

SKRIPSI

**PROTOTIPE *ASTRONOMICAL BASED SOLAR TRACKER*:
PENGEMBANGAN MODEL *TRACKING* UNTUK MEMAKSIMALKAN
OUTPUT DAYA DAN EFISIENSI PANEL SURYA**



GABRIEL SAMUEL ABADI MATONGAN

D041 171 014

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2021

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

**PROTOTYPE ASTRONOMICAL BASED SOLAR TRACKER: PENGEMBANGAN
MODEL TRACKING UNTUK MEMAKSIMALKAN OUTPUT DAYA DAN
EFISIENSI PANEL SURYA**

Disusun dan diajukan oleh:

GABRIEL SAMUEL ABADI MATONGAN

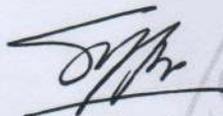
D041 17 1014

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada Tanggal 4 November 2021 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

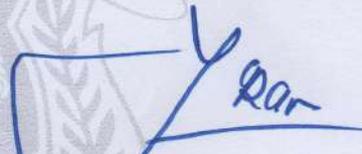
Menyetujui

Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping



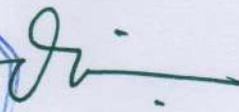
Prof. Dr. Eng. Ir. Syafaruddin, S.T., M.Eng., IPU
NIP. 19740530 199903 1 003



Dr. Ir. Yusran, S.T., M.T.
NIP. 19750404 200012 1 001

Ketua Program Studi




Dr. Eng. Ir. Dewiani, MT.
NIP. 19691026 199412 2 001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Gabriel Samuel Abadi Matongan
NIM : D041171014
Program Studi : Teknik Elektro
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

(Prototipe *Astronomical Based Solar Tracker*: Pengembangan Model *Tracking*
untuk Memaksimalkan *Output* Daya dan Efisiensi Panel Surya)

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambil alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 4 November 2021

Yang Menyatakan



(Gabriel Samuel Abadi Matongan)

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh, Salam sejahtera bagi kita semua, *Shalom, Om Swastyatsu, Namu Buddhaya*, Salam Kebajikan.

Puji syukur senantiasa dipanjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa yang dengan limpahan kasih setia, bimbingan, dan berkat-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul “*PROTOTIPE ASTRONOMICAL BASED SOLAR TRACKER: PENGEMBANGAN MODEL TRACKING UNTUK MEMAKSIMALKAN OUTPUT DAYA DAN EFISIENSI PANEL SURYA*”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.

Pada penulisan skripsi ini, penulis banyak dihadapkan dengan berbagai hambatan, akan tetapi berkat adanya bimbingan, dukungan dan bantuan dari berbagai pihak, akhirnya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik. Olehnya itu, melalui kesempatan ini penulis juga mengucapkan penghargaan dan banyak terima kasih kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa, yang telah senantiasa memberikan kesempatan, berkat, akal budi, pengetahuan, dan segala yang tak terhitung jumlahnya untuk dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Kedua orang tua penulis, Ir. Agustinus Matongan dan Ir. Fransiska Panggau atas segala doa, jasa, motivasi dan dukungan yang telah diberikan dan yang senantiasa mengingatkan penulis untuk menyelesaikan skripsi secepatnya.
3. Kedua adik tercinta dan seluruh keluarga penulis atas segala semangat, nasehat dan bantuan yang telah diberikan.
4. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Syafaruddin, S.T., M.T., IPU selaku pembimbing I dan Bapak Dr. Yusran, S.T., M.T. selaku pembimbing II serta Ibu Dr. Ir. Hasniaty A., S.T., M.T. selaku penguji I dan Ibu Dr. Fitriyanti Mayasari, S.T., M.T. selaku penguji II yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikirannya dalam membimbing dan mengarahkan penulis dalam pembuatan tugas akhir.
5. Ibu Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T. sebagai Ketua Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

6. Seluruh Dosen dan Staf Akademik Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas pengabdianya.
7. Ibu Salmiati selaku Staf Akademik Program Studi S1 yang tiada letih membantu mahasiswa dalam pengurusan administrasi dan Bapak Amsal Salim, S.T. yang senantiasa membantu dan mensupport penulis saat pengambilan data di Rooftop Gedung Elektro.
8. Teman-teman PT. Tenstronic Teknologi Indonesia, khususnya saudara Arson Marianus dan Muh. Rafli Nur Ihsan atas bantuan yang luar biasa kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir
9. Teman-teman CV. Makassar Multi Manufacturing Technology (M3-Tech), khususnya Achmad Fachry dan Nunu atas bantuan yang luar biasa kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir.
10. Saudara Ilham Ramli yang menjadi rekan seperjuangan dalam menyelesaikan tugas akhir serta teman diskusi dan bercanda tawa selama pengambilan data di Rooftop Gedung Elektro.
11. Teman-teman Equalizer 2017 atas cerita, canda tawa dan kenangannya selama ini.
12. Keluarga Besar Paradize 09 atas kisah dan kenangan masa muda yang diberikannya.
13. Rekan-rekan seperjuangan Teknik Kendali 2017, khususnya Ira Kala dan Muh. Alif Akbar yang senantiasa membantu penulis dalam akademik.
14. Teman-teman dan kakak-kakak Laboratorium Elektronika Daya, khususnya kakanda Ahmad Jayadi dan Cristian Dave yang senantiasa menjadi teman diskusi.
15. Keluarga Besar KMKO Teknik Unhas, khususnya Rediscover You 2017 atas kisah, tangis dan tawa, serta ilmu yang telah diberikan.
16. Teman-teman nongkrong di Lab T3, khususnya saudara Hardiyansyah, Firmansyah, Yulianti, Arham, dan Fadli yang telah membantu dan memfasilitasi penulis dalam penyelesaian tugas akhir
17. Kakak-kakak dan adik-adik yang telah melengkapi perjalanan hidup penulis selama menempuh bangku kuliah.

