaiki untuk mencapai akurasi yang lebih baik dan mencerminkan keadaan sebenarnya secara lebih tepat.

Pada *boundary condition* untuk konveksi dalam *casing* (vakum), nilai temperatur udara *real* akibat tekanan vakum perlu didefinisikan sesuai dengan keadaan aktualnya. Sehingga digunakan metode *trial and error* untuk mendapatkan nilai temperatur udara *real* yang sesuai. Maka didapatkan nilai temperatur udara vakum adalah sebesar 5°C pada tekanan 0,5 bar.

Dengan metode interpolasi, kita dapat menghitung besar temperatur udara vakum pada tekanan tertentu.



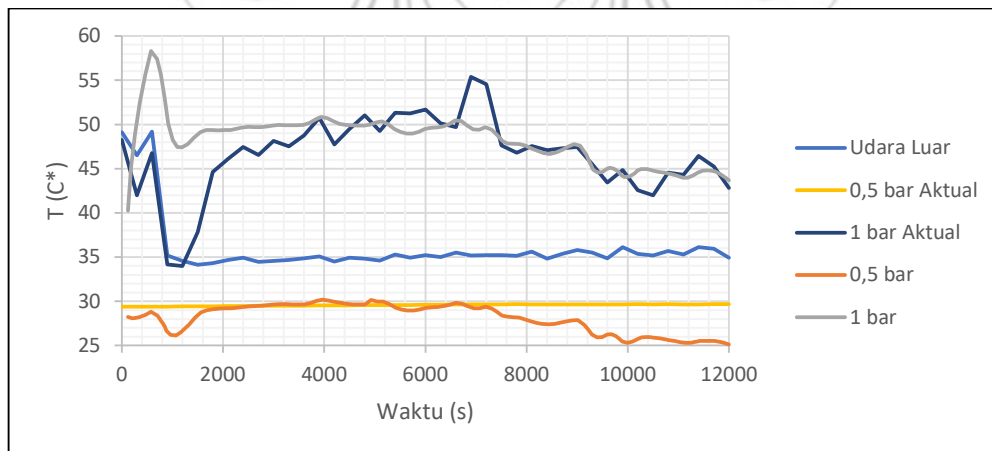
Tabel 4.1 Temperatur udara *real* vakum

P (bara)	h (W/m <sup>2</sup> .K)	Tudara (°C)	Keterangan
1	9,40	36.1	Data**
0,9	9,06	29.88	Interpolasi
0,8	8,64	23.66	Interpolasi
0,7	8,20	17.44	Interpolasi
0,6	7,76	11.22	Interpolasi
0,5	7,33	5	Trial and error
0,4	6,78	-1.22	Interpolasi
0,3	5,97	-7.44	Interpolasi
0,2	5,16	-13.66	Interpolasi
0,1	4,35	-19.88	Interpolasi

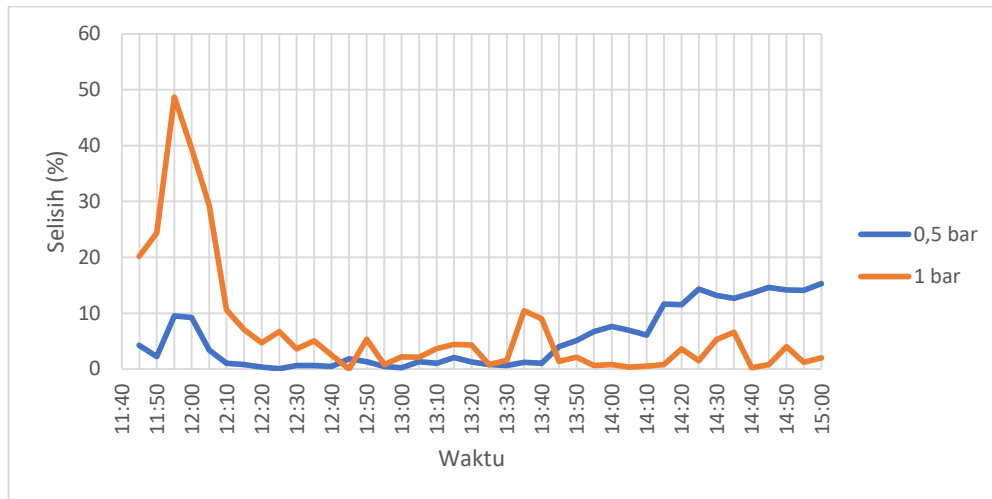
\*Merupakan nilai rata-rata data eksperimen aktual

\*\*Menggunakan data temperatur udara data eksperimen aktual

Kemudian dilakukan simulasi dengan parameter di atas dengan *boundary condition* yang telah ditentukan, lalu dibandingkan dengan data eksperimen aktual yang dilakukan untuk divalidasi.



Gambar 4.1 Grafik hasil simulasi untuk validasi



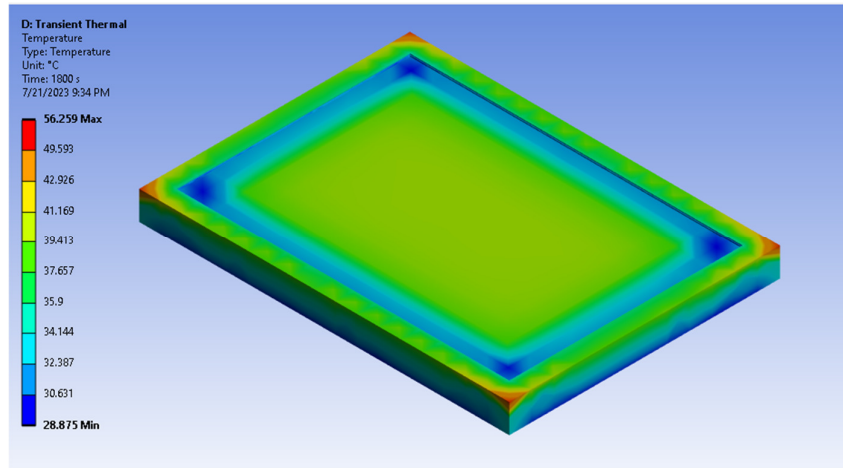
Gambar 4.2 Selisih hasil temperatur simulasi dan eksperimen aktual

Dari grafik di atas, terlihat bahwa terdapat selisih hasil antara data simulasi dan data eksperimen sekitar  $\pm 10\%$ . Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi belum sepenuhnya cocok dengan data eksperimen aktual. Kemungkinan adanya faktor-faktor tertentu yang tidak dipertimbangkan dalam model matematika atau simulasi numerik dapat menjadi alasan terjadinya selisih tersebut. Seperti perhitungan sudut datang radiasi yang kurang tepat, arah dan kecepatan angin yang perlu divariasikan, parameter material yang kurang sesuai, dan faktor-faktor lainnya.

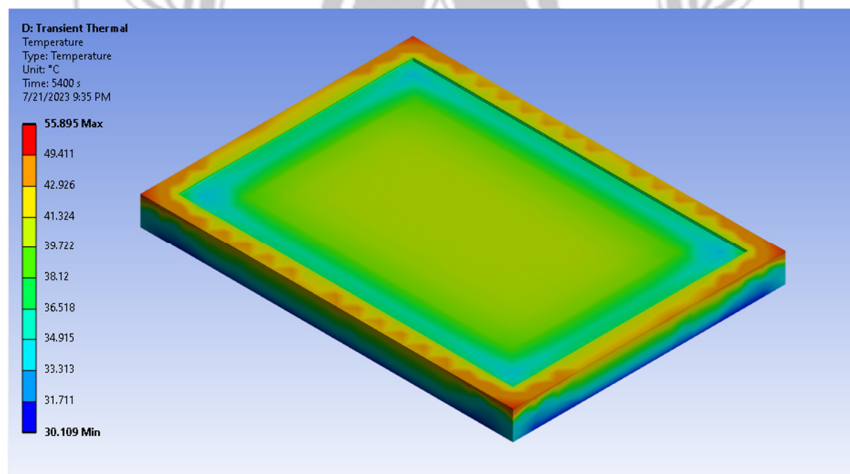
Untuk hasil simulasi pada jam 11.40-12.10 terlihat besar selisih yang cukup besar, hal ini dikarenakan temperatur awal  $T_0$  yang didefinisikan untuk seluruh komponen geometri adalah  $28^\circ\text{C}$  dimana keadaan ini tidak menggambarkan seperti kondisi awal dari eksperimen aktualnya, sehingga diperlukan waktu untuk mencapai *thermal equilibrium* atau kesetimbangan termalnya.

## 4.2 Hasil Distribusi Temperatur

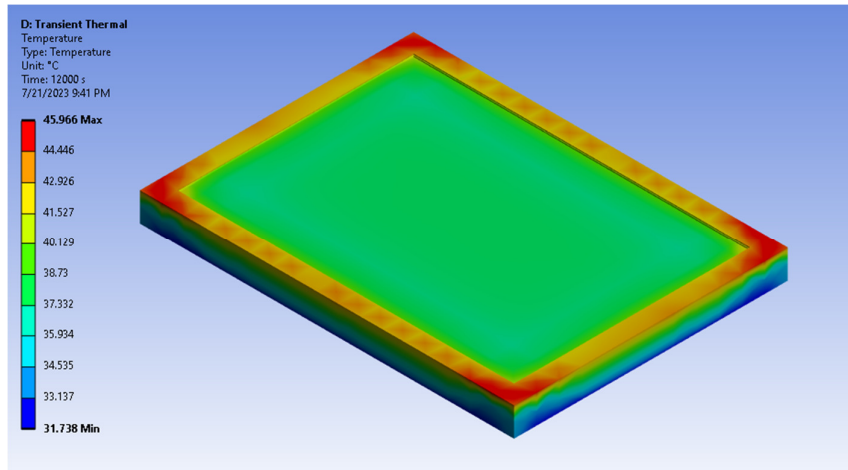
### 4.2.1 Hasil distribusi temperatur *casing*



Gambar 4.3 Distribusi temperatur *casing* pada jam 12.10



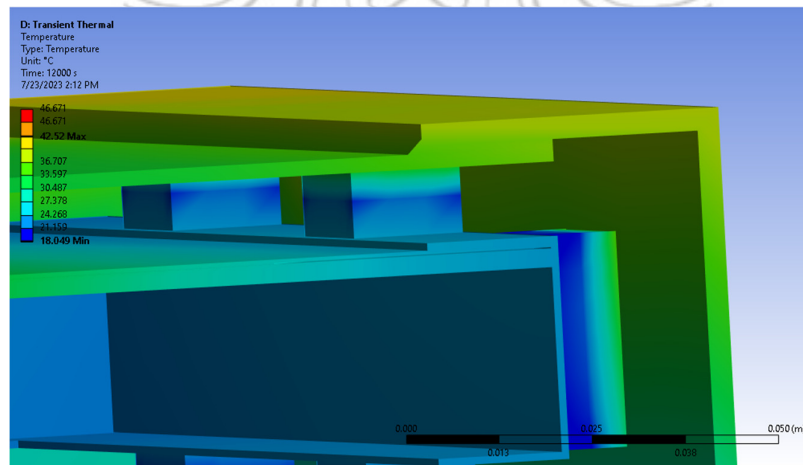
Gambar 4.4 Distribusi temperatur *casing* pada jam 13.10



Gambar 4.5 Distribusi temperatur *casing* pada jam 15.00

Dari hasil simulasi diatas menunjukkan distribusi temperatur pada permukaan luar *casing* dengan sisi atas terpapar sinar matahari. Terlihat dari zona panasnya, pada material kayu, menyerap lebih banyak panas daripada material kaca dengan zona panas tertinggi berada pada ujung sudut *casing*.

