

**PENGARUH POSISI *HEAT SINK MICROCHANNEL* TERHADAP EFISIENSI PADA  
PANEL SURYA DENGAN VARIASI SUDUT DAN *THERMOELECTRIC COOLER*  
MENGUNAKAN METODE CFD**

**(Skripsi)**

**Oleh:**

**SANGKOT SAHAT TUA LUBIS**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG**

**2022**

**PENGARUH POSISI *HEAT SINK MICROCHANNEL* TERHADAP EFISIENSI PADA  
PANEL SURYA DENGAN VARIASI SUDUT DAN *THERMOELECTRIC COOLER*  
MENGUNAKAN METODE CFD**

**Oleh**

**SANGKOT SAHAT TUA LUBIS**

**Skripsi**

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar  
SARJANA TEKNIK**

**Pada**

**Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2022**

## ABSTRAK

# PENGARUH POSISI *HEAT SINK MICROCHANNEL* TERHADAP EFISIENSI PADA PANEL SURYA DENGAN VARIASI SUDUT DAN *THERMOELECTRIC COOLER* MENGGUNAKAN METODE CFD

Oleh

Sangkot Sahat Tua Lubis

Salah satu energi terbarukan yang memiliki potensi paling besar adalah energi matahari. Porsi yang melimpah dan bersifat kontinu membuat energi matahari menjadi salah satu pilihan energi untuk masa depan. Untuk memanfaatkan energi matahari tersebut maka dibutuhkan sebuah alat yang kita kenal dengan panel surya atau *PV cell*. Panel surya memanfaatkan gelombang elektromagnetik yang di pancarkan oleh matahari, dan kemudian merubahnya menjadi energi listrik. Efek fotovoltaik merupakan proses dimana terjadinya perubahan energi foton yang dipancarkan oleh matahari melalui sinarnya menjadi energi listrik. Rendahnya efisiensi pada panel surya masih menjadi kendala hingga saat ini. Pada saat ini efisiensi panel surya hanya berkisar 15%-20%, dan akan terus menurun apabila temperatur kerja panel surya melebihi 25°C. Kenaikan temperatur yang terjadi dapat menurunkan efisiensi daya keluaran panel surya sebesar 0,5% disetiap kenaikan temperatur 1°C. Oleh karena itu dibutuhkan suatu sistem yang dapat menjaga temperatur panel surya pada temperatur optimalnya yaitu pada 25°C. Terdapat beberapa cara untuk menjaga temperatur kerja dari panel surya, salah satunya adalah dengan menggunakan sebuah pelat aluminium, *heat sink microchannel*, dan *thermos electric cooler* yang disusun secara berdampingan seperti yang digunakan pada penelitian kali ini. Penelitian dilakukan dengan menggunakan metode CFD dengan bantuan *software* Ansys. Pada penelitian ini dilakukan variasi sudut arah aliran fluida dengan pola susunan *heat sink* yaitu pada kemiringan 0° dan 10°. Setelah itu variasi terbaik akan digabungkan dengan menambahkan TEC. Pada variasi sudut 0° terjadi penurunan temperatur sebesar 15,425°C sedangkan pada variasi sudut 10° terjadi penurunan temperatur sebesar 15,967°C. Saat digabungkan dengan TEC, temperatur sisi dingin TEC adalah 42,65°C dan temperatur sisi panas TEC adalah 45,94°C.

Kata Kunci: Energi Terbarukan, Energi Matahari, *Heat Sink Mircochannel*, *Thermo-Electric Cooler*, *PV Cell*, *Ansys Fluid Flow Fluent*, *CFD*.

## **ABSTRACT**

### **THE EFFECT OF HEAT SINK MICROCHANNEL POSITION ON THE EFFICIENCY OF SOLAR PANELS WITH VARIATIONS OF ANGLE AND THERMOELECTRIC COOLER USING CFD METHOD**

By

Sangkot Sahat Tua Lubis

*One of the renewable energy that has the greatest potential is solar energy. Its abundant and continuous supply makes solar energy one of the energy choices for the future. To utilize solar energy, we need a tool that we know as solar panels or PV cells. Solar panels utilize electromagnetic waves emitted by the sun, and then convert them into electrical energy. The photovoltaic effect is a process in which the energy of photons emitted by the sun is converted into electrical energy. The low efficiency of solar panels is still an obstacle to date. At this time, the efficiency of solar panels is only around 15%-20%, and will continue to decrease if the working temperature of the solar panels exceeds 25°C. The increase in temperature that occurs can reduce the efficiency of the solar panel output power by 0.5% for every 1°C increase in temperature. Therefore we need a system that can maintain the temperature of the solar panel at its optimal temperature of 25°C. There are several ways to maintain the working temperature of solar panels, one of which is by using an aluminum plate, microchannel heat sink, and electric cooler thermos which are arranged side by side as used in this study. The research was conducted using the CFD method with the help of Ansys software. In this study, variations of the angle of the fluid flow direction with the pattern of the heat sink arrangement were carried out, namely at a slope of 0° and 10°. After that the best variations will be combined by adding TEC. At 0° angle variation there is a decrease in temperature of 15.425°C while at 10° angle variation there is a decrease in temperature of 15.967°C. When combined with TEC, the cold side temperature of TEC is 42.65°C and the hot side temperature of TEC is 45.94°C.*

*Keywords: Renewable Energy, Solar Energy, Heat Sink Microchannel, Thermo-Electric Cooler, PV Cell, Ansys Fluid Flow Fluent, CFD.*

Judul Skripsi : **PENGARUH POSISI *HEAT SINK*  
*MICROCHANNEL* TERHADAP  
EFISIENSI PADA PANEL SURYA  
DENGAN VARIASI SUDUT DAN  
*THERMOELECTRIC* *COOLER*  
MENGUNAKAN METODE CFD**

Mahasiswa : Sangkot Sahat Tua Lubis

Nomor Pokok Mahasiswa : 1855021007

Fakultas : Teknik



Amrizal, S.T., M.T., Ph.D.

NIP 19700202 199803 1 004

Ahmad Yonanda, S.T., M.T.

NIP 19930110 201903 1 008

**MENGETAHUI**

Ketua Jurusan

Teknik Mesin

Ketua Program Studi

S1 Teknik Mesin

A large, stylized black ink signature of Dr. Amrul, S.T., M.T.

Dr. Amrul, S.T., M.T.

NIP 19710331 199903 1 003

A large, stylized black ink signature of Novri Tanti, S.T., M.T.

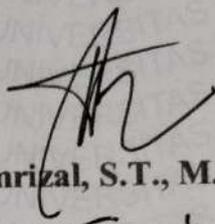
Novri Tanti, S.T., M.T.

NIP 19701104 199703 2 001

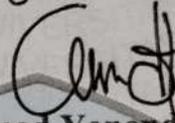
**MENGESAHKAN**

1. Tim Penguji

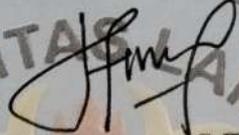
Ketua

  
: Amrizal, S.T., M.T., Ph.D.

Anggota Penguji

  
: Ahmad Yonanda, S.T., M.T.

Penguji Utama

  
: Dr. Harmen, S.T., M.T.

2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., 

NIP. 197509282001121002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 13 Agustus 2022

## LEMBAR PERNYATAAN

TUGAS AKHIR INI DIBUAT SENDIRI OLEH PENULIS DAN BUKAN HASIL  
PLAGIAT SEBAGAIMANA DIATUR DALAM PASAL 36 PERATURAN  
AKADEMIK UNIVERSITAS LAMPUNG DENGAN PERATURAN REKTOR  
NO. 13 TAHUN 2019.

Bandar Lampung, 11 September 2022

Pembuat Pernyataan



**Sangkot Sahat Tua Lubis**

NPM. 1855021007

## **HALAMAN MOTO**

“Bebek berjalan berbondong-bondong, akan tetapi burung elang terbang  
sendirian”

**-Ir. Soekarno**

## **HALAMAN PERSEMBAHAN**

Tugas akhir ini saya persembahkan untuk Ayahanda tersayang Hazairin Lubis  
dan Ibunda tercinta Goryati Kesturi Siagian

**In Loving Memory of My Beloved Mother**

**Goryati Kesturi Siagian**

9 Oktober 1971 – 5 Juli 2022

“Hey look Ma, I made it”

## SAWACANA

### *Assalamu'alaikum Warahmatullohi Wabarokatuh*

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas rahmat dan karunia yang telah memberikan nikmat hidup dan rezeki sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi dengan lancar dan dalam keadaan sehat. Shalawat dan salam semoga selalu tercurah kepada Rasulullah Muhammad SAW, para sahabat, keluarga serta pengikutnya yang tetap istiqomah hingga akhir zaman. Penulisan skripsi yang berjudul “Pengaruh Posisi *Heat Sink Microchannel* Terhadap Efisiensi Pada Panel Surya Dengan Variasi Sudut Dan *Thermoelectric Cooler* Menggunakan Metode CFD” merupakan syarat bagi penulis untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Penulis sangat berharap karya yang merupakan wujud kerja dan pemikiran maksimal dapat bermanfaat dalam kehidupan sehari-hari khususnya pada bidang itu sendiri. Skripsi ini dapat terselesaikan karena dukungan dan keterlibatan berbagai pihak, oleh karena itu penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih kepada:

1. Orang tua penulis, Ayahanda Hazairin Lubis dan Ibunda Goryati Kesturi Siagian yang selalu mendampingi, mendidik, mendoakan, mendukung, dan memberikan restu penulis agar tetap bersemangat dalam menjalankan serta menyelesaikan studi di Teknik Mesin.
2. Asnawi Lubis, S.T., M.Sc., Ph.D., sebagai dosen dan Uda atau paman yang selalu ada untuk membantu semua masalah baik di dalam proses perkuliahan dan di luar perkuliahan.
3. Saleh Lubis, S.E., sebagai Uda atau paman yang selalu membantu dan mendukung secara materi maupun moril bagi penulis selama menjalankan kuliah.

4. Muhammad Amin Nasution, sebagai abang yang selalu memberikan solusi dan ketenangan apabila keraguan datang, dan telah menunjukkan jalan untuk melanjutkan studi penulis.
5. Dr. Amrul, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
6. Novri Tanti, S.T., M.T., selaku Ketua Prodi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
7. Dr. Jamiatul Akmal, S.T., M.T. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
8. Amrizal, S.T., M.T., Ph.D selaku Dosen Pembimbing I yang telah membimbing selama proses pengerjaan skripsi ini.
9. Ahmad Yonanda, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing II yang telah membimbing selama proses pengerjaan skripsi ini
10. Dr. Harmen, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji yang telah bersedia mengoreksiserta meluruskan penulis dalam penyusunan skripsi ini.
11. Seluruh Dosen di Teknik Mesin Universitas Lampung yang telah menjadi gurudan mengajarkan dasar pengetahuan yang dibutuhkan kepada penulis.
12. Seluruh staff dan karyawan di Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung
13. Seluruh saudara-saudara yang tidak dapat disebutkan satu persatu.
14. Reza Annisa Ainnayah wanita pendampingku yang selalu ada untuk membantumenyelesaikan skripsi.
15. Teman angkatan 2018 Teknik Mesin yang telah memberikan informasi-informasi terkait penyelesaian skripsi.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan yang terdapat pada skripsi ini, oleh karena itu penulis sangat mengharapkan saran dan kritik dari semua pihak yang bersifat membangun dalam rangka penyempurnaan skripsi ini. Besar harapannya agar skripsi ini dapat bermanfaat bagi para pembaca. Aamiin

***Wassalamu 'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh***

## RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Kota Batam, Provinsi Kepulauan Riau pada 19 Februari 2000 sebagai anak tunggal dari pasangan Bapak Hazairin Lubis dan Ibu Goryati Kesturi Siagian. Penulis menempuh pendidikan dasar di SDN 003 LUBUK BAJA hingga tahun 2012, lalu dilanjutkan di SMPN 3 KOTA BATAM yang diselesaikan pada tahun 2015 dan SMAN 1 BATAM yang diselesaikan tahun 2018. Pada tahun 2018, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Mesin di Universitas Lampung melalui Seleksi Mandiri Masuk Perguruan Tinggi Wilayah Barat (SMMPTN-Barat).

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam Himpunan Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai Kepala Bidang Organisasi dan Kepemimpinan (Orgapin). Selain aktif dalam HIMATEM, penulis pernah menjadi bagian panitia kegiatan-kegiatan pada Jurusan Teknik Mesin.

Penulis pernah melakukan Kerja Praktik (KP) di PLTU unit Tarahan, Lampung Selatan pada Januari 2022 dengan judul laporan “**ANALISIS PERFORMA KOPLING FLUIDA PADA *BUCKET ELEVATOR B-15* PLTU TARAHAN**”.

Tahun 2022 penulis melakukan penelitian dengan tema panel surya dengan judul penelitian “**PENGARUH POSISI *HEAT SINK MICROCHANNEL* TERHADAP EFISIENSI PADA PANEL SURYA DENGAN VARIASI SUDUT DAN *THERMOELECTRIC COOLER* MENGGUNAKAN METODE CFD**” dibawah bimbingan Amrizal, S.T., M.T dan Ahmad Yonanda, S.T., M.T

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>iii</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>xiv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xix</b>
<b>I. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Tujuan Penelitian .....	4
1.3 Batasan Masalah .....	4
1.4 Kerangka Pemikiran .....	5
1.5 Hipotesis .....	5
1.6 Sistematika Penulisan.....	6
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>7</b>
2.1 Energi Matahari .....	7
2.2 Sejarah Sel Surya .....	8
2.3 <i>Photovoltaic Cell</i> (Sel Surya) .....	9
2.4 Proses Konversi Sel Surya.....	12
2.5 Semikonduktor .....	16
2.6 Jenis-Jenis Sel Surya .....	17
2.6.1 Monokristalin .....	17
2.6.2 Polikristalin .....	17
2.6.3 Amorf .....	18

2.6.4 Lapisan Tipis ( <i>Thin Films</i> ) .....	19
2.7 Faktor Pengoperasian Panel Surya .....	20
2.7.1 <i>Ambient Air Temperature</i> .....	20
2.7.2 Radiasi solar matahari ( <i>insolation</i> ) .....	21
2.7.3 Kecepatan angin bertiup .....	21
2.7.4 Keadaan atmosfer bumi .....	21
2.7.5 Orientasi panel atau <i>PV array</i> .....	21
2.8 Efisiensi Sel Surya .....	21
2.9 Sirip Pada Sel Surya .....	23
2.10 TEC ( <i>Thermo-Electric Cooler</i> ) .....	24
2.11 Efek Peltier .....	25
2.12 Prinsip Kerja <i>Thermo-Electric Cooler</i> .....	26
2.13 Perpindahan Panas .....	27
2.13.1 Perpindahan Panas Konduksi .....	27
2.13.2 Perpindahan Panas Konveksi .....	28
2.13.3 Perpindahan Panas Radiasi .....	29
2.14 <i>Computing Fluid Dynamic (CFD)</i> .....	30
2.14.1 <i>Pre-Processing</i> .....	32
2.14.2 Proses <i>Solver</i> .....	32
2.14.3 <i>Post-Processing</i> .....	32

### **III. METODOLOGI PENELITIAN.....33**

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian .....	33
3.1.1 Waktu Penelitian .....	33
3.1.2 Tempat Penelitian .....	33
3.2 Parameter Penelitian .....	33
3.2.1 Data Pendukung .....	33
3.2.2 Simulasi Karakteristik Unjuk Kerja .....	34
3.3 Diagram Alir Metode Penelitian .....	34
3.4 Perancangan Desain Geometri Sistem Pendingin .....	36

3.5	Pengujian Simulasi CFD .....	38
3.6	Rancang Bangun Keseluruhan .....	38
3.6.1	Geometri.....	41
3.6.2	<i>Meshing</i> .....	43
3.6.3	Set-Up.....	45
3.6.4	<i>Solutions and Results</i> .....	51
<b>IV.</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>52</b>
4.1	Penelitian Awal .....	52
4.2	Validasi Data .....	53
4.3	Pengembangan Penelitian .....	55
4.3.1	Pengembangan Penelitian Berdasarkan Variasi Sudut <i>Heat Sink</i> ..	56
4.3.2	Pengembangan Penelitian Menggunakan Variasi <i>Thermo-Electric Cooler</i> .....	68
<b>V.</b>	<b>PENUTUP .....</b>	<b>69</b>
5.1	Kesimpulan .....	69
5.2	Saran .....	70