18. Dan untuk semua pihak yang tak dapat penulis sebutkan satu per satu yang telah memberikan dukungan baik secara langsung maupun tidak langsung sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata dengan segala kerendahan hati, penulis menyadari masih terdapat kekurangan dalam penulisan tugas akhir ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan adanya saran dan kritik demi kesempurnaan tugas akhir ini.

Makassar, 4 November 2021

Hormat Saya

Penulis

ABSTRAK

GABRIEL SAMUEL ABADI MATONGAN. Prototipe *Astronomical Based Solar Tracker*: Pengembangan Model *Tracking* untuk Memaksimalkan *Output* Daya dan Efisiensi Panel Surya (dibimbing oleh Syafarudin dan Yusran)

Solar tracker merupakan sistem mekanis yang menggerakkan panel surya mengikuti pergerakan matahari, dimana secara umum terdapat dua jenis yaitu *Single Axis* dan *Dual Axis*. Sistem *Dual axis* mengikuti pergerakan matahari lebih akurat sehingga memiliki keunggulan kenaikan output daya, namun membutuhkan konsumsi daya lebih. Pada penelitian dirancang *Prototipe Astronomical Based Solar Tracker* yang merupakan pengembangan dari sistem *dual axis* dengan menambahkan sumbu lintang sehingga pergerakan sesuai algoritma pergerakan matahari pada koordinat equatorial. Tujuan dari penelitian adalah mendapatkan rancangan prototipe yang menghasilkan output daya panel surya secara maksimal dengan konsumsi daya sistem *tracking* yang minimum dibuktikan dengan hasil pengujian kinerja dalam kondisi matahari sesungguhnya.

Prototipe yang dirancang menggunakan inputan dari modul pewaktu RTC DS3231 untuk diproses mikrokontroler Arduino Pro Mini lalu dikirim ke *Motor Driver* L298N untuk menggerakkan motor sesuai algoritma pergerakan matahari. Sensor MPU 6050 memberikan *feedback* yang menunjukkan kemiringan panel surya. Pengambilan data dibantu sensor tegangan 25V, sensor arus ACS712 dan SD Card modul sebagai sistem monitoring dan data *logger*. Sistem didesain untuk bersifat *self-powered* dengan dilengkapi baterai dan *charger controller*.

Hasil pengujian menunjukkan prototipe berhasil menaikkan output keluaran daya panel surya dengan rata-rata 56,677% dimana nilai terbesar 84,455% dan terkecil 30,445%. Prototipe juga berhasil melakukan proses tracking dengan konsumsi daya minimum dengan rata-rata 7,502 Wh dimana nilai terbesar 7,514 Wh dan terkecil 7,487 Wh. Selain itu, prototipe berhasil mengikuti pergerakan matahari dengan baik, dengan eror terbesar sebesar 2° pada *Hours Angle* dengan dan eror terbesar sebesar 1° yang terjadi pada 3 hari dari total 28 hari pada Deklinasi.

Kata Kunci: Panel Surya, *Solar Tracker*, Algoritma Pergerakan Matahari,

ABSTRACT

GABRIEL SAMUEL ABADI MATONGAN. Prototype of Astronomical Based Solar Tracker: Development of Tracking Models to Maximize Photovoltaic Power Output and Efficiency (supervised by Syafarudin and Yusran)

Solar tracker is a mechanical system that moves photovoltaic following the movement of the sun, where in general there are two types, Single Axis and Dual Axis. Dual axis system follows the movement of the sun more accurately so it has an advantage at power output increasing, but requires more power consumption. In this research, an Prototype of Astronomical Based Solar Tracker is designed which is the development of a dual axis system by adding a latitude axis that makes the movement according to the sun movement algorithm in equatorial coordinates. The purpose of the research is to obtain a prototype design that produces maximum photovoltaic power output with minimum tracking power consumption proven by the results of performance testing in real sun conditions.

The prototype uses input from the DS3231 RTC timer module to be processed by the Arduino Pro Mini microcontroller and then sent to the L298N Motor Driver to drive the motor according to the solar movement algorithm. The MPU 6050 sensor provides feedback indicating the tilt of the photovoltaic. Data retrieval is assisted by a 25V voltage sensor, ACS712 current sensor and SD Card module as a monitoring system and data logger. The system is designed to be self-powered, equipped with a battery and charger controller.

The test results show that the prototype has succeeded in increasing the output of photovoltaic power by an average of 56.677% where the largest value is 84.455% and the smallest is 30.445%. The prototype also succeeded in tracking with minimum power consumption with an average of 7.502 Wh, where the largest value was 7.514 Wh and the smallest was 7.487 Wh. In addition, the prototype managed to follow the movement of the sun well, with the largest error of 2° at Hours Angle and the largest error of 1° occurring on 3 days out of a total of 28 days at Declination.

Keyword: Photovoltaic, Solar Tracker, Sun Movement Algorithm

DAFTAR ISI

LEMBAR SAMPUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xiv
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Batasan Masalah	5
1.4 Tujuan Penelitian	6
1.5 Metodologi Penelitian.....	6
1.6 Manfaat Penelitian	8
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	10
2.1 Karakteristik Panel Surya	10
2.2 Jenis-Jenis Panel Surya.....	12
2.3 Tata Koordinat Bola Langit	18
2.4 Gerak Semu Tahunan Matahari	24
2.5 Perhitungan Radiasi Matahari.....	26
2.6 <i>Solar Incidence Angle (θ_s)</i>	28
2.7 <i>Solar Tracker</i>	29
2.8 Potensi Energi Surya di Lokasi Pengambilan Data	29
BAB III. METODE PENELITIAN	39
3.1 Tahap-Tahap Penelitian	39
3.2 Konfigurasi Alat.....	39
3.3 Parameter Perancangan.....	42
3.4 Komponen Sistem.....	46
3.5 Rancangan Prototipe	52
3.6 Algoritma Pengontrolan Motor.....	58
3.7 Pembuatan dan Perakitan Rancangan Penelitian	60