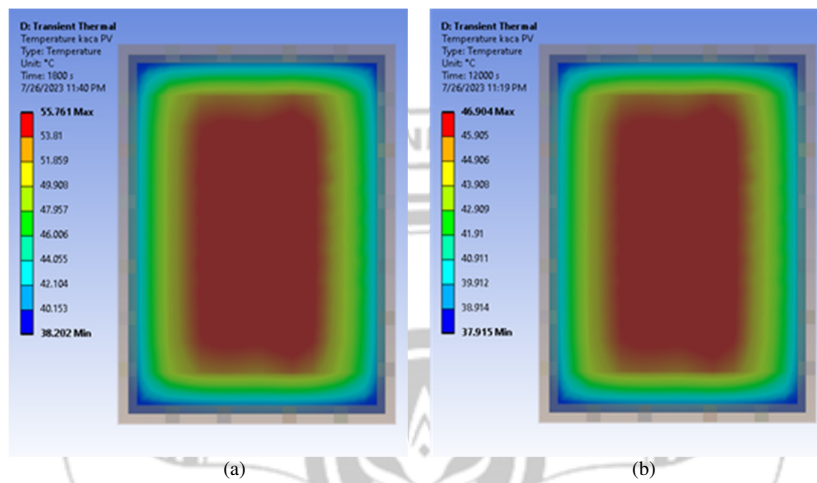
#### 4.2.2 Hasil distribusi temperatur isolator



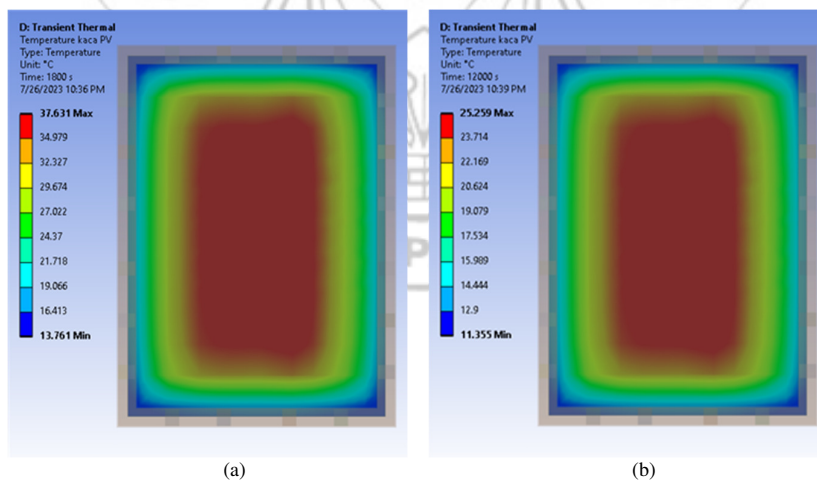
Gambar 4.6 Distribusi temperatur isolator

Dari hasil simulasi pada Gambar 4.6 menunjukkan distribusi temperatur pada isolator panel PV terhadap *casing*. Terlihat bahwa isolator mencegah transfer panas konduksi dari *casing* maupun sebaliknya.

#### 4.2.3 Hasil distribusi temperatur panel PV



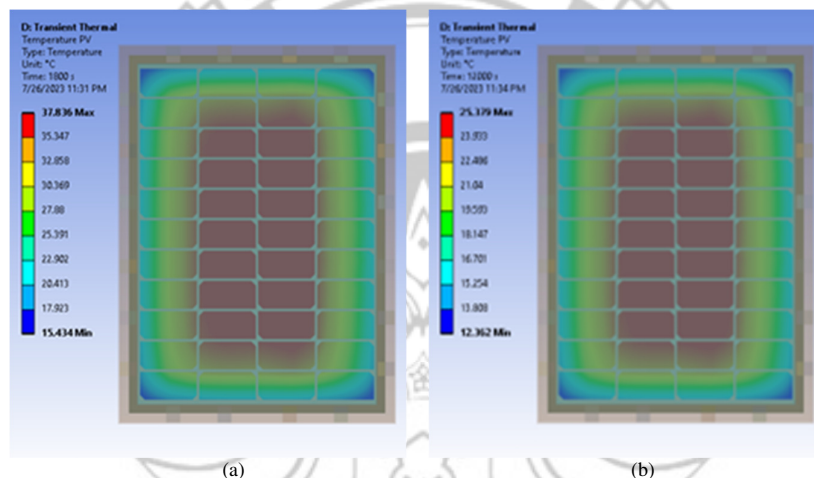
Gambar 4.7 Distribusi panas kaca panel PV tekanan 1 bar normal pada (a) jam 12.10, dan (b) jam 15.00



Gambar 4.8 Distribusi panas kaca panel PV tekanan 0,5 bar pada (a) jam 12.10, (b) jam 15.00

Dari hasil simulasi pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8 menunjukkan distribusi temperatur kaca panel PV pada dua keadaan temperatur yaitu tekanan normal (1 bara) dan tekanan vakum (0,5 bara). Terlihat zona panasnya memiliki gradien panas yang sama pada kedua keadaan tersebut tetapi dengan nilai temperatur yang berbeda. Dengan zona panas tertinggi berada pada tengah kaca dan zona panas terendah berada pada ujung sudut kaca panel PV.

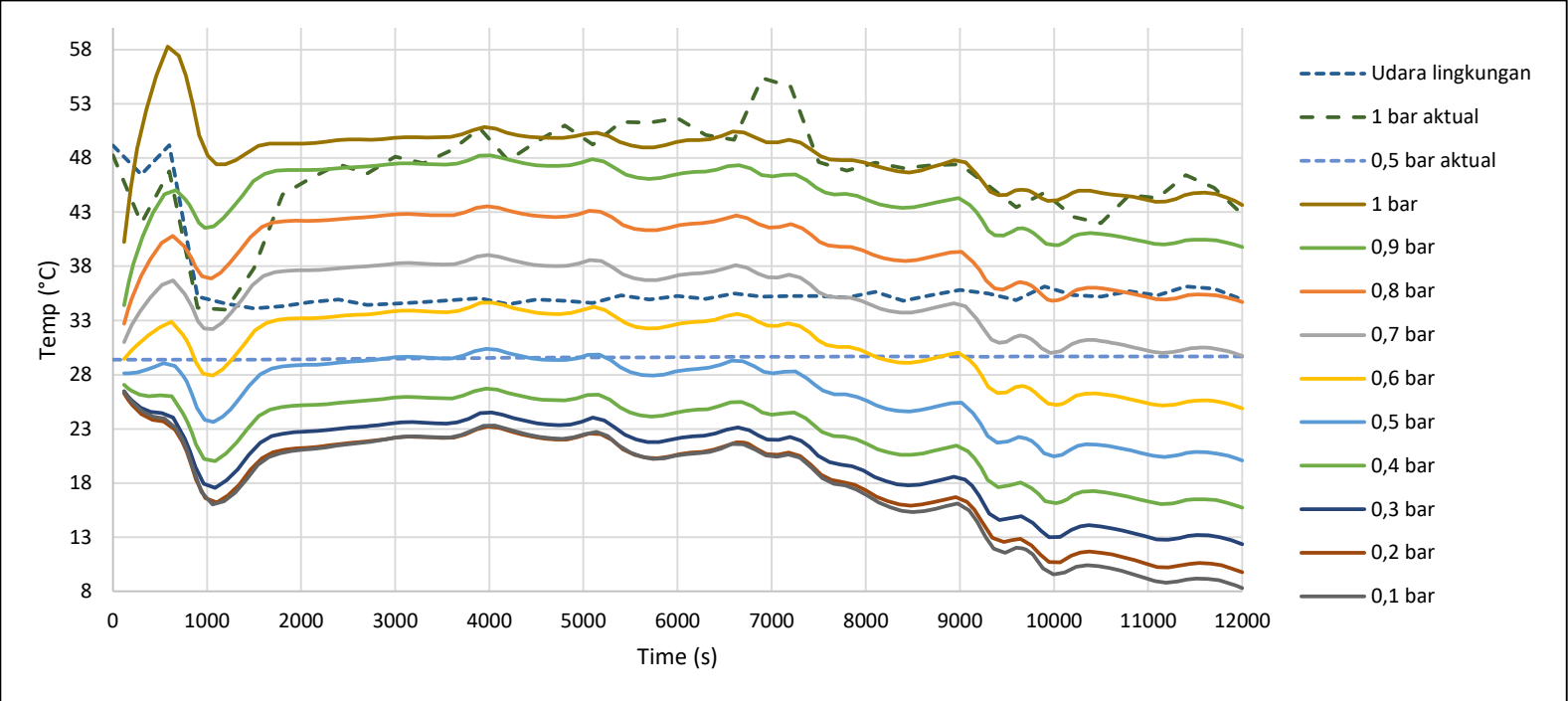
#### 4.2.4 Hasil distribusi temperatur PV cell



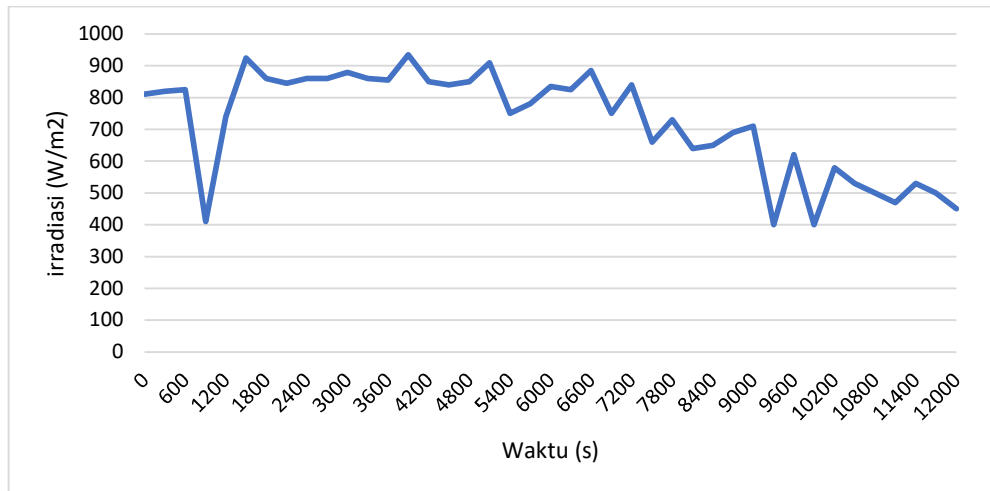
Gambar 4.9 Distribusi panas *PV cell* tekanan 0,5 bar pada (a) jam 12.10, dan (b) jam 15.00

Dari hasil simulasi pada Gambar 4.9 menunjukkan zona distribusi panas yang tidak homogen walaupun seluruh bagian *PV cell* dikenai irradiasi matahari, hal ini disebabkan oleh konduksi antar *PV cell* yang berdekatan. Hal ini dapat terlihat dari zona panas tertinggi berada pada bagian tengah dimana *PV cell* saling berdekatan.

4.3 Hasil Temperatur Berdasarkan Tekanan



Gambar 4.10 Hasil temperatur simulasi terhadap tekanan



Gambar 4.11 Data Irradiasi pada Eksperimen Aktual

Dari hasil distribusi temperatur yang telah dilakukan, pada pendinginan tekanan yang berbeda, distribusi panas yang dihasilkan memiliki gradien panas yang sama dan hasil distribusi panasnya adalah tidak homogen. Oleh karena itu, nilai rata-rata (*average*) temperatur yang akan digunakan sebagai dasar perhitungan performa listrik *panel PV*. Nilai rata-rata (*average*) yang dimaksud adalah nilai rata-rata temperatur berdasarkan luas permukaan. Sehingga seluruh permukaan yang dimaksud memiliki distribusi panas yang homogen. Hasil temperatur rata-rata dari hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar 4.10 untuk tekanan pendinginan yang bervariasi.

Grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.10 menunjukkan bentuk perubahan temperatur yang sama dengan perubahan irradiasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.11. Hal ini disebabkan oleh panas yang timbul akibat radiasi matahari.

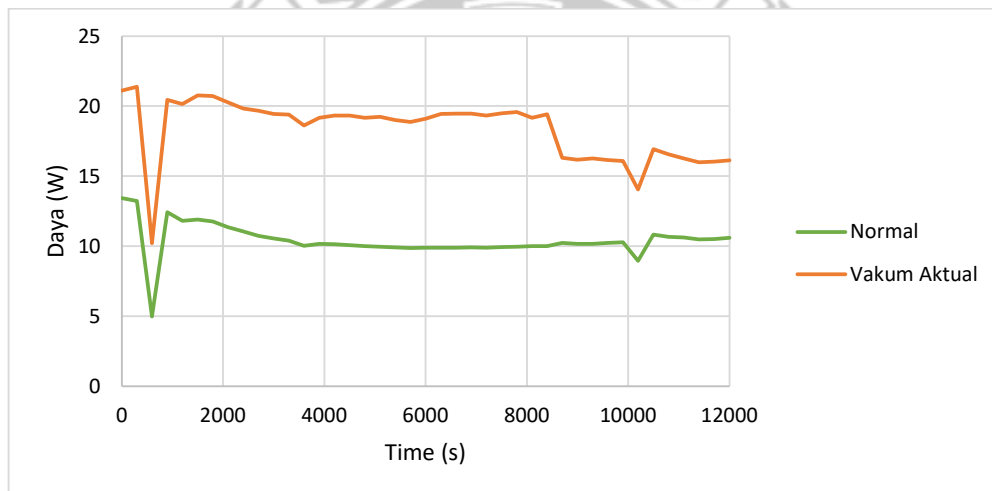
Pada tekanan 0,2 bar dan 0,1 bar menunjukkan semakin kecil tekanan pendinginannya, maka semakin kecil juga perbedaannya pada tekanan



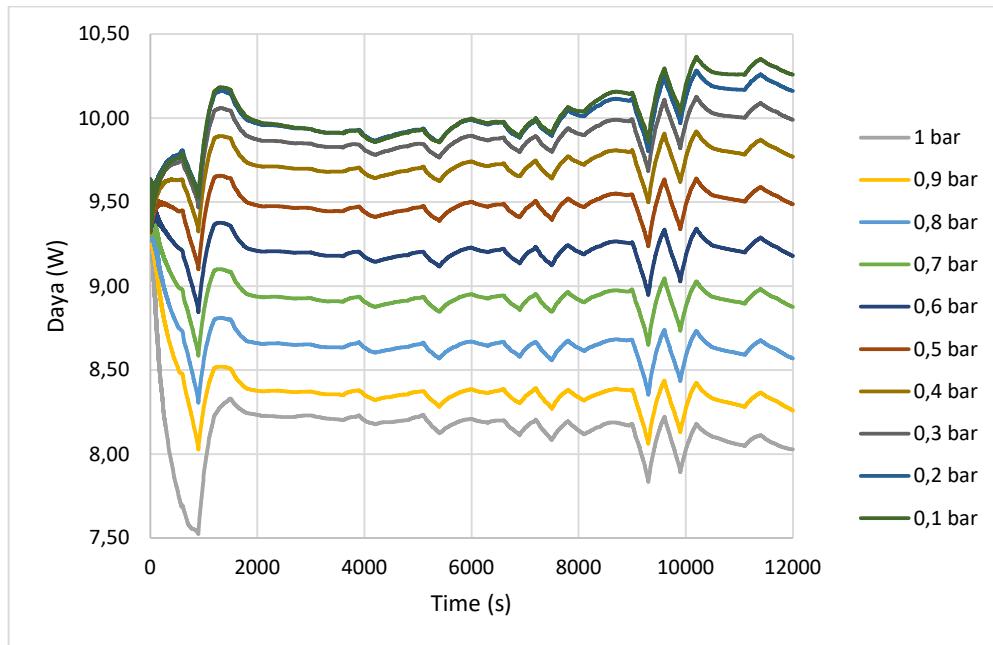
pendinginan sebelumnya. Walaupun dengan tekanan pendinginannya semakin kecil dapat meraih temperatur udara yang lebih rendah untuk menghasilkan pendinginan yang lebih baik.