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Contoh <i>Photovoltaic Cell</i> .....	10
Gambar 2.2 Tingkat Energi P-N Semikonduktor .....	11
Gambar 2.3 Semikonduktor Jenis P dan N Sebelum Disambung .....	14
Gambar 2.4 Perpindahan Elektron dan <i>Hole</i> Pada Semikonduktor .....	14
Gambar 2.5 Hasil Muatan Positif dan Negative Pada Semikonduktor .....	14
Gambar 2.6 Timbulnya Medan Listrik Internal E .....	15
Gambar 2.7 Sel surya Monokristal .....	17
Gambar 2.8 Sel Surya Polikristal .....	18
Gambar 2.9 Sel Surya Amorf .....	19
Gambar 2.10 Panel Surya Lapisan Tipis .....	19
Gambar 2.11 Sirip Persegi, Sirip <i>Pin</i> , Sirip Persegi Panjang dan Sirip Segitiga .....	23
Gambar 2.12 Susunan Termoelektrik .....	25
Gambar 2.13 Prinsip Kerja TEC .....	26
Gambar 3.1 Bentuk Geometri <i>Heat Sink Microchannel</i> .....	36
Gambar 3.2 Bentuk Geometri Heat Sink 10° .....	37
Gambar 3.3 Bentuk Geometri Heat Sink 0° .....	37
Gambar 3.4 Desain PV, Plat Aluminium, TEC, dan <i>Heat Sink</i> .....	39
Gambar 3.5 Detail Lapisan Susunan Sistem Pendingin Panel Surya .....	39
Gambar 3.6 Tampilan Awal <i>Software Ansys</i> .....	40
Gambar 3.7 Tahapan Simulasi Dengan <i>Fluid Flow Fluent</i> .....	41
Gambar 3.8 Proses Input Geometri dari <i>Autodesk Inventor</i> .....	42
Gambar 3.9 Proses Pembuatan Domain Fluida .....	42
Gambar 3.10 Tahapan <i>Meshing</i> Pada Simulasi <i>Fluid Flow Fluent</i> .....	43

Gambar 3.11 Kualitas <i>Mesh</i> Yang Diperoleh .....	44
Gambar 3.12. Tahap Pemberian Nama Bagian-Bagian Benda Uji .....	45
Gambar 3.13. Proses <i>Set-Up Fluid Flow Fluent</i> .....	46
Gambar 3.14. Pemodelan Radiasi Matahari .....	47
Gambar 3.15 Penambahan Jenis Material Baru .....	48
Gambar 3.16 Penentuan Bahan dari Bagian-Bagian Benda Uji.....	49
Gambar 3.17 Pengaturan Kondisi Batas .....	49
Gambar 3.18. Pengaturan Radiasi Pada <i>Wall PV Cell</i> .....	50
Gambar 3.19. Hasil Kontur Temperatur .....	51
Gambar 4.1 <i>Contour</i> Temperatur <i>PV Cell</i> dan Fluida .....	55
Gambar 4.2 Desain Geometri <i>Heat Sink Microchannel</i> .....	56
Gambar 4.3 Grafik Kecepatan Aliran Fluida .....	58
Gambar 4.4 Kontur Temperatur Keluaran Variasi 0° dan Variasi 10° .....	59
Gambar 4.5. Vektor Kecepatan Fluida Pada Variasi <i>Heat Sink</i> 10° .....	60
Gambar 4.6. Vektor Kecepatan Fluida Pada <i>Heat Sink</i> 10° di Titik Awal .....	61
Gambar 4.7. Vektor Kecepatan Fluida Pada <i>Heat Sink</i> 10° di Titik Akhir .....	62
Gambar 4.8. Vektor Kecepatan Fluida Pada <i>Heat Sink</i> 0° di Titik Awal .....	63
Gambar 4.9. Vektor Kecepatan Fluida Pada <i>Heat Sink</i> 0° di Titik Akhir .....	64
Gambar 4.10. Perbandingan Vektor Kecepatan Pada Kedua Variasi Sudut .....	65
Gambar 4.11. Vektor Tekanan Pada <i>Heat Sink</i> 0° .....	66
Gambar 4.12 Vektor Tekanan Pada Pangkal <i>Heat Sink</i> 0° .....	66
Gambar 4.13 <i>Pathlines</i> Turbulensi Aliran Pada <i>Heat Sink</i> 0° .....	67

## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1. Perbandingan efisiensi material bahan pembuat <i>photovoltaic</i> .....	20
Tabel 4.1 Data Hasil Simulasi oleh Popovici (2015) .....	54
Tabel 4.2 Hasil Pengujian PV Dengan Variasi Sudut <i>Heat Sink</i> .....	57

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Saat ini terjadi peningkatan populasi dunia yang cukup signifikan, diperkirakan pada tahun 2030 jumlah populasi dunia akan mencapai 8,5 miliar jiwa dan akan meningkat lagi hingga 9,7 miliar jiwa pada tahun 2050 dari jumlah 7,9 miliar jiwa pada saat ini ditahun 2022. Peningkatan jumlah populasi yang terjadi tentunya diiringi dengan meningkatnya jumlah konsumsi energi dunia, seperti penggunaan energi listrik. Minyak bumi masih menjadi pilihan utama sumber energi dunia hingga saat ini diikuti dengan batu bara dan gas bumi. Penggunaan bahan bakar fosil sebagai sumber energi diberbagai bidang menyebabkan cadangannya semakin berkurang. Penggunaan bahan bakar fosil seperti minyak bumi memiliki dampak negatif terhadap lingkungan, dan sifatnya yang tidak dapat diperbaharui menimbulkan masalah baru lainnya. Maka dari itu dengan meningkatnya jumlah penduduk dibutuhkan suatu terobosan yang baru untuk mencari suatu energi alternatif yang dapat diperbaharui.

Pembahasan terkait konsumsi energi merupakan masalah besar yang terjadi pada saat ini. Para peneliti mengalihkan perhatiannya terhadap produksi energi bersih dengan menggunakan sumber energi alternatif seperti energi matahari yang kontribusi polusinya lebih rendah, limbah yang dapat diabaikan dan kemudahan untuk di implementasikan (Moshfegh, 2017). Saat ini alat yang umum digunakan untuk mengubah energi matahari menjadi energi listrik

adalah *photovoltaic cells*. Namun, rendahnya efisiensi dari teknologi ini dan biaya investasi awal yang cukup besar memberikan stigma yang buruk terhadap teknologi ini. Jadi, kemungkinan peningkatan performa terhadap sel fotovoltaik ini akan menjadi suatu hal yang menarik.

Energi elektromagnetik yang dipancarkan dari matahari merupakan sumber energi terbesar yang akan terus berkelanjutan, ramah lingkungan, dan penggunaannya relatif sederhana. Sehingga dengan beberapa kelebihan yang dapat dimanfaatkan dari energi matahari tersebut maka energi matahari sangat berpotensi untuk dijadikan sebagai sumber energi alternatif yang dapat dimanfaatkan secara optimal. Cahaya matahari mempunyai spektrum sinar mulai dari sinar UV (ultraviolet) hingga sinar *near-infrared*. Intensitas radiasi matahari di luar atmosfer bumi disebut dengan konstanta surya, dengan nilai sebesar  $1365 \text{ W/m}^2$ . Setelah disaring oleh atmosfer bumi, beberapa spektrum cahaya akan hilang, dan intensitas puncak radiasi menjadi sekitar  $1000 \text{ W/m}^2$ . Nilai ini menggambarkan intensitas radiasi pada keadaan permukaan tegak lurus sinar matahari dan pada keadaan yang cerah (Arifin, 2017).

*Solar panel* atau panel surya merupakan sebuah alat yang dapat mengubah sinar matahari menjadi energi listrik secara langsung. Energi foton yang datang dari matahari memiliki dua bentuk yaitu energi panas dan energi cahaya. Panel surya menghasilkan energi listrik dengan cara mengubah *photon* menjadi listrik atau biasa disebut dengan efek *photovoltaic*. Efek ini terjadi apabila suatu bahan menyerap *photon* dengan energi diatas ambang batas tertentu sehingga menyebabkan arus mengalir diantara lapisan N dan P yang muatannya berlawanan. Panel surya atau *solar panel* dapat merubah radiasi matahari menjadi energi listrik DC, akan tetapi panel surya memiliki keterbatasan pada saat radiasi matahari tinggi yang mengakibatkan temperatur permukaan panel surya juga semakin tinggi. Sehingga terjadi penurunan efisiensi daya *output*

dari panel surya sebesar 0,5% disetiap kenaikan temperature 1°C dari kondisi standar 25°C (Razak, 2016).

Terjadinya penurunan efisiensi dari panel surya memicu terjadinya pengembangan teknologi baru untuk mengurangi peningkatan temperature kerja yang terjadi akibat paparan dari radiasi cahaya matahari. Kolektor surya yang banyak dikembangkan adalah kolektor pelat datar atau disebut juga dengan *flat plate collectors* (FPC). Hal ini dikarenakan kolektor pelat datar dapat dengan mudah diaplikasikan, dengan desain yang sederhana serta lebih mudah untuk melakukan perpindahan panas secara merata. Pengujian yang menggunakan *flat plate collectors* (FPC) banyak digunakan dengan merubah komponen material, desain serta membuat susunan konfigurasi pendingin udara dengan sirip sebagai penyerap panas (Prasetyo, 2021).

Beberapa penelitian dilakukan untuk dapat menjaga temperatur panel surya agar tetap dalam keadaan optimal, salah satunya dari penelitian Egab dkk, (2020). Penelitian yang dilakukan adalah dengan menambahkan *heat sink* dengan beberapa variasi sirip dan lubang yang berbeda. Panas yang dihasilkan dari proses radiasi sinar matahari dapat dikurangi dengan merambatkan panas diantara *heat sink* yang dihembuskan dengan udara. Pendinginan dengan *heat sink* dapat ditingkatkan lagi dengan merubah jumlah sirip dan jarak lubang diantara sirip. Suhu panel menurun dengan penurunan suhu lingkungan dan *heat flux*. Penggunaan sirip dan lubang dapat meningkatkan performa panel surya, karena temperatur kerja panel yang menurun. Temperatur panel surya dengan *heat sink* dan sirip dapat berkurang hingga 50% dibandingkan dengan temperatur panel tanpa *heat sink* dan sirip.

Penelitian yang akan dilakukan selanjutnya adalah proses pengembangan dari penelitian yang telah dilakukan. Pengembangan yang dilakukan diupayakan

untuk mempermudah melihat efisiensi dari panel surya bersumber pada nilai termal dan *pressure drop*. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *software computing fluid dynamics* (CFD). CFD adalah salah satu ilmu dinamika fluida yang menerapkan metode numerik dan algoritma dalam memecahkan dan menganalisis masalah yang terjadi pada sebuah eksperimen. Hal inilah yang menjadi dasar dilakukannya simulasi dari kerja panel surya pelat datar dengan penambahan *heat sink microchannel* dan *thermoelectric cooler* (TEC) dengan pola tertentu untuk menganalisis termal dan *pressure drop* menggunakan CFD Ansys 2022 R1 agar diperoleh unjuk kerja yang diharapkan.

## 1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Membuat simulasi untuk mengetahui unjuk kerja panel surya dengan menggunakan sistem pendingin jenis *heat sink microchannel*.
2. Mengetahui temperatur permukaan panel surya.
3. Mengetahui pengaruh dan potensi penggunaan TEC pada panel surya.

## 1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menggunakan panel surya jenis *flat plate collector* (FPC) dengan ukuran 500 mm x 500 mm.
2. Simulasi dengan menggunakan *software* Ansys 2022 R1.
3. Simulasi dilakukan dengan kondisi *steady state*.
4. Material yang digunakan untuk *heat sink microchannel* adalah aluminium.
5. Simulasi dilakukan untuk memperoleh efisiensi termal dari panel surya jenis kolektor pelat datar.

6. *Thermoelectric cooler* (TEC) ditambahkan sebagai variasi terakhir.
7. Ukuran *heat sink* yang digunakan memiliki tinggi 20 mm dengan panjang 40 mm dan lebar 40 mm, dengan ketebalan pelat dasar 4,2 mm.
8. Ukuran *thermoelectric cooler* (TEC) yang digunakan memiliki panjang 40 mm, lebar 40 mm, dan ketebalan 3,3 mm.

#### 1.4 Kerangka Pemikiran

Dengan menggunakan sel surya maka energi matahari dapat dimanfaatkan untuk menjadi energi listrik. Penggunaan *heat sink microchannel* pada sel surya dapat merubah aliran menjadi turbulen sehingga proses perpindahan panas menjadi semakin merata di setiap area, sehingga dapat meningkatkan nilai efisiensinya. Penggunaan *thermoelectric cooler* dapat membantu proses penurunan temperatur kerja dari sel surya.

#### 1.5 Hipotesis

Berdasarkan kerangka pemikiran maka hipotesis yang dapat diajukan adalah sebagai berikut:

1. Geometri *heat sink* yang dipilih dapat menghasilkan aliran turbulen yang diinginkan.
2. Aliran turbulen dapat memengaruhi perubahan temperatur pada kolektor sel surya.
3. Metode CFD dinilai lebih efisien untuk memvariasikan geometri perbandingan luas permukaan sistem pendingin terhadap luas permukaan kolektor sel surya.

## **1.6 Sistematika Penulisan**

### **I. PENDAHULUAN**

Bab ini berisi tentang latar belakang, tujuan, batasan masalah, dan sistematika dari penelitian yang dilakukan.

### **II. TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini berisi tentang dasar teori pengujian yang dilakukan, seperti teori semikonduktor, proses konversi sel surya, prinsip dan cara kerja sel surya beserta jenis jenis sel surya.

### **III. METODOLOGI PENELITIAN**

Bab ini berisi tentang waktu dan tempat pengujian, parameter pengujian, prosedur pengujian, dan diagram alir penelitian.

### **IV. HASIL DAN PEMBAHASAN**

Bab ini berisi tentang data hasil eksperimen simulasi dengan perangkat lunak CFD Ansys 2022 dan melakukan analisis data.

### **V. SIMPULAN DAN SARAN**

Bab ini berisi tentang kesimpulan dari pengujian yang dilakukan dan saran yang dapat diberikan untuk pengujian selanjutnya.

### **DAFTAR PUSTAKA**

Berisikan tentang referensi dasar teori untuk mendukung jalannya pengujian yang dilakukan.

### **LAMPIRAN**

Berisikan tentang data-data tambahan yang mendukung pengujian atau penelitian.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Energi Matahari

Indonesia memiliki banyak potensi energi terbarukan, seperti tenaga angin, air, biomasa, panas bumi, dan surya yang bersih dan ramah lingkungan, namun pemanfaatannya masih belum optimal. Salah satu penyebabnya adalah dikarenakan biaya pembangkitan pembangkit listrik energi terbarukan tidak dapat bersaing dengan biaya pembangkitan pembangkit listrik dari energi fosil. Indonesia terletak di garis khatulistiwa dan berada pada zona lintang iklim tropis, sehingga sumber energi surya di Indonesia relatif lebih besar di banding daerah lainnya. Matahari merupakan salah satu contoh dari energi terbarukan dan merupakan salah satu energi yang penting dalam kehidupan manusia.

Matahari menghasilkan energi dalam bentuk radiasi. Energi dihasilkan dalam inti matahari melalui proses penggabungan atom-atom hidrogen menjadi helium. Oleh karena letak matahari yang sangat jauh dari bumi, maka radiasi matahari yang sampai ke permukaan bumi hanya sebagian kecil. Radiasi matahari terbagi ke dalam beberapa jenis yaitu, radiasi langsung (*direct radiation*), radiasi pantulan (*albedo*), radiasi total (*total radiation*), dan radiasi tersebar (*diffuse radiation*) (Hutahaean, 2018).

*World Radiation Center (WRC)* menentukan nilai konstanta matahari ( $G_{sc}$ ) sebesar  $1367 \text{ W/m}^2$  dengan ketidakpastian sebesar 1%. Konstanta matahari ( $G_{sc}$ ) adalah energi dari matahari per unit waktu yang diterima oleh suatu permukaan yang tegak lurus terhadap arah radiasi matahari pada jarak rata-rata matahari-bumi di luar atmosfer. Sedangkan radiasi di luar atmosfer bumi yang diukur pada bidang normal terhadap radiasi pada hari ke- $n$  pada satu tahun disebut dengan konstanta radiasi ekstraterrestrial ( $G_{on}$ ). Oleh karena orbit bumi sebenarnya berbentuk elips sehingga perlu ada koreksi terhadap konstanta matahari. Energi matahari yang mencapai permukaan bumi berkisar  $3,9 \times 10^{24} \text{ joule} = 1,08 \times 10^{18} \text{ kWh}$  di setiap tahunnya, atau kira-kira 10000 kali lebih banyak dari permintaan energi primer secara global setiap tahunnya dan lebih banyak dari cadangan ketersediaan keseluruhan energi yang ada di bumi. Jadi apabila potensi tersebut dapat dimanfaatkan, seluruh kebutuhan energi di masa yang akan datang akan dapat terpenuhi.

## 2.2 Sejarah Sel Surya

Aliran listrik surya pertama kali ditemukan oleh Alexander Edmond Beequerel seorang ahli fisika dari Jerman pada abad ke-19, menangkap peristiwa berupa berkas sinar matahari yang mengenai larutan elektrolit kimia meningkatkan muatan elektron dari larutan tersebut. Kemudian pada abad ke-20 Albert Einstein memulai untuk mengembangkan penemuan dari Alexander Edmond Beequerel dengan nama "*Photoelectric Effect*" yang selanjutnya menjadi dasar dari "*Photovoltaic Effect*". Pengamatan yang dilakukan oleh Einstein pada sebuah lempeng metal yang melepaskan foton partikel energi cahaya pada saat energi matahari menyentuhnya. Kemudian foton-foton tersebut mendesak atom metal secara terus-menerus sehingga terjadi partikel energi foton yang bersifat sebagai gelombang energi cahaya. Pada tahun 1930-an hasil pengamatan Einstein menemukan konsep baru yaitu Mekanika Kuantum yang digunakan untuk membuat teknologi *solid state*. Kemudian teknologi ini

digunakan oleh *Bell Telephone Research Laboratories* untuk menciptakan sel surya yang pertama kali.

