

**TUGAS AKHIR - TM184835**

**ANALISIS PENGARUH SUDUT KEMIRINGAN DAN SUDUT  
AZIMUTH PANEL SURYA TERHADAP RADIASI MATAHARI  
PADA GEDUNG PARKIR BERTINGKAT DTM ITS**

**Nikolas Prayandi**  
NRP 0211184000095

Dosen Pembimbing  
**Bambang Arip Dwiyantoro S.T., M.Sc.Eng., Ph.D.**  
NIP 197804012002121001

**Program Studi S-1 Teknik Mesin**  
Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2022



**TUGAS AKHIR - TM184835**

# **ANALISIS PENGARUH SUDUT KEMIRINGAN DAN SUDUT AZIMUTH PANEL SURYA TERHADAP RADIASI MATAHARI PADA GEDUNG PARKIR BERTINGKAT DTM ITS**

**Nikolas Prayandi**  
NRP 0211184000095

Dosen Pembimbing  
**Bambang Arip Dwiyantoro S.T., M.Sc.Eng., Ph.D.**  
NIP 197804012002121001

**Program Studi S-1 Teknik Mesin**  
Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2022



**FINAL PROJECT - TM184835**

**ANALYSIS OF THE EFFECT OF TILT AND AZIMUTH  
ANGLES OF SOLAR PANELS ON SOLAR RADIATION AT  
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING'S  
PARKING BUILDING**

**Nikolas Prayandi**  
NRP 02111840000095

Advisor  
**Bambang Arip Dwiyantoro S.T., M.Sc.Eng., Ph.D.**  
NIP 197804012002121001

**Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering**  
Departement of Mechanical Engineering  
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya  
2022

## LEMBAR PENGESAHAN

### ANALISIS PENGARUH SUDUT KEMIRINGAN DAN SUDUT AZIMUTII PANEL SURYA TERHADAP RADIASI MATAHARI PADA GEDUNG PARKIR BERTINGKAT DTM ITS

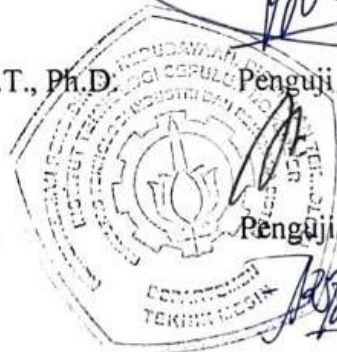
#### TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat  
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada  
Program Studi S-1 Teknik Mesin  
Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **NIKOLAS PRAYANDI**  
NRP. 0211184000095

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Bambang Arip Dwiyantoro S.T., M.Sc.Eng., Ph.D. Pembimbing
2. Ary Bachtiar Krishna Putra S.T., M.T., Ph.D. Penguji
3. Tri Vicca Kusumadewi S.T., M.Sc. Penguji
4. Dr. Is Bunyamin Suryo S.T., M.Sc. Penguji



**SURABAYA**  
Juli, 2022

## APPROVAL SHEET

### ANALYSIS OF THE EFFECT OF TILT AND AZIMUTH ANGLES OF SOLAR PANELS ON SOLAR RADIATION AT DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING'S PARKING BUILDING

#### FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements  
for obtaining a degree Bachelor of Engineering at  
Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering  
Department of Mechanical Engineering  
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering  
Sepuluh Nopember Institute of Technology

By: **NIKOLAS PRAYANDI**  
NRP. 0211184000095

Approved by Final Project Examiner Team:

1. Bambang Arip Dwiyantoro S.T., M.Sc.Eng., Ph.D. Advisor

2. Ary Bachtiar Krishna Putra S.T., M.T., Ph.D. Examiner

3. Tri Vicca Kusumadewi S.T., M.Sc. Examiner

4. Dr. Is Bunyamin Suryo S.T., M.Sc. Examiner



**SURABAYA**  
July, 2022

## PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Nikolas Prayandi / 02111840000095

Departemen : Teknik Mesin FT-IRS ITS

Dosen Pembimbing / NIP : Bambang Arip Dwiyantoro S.T., M.Sc.Eng., Ph.D. /  
197804012002121001

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “**Analisis Pengaruh Sudut Kemiringan dan Sudut Azimuth Panel Surya terhadap Radiasi Matahari pada Gedung Parkir Bertingkat DTM ITS**” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 27 Juli 2022

Mengetahui

Dosen Pembimbing



(Bambang Arip Dwiyantoro S.T., M.Sc.Eng., Ph.D.)  
NIP. 197804012002121001

Mahasiswa,



(Nikolas Prayandi)

NRP. 02111840000095

## STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Nikolas Prayandi / 0211184000095  
Departement : Mechanical Engineering INDSYS ITS  
Advisor / NIP : Bambang Arip Dwiyantoro S.T., M.Sc.Eng., Ph.D. /  
197804012002121001

hereby declare that the Final Project with the title of “**Analysis of The Effect of Tilt and Azimuth Angles of Solar Panels on Solar Radiation at Department of Mechanical Engineering’s Parking Building**” is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Acknowledged

Advisor



(Bambang Arip Dwiyantoro S.T., M.Sc.Eng., Ph.D.)  
NIP. 197804012002121001

Surabaya, 27 Juli 2022

Student,



(Nikolas Prayandi)  
NRP. 0211184000095

# ANALISIS PENGARUH SUDUT KEMIRINGAN DAN SUDUT AZIMUTH PANEL SURYA TERHADAP RADIASI MATAHARI PADA GEDUNG PARKIR BERTINGKAT DTM ITS

Nama Mahasiswa : Nikolas Prayandi  
NRP : 0211184000095  
Departemen : Teknik Mesin FT-IRS ITS  
Dosen Pembimbing : Bambang Arip Dwiyantoro S.T., M.Sc.Eng., Ph.D.

## ABSTRAK

Indonesia memiliki iklim tropis di hampir seluruh wilayahnya, sehingga potensi energi surya yang dimiliki sangat besar yakni mencapai 19.835 GW. Namun pemanfaatan energi surya di Indonesia masih terlampau jauh dari yang ditargetkan. Energi surya masih menjadi penyumbang kecil dalam memenuhi kebutuhan listrik di Indonesia, yakni hanya sebesar 0,05% dari produksi seluruh pembangkit listrik di Indonesia. Oleh karena itu, Departemen Teknik Mesin ITS memulai langkah dalam memanfaatkan energi surya sebagai sumber daya listrik. *Photovoltaic* merupakan salah satu teknologi yang paling umum digunakan dalam mengkonversi energi surya menjadi energi listrik dengan bantuan foton.

Dalam penelitian ini, dilakukan analisis pengaruh dari sudut kemiringan dan sudut azimuth panel surya terhadap radiasi matahari yang diterima. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan *software* MATLAB untuk memperoleh nilai radiasi matahari maksimum dengan memvariasikan sudut kemiringan sebesar  $0^\circ$  hingga  $90^\circ$  dengan kenaikan  $1^\circ$  dan sudut azimuth sebesar  $0^\circ$  hingga  $90^\circ$  dengan kenaikan  $4^\circ$ . Penelitian diawali dengan melakukan studi literatur untuk menunjang dalam menyelesaikan permasalahan. Penentuan variabel kontrol dan bebas dilakukan setelah mendapatkan data awal penelitian. Dilanjutkan dengan perhitungan serta analisis pengaruh sudut kemiringan dan sudut azimuth. Hasil perhitungan yang didapatkan berupa nilai radiasi matahari maksimum dan digunakan dalam menentukan sudut kemiringan dan sudut azimuth optimal pada panel surya.

Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa sudut kemiringan optimum setiap bulan memiliki variasi antara  $3^\circ$  hingga  $33^\circ$  dengan sudut azimuth sebesar  $0^\circ$  dan  $180^\circ$ . Sudut kemiringan optimum setiap kuartal memiliki variasi  $7^\circ$  hingga  $26^\circ$  dengan sudut azimuth sebesar  $0^\circ$  dan  $180^\circ$ . Sedangkan pada musim kemarau memiliki sudut kemiringan  $24^\circ$  dan sudut azimuth  $180^\circ$ , serta pada musim hujan memiliki sudut kemiringan  $9^\circ$  dan sudut azimuth  $0^\circ$ . Orientasi optimum sepanjang tahun berada pada sudut kemiringan  $9^\circ$  dan sudut azimuth  $180^\circ$ . Konfigurasi panel surya setiap bulan, kuartal, dan musim memberikan peningkatan radiasi matahari yang diterima sepanjang tahun masing-masing sebesar 3,59%, 2,94%, dan 2,89% lebih besar daripada konfigurasi tahunan. Semakin besar deviasi sudut maka semakin besar juga *energy loss* yang terjadi. Pengaruh sudut kemiringan dapat menyebabkan *energy loss* hingga mencapai 63,40% pada deviasi sudut sebesar  $87^\circ$ , sedangkan pengaruh sudut azimuth hanya dapat menyebabkan *energy loss* hingga mencapai 15,44% pada deviasi sudut  $180^\circ$ . Sehingga dapat dikatakan sudut kemiringan memiliki pengaruh yang lebih besar terhadap intensitas radiasi matahari yang diterima dibandingkan dengan sudut azimuth.

**Kata kunci:** *panel surya, radiasi matahari maksimum, sudut kemiringan, sudut azimuth.*



# ANALYSIS OF THE EFFECT OF TILT AND AZIMUTH ANGLES OF SOLAR PANELS ON SOLAR RADIATION AT DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING'S PARKING BUILDING

**Student Name** : Nikolas Prayandi  
**NRP** : 0211184000095  
**Department** : Mechanical Engineering FT-IRS ITS  
**Advisor** : Bambang Arip Dwiyantoro S.T., M.Sc.Eng., Ph.D.

## ABSTRACT

Indonesia has a tropical climate in almost all its territory, so the solar energy's potential is very large, reaching 19.835 GW. However, the utilization of solar energy in Indonesia is still far from the target. Solar energy still has a small contribution in meeting electricity needs in Indonesia, which is only 0.05% of the production of all power plants in Indonesia. Therefore, the Department of Mechanical Engineering, ITS started steps in utilizing solar energy as a power source. Photovoltaic is one of the most used technologies in converting solar energy into electrical energy with the help of photons.

In this study, an analysis of the effect of the tilt and azimuth angle on the received solar radiation was carried out. Calculations were performed using MATLAB software to obtain the maximum solar radiation value by varying the tilt angle from  $0^\circ$  to  $90^\circ$  in  $1^\circ$  increments and the azimuth angle from  $0^\circ$  to  $90^\circ$  in  $4^\circ$  increments. The research begins by conducting a literature study to assist in solving the problem. The determination of the control and independent variables was carried out after obtaining the initial data of the study. Followed by the calculation and analysis of the influence of the angle of inclination and the azimuth angle. The calculation results obtained are the maximum solar radiation value and are used to determine the optimal tilt angle and azimuth angle on the solar panel.

The results of this study indicate that the monthly optimum tilt angle varies between  $3^\circ$  to  $33^\circ$  with azimuth angles of  $0^\circ$  and  $180^\circ$ . The optimum tilt angles every quarter has a variation of  $7^\circ$  to  $26^\circ$  with azimuth angles of  $0^\circ$  and  $180^\circ$ . Whereas in the dry season has a tilt angle of  $24^\circ$  and an azimuth angle of  $180^\circ$ , and in the rainy season has a tilt angle of  $9^\circ$  and an azimuth angle of  $0^\circ$ . The optimum orientation throughout the year is at tilt angle of  $9^\circ$  and an azimuth angle of  $180^\circ$ . Changing configuration of solar panels every month, quarter, and season provides an increase in solar radiation received throughout the year by 3,59%, 2,94%, and 2,89%, respectively, greater than the annual configuration. The greater tilt angle deviation, the greater the energy loss that occurs. The influence of tilt angle can cause energy loss up to 63,40% at tilt angle deviation up to  $87^\circ$ , while the effect of the azimuth angle can only cause energy loss up to 15,44% at azimuth angle deviation up to  $180^\circ$ . So, it can be said that the tilt angle has a greater influence on the intensity of solar radiation received compared to the azimuth angle.

**Keyword:** *azimuth angle, maximum solar radiation, solar panel, tilt angle.*

## KATA PENGANTAR

Puji Syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa yang senantiasa melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, hingga terselesaikannya Tugas Akhir beserta Laporan Tugas Akhir yang berjudul **Analisis Pengaruh Sudut Kemiringan dan Sudut Azimuth Panel Surya terhadap Radiasi Matahari pada Gedung Parkir Bertingkat DTM ITS**.

Penulis telah banyak memperoleh dukungan serta bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian Tugas Akhir dan Laporan Tugas Akhir ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua penulis, Ibu **Yanthi Hasan Suwandi**, serta kakak penulis, **Calvin Prayandi** yang telah memberikan dukungan serta doa yang tiada henti-hentinya agar segala urusan penulis dimudahkan dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Bapak **Bambang Arip Dwiyantoro S.T., M.Sc.Eng., Ph.D.** selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan ilmu, petunjuk, nasihat, motivasi, dukungan, serta doa dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
3. Bapak **Ary Bachtiar Krishna Putra S.T., M.T., Ph.D.**, Ibu **Tri Vicca Kusumadewi S.T., M.Sc.**, dan Bapak **Dr. Is Bunyamin Suryo S.T., M.Sc.** selaku dosen penguji dalam sidang Tugas Akhir Penulis yang telah memberikan masukan serta saran untuk Tugas Akhir ini.
4. Bapak **Dr. Eng. Yohanes, S.T., M.Sc.** selaku dosen wali yang telah membantu dan membimbing Penulis selama masa perkuliahan.
5. **Rianti Ayu Pratiwi** selaku *support system*, selalu siap siaga membantu, dan menemani Penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir ini.
6. Seluruh teman bimbingan Tugas Akhir (**Francis, Reves, Otniel, Abdillah, Niko, Dito, Fajar, dan Hanif**) atas segala motivasi, bantuan, dan ilmu yang telah diberikan selama menyelesaikan Tugas Akhir ini.
7. Seluruh keluarga besar Gunadya (**Ajis, Vicky, Ganes, Rafli, Ican, Mumud, Acid, Jono, Edo, Fadel, Fazhli, Andi, Aga, Ghani, Klipo, dan Ilham**) yang telah membantu dan menemani Penulis dengan dipenuhi canda, tawa, pujian, cecian, serta semangat yang tiada henti diberikan untuk penulis selama perkuliahan.
8. Seluruh warga Lab. MBP (**Jay, Faqih, Kelpo, dan Arighi**) yang telah memberikan fasilitas dan motivasi dalam mengerjakan Tugas Akhir ini.
9. Seluruh keluarga besar M61 yang telah menemani Penulis selama menempuh pendidikan di Departemen Teknik Mesin FT-IRS ITS.
10. Seluruh dosen, karyawan, dan civitas akademika Departemen Teknik Mesin FT-IRS ITS, atas segala bantuan dan kerjasamanya selama masa perkuliahan.
11. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, terima kasih atas bantuan serta doa-doa baiknya.

Penulis sadar bahwa penulisan laporan Tugas Akhir ini tidak sempurna, namun semoga laporan ini dapat memberikan kontribusi positif dan menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembaca, keluarga besar Teknik Mesin khususnya, dan civitas akademika ITS pada umumnya. Selain itu, semoga dapat bermanfaat sebagai referensi pengerjaan laporan Tugas Akhir bagi mahasiswa yang akan mengerjakan.

Surabaya, 28 Juni 2022

Penulis

## DAFTAR ISI

COVER.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iv
PERNYATAAN ORISINALITAS .....	vi
ABSTRAK .....	viii
KATA PENGANTAR.....	x
DAFTAR ISI .....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL .....	xv
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan Penelitian.....	2
1.4. Batasan Masalah.....	2
1.5. Manfaat Penelitian.....	2
BAB II DASAR TEORI & TINJAUAN PUSTAKA.....	3
2.1. Matahari .....	3
2.2. Konstanta Surya .....	3
2.3. Geometri Sudut pada Permukaan Bidang Miring .....	4
2.4. Radiasi Ekstraterrestrial pada Bidang Datar.....	6
2.5. Komponen Radiasi Langsung dan <i>Diffuse</i> Bulanan.....	7
2.5.1. Indeks Kecerahan.....	7
2.5.2. Fraksi <i>Diffuse</i> .....	7
2.6. Radiasi Harian Rata-Rata pada Permukaan Bidang Miring: <i>KT Method</i> .....	8
2.7. Photovoltaic.....	10
2.8. Penelitian Terdahulu .....	11
2.8.1. Analisis Pengaruh Sudut Kemiringan Panel Surya terhadap Radiasi Matahari yang Diterima oleh Panel Surya Tipe Larik Tetap.....	11
2.8.2. <i>Analysis of The Tilt and Azimuth Angles of Photovoltaic Systems in Non-ideal Positions for Urban Applications</i> .....	13
2.8.3. <i>Investigation of Optimal Tilt Angles and Effects of Soiling on PV Energy Production in Pakistan</i> .....	14
BAB III METODE PENELITIAN .....	17
3.1. Diagram Alir Penelitian .....	17
3.2. Studi Literatur .....	18
3.3. Pengumpulan Data .....	18
3.3.1. Gedung Parkir Bertingkat Departemen Teknik Mesin ITS .....	18
3.3.2. Radiasi Harian Rata-Rata Matahari per Bulan pada Bidang Datar .....	20
3.4. Penentuan Variabel Kontrol .....	21
3.5. Penentuan Variabel Bebas.....	21
3.6. Diagram Alir Perhitungan .....	22
3.7. Validasi Perhitungan .....	27
BAB IV ANALISIS DATA & PEMBAHASAN.....	29
4.1. Sudut Kemiringan dan Sudut Azimuth Optimum .....	29
4.1.1. Contoh Perhitungan Radiasi Harian Rata-Rata .....	29
4.1.2. Orientasi Optimum Bulanan .....	32
4.1.2.1. Januari.....	33
4.1.2.2. Februari.....	34

4.1.2.3. Maret.....	35
4.1.2.4. April.....	35
4.1.2.5. Mei.....	36
4.1.2.6. Juni.....	37
4.1.2.7. Juli.....	37
4.1.2.8. Agustus .....	38
4.1.2.9. September .....	39
4.1.2.10. Oktober .....	39
4.1.2.11. Nopember .....	40
4.1.2.12. Desember .....	41
4.1.3. Orientasi Optimum Kuartal .....	41
4.1.3.1. Kuartal I.....	42
4.1.3.2. Kuartal II.....	43
4.1.3.3. Kuartal III .....	44
4.1.3.4. Kuartal IV .....	44
4.1.4. Orientasi Optimum Musiman .....	45
4.1.4.1. Musim Kemarau .....	46
4.1.4.2. Musim Hujan .....	46
4.1.5. Orientasi Optimum Tahunan .....	47
4.2. Perbandingan Konfigurasi Orientasi .....	49
4.3. Pengaruh Sudut Kemiringan dan Sudut Azimuth .....	50
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....	53
5.1. Kesimpulan.....	53
5.2. Saran.....	53
DAFTAR PUSTAKA.....	54
LAMPIRAN .....	55

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Struktur Matahari .....	3
<b>Gambar 2.2</b>	Hubungan antara Bumi dan Matahari .....	4
<b>Gambar 2.3</b>	Geometri Sudut Matahari terhadap Bumi .....	4
<b>Gambar 2.4</b>	Variasi Sudut Deklinasi Sepanjang Tahun .....	5
<b>Gambar 2.5</b>	Geometri Sudut pada Permukaan Bidang Miring .....	5
<b>Gambar 2.6</b>	Radiasi Harian Rata-Rata Setiap Bulan terhadap Garis Lintang Utara dan Selatan .....	7
<b>Gambar 2.7</b>	Korelasi Fraksi Diffuse Rata-Rata terhadap Indeks Kecerahan .....	8
<b>Gambar 2.8</b>	Korelasi yang Disarankan antara $H_d/H$ terhadap $KT$ dan $\omega_s$ .....	8
<b>Gambar 2.9</b>	Skema Cara Kerja Sel Surya .....	10
<b>Gambar 2.10</b>	Grafik Hubungan Sudut Kemiringan terhadap Radiasi Matahari yang Diterima Setiap Bulan .....	11
<b>Gambar 2.11</b>	Perbandingan Radiasi Rata-Rata pada Musim Hujan dan Musim Kemarau ....	12
<b>Gambar 2.12</b>	Energy Loss pada 10 Lokasi Penelitian .....	14
<b>Gambar 2.13</b>	Sudut Kemiringan Optimal Setiap Bulan .....	15
<b>Gambar 2.14</b>	Perbandingan Penyesuaian untuk Berbagai Interval .....	15
<b>Gambar 3.1</b>	Diagram Alir Penelitian .....	18
<b>Gambar 3.2</b>	Tampak Depan Gedung Parkir Departemen Teknik Mesin ITS .....	19
<b>Gambar 3.3</b>	Tampak Samping Gedung Parkir Departemen Teknik Mesin ITS .....	19
<b>Gambar 3.4</b>	Lokasi Koordinat Gedung Parkir Departemen Teknik Mesin ITS .....	20
<b>Gambar 3.5</b>	Diagram Alir Perhitungan .....	26
<b>Gambar 3.6</b>	Validasi Perhitungan pada Microsoft Excel .....	27
<b>Gambar 4.1</b>	Sudut Kemiringan Optimum Setiap Bulan .....	33
<b>Gambar 4.2</b>	Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Bulan Januari .....	34
<b>Gambar 4.3</b>	Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Bulan Februari .....	34
<b>Gambar 4.4</b>	Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Bulan Maret .....	35
<b>Gambar 4.5</b>	Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Bulan April .....	36
<b>Gambar 4.6</b>	Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Bulan Mei .....	36
<b>Gambar 4.7</b>	Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Bulan Juni .....	37
<b>Gambar 4.8</b>	Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Bulan Juli .....	38
<b>Gambar 4.9</b>	Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Bulan Agustus .....	38
<b>Gambar 4.10</b>	Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Bulan September .....	39
<b>Gambar 4.11</b>	Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Bulan Oktober .....	40
<b>Gambar 4.12</b>	Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Bulan Nopember .....	40
<b>Gambar 4.13</b>	Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Bulan Desember .....	41

<b>Gambar 4.14</b>	Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Kuartal I.....	43
<b>Gambar 4.15</b>	Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Kuartal II .....	43
<b>Gambar 4.16</b>	Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Kuartal III .....	44
<b>Gambar 4.17</b>	Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Kuartal IV .....	45
<b>Gambar 4.18</b>	Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Musim Kemarau .....	46
<b>Gambar 4.19</b>	Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Musim Hujan.....	47
<b>Gambar 4.20</b>	Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata Tahunan.....	48
<b>Gambar 4.21</b>	Instalasi Fixed Panel Surya pada Atap Gedung Parkir Bertingkat .....	48
<b>Gambar 4.22</b>	Rekomendasi Instalasi Panel Surya pada Atap Gedung Parkir Bertingkat.....	49
<b>Gambar 4.23</b>	Perbandingan Konfigurasi Sepanjang Tahun.....	49
<b>Gambar 4.24</b>	Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Energy Loss .....	51
<b>Gambar 4.25</b>	Pengaruh Deviasi Sudut Kemiringan terhadap Energy Loss .....	51
<b>Gambar 4.26</b>	Pengaruh Deviasi Sudut Azimuth terhadap Energy Loss .....	52

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Rekomendasi Hari Rata-Rata dan Nilai $n$ pada Bulan.....	5
<b>Tabel 2.2</b> Variasi Sudut Azimut terhadap Radiasi Rata-Rata Setiap Bulan .....	12
<b>Tabel 2.3</b> Sudut Kemiringan Optimal dan Iradiasi Matahari Tahunan Maksimal.....	13
<b>Tabel 3.1</b> Radiasi Harian Rata-Rata Matahari per Bulan pada Bidang Datar .....	20
<b>Tabel 3.2</b> Variabel Kontrol .....	21
<b>Tabel 3.3</b> Variabel Bebas.....	21
<b>Tabel 3.4</b> Variabel $n$ dan $\delta$ Setiap Bulan.....	21
<b>Tabel 3.5</b> Perbandingan Sudut Kemiringan Optimum Hasil Perhitungan.....	28
<b>Tabel 4.1</b> Sudut Kemiringan dan Sudut Azimuth Optimum Setiap Bulan.....	32
<b>Tabel 4.2</b> Sudut Kemiringan dan Sudut Azimuth Optimum Setiap Kuartal.....	42
<b>Tabel 4.3</b> Sudut Kemiringan dan Sudut Azimuth Optimum Setiap Musim .....	45
<b>Tabel 4.4</b> Sudut Kemiringan dan Sudut Azimuth Optimum Sepanjang Tahun.....	47

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Indonesia terletak pada garis khatulistiwa, sehingga hampir seluruh wilayahnya memiliki iklim tropis. Hal tersebut menyebabkan Indonesia memiliki potensi energi surya yang melimpah. Potensi distribusi radiasi matahari rata-rata di Indonesia sekitar 4,5 kWh/m<sup>2</sup> per hari dengan deviasi sekitar 10% pada wilayah Barat dan 5,1 kWh/m<sup>2</sup> per hari dengan deviasi sekitar 9% pada wilayah Timur. Sehingga pada beberapa penelitian, potensi total radiasi rata-rata matahari di Indonesia sekitar 4,8 kWh/m<sup>2</sup> per hari (Veldhuis & Reinders, 2013). Kementerian Energi dan Sumber daya Mineral (ESDM) memperkirakan secara teknis potensi energi surya di Indonesia sebesar 533 GW termasuk wilayah hutan dan 208 GW apabila tidak termasuk wilayah hutan, dengan penyumbang terbesar yaitu Sumatera sebesar 32% dan Kalimantan sebesar 25% (Langer et al., 2021). Sedangkan Institute of Essential Service Reform (IESR) memperkirakan potensi energi surya dapat mencapai 3.396 GW hingga 19.835 GW dengan kondisi penggunaan wilayah tertentu dan kemiringan panel 10°. Hasil tersebut menunjukkan angka 16 hingga 95 kali lebih besar daripada perkiraan Kementerian ESDM (IESR, 2021).

Potensi energi surya di Indonesia dapat dikatakan sangat tinggi, tetapi pada kenyataannya, pemanfaatan energi surya itu sendiri masih belum digunakan secara maksimal. Pada tahun 2020, produksi dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang ada di Indonesia hanya sebesar 154 GWh baik *On Grid* maupun *Off Grid* atau sekitar 0,05% dari total produksi seluruh pembangkit listrik di Indonesia. Angka tersebut sangat kecil dibandingkan dengan produksi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) batubara yang mencapai 180.869 GWh atau sekitar 61,95% dari total produksi (Kementerian ESDM Republik Indonesia, 2021). Hal tersebut dikarenakan Indonesia masih sangat bergantung pada bahan bakar fosil dibandingkan energi terbarukan. Dalam Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) tahun 2017 ditargetkan pengembangan PLTS diproyeksikan sebesar 6,5 GW pada tahun 2025 dan 45 GW pada tahun 2050. Angka tersebut menunjukkan pemanfaatan sebesar 22% dari potensi energi surya sebesar 208 GW (Peraturan Presiden Republik Indonesia, 2017).

Departemen Teknik Mesin (DTM) ITS memulai langkah dalam memanfaatkan energi surya sebagai sumber daya listrik. Rencana pembangunan gedung parkir bertingkat yang memiliki ruangan dengan sumber daya listrik yang berasal dari energi surya merupakan langkah awal DTM ITS dalam memanfaatkan potensi energi surya di Indonesia dan mendukung penggunaan Energi Baru Terbarukan (EBT) seperti yang ditargetkan oleh pemerintah. Besarnya produksi listrik yang dihasilkan sangat bergantung pada intensitas radiasi matahari yang diterima oleh panel surya. Dengan mengoptimalkan orientasi dari panel surya maka diharapkan intensitas radiasi matahari dapat mencapai titik maksimum.