Hal ini disebabkan oleh karakteristik udara vakum, semakin vakum udara tersebut maka *heat transfer coefficient* pada konveksi semakin kecil sehingga perpindahan panas untuk pendinginan semakin kecil.

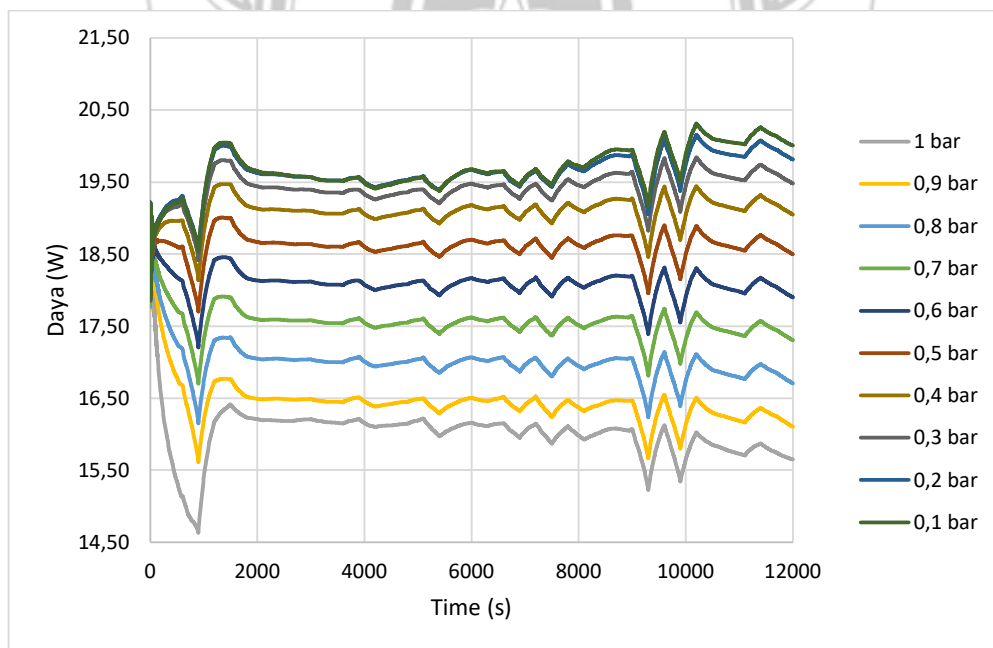
#### 4.4 Hasil Performa Listrik Panel PV



Gambar 4.12 Performa daya listrik dari eksperimen aktual



Gambar 4.13 Performa daya listrik beban 10W dari simulasi

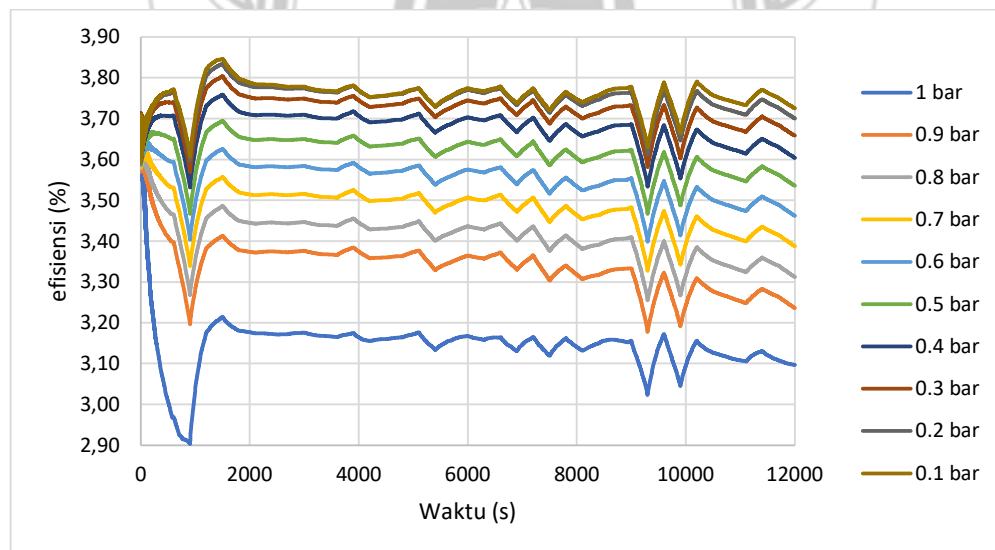


Gambar 4.14 Performa daya listrik beban 20W dari simulasi

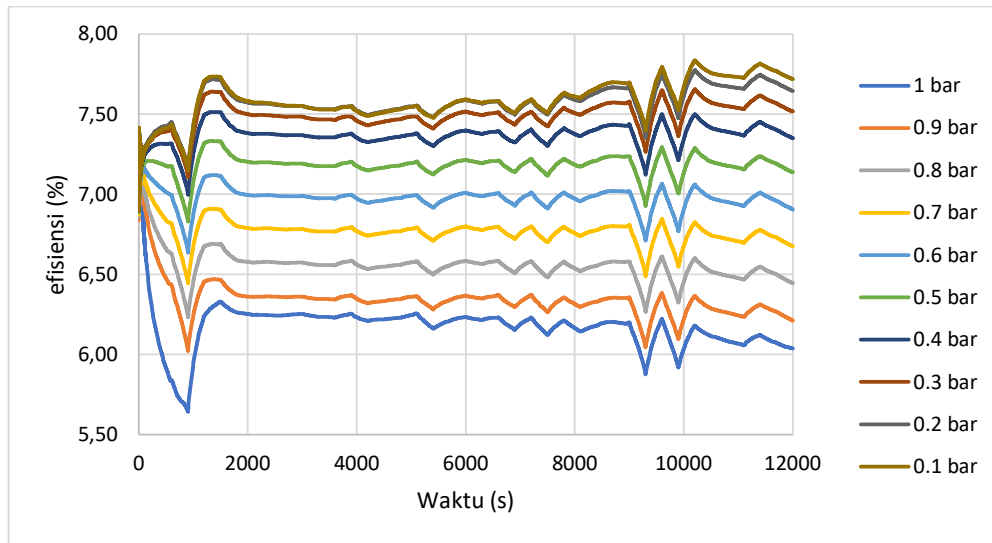
Pada Gambar 4.12 menunjukkan hasil daya listrik yang dihasilkan oleh panel *PV* pada eksperimen aktual selama 5 jam (jam 11.40-15.00), terlihat adanya peningkatan daya yang dihasilkan karena pengaruh dari tekanan.

Sedangkan pada Gambar 4.13 dan 4.14 merupakan hasil daya listrik dihasilkan oleh panel *PV* selama 5 jam dengan input data temperatur dan data irradiasi dengan beban listrik 21,8V daya 10W dan 20W, terlihat adanya peningkatan daya yang dihasilkan karena pengaruh dari tekanan.

Pada waktu 900 detik (jam 11.55) di kedua grafik pada Gambar 4.9 dan 4.10, terdapat penurunan daya yang dihasilkan, hal ini diakibatkan karena nilai irradiasi saat itu sangat turun yaitu sebesar  $410\text{W}/\text{m}^2$ .



Gambar 4.15 Efisiensi panel *PV* dengan beban 10W diberbagai tekanan pendinginan



Gambar 4.16 Efisiensi panel PV dengan beban 20W diberbagai tekanan pendinginan

Dari data daya listrik yang telah dianalisis di atas, maka dapat dihitung besar efisiensi panel surya terhadap irradiasi matahari, disajikan pada grafik pada Gambar 4.15 dan 4.16. Grafik menunjukkan besar efisiensi terbesar pada tekanan vakum 0.1 bar dengan efisiensi rata-rata 3,76% pada beban 10W dan efisiensi rata-rata 7,59% pada beban 20W. Dengan besar peningkatan efisiensi dibandingkan dengan tekanan normal (1 bara) disajikan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Peningkatan efisiensi panel PV

Tekanan (bara)	Beban 10W	Beban 20W
	Peningkatan (%)	Peningkatan (%)
0.9	5.82	2.65
0.8	7.80	5.85
0.7	9.66	8.81
0.6	11.40	11.54
0.5	13.05	14.08
0.4	14.49	16.22
0.3	15.48	17.61
0.2	16.14	18.48
0.1	16.35	18.68

#### 4.5 Perbandingan Performa dengan Sistem Pendinginan Lain

Salah satu metode sistem pendinginan panel surya *active cooling method* yaitu dengan sistem *water spray*. Dengan metode ini didapatkan peningkatan efisiensi sebesar 2.47% berdasarkan percobaan (2022) Tri Rahajoeningroem dan Ichsan Jatnika pada artikel ilmiah “Sistem Pendingin Otomatis Panel Surya Untuk Peningkatan Daya Output Berbasis Mikrokontroler”.

Jika dibandingkan dengan performa teknik pendinginan vakum, teknik ini memiliki peningkatan efisiensi yang sama dengan teknik pendinginan vakum pada tekanan 0,9 bar. Dengan peningkatan efisiensi lebih tinggi pada penurunan tekanan vakum lebih lanjut hingga pada tekanan vakum 0.1 bar menghasilkan peningkatan efisiensi sebesar 18.68% dari efisiensi panel surya tanpa pendinginan.

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan Hasil dan Simulasi yang telah dilakukan maka dengan ini dapat diberi kesimpulan sebagai berikut:

- 1) Hasil simulasi distribusi temperatur pada panel PV tidak homogen, pada tekanan 0,5 bar dengan irradiansi tertinggi  $935 \text{ W/m}^2$  dengan zona panas tertinggi berada di tengah sebesar  $39,9^\circ\text{C}$  dan zona panas terendah berada pada ujung sudut panel sebesar  $14,4^\circ\text{C}$ .
- 2) Hasil simulasi distribusi temperatur pada panel PV nilainya semakin rendah akibat penurunan tekanan pendinginan vakum, dengan irradiansi tertinggi  $935 \text{ W/m}^2$  mendapatkan temperatur PV rata-rata pada tekanan 1 bar ialah  $50,9^\circ\text{C}$  dan tekanan 0,9 bar ialah  $48,2^\circ\text{C}$ .
- 3) Performa daya listrik panel PV dari hasil simulasi meningkat akibat penurunan tekanan pendinginan vakum. Dengan besar peningkatan tertinggi yang dapat dicapai sebesar  $18,68\%$  pada tekanan 0,1 bar dengan beban 20W.

#### **5.2 Saran**

- 1) Dibutuhkan data parameter lebih lanjut seperti kecepatan angin dan arah sudut datang radiasi matahari dalam simulasi sehingga hasil simulasi dapat menjadi lebih akurat lagi.

- 2) Diperlukan analisis tambahan dengan CFD untuk analisis pada udara vakum untuk mendapatkan nilai temperatur udara akibat tekanan vakum.
- 3) Diperlukan simulasi dengan suhu awal yang *non-uniform* untuk seluruh bagian geometri agar simulasi dapat mencapai keadaan yang *steady state*.