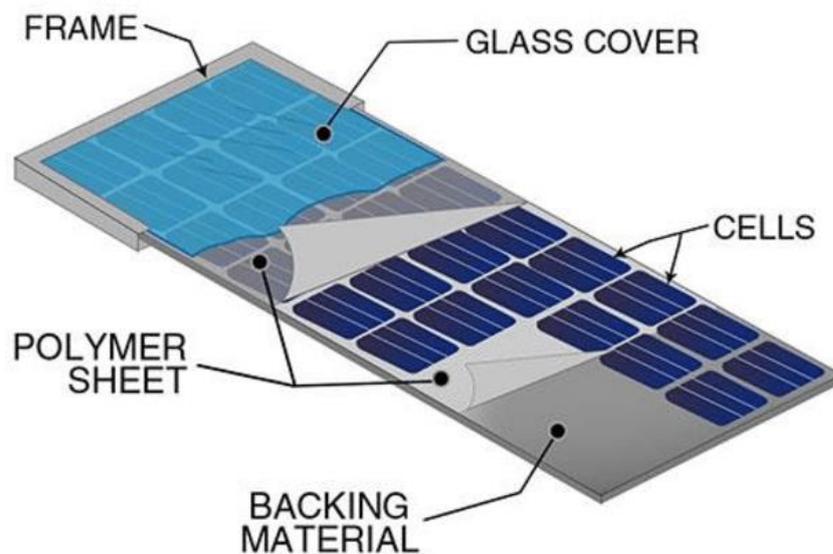
Semakin berkembangnya zaman, desain dan penggunaan sel surya semakin berkembang. Pada tahun 1950-1960 sel surya siap diaplikasikan ke pesawat ruang angkasa. Perkembangan sel surya semakin pesat dan pada tahun 1970-an, sel surya diperkenalkan secara luas di seluruh dunia sebagai energi alternatif. Oleh karena itu, PV mulai diaplikasikan pada *Low Power Warning System* dan *Offshore Buoys*. Namun pengembangan sel surya tidak dapat dilakukan secara massif oleh karena pembuatannya yang masih manual, dan menyebabkan biaya produksi yang mahal. Pada tahun 1980-an, perusahaan-perusahaan pembuat PV menjalin kerjasama dengan pemerintah agar produksi PV bisa semakin massif, sehingga dapat mengurangi atau menekan biaya produksi sel surya sehingga harga dapat lebih terjangkau (Pahlevi, 2014).

### **2.3 Photovoltaic Cell (Sel Surya)**

Kata '*photovoltaic*' terdiri dari dua kata yaitu *photo* dan *volta*. *Photo* yang berarti cahaya (dari bahasa Yunani yaitu *phos*, *photos*: cahaya) dan *volta* (berasal dari nama fisikawan Italia yang bernama Alessandro Volta 1745-1827) yang berarti unit tegangan listrik. Dengan kata lain, *photovoltaic* berarti proses konversi cahaya matahari secara langsung untuk diubah menjadi energi listrik. Sehingga, kata *photovoltaic* bisa disingkat dengan PV (Muchammad, 2011).

*Photovoltaic cell* atau PV bisa disebut juga dengan *solar cell*, *solar array*, *solar panel*, dan *photovoltaic panel*. *Solar array* merupakan kumpulan atau kelompok dari *solar panel*, dan *solar panel* merupakan kumpulan dari *solar*

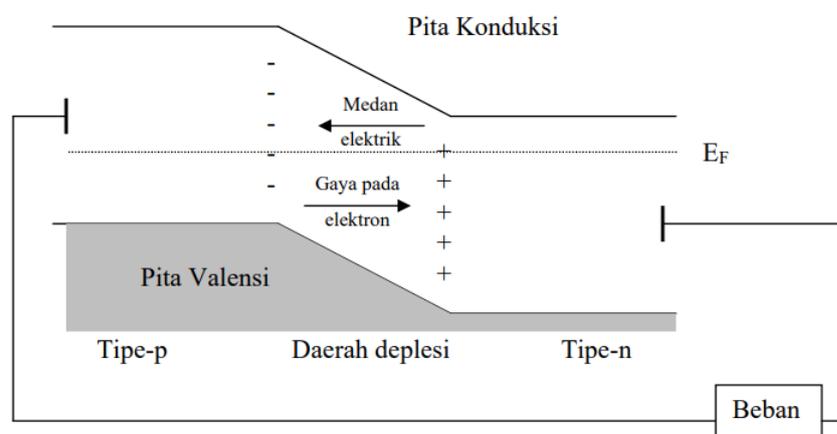
*cell*. *Solar cell* adalah elemen aktif (semikonduktor) yang menggunakan efek *photovoltaic* untuk mengubah energi surya menjadi energi listrik tanpa bagian-bagian mekanis dan tanpa bahan bakar.



Gambar 2.1. Contoh *photovoltaic cell* (Harahap, 2020)

Pada gambar 2.1. merupakan gambar dari *photovoltaic cell* atau *PV module* yang terbuat dari potongan-potongan silicon yang sangat kecil dan dilapisi dengan bahan kimia khusus agar dapat membentuk dasar dari *photovoltaic cell*. Pada umumnya *photovoltaic cell* memiliki ketebalan minimum yaitu 0,3 mm yang terbuat dari irisan bahan semikonduktor dengan kutub positif dan kutub negatif. Bahan semikonduktor merupakan suatu bahan yang mempunyai sifat konduktor dan isolator yang baik. Contoh bahan semikonduktor yang sering dijumpai adalah silicon dan germanium. Silikon dapat berperan sebagai isolator pada saat temperatur rendah dan berperan sebagai konduktor bila ada energi dan panas. Oleh karena kerak bumi tersusun dari silikon sebanyak 25% maka diperkirakan cadangan silikon tidak akan mengalami kekurangan.

Panel surya merupakan system pembangkit listrik paling efektif, berkelanjutan, dan ramah lingkungan di dunia saat ini. Ada beberapa tipe teknologi panel surya yang tersedia, seperti *mono crystalline silicon*, *poly crystalline silicon*, *amorphous silicon*, *thin films* adalah jenis teknologi yang paling populer saat ini sebagai pembangkit listrik. Performa dan efisiensi dari modul panel surya bergantung kepada parameter elektrikal dan lokasi lingkungan operasinya (Sugianto, 2020).



Gambar 2.2. Tingkat energi yang dihasilkan oleh sambungan p-n semikonduktor (Yuwono, 2005)

Pada gambar 2.2. terlihat elektron dari pita konduksi dapat meloncat ke pita valensi Ketika sambungan tersebut dikenai foton dengan energi tertentu. Pada gambar 2.2. juga terlihat tingkat energi yang dihasilkan. Terjadinya perpindahan elektron dari pita valensi menuju pita konduksi disebabkan bahan semikonduktor yang memiliki struktur seperti isolator yang memiliki celah energi kecil (1 eV atau kurang). Foton dengan tingkat energi tertentu akan melepaskan elektron dari ikatannya. Berikut beberapa keunggulan dan kelemahan dari menggunakan panel surya yaitu:

Keunggulan Panel Surya:

1. Panel surya ramah lingkungan dan tidak memberikan kontribusi pada perubahan cuaca dan iklim, seperti pada penggunaan bahan bakar fosil karena panel surya tidak memancarkan gas rumah kaca seperti karbon dioksida.
2. Panel surya menggunakan energi dari matahari sebagai bentuk energi paling banyak tersedia di planet bumi.
3. Panel surya mudah dipasang dan biaya pemeliharaan yang relatif rendah.
4. Panel surya tidak memberikan kontribusi atau perannya terhadap polusi suara.
5. Panel surya dapat dibeli secara bertahap, artinya investasi awal secara besar besaran tidak perlu.
6. Efisiensi panel surya tidak akan banyak berkurang dalam waktu pemakaian 20 tahun, sehingga akan menghemat biaya energi dalam waktu panjang.

Kelemahan panel surya:

1. Biaya investasi keseluruhan panel surya masih relatif mahal. Meskipun telah banyak mengalami penurunan harga,
2. Efisiensi panel surya masih harus ditingkatkan lagi secara signifikan karena banyak sinar matahari yang terbuang dan menjadi panas.
3. Panel surya terbuat dari beberapa bahan yang tidak ramah lingkungan.

### **3.5 Proses Konversi Sel Surya**

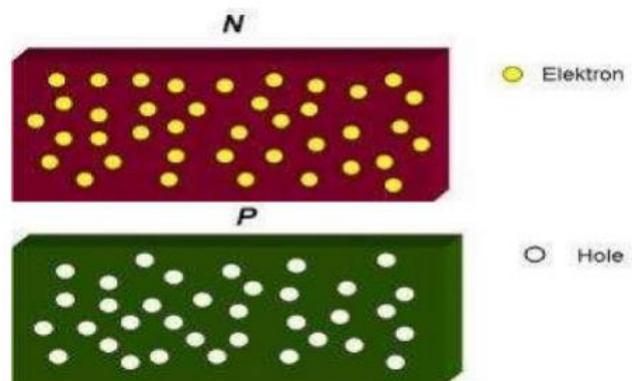
Proses konversi dari cahaya matahari menjadi energi listrik dapat terjadi karena bahan material penyusun sel surya yang berupa semikonduktor. Dan tersusun atas dua jenis semikonduktor, yaitu jenis n dan jenis p. Semikonduktor jenis n memiliki kelebihan elektron, sehingga kelebihan muatan negatif. Sedangkan

semikonduktor jenis p memiliki kelebihan *hole*, sehingga kelebihan muatan positif (Madani, 2018).

Ketika sinar matahari yang terdiri dari foton-foton jatuh pada permukaan sel surya (*absorber*), diserap, dipantulkan, atau dilewatkan dan hanya foton dengan tingkat energi tertentu yang dapat membebaskan elektron dari ikatan atomnya, sehingga mengalir arus listrik. Tingkat energi ini disebut dengan energi *band-gap* artinya, sebagai jumlah energi yang dibutuhkan untuk mengeluarkan elektron dari ikatan kovalennya sehingga terjadilah aliran arus listrik. Elektron dari pita valensi akan berpindah ke pita konduksi. Elektron menjadi pembawa n dan meninggalkan *hole*, pembawa p. Pembawa p akan menuju sambungan begitu pula dengan pembawa n yang nantinya menghasilkan beda potensial. Jika energi foton terlalu besar dari pada energi *band-gap*, maka ekstra energi tersebut akan dirubah dalam bentuk panas di sel surya. Oleh karena itu penting untuk mengatur bahan yang akan digunakan pada sel surya, dengan memodifikasi struktur molekul dan semikonduktor yang akan digunakan (Yuwono, 2005).

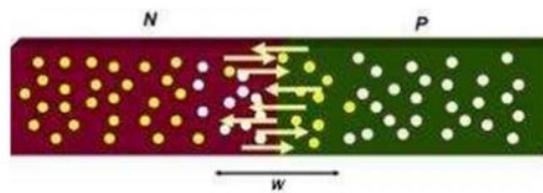
Pada awalnya, pembuatan dua jenis semikonduktor bertujuan agar terjadi peningkatan pada konduktifitas termalnya atau kemampuan daya hantar listrik dan panas semikonduktor alami. Pada semikonduktor alami ini, elektron maupun juga hole memiliki jumlah yang sama. Kelebihan elektron atau *hole* dapat menambah daya hantar listrik dari sebuah semikonduktor. Dua jenis semikonduktor n dan p bila disatukan akan menjadi sambungan p-n atau diode p-n. Dalam istilah lain disebut juga dengan sambungan metalurgi (*metallurgicaljunction*) yang dapat digambarkan sebagai berikut:

1. Semikonduktor jenis p dan n sebelum disambung.



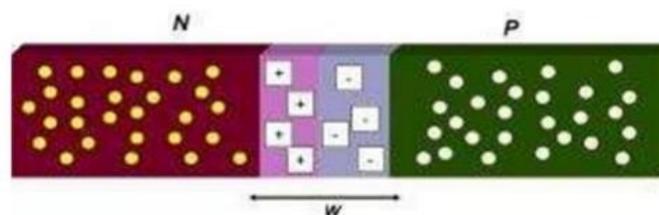
Gambar 2.3. Semikonduktor jenis p dan n sebelum disambung (Montaria)

2. Sesaat setelah disambung, terjadi perpindahan elektron dan *hole* dari semikonduktor p dan n.



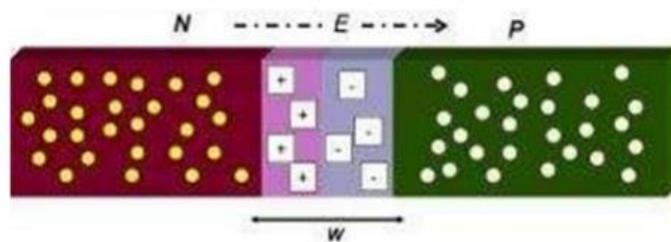
Gambar 2.4. Perpindahan elektron dan *hole* pada semikonduktor (Montaria)

3. Elektron dari semikonduktor n bersatu dengan *hole* pada semikonduktor p sehingga jumlah *hole* pada semikonduktor p berkurang.



Gambar 2.5. Hasil muatan positif dan negative pada semikonduktor (Montaria)

4. Daerah negatif dan positif ini disebut dengan daerah deplesi (*depletion region*) dan ditandai dengan huruf W.
5. Baik elektron maupun *hole* yang ada pada daerah deplesi disebut dengan pembawa muatan minor.
6. Oleh karena adanya perbedaan muatan pada daerah deplesi, maka medan listrik timbul dengan sendirinya dari sisi positif ke sisi negatif.



Gambar 2.6. Timbulnya medan listrik internal E (Montaria)

7. Adanya medan listrik menyebabkan sambungan p-n cenderung berlawanan dengan perpindahan *hole* maupun elektron pada saat terjadinya daerah deplesi.

Pada sambungan p-n inilah terjadi proses konversi cahaya matahari menjadi energi listrik. Untuk keperluan sel surya, semikonduktor n berada pada lapisan diatas sambungan p yang menghadap ke arah datangnya cahaya matahari, dan dibuat jauh lebih tipis daripada semikonduktor p. Sehingga cahaya matahari yang datang akan jatuh ke permukaan sel surya dapat terus diserap dan masuk ke daerah deplesi dan semikonduktor p.

## 2.5 Semikonduktor

Bahan penyusun semikonduktor mempunyai konduktifitas listrik yang nilainya berada diantara isolator dan konduktor yang besar energi gabnya  $< 6$  eV. Cu yang digunakan sebagai bahan penyusun pembuatan material semikonduktor mempunyai energi gab sebesar 2,1 eV sehingga baik digunakan sebagai bahan dasar pembuatan sel surya. Sumber energi utama dari pembangkit jenis ini adalah radiasi panjang gelombang pendek seperti yang dihasilkan oleh bahan radioaktif yang memiliki nilai panjang gelombang 0,01 dengan radiasi matahari yang panjang gelombangnya berkisar 5000. Salah satu penyusun dari matahari adalah spektrum ultraviolet yang termasuk dalam panjang gelombang pendek.

Nilai konduktifitas dari semikonduktor dapat diubah dengan menyuntikan material lain atau disebut juga dengan istilah *doping*. Maka semikonduktor juga dapat digunakan dalam bidang elektronik. Nilai tegangan dan arus listrik yang dihasilkan dari material lain tidak jauh berbeda dengan saat menggunakan material tembaga oksida dimana proses pengolahannya juga tidak terlalu rumit karena hanya dalam batas penggunaan untuk sumber sinar dan ukuran lempeng yang berbeda (Pratama, 2007).

Material dari semikonduktor banyak digunakan pada bahan dasar pembuatan peralatan elektronik, dimana selama ini kebutuhan tersebut dipenuhi dari bahan komposit plastic dengan bahan aktif silika. Bahan aktif silika selama ini bersumber dari turunan minyak bumi yang bahan bakunya semakin berkurang disetiap harinya dan tidak dapat diperbaharui. Komponen semikonduktor yang tidak digunakan lagi, lalu akan dibuang menjadi sampah plastic yang dapat mengakibatkan polusi terhadap lingkungan karena sulit untuk diurai (*nondegradable*) (Avella, 2009).

## 2.6 Jenis-Jenis Sel Surya

Terdapat beberapa jenis sel surya yang umum dan paling banyak digunakan saat ini, yaitu:

### 2.6.1 Monokristalin

Sel surya monokristalin merupakan jenis panel yang efisien dan dihasilkan dengan teknologi terbaru dan daya listrik yang dihasilkan persatuan luas yang paling tinggi. Sel surya jenis ini dirancang untuk dapat bekerja pada tempat-tempat yang iklimnya kurang menentu dan memiliki efisiensi sekitar 15%- 20%. Kelemahan dari sel surya ini adalah saat cahaya matahari kurang dari biasanya maka sel surya jenis ini tidak akan dapat berfungsi dengan baik, sehingga efisiensinya akan berkurang secara drastic dalam cuaca mendung atau berawan.