3.8	Prosedur Pengambilan dan Pengolahan Data	63
BAB IV. DISKUSI DAN PEMBAHASAN		65
4.1.	Tampilan Prototipe saat Proses Pengambilan Data	65
4.2.	Skenario Pengujian	66
4.3.	Pengujian Algoritma	71
4.4.	Hasil Pengujian	76
4.5.	Perhitungan Matematis	93
4.6.	Validasi Sistem	97
4.7.	Perbandingan Nilai Konsumsi Daya Sistem <i>Tracker</i> yang dirancang dengan Sistem Tracker pada Penelitian Sebelumnya	104
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN		106
5.1.	Kesimpulan	106
5.2.	Saran	107
DAFTAR PUSTAKA		108

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. <i>Single-Diode Model</i>	10
Gambar 2.2. Struktur Sel Surya Monocrystalline	13
Gambar 2.3. Struktur Sel Surya Polycrystalline	14
Gambar 2.4. Grafik <i>Maksimum Achievable Current Density</i> (MACD) untuk Nilai Ketebalan Sel yang Berbeda	15
Gambar 2.5. Profil Sel Surya Cu(InGa)Se ₂	16
Gambar 2.6. Struktur Sel Surya CdTe	17
Gambar 2.7. Bola Langit.....	18
Gambar 2.8. Tata Koordinat Horizon	19
Gambar 2.9. Tata Koordinat Ekuatorial	20
Gambar 2.10. Segitiga Bola	23
Gambar 2.11. Gerak Bumi Mengelilingi Matahari	24
Gambar 2.12. Perubahan Nilai Deklinasi Matahari (δ_s) Sepanjang Tahun.....	25
Gambar 2.13. Diagram <i>Solar Incidence Angle</i> (θ_s)	28
Gambar 2.14. Jenis-Jenis Sistem Solar Tracker.....	29
Gambar 2.15. Variasi Flux Matahari pada Sistem <i>Full Tracking</i> ($\varphi = 350$ LU) 30	
Gambar 2.16. Variasi Flux Matahari pada Sistem <i>Tracking E-W Polar</i> ($\varphi =$ 350 LU).....	32
Gambar 2.17. Variasi Flux Matahari pada Sistem <i>Tracking N-S Horizontal</i> ($\varphi =$ 350 LU)	33
Gambar 2.18. Variasi Flux Matahari pada Sistem <i>Tracking E-W Horizontal</i> ($\varphi = 350$ LU)	34
Gambar 3.1. Tahap - Tahap Penelitian.....	39
Gambar 3.2. Konfigurasi Alat.....	41
Gambar 3.3. Tampak Atas Panel Surya Venus Polycrystalline 100 Wp Model VG-100-18-P	43
Gambar 3.4. Spesifikasi Panel Surya Venus Polycrystalline 100 Wp Model VG- 100-18-P	43
Gambar 3.5. Aktuator Linear Venus Plus 18”	44

Gambar 3.6. Dua Buah Resistor Daya 6,8 Ohm/100 Watt	46
Gambar 3.7. Arduino Pro Mini	48
Gambar 3.8. Motor Driver L298N (Handson Technology, n.d.)	49
Gambar 3.9. Konfigurasi Pin-Out DS3231 (Maxim Integrated, 2015).....	50
Gambar 3.10. Orientasi Gerak Sensor MPU6050 (InvenSense, 2013).....	50
Gambar 3.11. Pin-Out ACS712 (Allegro®, 2007)	51
Gambar 3.12. Rancangan Rangka Prototipe Astronomical Base Solar Tracker... 52	
Gambar 3.13. Bagian-Bagian Rangka Prototipe Astronomical Base Solar Tracker.....	53
Gambar 3.14. Sistem Kontrol dan Pencatatan Data Panel Surya A (dengan Astronomical Based Solar Tracker)	54
Gambar 3.15. Sistem Kontrol dan Pencatatan Data Panel Surya B (tanpa tracking system).....	57
Gambar 4.1. Tampilan Prototipe Astronomical Based Solar Tracker (kiri) dan Panel Surya Statis dengan kemiringan 5° ke Utara (kanan).....	65
Gambar 4.2. Sudut Putar Aktuator Linear (Kotak Merah).....	66
Gambar 4.3. Struktur Bingkai Persegi yang Diperkuat dengan Penambahan Dynabolt (kotak merah) pada Bagian Bawah Rangka	67
Gambar 4.4. Sistem Kontrol dan Pencatatan Data Panel Surya A (dengan Astronomical Based Solar Tracker)	69
Gambar 4.5. Sistem Kontrol dan Pencatatan Data Panel Surya B (statis)	69
Gambar 4.6. Pengujian Konsumsi Daya Sistem Kontrol.....	71
Gambar 4.7. Kurva Perbandingan Nilai Algoritma Hours Angle Motor (garis bersambung) dengan Nilai Hours Angle Matahari Sebenarnya (garis putus-putus)	73
Gambar 4.8. Kurva Perbandingan Nilai Algoritma Declination Motor (garis bersambung) dengan Nilai Deklinasi Matahari Sebenarnya (garis putus-putus)	75
Gambar 4.9. Hasil Pengujian Tegangan, Arus dan Daya Panel A (dengan solar tracker) vs Panel B (statis) pada Skenario Langit Cerah tanggal 15 Agustus.	79