## DAFTAR PUSTAKA

- ANSYS Inc. 2010. *ANSYS Meshing User's Guide*. Canonsburg: ANSYS Inc.
- Computer & Electronics Journal. 2008. Dasar Teori Semikonduktor (2). *Computer & Electronics Journal*. (Online). (<https://cnej.wordpress.com/2008/11/23/dasar-teori-semikonduktor-2/>). Diakses pada 14 Februari 2023.
- Darmansyah, I.. 2016. analisis sambungan pemikul momen pada struktur portal baja menggunakan sambungan tipe *end plate*. (Laporan hasil penelitian). Skripsi. Medan: Universitas Sumatera Utara.
- Dayasurya. 2019. Sel Surya Silikon. *Pembangkit Listrik Tenaga Surya*. (Online). (<http://dayasurya.weebly.com/sel-surya-silikon.html>). Diakses pada 14 Februari 2023.
- Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi. 2021. Indonesia Kaya Energi Surya, Pemanfaatan Listrik Tenaga Surya oleh Masyarakat Tidak Boleh Ditunda. (<https://ebtke.esdm.go.id/post/2021/09/02/2952/indonesia.kaya.energi.surya.pemanfaatan.listrik.tenaga.surya.oleh.masyarakat.tidak.boleh.ditunda>). (Online). Diakses pada 17 Januari 2023.
- Dr. Saud T. Al-Jadir, P.. 2023. ANSYS Thermal Analysis Course of Solar PV Module, (online), (<https://www.udemy.com/course/ansys-thermal-analysis-course-of-solar-pv-module/>). Diakses pada 01 April 2023.
- Duffie, J., dan Beckman, W.. 2013. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Effendy, dan Ridho, M.. 2021. Sistem Monitoring Kinerja Panel Surya Berbasis IoT Menggunakan Arduino Uno pada PLTS Pematang Johar. (Skripsi). Medan: Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
- Fahmi, A.. 2021. Analisa Numerik *Apk Shell Helical Coil* Bersirip pada Aplikasi ACWH, (Skripsi). Medan: Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
- Harahap, R., dan Suherman. Ed., 2021. *Active Versus Passive Cooling Systems In Increasing Solar Panel Output*. (Laporan hasil penelitian). Medan: Universitas Sumatera Utara.
- Incropera, F., dkk.,. 2007. *Fundamentals of Heat and Mass transfer Sixth Edition*. Hoboken, United States of America: John Wiley & Sons, Inc.

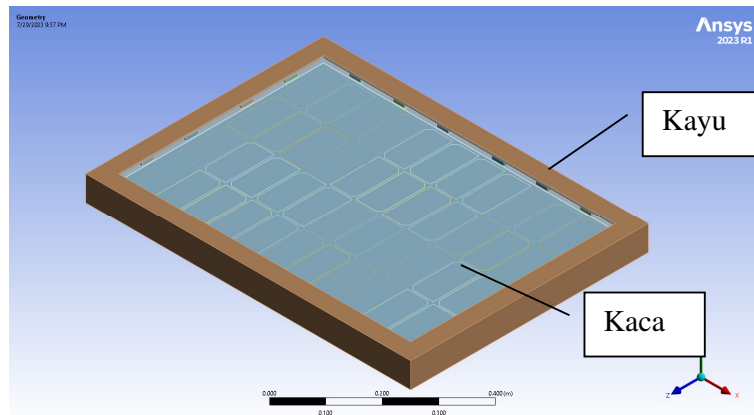


- Jamaluddin. 2018. Perpindahan Panas dan Massa pada Penyangraian dan Penggorengan Bahan Pangan. (Laporan hasil penelitian). Makassar: Badan Penerbit Universitas Negeri Makassar.
- Juttula , H., dan Mäkynen, A. 2012. Determination of Refractive Index of Softwood Using Immersion Liquid Method. *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*. Finland: University of Oulu
- MathWorks, Inc. 2022. *PV Array*. *Mathworks Help Center*, (Online). (<https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/pvarray.html>). Diakses pada 12 Februari 2023.
- Moharram, K., dkk.,. 2013. Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling. *Ain Shams Engineering Journal*. Cairo: Beni-Suef University
- Parante, A., dan Yusuf, S. 2022. Sistem Monitoring dan Data Logger Pembangkit Listrik Tenaga Surya Berbasis Arduino Uno dengan Menggunakan Thingspeak. (Skripsi). Makassar: Politeknik Negeri Ujung Pandang.
- Pavlovic, A., dkk.,. 2021. Thermal Behavior of Monocrystalline Silicon Solar Cells: A Numerical and Experimental Investigation on the Module Encapsulation Materials. *Journal of Applied and Computational Mechanics*. Khuzestan: Shahid Chamran University of Ahvaz
- Rahmalia, N. 2021. MATLAB, Platform Pemrograman dengan Segudang Kegunaan. (Online). (<https://glints.com/id/lowongan/matlab-adalah/#.Y957ty9By02>). Diakses pada 31 Januari 2023.
- Ramadhani, B. 2018. *Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Dos & Don'ts*. Jakarta Pusat: Energising Development (EnDev) Indonesia.
- Rathour, R. S., dkk., Ed.,. 2019. Cooling of Solar Photovoltaic Cell: Using Novel Technique. *Advances in Fluid and Thermal Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Singapura.
- Rodrigues, E., dkk, Ed.,. 2011. Simulation of a solar cell considering single-diode equivalent circuit model. *International conference on renewable energies and power quality*. Spanyol.
- Safrizal. 2017. Rancangan Panel Surya Sebagai Sumber Energi Listrik pada Gedung Fakultas Sains dan Teknologi Unismu Jepara., *Jurnal DISPROTEK*. (Online), (<https://ejournal.unisnu.ac.id>). Diakses pada 17 Januari 2023.

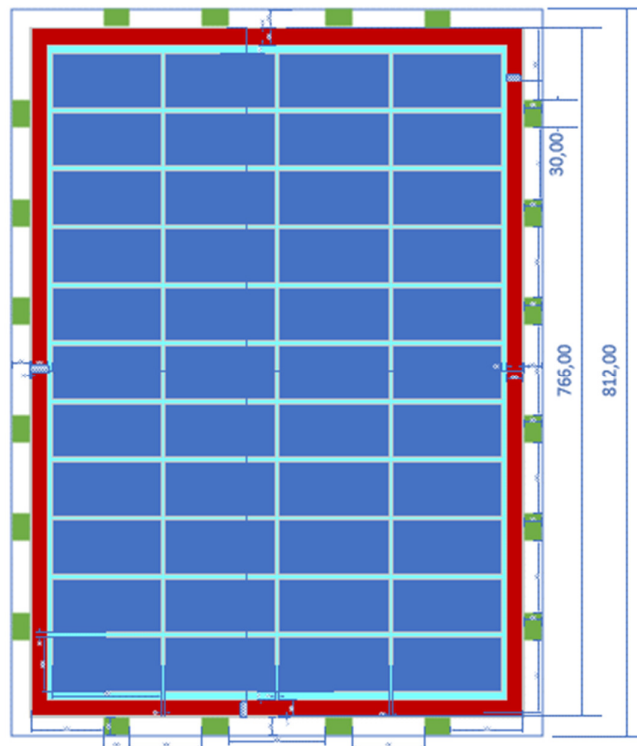
- Saidi, M., dan Abardeh, R. 2010. Air Pressure Dependence of Natural-Convection Heat Transfer. *Proceedings of the World Congress on Engineering 2010 Vol II*. Tehran: Sharif University of Technology
- Suprpto, I., dan Widodo, S. 2017. *Pengenalan Teknologi Vakum*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar Badan Tenaga Nuklir Nasional.
- Suryanto dan Firman. 2022. The Vacuum Technique for Cooling PV Cell. (Laporan hasil penelitian). Makassar: Politeknik Negeri Ujung Pandang.
- Tian, S. 2017. Prototipe Sistem Monitoring Parameter Pembangkit Listrik Tenaga Surya Berbasis Internet of Things. (Skripsi). Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta.
- Tiyas, P. K., dan Widyartono, M. 2020. Pengaruh Efek Suhu Terhadap Kinerja Panel Surya. (Laporan hasil penelitian). Surabaya: Universitas Negeri Surabaya.
- Universitas Medan Area. 2016. Proses Perpindahan Kalor. (Skripsi). Medan: Universitas Medan Area.
- Universitas Muhammadiyah Malang. 2013. Karakteristik Solar Cell. (Skripsi). Malang: Universitas Muhammadiyah Malang.
- Universitas Negeri Yogyakarta. 2017. Dasar-dasar Operasi Matlab. (Online). (<http://staffnew.uny.ac.id/upload/131808683/pendidikan/bab-i.pdf>). Diakses pada 28 Januari 2023.
- Victron Energy. 2008. BlueSolar Charge Controller. Victron Energy B. V.
- Wikipedia. 2022. Hukum Gay-Lussac, (Online), ([https://id.wikipedia.org/wiki/Hukum\\_Gay-Lussac](https://id.wikipedia.org/wiki/Hukum_Gay-Lussac)). Diakses pada 30 Januari 2023.
- Wikipedia. 2023. Power Inverter., (Online), ([https://id.wikipedia.org/wiki/Power\\_inverter](https://id.wikipedia.org/wiki/Power_inverter)). Diakses pada 14 Februari 2023.
- Zhe, L. W., dkk. 2016. Investigation of Solar Panel Performance Based on Different Wind Velocity. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. Indonesia: Medan Institute of Technology.

## LAMPIRAN

### Lampiran 1 – Gambar geometri casing dan PV



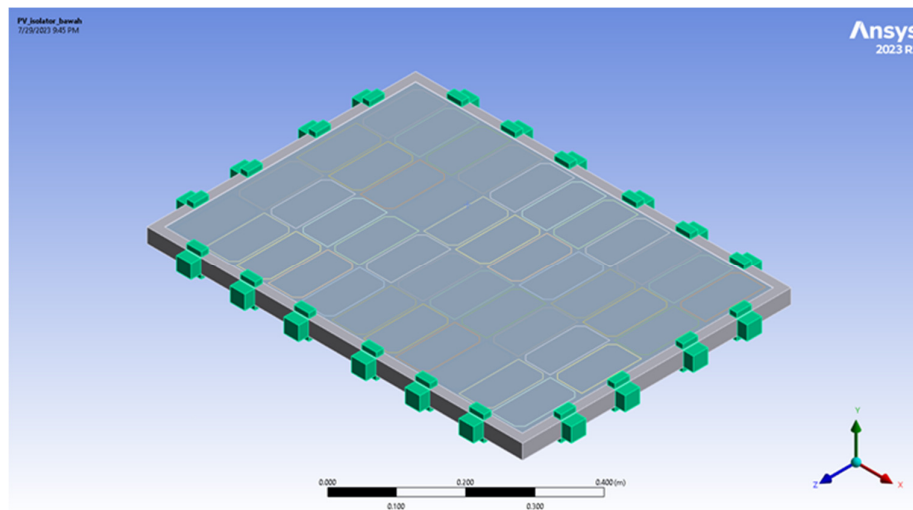
Geometri casing dan panel PV tampilan ISO



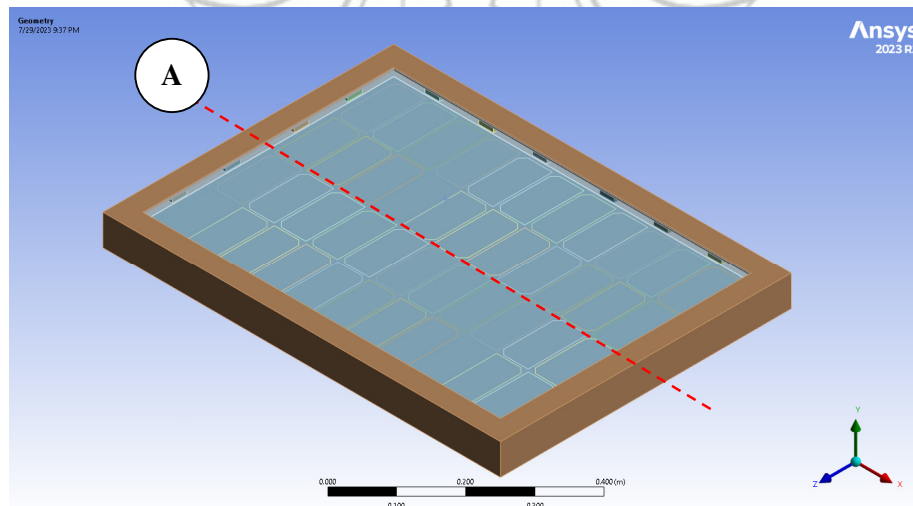
Draft desain casing dan panel PV tampilan atas