Gambar 2.7. Sel surya monokristal (Setyaningrum, 2017)

### 2.6.2 Polikristalin

Jenis sel surya polikristalin atau disebut juga dengan 'multi-kristal' atau banyak kristal silikon, memiliki susunan kristal yang acak dikarenakan

fabrikasi yang dilakukan adalah dengan pengecoran. Oleh karena ada banyak kristal pada setiap selnya, maka elektron akan kurang bebas untuk bergerak. Tipe ini membutuhkan luas permukaan yang lebih lebar atau luas untuk mendapatkan daya yang sama dibandingkan dengan jenis sel surya monokristalin. Efisiensi yang dihasilkan oleh sel surya ini lebih rendah dibandingkan dengan sel surya monokristalin.

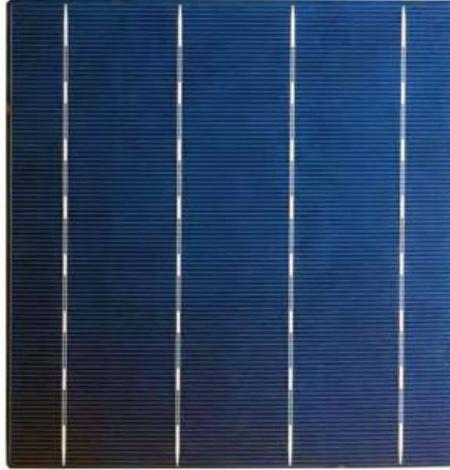


Gambar 2.8. Sel surya polikristal (Setyanignrum, 2017)

### 2.6.3 Amorf

Silikon *amorphouse* (a-Si) digunakan untuk bahan baku panel surya yang dipakai di kalkulator pada waktu tertentu. Kinerja dari *amorphouse* lebih rendah jika dibandingkan dengan sel surya c-Si yang merupakan kristal tradisional, namun cocok digunakan pada kalkulator karena penggunaan tenaga yang rendah. Perkembangan pada Teknik a-Si saat ini membuat bahan ini menjadi lebih efektif untuk bidang yang lebih luas. Efisiensi tinggi dapat diperoleh ketika penyusunan dilakukan dengan beberapa lapisan sel a-Si yang tipis dibagian atas satu sama lain, setiap bagian rangkaian diatur untuk bekerja pada frekuensi cahaya tertentu. Untuk produksi dalam jumlah besar, biaya produksi akan dapat dikurangi. Sel a-Si menggunakan sekitar 1% silikon daripada bahan sel

c-Si dengan biaya silikon yang merupakan faktor terbesar dalam biaya produksinya.



Gambar 2.9. Sel surya amorf (Setyaningrum, 2017)

#### 2.6.4 Lapisan Tipis (*Thin Films*)

Sel surya jenis ini adalah sel surya dengan struktur lapisan yang tipis mikrokrystal-silikon dengan luas permukaan yang dibutuhkan per Watt daya lebih besar dari monokristalin dan polikristalin. Sel surya ini nantinya akan dipasangkan pada sebuah lapisan dasar. Dan Ketika dilihat secara fisik, solar panel ini merupakan *film* solar sel yang memiliki dua lapisan.



Gambar 2.10. Panel surya lapisan tipis (Setyaningrum, 2017)

Tabel 2.1. Perbandingan efisiensi material bahan pembuat *photovoltaic*

<i>Solar cell material</i>	<i>Cell efficiency, <math>\eta_{cell}</math> (laboratory)</i>	<i>Cell efficiency, <math>\eta_{cell}</math> (production)</i>	<i>Module efficiency, <math>\eta_{module}</math> (series production)</i>
<i>Monocrystalline silicon</i>	24,7 %	18 %	14 %
<i>Polycrystalline silicon</i>	19,8 %	16 %	13 %
<i>Ribbon silicon</i>	19,7 %	14 %	13 %
<i>Crystalline thin film silicon</i>	19,2 %	9,5 %	7,9 %
<i>Amorphous silicon</i>	13,0 %	10,5 %	7,5 %

## 2.7 Faktor Pengoperasian Panel Surya

Agar panel surya dapat beroperasi secara optimal, faktor yang memengaruhi adalah sebagai berikut:

### 2.7.1 *Ambient air temperature*

Sebuah panel surya akan beroperasi secara maksimum apabila temperatur panel tetap normal pada temperature 25 °C, kenaikan temperature yang melebihi temperature normal pada sel PV akan melemahkan *voltage* (*Voc*). Setiap kenaikan temperatur dari panel surya 1 °C maka akan mengurangi sekitar 0,5 % dari total daya yang dihasilkan, dan disetiap kenaikan temperatur 10 °C daya yang dihasilkan akan berkurang 2 kali lipat.

### 2.7.2 Radiasi solar matahari (*insolation*)

Radiasi solar matahari diberbagai lokasi dapat bervariasi dan bergantung terhadap keadaan spektrum solar ke bumi. *Insolation solar* matahari akan berpengaruh pada arus dan tegangan keluaran.

### 2.7.3 Kecepatan angin bertiup

Kecepatan tiup angin disekitar lokasi dari *PV array* dapat membantu untuk mendinginkan permukaan temperatur kaca-kaca *PV array*.

### 2.7.4 Keadaan atmosfer bumi

Keadaan dari atmosfer bumi saat berawan, mendung, jenis partikel debu udara, asap, uap air udara (Rh), kabut dan polusi akan menentukan hasil maksimum arus listrik dari deretan PV.

### 2.7.5 Orientasi panel atau *PV array*

Orientasi rangkaian/ deretan PV (*array*) terhadap arah matahari secara optimum sangat penting agar deretan panel PV dapat menghasilkan energi maksimum. Selain arah orientasi, sudut orientasi (*tilt angle*) juga akan memengaruhi hasil energi dari panel surya.

## 2.8 Efisiensi Sel Surya

Kemampuan sel surya yang mampu menghasilkan energi listrik tentu berhubungan dengan teknologi fotovoltaik yang mampu menyerap gelombang elektromagnetik. Pada dasarnya prinsip sel surya ini berkebalikan dengan prinsip kerja LED (*light emitting diode*) yang mengubah energi dari listrik menjadi energi cahaya atau boleh disebut identic dengan sebuah diode cahaya (*photodiode*) (Sari, 2014). Kemampuan keseluruhan dari sel surya bergantung pada parameter seperti intensitas cahaya, besarnya sudut datang matahari, dan

temperature sel surya. Umumnya efisiensi sel surya digunakan sebagai parameter pembandingan kinerja dari suatu sel surya terhadap sel surya lainnya. Efisiensi adalah perbandingan energi yang keluar dengan energi yang masuk dari matahari.

Efisiensi keluaran maksimum disimbolkan dengan  $\eta$ , yaitu persentase daya keluaran optimum terhadap energi cahaya yang digunakan, berikut persamaannya:

$$\eta = \frac{FF \times V_{OC} \times I_{SC}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.1)$$

$$FF = \frac{V_m \times I_m}{V_{OC} \times I_{SC}} \dots\dots\dots(2.2)$$

$$\eta = \frac{V_m \times I_m}{I(t) \times A} \times 100\% \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan:

$\eta$  = efisiensi sel surya

$P_{out}$  = daya keluar

$P_{in}$  = daya masuk

$V_m$  = tegangan maksimum

$I_m$  = arus maksimum

$V_{oc}$  = *open circuit voltage*

$I_{sc}$  = *short circuit current*

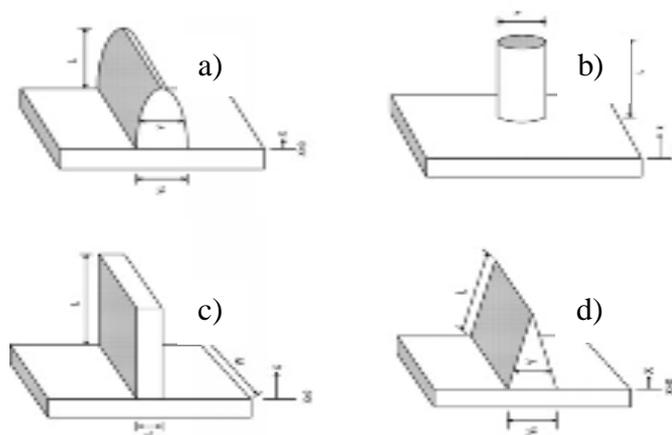
$I(t)$  = intensitas cahaya

Terdapat beberapa faktor yang membatasi nilai efisiensi dari sel surya, seperti cahaya. Menurunnya nilai efisiensi sel surya ada hubungannya terhadap cahaya yang tidak mempunyai cukup energi, karena cahaya matahari yang mempunyai

beragam spektrum. Cahaya matahari yang sampai ke bumi mempunyai intensitas yang berbeda pada spektrum panjang gelombang. Nilai efisiensi akan berkurang apabila energi matahari yang diterima sedikit.

## 2.9 Sirip Pada Sel Surya

Penambahan sirip pada sel surya merupakan salah satu cara untuk meningkatkan luas area kontak perpindahan panas dan turbulensi aliran fluida agar dapat meningkatkan efektifitas sel surya. Perubahan aliran udara menjadi turbulen akan meningkatkan nilai koefisien perpindahan panas. Gambar 2.11 merupakan beberapa jenis sirip yang sering digunakan pada sistem pendingin sel surya.



Gambar 2.11 (a) sirip persegi (b) sirip *pin* (c) sirip persegi panjang (d) sirip segitiga (Mokheimer, 2003)

Elsafi (2015) melakukan simulasi dengan konfigurasi geometri sirip terhadap performa dari sel surya. Variasi geometri sirip yang dipilih adalah sirip persegi

panjang (*rectangle fin*), sirip parabola (*parabolic fin*), dan sirip segitiga (*triangular fin*), diperoleh bahwa geometri sirip persegi panjang lebih efektif untuk menurunkan temperatur sel surya. Secara matematis efektifitas sirip dapat ditulis sebagai berikut:

$$\varepsilon_f = \frac{q_f}{hA_{c,t}\theta_b} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana:

$\varepsilon_f$  = efektifitas sirip

$q_f$  = perpindahan panas melalui sirip

$h$  = koefisien perpindahan panas

$A_{c,t}$  = luas area sirip

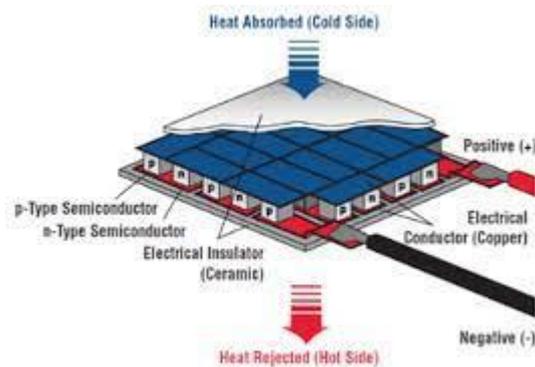
$\theta_b$  = perbedaan temperatur sirip dan lingkungan

## 2.10 TEC (*Thermo-Electric Cooler*)

TEC merupakan sebuah komponen pendingin solid-state elektrik yang bekerja seperti pemompa panas saat melakukan proses pendinginan. TEC memindahkan panas dengan menyerap panas melalui salah satu sisinya dan memancarkan panas tersebut melalui sisi lainnya. Pada bagian sisi TEC yang mengabsorpsi panas terjadi efek pendinginan dan dapat dimanfaatkan untuk berbagai kebutuhan.

Modul TEC merupakan sirkuit terintegrasi dalam bentuk solid yang menggunakan prinsip efek Seebeck, Peltier, dan Thompson. *Thermo-Electric Cooler* terdiri dari pasangan material semikonduktor tipe-p dan tipe-n yang membentuk termokopel. Sehingga memungkinkan TEC untuk menghasilkan panas dan dingin di masing masing sisinya jika arus listrik

digunakan dan biasanya dipakai sebagai sistem pendingin. Peristiwa tersebut didasarkan pada efek Peltier (Nandy, 2009).



Gambar 2.12. Susunan termoelektrik (Nandy,2009)

## 2.11 Efek Peltier

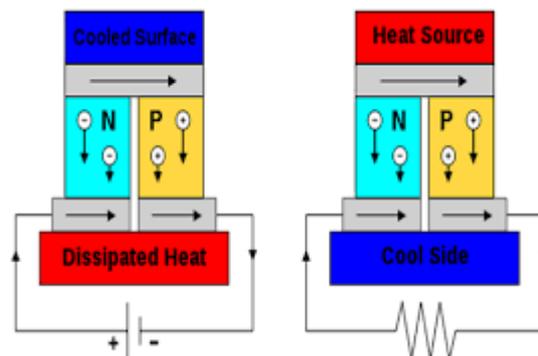
Efek Peltier merupakan kebalikan dari efek Seebeck, yaitu apabila dua buah logam dengan material yang berbeda kemudian dialirkan arus listrik searah pada sambungan tersebut, maka akan menghasilkan perbedaan temperature dikedua sisi TEC. *Thermo-Electric Cooler* menggunakan prinsip tersebut sebagai pendingin ataupun pompa kalor. Jumlah arus searah yang dialirkan akan sebanding dengan perbedaan temperatur yang dihasilkan.

TEC terdiri dari dua bahan material berbeda yang disambungkan dan material tersebut harus memiliki koefisien Seebeck yang cukup tinggi. Bismuth-Telluride banyak dipilih sebagai bahan dasar TEC. Teknologi TEC memiliki berbagai kelebihan seperti, tidak ada terjadinya getaran, dapat diatur sebagai pemanas atau pendingin, penggunaan yang ringkas, dan tidak membutuhkan refrigeran.

## 2.12 Prinsip Kerja *Thermo-Electric Cooler*

*Thermo-Electric Cooler* (TEC) terdiri dari semikonduktor tipe P dan tipe N yang terhubung secara elektrik dengan susunan seri, namun terhubung secara termis melalui susunan paralel. Proses pendinginan yang terjadi menggunakan efek Peltier, yaitu ketika arus listrik DC melewati material semikonduktor dengan tipe yang berbeda yaitu tipe N dan tipe P maka akan menimbulkan panas (melepaskan panas) pada satu sisi dan dingin (menyerap panas) pada sisi lainnya (Poetro, 2010).

Proses pendinginan dapat terjadi dikarenakan adanya perpindahan aliran elektron dari tingkat energi yang lebih rendah pada semikonduktor tipe P, menuju tingkat energi yang lebih tinggi yaitu semikonduktor tipe N. Elektron tipe P yang memiliki tingkat energi yang lebih rendah dapat mengalir dengan menyerap energi yang mengakibatkan sisi lainnya menjadi dingin. Pada sambungan sisi panas, elektron mengalir dari tingkat energi yang lebih tinggi pada tipe N, menuju tingkat energi yang lebih rendah pada tipe P. Dengan tingginya tingkat energi yang dimiliki semikonduktor tipe N, maka kelebihan energi atau elektron tersebut dilepas ke lingkungan, sehingga sisi TEC tersebut menjadi panas.



Gambar 2.13. Prinsip Kerja TEC (Poetro, 2010)

Pada gambar 2.13. menunjukkan elektron mengalir dari semikonduktor tipe P dengan tingkat energi rendah, sehingga akan menyerap panas pada sisi dingin kemudian mengalir ke semikonduktor tipe N yang memiliki tingkat energi yang tinggi. Terjadinya kelebihan energi pada semikonduktor tipe N dilepas ke lingkungan dan mengalir kembali ke semikonduktor tipe P dan seperti itu untuk seterusnya.

## **2.13 Perpindahan Panas**

Seluruh proses perpindahan panas memiliki sistem yang saling berkaitan dan memiliki dasar yang berbeda beda. Termodinamika dalam pertukaran panas sangat memainkan peran hukum pertama dan kedua termodinamika, dengan mekanisme utama ini dapat melakukan transfer energi antara sistem dengan sekitarnya.