Photovoltaic (PV) merupakan teknologi yang umum digunakan untuk mengkonversi energi surya menjadi energi listrik. Performa dari sistem PV bergantung pada beberapa variabel, salah satunya yaitu sudut kemiringan dan sudut azimuth. Banyak penelitian yang berfokus pada pengaruh orientasi dan kemiringan terhadap performa dari sistem PV. Pangestuningtyas et al. (2014) melakukan penelitian mengenai sudut kemiringan optimal dan pengaruhnya terhadap radiasi matahari yang diterima. Penelitian yang dilakukan di Kota Semarang mendapatkan sudut kemiringan optimal yang bervariasi antara 1° hingga 34° sepanjang tahun dengan sudut azimuth optimal sebesar 180°. Barbón et al. (2022) melakukan penelitian mengenai pengaruh sudut kemiringan dan sudut azimuth terhadap performa dari sistem PV. Dalam penelitian tersebut, didapatkan variasi total energi yang dihasilkan sebesar 20% akibat sudut kemiringan dan kenaikan hingga mencapai 24,3% akibat dari sudut azimuth yang dioptimasi. Ullah et al. (2019) melakukan penelitian terhadap sudut kemiringan optimum dan efek debu pada sistem



PV. Penelitian tersebut menghasilkan perbedaan kenaikan energi yang didapatkan pada kota Lahore, Pakistan dengan menyesuaikan sudut kemiringan secara harian, bulanan, musiman, dan dua kali dalam setahun yakni sebesar 7,41%, 7,25%, 6,09%, dan 5,90% per tahun. Semakin sering melakukan penyesuaian sudut kemiringan maka energi yang dihasilkan juga semakin besar.

Dalam penelitian ini dilakukan perhitungan radiasi matahari rata-rata per bulan pada panel PV dengan orientasi tertentu menggunakan pemrograman MATLAB. Untuk memperoleh radiasi rata-rata maksimum dilakukan variasi sudut kemiringan dan sudut azimuth pada panel PV. Hasil dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui sudut kemiringan dan sudut azimuth optimum yang dapat diterapkan di Gedung Parkir Bertingkat Departemen Teknik Mesin ITS agar dapat menghasilkan energi yang maksimal setiap tahunnya, serta menganalisis pengaruh sudut kemiringan dan sudut azimuth terhadap radiasi matahari yang diterima.

## **1.2. Perumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang di atas, didapatkan rumusan masalah pada penelitian ini sebagai berikut.

1. Bagaimana menentukan sudut kemiringan dan sudut azimuth optimum panel surya pada Gedung Parkir Bertingkat Departemen Teknik Mesin ITS?
2. Bagaimana pengaruh sudut kemiringan panel surya terhadap radiasi matahari?
3. Bagaimana pengaruh sudut azimuth panel surya terhadap radiasi matahari?

## **1.3. Tujuan Penelitian**

Berdasarkan rumusan masalah yang telah disebutkan, adapun tujuan dari penelitian ini sebagai berikut.

1. Menentukan sudut kemiringan dan sudut azimuth optimum panel surya pada Gedung Parkir Bertingkat Departemen Teknik Mesin ITS.
2. Mengetahui pengaruh sudut kemiringan panel surya terhadap radiasi matahari yang diterima.
3. Mengetahui pengaruh sudut azimuth panel surya terhadap radiasi matahari yang diterima.

## **1.4. Batasan Masalah**

Adapun batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini sebagai berikut.

1. Penelitian dilakukan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
2. Panel surya terletak pada koordinat  $7^{\circ}17'03.8''$  Selatan dan  $112^{\circ}47'48.8''$  Timur.
3. *Ground reflectance* sebesar 0,2 untuk tanah tidak bersalju.
4. Total radiasi harian rata-rata matahari per bulan pada bidang datar berdasarkan data dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG).

## **1.5. Manfaat Penelitian**

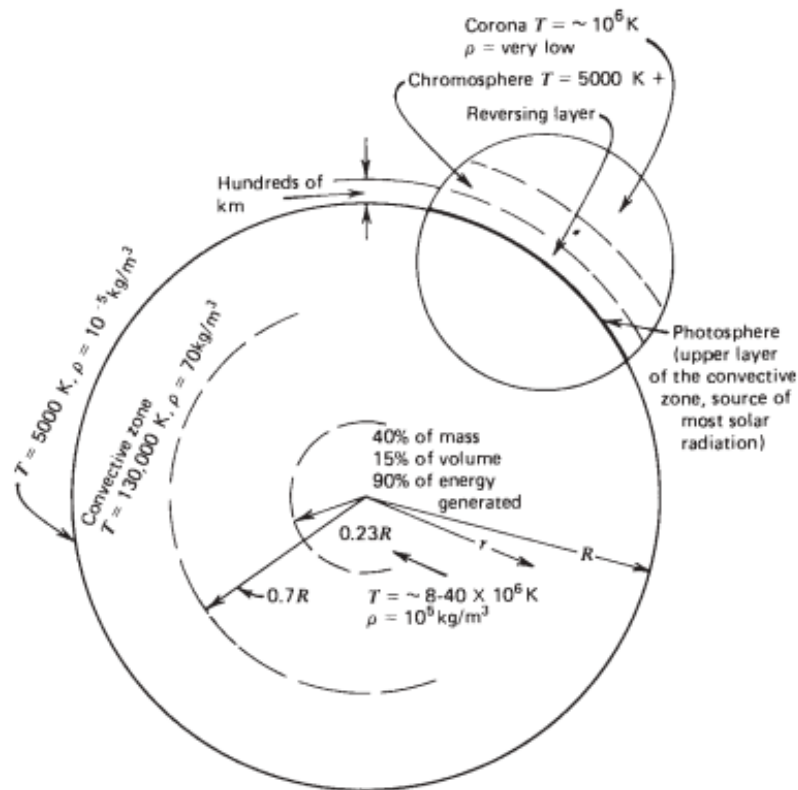
Adapun manfaat dari penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Sebagai rekomendasi untuk diterapkan pada instalasi panel surya di Gedung Parkir Bertingkat Departemen Teknik Mesin ITS.
2. Sebagai referensi untuk penelitian yang berkaitan dengan optimasi sudut kemiringan dan sudut azimuth panel surya.
3. Sebagai sebuah inovasi untuk meningkatkan performa panel surya dalam menerima radiasi matahari.

## BAB II DASAR TEORI & TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Matahari

Matahari merupakan pusat tata surya yang memiliki diameter sebesar  $1,39 \times 10^9$  m dan jarak rata-rata dengan bumi sebesar  $1,495 \times 10^{11}$  m. Temperatur pada permukaan matahari dapat mencapai 5.777 K sedangkan temperatur bagian dalamnya sekitar  $8 - 40 \times 10^6$  K, serta memiliki massa jenis sebesar seratus kali lebih besar dari air.

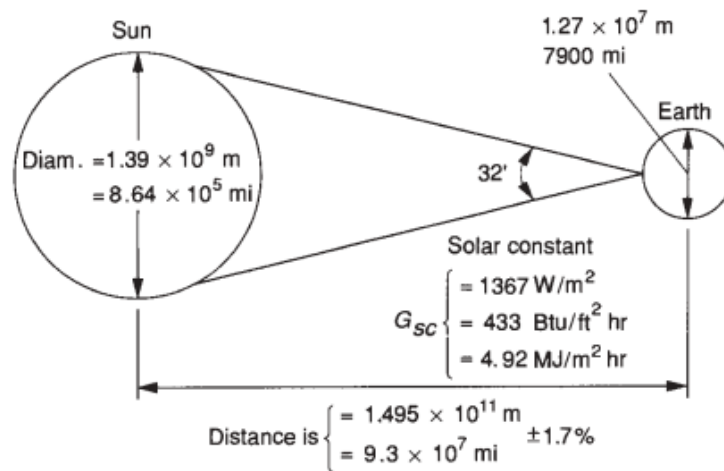


**Gambar 2.1** Struktur Matahari

Energi yang dihasilkan oleh matahari 90% berasal dari daerah di bawah  $0,23R$  ( $R$  merupakan jari-jari matahari) yang mengandung 15% volume dan 40% massa matahari. Temperatur akan terus menurun dari pusat matahari hingga lapisan permukaan matahari. Kemudian pada lapisan atmosfer matahari yang merupakan lapisan gas dengan ketebalan beratus-ratus kilometer, massa jenis akan menurun dan temperatur akan meningkat hingga lapisan terluarnya, corona, yang memiliki temperatur mencapai  $10^6$  K. Radiasi matahari yang dipancarkan merupakan hasil gabungan dari beberapa lapisan yang memancarkan dan menyerap radiasi dari panjang gelombang yang bervariasi.

### 2.2. Konstanta Surya

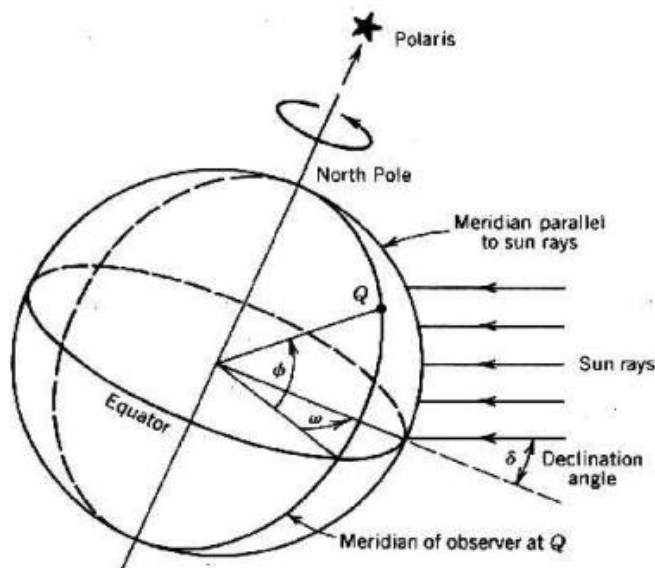
Pergerakan bumi terhadap matahari akibat gaya gravitasi matahari memiliki lintasan orbit yang berbentuk elips. Hal tersebut mengakibatkan jarak antara bumi dan matahari memiliki variasi sebesar 1,7% sehingga besarnya konstanta surya juga bervariasi. Jarak rata-rata bumi dan matahari sebesar  $1,495 \times 10^{11}$  m digunakan untuk menentukan besarnya konstanta surya. Konstanta surya merupakan energi matahari per waktu yang diterima oleh luasan permukaan yang tegak lurus terhadap arah datangnya radiasi. Besarnya konstanta surya,  $G_{sc}$ , yang didapatkan sebesar  $1367$  W/m<sup>2</sup> dengan perkiraan error sebesar  $\pm 1,5\%$ .



**Gambar 2.2** Hubungan antara Bumi dan Matahari  
 Sumber: (Duffie & Beckman, 2013)

### 2.3. Geometri Sudut pada Permukaan Bidang Miring

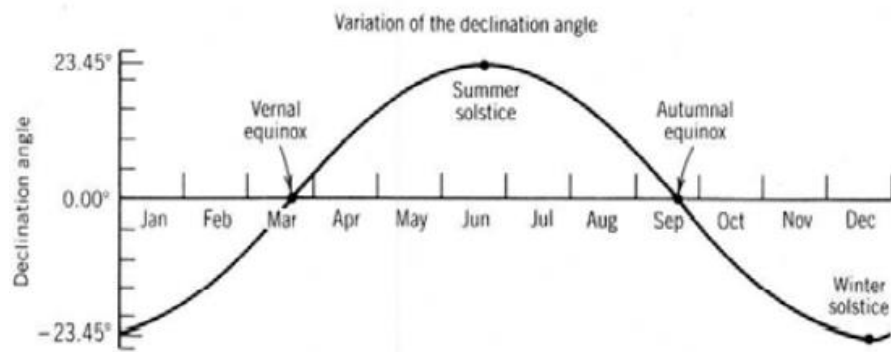
Duffie & Beckman (2013) menggambarkan hubungan geometris antara bidang permukaan dengan kemiringan dan orientasi relatif tertentu terhadap bumi dan radiasi matahari langsung dalam beberapa sudut sebagai berikut.



**Gambar 2.3** Geometri Sudut Matahari terhadap Bumi  
 Sumber: (Hussein & Albarqouni, 2010)

- $\phi$  Latitude, yaitu garis lintang atau sudut lokasi di bumi terhadap garis khatulistiwa. Arah Utara bernilai positif dan Selatan negatif ( $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ ).
- $\omega$  Sudut jam, perpindahan sudut matahari ke timur atau barat meridian lokal karena rotasi bumi pada porosnya dengan  $15^\circ$  per jam, dimana pagi negatif dan sore positif.
- $\delta$  Deklinasi, sudut yang dibentuk antara posisi sudut matahari pada siang hari terhadap bidang khatulistiwa. Arah Utara bernilai positif dan Selatan negatif ( $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$ ). Besarnya sudut deklinasi dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$\delta = 23,45 \sin \left( 360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (2.1)$$



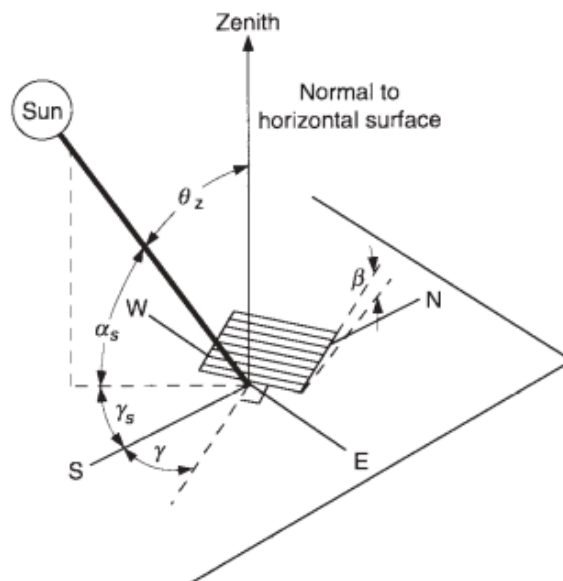
**Gambar 2.4** Variasi Sudut Deklinasi Sepanjang Tahun  
 Sumber: (Hussein & Albarqouni, 2010)

Dimana  $n$  merupakan hari pada bulan pengukuran, yang dapat diperoleh berdasarkan tabel di bawah ini.

**Tabel 2.1** Rekomendasi Hari Rata-Rata dan Nilai  $n$  pada Bulan

Month	$n$ for $i$ th Day of Month	For Average Day of Month		
		Date	$n$	$\delta$
January	$i$	17	17	-20.9
February	$31 + i$	16	47	-13.0
March	$59 + i$	16	75	-2.4
April	$90 + i$	15	105	9.4
May	$120 + i$	15	135	18.8
June	$151 + i$	11	162	23.1
July	$181 + i$	17	198	21.2
August	$212 + i$	16	228	13.5
September	$243 + i$	15	258	2.2
October	$273 + i$	15	288	-9.6
November	$304 + i$	14	318	-18.9
December	$334 + i$	10	344	-23.0

Sumber: (Duffie & Beckman, 2013)



**Gambar 2.5** Geometri Sudut pada Permukaan Bidang Miring

- $\beta$  Slope atau sudut kemiringan, yaitu sudut yang terbentuk antara bidang permukaan dengan bidang horizontal.
- $\gamma$  Azimuth, yaitu sudut proyeksi pada bidang horizontal ke permukaan terhadap meridian lokal, dengan titik nol berada di Selatan, positif ke Barat dan negatif ke Timur ( $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ ).
- $\theta$  Sudut datang, yaitu sudut yang dibentuk antara radiasi langsung matahari dan garis normal bidang permukaan. Besarnya sudut datang pada bidang miring dapat diperoleh menggunakan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma \\ & + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (2.2)$$

- $\theta_z$  Sudur zenith, yaitu sudut yang terbentuk antara radiasi langsung matahari dengan garis normal bidang horizontal. Besarnya sudut zenith dapat diperoleh menggunakan persamaan berikut.

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cos \phi \cos \omega + \sin \delta \sin \phi \cos \beta \quad (2.3)$$

- $\omega_s$  Sudut jam matahari terbenam, merupakan sudut terbenam matahari terhadap normal bidang horizontal ketika sudut zenith sebesar  $90^\circ$ . Sudut jam matahari terbenam dapat diperoleh menggunakan persamaan berikut.

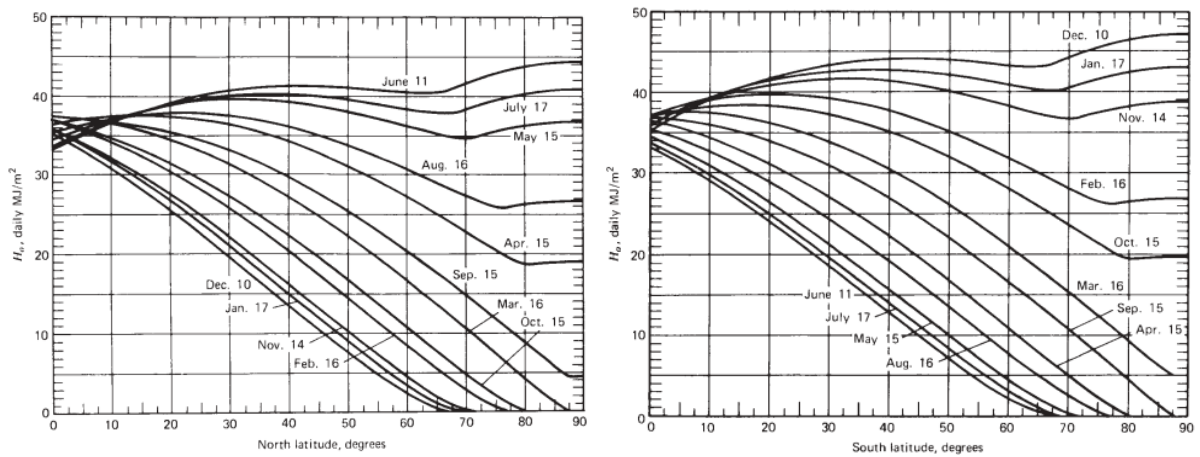
$$\cos \omega_s = -\frac{\sin \phi \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta} = -\tan \phi \tan \delta \quad (2.4)$$

#### 2.4. Radiasi Ekstraterrestrial pada Bidang Datar

Beberapa perhitungan radiasi paling mudah dilakukan dengan menggunakan tingkat radiasi yang dinormalisasi, yaitu rasio tingkat radiasi terhadap radiasi yang mungkin secara teoritis akan tersedia jika tidak ada atmosfer. Untuk melakukan perhitungan tersebut diperlukan penghitungan radiasi pada daerah ekstraterrestrial. Daerah ekstraterrestrial merupakan daerah yang berada di atas atmosfer bumi sehingga radiasi matahari masih belum terdifusi atau terpantulkan. Untuk memperoleh radiasi matahari harian rata-rata per bulan pada daerah ekstraterrestrial dapat menggunakan persamaan berikut.

$$\bar{H}_o = \frac{24 \times 3.600 G_{sc}}{\pi} \left( 1 + 0,033 \cos \frac{360\bar{n}}{365} \right) \times \cos \phi \cos \bar{\delta} \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \bar{\delta} \quad (2.5)$$

Radiasi matahari harian rata-rata setiap bulan dapat ditentukan berdasarkan persamaan di atas dengan koordinat garis lintang  $-60^\circ$  hingga  $60^\circ$  menggunakan  $n$  dan  $\delta$  tanggal rata-rata pada bulan pengukuran. Radiasi matahari harian rata-rata digambarkan sebagai fungsi dari garis lintang untuk belahan bumi bagian Utara dan Selatan yang ditunjukkan pada Gambar 2.6.



**Gambar 2.6** Radiasi Harian Rata-Rata Setiap Bulan terhadap Garis Lintang Utara dan Selatan

## 2.5. Komponen Radiasi Langsung dan *Diffuse* Bulanan

### 2.5.1. Indeks Kecerahan

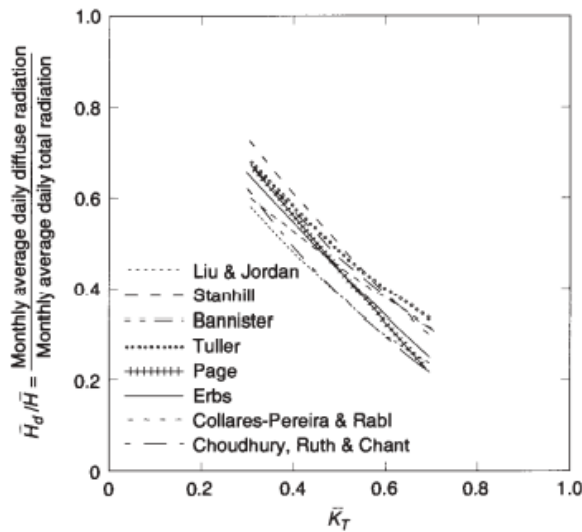
Frekuensi radiasi yang diterima di permukaan bumi selalu bervariasi, bergantung pada kondisi langit (cerah atau berawan). Untuk menggambarkan kondisi langit tersebut didefinisikan *clearness index* atau indeks kecerahan. Indeks kecerahan merupakan perbandingan radiasi harian rata-rata per bulan pada bidang horizontal di permukaan bumi terhadap radiasi harian rata-rata per bulan pada daerah ekstraterrestrial. Indeks kecerahan dapat didefinisikan secara bulanan, harian, maupun per jam. Untuk memperoleh nilai dari indeks kecerahan rata-rata per bulan dapat menggunakan persamaan berikut.

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} \quad (2.6)$$

Dimana  $\bar{H}$  dapat diperoleh berdasarkan hasil pengukuran total radiasi matahari pada bidang horizontal yang pada umumnya menggunakan pyranometer.

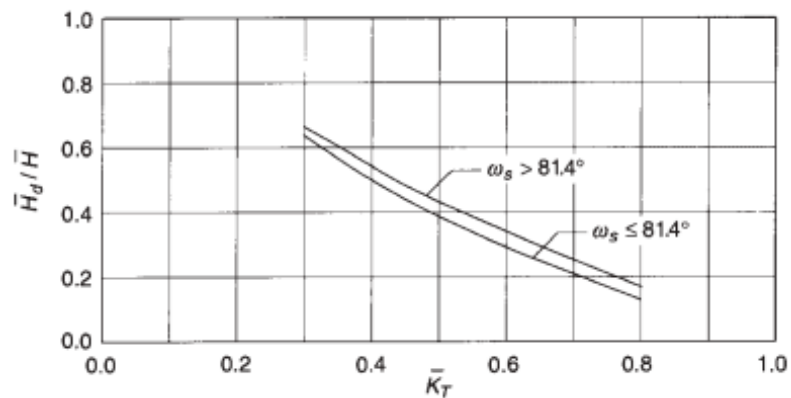
### 2.5.2. Fraksi *Diffuse*

Fraksi *diffuse* per bulan,  $\bar{H}_d/\bar{H}$ , dapat digambarkan sebagai fungsi dari indeks kecerahan rata-rata per bulan,  $\bar{K}_T$  seperti pada Gambar 2.7. Data untuk grafik tersebut dapat diperoleh dari data harian dengan dua cara. Pertama, data per bulan dapat diplot dengan menjumlahkan data *diffuse* harian dan total radiasi. Kedua, kurva  $H_d/H$  terhadap  $K_T$  harian dapat digunakan dengan distribusi cuaca cerah dan berawan untuk mengembangkan hubungan rata-rata bulanan.



**Gambar 2.7** Korelasi Fraksi *Diffuse* Rata-Rata terhadap Indeks Kecerahan

Korelasi fraksi *diffuse* rata-rata bergantung pada musim, kurva musim dingin terletak di bawah yang lain, menunjukkan kelembaban dan debu yang lebih rendah di langit dengan fraksi *diffuse* yang lebih rendah. Ketergantungan  $\bar{H}_d/\bar{H}$  terhadap  $\bar{K}_T$  ditunjukkan pada Gambar 2.8.



**Gambar 2.8** Korelasi yang Disarankan antara  $\bar{H}_d/\bar{H}$  terhadap  $\bar{K}_T$  dan  $\omega_s$

Persamaan untuk korelasi fraksi *diffuse* rata-rata per bulan terhadap  $\bar{K}_T$  sebagai berikut. Untuk  $\omega_s \leq 81,4^\circ$  dan  $0,3 \leq \bar{K}_T \leq 0,8$ ,

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,391 - 3,560 \bar{K}_T + 4,189 \bar{K}_T^2 - 2,137 \bar{K}_T^3 \quad (2.7)$$

Untuk  $\omega_s > 81,4^\circ$  dan  $0,3 \leq \bar{K}_T \leq 0,8$ ,

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,311 - 3,022 \bar{K}_T + 3,427 \bar{K}_T^2 - 1,821 \bar{K}_T^3 \quad (2.8)$$

## 2.6. Radiasi Harian Rata-Rata pada Permukaan Bidang Miring: *KT Method*

Studi perhitungan tentang radiasi rata-rata pada permukaan bidang miring telah dikembangkan oleh Klein dan Theilacker pada tahun 1981. Untuk memperoleh radiasi rata-rata pada permukaan bidang miring bulanan diperlukan rasio total radiasi rata-rata pada bidang miring setiap bulan dan total radiasi harian rata-rata matahari per bulan pada bidang datar. Nilai

radiasi rata-rata pada permukaan bidang miring bulanan dapat diperoleh berdasarkan persamaan berikut.

$$\bar{H}_T = \bar{H}\bar{R} \quad (2.9)$$

Klein dan Theilacker mengembangkan bentuk yang lebih umum untuk melakukan perhitungan berdasarkan nilai sudut azimuth tertentu. Jika sudut azimuth tidak menghadap Selatan atau Utara ( $\gamma \neq 0^\circ$  atau  $180^\circ$ ), waktu matahari terbit dan terbenam pada permukaan bidang miring tidak akan simetris terhadap matahari tengah hari. Persamaan untuk memperoleh nilai  $\bar{R}$  sebagai berikut.

$$\bar{R} = D + \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2.10)$$

Dimana,

$$D = \begin{cases} \max(0, G(\omega_{ss}, \omega_{sr})) & \text{jika } \omega_{ss} \geq \omega_{sr} \\ \max(0, [G(\omega_{ss}, -\omega_s) + G(\omega_s, \omega_{sr})]) & \text{jika } \omega_{sr} > \omega_{ss} \end{cases} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} G(\omega_1, \omega_2) = & \frac{1}{2d} \left[ \left( \frac{bA}{2} - a'B \right) (\omega_1 - \omega_2) \frac{\pi}{180} \right. \\ & + (a'A - bB)(\sin \omega_1 - \sin \omega_2) - a'C(\cos \omega_1 - \cos \omega_2) \\ & + \left( \frac{bA}{2} \right) (\sin \omega_1 \cos \omega_1 - \sin \omega_2 \cos \omega_2) \\ & \left. + \left( \frac{bC}{2} \right) (\sin^2 \omega_1 - \sin^2 \omega_2) \right] \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$a = 0,409 + 0,5016 \sin(\omega_s - 60) \quad (2.13)$$

$$a' = a - \frac{\bar{H}_d}{H} \quad (2.14)$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \sin(\omega_s - 60) \quad (2.15)$$

$$d = \sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s \quad (2.16)$$

Untuk beberapa orientasi, matahari dapat terbit dan terbenam dua kali dalam sehari, menghasilkan dua kondisi seperti pada persamaan 2.11. Sudut jam matahari terbit dan terbenam pada sebuah bidang permukaan ditentukan dengan membiarkan sudut datang radiasi matahari bernilai  $90^\circ$ . Hal ini akan mengakibatkan persamaan kuadrat dengan dua nilai  $\omega$  yang harus berada pada  $\pm\omega_s$ . Tanda pada  $\omega_{sr}$  dan  $\omega_{ss}$  bergantung pada orientasi bidang permukaan.

$$|\omega_{sr}| = \min \left[ \omega_s, \cos^{-1} \frac{AB + C \sqrt{A^2 - B^2 + C^2}}{A^2 + C^2} \right] \quad (2.17)$$

$$\omega_{sr} = \begin{cases} -|\omega_{sr}| & \text{jika } (A > 0 \text{ and } B > 0) \text{ atau } (A \geq B) \\ +|\omega_{sr}| & \text{sebaliknya} \end{cases}$$

$$|\omega_{ss}| = \min \left[ \omega_s, \cos^{-1} \frac{AB - C \sqrt{A^2 - B^2 + C^2}}{A^2 + C^2} \right] \quad (2.18)$$

$$\omega_{ss} = \begin{cases} +|\omega_{ss}| & \text{jika } (A > 0 \text{ and } B > 0) \text{ atau } (A \geq B) \\ -|\omega_{ss}| & \text{sebaliknya} \end{cases}$$



Dimana,

$$A = \cos \beta + \tan \phi \cos \gamma \sin \beta \quad (2.19)$$

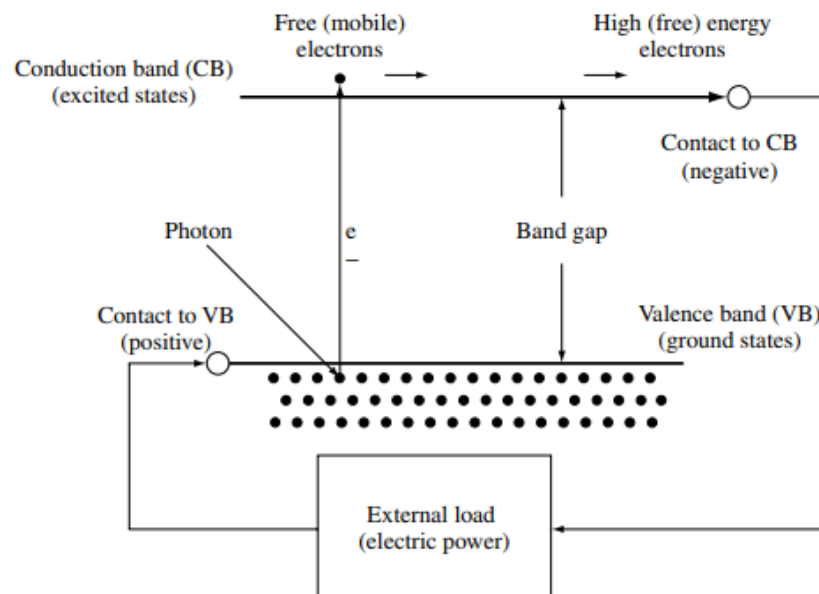
$$B = \cos \omega_s \cos \beta + \tan \delta \sin \beta \cos \gamma \quad (2.20)$$

$$C = \frac{\sin \beta \sin \gamma}{\cos \phi} \quad (2.21)$$

Nilai dari  $\bar{R}$  berlaku untuk semua orientasi permukaan dan semua garis lintang (termasuk garis lintang negatif untuk belahan bumi bagian Selatan). Hal ini berlaku ketika matahari terbit atau terbenam di permukaan bidang miring dua kali setiap hari atau tidak semuanya (Duffie & Beckman, 2013).