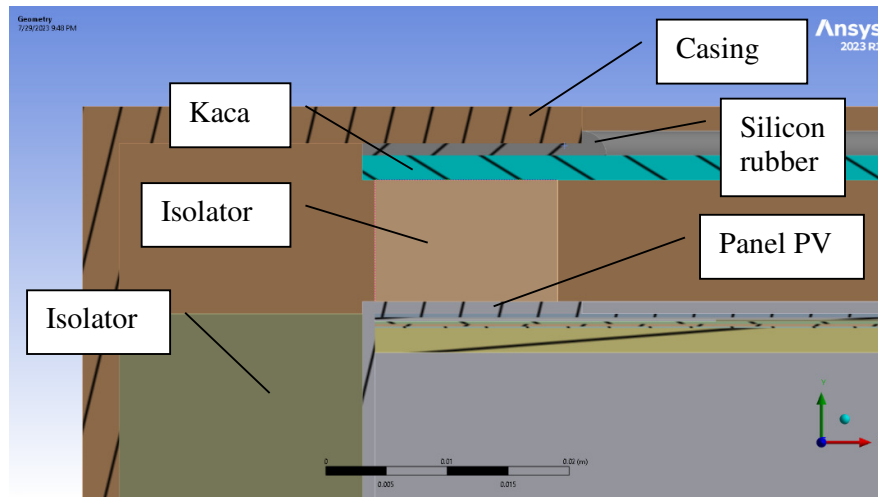
Draft desain casing dan panel PV tampilan samping



Geometri panel PV dengan isolator panas tampilan ISO



Geometri casing dan panel PV belahan A



Geometri casing dan panel PV tampilan belahan A



**Lampiran 2 – Data eksperimen aktual**

Waktu	Tegangan Panel 1	Arus Panel 1	Tegangan Panel (Vakum) 2	Arus Panel 2	Temperatur Udara Luar	Temperatur Panel Normal Pressure	Temperatur Panel Vacuum Pressure	Intensitas Cahaya
11:40	18.392	0.730	18.107	1.167	49.125	48.250	29.38	810
11:45	18.168	0.728	18.137	1.179	46.500	42.000	29.38	820
11:50	13.471	0.370	17.735	0.576	49.188	46.750	29.39	825
11:55	17.870	0.696	18.006	1.137	35.188	34.188	29.40	410
12:00	17.551	0.672	17.785	1.134	34.563	34.000	29.41	740
12:05	17.571	0.678	17.979	1.155	34.125	37.813	29.41	925
12:10	17.497	0.672	18.058	1.147	34.313	44.625	29.42	860
12:15	17.298	0.656	17.934	1.130	34.688	46.125	29.44	845
12:20	17.174	0.643	17.859	1.111	34.938	47.438	29.46	860
12:25	17.000	0.631	17.810	1.105	34.438	46.563	29.48	860
12:30	16.876	0.626	17.735	1.097	34.563	48.125	29.48	880
12:35	16.801	0.620	17.711	1.096	34.688	47.500	29.50	860
12:40	16.602	0.604	17.487	1.064	34.875	48.750	29.51	855
12:45	16.727	0.608	17.686	1.084	35.063	50.750	29.55	935
12:50	16.702	0.608	17.765	1.087	34.500	47.750	29.56	850
12:55	16.677	0.605	17.744	1.090	34.938	49.500	29.57	840
13:00	16.602	0.603	17.658	1.085	34.813	51.000	29.58	850
13:05	16.577	0.600	17.711	1.086	34.625	49.250	29.58	910
13:10	16.564	0.598	17.645	1.078	35.313	51.313	29.60	750
13:15	16.552	0.596	17.597	1.072	34.938	51.250	29.59	780
13:20	16.558	0.598	17.708	1.079	35.250	51.688	29.61	835
13:25	16.552	0.598	17.807	1.092	35.000	50.125	29.63	825

Waktu	Tegangan Panel 1	Arus Panel 1	Tegangan Panel (Vakum) 2	Arus Panel 2	Temperatur Udara Luar	Temperatur Panel Normal Pressure	Temperatur Panel Vacuum Pressure	Intensitas Cahaya
13:30	16.554	0.597	17.810	1.093	35.500	49.688	29.64	885
13:35	16.577	0.598	17.810	1.093	35.188	55.375	29.66	750
13:40	16.577	0.597	17.785	1.088	35.250	54.563	29.66	840
13:45	16.577	0.600	17.817	1.095	35.250	47.625	29.66	660
13:50	16.587	0.600	17.859	1.096	35.125	46.813	29.68	730
13:55	16.602	0.603	17.750	1.080	35.625	47.563	29.67	640
14:00	16.602	0.604	17.810	1.091	34.813	47.063	29.67	650
14:05	16.624	0.616	18.058	0.903	35.375	47.313	29.67	690
14:10	16.611	0.613	17.970	0.901	35.813	47.438	29.67	710
14:15	16.614	0.612	17.983	0.905	35.500	45.500	29.66	400
14:20	16.627	0.615	17.960	0.900	34.875	43.438	29.67	620
14:25	16.627	0.618	17.934	0.896	36.125	44.813	29.67	400
14:30	15.906	0.563	17.145	0.820	35.375	42.563	29.68	580
14:35	16.925	0.640	18.281	0.926	35.188	42.000	29.67	530
14:40	16.826	0.634	18.132	0.914	35.688	44.563	29.68	500
14:45	16.791	0.632	18.058	0.901	35.313	44.313	29.67	470
14:50	16.751	0.626	17.983	0.890	36.125	46.438	29.67	530
14:55	16.739	0.629	17.960	0.893	35.938	45.250	29.68	500
15:00	16.726	0.634	17.983	0.897	34.938	42.813	29.68	450

**Lampiran 3 – Parameter termal simulasi**

No.	Time (s)	Irradiance (W/m <sup>2</sup> )	Glass			ETFE			EVA	PV cell	
			$\alpha$	$\tau$	$\rho$	$\alpha$	$\tau$	$\rho$	$\tau$	$\alpha$	$\rho$
			0.09 (W/m <sup>2</sup> )	0.84 (W/m <sup>2</sup> )	0.07 (W/m <sup>2</sup> )	0.01 (W/m <sup>2</sup> )	0.92 (W/m <sup>2</sup> )	0.08 (W/m <sup>2</sup> )	1 (W/m <sup>2</sup> )	0.97 (W/m <sup>2</sup> )	0.03 (W/m <sup>2</sup> )
1	0	810	72.9	680.4	56.7	6.8	626.0	54.4	626.0	607.2	18.8
2	300	820	73.8	688.8	57.4	6.9	633.7	55.1	633.7	614.7	19.0
3	600	825	74.25	693	57.75	6.9	637.6	55.4	637.6	618.4	19.1
4	900	410	36.9	344.4	28.7	3.4	316.8	27.6	316.8	307.3	9.5
5	1200	740	66.6	621.6	51.8	6.2	571.9	49.7	571.9	554.7	17.2
6	1500	925	83.25	777	64.75	7.8	714.8	62.2	714.8	693.4	21.4
7	1800	860	77.4	722.4	60.2	7.2	664.6	57.8	664.6	644.7	19.9
8	2100	845	76.05	709.8	59.15	7.1	653.0	56.8	653.0	633.4	19.6
9	2400	860	77.4	722.4	60.2	7.2	664.6	57.8	664.6	644.7	19.9
10	2700	860	77.4	722.4	60.2	7.2	664.6	57.8	664.6	644.7	19.9
11	3000	880	79.2	739.2	61.6	7.4	680.1	59.1	680.1	659.7	20.4
12	3300	860	77.4	722.4	60.2	7.2	664.6	57.8	664.6	644.7	19.9
13	3600	855	76.95	718.2	59.85	7.2	660.7	57.5	660.7	640.9	19.8
14	3900	935	84.15	785.4	65.45	7.9	722.6	62.8	722.6	700.9	21.7
15	4200	850	76.5	714	59.5	7.1	656.9	57.1	656.9	637.2	19.7
16	4500	840	75.6	705.6	58.8	7.1	649.2	56.4	649.2	629.7	19.5
17	4800	850	76.5	714	59.5	7.1	656.9	57.1	656.9	637.2	19.7
18	5100	910	81.9	764.4	63.7	7.6	703.2	61.2	703.2	682.2	21.1
19	5400	750	67.5	630	52.5	6.3	579.6	50.4	579.6	562.2	17.4



20	5700	780	70.2	655.2	54.6	6.6	602.8	52.4	602.8	584.7	18.1
21	6000	835	75.15	701.4	58.45	7.0	645.3	56.1	645.3	625.9	19.4
22	6300	825	74.25	693	57.75	6.9	637.6	55.4	637.6	618.4	19.1
23	6600	885	79.65	743.4	61.95	7.4	683.9	59.5	683.9	663.4	20.5
24	6900	750	67.5	630	52.5	6.3	579.6	50.4	579.6	562.2	17.4
25	7200	840	75.6	705.6	58.8	7.1	649.2	56.4	649.2	629.7	19.5
26	7500	660	59.4	554.4	46.2	5.5	510.0	44.4	510.0	494.7	15.3
27	7800	730	65.7	613.2	51.1	6.1	564.1	49.1	564.1	547.2	16.9
28	8100	640	57.6	537.6	44.8	5.4	494.6	43.0	494.6	479.8	14.8
29	8400	650	58.5	546	45.5	5.5	502.3	43.7	502.3	487.3	15.1
30	8700	690	62.1	579.6	48.3	5.8	533.2	46.4	533.2	517.2	16.0
31	9000	710	63.9	596.4	49.7	6.0	548.7	47.7	548.7	532.2	16.5
32	9300	400	36	336	28	3.4	309.1	26.9	309.1	299.8	9.3
33	9600	620	55.8	520.8	43.4	5.2	479.1	41.7	479.1	464.8	14.4
34	9900	400	36	336	28	3.4	309.1	26.9	309.1	299.8	9.3
35	10200	580	52.2	487.2	40.6	4.9	448.2	39.0	448.2	434.8	13.4
36	10500	530	47.7	445.2	37.1	4.5	409.6	35.6	409.6	397.3	12.3
37	10800	500	45	420	35	4.2	386.4	33.6	386.4	374.8	11.6
38	11100	470	42.3	394.8	32.9	3.9	363.2	31.6	363.2	352.3	10.9
39	11400	530	47.7	445.2	37.1	4.5	409.6	35.6	409.6	397.3	12.3
40	11700	500	45	420	35	4.2	386.4	33.6	386.4	374.8	11.6
41	12000	450	40.5	378	31.5	3.8	347.8	30.2	347.8	337.3	10.4

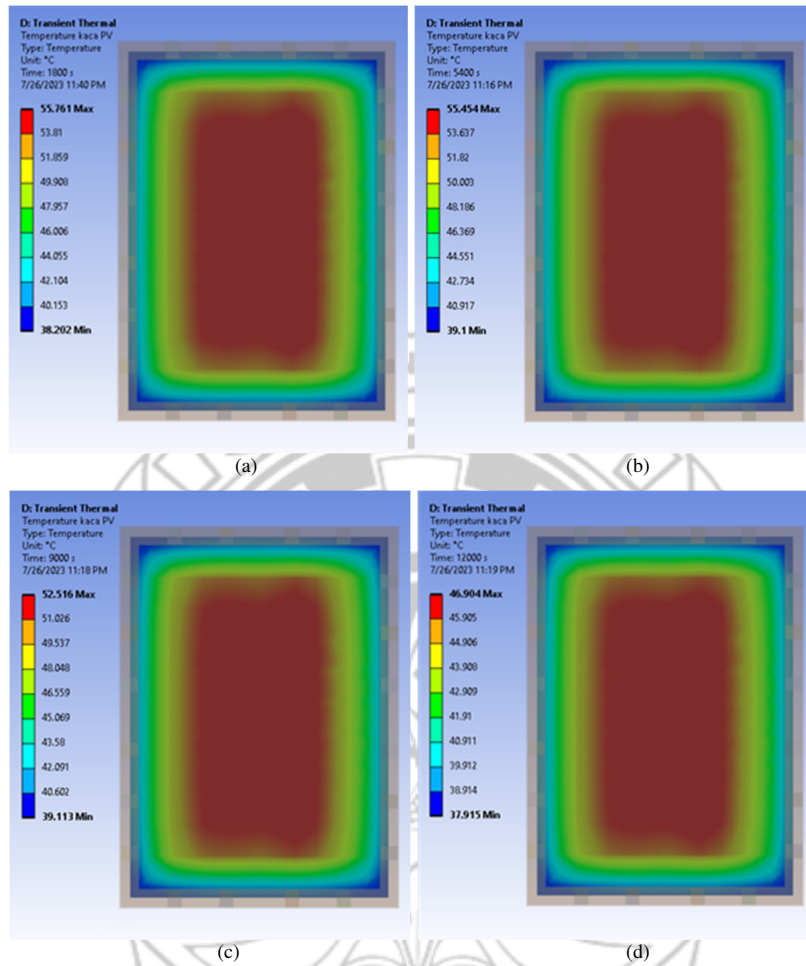
No.	Time (s)	Irradiance (W/m <sup>2</sup> )	Casing	
			$\alpha$	$\rho$
			0.95 (W/m <sup>2</sup> )	0.05 (W/m <sup>2</sup> )
1	0	810	769.5	40.5
2	300	820	779.0	41.0
3	600	825	783.8	41.3
4	900	410	389.5	20.5
5	1200	740	703.0	37.0
6	1500	925	878.8	46.3
7	1800	860	817.0	43.0
8	2100	845	802.8	42.3
9	2400	860	817.0	43.0
10	2700	860	817.0	43.0
11	3000	880	836.0	44.0
12	3300	860	817.0	43.0
13	3600	855	812.3	42.8
14	3900	935	888.3	46.8
15	4200	850	807.5	42.5
16	4500	840	798.0	42.0
17	4800	850	807.5	42.5
18	5100	910	864.5	45.5
19	5400	750	712.5	37.5