### **2.13.1 Perpindahan Panas Konduksi**

Peristiwa perpindahan panas secara konduksi berkaitan dengan perpindahan molekul dan atom yang ada pada benda padat, atau gas. Perpindahan panas konduksi dapat diartikan sebagai proses perpindahan energi di mana energi yang lebih besar bergerak ke energi yang lebih rendah. (Holman, 1983)

Suatu benda yang bertemperatur tinggi memiliki molekul energi yang lebih tinggi juga. Pada proses perpindahan panas, molekul yang memiliki energi lebih tinggi akan berpindah ke molekul yang memiliki energi lebih rendah, hal ini terus terjadi sehingga benda tersebut mengalami pemanasan dan terus berlanjut hingga temperatur yang dicapai. Perpindahan panas konduksi dapat dihitung menggunakan persamaan.

$$\dot{Q} = -K \times \frac{dT}{dx} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana:

- $\dot{Q}$  = Kalor konduksi (w/m<sup>2</sup>)
- K = Konduktivitas termal (W/mK)
- $d_T$  = perubahan temperatur (K)
- $d_x$  = perubahan jarak (m)

### 2.13.2 Perpindahan Panas Konveksi

Peristiwa perpindahan panas secara konveksi dapat terjadi akibat sebuah permukaan yang bersinggungan dengan fluida yang bergerak di sekitarnya. Besarnya nilai perpindahan panas konveksi dapat menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$\dot{Q} = h \times A \times (T_s - T_e) \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana:

- $\dot{Q}$  = Panas Konveksi (Watt)
- h = Koefisien perpindahan panas konveksi (W/m<sup>2</sup>K)
- A = Luas permukaan (m<sup>2</sup>)
- $T_s$  = Temperatur permukaan (K)
- $T_e$  = Temperatur lingkungan (K)

Pengambilan panas dengan konveksi akan lebih cepat apabila mempercepat aliran fluida yang melewati permukaan benda, sehingga peristiwa konveksi yang menggunakan pompa atau daya untuk menghilangkan panas secara konveksi disebut dengan forced convection atau konveksi paksa. Peristiwa konveksi yang tidak menggunakan daya atau pompa sehingga melakukan pendinginan alami dengan lingkungan disebut dengan konveksi bebas.

### 2.13.3 Perpindahan Panas Radiasi

Radiasi termal merupakan energi yang di emisikan oleh benda yang bersuhu tidak nol. Emisi dapat dikaitkan dengan perubahan dalam konfigurasi elektron dari atom atau molekul. Energi yang berasal dari lokasi radiasi berpindah melalui gelombang elektromagnetik. Ketika perpindahan panas secara konduksi dan konveksi harus terdapat medium, perpindahan panas secara radiasi tidak membutuhkan medium untuk memindahkan panas atau dalam keadaan vakum, radiasi mengemisikan atau menyebarkan energi termalnya dari suatu permukaan benda. Heat flux atau laju panas yang dipancarkan oleh permukaan benda nyata akan lebih kecil nilainya dari blackbody atau benda hitam dan nilainya sebagai berikut

$$E = \varepsilon \times \sigma \times T^4 \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana:

E = Daya pancar (W/m<sup>2</sup>)

$\varepsilon$  = Emisivitas ( $0 < \varepsilon < 1$ )

$\sigma$  = Konstanta Stefan Blotzman ( $5,669 \times 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>K)

T = Temperatur absolut (K)

Dengan nilai dalam rentang ( $0 < \varepsilon < 1$ ), daya pancaran memberikan seberapa efisien permukaan memancarkan energi relative terhadap benda hitam atau *blackbody*. Pancaran radiasi dari benda hitam atau *black body* memiliki penyinaran yang ideal meskipun dengan temperatur yang sama. Energi radiasi matahari bergerak pada kecepatan cahaya yaitu  $3 \times 10^8$  serta menyerupai radiasi cahaya. Terdapat karakteristik radiasi dari benda hitam di antaranya adalah tranmisivitas, absorptivitas dan emisivitas. (Incropera, 2007)

## 2.14 *Computing Fluid Dynamic (CFD)*

*Computational Fluid Dynamics* atau CFD adalah alat yang digunakan untuk menganalisis suatu perpindahan panas, aliran fluida, dan fenomena lain yang terasosiasi seperti reaksi kimia yang berdasar simulasi komputer. CFD merupakan suatu cabang dinamika fluida yang menggunakan pengembangan dari metode numerik. Proses penerapan CFD dengan menggunakan iterasi sehingga dapat menampilkan langkah proses CFD dan dapat memberikan solusi ketika menggunakan tahapan analisisnya untuk memahami fenomena aliran yang terjadi. Proses CFD menyelesaikan suatu masalah dengan cara membagi sistem menjadi bagian sel yang kecil dan mengaplikasikan persamaan pada elemen-elemen tersebut untuk mencari penyelesaian numerik seperti mengenai distribusi tekanan dan gradien temperatur.

Teknik penyelesaian masalah dengan *Computational Fluid Dynamics* sebagai alat riset mulai berkembang pada abad ke-20 diiringi dengan perkembangan komputerisasi. Sehingga menjadikan CFD sebagai alat riset ketiga mendahului metode yang sudah ada sebelumnya yaitu metode eksperimen dan metode teori. Pada abad ke-17, peneliti menggunakan metode eksperimen dalam mempelajari dan menganalisa fenomena aliran fluida. Kemudian pada abad ke-18 dan ke-19, terjadi perkembangan teori mekanika fluida di belahan eropa. Teori tersebut digunakan sebagai instrument perhitungan dan untuk mendesain peralatan mekanikal. Pada awalnya, CFD banyak digunakan dalam industri penerbangan dan dirgantara. Saat ini CFD telah berkembang menjadi bagian penting dalam berbagai industri lainnya seperti otomotif, industri kimia, perkapalan, nuklir, dan pembangkit listrik. Bahkan dalam satu dekade terakhir, metode CFD sudah digunakan dalam beberapa industri non-mekanikal seperti industri elektronik, medis, dan lingkungan sebagai alat *research and development (R&D)*.

*Computational Fluid Dynamics* atau CFD digunakan sebagai perantara dari metode eksperimen dan metode teori. CFD menggunakan kelebihan teknologi komputerisasi sebagai alat perhitungan yang dapat melakukan perhitungan hanya dalam rentang mili detik. Untuk dapat melakukan metode CFD perlu berinvestasi pada komputer, *software*, dan biaya listrik saat perhitungan berlangsung. Sedangkan teori hanya bermodalkan perhitungan tangan dan rumus rumus saja. Dari segi waktu CFD juga tidak lebih singkat bila dibandingkan dengan teori karena persamaan yang dihitung sangat banyak dalam bentuk matriks, sedangkan teori hanya menggunakan satu, dua, atau lebih persamaan. Dalam hal asumsi, pada metode eksperimen dibangun atas dasar realita, sehingga tidak menggunakan asumsi. Metode teori dibangun atas dasar asumsi-asumsi. Dan pada metode CFD mampu untuk mengurangi asumsi-asumsi pada metode teori. Dengan metode CFD para peneliti tidak perlu untuk melakukan pengujian berulang-ulang dan dapat membantu untuk memilah desain yang buruk serta konsekuensi biayanya.

Penggunaan CFD dalam industri aliran satu fasa dapat dilakukan untuk memprediksi performa aerodinamika dari pesawat, menentukan momen, menentukan torsi, dan dapat melihat visualisasi aliran. Sehingga dapat menguntungkan dalam pemilihan tipe airfoil yang lebih efisien, optimalisasi desain *part* untuk mengurangi *drag*, dan untuk meningkatkan efisiensi pompa dan kompresor. Dalam industri perpindahan panas, CFD dapat memprediksi persebaran suhu, kecepatan, dan tekanan, memprediksi tingkat kelembaban relatif, memprediksi pertukaran kalor pada *heat exchanger*, dan dapat memprediksi fenomena konduksi, konveksi, dan radiasi. Sehingga metode CFD memiliki keuntungan untuk dapat meningkatkan *human comfort* pada kasus HVAC, dan untuk meningkatkan efektifitas *heat exchanger*.

Terdapat 3 tahapan untuk melakukan metode *Computational Fluid Dynamics* atau CFD diantaranya sebagai berikut:

#### 2.14.1 *Pre-Processing*

*Pre-Processing* merupakan suatu proses awal dalam melakukan simulasi seperti menentukan objek simulasi, menentukan batasan domain analisis, dan membuat model geometri dalam 2D maupun 3D. Setelah model geometri selesai, langkah berikutnya adalah melakukan meshing atau diskritisasi ruang. Atau dengan kata lain mencacah domain menjadi sel-sel kecil.

#### 2.14.2 Proses *Solver*

Pada tahap ini dilakukan penentuan kondisi batas dalam sebuah simulasi CFD, maka semua parameter diproses pada tahapan ini. Seperti penentuan kondisi batas baik inlet, outlet, dan wall pada domain fluida. Dibutuhkan pengetahuan untuk menentukan asumsi pada model dan menentukan parameter-parameter dalam dinamika fluida agar hasil yang diperoleh akurat.

#### 2.14.3 *Post-Processing*

*Post-Processing* merupakan tahap akhir dari proses simulasi, yaitu tahap yang menunjukkan hasil akhir. Pada tahap ini dapat menampilkan kontur warna serta animasi hasil simulasi yang nantinya dapat dianalisis. Sehingga pada hasil dapat dilakukan pengambilan data dari hasil pengujian.

### III. METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada waktu dan tempat penelitian sebagai berikut:

##### 3.1.1 Waktu Penelitian

Waktu penelitian dilakukan pada bulan April 2022 sampai dengan Juni 2022.

##### 3.1.2 Tempat Penelitian

Penelitian dan pengambilan data dilaksanakan di Laboratorium Termodinamika Teknik Mesin Universitas Lampung.

#### 3.2 Parameter Penelitian

Parameter penelitian yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

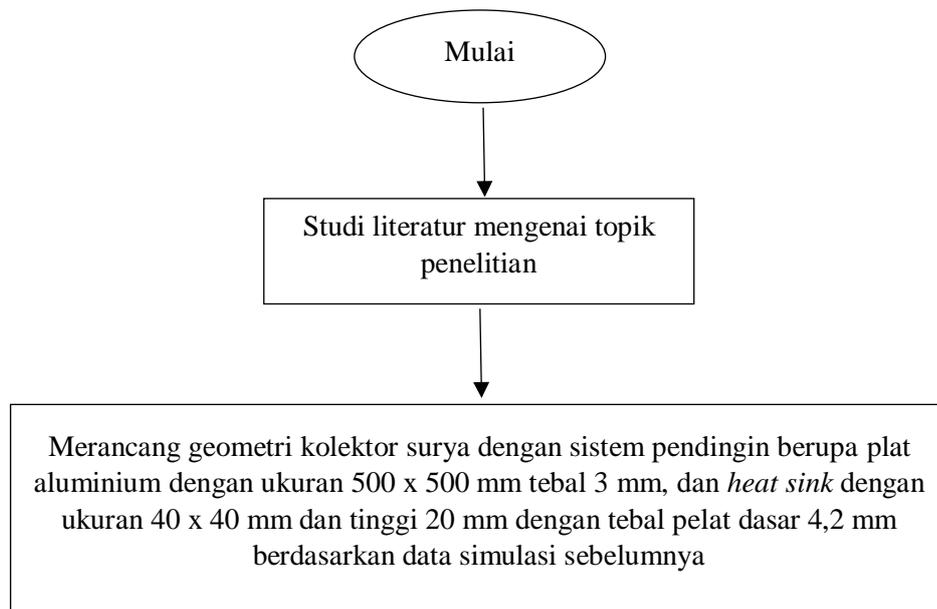
##### 3.2.1 Data Pendukung

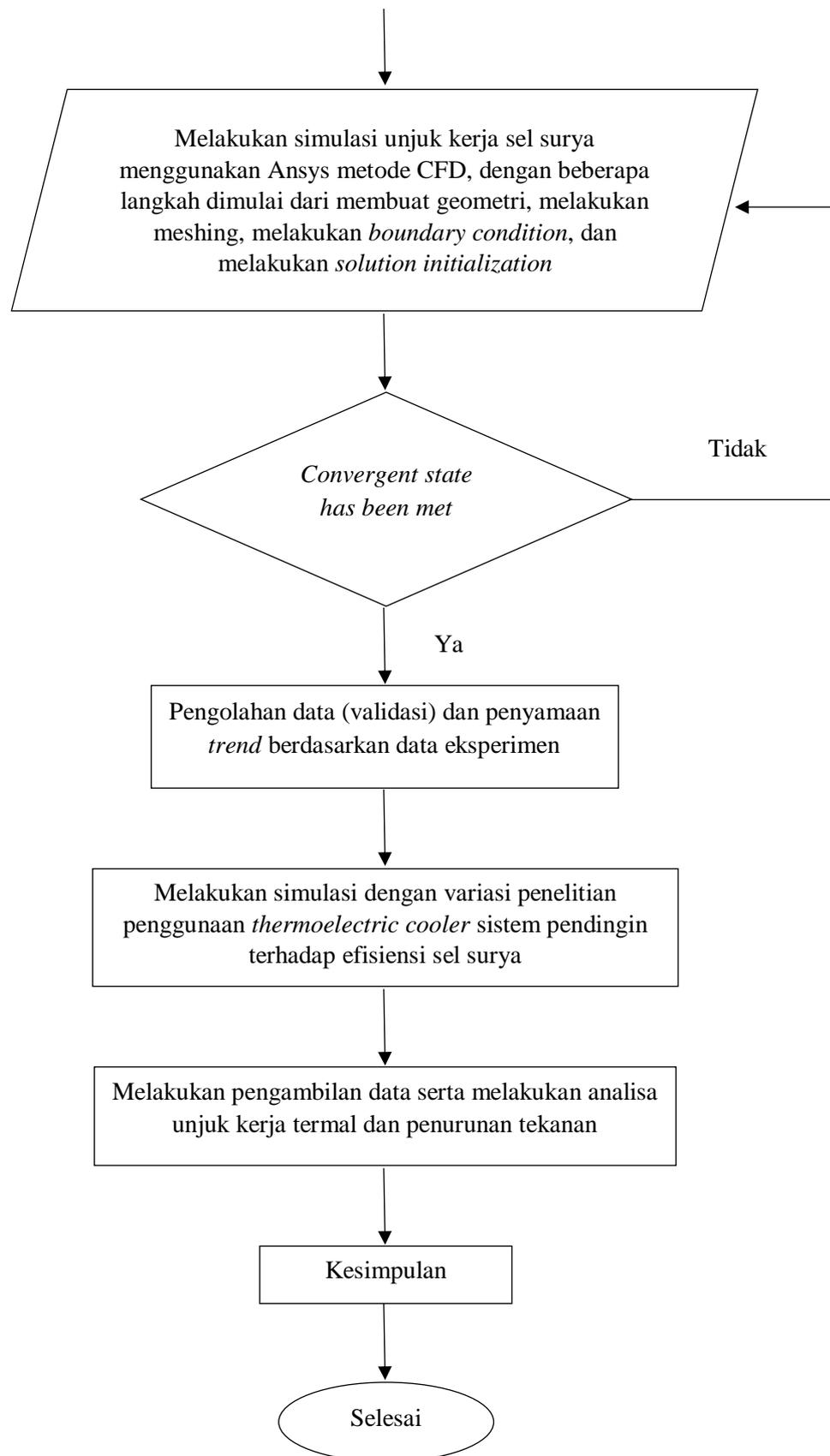
Geometri panel surya menggunakan *heat sink microchannel* dengan ukuran panjang 40 mm, lebar 40 mm, dan tinggi 20 mm dengan ketebalan plat dasar 4,2 mm. Juga menggunakan *thermoelectric cooler* dengan ukuran panjang 40 mm dan lebar 40 mm dengan ketebalan 3,3 mm. Panjang panel surya yaitu 500 mm dan lebar 500 mm.

### 3.2.2 Simulasi Karakteristik Unjuk Kerja

Simulasi unjuk kerja dilakukan untuk melihat unjuk kerja termal dan juga penurunan temperatur yang terjadi pada sel surya dengan sistem pendingin berupa plat aluminium dan *heat sink microchannel*. Dilakukan variasi penggunaan *thermoelectric cooler* untuk melihat pengaruh dan potensi penggunaan TEC kedepannya. Proses simulasi dilakukan menggunakan aplikasi CFD yaitu Ansys 2022 R1 dan perancangan geometri dilakukan menggunakan aplikasi Autodesk Inventor 2021.