## 2.7. Photovoltaic

Photovoltaic (PV) merupakan teknologi yang dapat menghasilkan listrik DC dari sebuah semikonduktor ketika disinari oleh foton. Sel surya yang merupakan elemen individual dari sistem PV terbuat dari material semikonduktor yang memiliki ikatan elektron lemah yang menempati *valence band*. Ketika energi melebihi ambang batas tertentu, yang disebut *band gap energy*, diterapkan pada elektron valensi, ikatan akan terputus dan elektron akan sedikit "bebas" untuk bergerak dalam pita energi baru yang disebut *conduction band* di mana ia dapat "menghantarkan" listrik melalui material. Dengan demikian, elektron bebas dalam *conduction band* dipisahkan dari *valence band* oleh *band gap*. Energi yang dibutuhkan untuk membebaskan elektron ini dapat disuplai oleh foton.



**Gambar 2.9** Skema Cara Kerja Sel Surya

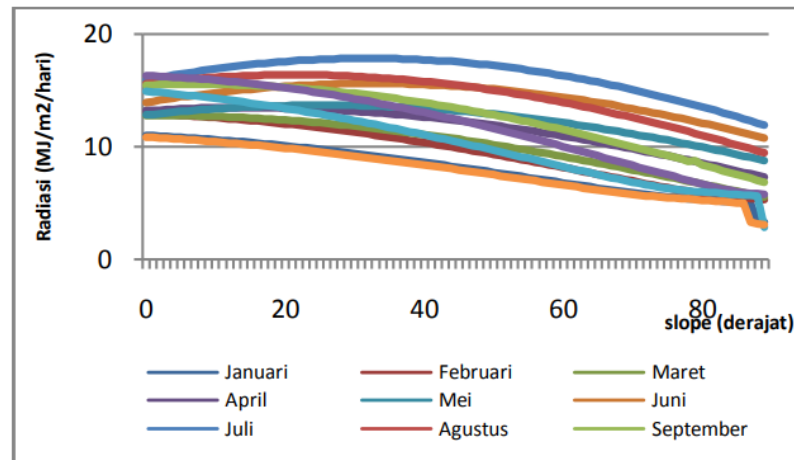
Ketika sel surya disinari oleh sinar matahari, foton akan menabrak elektron valensi sehingga memutuskan ikatan dan mendorongnya ke *conduction band*. Kontak selektif (*n-doped semiconductor*) akan mengumpulkan elektron dengan energi yang lebih tinggi pada *conduction band* dan mendorong elektron tersebut ke sirkuit eksternal melalui kabel. Elektron akan kehilangan energinya dengan melakukan pekerjaan di sirkuit eksternal seperti menyalakan elektronik, lampu, atau komputer. Elektron akan kembali ke sel surya melalui kontak selektif kedua (*p-type semiconductor*) yang mengembalikannya ke *valence band* dengan energi yang sama seperti pada mulanya.

Sinar matahari adalah spektrum foton yang didistribusikan pada rentang energi tertentu. Foton yang energinya lebih besar dari energi *band gap* (energi ambang batas) dapat mengeksitasi elektron dari *valence band* ke *conduction band* di mana mereka dapat keluar dari perangkat dan menghasilkan energi listrik. Foton dengan energi lebih kecil dari energi *band gap* akan gagal mengeksitasi elektron bebas. Sebaliknya, energi itu bergerak melalui sel surya dan akan diserap di bagian belakang sebagai panas. Sel surya di bawah sinar matahari langsung bisa sedikit lebih hangat daripada suhu udara sekitar. Dengan demikian, sel PV dapat menghasilkan listrik tanpa beroperasi pada suhu tinggi dan tanpa bagian yang bergerak (Luque & Hegedus, 2003).

## 2.8. Penelitian Terdahulu

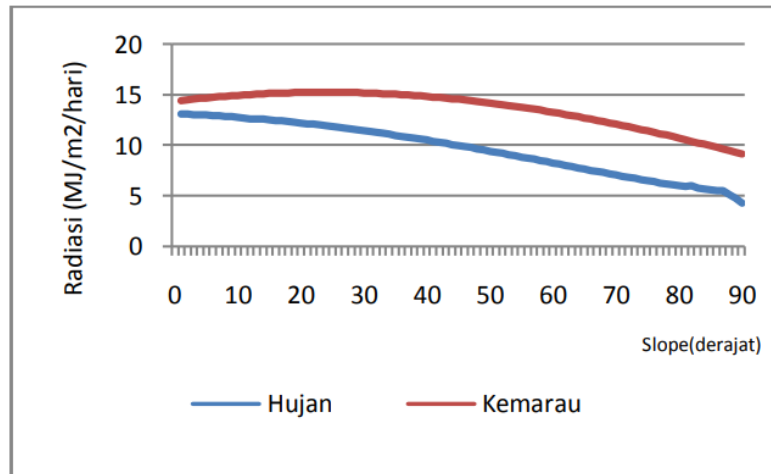
### 2.8.1. Analisis Pengaruh Sudut Kemiringan Panel Surya terhadap Radiasi Matahari yang Diterima oleh Panel Surya Tipe Larik Tetap

Pada tahun 2014, Pangestuningtyas D.L., Hermawan, dan Karnoto melakukan penelitian terhadap panel surya tipe larik tetap untuk melihat pengaruh dari sudut kemiringan terhadap performa dari panel surya tersebut. Penelitian dilaksanakan di Kota Semarang dengan menggunakan data pengukuran intensitas radiasi matahari dari stasiun pengukuran BMKG. Perhitungan dilakukan menggunakan GUI (*Graphic User Interface*) pada *software* MATLAB 2008a dengan memvariasikan sudut kemiringan dari  $1^\circ$  hingga  $90^\circ$  untuk mendapatkan nilai radiasi matahari yang terbesar pada setiap bulannya. Performa dari panel surya ditingkatkan dengan cara menempatkan panel surya dengan sudut kemiringan yang paling tepat agar intensitas radiasi matahari yang diterima maksimal.



**Gambar 2.10** Grafik Hubungan Sudut Kemiringan terhadap Radiasi Matahari yang Diterima Setiap Bulan

Hasil yang diperoleh berdasarkan program simulasi MATLAB berupa tabel dan grafik yang memperlihatkan hubungan antara sudut kemiringan dan radiasi matahari yang diterima setiap bulannya. Berdasarkan Gambar 2.10 dapat dilihat bahwa pengaruh sudut kemiringan terhadap radiasi matahari yang diterima berfluktuasi dengan grafik nonlinear. Dari grafik tersebut kemudian didapatkan radiasi maksimum setiap bulan dengan sudut kemiringan yang bervariasi antara  $1^\circ$  hingga  $34^\circ$ .



**Gambar 2.11** Perbandingan Radiasi Rata-Rata pada Musim Hujan dan Musim Kemarau

Pengaruh sudut kemiringan dan radiasi matahari yang diterima juga dapat ditinjau pada setiap musim. Dengan menjumlahkan radiasi matahari rata-rata yang diterima pada bulan Oktober sampai Maret untuk musim hujan dan bulan April sampai September untuk musim kemarau, didapatkan variasi radiasi matahari yang diterima terhadap sudut kemiringan pada setiap musim seperti pada Gambar 2.11 dapat dilihat bahwa pada musim kemarau jumlah radiasi matahari yang diterima lebih besar yaitu  $15,284 \text{ MJ/m}^2$  pada sudut kemiringan  $24^\circ$  dibandingkan pada musim hujan sebesar  $13,128 \text{ MJ/m}^2$  pada sudut kemiringan  $1^\circ$ .

**Tabel 2.2** Variasi Sudut Azimut terhadap Radiasi Rata-Rata Setiap Bulan

Bln	$90^\circ$ (MJ/m <sup>2</sup> )	$120^\circ$ (MJ/m <sup>2</sup> )	$150^\circ$ (MJ/m <sup>2</sup> )	$180^\circ$ (MJ/m <sup>2</sup> )	$210^\circ$ (MJ/m <sup>2</sup> )	$240^\circ$ (MJ/m <sup>2</sup> )	$270^\circ$ (MJ/m <sup>2</sup> )
Jan	11,0	10,8	10,8	10,7	10,8	10,9	11,0
Feb	12,9	12,8	12,7	12,7	12,7	12,8	12,9
Mar	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7
Apr	13,0	13,2	13,3	13,4	13,4	13,2	13,1
Mei	12,6	12,9	13,2	13,3	13,2	13,0	12,7
Jun	13,6	14,1	14,5	14,7	14,6	14,2	13,8
Jul	15,6	16,1	16,6	16,8	16,6	16,3	15,7
Agt	15,4	15,7	16,0	16,1	16,0	15,8	15,5
Sept	15,3	15,4	15,5	15,5	15,5	15,4	15,3
Okt	16,2	16,1	16,0	16,0	16,0	16,1	16,2
Nop	14,8	14,6	14,5	14,4	14,5	14,6	14,8
Des	10,8	10,7	10,6	10,5	10,6	10,7	10,8

Selain sudut kemiringan, sudut azimut juga memiliki pengaruh terhadap besarnya radiasi matahari yang diterima. Sudut azimut divariasikan dari  $90^\circ$  hingga  $270^\circ$  dengan kenaikan  $30^\circ$  untuk mendapatkan pengaruh sudut azimut terhadap radiasi matahari yang diterima dan digunakan sudut kemiringan  $9^\circ$  yang merupakan sudut kemiringan dengan radiasi rata-rata matahari maksimum yaitu sebesar  $13,86 \text{ MJ/m}^2$  per hari. Berdasarkan

Tabel 2.2 didapatkan sudut azimuth yang terbaik sebesar 180° yaitu dengan pemasangan panel surya menghadap Utara (Pangestuningtyas et al., 2014).

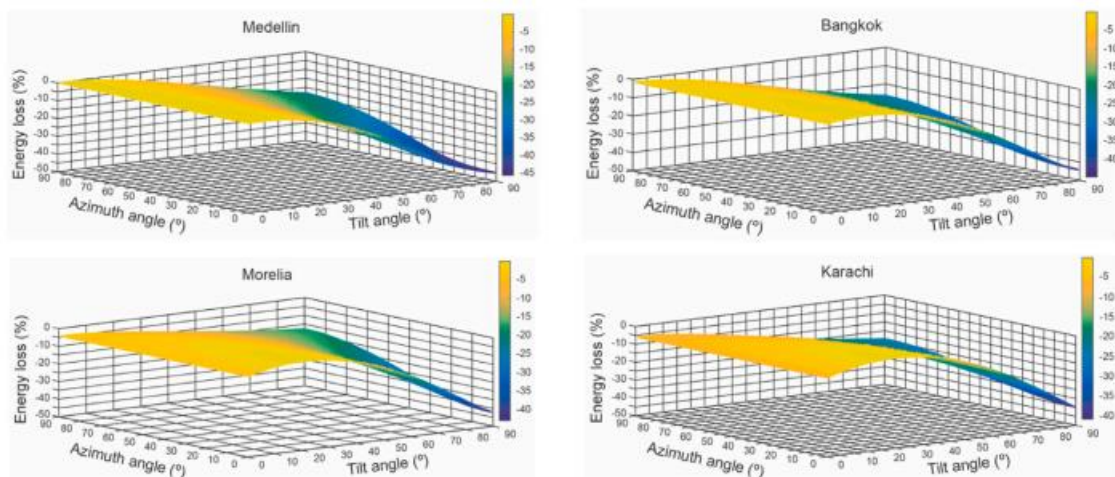
### 2.8.2. Analysis of The Tilt and Azimuth Angles of Photovoltaic Systems in Non-ideal Positions for Urban Applications

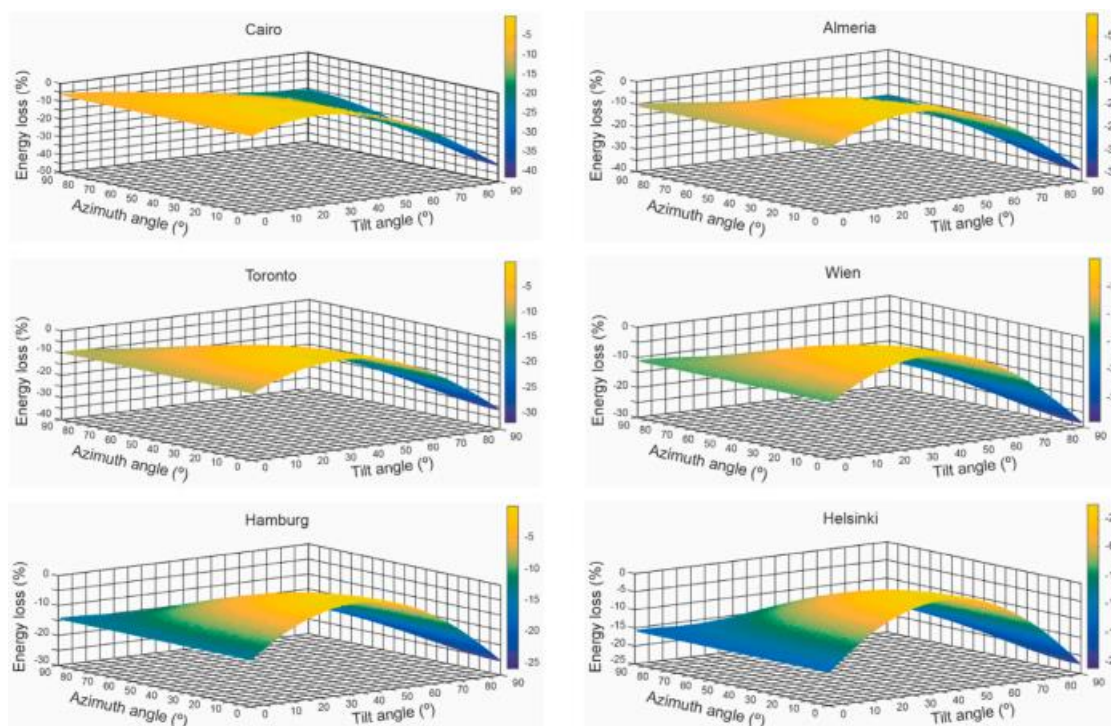
Pada tahun 2021, Barbón dkk. melakukan penelitian terhadap pengaruh dari sudut kemiringan dan sudut azimuth pada sistem PV terhadap intensitas energi yang diterima. Penelitian ini bertujuan untuk melihat pengaruh dari posisi instalasi non-ideal sistem PV terhadap energi yang diterima setiap tahun dan distribusi panel PV. Penelitian dilaksanakan pada sepuluh lokasi berbeda dengan membandingkan *energy loss* yang dihasilkan oleh deviasi dari sudut kemiringan dan sudut azimuth instalasi sistem PV pada posisi non-ideal dan posisi ideal (optimal). Perhitungan iradiasi matahari tahunan dilakukan menggunakan model matematika pada *software* MATLAB, sedangkan posisi ideal didapatkan menggunakan aplikasi Hukum Cavalieri.

**Tabel 2.3** Sudut Kemiringan Optimal dan Iradiasi Matahari Tahunan Maksimal

City	Jacobson's formula		Proposed method	
	$\beta_{opt}$ (°)	Maximum annual irradiation (MWh/m <sup>2</sup> )	$\beta_{opt}$ (°)	Maximum annual irradiation (MWh/m <sup>2</sup> )
Medellin (Colombia)	8.3	1.8274	4.5	1.8299
Bangkok (Thailand)	15.3	1.8843	13.2	1.8852
Morelia (Mexico)	20.0	2.1772	19.9	2.1772
Karachi (Pakistan)	23.5	2.2398	23.6	2.2398
Cairo (Egypt)	26.6	2.2764	24.2	2.2779
Almeria (Spain)	30.0	2.1084	30.3	2.1084
Toronto (Canada)	33.0	1.4442	30.6	1.4450
Wien (Austria)	34.8	1.3397	32.9	1.3408
Hamburg (Germany)	36.7	1.1700	36.8	1.1701
Helsinki (Finland)	39.0	1.0558	38.6	1.0562

Sepuluh lokasi yang berbeda dipilih untuk mendapatkan hasil yang bervariasi pada daerah Utara garis khatulistiwa yang memiliki garis lintang 6° hingga 60° dengan kenaikan sekitar 6°. Berdasarkan Tabel 2.3 dapat dilihat hasil yang diperoleh berdasarkan perhitungan model matematika pada MATLAB hampir memiliki kesamaan dengan rumus perhitungan Jacobson, dengan deviasi tidak lebih dari 0,30%. Hasil perhitungan yang telah divalidasi kemudian digunakan untuk memperoleh persentase *energy loss* terhadap posisi non-ideal dari sistem PV.





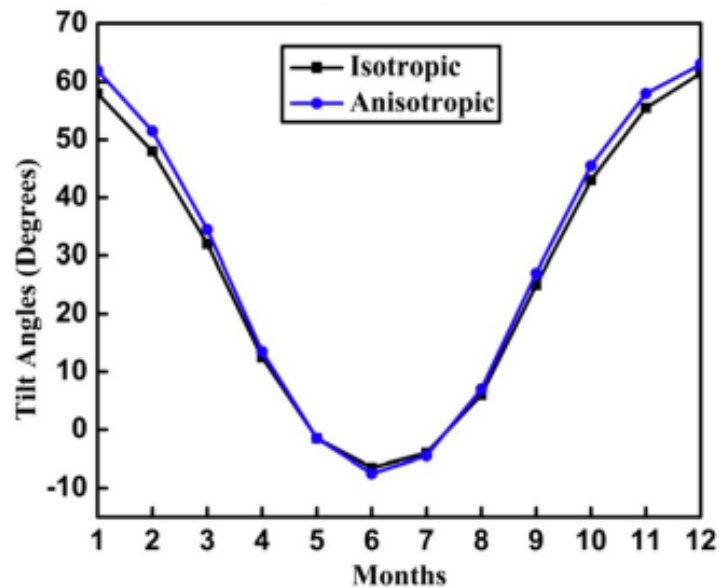
**Gambar 2.12** *Energy Loss* pada 10 Lokasi Penelitianb

Orientasi sudut azimuth sebesar  $0^\circ$  dan deviasi sudut kemiringan hingga mencapai  $10^\circ$  memiliki pengaruh yang sangat kecil terhadap iradiasi matahari yang diterima, yakni hanya sekitar 1%. Apabila deviasi sudut kemiringan semakin besar, maka pengaruhnya terhadap iradiasi matahari yang diterima juga semakin besar. Deviasi  $21^\circ$ – $23^\circ$  dapat menyebabkan *energy loss* sebesar 5%, deviasi  $31^\circ$ – $33^\circ$  dapat menyebabkan *energy loss* sebesar 10%, deviasi  $37^\circ$ – $40^\circ$  dapat menyebabkan *energy loss* sebesar 15%, sementara deviasi  $43^\circ$ – $47^\circ$  dapat menyebabkan *energy loss* sebesar 20%. Semakin besar garis lintang sebuah lokasi akan terjadi penurunan sudut azimuth pada iradiasi matahari yang diterima hingga 1%. Di Helsinki, deviasi sudut azimuth yang mencapai  $23^\circ$  memiliki pengaruh yang sangat kecil pada iradiasi matahari yang diterima, yakni hanya mencapai 1%. Sementara apabila deviasi sudut azimuth semakin besar, maka pengaruhnya terhadap iradiasi matahari yang diterima juga semakin besar. Deviasi yang mencapai  $48^\circ$  dapat menyebabkan *energy loss* sebesar 5% dan deviasi yang mencapai  $69^\circ$  dapat menyebabkan *energy loss* sebesar 10%. Sehingga, pengaruh dari sudut kemiringan lebih besar dibandingkan pengaruh sudut azimuth terhadap iradiasi matahari yang diterima (Barbón et al., 2022).

### **2.8.3. Investigation of Optimal Tilt Angles and Effects of Soiling on PV Energy Production in Pakistan**

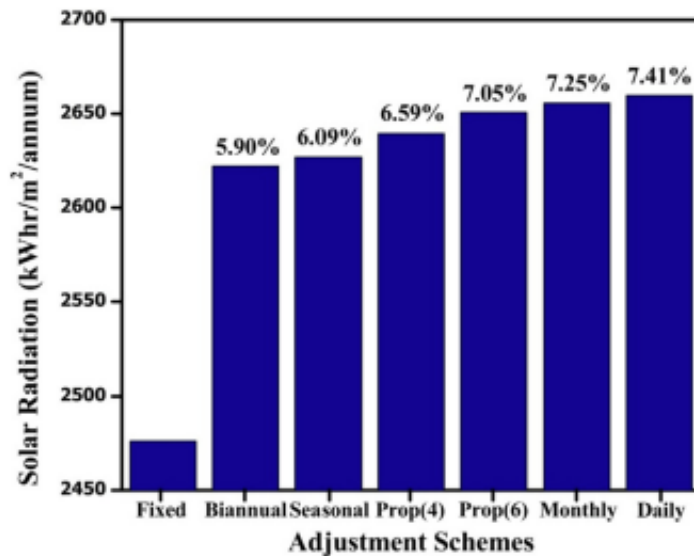
Penelitian yang dilakukan oleh Assad Ullah, Hassan Imran, Zaki Maqsood, dan Nauman Zafar Butt pada tahun 2019 memiliki tujuan untuk menentukan sudut kemiringan yang optimal dan mengidentifikasi pengaruh dari debu yang menumpuk pada panel PV di kota Lahore, Pakistan. Untuk memperoleh sudut kemiringan optimal, dilakukan perhitungan dalam mencari radiasi matahari maksimum pada bidang miring dengan variasi sudut kemiringan antara  $-90^\circ$  sampai  $90^\circ$ . Penelitian dilakukan sepanjang tahun untuk dapat menentukan sudut kemiringan optimal harian, bulanan, musiman, dan

dua kali setahun agar dapat membandingkan penyesuaian instalasi yang paling menguntungkan.



**Gambar 2.13** Sudut Kemiringan Optimal Setiap Bulan

Berdasarkan Gambar 2.13 didapatkan sudut kemiringan optimal bulanan sepanjang tahun pada kota Lahore bervariasi antara  $61,5^\circ$  hingga  $-6,5^\circ$  dengan orientasi menghadap ke Selatan (nilai negatif berarti orientasi menghadap ke Utara). Optimasi sudut kemiringan dilakukan menggunakan *coding* pada *software* MATLAB dengan permodelan *isotropic* dan *anisotropic* dalam menghitung radiasi *diffuse*. Keduanya hampir memiliki kesamaan bentuk grafik kecuali pada musim dingin ketika kondisi berawan lebih sering terjadi. Untuk mendapatkan produksi energi maksimal dari panel PV sepanjang tahun, sudut kemiringan optimal disesuaikan untuk berbagai interval periodik seperti harian, bulanan, musiman, dan tahunan.



**Gambar 2.14** Perbandingan Penyesuaian untuk Berbagai Interval

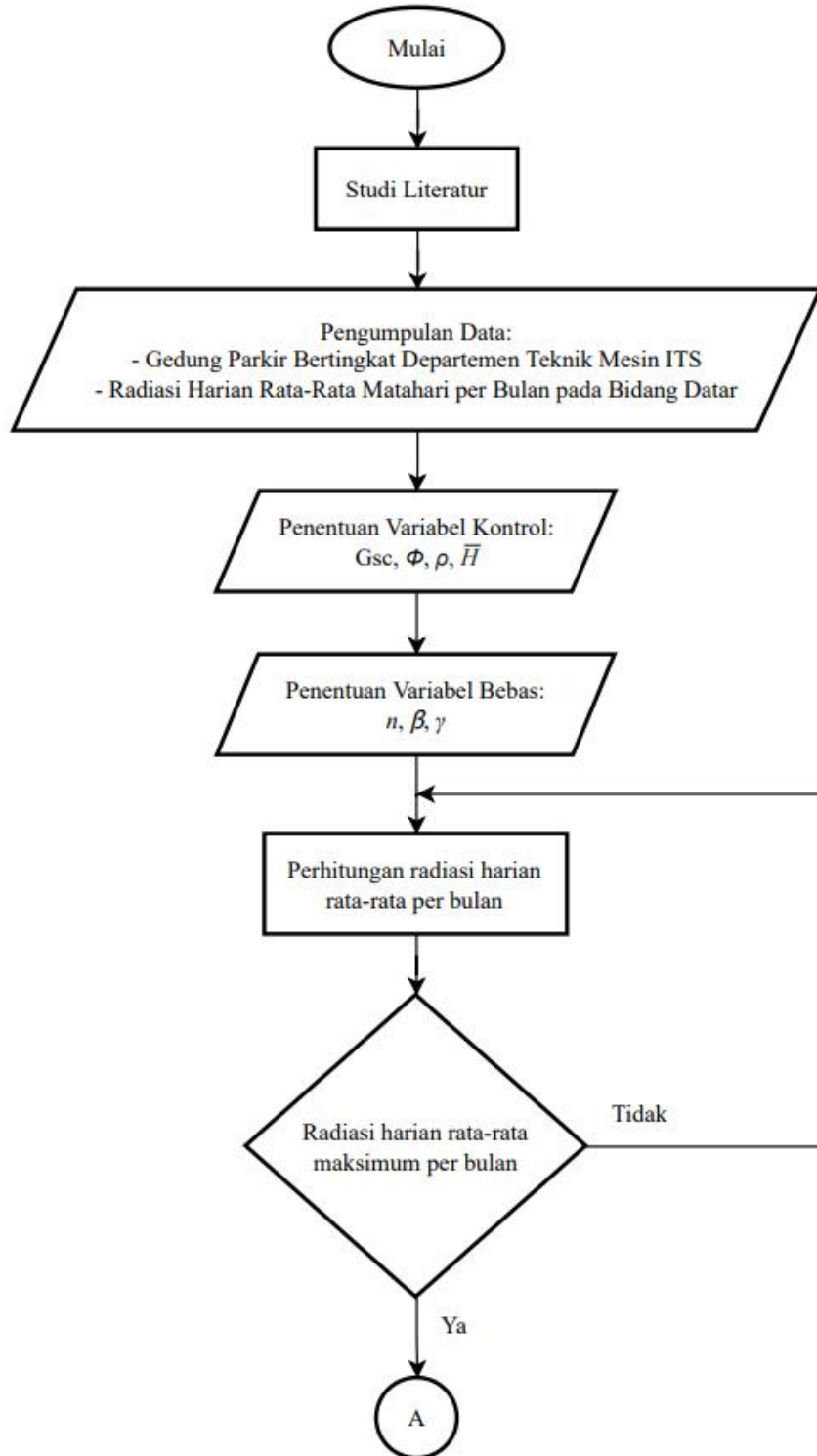
Penyesuaian sudut kemiringan sebanyak dua kali atau lebih dalam setahun akan meningkatkan radiasi matahari yang diterima mulai dari 5,9% hingga 7,41%. Radiasi

matahari yang paling sedikit diterima terjadi pada sudut kemiringan tetap sepanjang tahun. Oleh karena itu, sudut kemiringan tetap meskipun merupakan pilihan yang paling nyaman, namun tidak begitu efisien. Sedangkan untuk radiasi matahari tertinggi yang diterima terjadi pada sudut kemiringan yang disesuaikan setiap hari yaitu sebesar 2.660 kWh/m<sup>2</sup> atau sebesar 7,41% lebih tinggi dibandingkan sudut kemiringan tetap, tetapi hal ini mungkin bukan pilihan yang praktis. Penyesuaian sudut kemiringan sebanyak enam kali dalam setahun merupakan opsi yang juga menguntungkan. Walaupun tingkat radiasi matahari yang diterima sebesar 2650 kWh/m<sup>2</sup> dalam setahun atau sebesar 7,05% lebih tinggi dari sudut kemiringan tetap, jadwal penyesuaian memiliki jumlah yang lebih sedikit dan juga lebih praktis. Sehingga, semakin sering melakukan penyesuaian sudut kemiringan maka semakin tinggi radiasi matahari yang diterima oleh panel PV (Ullah et al., 2019).