20	5700	780	741.0	39.0
21	6000	835	793.3	41.8
22	6300	825	783.8	41.3
23	6600	885	840.8	44.3
24	6900	750	712.5	37.5
25	7200	840	798.0	42.0
26	7500	660	627.0	33.0
27	7800	730	693.5	36.5
28	8100	640	608.0	32.0
29	8400	650	617.5	32.5
30	8700	690	655.5	34.5
31	9000	710	674.5	35.5
32	9300	400	380.0	20.0
33	9600	620	589.0	31.0
34	9900	400	380.0	20.0
35	10200	580	551.0	29.0
36	10500	530	503.5	26.5
37	10800	500	475.0	25.0
38	11100	470	446.5	23.5
39	11400	530	503.5	26.5
40	11700	500	475.0	25.0
41	12000	450	427.5	22.5

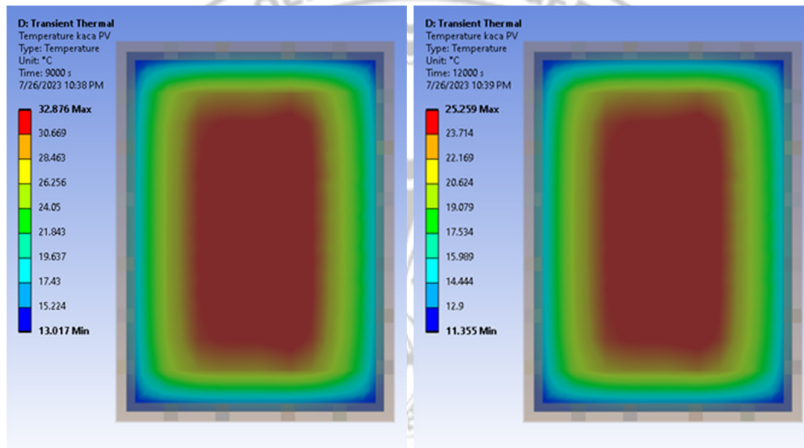
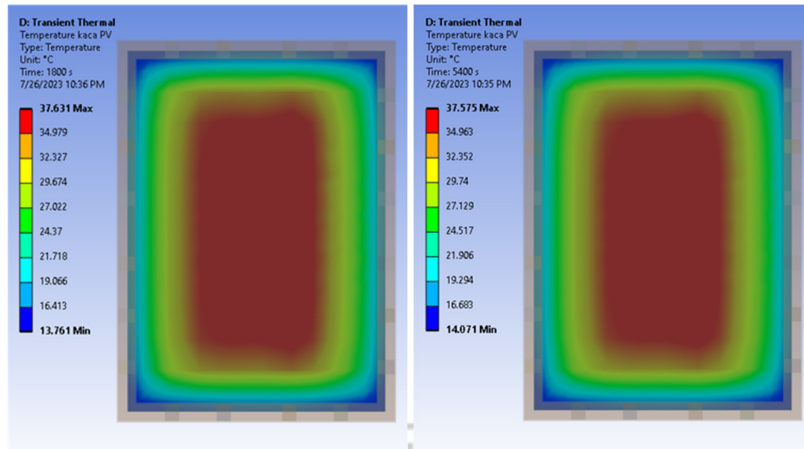
No.	Time (s)	PV cell		
		$\alpha$	to	to
		0.95 (W/m <sup>2</sup> )	Electric (W/m <sup>2</sup> )	Heat (W/m <sup>2</sup> )
1	0	607.2	42.3	564.9
2	300	614.7	41.6	573.1
3	600	618.4	15.7	602.7
4	900	307.3	39.1	268.2
5	1200	554.7	37.1	517.6
6	1500	693.4	37.5	655.9
7	1800	644.7	37.0	607.7
8	2100	633.4	35.7	597.7
9	2400	644.7	34.8	609.9
10	2700	644.7	33.8	610.9
11	3000	659.7	33.2	626.4
12	3300	644.7	32.8	611.9
13	3600	640.9	31.6	609.3
14	3900	700.9	32.0	668.9
15	4200	637.2	32.0	605.2
16	4500	629.7	31.7	597.9
17	4800	637.2	31.5	605.7
18	5100	682.2	31.3	650.8
19	5400	562.2	31.2	531.0

20	5700	584.7	31.0	553.7
21	6000	625.9	31.1	594.8
22	6300	618.4	31.2	587.3
23	6600	663.4	31.1	632.3
24	6900	562.2	31.2	531.0
25	7200	629.7	31.2	598.5
26	7500	494.7	31.3	463.4
27	7800	547.2	31.3	515.9
28	8100	479.8	31.5	448.2
29	8400	487.3	31.6	455.7
30	8700	517.2	32.2	485.0
31	9000	532.2	32.0	500.2
32	9300	299.8	32.0	267.8
33	9600	464.8	32.2	432.6
34	9900	299.8	32.3	267.5
35	10200	434.8	28.2	406.6
36	10500	397.3	34.1	363.2
37	10800	374.8	33.6	341.2
38	11100	352.3	33.4	318.9
39	11400	397.3	33.0	364.3
40	11700	374.8	33.1	341.7
41	12000	337.3	33.4	304.0

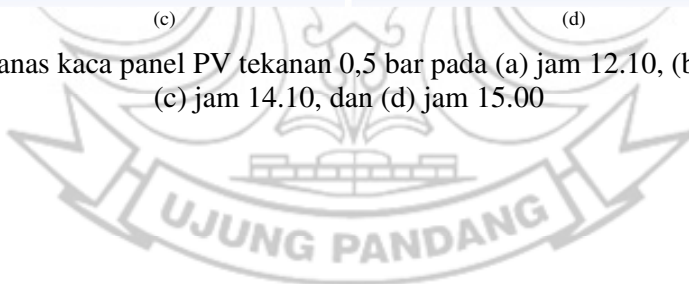
#### Lampiran 4 – Distribusi temperatur simulasi



Distribusi panas kaca panel PV tekanan 1 bar normal pada (a) jam 12.10, (b) jam 13.10, (c) jam 14.10, dan (d) jam 15.00



Distribusi panas kaca panel PV tekanan 0,5 bar pada (a) jam 12.10, (b) jam 13.10, (c) jam 14.10, dan (d) jam 15.00



### Lampiran 5 – Data temperatur simulasi

1 bar		0,9 bar		0,8 bar		0,7 bar		0,6 bar		0,5 bar		0,4 bar		0,3 bar		0,2 bar		0,1 bar	
Time (s)	Temp (°C)	Time (s)	Temp (°C)	Time (s)	Temp (°C)	Time (s)	Temp (°C)	Time (s)	Temp (°C)	Time (s)	Temp (°C)	Time (s)	Temp (°C)	Time (s)	Temp (°C)	Time (s)	Temp (°C)	Time (s)	Temp (°C)
120	40.26	120	34.397	120	32.707	120	31.002	120	29.441	120	28.143	120	27.055	120	26.492	120	26.281	120	26.456
189.05	45.258	168.64	36.477	160	33.966	160	31.828	160	29.86	160	28.139	160	26.746	160	26.015	160	25.733	160	25.949
258.1	48.9	217.28	38.222	200	35.04	200	32.562	200	30.242	200	28.166	200	26.497	200	25.61	200	25.257	200	25.504
354.07	52.487	317.28	40.808	298.74	37.063	293.05	33.877	282.97	30.904	259.23	28.226	286.06	26.143	293.58	24.945	301.88	24.389	309.09	24.63
461.44	55.576	428.96	42.946	397.49	38.657	401.41	35.131	381.56	31.628	353.34	28.465	385.43	25.997	401.05	24.561	419.71	23.863	429.09	24.129
581.44	58.285	548.96	44.658	517.49	40.155	521.41	36.29	501.56	32.391	446.78	28.726	505.43	26.084	521.05	24.466	539.71	23.684	549.09	23.971
701.44	57.409	668.96	45.037	637.49	40.805	641.41	36.694	621.56	32.875	540.23	29.073	625.43	26.009	641.05	24.035	659.71	22.91	669.09	23.054
774.41	55.61	769.33	44.206	757.49	39.821	761.41	35.484	741.56	31.708	660.23	28.785	745.43	24.424	761.05	22.127	733.61	21.851	735.94	22.049
846.97	52.936	811.66	43.7	797.49	39.349	801.94	34.919	781.56	31.157	719.25	28.226	791.63	23.641	818.26	20.928	783.29	20.898	789.56	20.922
919.53	50.079	853.98	43.046	837.49	38.715	842.46	34.218	821.56	30.47	751.31	27.836	837.82	22.655	875.47	19.482	832.96	19.699	843.17	19.542
1006.6	48.211	915.48	42.009	877.49	37.967	905.92	32.928	884.36	29.115	783.38	27.348	884.01	21.523	965.66	17.932	882.64	18.314	940.82	17.17
1098.1	47.429	976.98	41.551	945.88	37.062	969.37	32.259	959.87	28.093	838.44	26.235	969.65	20.237	1085.7	17.546	982.76	16.61	1060.8	16.044
1194.6	47.419	1074.4	41.685	1044.6	36.882	1065	32.216	1064.9	27.915	893.5	24.918	1084.9	20.001	1205.7	18.242	1102.8	16.216	1180.2	16.303
1306.3	47.796	1174.3	42.453	1143.4	37.411	1160.6	32.802	1169.9	28.523	974.84	23.864	1200.1	20.744	1325.7	19.282	1222.8	16.85	1299.6	17.123
1426.3	48.488	1274.1	43.426	1242.2	38.319	1256.2	33.71	1275	29.48	1071.3	23.62	1315.3	21.757	1445.7	20.624	1342.8	17.872	1418.9	18.358
1546.3	49.119	1374	44.485	1341	39.335	1368.9	34.924	1388.9	30.699	1167.7	24.121	1430.5	23.018	1565.7	21.737	1462.8	19.241	1538.3	19.646
1666.3	49.344	1494	45.847	1461	40.689	1481.7	36.249	1508.9	32.073	1247.5	24.793	1550.5	24.183	1685.7	22.325	1582.8	20.283	1658.3	20.387
1786.3	49.333	1614	46.546	1581	41.618	1601.7	37.098	1628.9	32.779	1327.3	25.58	1670.5	24.786	1805.7	22.546	1702.8	20.839	1778.3	20.749
1906.3	49.324	1734	46.824	1701	42.038	1721.7	37.463	1748.9	33.071	1447.3	26.964	1790.5	25.014	1925.7	22.682	1822.8	21.068	1898.3	20.951
2026.3	49.335	1854	46.895	1821	42.15	1841.7	37.58	1868.9	33.173	1567.3	28.046	1910.5	25.128	2045.7	22.736	1942.8	21.205	2018.3	21.076
2146.3	49.386	1974	46.912	1941	42.196	1961.7	37.627	1988.9	33.21	1687.3	28.574	2030.5	25.168	2165.7	22.791	2062.8	21.269	2138.3	21.166
2266.3	49.505	2094	46.89	2061	42.192	2081.7	37.629	2108.9	33.206	1807.3	28.765	2150.5	25.198	2285.7	22.891	2182.8	21.346	2258.3	21.294
2386.3	49.665	2214	46.928	2181	42.216	2201.7	37.675	2228.9	33.26	1927.3	28.86	2270.5	25.283	2405.7	23.02	2302.8	21.464	2378.3	21.455
2506.3	49.725	2334	47.009	2301	42.288	2321.7	37.762	2348.9	33.354	2047.3	28.891	2390.5	25.402	2525.7	23.124	2422.8	21.604	2498.3	21.595
2626.3	49.704	2454	47.096	2421	42.383	2441.7	37.859	2468.9	33.447	2167.3	28.934	2510.5	25.488	2588.7	23.168	2542.8	21.713	2618.3	21.707
2746.3	49.683	2574	47.159	2541	42.453	2561.7	37.923	2588.9	33.516	2287.3	29.016	2630.5	25.554	2638	23.197	2662.8	21.799	2738.3	21.819
2866.3	49.746	2694	47.205	2661	42.504	2681.7	37.973	2708.9	33.571	2407.3	29.127	2750.5	25.632	2687.4	23.225	2782.8	21.913	2858.3	21.978
2986.3	49.863	2814	47.294	2781	42.581	2801.7	38.06	2828.9	33.674	2527.3	29.21	2870.5	25.755	2736.7	23.258	2902.8	22.07	2978.3	22.175
3106.3	49.911	2934	47.416	2901	42.696	2921.7	38.186	2948.9	33.809	2647.3	29.271	2990.5	25.905	2821.6	23.34	3022.8	22.232	3098.3	22.277
3226.3	49.903	3054	47.504	3021	42.814	3035	38.291	3068.9	33.892	2767.3	29.353	3110.5	25.958	2941.6	23.496	3142.8	22.285	3218.3	22.292
3346.3	49.885	3174	47.506	3141	42.834	3148.4	38.304	3188.9	33.89	2887.3	29.475	3230.5	25.931	3061.6	23.609	3262.8	22.258	3338.3	22.257
3466.3	49.897	3294	47.452	3261	42.791	3268.4	38.259	3308.9	33.833	3007.3	29.616	3296.2	25.898	3181.6	23.623	3382.8	22.214	3458.3	22.225
3586.3	49.928	3414	47.412	3381	42.743	3388.4	38.213	3428.9	33.792	3127.3	29.651	3361.9	25.87	3301.6	23.568	3502.8	22.174	3578.3	22.197
3706.3	50.173	3534	47.385	3501	42.709	3508.4	38.178	3548.9	33.76	3247.3	29.616	3481.9	25.828	3421.6	23.531	3622.8	22.194	3698.3	22.415
3826.3	50.576	3654	47.474	3621	42.728	3628.4	38.208	3668.9	33.879	3367.3	29.563	3601.9	25.798	3541.6	23.499	3742.8	22.495	3818.3	22.84
3946.3	50.856	3774	47.767	3741	42.979	3748.4	38.471	3788.9	34.206	3487.3	29.522	3721.9	26.047	3661.6	23.604	3862.8	22.981	3938.3	23.268