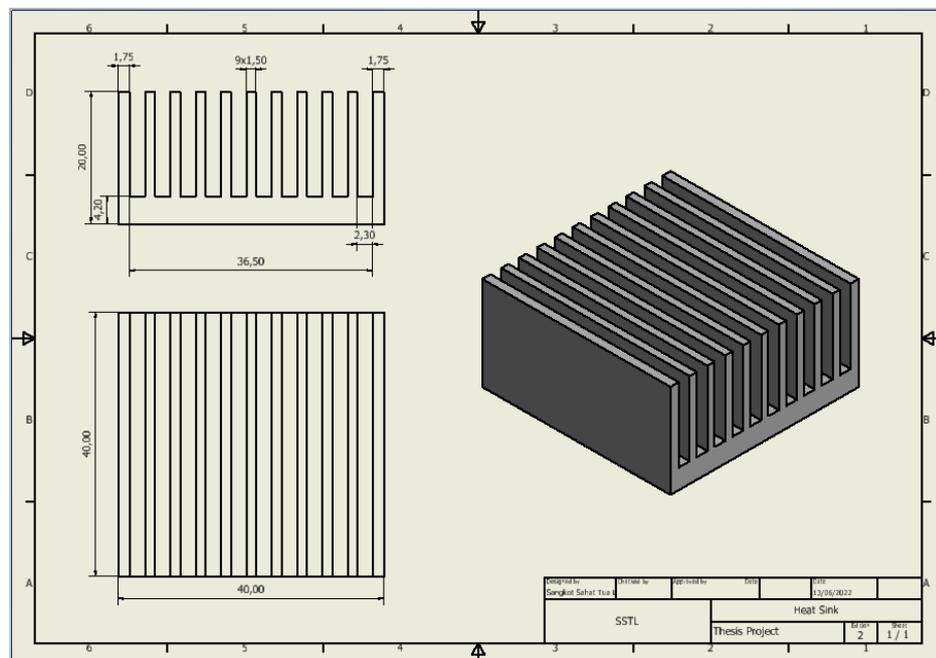
### 3.3 Diagram Alir Metode Penelitian



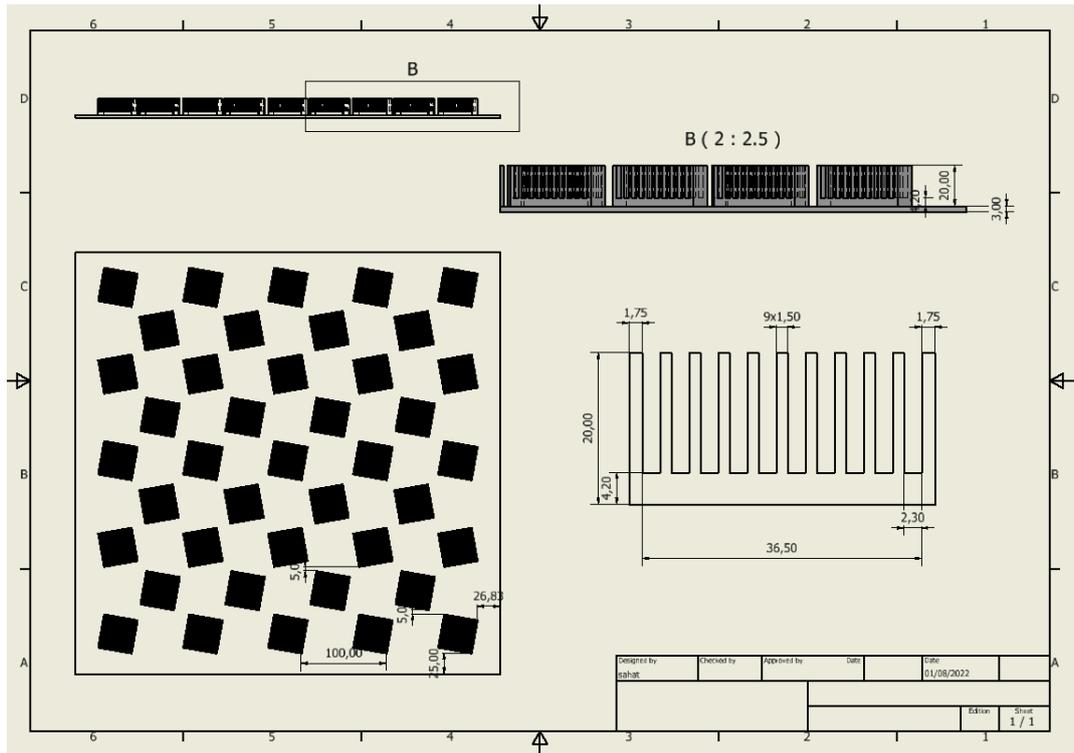


### 3.4 Perancangan Desain Geometri Sistem Pendingin

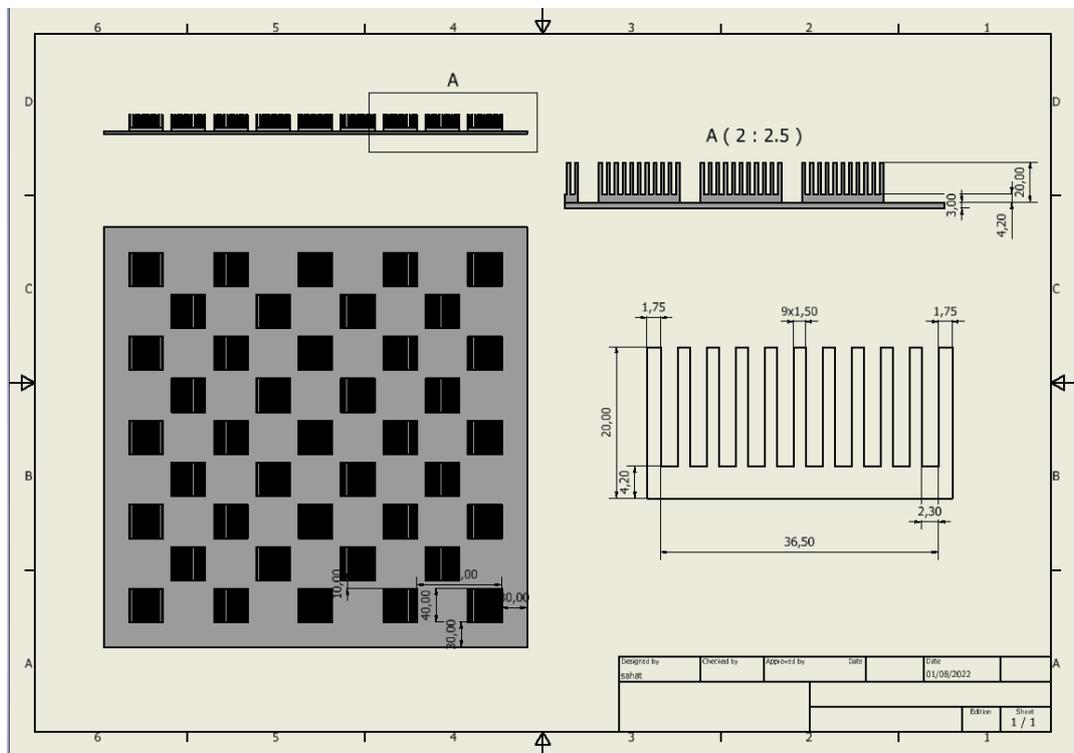
Penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahapan, dimulai dari prosedur perancangan desain *heat sink microchannel* pada sel surya tipe kolektor plat datar dengan menggunakan Autodesk Inventor 2021. Pengujian dilakukan untuk mengetahui variasi pola susunan yang paling optimal dalam proses penyerapan panas dari kolektor surya, selama proses tersebut dilihat kemampuan untuk menurunkan temperatur permukaan sel surya terendah. Heat Sink Microchannel disusun di bagian bawah dari pada PV dan plat alumunium. Heat Sink jenis microchannel memiliki geometri 40 mm x 40 mm dengan tinggi 20 mm. Penampang PV berukuran 500 mm x 500 mm dan dilapisi plat alumunium dengan ukuran yang sama di bagian bawahnya. Heat Sink Microchannel sebanyak 41 buah divariasikan dengan kemiringan sudut  $0^\circ$  dan  $10^\circ$ .



Gambar 3.1. Bentuk Geometri *Heat Sink Microchannel*



Gambar 3.2. Bentuk Geometri Heat Sink 10°



Gambar 3.3. Bentuk geometri Heat Sink 0°

### 3.5 Pengujian Simulasi CFD

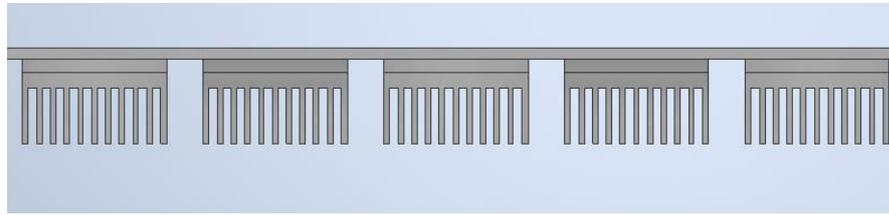
Pengujian secara simulasi pada penelitian ini dilakukan dengan bantuan perangkat lunak *Ansys Fluid Flow Fluent*. Langkah awal yang harus dilakukan adalah sebagai berikut.

1. Melakukan proses desain geometri pada aplikasi *Autodesk Inventor*.
2. Melakukan impor data geometri ke perangkat lunak *Ansys Design Modeler* untuk membuat domain fluida.
3. Membuka jendela *Ansys Fluid Flow Fluent* dan memastikan bahwa simulasi adalah *fluent*.
4. Melakukan *input* geometri ke dalam *Ansys Design Modeler* berdasarkan file yang telah di *save* dengan format *.stp*.
5. Melakukan seting di dalam *Ansys Fluid Flow Fluent* mulai dari *meshing*, *setting setup flow dan result*. Pada saat *meshing* dilakukan pemberian atau penentuan daerah benda uji.
6. Melakukan seting pada bagian *meshing* di antaranya adalah bagian *meshing control* dan *size control*. Dan setelah data *up to date* maka bisa langsung di *generate*.
7. Melakukan seting diantaranya adalah pemodelan energi, radiasi, penambahan material, penentuan kondisi batas, dan sebagainya.
8. Mengolah data pada bagian result dimana bentuk hasil yang bisa disajikan sebagai bahan dari penelitian di antara adalah *vector*, *contour temperature* dan *pressure drop* dari simulasi yang dilakukan.

### 3.6 Rancang Bangun Keseluruhan

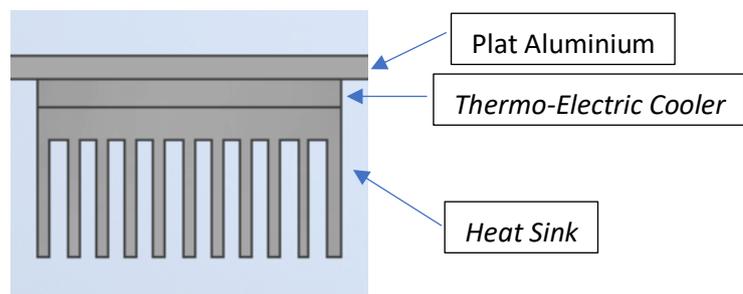
Sebelum melakukan simulasi CFD dengan *Ansys Workbench*, langkah yang pertama kali dilakukan adalah dengan mendesain geometri benda uji dengan bantuan aplikasi *Autodesk Inventor*. Pada aplikasi *Autodesk Inventor* dilakukan

pemodelan geometri PV *cell* beserta sistem pendingin yang dipilih yaitu plat aluminium, TEC, dan *heat sink*.



Gambar 3.4. Desain PV, plat aluminium, TEC, dan *heat sink*

Gambar 3.4 merupakan desain geometri dari PV *cell* dan plat aluminium yang berukuran 500 mm x 500 mm, dengan susunan TEC dan *heat sink microchannel* dibagian bawahnya yang berjumlah 41 buah. Susunan sistem pendingin berupa *heat sink microchannel* di desain agar aliran udara yang masuk dapat melewati seluruh bagian susunan *heat sink* hingga bagian belakang. Apabila hal tersebut dapat dipenuhi maka akan terjadi perpindahan panas yang baik nantinya. Saat variasi dilakukan juga diharapkan penyusunan sistem pendingin diusahakan agar mendapatkan *air flow* terbaik. Karena permasalahan pada umumnya, *air flow* yang melewati sistem pendingin dari PV tidak terlalu baik.

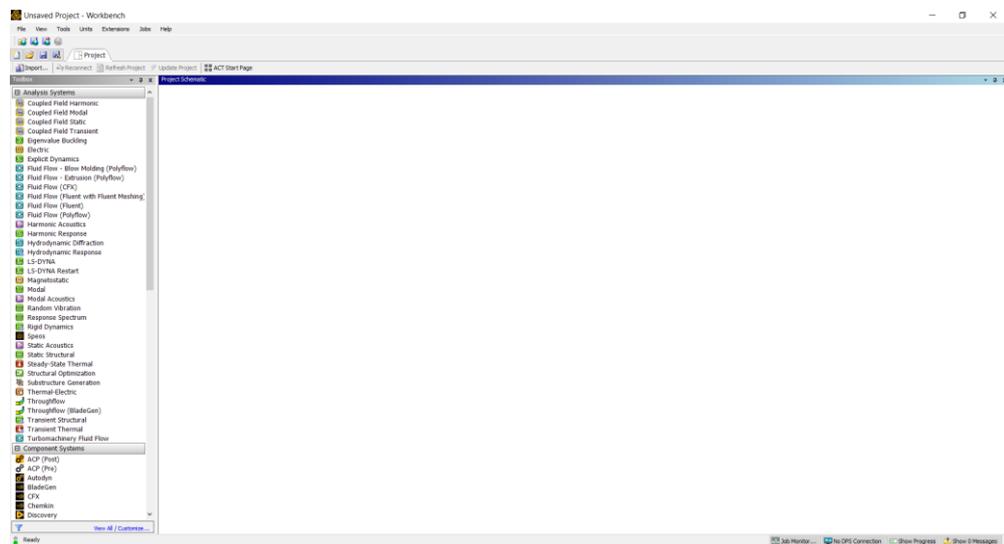


Gambar 3.5. Detail lapisan susunan sistem pendingin panel surya

Gambar 3.5 memperlihatkan bahwa sistem pendinginan dari panel surya memiliki beberapa jenis. Pada lapisan pertama merupakan lapisan plat

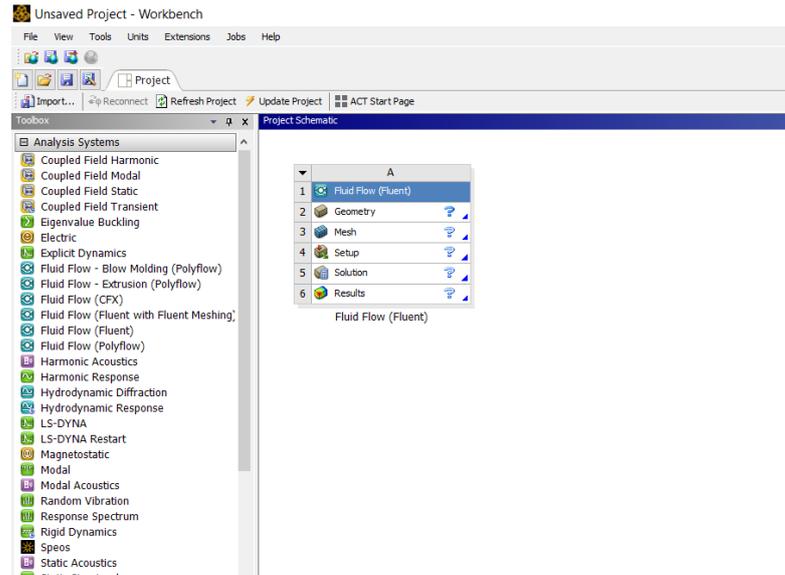
aluminium, diikuti dengan *thermos-electric cooler*, dan ditambah dengan *heat sink microchannel*. Dengan digunakannya beberapa sistem tersebut diharapkan terjadi penurunan temperatur permukaan PV yang maksimal.

Setelah desain panel surya beserta sistem pendinginnya selesai, maka tahap selanjutnya dapat dilakukan. Tahapan selanjutnya adalah melakukan simulasi dengan menggunakan bantuan *software Ansys fluid flow fluent*. Pada *software* ini dapat kita lihat bagaimana proses termal dan fenomena aliran yang terjadi pada panel surya.



Gambar 3.6. Tampilan awal *software Ansys*

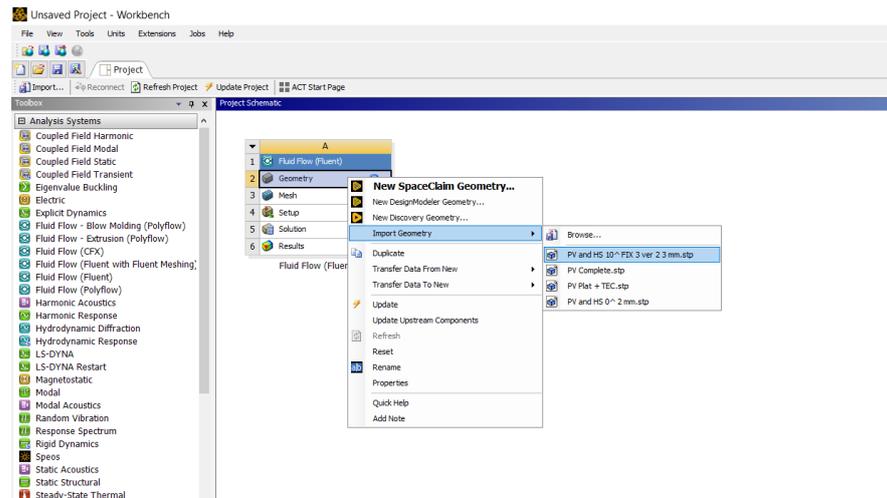
Pada *software Ansys* terdapat beberapa menu yang dapat dipilih untuk melakukan simulasi, hal tersebut ditentukan dengan tujuan dilakukannya simulasi. Pada simulasi ini dipilih simulasi dengan *fluid flow (fluent)* dimana kegunaannya adalah untuk mengetahui perpindahan-perpindahan panas yang terjadi dan fenomena aliran yang terjadi.