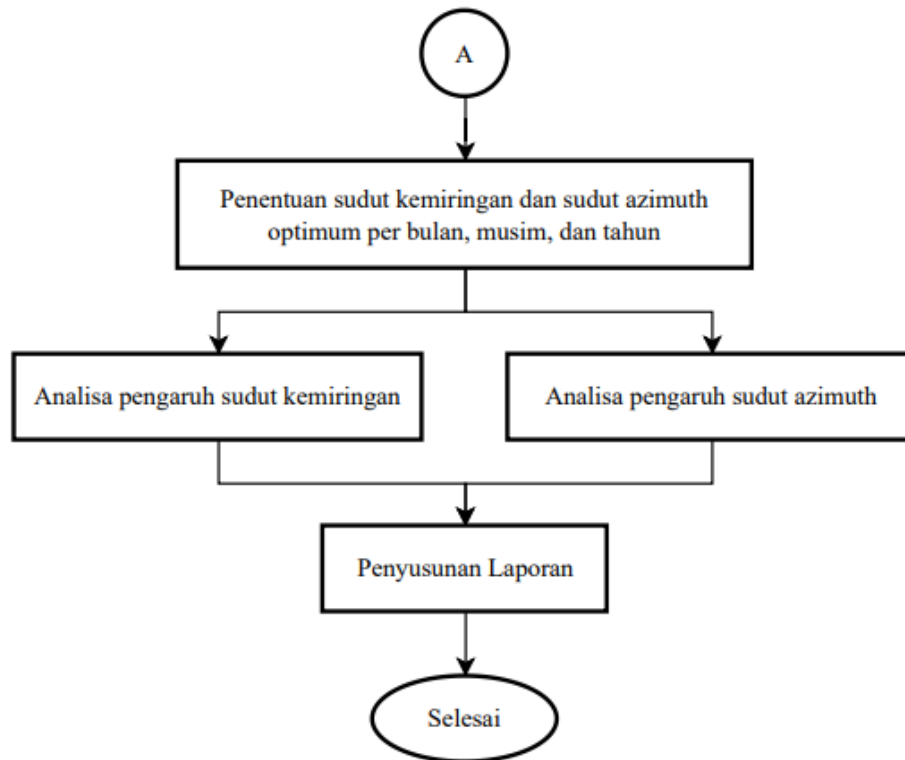
## BAB III METODE PENELITIAN

### 3.1. Diagram Alir Penelitian

Metodologi yang digunakan dalam penelitian disederhanakan dalam bentuk diagram alir agar penelitian dilaksanakan secara sistematis dan mempermudah dalam menganalisis data. Diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1 dibawah ini.







**Gambar 3.1** Diagram Alir Penelitian

### 3.2. Studi Literatur

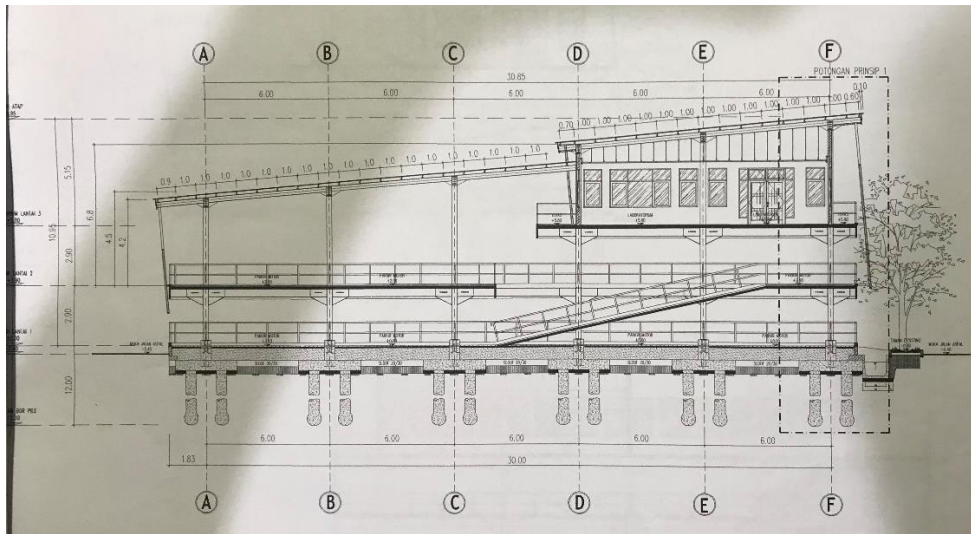
Sebelum melaksanakan penelitian, studi literatur dilakukan untuk mendapatkan informasi berdasarkan referensi penelitian terdahulu guna menunjang penulis dalam menyelesaikan permasalahan pada penelitian. Studi literatur yang dilakukan yaitu mencari referensi penelitian mengenai optimasi sudut kemiringan dan sudut azimuth pada panel surya. Berbagai literatur yang digunakan sebagai penunjang yaitu berasal dari artikel, buku, dan jurnal internasional.

### 3.3. Pengumpulan Data

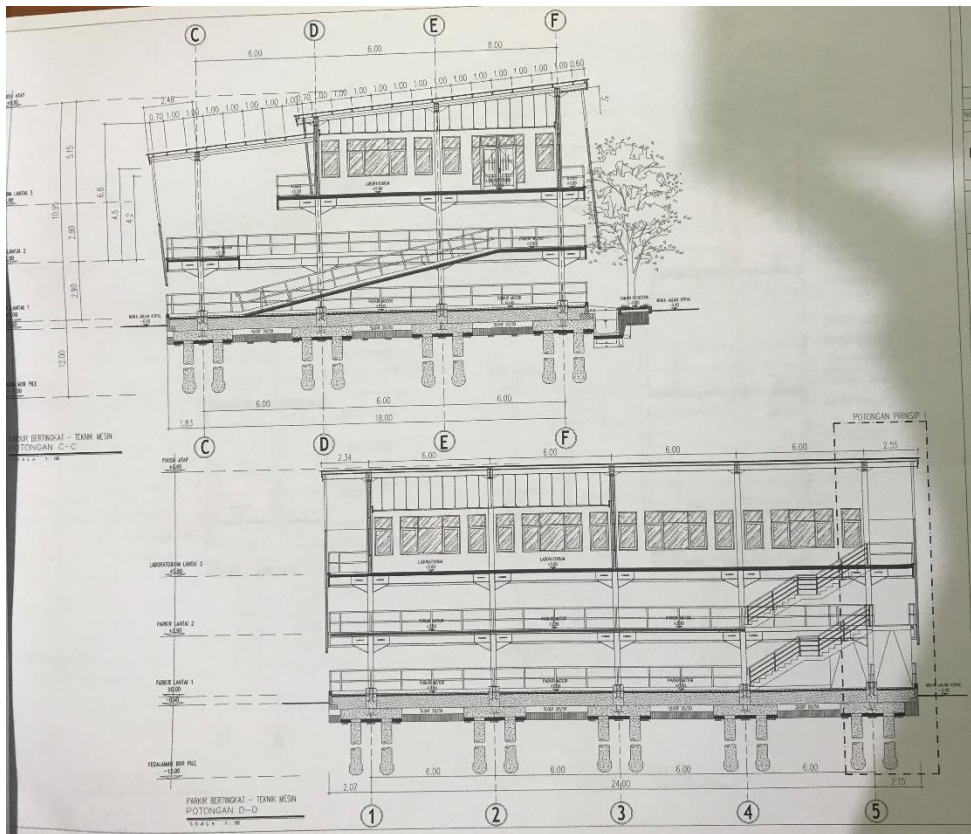
Pada tahap ini, dilakukan pengumpulan data yang nantinya berguna dalam penyelesaian permasalahan dalam penelitian. Adapun data yang digunakan diperoleh berdasarkan rancangan Gedung Parkir Bertingkat Departemen Teknik Mesin ITS dan radiasi harian rata-rata matahari setiap bulan pada bidang datar dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika.

#### 3.3.1. Gedung Parkir Bertingkat Departemen Teknik Mesin ITS

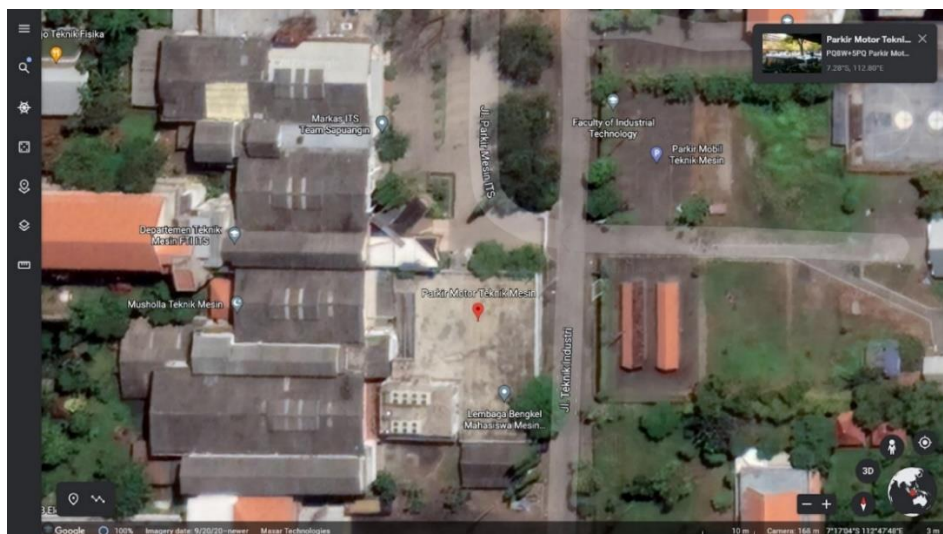
Gedung Parkir Bertingkat merupakan proyek Departemen Teknik Mesin ITS dalam membangun Ruang Laboratorium di Lantai 3 Lahan Parkir Kendaraan Roda Dua. Ruang Laboratorium akan difungsikan untuk mahasiswa dan memiliki sumber daya dari energi surya. Berikut merupakan Rancangan Gedung Parkir Bertingkat Departemen Teknik Mesin ITS.



**Gambar 3.2** Tampak Depan Gedung Parkir Departemen Teknik Mesin ITS



**Gambar 3.3** Tampak Samping Gedung Parkir Departemen Teknik Mesin ITS  
Sumber: Departemen Teknik Mesin ITS



**Gambar 3.4** Lokasi Koordinat Gedung Parkir Departemen Teknik Mesin ITS

Pada penelitian ini digunakan data lokasi koordinat Gedung Parkir Departemen Teknik Mesin ITS dalam memperoleh sudut deklinasi. Dengan koordinat  $7^{\circ}17'04''$  Selatan dan  $112^{\circ}47'48''$  Timur, didapatkan sudut deklinasi sebagai berikut.

$$\phi = -7,28^{\circ}$$

### 3.3.2. Radiasi Harian Rata-Rata Matahari per Bulan pada Bidang Datar

Radiasi harian rata-rata matahari per bulan pada bidang datar dinotasikan sebagai  $\bar{H}$  yang merupakan radiasi matahari yang diukur pada tanggal rata-rata bulan pengukuran menggunakan *pyranometer*. Radiasi total matahari (*beam* dan *diffuse*) diukur di atas permukaan bumi dengan orientasi sejajar dengan bidang horizontal ( $\beta = 0^{\circ}$ ). Data radiasi tersebut diperoleh dari rata-rata pengukuran Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) pada Stasiun Meteorologi Perak I, Stasiun Meteorologi Maritim Perak II, dan Stasiun Meteorologi Juanda pada tahun 2020. Berikut merupakan radiasi harian rata-rata matahari per bulan pada bidang datar di Kota Surabaya.

**Tabel 3.1** Radiasi Harian Rata-Rata Matahari per Bulan pada Bidang Datar

Bulan	$\bar{H}$ (MJ/m <sup>2</sup> )
Januari	17,188
Februari	17,822
Maret	18,218
April	17,454
Mei	16,410
Juni	16,268
Juli	17,750
Agustus	19,242
Sepember	21,017
Oktober	19,730
Nopember	17,992
Desember	13,211

Sumber: (BMKG, 2020).

### 3.4. Penentuan Variabel Kontrol

Variabel kontrol merupakan variabel yang dapat dikendalikan sehingga pengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat tidak dipengaruhi oleh faktor di luar penelitian. Pada penelitian ini digunakan sejumlah variabel kontrol untuk menghindari adanya hasil perhitungan yang bias. Berikut merupakan variabel kontrol yang digunakan pada penelitian ini.

**Tabel 3.2** Variabel Kontrol

No	Variabel	Nilai	Keterangan
1.	$G_{sc}$	1.367 W/m <sup>2</sup>	Konstanta surya
2.	$\phi$	-7,28°	Garis lintang
3.	$\rho_g$	0,2	Ground reflectance
4.	$\bar{H}$	Tabel 3.1	Radiasi harian rata-rata setiap bulan pada bidang datar

### 3.5. Penentuan Variabel Bebas

Variabel bebas merupakan variabel yang nilainya akan memengaruhi variabel lainnya, yaitu variabel terikat. Pada penelitian ini, variabel bebas akan divariasikan untuk melihat pengaruhnya terhadap variabel terikat (radiasi matahari). Adapun variabel bebas yang digunakan yaitu sebagai berikut.

**Tabel 3.3** Variabel Bebas

No	Variabel	Nilai	Keterangan
1.	$n$	Tabel 3.4	Hari pada bulan pengukuran
2.	$\beta$	0° - 90° dengan kenaikan 1°	Sudut kemiringan
3.	$\gamma$	-180° - 180° dengan kenaikan 4°	Sudut azimuth

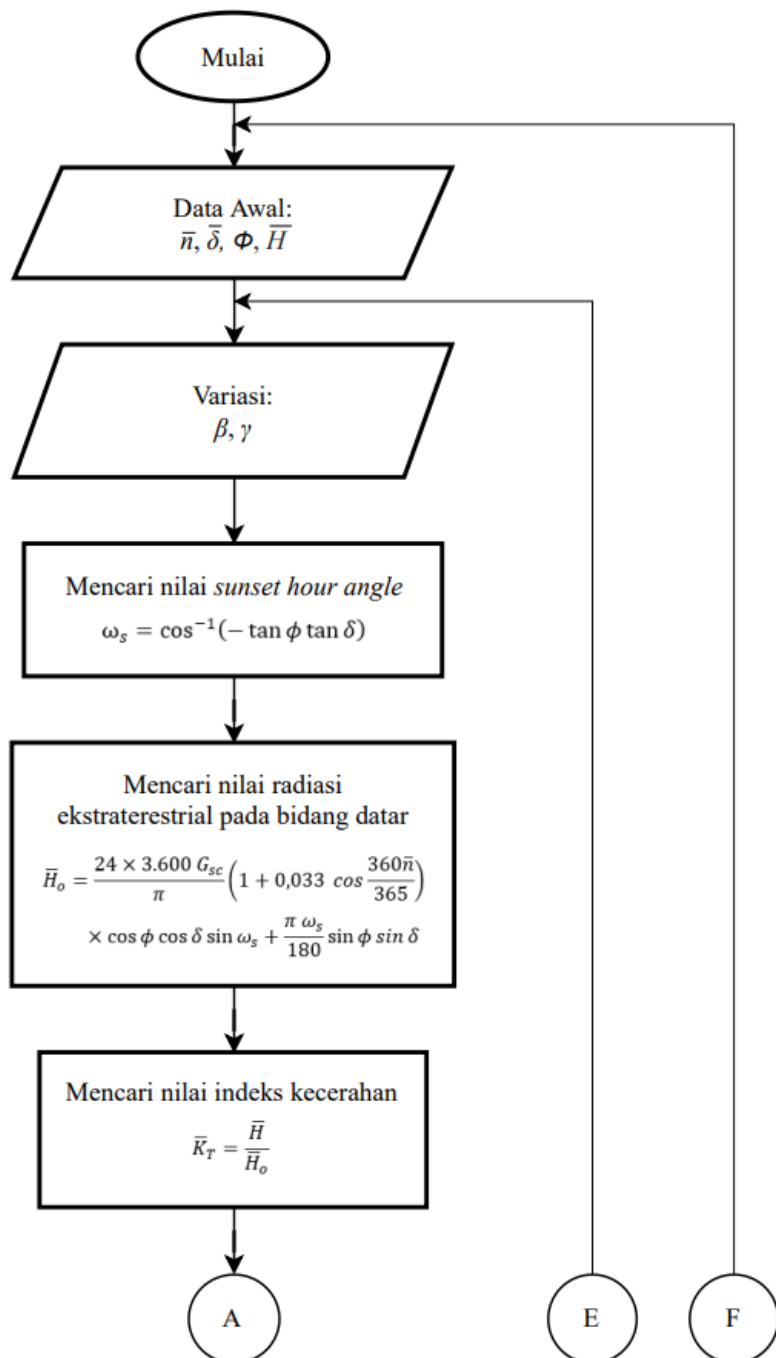
Untuk mendapatkan hasil yang dapat merepresentasikan pengukuran sepanjang tahun, digunakan nilai  $\bar{n}$  pada setiap bulan berdasarkan Tabel 2.1. Nilai  $\bar{n}$  merupakan nilai  $n$  pada hari pengukuran yang dapat mewakili tingkat radiasi matahari selama bulan tersebut. Nilai  $\bar{n}$  kemudian akan digunakan dalam mendapatkan sudut deklinasi rata-rata ( $\bar{\delta}$ ) pada bulan pengukuran. Berikut merupakan nilai  $\bar{n}$  dan  $\bar{\delta}$  yang digunakan pada penelitian ini.

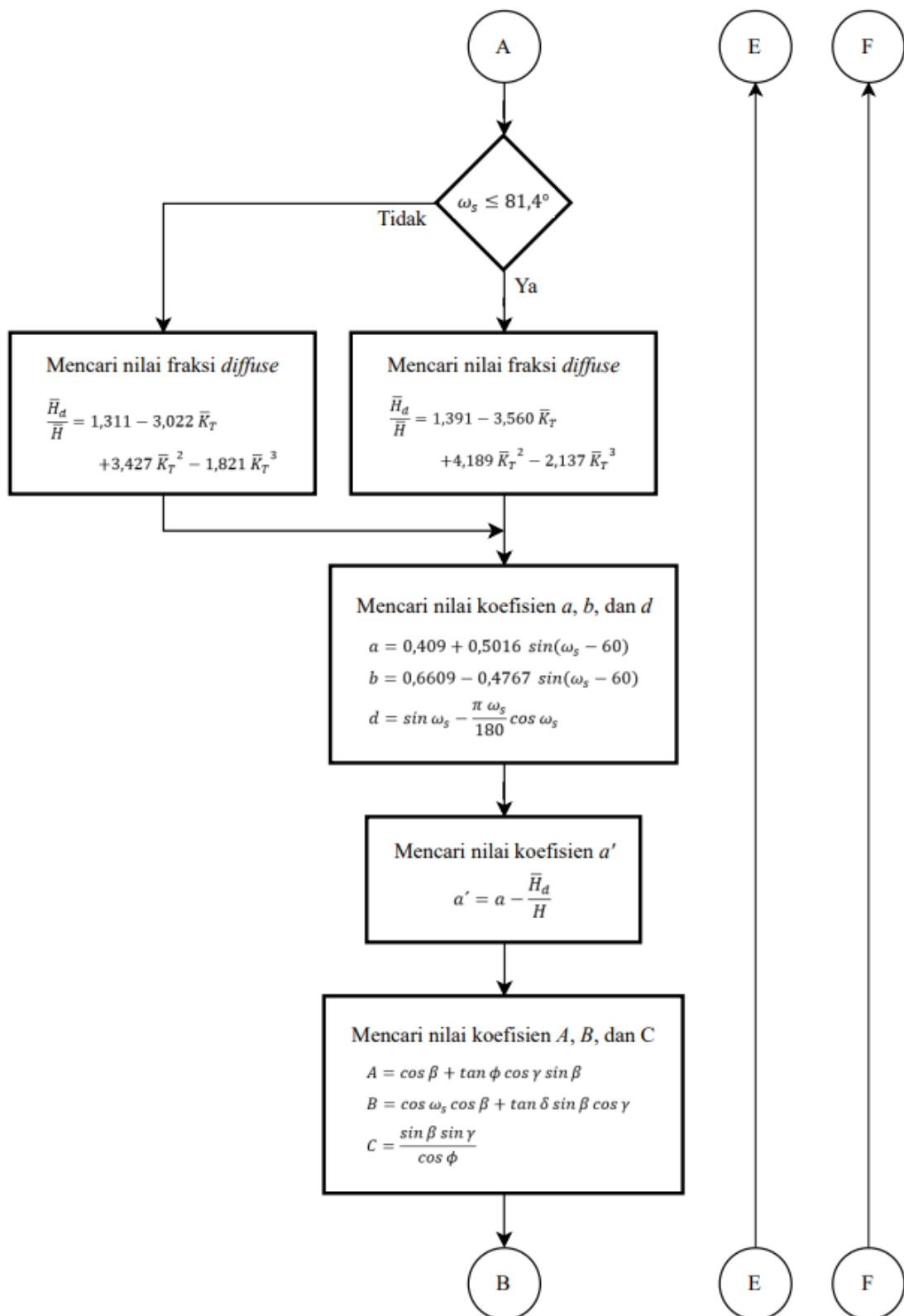
**Tabel 3.4** Variabel  $\bar{n}$  dan  $\bar{\delta}$  Setiap Bulan

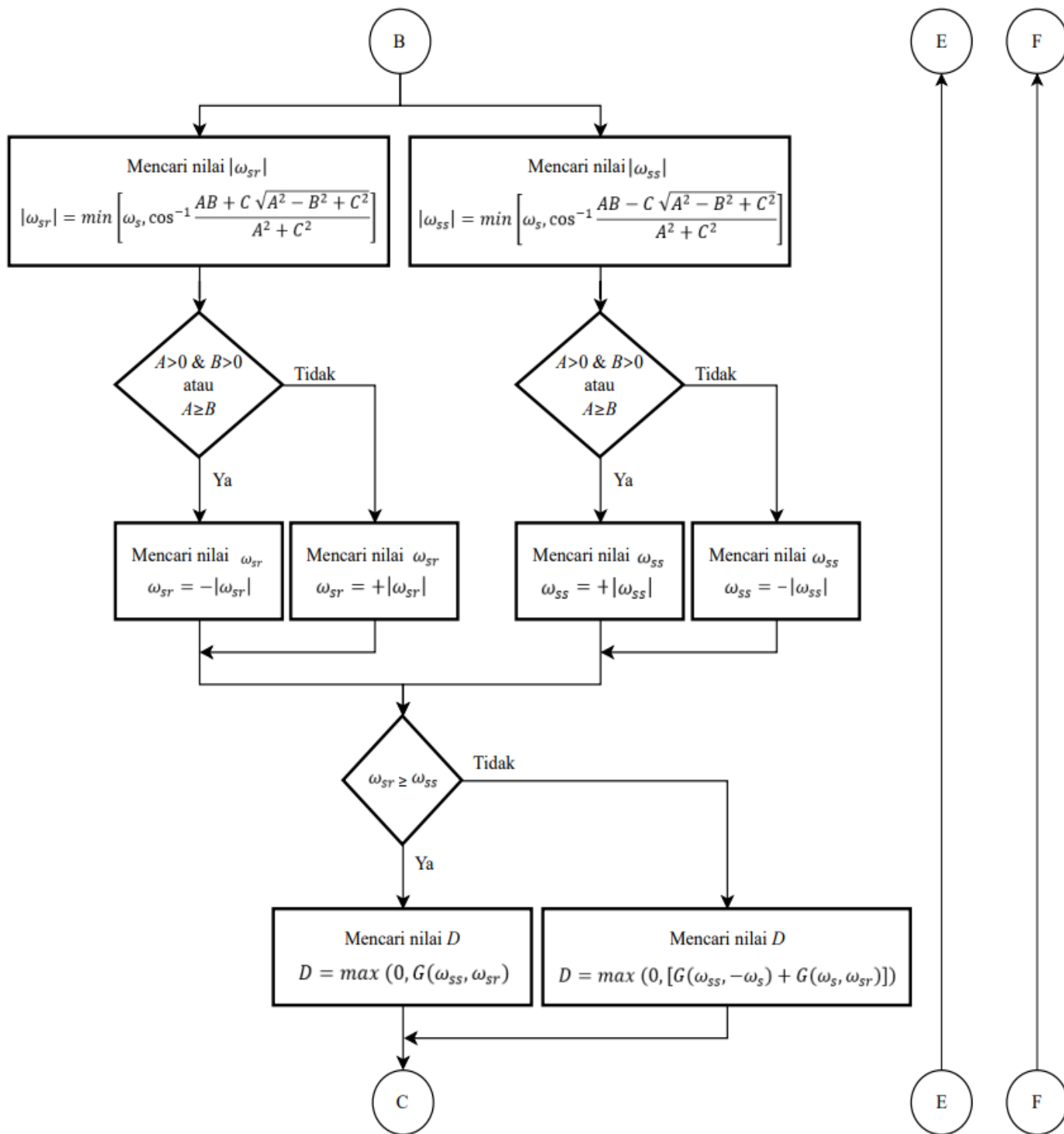
Bulan	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Agu	Sep	Okt	Nop	Des
$\bar{n}$	17	47	75	105	135	162	198	228	258	288	318	344
$\bar{\delta}$	-20,9	-13,0	-2,4	9,4	18,8	23,1	21,2	13,5	2,2	-9,6	-18,9	-23,0

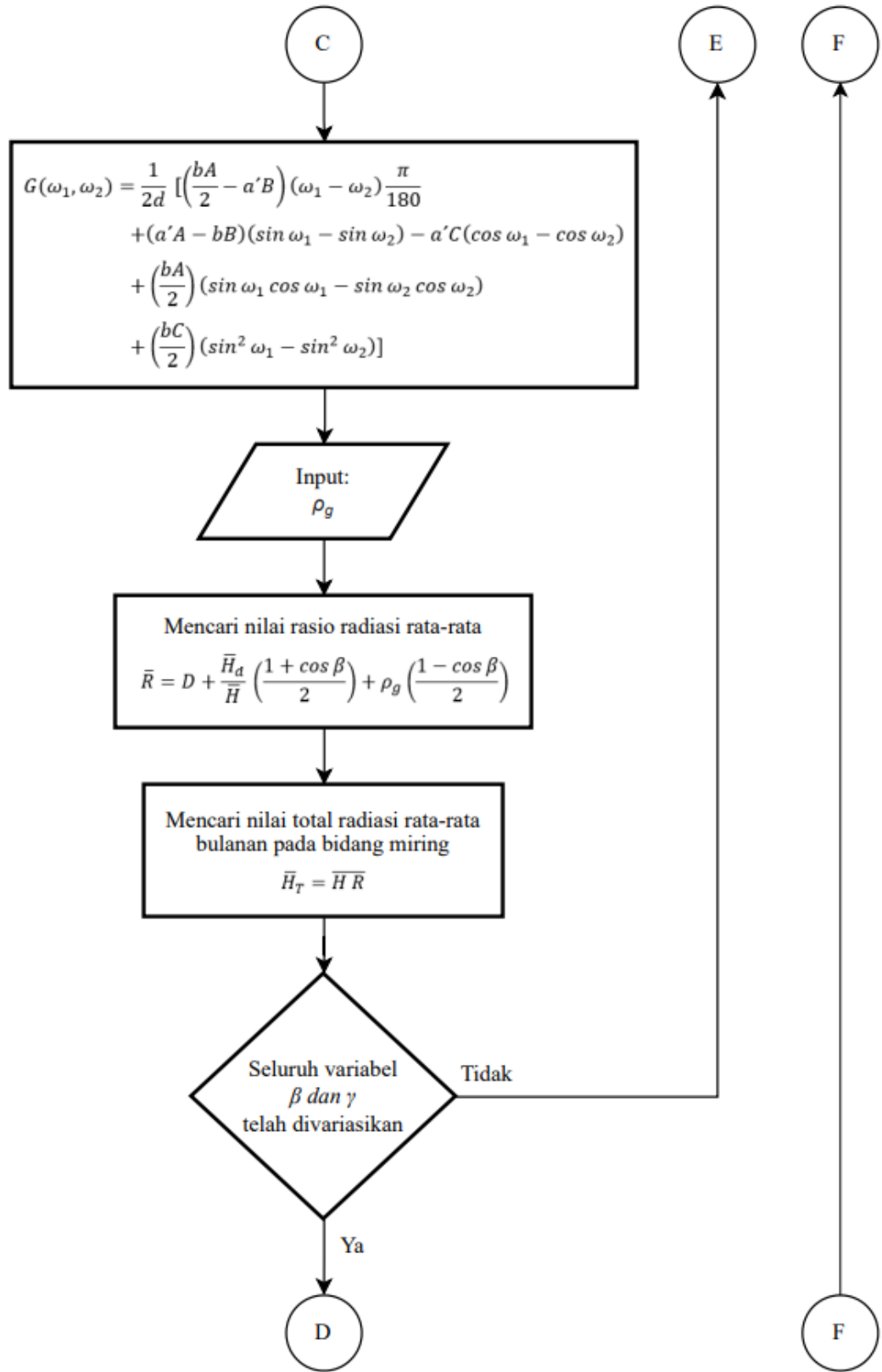
### 3.6. Diagram Alir Perhitungan

Pada penelitian ini, digunakan software MATLAB R2020b dalam melakukan perhitungan radiasi harian rata-rata setiap bulan pada bidang miring. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan metode *multidimensional optimization* dimana digunakan matriks persegi sebesar 91x91 dengan mengkombinasikan sudut kemiringan dan sudut azimuth ke dalam persamaan untuk mendapatkan nilai radiasi harian rata-rata maksimum. Mula-mula dimasukkan data awal untuk setiap bulan lalu matriks variasi sudut kemiringan dan sudut azimuth, kemudian perhitungan dilakukan sebanyak 19 kali yaitu 12 bulan, 4 kuartal, 2 musim, dan sepanjang tahun. Berikut merupakan diagram alir perhitungan pada penelitian yang akan dilakukan.