Gambar 4.10. Hasil Pengujian Tegangan, Arus, dan Daya Panel A (dengan solar tracker) vs Panel B (statis) pada Skenario Langit Mendung tanggal 17 Agustus.	80
Gambar 4.11. Perbandingan Energi Total per Satuan Waktu Panel A (dengan solar tracker) vs Panel B (Statis) pada Skenario Langit Cerah tanggal 15 Agustus	82
Gambar 4.12. Perbandingan Energi Total per Satuan Waktu Panel A (dengan solar tracker) vs Panel B (Statis) pada Skenario Langit Mendung 17 Agustus	83
Gambar 4.13. Kurva Konsumsi Daya Sistem Tracking pada Pengambilan Data dengan Total Konsumsi Daya Terbesar pada Tanggal 22 Agustus	85
Gambar 4.14. Kurva Konsumsi Daya Sistem Tracking pada Pengambilan Data dengan Total Konsumsi Daya Terkecil pada Tanggal 10 Agustus	86
Gambar 4.15. Hasil Pengujian nilai sudut Pitch dan Roll Sensor Sudut MPU 6050 pada Hari Pertama Pengambilan Data di Tanggal 29 Juli	88
Gambar 4.16. Hasil Pengujian nilai sudut Pitch dan Roll Sensor Sudut MPU 6050 pada Hari Terakhir Pengambilan Data di Tanggal 25 Agustus	89
Gambar 4.17. Grafik Intensitas Cahaya Matahari Saat Langit Cerah pada Tanggal 15 Agustus	91
Gambar 4.18. Grafik Intensitas Cahaya Matahari Saat Langit Mendung pada Tanggal 17 Agustus	92
Gambar 4.19. Perbandingan Logaritma Pergerakan Sudut Roll dengan Hasil Pergerakan Sudut Roll pada Tanggal 29 Juli.....	98
Gambar 4.20. Perbandingan Logaritma Pergerakan Sudut Roll dengan Hasil Pergerakan Sudut Roll pada Tanggal 25 Agustus	99
Gambar 4.21. Validasi Nilai Pole Angle dengan Menggunakan Waterpass Digital	102
Gambar 4.22. Proses Kalibrasi Sensor	103

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Perbandingan Flux Matahari pada berbagai Jenis Sistem Tracking ($\varphi = 350$ LU)	35
Tabel 3.1. Spesifikasi Panel Surya Venus Polycrystalline 100 Wp Model VG- 100-18-P	44
Tabel 3.2. Spesifikasi Aktuator Linear Venus Plus 18”	45
Tabel 3.3. Daftar Komponen Sistem.....	46
Tabel 3.4. Spesifikasi Arduino Pro Mini	48
Tabel 3.5. Datasheet L289N Motor Driver	49
Tabel 4.1. Overview Hasil Pengambilan Data	77
Tabel 4.2. Nilai Sudut Deklinasi Hasil Pengujian dan Nilai Sudut Deklinasi Sesuai Logaritma Perancangan.....	97

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara kepulauan dengan luas wilayah terbesar keempat di dunia dan wilayahnya dilewati oleh garis khatulistiwa. Kondisi geografis ini menjadikan Indonesia sebagai salah satu negara dengan potensi energi surya terbesar. Indonesia memiliki potensi energi surya yang sangat besar yakni sekitar 207,8 GWp. Namun sangat disayangkan, dengan besarnya potensi yang dimiliki, kapasitas PLTS terpasang di negara kita per 28 Januari 2020 baru berkisar 152,44 MWp (0,04 %) (ESDM, 2020).

Pengembangan pemanfaatan energi surya di Indonesia seharusnya mendapatkan perhatian khusus. Berbeda dengan negara Eropa yang memiliki 4 musim dengan lama penyinaran matahari berubah-ubah, Indonesia mendapatkan penyinaran matahari dalam kurun waktu yang hampir sama, yakni pada kisaran 12 jam sepanjang tahun (Manan, 2009). Pengoptimalan energi yang dibangkitkan panel surya sepanjang waktu penyinaran matahari kemudian menjadi tantangan dalam memaksimalkan potensi energi yang ada.

Panel surya yang ada saat ini kebanyakan masih menggunakan rangka kaki yang tetap (permanen). Hal ini mengakibatkan panel surya tidak bisa menghasilkan daya listrik secara optimal, karena praktis dalam sehari hanya satu sampai dua jam saja posisinya hampir tegak lurus terhadap posisi matahari. Teknologi *solar tracker* menjadi salah satu solusi dari permasalahan tersebut. *Solar tracker* merupakan suatu sistem mekanis yang membuat panel surya dapat mengikuti pergerakan matahari (Manan, 2009).

Secara umum terdapat dua jenis *solar tracker* yaitu *Single Axis Solar Tracker* dan *Dual Axis Solar Tracker*. Sistem *Dual axis* dapat mengikuti pergerakan matahari dengan lebih akurat sehingga memiliki keunggulan dari segi kenaikan output daya. Studi di Amman, Jordania dengan *Dual Axis*, *Single Axis E-W*, *Single Axis Vertical* dan *Single Axis N-S* mendapati terjadi peningkatan daya masing-masing sebesar 43,87%, 37,54%, 34,43% dan 15,69% (Abdallah, 2004).

Dual Axis Solar Tracker juga memiliki kekurangan. Sistem *Dual Axis* memerlukan biaya investasi yang lebih sehingga untuk beberapa lokasi yang berada di lintang tidak jauh dari khatulistiwa, penggunaan sistem *Single Axis* lebih direkomendasikan. Studi di Bangladesh mendapati kenaikan efisiensi 26% - 45% pada sistem *Dual Axis* hanya berbeda 1% - 5% dari sistem *Single Axis* dengan menaikkan efisiensi 25% - 40%. Hasil studi lebih merekomendasikan sistem *Single Axis* pada lokasi tersebut (Fahad et al., 2019). Penggunaan dua aktuator pada sistem *Dual Axis* juga memerlukan konsumsi daya lebih. Studi di Santa Marta Colombia mendapati sistem *Dual Axis* yang digunakan memiliki konsumsi daya sebesar 6,1-6,5 Wh sehingga kenaikan output panel surya setelah dikurangi konsumsi daya sistem *tracking* hanya sebesar 9,87% (Algarín et al., 2017).

Pada penelitian ini akan dirancang suatu model *solar tracker* dengan mengkombinasikan teori-teori dan model-model sebelumnya dengan harapan dapat menghasilkan prototipe *solar tracker* yang lebih baik. Prototipe dibangun dari berbagai komponen dengan fungsi berbeda-beda untuk menjalankan proses *tracking* dengan baik. Modul pewaktu DS3231 digunakan sebagai inputan dari mikrokontroler Arduino Mega untuk kemudian dikonversi dengan algoritma pergerakan matahari menjadi koordinat ekuatorial matahari secara *real time*. Mikrokontroler kemudian mengirim sinyal ke *motor driver* L2898 untuk mengontrol aktuator guna melakukan proses *tracking*. Sensor sudut MPU6050 akan memberikan umpan balik berupa sudut kemiringan panel surya agar pada proses *tracking* didapatkan sudut kemiringan panel surya yang diinginkan.