Gambar 3.7. Tahapan simulasi dengan *fluid flow fluent*

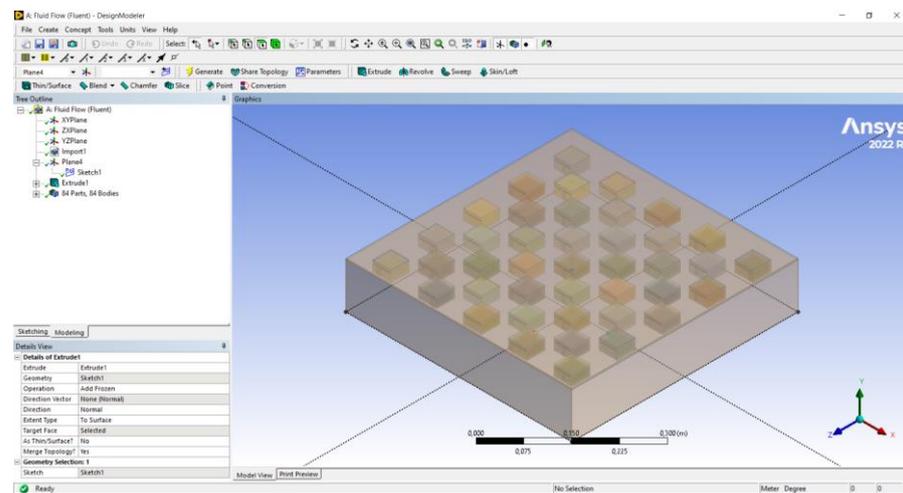
### 3.6.1. Geometri

Pada simulasi dengan menggunakan *fluid flow fluent* terdapat beberapa tahapan yang harus dilalui. Dimulai dengan melakukan desain atau penentuan geometri, *meshing*, penentuan *set-up* hingga nanti diperoleh hasil dari simulasi yang dilakukan. Tahapan pertama adalah dengan melakukan desain geometri. Pada kasus ini desain geometri telah dilakukan pada aplikasi yang berbeda yaitu dengan menggunakan *software Autodesk Inventor*.



Gambar 3.8. Proses input geometri dari Autodesk Inventor

Oleh karena desain geometri telah dilakukan dengan menggunakan Autodesk Inventor, maka pada tahapan input geometri di Ansys kita hanya melakukan *import geometry*. Setelah dilakukan *import geometry* maka langkah selanjutnya adalah dengan memasukkan area domain fluida.



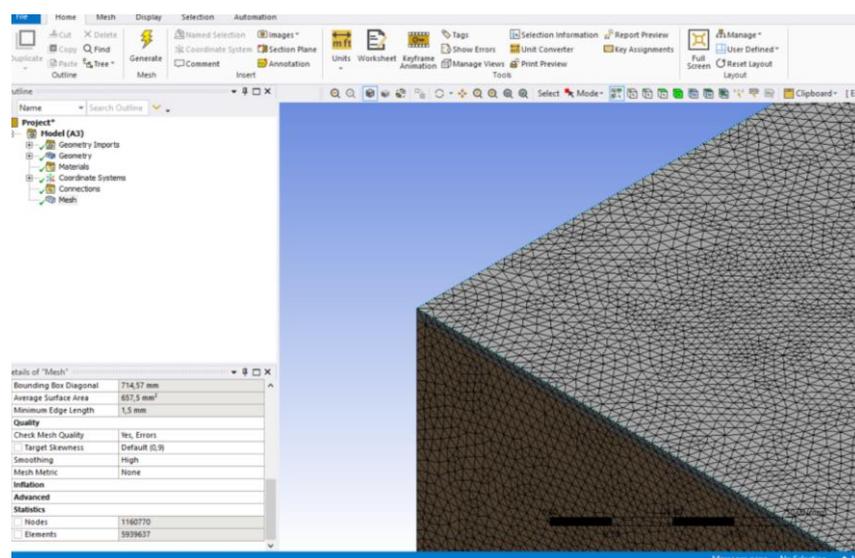
Gambar 3.9. Proses pembuatan domain fluida

Gambar 3.9. memperlihatkan area ataupun domain fluida yang bekerja pada simulasi panel surya dengan menggunakan *heat sink microchannel*.

Setelah melakukan *extrude* definisikan jenis domainnya, pastikan keadaan domain adalah fluida. Domain fluida bertujuan agar dapat mensimulasikan aliran udara paksa yang digunakan pada bagian saluran inlet saluran fluida. Sehingga kecepatan aliran udara masuk juga dapat ditentukan. Analisis aliran fluida juga dapat dilakukan seperti turbulensi aliran yang terjadi, apabila domain fluida telah tersedia. Setelah desain geometri dan pendefinisian jenis bahan yang digunakan telah selesai, maka tahap selanjutnya adalah dengan melakukan meshing. Meshing adalah salah satu tahap yang harus dilakukan dalam melakukan simulasi CFD, dan merupakan tahap kedua dalam simulasi dengan *fluid flow fluent*.

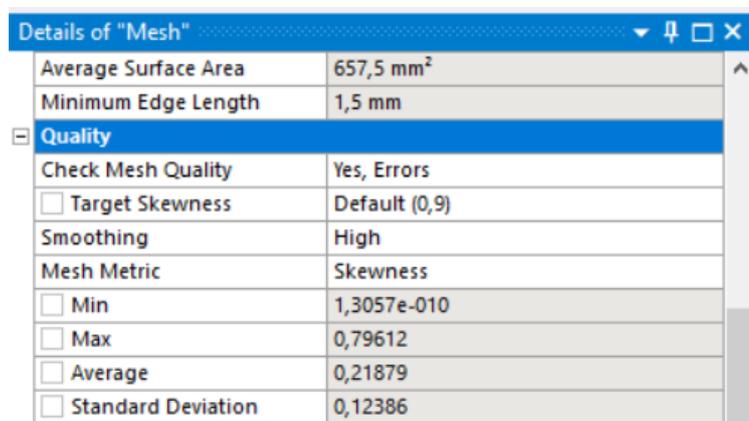
### 3.6.2. Meshing

Pada simulasi dengan sistem *fluid flow fluent*, *meshing* merupakan salah satu tahapan yang penting karena hasil simulasi yang baik ditentukan dengan kualitas *meshing* yang dilakukan. Apabila *meshing* yang diperoleh kurang baik maka hasil yang diperoleh nantinya tidak akan akurat. Jadi tahapan *meshing* ini merupakan tahapan yang penting untuk diperhatikan.



Gambar 3.10 Tahapan *meshing* pada simulasi *fluid flow fluent*

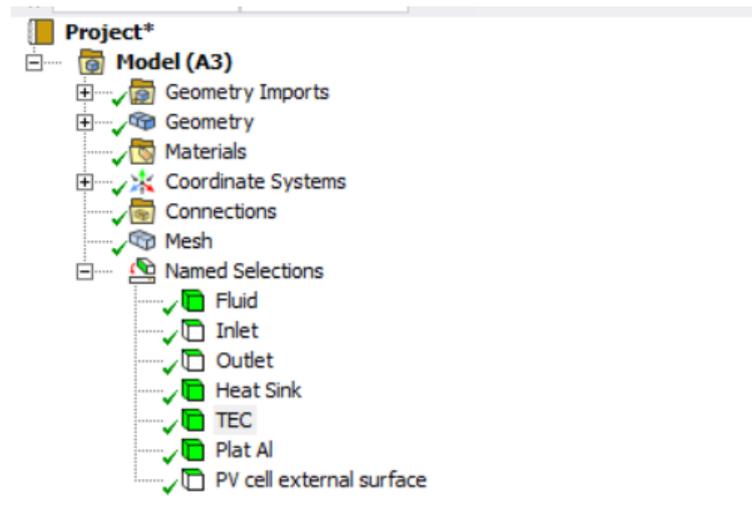
Gambar 3.10 merupakan bagian ataupun tahapan *meshing* yang harus dilewati pada simulasi dengan menggunakan *fluid flow fluent*. Pada bagian ini diatur *element size* dari benda uji yaitu 2,5 mm dengan *smoothing high* untuk hasil yang maksimal. Diperoleh jumlah elemen sebanyak 1,16 juta yang sudah melebihi dari rata rata nilai *independence grid test*. Untuk memastikan apakah *meshing* yang kita lakukan sudah benar, maka hal tersebut dapat dilihat pada bagian *mesh metric* dan pilih bagian *skewness* lalu dari angka tersebut dapat kita analisis apakah *meshing* yang diperoleh telah cukup baik atau tidak.



Details of "Mesh"	
Average Surface Area	657,5 mm <sup>2</sup>
Minimum Edge Length	1,5 mm
Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0,9)
Smoothing	High
Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	1,3057e-010
<input type="checkbox"/> Max	0,79612
<input type="checkbox"/> Average	0,21879
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,12386

Gambar 3.11. Kualitas *mesh* yang diperoleh

*Skewness ratio* merupakan salah satu indikator untuk mengetahui kualitas *mesh* yang kita lakukan. Nilai *skewness ratio* dapat kita lihat pada bagian *mesh metric*. Nilai maksimum yang diperbolehkan adalah 0,9 dan semakin rendah nilainya akan semakin bagus kualitas *meshing* yang dilakukan. Semakin rendah nilai rata-rata yang diperoleh juga akan dapat mengurangi nilai eror dari simulasi yang dilakukan.

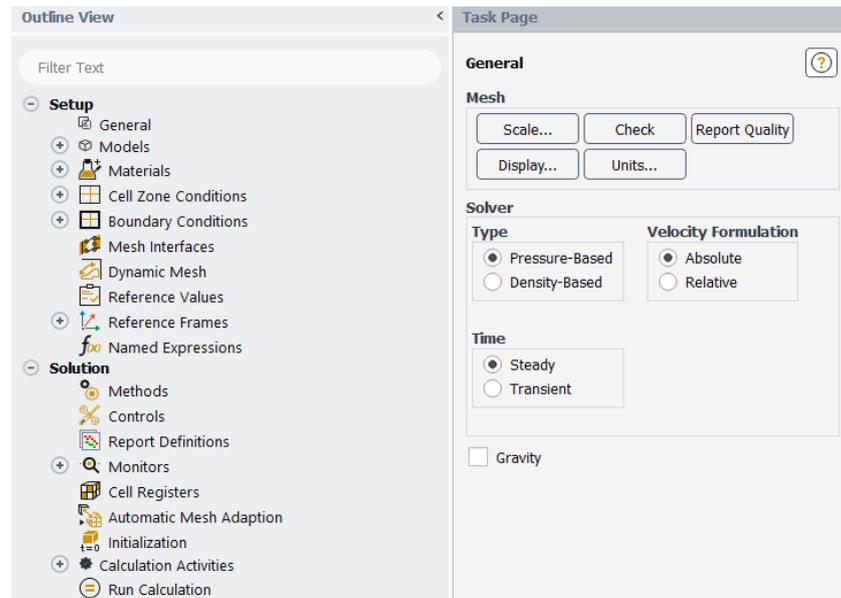


Gambar 3.12. Tahap pemberian nama bagian-bagian benda uji

Setelah *meshing* selesai dilakukan, maka tahap selanjutnya dapat dilakukan yaitu tahapan pemberian nama untuk bagian-bagian benda uji. Dimulai dari bagian domain fluida, bagian saluran masuk dan keluaran fluida yang akan diberikan secara paksa, bagian pelat aluminium, bagian *thermoelectric cooler*, bagian *heat sink microchannel*, dan bagian dari *PV cell* atau lapisan panel suryanya. Hal ini dilakukan agar kita dapat melakukan definisi set-up atau pemodelan benda uji pada tahapan selanjutnya.

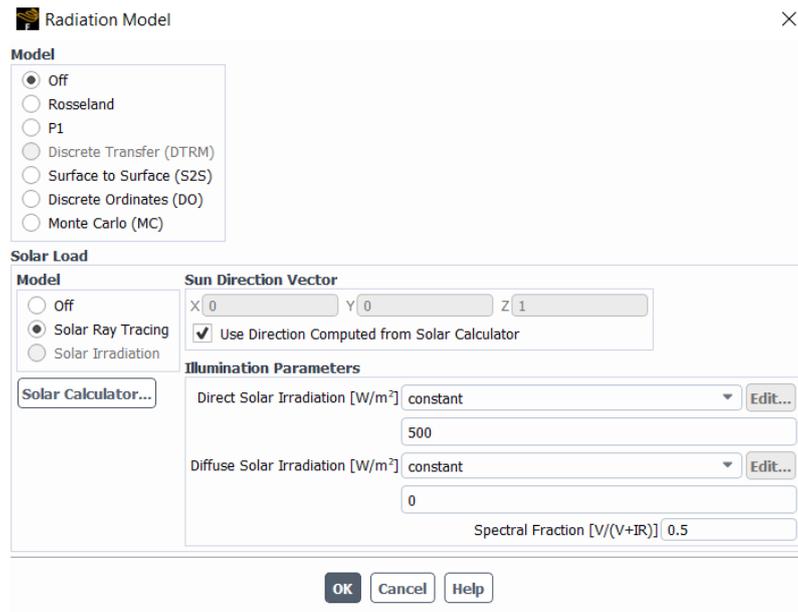
### 3.6.3. Set-Up

Setelah tahap kedua selesai dilakukan yaitu tahap melakukan *meshing*, maka tahap selanjutnya adalah dengan melakukan pemodelan benda uji seperti dengan melakukan penentuan kondisi batas. Pada tahap ini merupakan proses yang penting karena hampir semua parameter di proses disini.



Gambar 3.13. Proses *set-up fluid flow fluent*

Pada tahapan *set-up* ini dilakukan beberapa hal penting. Pertama pada bagian general kita harus mengatur nilai gravitasi dan memilih kondisi terjadinya proses simulasi yaitu pada kondisi *steady* atau *transient*. Setelah itu pada bagian '*Models*' terdapat beberapa parameter yang harus diatur seperti mengaktifkan persamaan energi, mengatur kondisi viskos dengan memilih pemodelan k-epsilon (2 eqn) dengan k-epsilon model yaitu RNG dan *buoyancy effect* adalah *full*. Pemilihan atau penentuan model ini berdasarkan pada penelitian simulasi yang telah dilakukan sebelumnya. Setelah itu tahap selanjutnya adalah dengan menentukan parameter pada bagian radiasi. Pada bagian ini kita menentukan metode atau cara pensimulasian radiasi matahari. Artinya radiasi matahari yang datang, dapat di simulasikan dengan beberapa cara. Hal tersebut juga berpengaruh pada hasil akhir yang akan diperoleh.



Gambar 3.14. Pemodelan radiasi matahari

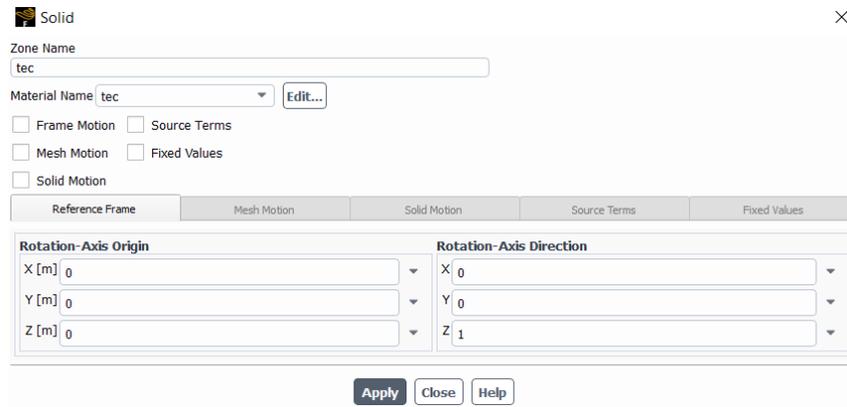
Pada tahap pemodelan radiasi matahari terdapat beberapa metode. Seperti dengan sistem *heat generation*, *solar ray tracing*, dan *enclosure*. Dari beberapa metode tersebut metode solar ray tracing merupakan metode yang paling praktis dan akurat. Oleh karena penggunaannya yang praktis, metode ini dipilih sebagai sistem pemodelan radiasi matahari pada kasus ini. Dengan menggunakan metode *solar ray tracing* kita dapat menentukan arah datangnya sinar matahari dengan jumlah radiasi matahari yang mengenai benda uji dimana pada kasus ini merupakan lapisan panel surya yaitu *PV cell*. Setelah jumlah radiasi matahari ditentukan, tahap selanjutnya adalah dengan menentukan berapa banyak jumlah matahari yang terdifusi atau yang dipancarkan kembali. Pada kasus ini nilai radiasi matahari yang mengenai *PV cell* adalah  $500 \text{ W/m}^2$  dengan nilai matahari yang dipancarkan kembali adalah 0. Arah datangnya sinar matahari adalah dari sumbu Y karena bagian *PV cell* terletak pada bagian paling atas di sumbu Y. Maka dengan ditentukannya parameter tersebut, radiasi matahari akan datang dan mengenai *PV cell* terlebih dahulu. Setelah mengenai *PV cell* efek panas yang terjadi akan mengenai bagian bagian lainnya terutama bagian bagian yang langsung

bersebalahan dengan PV *cell*. Bagian tersebut adalah pelat aluminium dan sistem pendingin seperti *heat sink* dan *thermoelectric cooler*. Maka udara yang melewati saluran juga akan mempengaruhi temperatur permukaan dari PV *cell*. Setelah penentuan model selesai dilakukan, maka tahap selanjutnya adalah dengan menentukan material yang akan digunakan pada simulasi benda uji.