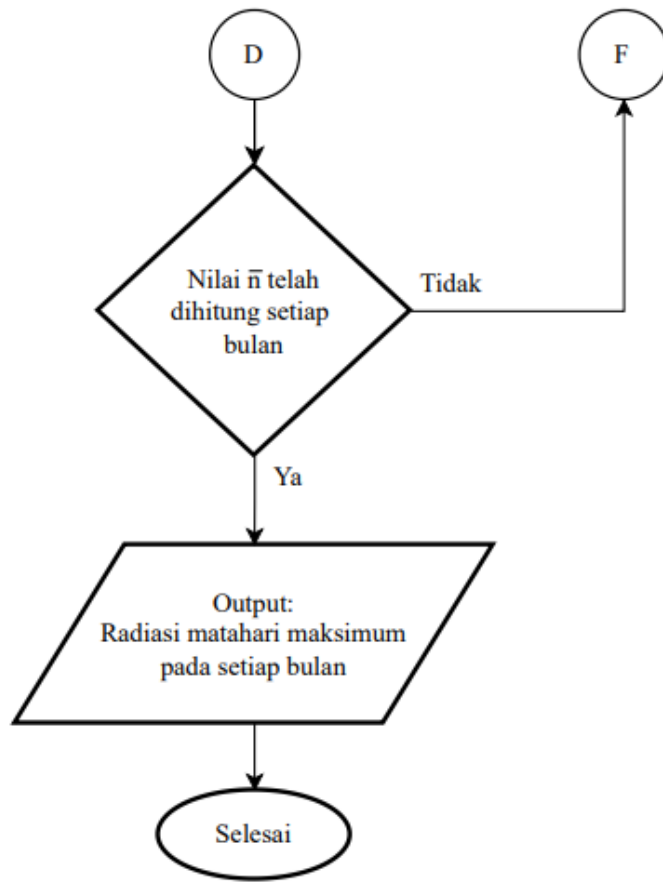












**Gambar 3.5** Diagram Alir Perhitungan

### 3.7. Validasi Perhitungan

Validasi dilakukan untuk memperkuat data hasil perhitungan pada *software* MATLAB R2020b. Validasi metode dilakukan menggunakan Microsoft Excel berdasarkan perhitungan radiasi harian rata-rata dengan metode KT. Penelitian yang berjudul *“Prediction of The Optimum Slope and Surface Azimuth Angles Using The Genetic Algorithm”* yang dilakukan oleh Talebizadeh et al. (2011) digunakan sebagai acuan untuk dapat mengetahui tingkat keakuratan perhitungan yang sudah dilakukan. Penelitian tersebut dilakukan di Iran pada *latitude* 32,5° untuk mendapatkan sudut kemiringan optimum setiap jam, harian, bulanan, musiman, dan sepanjang tahun dengan menggunakan metode optimasi Algoritma Genetika. Data radiasi harian rata-rata setiap bulan pada bidang datar didapatkan berdasarkan Iranian Meteorology Organization (IMO). Data awal yang sama dimasukkan ke dalam Microsoft Excel untuk dilakukan perhitungan radiasi harian rata-rata pada bidang miring dengan menggunakan metode yang berbeda yaitu metode KT. Berikut merupakan perhitungan yang dilakukan pada Microsoft Excel berdasarkan data dari penelitian yang dilakukan oleh Talebizadeh.

Input Data		$\beta$	A	B	C	$\omega_{sr}$	$\omega_{sw}$	G	R	$H_t$	$\beta$	A	B	C	$\omega_{sr}$	$\omega_{sw}$	G	R	$H_t$
n	17	0 °	1.000	0.243	0.000	-75.91 °	75.91 °	0.767	0.992	13.590	46 °	1.153	-0.106	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.445	1.666	22.830
$\delta$	-20.92 °	1 °	1.011	0.237	0.000	-75.91 °	75.91 °	0.789	1.014	13.892	47 °	1.148	-0.113	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.451	1.672	22.903
$\phi$	32.5 °	2 °	1.022	0.230	0.000	-75.91 °	75.91 °	0.811	1.036	14.190	48 °	1.143	-0.121	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.456	1.677	22.971
γ	0 °	3 °	1.032	0.223	0.000	-75.91 °	75.91 °	0.832	1.057	14.485	49 °	1.137	-0.129	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.460	1.681	23.032
p	0.2	4 °	1.042	0.216	0.000	-75.91 °	75.91 °	0.853	1.079	14.776	50 °	1.131	-0.136	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.465	1.685	23.087
H	13.700 MJ/m <sup>2</sup>	5 °	1.052	0.209	0.000	-75.91 °	75.91 °	0.874	1.100	15.064	51 °	1.124	-0.144	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.468	1.689	23.137
Find $\omega_{s1}$		6 °	1.061	0.202	0.000	-75.91 °	75.91 °	0.895	1.120	15.348	52 °	1.118	-0.151	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.472	1.692	23.179
$\omega_{s1}$		7 °	1.070	0.195	0.000	-75.91 °	75.91 °	0.916	1.141	15.628	53 °	1.111	-0.159	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.474	1.695	23.216
Find A, B, and C		8 °	1.079	0.188	0.000	-75.91 °	75.91 °	0.936	1.161	15.905	54 °	1.103	-0.166	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.477	1.697	23.247
A		9 °	1.087	0.181	0.000	-75.91 °	75.91 °	0.956	1.181	16.177	55 °	1.095	-0.173	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.479	1.699	23.271
B		10 °	1.095	0.173	0.000	-75.91 °	75.91 °	0.975	1.200	16.445	56 °	1.087	-0.181	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.480	1.700	23.289
C		11 °	1.103	0.166	0.000	-75.91 °	75.91 °	0.995	1.220	16.710	57 °	1.079	-0.188	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.481	1.701	23.301
Find $\omega_{s2}$		12 °	1.111	0.159	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.014	1.239	16.970	58 °	1.070	-0.195	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.482	1.704	23.307
$\omega_{s2}$		13 °	1.118	0.151	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.032	1.257	17.225	59 °	1.061	-0.202	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.482	1.701	23.307
Find $\omega_{s3}$		14 °	1.124	0.144	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.051	1.276	17.477	60 °	1.052	-0.209	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.482	1.701	23.300
$\omega_{s3}$		15 °	1.131	0.136	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.069	1.294	17.724	61 °	1.042	-0.216	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.481	1.700	23.287
Find $\omega_{s4}$		16 °	1.137	0.129	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.087	1.311	17.966	62 °	1.032	-0.223	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.480	1.698	23.268
$\omega_{s4}$		17 °	1.143	0.121	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.104	1.329	18.204	63 °	1.022	-0.230	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.478	1.697	23.243
Find A, B, C		18 °	1.148	0.113	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.121	1.346	18.437	64 °	1.011	-0.237	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.476	1.694	23.211
$\omega_{s5}$		19 °	1.153	0.106	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.138	1.362	18.666	65 °	1.000	-0.243	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.474	1.692	23.174
Find $H_t$		20 °	1.158	0.098	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.154	1.379	18.889	66 °	0.989	-0.250	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.471	1.688	23.130
$H_t$		21 °	1.162	0.090	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.170	1.395	19.108	67 °	0.977	-0.257	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.467	1.685	23.080
Find $K_t$		22 °	1.166	0.083	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.186	1.410	19.322	68 °	0.965	-0.263	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.463	1.681	23.024
$K_t$		23 °	1.169	0.075	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.201	1.426	19.531	69 °	0.953	-0.270	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.459	1.676	22.962
Find $H_t/H$		24 °	1.173	0.067	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.216	1.440	19.735	70 °	0.941	-0.276	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.454	1.671	22.893
$H_t/H$		25 °	1.176	0.059	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.231	1.455	19.934	71 °	0.928	-0.282	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.449	1.666	22.819
Find a', b, and d		26 °	1.178	0.051	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.245	1.469	20.127	72 °	0.915	-0.288	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.443	1.660	22.738
a		27 °	1.180	0.043	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.259	1.483	20.315	73 °	0.902	-0.294	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.437	1.653	22.652
a'		28 °	1.182	0.036	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.273	1.496	20.498	74 °	0.888	-0.300	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.431	1.647	22.559
b		29 °	1.183	0.028	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.286	1.509	20.676	75 °	0.874	-0.306	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.424	1.639	22.461
d		30 °	1.185	0.020	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.298	1.522	20.848	76 °	0.860	-0.312	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.416	1.632	22.356
Find G		31 °	1.185	0.012	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.311	1.534	21.015	77 °	0.846	-0.318	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.408	1.624	22.246
G		32 °	1.186	0.004	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.322	1.546	21.176	78 °	0.831	-0.323	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.400	1.615	22.130
Find D		33 °	1.186	-0.004	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.334	1.557	21.332	79 °	0.816	-0.329	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.391	1.606	22.007
D		34 °	1.185	-0.012	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.345	1.568	21.482	80 °	0.801	-0.334	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.382	1.597	21.879
Find R		35 °	1.185	-0.020	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.356	1.579	21.626	81 °	0.786	-0.339	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.373	1.587	21.746
R		36 °	1.183	-0.028	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.366	1.589	21.765	82 °	0.770	-0.345	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.363	1.577	21.606
Find $\omega_{s6}$		37 °	1.182	-0.036	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.376	1.598	21.898	83 °	0.754	-0.350	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.352	1.567	21.461
$\omega_{s6}$		38 °	1.180	-0.043	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.385	1.608	22.025	84 °	0.738	-0.355	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.342	1.555	21.310
Find $\omega_{s7}$		39 °	1.178	-0.051	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.394	1.617	22.146	85 °	0.722	-0.360	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.330	1.544	21.154
$\omega_{s7}$		40 °	1.176	-0.059	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.403	1.626	22.262	86 °	0.706	-0.365	0.000	-75.91 °	75.91 °	1.317	1.532	21.000

Gambar 3.6 Validasi Perhitungan pada Microsoft Excel

Hasil perhitungan yang telah dilakukan pada Microsoft Excel dengan metode KT kemudian dibandingkan dengan hasil yang didapatkan oleh Talebizadeh dkk. dengan metode Algoritma Genetika untuk mengetahui keakuratan hasil yang didapatkan dan memvalidasi metode yang sudah dilakukan. Berikut merupakan perhitungan radiasi harian rata-rata yang telah dilakukan untuk mendapatkan sudut kemiringan optimum setiap bulan, musim, dan tahun.

**Tabel 3.5** Perbandingan Sudut Kemiringan Optimum Hasil Perhitungan

	Algoritma Genetika	Hasil Perhitungan	
	$\beta_{opt}$ (°)	$\beta_{opt}$ (°)	$H_T$ (MJ/m <sup>2</sup> /hari)
Januari	56,72	58,5	23,307
Februari	47,59	49	24,053
Maret	32,5	33,5	21,563
April	16,65	17,5	23,913
Mei	2,98	4	26,895
Juni	-3,91	-3	29,711
Juli	-0,97	0	28,713
Agustus	11,32	12	27,361
September	28,21	29	27,197
Oktober	44,04	46	27,003
Nopember	54,72	56	22,458
Desember	58,8	60	20,902
Musim Dingin	45,6	48	22,687
Musim Semi	5,24	5,5	26,623
Musim Panas	12,85	14	27,290
Musim Gugur	52,52	53	23,340
Sepanjang Tahun	29,05	30	23,731

Berdasarkan Tabel 3.5 dapat dilihat bahwa pada sudut azimuth 0°, antara hasil perhitungan Microsoft Excel dan Algoritma Genetika memiliki nilai deviasi sudut kemiringan rata-rata pada 1,12° dengan deviasi sudut kemiringan tertinggi pada 2,4°. Nilai ini dapat dikatakan sangat kecil sehingga validasi metode yang dilakukan sudah benar dan cukup akurat.

## BAB IV ANALISIS DATA & PEMBAHASAN

### 4.1. Sudut Kemiringan dan Sudut Azimuth Optimum

Intensitas radiasi matahari yang diterima oleh panel surya dipengaruhi oleh orientasi panel surya itu sendiri, salah satunya yaitu sudut kemiringan dan sudut azimuth. Dengan mengoptimalkan sudut kemiringan dan sudut azimuth, maka panel surya dapat menerima radiasi matahari yang maksimal sehingga daya yang dihasilkan juga semakin besar. Besarnya intensitas radiasi matahari yang diterima oleh panel surya akan ditinjau secara harian setiap bulan, musim, dan tahun pada penelitian ini.

#### 4.1.1. Contoh Perhitungan Radiasi Harian Rata-Rata

Perhitungan radiasi harian rata-rata dilakukan menggunakan *software* MATLAB R2020B. Radiasi harian rata-rata dioptimasi setiap bulannya dengan bervariasi sudut kemiringan dan sudut azimuth menggunakan metode matriks dengan mengkombinasikan kedua sudut tersebut. Matriks yang digunakan yaitu matriks persegi dengan dimensi 91x91, sehingga hasil dari perhitungan radiasi harian rata-rata juga berbentuk matriks yang kemudian dicari nilai radiasi maksimumnya. Setelah radiasi harian rata-rata maksimum didapatkan, sudut kemiringan dan sudut azimuth dapat dicari berdasarkan baris dan kolom pada matriks tersebut. Berikut merupakan contoh perhitungan radiasi harian rata-rata pada bulan Januari.

$$\begin{aligned}
 \text{Data Awal:} \quad & \bar{n} = 17 \\
 & \bar{\delta} = 23,45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) = -20,92^\circ \\
 & \phi = -7,28^\circ \\
 & \bar{H} = 17,188 \text{ MJ/m}^2 \\
 & \rho_g = 0,2 \\
 & G_{sc} = 1.367 \text{ W/m}^2 \\
 \text{Variasi:} \quad & \beta = 40^\circ \\
 & \gamma = 25^\circ
 \end{aligned}$$

1. Menghitung nilai *sunset hour angle*

$$\begin{aligned}
 \cos \omega_s &= -\tan \phi \tan \delta \\
 &= -\tan(-7,28) \tan(-20,92) \\
 &= 92,8^\circ
 \end{aligned}$$

2. Menghitung nilai radiasi ekstraterrestrial pada bidang datar

$$\bar{H}_o = \frac{24 \times 3.600 G_{sc}}{\pi} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360\bar{n}}{365}\right) \times \cos \phi \cos \bar{\delta} \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \bar{\delta}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{24 \times 3.600 \times 1.367}{\pi} \left( 1 + 0,033 \cos \frac{360 \times 17}{365} \right) \\
&\quad \times \cos(-7,28) \cos(-20,92) \sin(92,8) \\
&\quad + \frac{\pi \times 92,8^\circ}{180} \sin(-7,28) \sin(-20,92) \\
&= 38,752 \text{ MJ/m}^2
\end{aligned}$$

3. Menghitung nilai indeks kecerahan dan fraksi *diffuse*

$$\begin{aligned}
\bar{K}_T &= \frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} \\
&= \frac{17,188}{38,752} \\
&= 0,444
\end{aligned}$$

Karena  $\omega_s > 81,4^\circ$  dan  $0,3 \leq \bar{K}_T \leq 0,8$ , maka

$$\begin{aligned}
\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} &= 1,311 - 3,022 \bar{K}_T + 3,427 \bar{K}_T^2 - 1,821 \bar{K}_T^3 \\
&= 1,311 - 3,022 (0,444) + 3,427 (0,444)^2 - 1,821 (0,444)^3 \\
&= 0,486
\end{aligned}$$

4. Menghitung nilai  $\omega_{sr}$  dan  $\omega_{ss}$

$$\begin{aligned}
A &= \cos \beta + \tan \phi \cos \gamma \sin \beta \\
&= \cos(40) + \tan(-7,28) \cos(25) \sin(40) \\
&= 0,692
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B &= \cos \omega_s \cos \beta + \tan \delta \sin \beta \cos \gamma \\
&= \cos(92,8) \cos(40) + \tan(-20,92) \sin(40) \cos(25) \\
&= -0,26
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C &= \frac{\sin \beta \sin \gamma}{\cos \phi} \\
&= \frac{\sin(40) \sin(25)}{\cos(-7,28)} \\
&= 0,274
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
|\omega_{sr}| &= \min \left[ \omega_s, \cos^{-1} \frac{AB + C \sqrt{A^2 - B^2 + C^2}}{A^2 + C^2} \right] \\
&= \cos^{-1} \frac{0,692 \times (-0,26) + 0,274 \sqrt{(0,692)^2 - (-0,26)^2 + (0,274)^2}}{(0,692)^2 + (0,274)^2}
\end{aligned}$$

$$= \min(92,8, 88,86)$$

$$= 88,86^\circ$$

$$|\omega_{ss}| = \min \left[ \omega_s, \cos^{-1} \frac{AB - C \sqrt{A^2 - B^2 + C^2}}{A^2 + C^2} \right]$$

$$= \cos^{-1} \frac{0,692 \times (-0,26) - 0,274 \sqrt{(0,692)^2 - (-0,26)^2 + (0,274)^2}}{(0,692)^2 + (0,274)^2}$$

$$= \min(92,8, 132,06)$$

$$= 92,8^\circ$$

Karena  $A \geq B$ , maka

$$\omega_{sr} = -88,86^\circ$$

$$\omega_{ss} = 92,8^\circ$$

#### 5. Menghitung nilai $D$

$$a = 0,409 + 0,5016 \sin(\omega_s - 60)$$

$$= 0,409 + 0,5016 \sin(92,8 - 60)$$

$$= 0,681$$

$$a' = a - \frac{\bar{H}_d}{H}$$

$$= 0,681 - 0,486$$

$$= 0,195$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \sin(\omega_s - 60)$$

$$= 0,6609 - 0,4767 \sin(92,8 - 60)$$

$$= 0,403$$

$$d = \sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s$$

$$= \sin(92,8) - \frac{\pi \times 92,8}{180} \cos(92,8)$$

$$= 1,078$$

Karena  $\omega_{ss} \geq \omega_{sr}$ , maka

$$D = \max(0, G(\omega_{ss}, \omega_{sr}))$$

$$G(\omega_{ss}, \omega_{sr}) = \frac{1}{2d} \left[ \left( \frac{bA}{2} - a'B \right) (\omega_{ss} - \omega_{sr}) \frac{\pi}{180} \right. \\ \left. + (a'A - bB)(\sin \omega_{ss} - \sin \omega_{sr}) - a'C(\cos \omega_{ss} - \cos \omega_{sr}) \right]$$

$$+ \left(\frac{bA}{2}\right) (\sin \omega_{ss} \cos \omega_{ss} - \sin \omega_{sr} \cos \omega_{sr})$$

$$+ \left(\frac{bC}{2}\right) (\sin^2 \omega_{ss} - \sin^2 \omega_{sr})]$$

$$G = 0,501$$

Sehingga,

$$D = 0,501$$

6. Mencari nilai rasio total radiasi rata-rata.

$$\bar{R} = D + \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right)$$

$$= 0,501 + 0,486 \left(\frac{1 + \cos(40)}{2}\right) + 0,2 \left(\frac{1 - \cos(40)}{2}\right)$$

$$= 0,953$$

7. Menghitung radiasi harian rata-rata pada bidang miring

$$\bar{H}_T = \bar{H}\bar{R}$$

$$= 17,188 \times 0,953$$

$$= 16,387 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$$

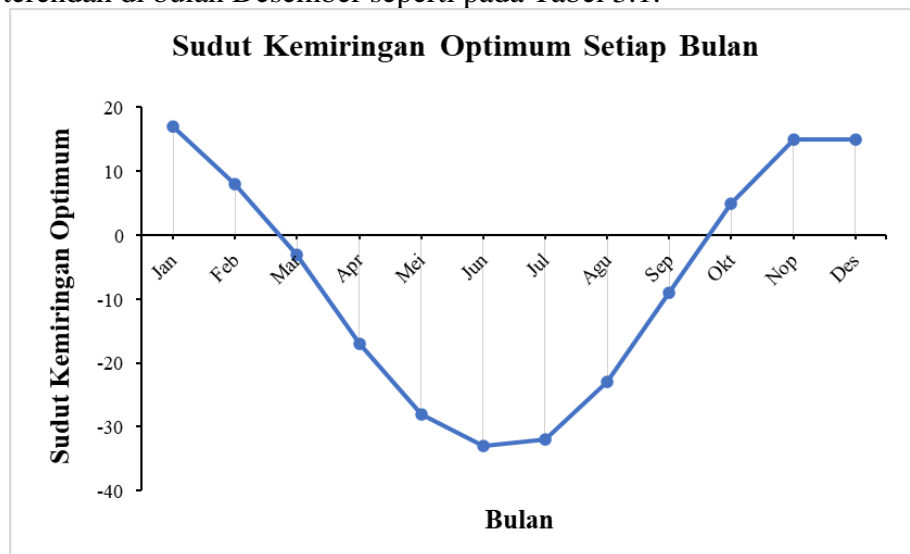
#### 4.1.2. Orientasi Optimum Bulanan

Sudut kemiringan dan sudut azimuth optimum setiap bulannya didapatkan berdasarkan perhitungan radiasi harian rata-rata yang telah dijelaskan sebelumnya. Perhitungan dilakukan selama bulan Januari hingga bulan Desember berdasarkan nilai  $\bar{n}$ ,  $\bar{\delta}$ , dan  $\bar{H}$  pada setiap bulan. Besarnya sudut kemiringan dan sudut azimuth optimum setiap bulannya dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut.

**Tabel 4.1** Sudut Kemiringan dan Sudut Azimuth Optimum Setiap Bulan

Bulan	MATLAB			Microsoft Excel		
	$\beta_{\text{opt}} (^{\circ})$	$\gamma_{\text{opt}} (^{\circ})$	$H_T$ (MJ/m <sup>2</sup> /hari)	$\beta_{\text{opt}} (^{\circ})$	$\gamma_{\text{opt}} (^{\circ})$	$H_T$ (MJ/m <sup>2</sup> /hari)
Januari	17	0	17,543	17	0	17,541
Februari	8	0	17,809	8	0	17,805
Maret	3	180	18,086	3	180	18,083
April	17	180	17,834	17	180	17,831
Mei	28	180	17,744	28	180	17,738
Juni	33	180	18,364	33	180	18,355
Juli	32	180	19,888	32	180	19,879
Agustus	23	180	20,269	23	180	20,258
September	9	180	21,036	9	180	21,033
Oktober	5	0	19,627	5	0	19,624
Nopember	15	0	18,273	15	0	18,271
Desember	15	0	13,394	15	0	13,393

Radiasi harian rata-rata setiap bulan yang didapatkan berdasarkan optimasi perhitungan pada MATLAB hampir memiliki nilai yang sama dengan validasi yang dilakukan pada Microsoft Excel dengan *relative error* hanya mencapai 0,05%. Sehingga dapat dikatakan hasil yang diperoleh sudah cukup akurat. Berdasarkan Tabel 4.1 nilai sudut kemiringan memiliki variasi antara 3° hingga 33° dengan nilai azimuth pada bulan Oktober hingga Februari sebesar 0° dan pada bulan Maret hingga September sebesar 180°. Nilai radiasi harian rata-rata maksimum terdapat pada bulan September sebesar 21,036 MJ/m<sup>2</sup>/hari, sedangkan nilai radiasi harian rata-rata minimum terdapat pada bulan Desember yaitu sebesar 13,394 MJ/m<sup>2</sup>/hari. Hal ini dikarenakan data radiasi harian rata-rata pada bidang datar dari BMKG yang memiliki nilai tertinggi di bulan September dan nilai terendah di bulan Desember seperti pada Tabel 3.1.



**Gambar 4.1** Sudut Kemiringan Optimum Setiap Bulan

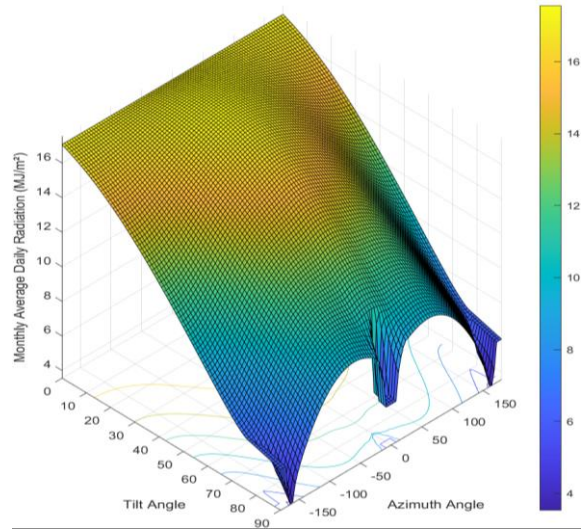
Sudut kemiringan optimum setiap bulan digambarkan dengan grafik sepanjang tahun seperti pada Gambar 4.1. Dapat dilihat pada bulan Maret hingga September memiliki nilai sudut kemiringan negatif yang berarti panel surya memiliki sudut azimuth yang menghadap ke Utara ( $\gamma = 180^\circ$ ). Hal tersebut dikarenakan variasi sudut deklinasi terhadap garis khatulistiwa seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 akibat dari gerak semu matahari. Lokasi Kota Surabaya yang terletak di dekat garis khatulistiwa menjadi penyebab adanya dua nilai sudut azimuth dikarenakan matahari yang seolah-olah bergerak melewati langit Kota Surabaya dari arah Selatan menuju Utara atau sebaliknya.