4066.3	50.718	3894	48.19	3861	43.382	3868.4	38.888	3908.9	34.633	3607.3	29.506	3841.9	26.461	3781.6	23.944	3982.8	23.209	4058.3	23.286
4186.3	50.319	4014	48.233	3981	43.548	3988.4	39.034	4028.9	34.656	3727.3	29.745	3961.9	26.731	3901.6	24.453	4102.8	23.097	4178.3	23.013
4306.3	50.066	4134	48.016	4101	43.405	4108.4	38.877	4148.9	34.413	3847.3	30.159	4081.9	26.648	4021.6	24.522	4222.8	22.767	4298.3	22.724
4426.3	49.937	4254	47.723	4221	43.094	4228.4	38.563	4268.9	34.12	3967.3	30.398	4201.9	26.321	4141.6	24.301	4342.8	22.501	4418.3	22.469
4546.3	49.879	4374	47.51	4341	42.867	4348.4	38.332	4388.9	33.893	4087.3	30.298	4321.9	26.061	4261.6	23.986	4462.8	22.266	4538.3	22.263
4666.3	49.86	4494	47.344	4461	42.688	4468.4	38.147	4508.9	33.713	4207.3	29.974	4441.9	25.85	4381.6	23.73	4582.8	22.106	4658.3	22.141
4786.3	49.865	4614	47.268	4581	42.587	4588.4	38.039	4628.9	33.625	4327.3	29.726	4561.9	25.703	4501.6	23.512	4702.8	22.023	4778.3	22.084
4906.3	50.003	4734	47.249	4701	42.553	4708.4	38.001	4748.9	33.598	4447.3	29.523	4681.9	25.634	4621.6	23.39	4822.8	22.028	4898.3	22.216
5026.3	50.237	4854	47.336	4821	42.586	4828.4	38.042	4868.9	33.699	4567.3	29.39	4801.9	25.62	4741.6	23.337	4942.8	22.241	5018.3	22.528
5146.3	50.328	4974	47.573	4941	42.798	4948.4	38.255	4988.9	33.956	4687.3	29.331	4921.9	25.811	4861.6	23.413	5062.8	22.591	5138.3	22.725
5266.3	50.021	5094	47.903	5061	43.109	5068.4	38.585	5108.9	34.263	4807.3	29.332	5041.9	26.127	4981.6	23.668	5182.8	22.537	5258.3	22.319
5386.3	49.471	5214	47.671	5181	43.046	5188.4	38.483	5228.9	33.972	4927.3	29.521	5161.9	26.176	5101.6	24.035	5302.8	21.963	5378.3	21.459
5506.3	49.144	5334	47.057	5301	42.528	5308.4	37.934	5348.8	33.287	5047.3	29.843	5281.9	25.705	5221.6	23.76	5422.8	21.125	5498.3	20.82
5626.3	48.979	5454	46.464	5421	41.828	5422.7	37.258	5452	32.736	5167.3	29.859	5388.4	24.99	5331.6	23.145	5542.8	20.619	5618.3	20.418
5746.3	48.97	5574	46.178	5541	41.474	5537	36.897	5555.3	32.421	5287.3	29.373	5495	24.507	5441.6	22.452	5662.8	20.347	5738.3	20.246
5866.3	49.155	5694	46.077	5661	41.327	5657	36.731	5675.3	32.262	5391.7	28.676	5601.6	24.24	5561.6	22.016	5782.8	20.292	5858.3	20.29
5986.3	49.468	5814	46.162	5781	41.362	5777	36.752	5795.3	32.299	5496.2	28.237	5721.6	24.13	5681.6	21.793	5902.8	20.427	5978.3	20.51
6106.3	49.626	5934	46.378	5901	41.547	5897	36.928	5915.3	32.49	5616.2	27.98	5841.6	24.219	5801.6	21.788	6022.8	20.672	6098.3	20.679
6226.3	49.664	6054	46.591	6021	41.798	6017	37.184	6035.3	32.732	5736.2	27.913	5961.6	24.456	5921.6	21.968	6142.8	20.812	6218.3	20.77
6346.3	49.743	6174	46.695	6141	41.927	6137	37.318	6155.3	32.854	5856.2	28.031	6081.6	24.653	6041.6	22.198	6262.8	20.88	6338.3	20.881
6466.3	50.029	6294	46.732	6261	41.981	6257	37.376	6275.3	32.907	5976.2	28.287	6201.6	24.751	6161.6	22.318	6382.8	21.067	6458.3	21.177
6586.3	50.443	6414	46.927	6381	42.129	6377	37.522	6395.3	33.084	6096.2	28.466	6321.6	24.83	6281.6	22.371	6502.8	21.404	6578.3	21.61
6706.3	50.352	6534	47.231	6501	42.409	6497	37.804	6515.3	33.402	6216.2	28.552	6441.6	25.081	6401.6	22.573	6622.8	21.742	6698.3	21.594
6826.3	49.875	6654	47.347	6621	42.682	6617	38.092	6635.3	33.616	6336.2	28.647	6561.6	25.449	6521.6	22.915	6675.7	21.761	6818.3	21.124
6946.3	49.436	6774	47.028	6741	42.446	6737	37.874	6755.3	33.342	6456.2	28.904	6681.6	25.474	6641.6	23.146	6712.5	21.721	6938.3	20.544
7066.3	49.433	6894	46.428	6861	41.895	6857	37.317	6858	32.866	6576.2	29.281	6801.6	25.066	6761.6	22.853	6749.3	21.634	7058.3	20.433
7186.3	49.689	7013.1	46.288	6972.5	41.587	6960.3	36.991	6957.1	32.531	6696.2	29.225	6900	24.503	6857.4	22.388	6846.3	21.142	7178.3	20.647
7306.3	49.42	7132.2	46.452	7084.1	41.629	7063.6	36.976	7056.3	32.494	6816.2	28.766	6998.4	24.316	6953.1	22.02	6943.3	20.685	7298.3	20.348
7426.3	48.738	7252.2	46.478	7204.1	41.899	7183.6	37.232	7176.3	32.736	6914.8	28.273	7118.4	24.431	7073.1	21.984	7063.3	20.585	7418.3	19.474
7522.7	48.135	7372.2	45.957	7324.1	41.509	7303.6	36.961	7296.3	32.502	7013.4	28.126	7238.4	24.522	7193.1	22.247	7183.3	20.802	7538.3	18.46
7619	47.863	7475.1	45.24	7418.5	40.941	7410.3	36.34	7402.9	31.894	7133.4	28.276	7358.4	24.001	7313.1	21.888	7303.3	20.474	7658.3	17.95
7739	47.825	7570.4	44.797	7510.5	40.259	7500	35.617	7492.4	31.171	7253.4	28.283	7446.6	23.356	7403.9	21.308	7414.4	19.71	7778.3	17.777
7859	47.793	7665.7	44.625	7602.4	39.916	7589.7	35.245	7582	30.742	7373.4	27.697	7534.8	22.716	7494.7	20.501	7525.4	18.757	7898.3	17.429
7979	47.582	7785.7	44.681	7722.4	39.82	7709.7	35.107	7702	30.569	7459.5	27.072	7654.8	22.335	7614.7	19.921	7636.5	18.266	8018.3	16.842
8099	47.268	7905.7	44.499	7842.4	39.787	7829.7	35.102	7822	30.564	7545.6	26.522	7774.8	22.288	7734.7	19.722	7756.5	18.081	8138.3	16.194
8219	47.002	8025.7	44.126	7962.4	39.495	7949.7	34.823	7942	30.281	7665.6	26.204	7894.8	22.059	7854.7	19.556	7876.5	17.83	8258.3	15.751
8339	46.755	8145.7	43.738	8082.4	39.042	8056.8	34.425	8042	29.907	7785.6	26.201	8014.8	21.626	7974.7	19.147	7996.5	17.342	8378.3	15.425
8459	46.664	8265.7	43.516	8190.6	38.755	8153.4	34.098	8137.1	29.546	7905.6	25.962	8130.4	21.131	8094.7	18.552	8116.5	16.736	8498.3	15.321
8579	46.824	8385.7	43.393	8298.7	38.578	8250.1	33.884	8232.2	29.312	8011.9	25.591	8245.9	20.826	8214.7	18.159	8236.5	16.319	8618.3	15.408
8699	47.151	8505.7	43.447	8418.7	38.49	8368.3	33.736	8349.2	29.133	8117.6	25.139	8365.9	20.614	8334.7	17.879	8356.5	16.019	8738.3	15.626
8819	47.466	8625.7	43.643	8538.7	38.585	8483.2	33.747	8466.3	29.105	8223.3	24.851	8485.9	20.583	8454.7	17.766	8476.5	15.91	8858.3	15.863
8939	47.782	8745.7	43.894	8658.7	38.809	8598.1	33.903	8586.3	29.244	8343.3	24.645	8605.9	20.727	8574.7	17.855	8596.5	16	8978.3	16.131
9059	47.585	8865.7	44.111	8778.7	39.048	8711.1	34.151	8678.4	29.43	8463.3	24.596	8725.9	20.978	8694.7	18.095	8716.5	16.232	9098.3	15.454