The screenshot shows the 'Create/Edit Materials' dialog box. The 'Name' field contains 'pv-cell'. The 'Material Type' is set to 'solid'. The 'Order Materials by' section has 'Name' selected. The 'Chemical Formula' field contains 'pv'. The 'Fluent Solid Materials' dropdown is set to 'pv-cell (pv)'. The 'Mixture' dropdown is set to 'none'. The 'Properties' section shows three properties: Density [kg/m³] with a value of 2330, Cp (Specific Heat) [J/(kg K)] with a value of 677, and Thermal Conductivity [W/(m K)] with a value of 148. At the bottom, there are buttons for 'Change/Create', 'Delete', 'Close', and 'Help'.

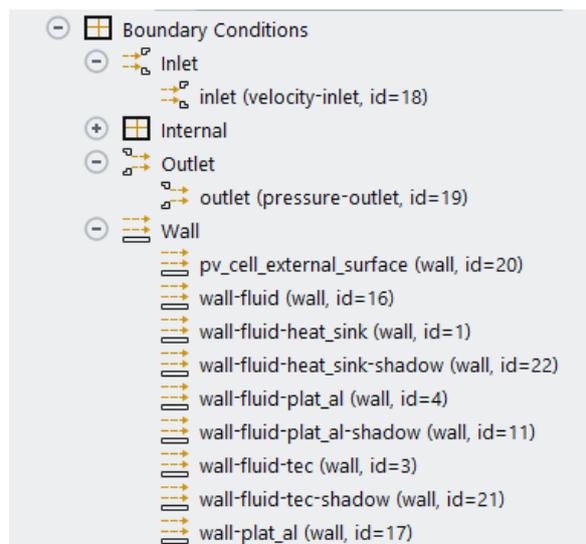
Gambar 3.15 Penambahan jenis material baru

Pada tahap ini pastikan material fluida adalah udara. Untuk domain solid dapat ditentukan satu persatu, dimulai dari bahan pelat yaitu aluminium. Domain solid selanjutnya adalah PV *cell* dan TEC, pada *database* yang tersedia bahan dari domain solid tersebut belum terdaftar. Oleh karena itu, kita harus memasukkan data-data baru tersebut agar dapat digunakan pada simulasi yang dijalankan. Data baru yang perlu dimasukkan merupakan data dari *thermal properties* saja, seperti densitas, panas spesifik bahan, dan konduktifitas termal bahan. Tahap selanjutnya adalah dengan menentukan *cell zone conditions*, dimana kita harus menentukan atau memastikan bahan atau material dari bagian bagian benda uji.



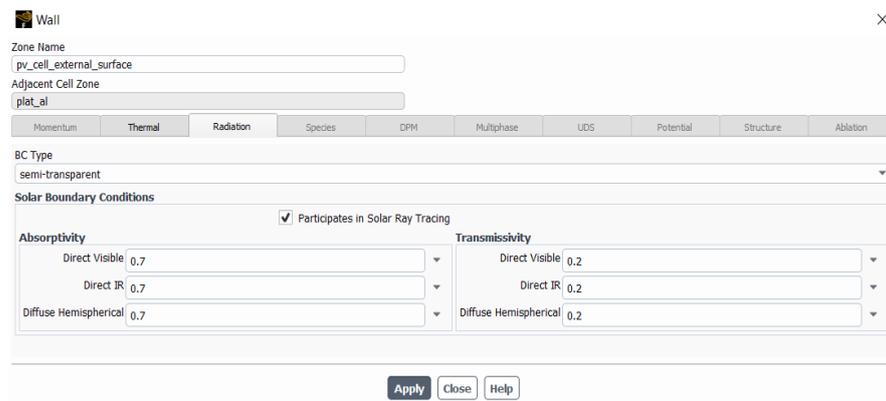
Gambar 3.16 Penentuan bahan dari bagian-bagian benda uji

Pada bagian penentuan *cell zone conditions* di domain solid, pengaturan bawaannya adalah material aluminium. Sehingga pada tahap ini kita harus memastikan kembali bahwa bahan atau material yang telah di *input* sebelumnya, sesuai dengan domain solid di bagian *cell zone conditions*. Seperti pada domain solid TEC, pada awalnya '*material name*' bawaannya adalah aluminium sehingga kita harus merubahnya menjadi bahan TEC.



Gambar 3.17. Pengaturan kondisi batas

Selanjutnya adalah pengaturan kondisi batas, dengan beberapa parameter yang harus diperhatikan seperti pada bagian *inlet*, *outlet*, dan seluruh bagian *wall*. Pada bagian *inlet* kita dapat mengatur kecepatan masuk aliran fluida, temperatur masuk fluida, dan mengatur intensitas turbulensi. Pada bagian *outlet* juga diberikan pengaturan yang sama dengan pengaturan pada bagian *inlet* dengan kecepatan masuk fluida sebesar 0,5 m/s dengan temperatur 34,85 °C.

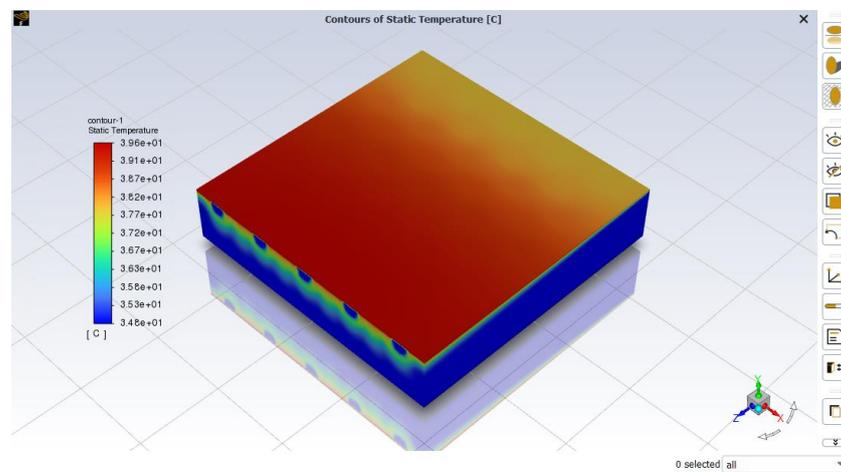


Gambar 3.18. Pengaturan radiasi pada *wall PV cell*

Pada bagian pengaturan *wall PV cell*, kondisi termal yang terjadi adalah dengan konveksi dengan koefisien perpindahan panas konveksi senilai 8 W/m<sup>2</sup>.K. Kondisi lapisan merupakan semi transparan, dan ceklis kolom '*Participates in Solar Ray Tracing*'. Dengan melakukan ceklis pada kolom tersebut maka lapisan dari *PV cell* berarti masuk dalam kategori bagian yang terkena simulasi radiasi matahari. Oleh karena itu bagian *wall* yang lain tidak perlu dimasukkan ke bagian yang mengikuti sistem radiasi *solar ray tracing*. Sehingga bagian *wall* yang lain harus di *unchecked* dari kolom '*Participates in Solar Ray Tracing*'. Setelah itu pengaturan atau *set-up* selesai dilakukan dan selanjutnya adalah tahap melakukan perhitungan atau disebut juga dengan *run calculation*. Namun sebelum itu harus dilakukan tahap *initialization* terlebih dahulu.

### 3.6.4. Solutions and Results

Pada tahap ini merupakan bagian hasil dari simulasi yang kita lakukan. Pada tahap ini kita juga dapat melakukan analisa dari pemodelan simulasi yang kita lakukan. Ada berbagai macam analisa yang dapat kita lakukan seperti temperatur baik pada permukaan panel surya maupun temperatur fluida yang bekerja. Analisa terhadap aliran fluida seperti turbulensi yang terjadi juga dapat terlihat pada bagian ini.



Gambar 3.19. Hasil kontur temperatur

Gambar 3.19 merupakan hasil kontur temperatur setelah simulasi dijalankan. Kontur temperatur tersebut merupakan gambaran dari seluruh domain solid dan fluida. Terlihat pada Gambar 3.19 bahwa kontur temperatur permukaan PV cell berwarna oranye hingga kemerahan, artinya temperatur PV cell lebih dingin terletak pada bagian saluran masuk dan semakin meningkat temperaturnya pada bagian keluaran. Sehingga diperoleh temperature maksimum permukaan PV sebesar 39,6 °C. Sedangkan kontur yang berwarna biru merupakan gambar dari domain fluida yang melintasi saluran masuk hingga keluar.

## V. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat diambil berdasarkan pengembangan penelitian sistem pendingin PV cell menggunakan *heat sink microchannel* dengan variasi sudut dan *thermos electric cooler* dengan metode CFD adalah sebagai berikut:

1. Unjuk kerja dari kedua variasi sudut pola susunan *heat sink* 0° dan 10° adalah bahwa kedua variasi tersebut dapat menurunkan temperatur permukaan PV cell dengan baik. Penurunan temperatur saat menggunakan plat aluminium dan *heat sink microchannel* terjadi sebesar 15,425°C pada variasi 0° dan penurunan sebesar 15,967 °C pada variasi 10°. Penurunan temperatur yang diperoleh juga lebih rendah dari pada penelitian yang dilakukan oleh Popovici (2015) sebelumnya yaitu sebesar 14,51°C.
2. Temperatur PV pada variasi sudut 0° diperoleh sebesar 38,595°C pada kecepatan aliran 0,5 m/s, 38,251°C pada kecepatan aliran 1,5 m/s, dan 37,862 °C pada kecepatan aliran 2,5 m/s. Sedangkan pada variasi sudut 10° diperoleh temperatur sebesar 38,063°C pada kecepatan aliran 0,5 m/s, 37,601°C pada kecepatan aliran 1,5 m/s, dan 36,889°C pada kecepatan aliran 2,5 m/s.
3. Penggunaan TEC pada simulasi yang dilakukan dapat menjadi potensi pemanfaatan panas berlebih pada panel surya oleh karena perbedaan temperatur yang terjadi pada kedua sisi TEC.

## 5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan pada penelitian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Untuk penelitian selanjutnya perlu dilakukan *grid independence test* pada saat melakukan *meshing*, untuk mengetahui pengaruh jumlah elemen terhadap hasil yang akan diperoleh.
2. Perlu dilakukannya penelitian lebih lanjut pada tambahan variasi seperti pada jumlah radiasi matahari yang bekerja pada proses simulasi, untuk mengetahui keakuratan pemodelan simulasi yang telah dibuat.
3. Perlu adanya penelitian lebih lanjut secara eksperimental untuk mendapatkan hasil yang akurat sebagai referensi, ataupun mencari hasil referensi eksperimental dari sumber jurnal lainnya.
4. Perlu dilakukannya penelitian lebih lanjut dengan menggunakan beberapa metode CFD untuk melihat apakah hasil yang diperoleh sudah akurat, seperti metode *enclosure*, *solar ray tracing*, dan *heat generation*.
5. Sebaiknya pada penelitian selanjutnya penggunaan TEC (*Thermo-Electric Cooler*) lebih dapat dimaksimalkan dengan menggunakan berbagai macam variasi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Arifin, Muhammad., Margareta, Desyana Olenka dan Trimaryana, Okky Fajar. 2017. Pengaruh Intensitas Cahaya Terhadap Efisiensi Konversi Sel Surya Berbasis *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC). Teknik Elektro, Politeknik Negeri Batam, Batam.
- Arifin, Zainal., Suyitno., Tjahjana, Dominicus Danardono Dwi Prija., Juwana, Wibawa Endra., Putra, Mufti Reza Aulia and Prabowo, Aditya Rio. 2020. The Effect of Heat Sink Properties on Solar Cell Cooling Systems. Department of Mechanical Engineering, Universitas Sebelas Maret, Surakarta, Indonesia.
- Avella, Maurizio., Buzarovska, Aleksandra., Errico, Maria Emanuela., Gentile, Gennaro and Grozdanov, Anita. 2009. Eco- Challenges of Bio-Based Polymer Composites. Institute for Chemistry and Technology of Polymers, Naples, Italy.
- Egab, Karim., Okab, Abdullah., Dywan, Hashim S. and Oudah, Saad K. 2020. Enhancing a Solar Panel Cooling System Using an Air Heat Sink With Different Fin Configurations. Electromechanical System Engineering, Southern Technical University, Iraq.
- Harahap, Partaonan. 2020. Pengaruh Temperatur Permukaan Panel Surya Terhadap Daya Yang Dihasilkan Dari Berbagai Jenis Sel Surya. Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

- Hutahaean, Romario. 2018. Studi Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Pada Komplek Perumahan Royal Garden Medan. Teknik Elektro, Universitas Sumatera Utara, Medan.
- Irwanto, M., dkk. 2017. *Photovoltaic Module Performance Analysis of Aluminum and Zinc Thin Metal Sheet Attached With Direct Current Brushless Fans Cooling System*. Medan Institute of Technology, Indonesia.
- Isyanto, Haris., Budiyanto., Fadlioni dan Chamdareno, Prian Gagani. 2017. Pendingin Untuk Peningkatan Daya Keluaran Panel Surya. Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Jakarta, Jakarta.
- Kristi, Ardath. 2020. Perancangan Sistem Pendingin Photovoltaic Dengan Memanfaatkan Kontroler Water Spray. Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Elektronik, Bandung.
- Kumar, R. Senthil., Priyadharshini N. Puja and Natarajan E. 2015. *Experimental and Numerical Analysis of Photovoltaic Solar Panels Using Thermoelectric Cooling*. Anna University, India.
- Madani, Fitra dan Rasali, Lisa. 2018. Pemanfaatan Energi Surya Sebagai Suplai Cadangan Pada Ruangan Jurusan Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Makassar. Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Makassar, Makassar.
- Maulana, Mochammad Iedvan., Naubnome, Viktor dan Sumarjo, Jojo. 2021. Pengaruh Iradiasi dan Temperatur Terhadap Efisiensi Daya Keluaran Pada Pemodelan *Photovoltaic Canadian Solar 270 wp*. Universitas Singaperbangsa Karawang, Karawang.

- Moshfegh, Hossein., Eslami, Mohammad and Hosseini, Arian. 2017. Thermoelectric Cooling of a Photovoltaic Panel. Mechanical Engineering, Shiraz University, Iran.
- Muchammad dan Setiawan, Hendri. 2011. Peningkatan Efisiensi Modul Surya 50 WP Dengan Penambahan Reflektor. Teknik Mesin, Universitas Diponegoro, Semarang.
- Pahlevi, Reza. 2014. Pengujian Karakteristik Panel Surya Berdasarkan Intensitas Tenaga Surya. Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah, Surakarta.
- Panjaitan, Monika. 2020. Sistem Pendingin *Thermo Electric Cooler* (TEC) Berbasis Tenaga Surya. Departemen Fisika, Universitas Sumatera Utara, Medan.
- Pawawoi, Andi dan Zulfahmi. 2019. Penambahan Sistem Pendingin *Heatsink* Untuk Optimasi Penggunaan Reflektor Pada Panel Surya. Teknik Elektro, Universitas Andalas, Padang.
- Pido, Rifaldo., Himran, Syukri dan Mahmuddin. 2018. Analisa Pengaruh Pendinginan Sel Surya Terhadap Daya Keluaran dan Efisiensi. Universitas Muslim Indonesia, Makassar.
- Popovici, Catalin George., Hudisteanu, Sebastian Valeriu and Mateescu, Theodor Dorin. 2015. *Efficiency Improvement of Photovoltaic Panels by Using Air Cooled Heat Sinks. Technical University of Iasi. Romania*
- Prasetyo, Joko. 2021. Pengaruh Variasi Geometri Sirip Tipe Sudut Pada *Absorber Collector Photovoltaic Thermal* Menggunakan Metode CFD. Teknik Meisn, Universitas Lampung, Bandar Lampung.

- Sari, Ajeng Purnama. 2014. Pengukuran Karakteristik Sel Surya. Jurusan Fisika, Universitas Islam Negeri Sunan Gunung Djati Bandung, Bandung.
- Setyaningrum, Yuli. 2017. Pengukuran Efisiensi Panel Surya Tipe Monokristalin dan Karakterisasi Struktur Material Penyusunnya. Departemen Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Sjahruddin, Charles. 2019. Studi Eksperimental Pendinginan Panel *Photovoltaic* Menggunakan *Heatsink* Metode Perpindahan Kalor Konveksi Bebas. Teknik Mesin, Universitas Sriwijaya, Palembang.
- Sugianto. 2020. Comparative Analysis of Solar Cell Efficiency between Monocrystalline and Polycrystalline. Electrical Engineering, Muslim University Indonesia, Indonesia.
- Widodo, PS., Sunarso dan Faizal, Ahmad. 2018. Analisis *Computational Fluid Dynamics* Suhu Permukaan Panel Surya Akibat Pengaruh Intensitas Radiasi Matahari, Kecepatan Angin dan Suhu Udara. Politeknik Negeri Pontianak, Pontianak.
- Yuwono, Budi. 2005. Optimalisasi Panel Sel Surya Dengan Menggunakan Sistem Pelacak Berbasis Mikrokontroler AT89C51. Jurusan Fisika, Universitas Sebelas Maret, Surakarta.