Tren grafik yang sama juga ditunjukkan pada penelitian terdahulu seperti pada Gambar 2.13. Perbedaan hanya terlihat pada *range* sudut kemiringan yang lebih besar pada penelitian yang dilakukan oleh Ullah dkk. akibat dari perbedaan sudut lintang lokasi penelitian. Walaupun menggunakan metode perhitungan yang berbeda, namun hasil yang didapatkan tetap memiliki tren grafik yang serupa.

#### 4.1.2.1. Januari

Perhitungan radiasi harian rata-rata dengan metode KT dilakukan pada bulan Januari dengan menggunakan nilai *mean day* ( $\bar{n}$ ) sebesar 17 dan sudut deklinasi rata-rata ( $\bar{\delta}$ ) sebesar  $-20,9^\circ$ , serta data pendukung dari BMKG berupa radiasi matahari pada bidang horizontal ( $\bar{H}$ ) sebesar 17,188 MJ/m<sup>2</sup>/hari. Didapatkan hasil perhitungan dalam bentuk matriks 91x91 dimana terdapat persebaran data radiasi harian rata-rata sebanyak 8.281 yang di-*plotting* ke dalam grafik 3-Dimensi terhadap fungsi sudut kemiringan dan sudut azimuth.



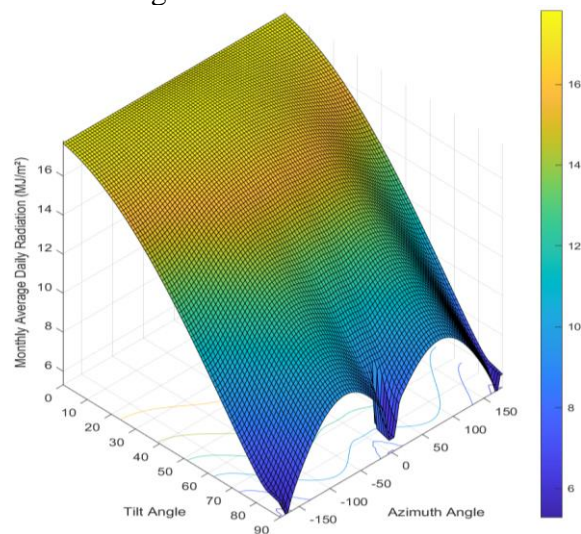


**Gambar 4.2** Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Bulan Januari

Berdasarkan Gambar 4.2, radiasi harian rata-rata pada bulan Januari mencapai nilai maksimum sebesar  $17,543 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$  pada sudut kemiringan  $17^\circ$  dan sudut azimuth  $0^\circ$  dan memiliki nilai minimum sebesar  $3,545 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$  pada sudut kemiringan  $90^\circ$  dan sudut azimuth  $164^\circ$ . Hal ini dikarenakan pada bulan Januari posisi matahari seolah-olah berada di atas langit bumi bagian Selatan.

#### 4.1.2.2. Februari

Perhitungan radiasi harian rata-rata dengan metode KT dilakukan pada bulan Februari dengan menggunakan nilai *mean day* ( $\bar{n}$ ) sebesar 47 dan sudut deklinasi rata-rata ( $\bar{\delta}$ ) sebesar  $-13^\circ$ , serta data pendukung dari BMKG berupa radiasi matahari pada bidang horizontal ( $\bar{H}$ ) sebesar  $17,822 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$ . Didapatkan hasil perhitungan dalam bentuk matriks  $91 \times 91$  dimana terdapat persebaran data radiasi harian rata-rata sebanyak 8.281 yang di-*plotting* ke dalam grafik 3-Dimensi terhadap fungsi sudut kemiringan dan sudut azimuth.

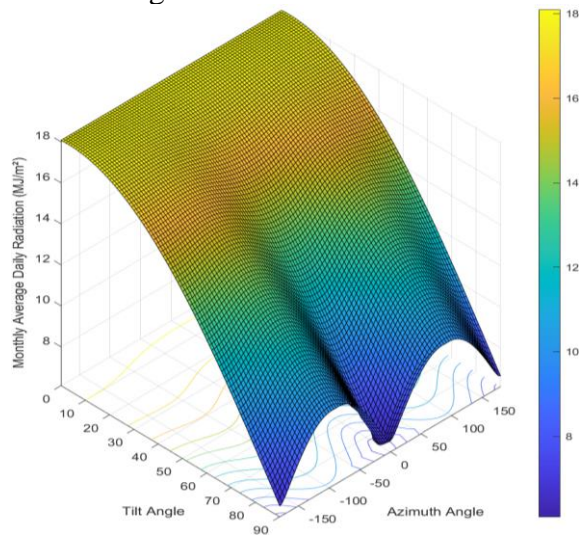


**Gambar 4.3** Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Bulan Februari

Berdasarkan Gambar 4.3, radiasi harian rata-rata pada bulan Februari mencapai nilai maksimum sebesar 17,809 MJ/m<sup>2</sup>/hari pada sudut kemiringan 8° dan sudut azimuth 0° dan memiliki nilai minimum sebesar 5,290 MJ/m<sup>2</sup>/hari pada sudut kemiringan 90° dan sudut azimuth 172°. Hal ini dikarenakan pada bulan Februari posisi matahari seolah-olah berada di Selatan Kota Surabaya dan sedang bergerak menuju langit Kota Surabaya.

#### 4.1.2.3. Maret

Perhitungan radiasi harian rata-rata dengan metode KT dilakukan pada bulan Maret dengan menggunakan nilai *mean day* ( $\bar{n}$ ) sebesar 75 dan sudut deklinasi rata-rata ( $\bar{\delta}$ ) sebesar -2,4°, serta data pendukung dari BMKG berupa radiasi matahari pada bidang horizontal ( $\bar{H}$ ) sebesar 18,218 MJ/m<sup>2</sup>/hari. Didapatkan hasil perhitungan dalam bentuk matriks 91x91 dimana terdapat persebaran data radiasi harian rata-rata sebanyak 8.281 yang di-*plotting* ke dalam grafik 3-Dimensi terhadap fungsi sudut kemiringan dan sudut azimuth.

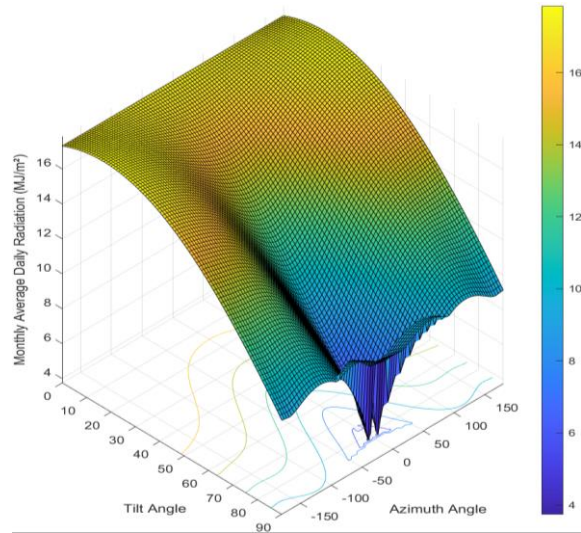


**Gambar 4.4** Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Bulan Maret

Berdasarkan Gambar 4.4, radiasi harian rata-rata pada bulan Maret mencapai nilai maksimum sebesar 18,086 MJ/m<sup>2</sup>/hari pada sudut kemiringan 3° dan sudut azimuth 180° dan memiliki nilai minimum sebesar 6,101 MJ/m<sup>2</sup>/hari pada sudut kemiringan 85° dan sudut azimuth 0°. Hal ini dikarenakan pada bulan Maret posisi matahari seolah-olah berada di atas langit Kota Surabaya dan sedang bergerak menuju bumi bagian Utara.

#### 4.1.2.4. April

Perhitungan radiasi harian rata-rata dengan metode KT dilakukan pada bulan April dengan menggunakan nilai *mean day* ( $\bar{n}$ ) sebesar 105 dan sudut deklinasi rata-rata ( $\bar{\delta}$ ) sebesar 9,4°, serta data pendukung dari BMKG berupa radiasi matahari pada bidang horizontal ( $\bar{H}$ ) sebesar 17,454 MJ/m<sup>2</sup>/hari. Didapatkan hasil perhitungan dalam bentuk matriks 91x91 dimana terdapat persebaran data radiasi harian rata-rata sebanyak 8.281 yang di-*plotting* ke dalam grafik 3-Dimensi terhadap fungsi sudut kemiringan dan sudut azimuth.

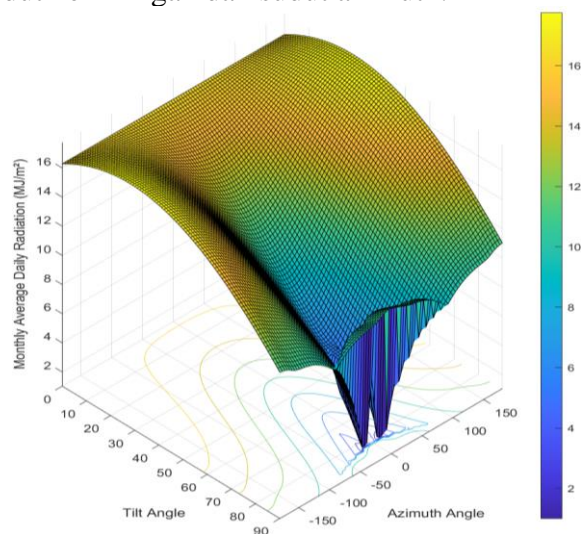


**Gambar 4.5** Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Bulan April

Berdasarkan Gambar 4.5, radiasi harian rata-rata pada bulan April mencapai nilai maksimum sebesar  $17,834 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$  pada sudut kemiringan  $17^\circ$  dan sudut azimuth  $180^\circ$  dan memiliki nilai minimum sebesar  $3,747 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$  pada sudut kemiringan  $82^\circ$  dan sudut azimuth  $8^\circ$ . Hal ini dikarenakan pada bulan April posisi matahari seolah-olah berada di Utara Kota Surabaya.

#### 4.1.2.5. Mei

Perhitungan radiasi harian rata-rata dengan metode KT dilakukan pada bulan Mei dengan menggunakan nilai *mean day* ( $\bar{n}$ ) sebesar 135 dan sudut deklinasi rata-rata ( $\bar{\delta}$ ) sebesar  $18,8^\circ$ , serta data pendukung dari BMKG berupa radiasi matahari pada bidang horizontal ( $\bar{H}$ ) sebesar  $16,410 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$ . Didapatkan hasil perhitungan dalam bentuk matriks  $91 \times 91$  dimana terdapat persebaran data radiasi harian rata-rata sebanyak 8.281 yang di-*plotting* ke dalam grafik 3-Dimensi terhadap fungsi sudut kemiringan dan sudut azimuth.

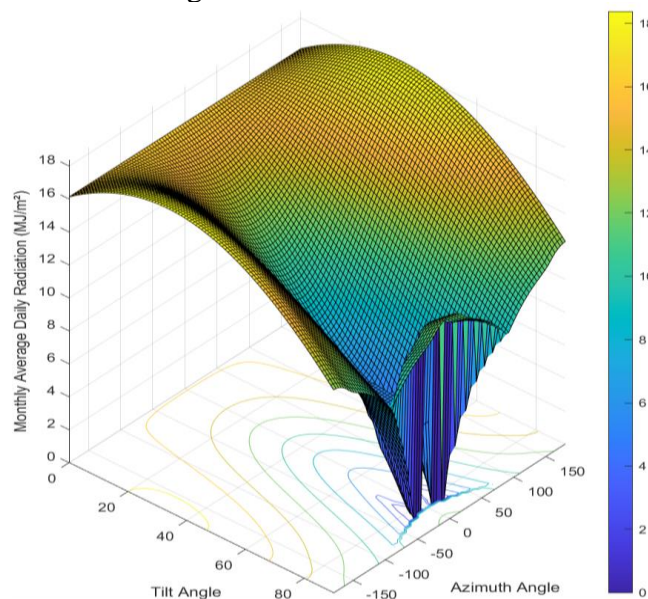


**Gambar 4.6** Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Bulan Mei

Berdasarkan Gambar 4.6, radiasi harian rata-rata pada bulan Mei mencapai nilai maksimum sebesar  $17,744 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$  pada sudut kemiringan  $28^\circ$  dan sudut azimuth  $180^\circ$  dan memiliki nilai minimum sebesar  $1,009 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$  pada sudut kemiringan  $82^\circ$  dan sudut azimuth  $12^\circ$ . Hal ini dikarenakan pada bulan Mei posisi matahari seolah-olah berada di atas langit bumi bagian Utara.

#### 4.1.2.6. Juni

Perhitungan radiasi harian rata-rata dengan metode KT dilakukan pada bulan Juni dengan menggunakan nilai *mean day* ( $\bar{n}$ ) sebesar 162 dan sudut deklinasi rata-rata ( $\bar{\delta}$ ) sebesar  $23,1^\circ$ , serta data pendukung dari BMKG berupa radiasi matahari pada bidang horizontal ( $\bar{H}$ ) sebesar  $16,268 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$ . Didapatkan hasil perhitungan dalam bentuk matriks  $91 \times 91$  dimana terdapat persebaran data radiasi harian rata-rata sebanyak 8.281 yang di-*plotting* ke dalam grafik 3-Dimensi terhadap fungsi sudut kemiringan dan sudut azimuth.

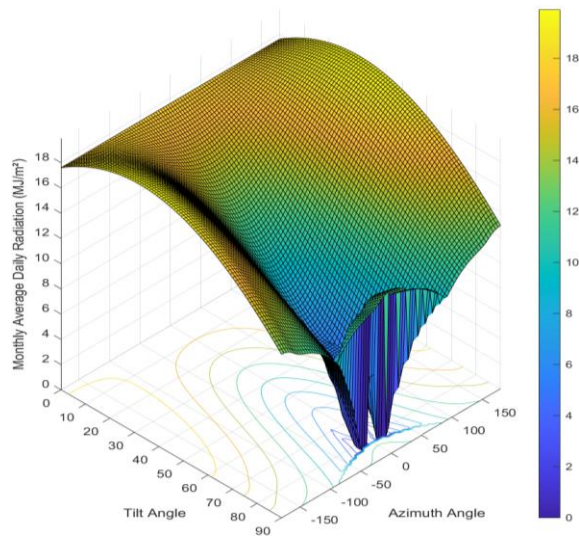


**Gambar 4.7** Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Bulan Juni

Berdasarkan Gambar 4.7, radiasi harian rata-rata pada bulan Juni mencapai nilai maksimum sebesar  $18,364 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$  pada sudut kemiringan  $33^\circ$  dan sudut azimuth  $180^\circ$  dan memiliki nilai minimum sebesar  $0,266 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$  pada sudut kemiringan  $82^\circ$  dan sudut azimuth  $24^\circ$ . Hal ini dikarenakan pada bulan Juni posisi matahari seolah-olah berada di atas langit bumi bagian Utara dan akan bergerak menuju garis khatulistiwa.

#### 4.1.2.7. Juli

Perhitungan radiasi harian rata-rata dengan metode KT dilakukan pada bulan Juli dengan menggunakan nilai *mean day* ( $\bar{n}$ ) sebesar 198 dan sudut deklinasi rata-rata ( $\bar{\delta}$ ) sebesar  $21,2^\circ$ , serta data pendukung dari BMKG berupa radiasi matahari pada bidang horizontal ( $\bar{H}$ ) sebesar  $17,750 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$ . Didapatkan hasil perhitungan dalam bentuk matriks  $91 \times 91$  dimana terdapat persebaran data radiasi harian rata-rata sebanyak 8.281 yang di-*plotting* ke dalam grafik 3-Dimensi terhadap fungsi sudut kemiringan dan sudut azimuth.

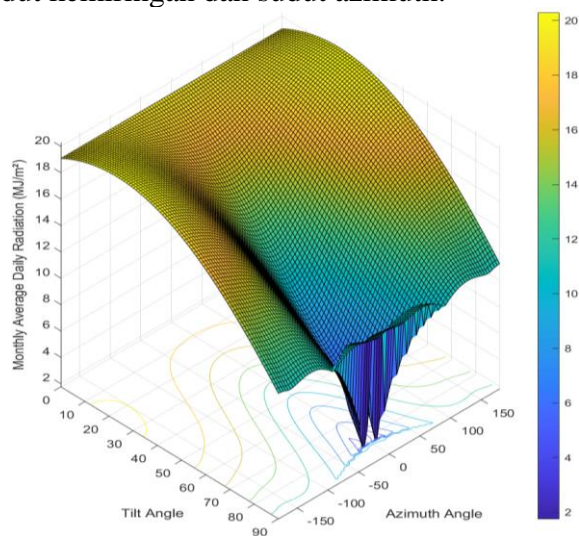


**Gambar 4.8** Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Bulan Juli

Berdasarkan Gambar 4.8, radiasi harian rata-rata pada bulan Juli mencapai nilai maksimum sebesar  $19,888 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$  pada sudut kemiringan  $32^\circ$  dan sudut azimuth  $180^\circ$  dan memiliki nilai minimum sebesar  $0,644 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$  pada sudut kemiringan  $83^\circ$  dan sudut azimuth  $24^\circ$ . Hal ini dikarenakan pada bulan Juli posisi matahari seolah-olah berada di bumi bagian Utara dan akan bergerak menuju garis khatulistiwa.

#### 4.1.2.8. Agustus

Perhitungan radiasi harian rata-rata dengan metode KT dilakukan pada bulan Agustus dengan menggunakan nilai *mean day* ( $\bar{n}$ ) sebesar 228 dan sudut deklinasi rata-rata ( $\bar{\delta}$ ) sebesar  $13,5^\circ$ , serta data pendukung dari BMKG berupa radiasi matahari pada bidang horizontal ( $\bar{H}$ ) sebesar  $19,242 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$ . Didapatkan hasil perhitungan dalam bentuk matriks  $91 \times 91$  dimana terdapat persebaran data radiasi harian rata-rata sebanyak 8.281 yang di-*plotting* ke dalam grafik 3-Dimensi terhadap fungsi sudut kemiringan dan sudut azimuth.

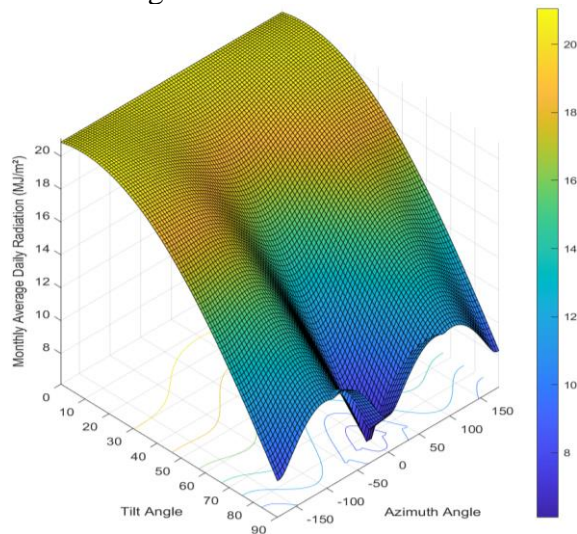


**Gambar 4.9** Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Bulan Agustus

Berdasarkan Gambar 4.9, radiasi harian rata-rata pada bulan Agustus mencapai nilai maksimum sebesar  $20,269 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$  pada sudut kemiringan  $23^\circ$  dan sudut azimuth  $180^\circ$  dan memiliki nilai minimum sebesar  $1,759 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$  pada sudut kemiringan  $82^\circ$  dan sudut azimuth  $12^\circ$ . Hal ini dikarenakan pada bulan Agustus posisi matahari seolah-olah berada di Utara Kota Surabaya.

#### 4.1.2.9. September

Perhitungan radiasi harian rata-rata dengan metode KT dilakukan pada bulan September dengan menggunakan nilai *mean day* ( $\bar{n}$ ) sebesar 258 dan sudut deklinasi rata-rata ( $\bar{\delta}$ ) sebesar  $2,2^\circ$ , serta data pendukung dari BMKG berupa radiasi matahari pada bidang horizontal ( $\bar{H}$ ) sebesar  $21,017 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$ . Didapatkan hasil perhitungan dalam bentuk matriks  $91 \times 91$  dimana terdapat persebaran data radiasi harian rata-rata sebanyak 8.281 yang di-*plotting* ke dalam grafik 3-Dimensi terhadap fungsi sudut kemiringan dan sudut azimuth.

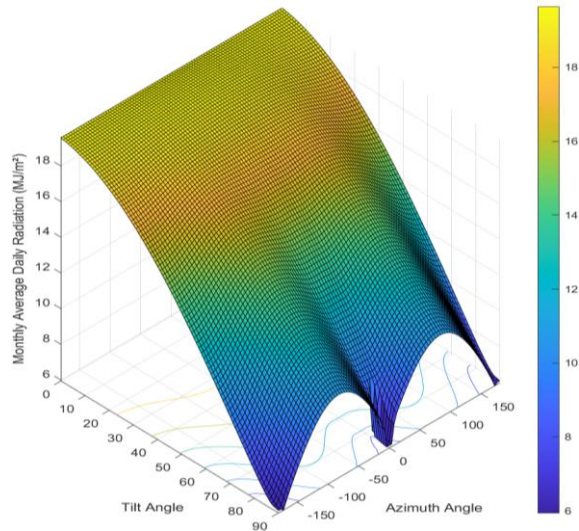


**Gambar 4.10** Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Bulan September

Berdasarkan Gambar 4.10, radiasi harian rata-rata pada bulan September mencapai nilai maksimum sebesar  $21,036 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$  pada sudut kemiringan  $9^\circ$  dan sudut azimuth  $180^\circ$  dan memiliki nilai minimum sebesar  $6,119 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$  pada sudut kemiringan  $82^\circ$  dan sudut azimuth  $4^\circ$ . Hal ini dikarenakan pada bulan September posisi matahari seolah-olah berada di Utara Kota Surabaya dan sedang bergerak menuju langit Kota Surabaya.

#### 4.1.2.10. Oktober

Perhitungan radiasi harian rata-rata dengan metode KT dilakukan pada bulan Oktober dengan menggunakan nilai *mean day* ( $\bar{n}$ ) sebesar 288 dan sudut deklinasi rata-rata ( $\bar{\delta}$ ) sebesar  $-9,6^\circ$ , serta data pendukung dari BMKG berupa radiasi matahari pada bidang horizontal ( $\bar{H}$ ) sebesar  $19,730 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$ . Didapatkan hasil perhitungan dalam bentuk matriks  $91 \times 91$  dimana terdapat persebaran data radiasi harian rata-rata sebanyak 8.281 yang di-*plotting* ke dalam grafik 3-Dimensi terhadap fungsi sudut kemiringan dan sudut azimuth.

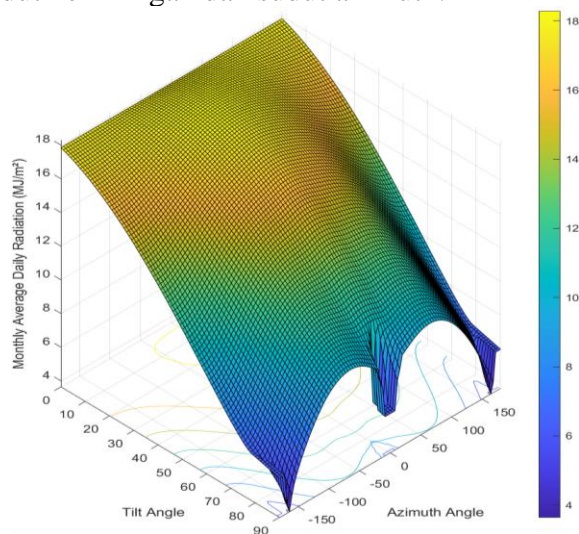


**Gambar 4.11** Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Bulan Oktober

Berdasarkan Gambar 4.11, radiasi harian rata-rata pada bulan Oktober mencapai nilai maksimum sebesar  $19,627 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$  pada sudut kemiringan  $5^\circ$  dan sudut azimuth  $0^\circ$  dan memiliki nilai minimum sebesar  $5,941 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$  pada sudut kemiringan  $90^\circ$  dan sudut azimuth  $172^\circ$ . Hal ini dikarenakan pada bulan Oktober posisi matahari seolah-olah berada di atas langit Kota Surabaya.

#### 4.1.2.11. Nopember

Perhitungan radiasi harian rata-rata dengan metode KT dilakukan pada bulan Nopember dengan menggunakan nilai *mean day* ( $\bar{n}$ ) sebesar 318 dan sudut deklinasi rata-rata ( $\delta$ ) sebesar  $-18,9^\circ$ , serta data pendukung dari BMKG berupa radiasi matahari pada bidang horizontal ( $\bar{H}$ ) sebesar  $17,992 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$ . Didapatkan hasil perhitungan dalam bentuk matriks  $91 \times 91$  dimana terdapat persebaran data radiasi harian rata-rata sebanyak 8.281 yang di-*plotting* ke dalam grafik 3-Dimensi terhadap fungsi sudut kemiringan dan sudut azimuth.

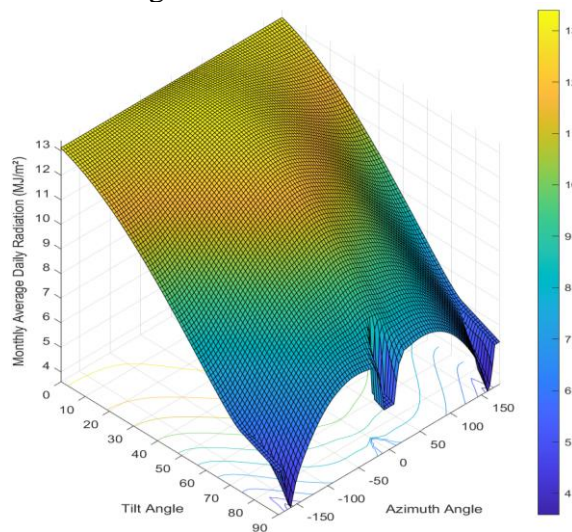


**Gambar 4.12** Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Bulan Nopember

Berdasarkan Gambar 4.12, radiasi harian rata-rata pada bulan Nopember mencapai nilai maksimum sebesar 18,273 MJ/m<sup>2</sup>/hari pada sudut kemiringan 15° dan sudut azimuth 0° dan memiliki nilai minimum 3,642 MJ/m<sup>2</sup>/hari pada sudut kemiringan 90° dan sudut azimuth 164°. Hal ini dikarenakan pada bulan Nopember posisi matahari seolah-olah berada di atas langit bumi bagian Selatan.

#### 4.1.2.12. Desember

Perhitungan radiasi harian rata-rata dengan metode KT dilakukan pada bulan Desember dengan menggunakan nilai *mean day* ( $\bar{n}$ ) sebesar 344 dan sudut deklinasi rata-rata ( $\bar{\delta}$ ) sebesar -23°, serta data pendukung dari BMKG berupa radiasi matahari pada bidang horizontal ( $\bar{H}$ ) sebesar 13,211 MJ/m<sup>2</sup>/hari. Didapatkan hasil perhitungan dalam bentuk matriks 91x91 dimana terdapat persebaran data radiasi harian rata-rata sebanyak 8.281 yang di-*plotting* ke dalam grafik 3-Dimensi terhadap fungsi sudut kemiringan dan sudut azimuth.



**Gambar 4.13** Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Bulan Desember

Berdasarkan Gambar 4.13, radiasi harian rata-rata pada bulan Desember mencapai nilai maksimum sebesar 13,394 MJ/m<sup>2</sup>/hari pada sudut kemiringan 15° dan sudut azimuth 0° dan memiliki nilai minimum 3,588 MJ/m<sup>2</sup>/hari pada sudut kemiringan 90° dan sudut azimuth 160°. Hal ini dikarenakan pada bulan Desember posisi matahari berada di atas langit bumi bagian Selatan dan akan bergerak menuju Utara.