Prototipe yang dirancang menggunakan aktuator linear sebagai penggerak untuk menggerakkan panel surya mengikuti pergerakan matahari. Aktuator linear adalah perangkat yang dapat mengubah inputan berupa sinyal listrik menjadi gerakan mekanik yang dapat digunakan untuk menggerakkan beban (Zhu & Chang, 2012). Prototipe *solar tracker* yang dirancang dikembangkan dari *dual axis solar tracker* yang nantinya akan memiliki pergerakan pada dua sumbu sehingga membutuhkan dua buah aktuator linear untuk proses *tracking*.

Model *solar tracker* yang diajukan merupakan pengembangan dari *Dual Axis Solar Tracker* sebagai dasar pergerakan dengan menambahkan satu sumbu, yakni

sumbu lintang yang biasa disebut dengan sumbu kutub (*polar axis*). Dengan demikian, nantinya pergerakan sumbu putar harian akan berputar mengelilingi atau paralel dengan *polar axis* (Alexandru & Pozna, 2010). Penambahan sumbu bertujuan untuk mengubah pergerakan *solar tracker* yang awalnya berdasarkan pada koordinat horizon menjadi koordinat ekuatorial.

Gerakan *solar tracker* akan didesain untuk mengikuti matahari sesuai algoritma pergerakan matahari pada koordinat ekuatorial. Pergerakan matahari dan benda langit lainnya pada koordinat ekuatorial dapat dibagi menjadi dua, yaitu pergerakan pada sumbu deklinasi dan pergerakan pada sumbu sudut jam (Roy & Clarke, 2003). Nilai koordinat sudut jam (Hours Angle) dari matahari berubah cukup cepat dengan kecepatan yang hampir konstan dalam sehari, yakni $15^\circ/\text{hours}$. Adapun nilai sudut deklinasi berubah sangat lambat, dimana perubahan 1° baru terjadi setelah rentang 1 hari hingga berhari-hari (Yao et al., 2014). Dengan demikian, secara praktis hanya satu aktuator yang senantiasa aktif, yaitu aktuator pada sumbu hours angle, sedangkan aktuator pada sumbu deklinasi hanya perlu aktif pada setelah selang waktu beberapa hari.

Dari hasil kajian di atas, penulis kemudian memberikan sebuah nama kepada prototipe yang akan dirancang yaitu “**Prototipe Astronomical Based Solar Tracker: Pengembangan Model Tracking untuk Memaksimalkan Output Daya Dan Efisiensi Panel Surya**”. Pemberian nama bersesuaian dengan *solar tracker* yang pergerakannya berbasis pada algoritma pergerakan matahari pada koordinat ekuatorial. Hipotesis yang dikembangkan dalam penelitian ini yaitu sistem *solar tracker* dengan pergerakan pada koordinat ekuatorial hanya membutuhkan satu aktuator untuk mengikuti gerak harian matahari, sedangkan satu aktuator lainnya hanya aktif setelah rentang beberapa hari. Dengan demikian konsumsi daya dapat berkurang dan *solar tracker* dapat mengikuti pergerakan matahari dengan lebih baik.

Dalam proses penelitian sistem *tracking* didesain agar untuk dapat bekerja tanpa membutuhkan daya dari sumber eksternal (*self-powered*). Prototipe dilengkapi dengan baterai dan *charge controller* sehingga nantinya prototipe dapat memanfaatkan daya yang dibangkitkan oleh panel surya untuk konsumsi sistem

tracking. Dengan demikian, prototipe dapat menjalankan fungsi tracking serta pencatatan data dengan baik. Pada proses pengambilan data nantinya akan dilakukan pengambilan dan perbandingan data output antara panel surya yang dipasang prototipe *Astronomical Based Solar Tracker* dan panel surya statis pada waktu dan lokasi yang sama. Dari hasil yang diperoleh diharapkan penelitian ini dapat menghasilkan sebuah prototipe *solar tracker* yang dapat meningkatkan output daya panel surya dengan maksimal namun dengan konsumsi daya sistem *tracking* yang minimum.

1.2 Rumusan Masalah

Panel Surya (*Photovoltaic*) mengkonversi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui fenomena efek fotolistrik (Khaligh & Onar, 2017). Oleh karenanya, jumlah intensitas cahaya matahari nantinya akan menentukan seberapa besar energi listrik yang dibangkitkan oleh panel surya. Intensitas cahaya yang jatuh ke panel surya tidak terlepas dari sudut kemiringan antara panel surya dengan arah datang sinar matahari, dimana makin kecil sudut yang dibentuk maka makin besar energi yang dihasilkan oleh panel surya (Śuri & Hofierka, 2004).

Kebanyakan panel surya yang ada saat ini masih dipasang secara tetap (permanen). Hal ini mengakibatkan besar sudut antara arah datang matahari dan garis normal panel surya tidak dapat senantiasa dijaga minimum sehingga panel surya tidak dapat meningkatkan energi secara optimal (Manan, 2009). *Solar Tracker* kemudian hadir sebagai salah satu solusi dari permasalahan ini, dimana *solar tracker* merupakan sistem mekanis yang menggerakkan panel surya mengikuti pergerakan matahari guna meningkatkan output keluaran panel surya.

Terdapat beberapa jenis panel surya yang secara garis besar dikelompokkan menjadi dua jenis, yaitu *Single Axis Solar Tracker* dan *Dual Axis Solar Tracker* (Duffie & Beckman, 2013). Baik *Single Axis* maupun *Dual Axis* memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. Sistem *Dual Axis* dapat mengikuti pergerakan matahari dengan lebih presisi sehingga dapat meningkatkan daya dengan lebih baik dibanding sistem *Single Axis*, namun membutuhkan biaya produksi dan perawatan yang lebih besar (Bouzakri & Abbou, 2020). Penggunaan dua aktuator pada sistem

Dual Axis juga menyebabkan konsumsi daya sistem *tracking* yang lebih besar.