9179	46.53	8985.7	44.318	8898.7	39.269	8824.1	34.376	8770.5	29.623	8583.3	24.722	8845.9	21.217	8814.7	18.333	8836.5	16.465	9185	14.445
9249.8	45.702	9105.7	43.648	9018.7	39.325	8937.1	34.583	8862.6	29.801	8681.7	24.921	8965.9	21.459	8934.7	18.578	8956.5	16.711	9271.8	12.995
9320.6	44.895	9171.3	43.037	9138.7	38.412	9057.1	34.316	8982.6	30.029	8780.1	25.122	9085.9	20.933	9054.7	18.331	9076.5	16.257	9358.6	11.943
9409.3	44.542	9237	42.233	9208.2	37.641	9177.1	33.173	9102.6	29.352	8900.1	25.366	9155.7	20.298	9129.4	17.757	9151.7	15.549	9478.6	11.579
9497.9	44.613	9302.6	41.307	9277.6	36.682	9256.9	32.128	9168.4	28.726	9020.1	25.418	9225.5	19.393	9204	16.851	9226.9	14.525	9598.6	12.032
9586.5	44.985	9368.2	40.85	9367.4	35.974	9336.7	31.251	9234.3	27.88	9140.1	24.457	9295.3	18.279	9312.1	15.174	9346.9	12.945	9664.7	11.97
9645.6	45.087	9463	40.821	9457.2	35.87	9416.5	30.949	9300.2	26.868	9217.2	23.523	9408.1	17.615	9420.1	14.579	9466.9	12.547	9701.2	11.852
9704.7	45.023	9557.7	41.227	9547	36.191	9496.3	31.04	9398.8	26.32	9294.2	22.344	9526.3	17.782	9537	14.77	9554.9	12.72	9737.7	11.659
9733.3	44.958	9613.6	41.497	9593	36.451	9576.1	31.438	9495.3	26.375	9398.6	21.719	9644.5	18.048	9654	14.939	9643	12.851	9774.2	11.399
9762	44.863	9669.4	41.524	9639.1	36.563	9638.1	31.617	9591.8	26.872	9512.4	21.846	9762.7	17.531	9774	14.325	9763	12.226	9883.7	10.138
9810.8	44.638	9725.3	41.375	9714.8	36.402	9700.1	31.538	9657.3	26.939	9626.2	22.26	9834.1	16.993	9859.6	13.576	9854.4	11.384	9993.2	9.5705
9871.7	44.283	9781.2	41.081	9740.3	36.309	9762.1	31.264	9685.6	26.913	9707.5	22.11	9905.5	16.327	9945.3	12.998	9945.9	10.703	10113	9.7315
9932.7	44.03	9837	40.679	9765.8	36.187	9816.6	30.902	9713.9	26.84	9734.8	22.015	10020	16.149	10065	13.037	10066	10.68	10233	10.256
10036	44.1	9914.2	40.077	9823.8	35.784	9871.2	30.44	9743	26.719	9762.1	21.883	10081	16.247	10185	13.675	10186	11.284	10353	10.421
10139	44.485	10007	39.949	9881.8	35.275	9958.4	30.015	9794.9	26.39	9828.2	21.386	10142	16.511	10278	13.989	10281	11.587	10473	10.338
10201	44.799	10048	39.985	9932.4	34.952	10076	30.181	9846.7	25.966	9894.4	20.748	10203	16.895	10370	14.102	10376	11.685	10593	10.149
10262	44.959	10090	40.102	9982.9	34.822	10193	30.84	9935.9	25.339	9997.5	20.465	10300	17.191	10490	14.009	10496	11.574	10713	9.8999
10382	44.96	10135	40.308	10043	34.862	10271	31.097	10023	25.234	10086	20.624	10420	17.255	10610	13.839	10616	11.389	10833	9.6107
10502	44.769	10202	40.733	10103	35.062	10349	31.201	10056	25.251	10174	21.089	10540	17.144	10730	13.619	10736	11.151	10953	9.2888
10612	44.636	10269	40.975	10152	35.314	10430	31.19	10089	25.324	10253	21.428	10660	16.97	10850	13.366	10856	10.879	11073	8.9379
10721	44.537	10384	41.083	10201	35.638	10510	31.089	10122	25.447	10333	21.589	10780	16.755	10970	13.09	10976	10.578	11193	8.8087
10841	44.414	10498	40.985	10250	35.85	10544	31.043	10177	25.765	10453	21.568	10900	16.514	11090	12.791	11096	10.253	11313	8.9175
10961	44.209	10612	40.847	10357	36.021	10563	31.017	10233	26.049	10573	21.427	11020	16.251	11210	12.752	11216	10.205	11412	9.1159
11081	43.958	10726	40.677	10446	36.015	10581	30.99	10333	26.262	10693	21.233	11140	16.068	11330	12.92	11336	10.373	11511	9.1991
11187	43.977	10840	40.491	10479	35.994	10608	30.95	10440	26.273	10813	21.012	11260	16.134	11425	13.109	11439	10.557	11631	9.1766
11293	44.217	10960	40.281	10513	35.96	10652	30.878	10547	26.163	10933	20.77	11334	16.252	11521	13.186	11542	10.621	11751	9.0246
11386	44.557	11067	40.082	10579	35.878	10742	30.719	10631	26.048	11053	20.512	11407	16.418	11641	13.162	11662	10.579	11871	8.7263
11479	44.743	11171	40.028	10656	35.762	10838	30.541	10715	25.915	11173	20.414	11481	16.506	11761	13.012	11782	10.398	11936	8.5271
11599	44.791	11275	40.132	10729	35.647	10945	30.33	10815	25.734	11293	20.538	11601	16.515	11881	12.731	11902	10.086	12000	8.2957
11719	44.69	11335	40.239	10802	35.523	11047	30.124	10925	25.521	11352	20.646	11721	16.416	12000	12.359	12000	9.763		
11839	44.341	11395	40.38	10895	35.354	11150	30.01	11036	25.294	11410	20.774	11841	16.179						
11922	44.019	11485	40.479	10989	35.178	11261	30.088	11147	25.161	11507	20.861	11950	15.882						
12000	43.664	11605	40.481	11087	34.986	11298	30.136	11267	25.243	11627	20.846	12000	15.728						
		11725	40.381	11185	34.958	11335	30.201	11307	25.298	11747	20.717								
		11832	40.194	11218	34.968	11395	30.345	11347	25.373	11850	20.507								
		11901	40.043	11251	34.995	11455	30.437	11416	25.521	11945	20.256								
		11969	39.869	11285	35.039	11526	30.485	11503	25.603	12000	20.092								
		12000	39.785	11352	35.175	11550	30.494	11588	25.616										
				11426	35.328	11562	30.498	11616	25.613										
				11527	35.405	11574	30.499	11644	25.604										
				11629	35.394	11602	30.497	11656	25.599										
				11731	35.303	11660	30.467	11668	25.593										
				11793	35.208	11774	30.299	11704	25.564										



		11849	35.098	11842	30.166	11778	25.45					
		11904	34.969	11911	30	11839	25.329					
		11952	34.846	11955	29.876	11899	25.183					
		12000	34.712	12000	29.742	11949	25.047					
						12000	24.9					



## Lampiran 6 – Data listrik simulasi

Beban 10W 21,8V

Time (s)	Daya (W)								
	1 bar	0.9 bar	0.8 bar	0.7 bar	0.6 bar	0.5 bar	0.4 bar	0.3 bar	0.2 bar
0	9.33	9.25	9.27	9.30	9.32	9.32	9.33	9.34	9.34
300	8.14	8.74	8.94	9.13	9.31	9.48	9.62	9.70	9.73
600	7.70	8.48	8.73	8.98	9.21	9.45	9.64	9.75	9.81
900	7.52	8.03	8.31	8.59	8.84	9.10	9.33	9.47	9.54
1200	8.23	8.51	8.80	9.09	9.37	9.65	9.88	10.04	10.14
1500	8.33	8.51	8.80	9.09	9.36	9.64	9.88	10.05	10.15
1800	8.24	8.39	8.67	8.95	9.23	9.50	9.73	9.89	9.99
2100	8.23	8.37	8.65	8.93	9.21	9.47	9.71	9.86	9.96
2400	8.22	8.38	8.66	8.94	9.21	9.48	9.71	9.86	9.95
2700	8.22	8.37	8.65	8.93	9.20	9.46	9.70	9.85	9.94
3000	8.23	8.37	8.65	8.93	9.20	9.46	9.70	9.85	9.93
3300	8.21	8.35	8.63	8.91	9.18	9.45	9.68	9.83	9.91
3600	8.20	8.35	8.63	8.91	9.18	9.45	9.68	9.82	9.91
3900	8.23	8.38	8.66	8.94	9.20	9.47	9.71	9.84	9.93
4200	8.18	8.32	8.60	8.88	9.14	9.41	9.64	9.78	9.86
4500	8.19	8.34	8.62	8.90	9.17	9.43	9.67	9.81	9.89
4800	8.20	8.35	8.64	8.91	9.18	9.45	9.69	9.83	9.92
5100	8.23	8.38	8.66	8.94	9.20	9.48	9.71	9.85	9.94
5400	8.12	8.28	8.57	8.85	9.12	9.39	9.62	9.77	9.86
5700	8.18	8.35	8.64	8.92	9.20	9.47	9.71	9.86	9.95
6000	8.21	8.39	8.67	8.95	9.23	9.50	9.74	9.90	9.99
6300	8.19	8.36	8.64	8.92	9.20	9.47	9.71	9.87	9.96
6600	8.20	8.39	8.67	8.95	9.22	9.49	9.73	9.88	9.97
6900	8.11	8.30	8.58	8.86	9.13	9.41	9.65	9.80	9.88
7200	8.20	8.39	8.67	8.95	9.23	9.51	9.75	9.89	9.99
7500	8.08	8.27	8.56	8.85	9.12	9.39	9.64	9.80	9.90
7800	8.20	8.38	8.68	8.96	9.25	9.52	9.77	9.94	10.05
8100	8.12	8.32	8.61	8.90	9.19	9.47	9.72	9.90	10.01
8400	8.16	8.36	8.66	8.95	9.24	9.52	9.78	9.96	10.08
8700	8.19	8.39	8.68	8.98	9.27	9.55	9.81	9.99	10.11
9000	8.18	8.39	8.68	8.98	9.26	9.55	9.81	9.99	10.12
9300	7.84	8.06	8.35	8.65	8.95	9.24	9.50	9.68	9.80
9600	8.22	8.44	8.74	9.05	9.34	9.64	9.91	10.11	10.25
9900	7.89	8.13	8.44	8.73	9.03	9.34	9.62	9.82	9.97
10200	8.18	8.42	8.73	9.03	9.34	9.64	9.92	10.13	10.28
10500	8.10	8.33	8.63	8.94	9.24	9.54	9.82	10.03	10.19
10800	8.07	8.31	8.61	8.91	9.22	9.52	9.80	10.01	10.17
11100	8.05	8.28	8.59	8.89	9.20	9.50	9.78	10.00	10.17
11400	8.11	8.37	8.68	8.98	9.29	9.59	9.87	10.09	10.26
11700	8.06	8.31	8.62	8.93	9.23	9.54	9.82	10.04	10.21
12000	8.03	8.26	8.57	8.88	9.18	9.49	9.77	9.99	10.16

Beban 20W 21,8V

Time (s)	Daya (W)								
	1 bar	0.9 bar	0.8 bar	0.7 bar	0.6 bar	0.5 bar	0.4 bar	0.3 bar	0.2 bar
0	17.87	17.72	17.76	17.81	17.85	17.86	17.88	17.88	17.88
300	12.11	17.20	17.60	17.98	18.33	18.67	18.94	19.09	19.16
600	11.45	16.68	17.18	17.67	18.13	18.61	18.97	19.20	19.31
900	11.13	15.61	16.15	16.70	17.20	17.70	18.14	18.42	18.55
1200	12.24	16.73	17.30	17.88	18.42	18.97	19.43	19.75	19.94
1500	12.40	16.76	17.35	17.90	18.44	19.00	19.47	19.80	20.00
1800	12.27	16.52	17.08	17.63	18.17	18.70	19.17	19.48	19.68
2100	12.24	16.48	17.04	17.58	18.12	18.65	19.12	19.42	19.61
2400	12.24	16.49	17.05	17.59	18.13	18.66	19.12	19.42	19.61
2700	12.24	16.48	17.03	17.57	18.11	18.64	19.10	19.40	19.57
3000	12.25	16.49	17.04	17.58	18.12	18.64	19.10	19.40	19.57
3300	12.22	16.45	17.00	17.54	18.08	18.60	19.06	19.35	19.52
3600	12.21	16.44	17.00	17.54	18.07	18.60	19.06	19.34	19.52
3900	12.25	16.51	17.07	17.61	18.14	18.67	19.13	19.40	19.57
4200	12.17	16.38	16.93	17.47	18.00	18.53	18.99	19.26	19.43
4500	12.19	16.42	16.97	17.51	18.05	18.57	19.03	19.32	19.48
4800	12.21	16.45	17.00	17.55	18.08	18.61	19.07	19.36	19.53
5100	12.26	16.50	17.07	17.61	18.13	18.67	19.13	19.40	19.58
5400	12.08	16.28	16.85	17.39	17.92	18.46	18.92	19.20	19.39
5700	12.17	16.43	16.99	17.54	18.09	18.62	19.10	19.40	19.58
6000	12.22	16.51	17.07	17.62	18.17	18.70	19.18	19.48	19.67
6300	12.18	16.46	17.01	17.56	18.11	18.64	19.12	19.42	19.61
6600	12.21	16.52	17.07	17.62	18.17	18.69	19.17	19.47	19.65
6900	12.07	16.32	16.87	17.42	17.96	18.50	18.98	19.27	19.44
7200	12.21	16.52	17.06	17.63	18.18	18.72	19.19	19.48	19.67
7500	12.01	16.23	16.80	17.37	17.91	18.44	18.93	19.24	19.43
7800	12.19	16.48	17.05	17.62	18.17	18.72	19.21	19.54	19.75
8100	12.06	16.32	16.90	17.47	18.03	18.58	19.08	19.43	19.65
8400	12.13	16.41	16.99	17.56	18.13	18.69	19.19	19.55	19.78
8700	12.17	16.47	17.06	17.63	18.20	18.76	19.27	19.63	19.87
9000	12.16	16.47	17.06	17.65	18.20	18.76	19.28	19.64	19.88
9300	11.59	15.67	16.24	16.81	17.39	17.96	18.46	18.83	19.05
9600	12.22	16.55	17.14	17.74	18.31	18.90	19.44	19.83	20.10
9900	11.68	15.80	16.39	16.98	17.55	18.15	18.70	19.09	19.38
10200	12.15	16.50	17.11	17.69	18.31	18.89	19.44	19.85	20.16
10500	12.02	16.30	16.89	17.48	18.08	18.67	19.22	19.62	19.94
10800	11.97	16.23	16.83	17.42	18.02	18.61	19.15	19.57	19.89
11100	11.93	16.16	16.76	17.36	17.95	18.54	19.09	19.52	19.85
11400	12.04	16.37	16.98	17.57	18.17	18.76	19.32	19.74	20.08
11700	11.95	16.25	16.85	17.45	18.04	18.64	19.19	19.62	19.95
12000	11.89	16.10	16.70	17.30	17.90	18.50	19.05	19.48	19.81