#### 4.1.3. Orientasi Optimum Kuartal

Sudut kemiringan dan sudut azimuth optimum juga ditinjau setiap tiga bulan atau empat kuartal dalam satu tahun. Besarnya sudut kemiringan dan sudut azimuth optimum ditentukan berdasarkan perhitungan radiasi harian rata-rata. Perhitungan secara kuartal mengacu pada perhitungan setiap bulan seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya. Berikut merupakan contoh perhitungan lebih lanjut untuk menentukan radiasi harian rata-rata pada Kuartal I.

$$\begin{aligned} \text{Variasi:} \quad & \beta = 40^\circ \\ & \gamma = 25^\circ \end{aligned}$$



Januari,  $\bar{H}_{T1} = 16,387 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$

Februari,  $\bar{H}_{T2} = 15,974 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$

Maret,  $\bar{H}_{T3} = 14,927 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$

Menghitung radiasi harian rata-rata pada Kuartal I

$$\begin{aligned}\bar{H}_T &= \frac{\bar{H}_{T1} + \bar{H}_{T2} + \bar{H}_{T3}}{3} \\ &= \frac{16,387 + 15,974 + 14,927}{3} \\ &= 15,762 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}\end{aligned}$$

Besarnya sudut kemiringan dan sudut azimuth optimum pada setiap kuartal dapat dilihat pada Tabel 4.2 berikut.

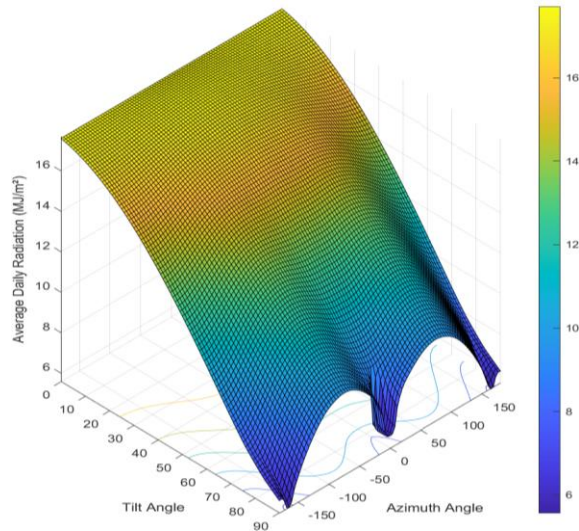
**Tabel 4.2** Sudut Kemiringan dan Sudut Azimuth Optimum Setiap Kuartal

Bulan	MATLAB			Microsoft Excel		
	$\beta_{\text{opt}} (^{\circ})$	$\gamma_{\text{opt}} (^{\circ})$	$H_T \text{ (MJ/m}^2/\text{hari)}$	$\beta_{\text{opt}} (^{\circ})$	$\gamma_{\text{opt}} (^{\circ})$	$H_T \text{ (MJ/m}^2/\text{hari)}$
Januari						
Februari	7	0	17,693	7	0	17,690
Maret						
April						
Mei	26	180	17,888	26	180	17,883
Juni						
Juli						
Agustus	21	180	20,193	22	180	20,186
September						
Oktober						
Nopember	11	0	17,058	11	0	17,055
Desember						

Radiasi harian rata-rata setiap kuartal yang didapatkan berdasarkan optimasi perhitungan pada MATLAB hampir memiliki nilai yang sama dengan validasi yang dilakukan pada Microsoft Excel dengan *relative error* hanya mencapai 0,03%. Sehingga dapat dikatakan hasil yang diperoleh sudah cukup akurat. Berdasarkan Tabel 4.2 nilai sudut kemiringan memiliki variasi antara  $7^{\circ}$  hingga  $26^{\circ}$  dan nilai azimuth pada Kuartal I dan IV sebesar  $0^{\circ}$  dan pada Kuartal II dan III sebesar  $180^{\circ}$ . Nilai radiasi harian rata-rata maksimum berada pada Kuartal III sebesar  $20,193 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$ , sedangkan nilai radiasi harian rata-rata minimum berada pada Kuartal IV yaitu sebesar  $17,058 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$ .

#### 4.1.3.1. Kuartal I

Perhitungan radiasi harian rata-rata dengan metode KT dilakukan pada Kuartal I yaitu selama bulan Januari hingga Maret. Didapatkan hasil perhitungan dalam bentuk matriks  $91 \times 91$  dimana terdapat persebaran data radiasi harian rata-rata sebanyak 8.281 yang di-plotting ke dalam grafik 3-Dimensi terhadap fungsi sudut kemiringan dan sudut azimuth.

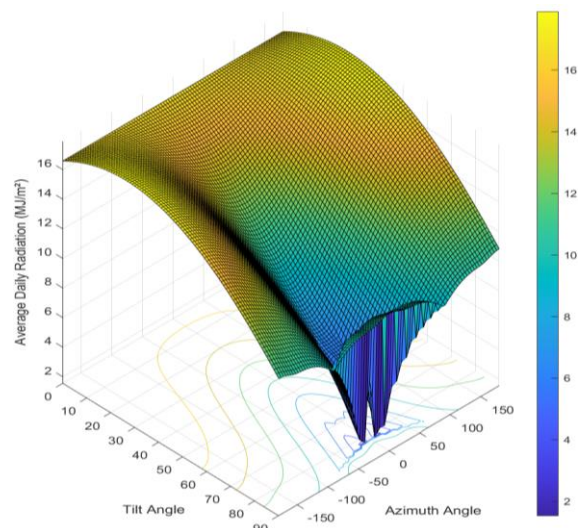


**Gambar 4.14** Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Kuartal I

Berdasarkan Gambar 4.14, radiasi harian rata-rata pada Kuartal I mencapai nilai maksimum sebesar  $17,693 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$  pada sudut kemiringan  $7^\circ$  dan sudut azimuth  $0^\circ$  dan memiliki nilai minimum  $5,568 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$  pada sudut kemiringan  $90^\circ$  dan sudut azimuth  $164^\circ$ . Hal ini dikarenakan pada bulan Januari hingga Maret posisi matahari seolah-olah dominan berada di Selatan Kota Surabaya.

#### 4.1.3.2. Kuartal II

Perhitungan radiasi harian rata-rata dengan metode KT dilakukan pada Kuartal II yaitu selama bulan April hingga Juni. Didapatkan hasil perhitungan dalam bentuk matriks  $91 \times 91$  dimana terdapat persebaran data radiasi harian rata-rata sebanyak 8.281 yang di-plotting ke dalam grafik 3-Dimensi terhadap fungsi sudut kemiringan dan sudut azimuth.



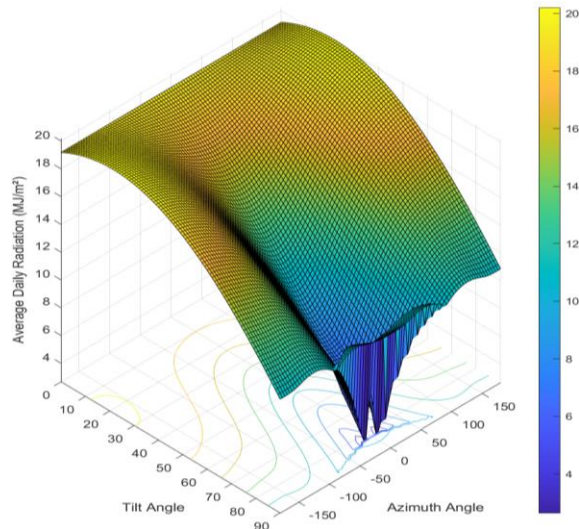
**Gambar 4.15** Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Kuartal II

Berdasarkan Gambar 4.15, radiasi harian rata-rata pada Kuartal II mencapai nilai maksimum sebesar  $17,888 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$  pada sudut kemiringan  $26^\circ$

dan sudut azimuth  $180^\circ$  dan memiliki nilai minimum  $1,546 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$  pada sudut kemiringan  $82^\circ$  dan sudut azimuth  $8^\circ$ . Hal ini dikarenakan pada bulan April hingga Juni posisi matahari seolah-olah dominan berada di Utara Kota Surabaya.

#### 4.1.3.3. Kuartal III

Perhitungan radiasi harian rata-rata dengan metode KT dilakukan pada Kuartal III yaitu selama bulan Juli hingga September. Didapatkan hasil perhitungan dalam bentuk matriks  $91 \times 91$  dimana terdapat persebaran data radiasi harian rata-rata sebanyak 8.281 yang di-*plotting* ke dalam grafik 3-Dimensi terhadap fungsi sudut kemiringan dan sudut azimuth.

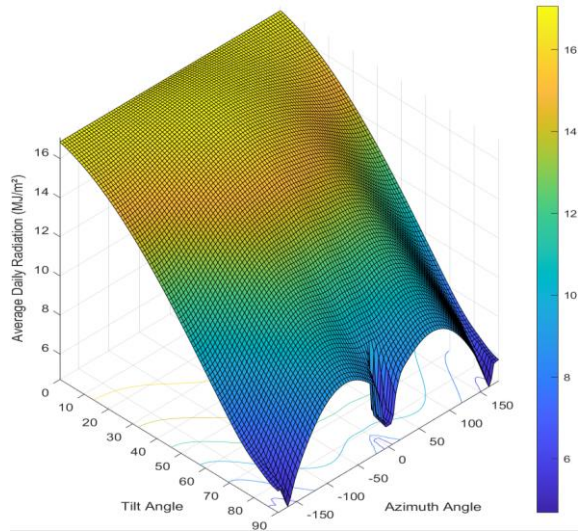


**Gambar 4.16** Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Kuartal III

Berdasarkan Gambar 4.16, radiasi harian rata-rata pada Kuartal III mencapai nilai maksimum sebesar  $20,193 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$  pada sudut kemiringan  $21^\circ$  dan sudut azimuth  $180^\circ$  dan memiliki nilai minimum  $2,653 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$  pada sudut kemiringan  $82^\circ$  dan sudut azimuth  $8^\circ$ . Hal ini dikarenakan pada bulan Juli hingga September posisi matahari seolah-olah dominan berada di Utara Kota Surabaya.

#### 4.1.3.4. Kuartal IV

Perhitungan radiasi harian rata-rata dengan metode KT dilakukan pada Kuartal IV yaitu selama bulan Oktober hingga Desember. Didapatkan hasil perhitungan dalam bentuk matriks  $91 \times 91$  dimana terdapat persebaran data radiasi harian rata-rata sebanyak 8.281 yang di-*plotting* ke dalam grafik 3-Dimensi terhadap fungsi sudut kemiringan dan sudut azimuth.



**Gambar 4.17** Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Kuartal IV

Berdasarkan Gambar 4.17, radiasi harian rata-rata pada Kuartal IV mencapai nilai maksimum sebesar 17,058 MJ/m<sup>2</sup>/hari pada sudut kemiringan 11° dan sudut azimuth 0° dan memiliki nilai minimum 4,692 MJ/m<sup>2</sup>/hari pada sudut kemiringan 90° dan sudut azimuth 164°. Hal ini dikarenakan pada bulan Oktober hingga Desember posisi matahari seolah-olah dominan berada di Selatan Kota Surabaya.

#### 4.1.4. Orientasi Optimum Musiman

Sudut kemiringan dan sudut azimuth optimum juga ditinjau pada setiap musim. Nilai sudut kemiringan dan sudut azimuth optimum ditentukan berdasarkan radiasi harian rata-rata maksimum pada setiap musim. Perhitungan secara musiman mengacu pada perhitungan setiap bulan seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya dan memiliki prinsip yang sama seperti perhitungan secara kuartal. Besarnya sudut kemiringan dan sudut azimuth optimum pada setiap musim dapat dilihat pada Tabel 4.3 berikut.

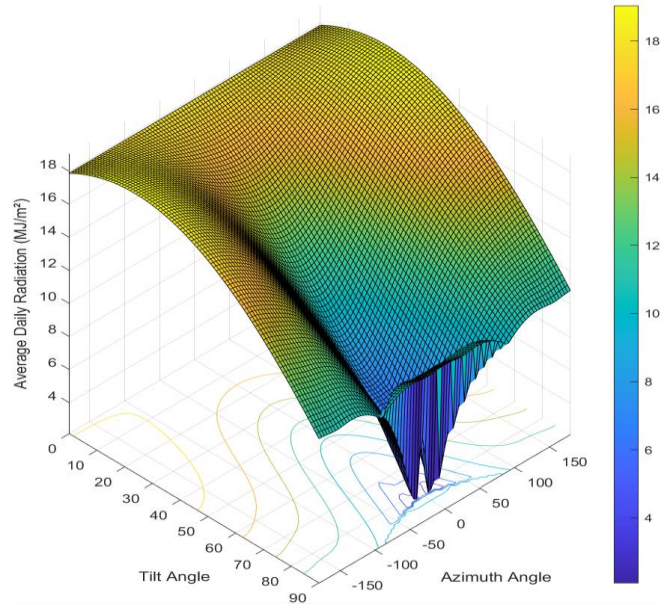
**Tabel 4.3** Sudut Kemiringan dan Sudut Azimuth Optimum Setiap Musim

Musim	MATLAB			Microsoft Excel		
	$\beta_{opt}$ (°)	$\gamma_{opt}$ (°)	$H_T$ (MJ/m <sup>2</sup> /hari)	$\beta_{opt}$ (°)	$\gamma_{opt}$ (°)	$H_T$ (MJ/m <sup>2</sup> /hari)
Kemarau	24	180	19,029	24	180	19,022
Hujan	9	0	17,372	9	0	17,366

Radiasi harian rata-rata setiap musim yang didapatkan berdasarkan optimasi perhitungan pada MATLAB hampir memiliki nilai yang sama dengan validasi yang dilakukan pada Microsoft Excel dengan *relative error* hanya mencapai 0,04%. Sehingga dapat dikatakan hasil yang diperoleh sudah cukup akurat. Berdasarkan Tabel 4.3 nilai radiasi harian rata-rata maksimum berada pada musim kemarau atau pada bulan April hingga September yaitu sebesar 19,029 MJ/m<sup>2</sup>/hari pada orientasi sudut kemiringan 24° dan sudut azimuth 180°. Sedangkan nilai radiasi harian rata-rata minimum berada pada musim hujan atau pada bulan Oktober hingga Maret yaitu sebesar 17,372 MJ/m<sup>2</sup>/hari pada orientasi sudut kemiringan 9° dan sudut azimuth 0°.

#### 4.1.4.1. Musim Kemarau

Perhitungan radiasi harian rata-rata dengan metode KT dilakukan pada musim kemarau yaitu selama bulan April hingga September. Didapatkan hasil perhitungan dalam bentuk matriks 91x91 dimana terdapat persebaran data radiasi harian rata-rata sebanyak 8.281 yang di-*plotting* ke dalam grafik 3-Dimensi terhadap fungsi sudut kemiringan dan sudut azimuth.

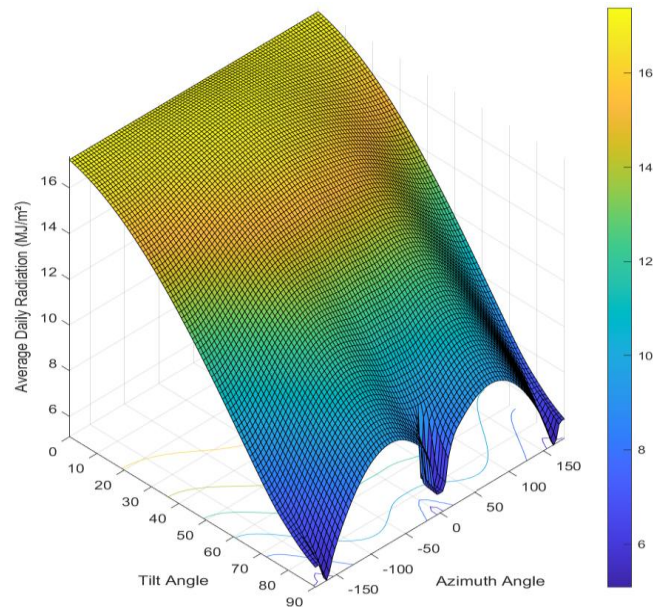


**Gambar 4.18** Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Musim Kemarau

Berdasarkan Gambar 4.18, radiasi harian rata-rata pada musim kemarau memiliki nilai maksimum sebesar 19,029 MJ/m<sup>2</sup>/hari pada sudut kemiringan 24° dan sudut azimuth 180° dan memiliki nilai minimum 2,099 MJ/m<sup>2</sup>/hari pada sudut kemiringan 82° dan sudut azimuth 8°. Hal ini disebabkan posisi matahari selama musim kemarau seolah-olah dominan berada di Utara Kota Surabaya.

#### 4.1.4.2. Musim Hujan

Perhitungan radiasi harian rata-rata dengan metode KT dilakukan pada musim hujan yaitu selama bulan Oktober hingga Maret. Didapatkan hasil perhitungan dalam bentuk matriks 91x91 dimana terdapat persebaran data radiasi harian rata-rata sebanyak 8.281 yang di-*plotting* ke dalam grafik 3-Dimensi terhadap fungsi sudut kemiringan dan sudut azimuth.



**Gambar 4.19** Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata pada Musim Hujan

Berdasarkan Gambar 4.19, radiasi harian rata-rata pada musim kemarau memiliki nilai maksimum sebesar 17,372 MJ/m<sup>2</sup>/hari pada sudut kemiringan 9° dan sudut azimuth 0° dan memiliki nilai minimum 5,094 MJ/m<sup>2</sup>/hari pada sudut kemiringan 90° dan sudut azimuth 164°. Hal ini disebabkan posisi matahari selama musim hujan seolah-olah dominan berada di Selatan Kota Surabaya.

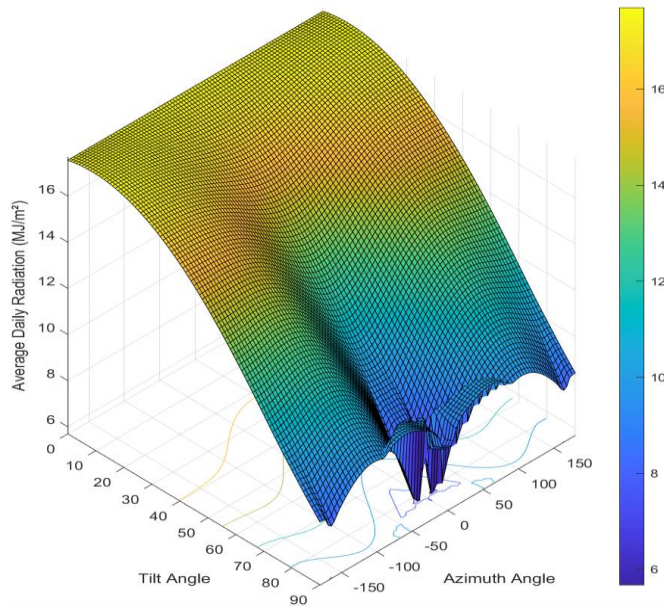
#### 4.1.5. Orientasi Optimum Tahunan

Sudut kemiringan dan sudut azimuth optimum juga ditinjau selama satu tahun dengan orientasi *fixed*. Nilai sudut kemiringan dan sudut azimuth optimum ditentukan berdasarkan radiasi harian rata-rata maksimum dalam setahun. Perhitungan secara tahunan juga mengacu pada perhitungan setiap bulan dan memiliki prinsip yang sama seperti perhitungan secara kuartal maupun musiman. Besarnya sudut kemiringan dan sudut azimuth optimum sepanjang tahun dapat dilihat pada Tabel 4.4 berikut.

**Tabel 4.4** Sudut Kemiringan dan Sudut Azimuth Optimum Sepanjang Tahun

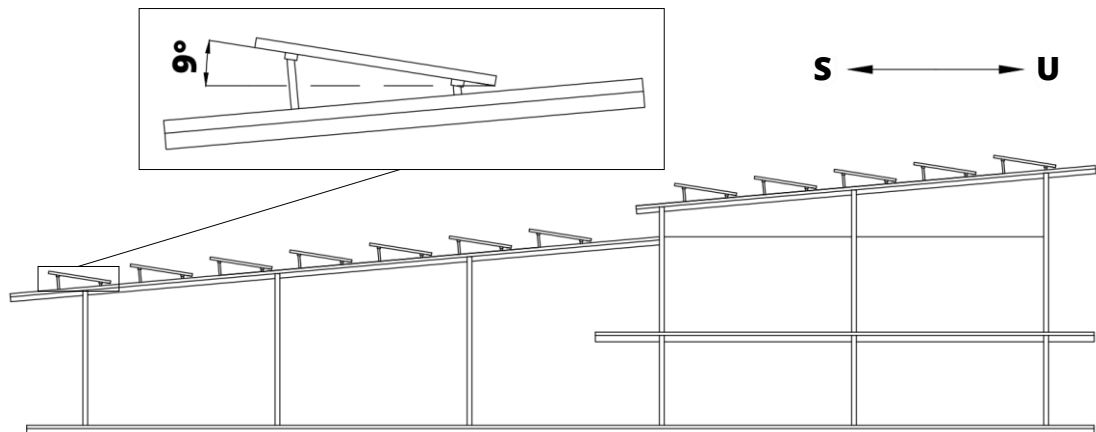
Konfigurasi	MATLAB			Microsoft Excel		
	$\beta_{opt}$ (°)	$\gamma_{opt}$ (°)	$H_T$ (MJ/m <sup>2</sup> /hari)	$\beta_{opt}$ (°)	$\gamma_{opt}$ (°)	$H_T$ (MJ/m <sup>2</sup> /hari)
Tahunan	9	180	17,689	9	180	17,686

Radiasi harian rata-rata sepanjang tahun yang didapatkan berdasarkan optimasi perhitungan pada MATLAB hampir memiliki nilai yang sama dengan validasi yang dilakukan pada Microsoft Excel dengan *relative error* hanya mencapai 0,02%. Sehingga dapat dikatakan hasil yang diperoleh sudah cukup akurat. Perhitungan radiasi harian rata-rata dengan metode KT yang dilakukan sepanjang tahun mendapatkan hasil perhitungan dalam bentuk matriks 91x91 dimana terdapat persebaran data radiasi harian rata-rata sebanyak 8.281 yang di-*plotting* ke dalam grafik 3-Dimensi terhadap fungsi sudut kemiringan dan sudut azimuth.



**Gambar 4.20** Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap Radiasi Harian Rata-Rata Tahunan

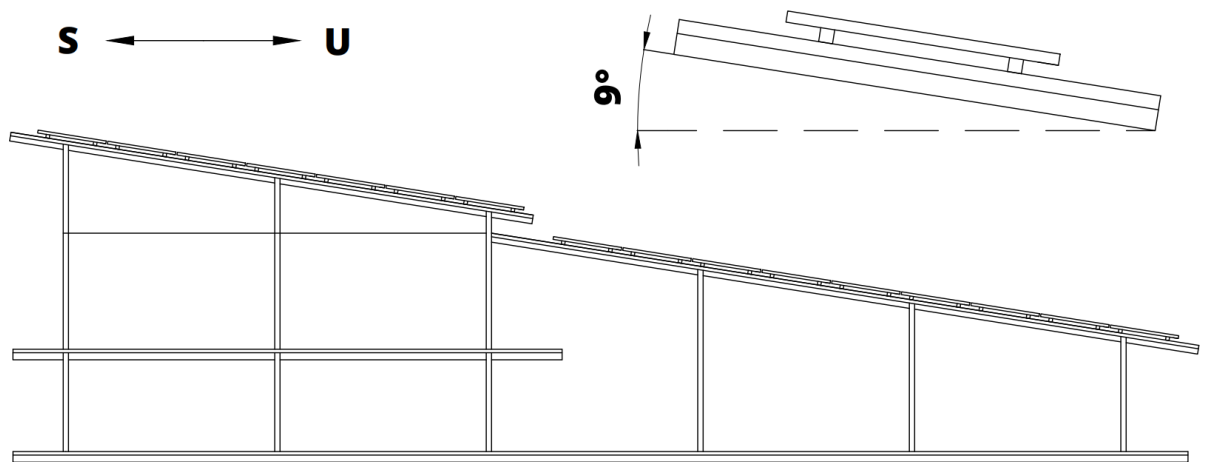
Berdasarkan Gambar 4.20, radiasi harian rata-rata sepanjang tahun memiliki nilai maksimum sebesar  $17,689 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$  pada sudut kemiringan  $9^\circ$  dan sudut azimuth  $180^\circ$  dan memiliki nilai minimum  $5,680 \text{ MJ/m}^2/\text{hari}$  pada sudut kemiringan  $82^\circ$  dan sudut azimuth  $8^\circ$ . Hal ini disebabkan oleh pergerakan matahari yang dominan berada di Utara Kota Surabaya sepanjang tahunnya. Dan juga pada bulan Maret hingga September, dimana panel surya menghadap Utara, memiliki nilai radiasi harian rata-rata yang lebih tinggi dibandingkan bulan Oktober hingga Februari, dimana panel surya menghadap Selatan.



**Gambar 4.21** Instalasi *Fixed Panel* Surya pada Atap Gedung Parkir Bertingkat

Gambar 4.21 menunjukkan pemasangan orientasi sepanjang tahun (*fixed*) panel surya berdasarkan rancangan desain atap gedung parkir bertingkat. Dapat dilihat sudut azimuth panel surya yang menghadap ke Utara memiliki perbedaan dengan rancangan desain atap yang menghadap ke Selatan. Hal tersebut dapat mengurangi performa dari panel surya akibat *shading*. Oleh karena itu direkomendasikan untuk mengubah

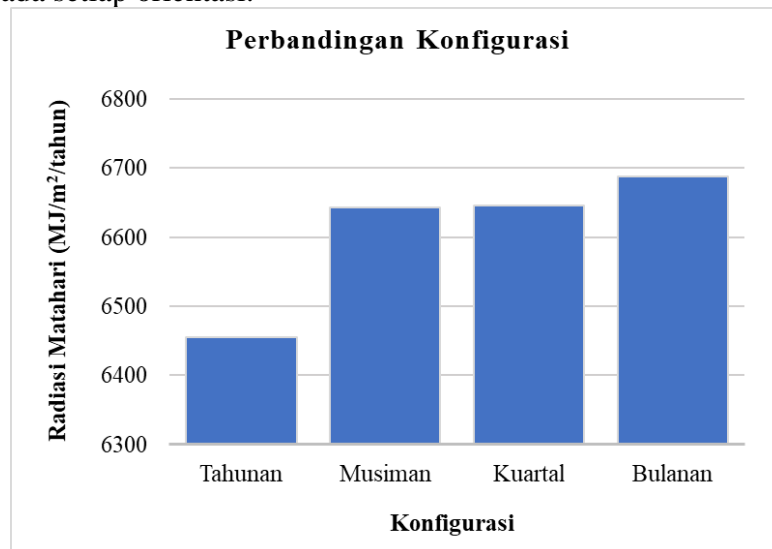
rancangan desain atap gedung parkir yang memiliki orientasi yang sama dengan panel surya seperti pada Gambar 4.22



**Gambar 4.22** Rekomendasi Instalasi Panel Surya pada Atap Gedung Parkir Bertingkat

#### 4.2. Perbandingan Konfigurasi Orientasi

Setelah mendapatkan hasil perhitungan radiasi harian rata-rata pada setiap orientasi, dilakukan penentuan orientasi yang paling menguntungkan sepanjang tahun. Peninjauan dilakukan secara tahunan sehingga dilakukan kalkulasi total radiasi matahari yang diterima dalam setahun pada setiap orientasi.



**Gambar 4.23** Perbandingan Konfigurasi Sepanjang Tahun

Berdasarkan Gambar 4.23 di atas, konfigurasi dengan tingkat radiasi paling rendah yaitu secara tahunan dengan total radiasi yang diterima sebesar 6.455,474 MJ/m<sup>2</sup> selama setahun. Konfigurasi tahunan merupakan konfigurasi paling praktis karena tidak diperlukan penyesuaian orientasi atau dapat dikatakan penyesuaian tetap sepanjang tahun. Sedangkan konfigurasi yang paling menguntungkan yaitu konfigurasi bulanan dengan total radiasi yang diterima sebesar 6.686,931 MJ/m<sup>2</sup> selama setahun atau sekitar 3,59% lebih tinggi dibandingkan konfigurasi tahunan. Namun konfigurasi bulanan kurang praktis karena dibutuhkan penyesuaian panel surya setiap bulan atau dua belas kali dalam setahun.