Penelitian ini dilakukan untuk mengembangkan model *solar tracker* guna membantu menyelesaikan permasalahan yang ada pada model *solar tracker* yang telah ada. Pada penelitian ini akan dirancang suatu prototipe yang diberi nama *Astronomical Based Solar Tracker*, model *solar tracker* yang menggunakan logaritma pergerakan matahari sesuai pada koordinat astronomi equatorial. Prototipe nantinya akan diuji pada kondisi matahari sesungguhnya guna menentukan keefektifan kinerja prototipe. Diharapkan nantinya, prototipe yang dirancang mampu menghasilkan output daya yang maksimal pada panel surya dengan konsumsi daya sistem *tracking* yang minimum.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang diangkat diantaranya sebagai berikut:

1. Pengujian dilakukan pada *Rooftop* Gedung Elektro, Kampus Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.
2. Pengujian dilakukan selama 12 jam mulai dari pukul 06.00 WITA-18.00 WITA dengan kondisi matahari bulan Juli dan Agustus 2021.
3. Pengujian dilakukan dengan membandingkan dua panel surya Venus *Polycrystalline* 100 Wp Model VG-100-18-P, dimana salah satunya dipasang *Astronomical Based Solar Tracker* dan satunya lagi di pasang permanent.
4. Pembahasan mengenai sistem mekanis hanya dibatasi pada rancang bangun saja. Adapun analisis lebih lanjut pada sisi mekanis tidak diuji pada penelitian ini.
5. Penelitian memfokuskan agar sistem *tracking* berjalan hanya berdasarkan algoritma pergerakan matahari sesuai dengan inputan waktu. Adapun faktor-faktor eksternal seperti keadaan cuaca tidak diperhitungkan dalam proses *tracking*
6. Penelitian tidak membahas mengenai keuntungan dan kerugian penggunaan prototipe dari aspek ekonomi.

7. Dikarenakan adanya keterbatasan pada sisi mekanis, pada penelitian ini pergerakan sistem mekanis hanya dibatasi pada pukul 09:00 hingga 15:00 pada sudut -45° hingga 45° saja.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mendapatkan rancangan prototipe *Astronomical Based Solar Tracker* yang mampu menghasilkan output daya yang maksimal pada panel surya dengan konsumsi daya sistem *tracking* yang minimum.
2. Mendapatkan hasil pengujian kinerja prototipe *Astronomical Based Solar Tracker* pada pengujian dalam kondisi matahari sesungguhnya.

1.5 Metodologi Penelitian

Adapun metodologi dibagi menjadi empat bagian, yaitu Perancangan Mekanis, Perancangan Kontrol dan Pencatatan Data, Perancangan Algoritma Pergerakan Motor, dan Pengolahan Data:

1.5.1 Perancangan Mekanis

Pada perancangan mekanis terlebih dahulu dilakukan pembuatan sketsa awal dengan menggunakan aplikasi SketchUp 2020 untuk mendapatkan desain awal dari prototipe yang nantinya akan menjadi acuan dalam pembuatan rangka prototipe. Setelah akan dilakukan pengumpulan alat dan bahan yang terdiri dari alat-alat pertukangan seperti gerinda, mesin las, kompresor, dll serta bahan rangka yang terdiri dari besi dengan berbagai jenis dan ukuran, seperti besi hollow, besi L, *bearing*, dll. Setelah alat dan bahan rampung maka akan dilakukan pembuatan rangka prototipe dengan menggunakan metode pengelasan untuk menyatukan besi-besi menjadi satu kesatuan yang membentuk rangka alat. Setelah proses pengelasan selesai maka akan dilakukan proses finishing dengan menghaluskan sisa-sisa hasil pengelasan lalu melakukan proses pengecatan. Setelah proses finishing selesai, alat siap untuk di bawa ke lokasi pengambilan data, dimana nantinya bagian-bagian rangka alat akan disatukan menjadi satu kesatuan yang siap digunakan untuk meletakkan panel surya dan sistem kontrol.

Pada penelitian ini, pembahasan dari sisi mekanis hanya dibatasi pada perancangan saja. Adapun untuk analisis mekanis lebih lanjut tidak dibahas pada penelitian ini. Hal ini bertujuan agar nantinya pembahasan dapat lebih difokuskan ke sisi elektronika dan kontrol yang sesuai dengan cabang ilmu yang didalami oleh penulis.

1.5.2 Perancangan Kontrol dan Pencatatan Data

Pada perancangan sistem kontrol dan pencatatan data terlebih dahulu dilakukan pendesainan awal dengan menggunakan aplikasi Easy Eda untuk mendapatkan desain awal sistem kontrol dan pencatatan data yang diinginkan. Setelah desain awal rampung maka dilakukan pemesanan komponen-komponen utama seperti Driver Motor L298N, RTC DS3231, Sensor Sudut MPU 6050, dll serta komponen-komponen pendukung seperti papan PCB, timah solder, *pin header*, dll. Persiapan alat juga dilakukan seperti solder, penghisap timah, tang potong, dll yang dipinjam dari berbagai tempat.

Setelah seluruh alat dan bahan telah rampung, maka dilakukan proses penyolderan untuk mendapatkan rangkaian kontrol dan pencatatan data yang diinginkan. Rangkaian kontrol dan pencatatan data yang telah selesai kemudian di letakkan di dalam box plastik untuk melindungi rangkaian dari air dan panas matahari lalu kemudian di instalasi pada rangka alat. Proses pengujian kemudian dilakukan untuk memastikan apakah rangkaian dapat menjalankan fungsinya dengan baik. Apabila rangkaian kontrol dan pencatatan data telah berfungsi sesuai dengan yang diinginkan, selanjutnya akan dilakukan proses pengambilan data untuk mendapatkan hasil perbandingan data antara panel surya yang dilengkapi dengan prototipe dan panel surya yang dipasang statis.

Pada penelitian ini, salah satu pembahasan utama yang akan dibahas ialah dari sisi elektronika dan kontrol, khususnya pada konsumsi rangkaian elektronika pada sistem *tracking*. Konsumsi sistem *tracking* dirasa perlu untuk dibahas mengingat salah satu dari tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan pemodelan *solar tracker* dengan konsumsi daya seminimum mungkin. Dari pembahasan dan analisis data konsumsi daya sistem *tracking* nantinya akan

didapatkan kesimpulan mengenai efisiensi dari prototipe *solar tracker* yang dirancang.

1.5.3 Perancangan Algoritma Pergerakan Motor

Pada penelitian ini, prototipe akan melakukan proses *tracking* dengan pergerakan yang didasarkan pada algoritma matahari pada koordinat equatorial. Oleh karenanya, pada perancangan algoritma ini pertama-tama dilakukan studi literatur terhadap referensi-referensi terkait maupun referensi lain yang dapat mendukung penelitian. Dari hasil studi literatur kemudian akan dirumuskan sebuah algoritma kontrol motor yang nantinya akan menjadi dasar penelitian ini. Setelah itu kemudian akan dibuat baris-baris kode program pada aplikasi Arduino IDE. Baris-baris program inilah yang nantinya akan diupload ke Arduino Pro Mini untuk mengontrol jalannya proses *tracking* dan pencatatan data.

1.5.4 Pengolahan Data

Hasil dari proses pengambilan data nantinya akan berupa barisan data yang tersimpan pada SD Card. Data pada SD Card nantinya akan di pindahkan ke laptop untuk diolah dan dianalisis lebih lanjut. Proses pengolahan dan analisis data pada penelitian ini menggunakan aplikasi Matlab 2018a. Pada aplikasi Matlab 2018a nantinya akan dilakukan proses pengolahan secara matematik untuk sehingga nantinya diperoleh hasil akhir berupa grafik-grafik perbandingan antara hasil yang didapatkan dengan menggunakan prototipe vs dengan tanpa menggunakan prototipe. Dari hasil pengolahan ini nantinya akan ditarik kesimpulan akhir dari keseluruhan penelitian yang menunjukkan keefektifan dari prototipe yang diajukan pada penelitian ini.

1.6 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Memberikan gambaran pengaruh penggunaan teknologi *Solar Tracker* terhadap output keluaran panel surya.
2. Menjadi referensi pengembangan model teknologi *Solar Tracker*.

Pada Bab I diatas terdapat beberapa teori yang baru dijelaskan secara singkat. Teori-teori ini dirasa penting sehingga perlu dijelaskan lebih lanjut untuk membantu pembaca dalam memahami gagasan yang diajukan oleh penulis. Pada Bab II yang selanjutnya akan dibahas, terdapat pemaparan lebih lanjut mengenai teori-teori yang menjadi dasar dan referensi yang mendukung penelitian ini.

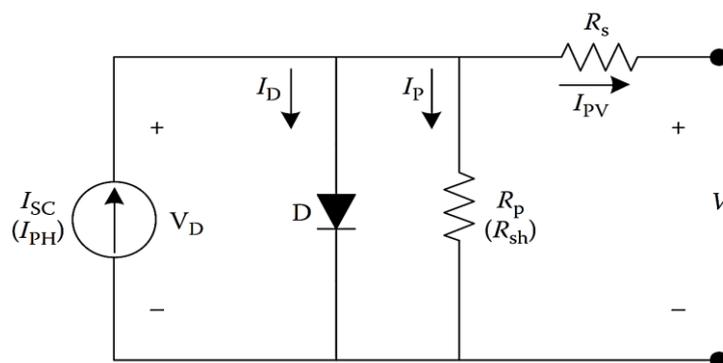
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dipaparkan teori-teori yang menjadi dasar dan referensi penelitian yang dilakukan. Teori-teori tersebut akan dibahas lebih lanjut untuk membantu pembaca memahami isi penelitian. Dalam penjelasan juga nantinya akan disertakan gambar, tabel, dan persamaan mengenai teori yang dibahas. Teori-teori yang dipaparkan berasal dari sumber publikasi buku dan jurnal ilmiah yang relevan dan telah diakui sehingga dapat dipercaya kebenarannya.

2.1 Karakteristik Panel Surya

Panel Surya (*Photovoltaic*) mengkonversi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui fenomena efek fotolistrik. Energi matahari yang diserap akan dikirimkan dalam bentuk elektron di dalam atom pada panel surya. Dengan energi yang didapatkan, elektron akan lepas dari posisi normalnya dan mengalir sebagai arus listrik dalam rangkaian elektronika. Suatu sel surya equivalent dengan suatu rangkaian yang dikenal dengan model *single-diode* yang dapat di lihat pada Gambar 2.1. (Khaligh & Onar, 2017).



Gambar 2.1. *Single-Diode Model* (Khaligh & Onar, 2017)

Pada Gambar 2.1. terlihat bahwa panel surya digambarkan sebagai sebuah sumber arus yang berasal dari panel surya (I_{PH}) atau setara dengan nilai arus hubung singkat rangkaian (I_{SC}) yang terhubung paralel dengan sebuah dioda (D) sehingga timbul arus dioda (I_D) dan mengalir ke dua buah tahanan, yaitu tahanan paralel (R_p atau R_{sh}) sehingga timbul arus paralel (I_p) dan tahanan seri (R_s) sehingga timbul

arus seri (I_S). Dari Gambar 2.1. terlihat bahwa nilai arus output adalah nilai arus pada tahanan seri ($I_{PV} = I_S$), dimana I_{PV} merupakan hasil pengurangan antara arus sumber I_{SC} dengan arus dioda I_D dan arus paralel I_P . Namun secara umum, nilai tahanan seri jauh lebih kecil dibanding tahanan output ($R_S \ll R$), sedang nilai tahanan paralel jauh lebih besar dari tahanan output ($R_P \gg R$). Dengan demikian, arus akan cenderung mengalir ke arah tahanan seri sehingga arus paralel dapat diasumsikan bernilai 0 ($I_P = 0$). Nilai I_{PV} kemudian dapat dirumuskan sesuai Pers. 2.1. (Khaligh & Onar, 2017).