Konfigurasi kuartal atau empat kali dalam setahun juga memiliki tingkat radiasi yang hampir mendekati konfigurasi bulanan dengan total radiasi yang diterima sebesar 6.645,085 MJ/m<sup>2</sup> selama setahun atau sekitar 2,94% lebih tinggi dibandingkan konfigurasi tahunan. Nilai yang hampir sama ditunjukkan oleh konfigurasi musiman dengan total radiasi yang diterima sebesar 6.642,341 MJ/m<sup>2</sup> selama setahun atau sekitar 2,89% lebih tinggi dibandingkan konfigurasi tahunan. Konfigurasi secara musiman dapat dikatakan cukup praktis dengan penyesuaian hanya dua kali dalam setahun.

### 4.3. Pengaruh Sudut Kemiringan dan Sudut Azimuth

Sudut kemiringan dan sudut azimuth panel surya merupakan variabel utama dalam memaksimalkan performa dari panel surya itu sendiri. Besarnya daya yang dapat dibangkitkan oleh panel surya dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari yang diterima. Salah satu faktor yang mempengaruhi besarnya intensitas radiasi matahari yang diterima yaitu orientasi dari panel surya itu sendiri. Untuk dapat mengetahui pengaruh sudut kemiringan dan azimuth, dilakukan peninjauan *energy loss* akibat deviasi sudut. Berdasarkan perhitungan radiasi harian rata-rata setiap bulannya, dapat diketahui *energy loss* yang dialami panel surya akibat dari deviasi sudut kemiringan dan sudut azimuth. Berikut merupakan contoh perhitungan untuk mendapatkan nilai *energy loss*.

Data Awal: Bulan Januari

Untuk  $\beta_{opt} = 17^\circ$  &  $\gamma_{opt} = 0^\circ$

$\bar{H}_{T\ opt} = 17,543$  MJ/m<sup>2</sup>/hari

Untuk  $\beta = 27^\circ$  &  $\gamma_{opt} = 0^\circ$

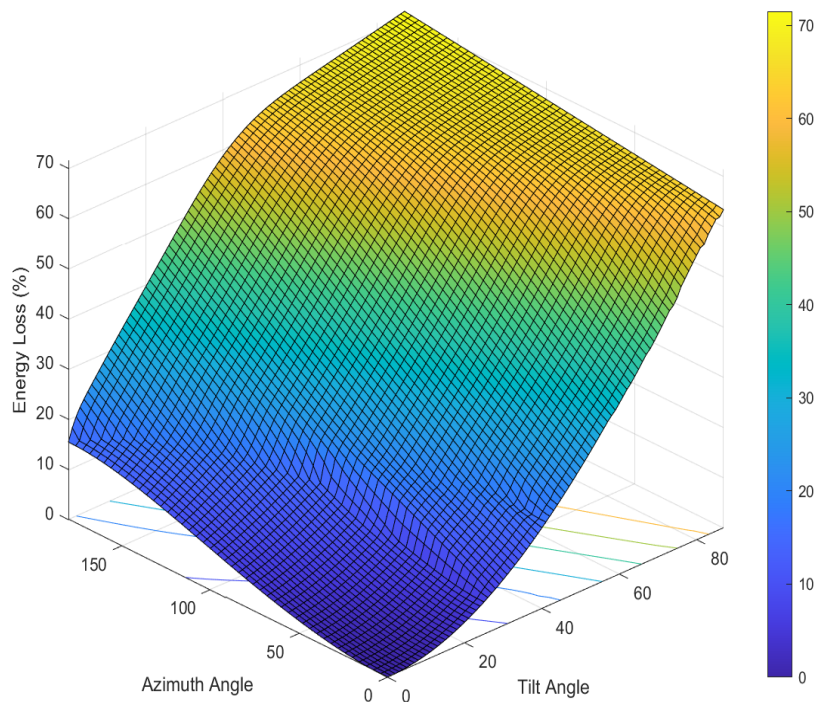
$\bar{H}_T = 17,352$  MJ/m<sup>2</sup>/hari

Deviasi sudut kemiringan

$$\beta_{dev} = 27 - 17 = 10^\circ$$

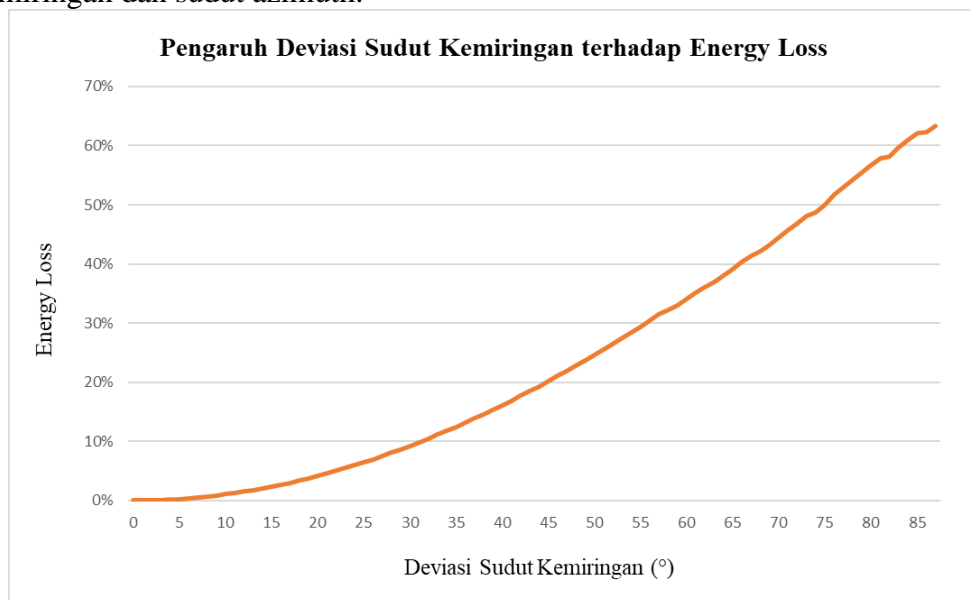
Energy loss akibat deviasi sudut kemiringan

$$\begin{aligned} E_{loss} &= \frac{\bar{H}_{T\ opt} - \bar{H}_T}{\bar{H}_{T\ opt}} \times 100 \% \\ &= \frac{17,543 - 17,352}{17,543} \times 100 \% \\ &= 1,09 \% \end{aligned}$$



**Gambar 4.24** Grafik Pengaruh Sudut Kemiringan dan Azimuth terhadap *Energy Loss*

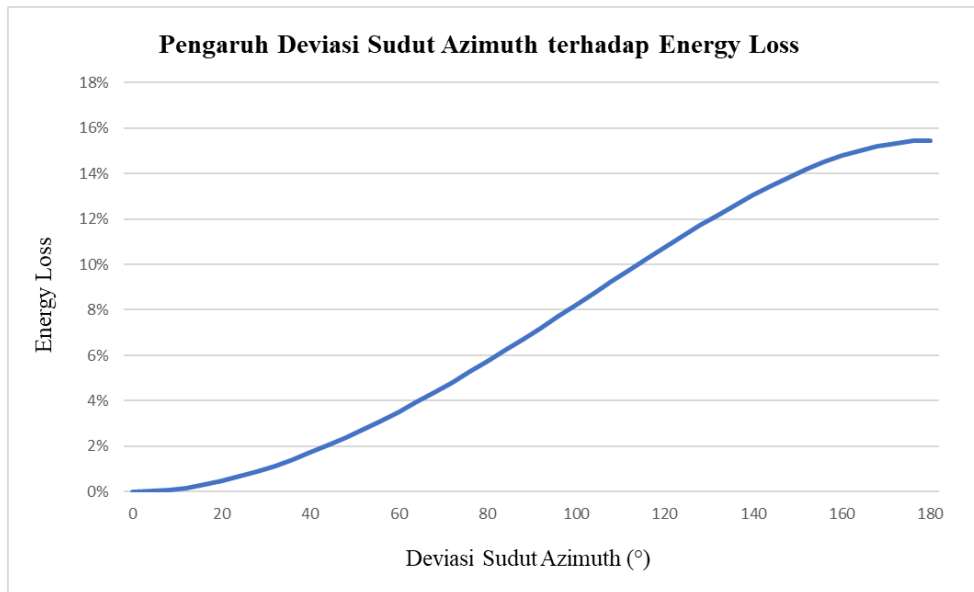
Perhitungan *energy loss* dilakukan pada setiap bulan untuk setiap deviasi sudut kemiringan dan sudut azimuth, kemudian dirata-ratakan untuk mendapatkan nilai yang representatif. Peninjauan untuk pengaruh dari deviasi sudut kemiringan dilakukan dalam posisi sudut azimuth optimum, begitu pula untuk pengaruh dari deviasi sudut azimuth dilakukan dalam posisi sudut kemiringan optimum. Berikut merupakan *energy loss* akibat dari deviasi sudut kemiringan dan sudut azimuth.



**Gambar 4.25** Pengaruh Deviasi Sudut Kemiringan terhadap *Energy Loss*

Berdasarkan Gambar 4.25, dapat dilihat bahwa pada sudut azimuth optimum dan deviasi sudut kemiringan yang mencapai  $10^\circ$  hanya memberikan pengaruh kecil yaitu sebesar 1% *energy loss*. Deviasi sudut kemiringan  $21^\circ$  hingga  $24^\circ$  mengakibatkan *energy loss* sebesar 5%, deviasi sudut kemiringan  $30^\circ$  hingga  $33^\circ$  mengakibatkan *energy loss* sebesar 10%, dan deviasi

sudut kemiringan yang mencapai  $49^\circ$  hingga  $54^\circ$  dapat mengakibatkan *energy loss* sebesar 25%. *Energy loss* tertinggi berada pada deviasi  $87^\circ$  yaitu sebesar 63,40%. Tren grafik pada Gambar 4.23 memiliki tren yang cenderung naik sehingga dapat dikatakan semakin besar deviasi sudut kemiringan maka semakin besar juga *energy loss* yang dialami panel surya.



**Gambar 4.26** Pengaruh Deviasi Sudut Azimuth terhadap *Energy Loss*

Berdasarkan Gambar 4.26, dapat dilihat bahwa pada sudut kemiringan optimum dan deviasi sudut azimuth yang mencapai  $30^\circ$  hanya memberikan pengaruh kecil yaitu sebesar 1% *energy loss*. Deviasi sudut azimuth  $70^\circ$  hingga  $75^\circ$  hanya mengakibatkan *energy loss* sebesar 5%, deviasi sudut azimuth  $112^\circ$  hingga  $118^\circ$  mengakibatkan *energy loss* sebesar 10%, dan *energy loss* tertinggi berada pada deviasi  $180^\circ$  yaitu sebesar 15,44%. Tren grafik pada Gambar 4.24 memiliki tren yang cenderung naik sehingga dapat dikatakan semakin besar deviasi sudut azimuth maka semakin besar juga *energy loss* yang dialami panel surya. Dapat dilihat pada kedua gambar di atas, sudut kemiringan memiliki pengaruh yang lebih besar dibandingkan dengan sudut azimuth.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1. Kesimpulan**

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Didapatkan orientasi optimum sepanjang tahun (*fixed*) berada pada sudut kemiringan  $9^\circ$  dan sudut azimuth  $180^\circ$ .
2. Konfigurasi panel surya yang disesuaikan setiap bulan merupakan konfigurasi yang paling menguntungkan dengan peningkatan sebesar 3,59% lebih besar daripada konfigurasi tetap (*fixed*) sepanjang tahun.
3. Semakin besar deviasi sudut maka semakin besar juga *energy loss* yang terjadi. Pengaruh sudut kemiringan dapat menyebabkan *energy loss* yang mencapai 63,40% pada deviasi sudut deviasi  $87^\circ$ . Sedangkan pengaruh sudut azimuth hanya dapat menyebabkan *energy loss* sebesar 15,44% pada deviasi sudut  $180^\circ$ . Sehingga sudut kemiringan memiliki pengaruh yang lebih dibandingkan dengan sudut azimuth.

#### **5.2. Saran**

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dan kesimpulan yang telah didapatkan, adapun saran yang dapat diberikan untuk pengembangan selanjutnya antara lain sebagai berikut.

1. Disarankan untuk menganalisis lebih lanjut terkait pengaruh dari ketinggian instalasi panel surya, efek *shading* akibat gedung yang berdekatan, serta penumpukan debu pada panel surya.
2. Disarankan untuk melakukan peninjauan secara harian untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat.
3. Disarankan untuk menerapkan konfigurasi panel surya secara bulanan untuk memperoleh intensitas radiasi yang maksimal.

## DAFTAR PUSTAKA

- Barbón, A., Bayón-Cueli, C., Bayón, L., & Rodríguez-Suanzes, C. (2022). Analysis of The Tilt and Azimuth Angles of Photovoltaic Systems in Non-Ideal Positions for Urban Applications. *Applied Energy*, 305, 117802. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117802>
- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (2020). Informasi Potensi Energi Surya Stasiun. <https://iklim.bmkg.go.id/>
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes (4th ed.). In *John Wiley & Sons, Inc.*
- Hussein, M. T., & Albarqouni, S. N. (2010). Enhanced Model of One Axis-Two Positions Manual Tracking Photovoltaic Panels for Lighting Projects in Palestine. *IASTED International Conference on Solar Energy*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3875.0563>
- IESR. (2021). Beyond 207 Gigawatts : Unleashing Indonesia's Solar Potential. In *Institute for Essential Services Reform*.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2021). Handbook of Energy & Economy Statistics of Indonesia 2020. In *Pusat Data dan Informasi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia*. <https://www.esdm.go.id/id/publikasi/handbook-of-energy-economic-statistics-of-indonesia>
- Langer, J., Quist, J., & Blok, K. (2021). Review of Renewable Energy Potentials in Indonesia and Their Contribution to a 100% Renewable Electricity System. *Energies*, 14, 7033. <https://doi.org/10.3390/en14217033>
- Luque, A., & Hegedus, S. (2003). Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. In *John Wiley & Sons, Inc.*
- Pangestuningtyas, D. L., Hermawan, H., & Karnoto, K. (2014). Analisis Pengaruh Sudut Kemiringan Panel Surya terhadap Radiasi Matahari yang Diterima oleh Panel Surya Tipe Larik Tetap. *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 2(4), 930–937. <https://doi.org/https://doi.org/10.14710/transient.2.4.930-937>
- Peraturan Presiden Republik Indonesia. (2017). Lampiran I Perpres Nomor 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional. In *Sekretariat Kabinet Republik Indonesia*.
- Talebizadeh, P., Mehrabian, M. A., & Abdolzadeh, M. (2011). Prediction of The Optimum Slope and Surface Zimuth Angles Using The Genetic Algorithm. *Energy and Buildings*, 43(11), 2998–3005. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.07.013>
- Ullah, A., Imran, H., Maqsood, Z., & Butt, N. Z. (2019). Investigation of Optimal Tilt Angles and Effects of Soiling on PV Energy Production in Pakistan. *Renewable Energy*, 139, 830–843. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.114>
- Veldhuis, A. J., & Reinders, A. H. M. E. (2013). Reviewing The Potential and Cost-Effectiveness of Grid-Connected Solar PV in Indonesia on a Provincial Level. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 315–324. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.010>

## LAMPIRAN

### 1. Perhitungan pada MATLAB

```
Perhitungan_TA_Monthly.m x +
1 clear;
2 clc;
3
4 disp('Optimum Tilt and Azimuth Angle Calculation in Surabaya, Indonesia')
5 disp('_____')
6 disp(' ')
7 disp('Input Initial Data')
8 disp(' ')
9 Latitude=input('Latitude of location = ');
10 Month=input('Select the month to calculate (for January use '1', for February use '2', etc.) = ');
11 disp('_____')
12
13 if Month==1; % January
14     Mean_day=17; % mean day of the month (n)
15     Declination=-20.9; % angular position of the sun at solar noon
16     Monthly_Radiation=17.188; % monthly average daily total radiation
17     disp([' '])
18     disp(['For January'])
19     disp([' '])
20     disp(['Mean day of the month is ',num2str(Mean_day)])
21     disp(['Declination at ',num2str(Declination),'°'])
22     disp(['Monthly average daily radiation on horizontal surface is ',num2str(Monthly_Radiat
23
24 elseif Month==2; % February
25     Mean_day=47; % mean day of the month (n)
26     Declination=-13; % angular position of the sun at solar noon
27     Monthly_Radiation=17.822; % monthly average daily total radiation
28     disp([' '])
29     disp(['For February'])
30     disp([' '])
31     disp(['Mean day of the month is ',num2str(Mean_day)])
32     disp(['Declination at ',num2str(Declination),'°'])
33     disp(['Monthly average daily radiation on horizontal surface is ',num2str(Monthly_Radiat
34
35 elseif Month==3; % March
36     Mean_day=75; % mean day of the month (n)
37     Declination=-2.4; % angular position of the sun at solar noon
38     Monthly_Radiation=18.218; % monthly average daily total radiation
39     disp([' '])
40     disp(['For March'])
41     disp([' '])
42     disp(['Mean day of the month is ',num2str(Mean_day)])
43     disp(['Declination at ',num2str(Declination),'°'])
44     disp(['Monthly average daily radiation on horizontal surface is ',num2str(Monthly_Radiat
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152 % Ground reflectance
153 ground_reflectance=0.2; % ground reflectance
154
155 % find ws, sunset hour angle in degrees
156 ws=(acosd((-tand(Latitude))*(tand(Declination))));
157
158 % find A, B, and C
159 slope=linspace(0,90,91); % the angle between the plane of the surface in question and
160 azimuth=linspace(-180,180,91); % the deviation of the projection on a horizontal plane of t
161 [X,Y]=meshgrid(slope,azimuth);
162
163 A=(cosd(X)+(tand(Latitude)).*(cosd(Y)).*(sind(X)));
164 B=cosd(ws).*cosd(X)+tand(Declination).*sind(X).*cosd(Y);
165 C=sind(X).*sind(Y)/cosd(Latitude);
166
167 % find wsr, sunrise hour angle
168 wsr=acosd((A.*B+C.*real(sqrt(A.^2-B.^2+C.^2)))./(A.^2+C.^2));
169 wsr=real(wsr);
170 wsr(wsr>ws)=ws;
171
172 for i=1:8281;
173     if (A(i)>0&&B(i)>0) | (A(i)>=B(i));
174         wsr(i)=-wsr(i);
175     else
176         wsr(i)=wsr(i);
177     end
178 end
179
180 %find wss, sunset hour angle
181 wss=acosd((A.*B-C.*real(sqrt(A.^2-B.^2+C.^2)))./(A.^2+C.^2));
182 wss=real(wss);
183 wss(wss>ws)=ws;
184
185 for i=1:8281;
186     if (A(i)>0&&B(i)>0) | (A(i)>=B(i));
187         wss(i)=wss(i);
188     else
189         wss(i)=-wss(i);
190     end
191 end
192
193 % find Ho, integrated daily extraterrestrial radiation on a horizontal surface
194 Gsc=1367; % solar constant
195
```

## 2. Hasil perhitungan pada MATLAB

```
Command Window
Optimum Tilt and Azimuth Angle Calculation in Surabaya, Indonesia
-----
Input Initial Data
Latitude of location = -7.28
Select the month to calculate (for January use '1', for February use '2', etc.) = 2
-----
For February
Mean day of the month is 47
Declination at -13°
Monthly average daily radiation on horizontal surface is 17.822 MJ/m²
Maximum monthly average daily radiation is 17.8089 MJ/m²
Optimum tilt angle ( $\beta$ ) at 8°
Optimum azimuth angle ( $\gamma$ ) at 0°
fx >>
```







## 5. Energy loss akibat deviasi sudut azimuth setiap bulan

Deviasi Sudut	Januari	Februari	Maret	April	Mei	Juni	Juli	Agustus	September	Oktober	November	Desember	Rata-Rata
0	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
4	0,01%	0,00%	0,00%	0,01%	0,04%	0,05%	0,05%	0,03%	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,02%
8	0,05%	0,01%	0,00%	0,06%	0,15%	0,21%	0,21%	0,11%	0,02%	0,01%	0,04%	0,04%	0,08%
12	0,12%	0,03%	0,00%	0,13%	0,34%	0,48%	0,46%	0,25%	0,03%	0,01%	0,10%	0,09%	0,17%
16	0,22%	0,05%	0,01%	0,22%	0,61%	0,86%	0,82%	0,43%	0,06%	0,02%	0,18%	0,16%	0,30%
20	0,33%	0,08%	0,01%	0,34%	0,95%	1,33%	1,28%	0,66%	0,09%	0,03%	0,27%	0,25%	0,47%
24	0,48%	0,11%	0,01%	0,47%	1,34%	1,91%	1,82%	0,93%	0,13%	0,04%	0,39%	0,35%	0,67%
28	0,64%	0,15%	0,02%	0,63%	1,80%	2,57%	2,44%	1,23%	0,17%	0,06%	0,52%	0,48%	0,89%
32	0,83%	0,20%	0,03%	0,81%	2,30%	3,30%	3,12%	1,58%	0,23%	0,08%	0,67%	0,62%	1,15%
36	1,03%	0,24%	0,03%	1,01%	2,85%	4,09%	3,87%	1,95%	0,28%	0,09%	0,83%	0,78%	1,42%
40	1,25%	0,30%	0,04%	1,22%	3,45%	4,95%	4,67%	2,36%	0,35%	0,12%	1,01%	0,95%	1,72%
44	1,49%	0,36%	0,05%	1,46%	4,09%	5,86%	5,52%	2,81%	0,42%	0,14%	1,20%	1,13%	2,04%
48	1,74%	0,42%	0,06%	1,71%	4,77%	6,82%	6,43%	3,28%	0,50%	0,16%	1,40%	1,33%	2,38%
52	2,01%	0,48%	0,07%	1,98%	5,49%	7,84%	7,38%	3,78%	0,58%	0,19%	1,62%	1,54%	2,75%
56	2,29%	0,55%	0,08%	2,27%	6,25%	8,90%	8,38%	4,32%	0,67%	0,21%	1,84%	1,76%	3,13%
60	2,58%	0,63%	0,09%	2,58%	7,05%	10,00%	9,43%	4,88%	0,76%	0,24%	2,08%	1,99%	3,53%
64	2,89%	0,70%	0,10%	2,89%	7,87%	11,15%	10,52%	5,47%	0,86%	0,27%	2,33%	2,23%	3,94%
68	3,21%	0,78%	0,11%	3,22%	8,73%	12,34%	11,64%	6,08%	0,96%	0,31%	2,59%	2,48%	4,37%
72	3,54%	0,86%	0,12%	3,57%	9,62%	13,56%	12,80%	6,72%	1,07%	0,34%	2,86%	2,74%	4,82%
76	3,87%	0,95%	0,14%	3,93%	10,53%	14,81%	14,00%	7,37%	1,18%	0,37%	3,13%	3,00%	5,27%
80	4,22%	1,04%	0,15%	4,29%	11,47%	16,09%	15,22%	8,05%	1,30%	0,41%	3,41%	3,26%	5,74%
84	4,57%	1,13%	0,16%	4,67%	12,42%	17,40%	16,47%	8,75%	1,42%	0,44%	3,70%	3,54%	6,22%
88	4,93%	1,22%	0,18%	5,06%	13,40%	18,74%	17,75%	9,47%	1,54%	0,48%	3,99%	3,81%	6,71%
92	5,29%	1,31%	0,19%	5,45%	14,39%	20,09%	19,05%	10,19%	1,66%	0,52%	4,29%	4,09%	7,21%
96	5,66%	1,40%	0,20%	5,84%	15,40%	21,45%	20,37%	10,93%	1,79%	0,55%	4,59%	4,36%	7,71%
100	6,03%	1,49%	0,22%	6,24%	16,41%	22,83%	21,70%	11,68%	1,92%	0,59%	4,89%	4,64%	8,22%
104	6,40%	1,59%	0,23%	6,64%	17,43%	24,22%	23,04%	12,43%	2,05%	0,63%	5,20%	4,91%	8,73%
108	6,77%	1,68%	0,25%	7,05%	18,45%	25,60%	24,38%	13,19%	2,17%	0,67%	5,50%	5,18%	9,24%
112	7,13%	1,77%	0,26%	7,44%	19,47%	26,99%	25,73%	13,94%	2,30%	0,70%	5,79%	5,45%	9,75%
116	7,49%	1,86%	0,27%	7,84%	20,48%	28,37%	27,06%	14,69%	2,42%	0,74%	6,09%	5,71%	10,25%
120	7,84%	1,95%	0,29%	8,22%	21,48%	29,73%	28,39%	15,43%	2,55%	0,78%	6,38%	5,97%	10,75%
124	8,18%	2,03%	0,30%	8,60%	22,47%	31,07%	29,70%	16,16%	2,67%	0,81%	6,66%	6,22%	11,24%
128	8,52%	2,12%	0,31%	8,97%	23,43%	32,39%	30,98%	16,86%	2,78%	0,84%	6,93%	6,45%	11,71%
132	8,84%	2,19%	0,32%	9,32%	24,36%	33,68%	32,23%	17,55%	2,89%	0,88%	7,19%	6,68%	12,18%
136	9,14%	2,27%	0,33%	9,65%	25,26%	34,92%	33,44%	18,21%	3,00%	0,91%	7,45%	6,90%	12,62%
140	9,43%	2,34%	0,34%	9,97%	26,11%	36,12%	34,61%	18,83%	3,10%	0,94%	7,68%	7,10%	13,05%
144	9,70%	2,41%	0,35%	10,27%	26,93%	37,26%	35,72%	19,42%	3,19%	0,96%	7,90%	7,29%	13,45%
148	9,95%	2,47%	0,36%	10,54%	27,69%	38,34%	36,77%	19,97%	3,27%	0,99%	8,11%	7,46%	13,83%
152	10,18%	2,52%	0,37%	10,79%	28,39%	39,35%	37,75%	20,47%	3,35%	1,01%	8,30%	7,61%	14,17%
156	10,39%	2,57%	0,38%	11,01%	29,03%	40,28%	38,64%	20,93%	3,41%	1,03%	8,46%	7,75%	14,49%
160	10,57%	2,61%	0,38%	11,20%	29,59%	41,10%	39,45%	21,33%	3,47%	1,05%	8,61%	7,87%	14,77%
164	10,72%	2,65%	0,39%	11,36%	30,08%	41,80%	40,13%	21,67%	3,52%	1,06%	8,73%	7,97%	15,01%
168	10,84%	2,68%	0,39%	11,49%	30,46%	42,35%	40,67%	21,95%	3,56%	1,07%	8,83%	8,05%	15,20%
172	10,92%	2,70%	0,39%	11,59%	30,74%	42,76%	41,07%	22,15%	3,58%	1,08%	8,90%	8,10%	15,33%
176	10,97%	2,71%	0,39%	11,65%	30,91%	43,00%	41,31%	22,27%	3,60%	1,09%	8,94%	8,14%	15,42%
180	10,99%	2,71%	0,39%	11,67%	30,97%	43,08%	41,39%	22,31%	3,61%	1,09%	8,96%	8,15%	15,44%

## BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Tangerang, 28 Agustus 2000, yang merupakan anak bungsu dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal mulai dari TK Strada Santa Maria I, SD Strada Santa Maria, SMP Strada Santa Maria, dan SMA Negeri 1 Tangerang. Setelah lulus dari SMA Negeri 1 Tangerang, Penulis melanjutkan pendidikan di Departemen Teknik Mesin FT-IRS ITS melalui jalur SBMPTN dan terdaftar dengan NRP. 0211184000095. Penulis aktif di bidang akademik maupun non-akademik selama berkuliah di Teknik Mesin. Pada bidang akademik, Penulis mempelajari Bidang Konversi Energi di Laboratorium Rekayasa Thermal dan Sistem Energi. Di bidang non-akademik, Penulis aktif sebagai Kepala Departemen Keprofesian dan Kepemanduan Mahasiswa di Himpunan Mahasiswa Mesin. Untuk informasi lebih lanjut mengenai penelitian ini beserta kritik dapat menghubungi Penulis melalui email: [nikolasprayy@gmail.com](mailto:nikolasprayy@gmail.com)