$$I_{PV} = I_{SC} - I_D - I_P \quad , \quad I_P \approx 0$$

$$I_{PV} = I_{SC} - I_D \quad (2.1)$$

Pada model ini, nilai *open-circuit voltage* ditentukan oleh material dan temperatur, sedangkan nilai *short-circuit current* ditentukan oleh intensitas cahaya. Faktor-faktor ini akan mempengaruhi karakteristik dioda sehingga nilai arus dioda (I_D) dituliskan sebagai Pers. 2.2. (Khaligh & Onar, 2017).

$$I_D = I_0 [e^{V_{PV}/\alpha V_T} - 1] \quad (2.2)$$

Dimana nilai V_{PV} merupakan nilai tegangan output, nilai I_0 merupakan nilai *dark saturation current* yang bergantung pada temperatur dan α adalah *ideality factor* yang bernilai antara 1 hingga 5. Nilai V_T merupakan nilai *temperature voltage* yang dirumuskan sebagai Pers. 2.3. (Khaligh & Onar, 2017).

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (2.3)$$

Dimana T adalah nilai temperatur absolut panel surya dan $q = 1,602.10^{-19}$ Coulomb adalah nilai muatan elektron. V_T bernilai 25,7 mV pada suhu 25°C. Dengan mensubstitusikan Pers. 2.3. ke Pers. 2.2., lalu mensubstitusikan Pers. 2.2. ke Pers. 2.1. maka akan didapatkan karakteristik I-V sebagai persamaan arus output (I_{PV}) pada Pers. 2.4. (Khaligh & Onar, 2017).

$$I_{PV} = I_{SC} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{PV}}{\alpha V_T}\right) - 1 \right]$$

$$I_{PV} = I_{SC} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_{PV}}{\alpha kT_C}\right) - 1 \right] \quad (2.4)$$

Adapun dengan menurunkan Pers. 2.4., didapatkan nilai tegangan pada output (V_{PV}) sebagai Pers. 2.5. (Khaligh & Onar, 2017).

$$\begin{aligned}\frac{I_{SC}-I_{PV}}{I_0} &= \exp\left(\frac{V_{PV}}{\alpha V_T}\right) - 1 \\ \frac{V_{PV}}{\alpha V_T} &= \ln\left[\frac{I_{SC}-I_{PV}}{I_0} + 1\right] \\ V_{PV} &= \alpha V_T \ln\left[\frac{I_{SC}-I_{PV}}{I_0} + 1\right]\end{aligned}\quad (2.5)$$

Pers. 2.4. dapat dijabarkan lebih lanjut dengan memperhitungkan nilai R_S dan R_P sehingga nilai $I_P \neq 0$. Selain itu, nilai arus dioda (I_D) juga akan ikut berubah dikarenakan perubahan nilai tegangan output yang dipengaruhi oleh adanya tegangan pada beban seri. Dengan demikian maka akan diperoleh nilai I_P dan I_D baru sesuai dengan Pers. 2.6. dan Pers. 2.7. (Khaligh & Onar, 2017).

$$I_P = \frac{V_{PV} + R_S I_{PV}}{R_P} \quad (2.6)$$

$$I_D = I_0 \left[e^{V_{PV}/\alpha V_T} - 1 \right] \quad (2.7)$$

Dengan mengganti I_P dan I_D pada Pers. 2.4. dengan nilai pada Pers. 2.6. dan Pers. 2.7. , maka akan didapatkan karakteristik I-V pada sel surya sebagai Pers. 2.8. (Khaligh & Onar, 2017).

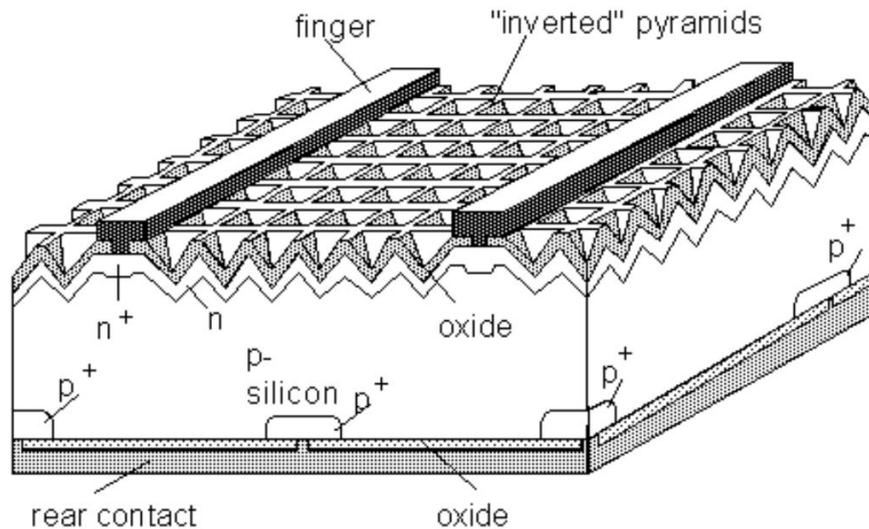
$$\begin{aligned}I_{PV} &= I_{PH} - I_0 - I_P \\ I_{PV} &= I_{PH} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V_{PV} + R_S I_{PV})}{\alpha k T}\right) - 1 \right] - \frac{V_{PV} + R_S I_{PV}}{R_P}\end{aligned}\quad (2.8)$$

2.2 Jenis-Jenis Panel Surya

Terdapat banyak jenis panel surya yang beredar saat ini. Namun terdapat dua jenis panel surya yang paling banyak digunakan saat ini, yaitu:

2.2.1. Monocrystalline Silicon Cell

Sel surya *monocrystalline* merupakan sel surya yang dibangun dari kristal silikon (Si) tunggal yang biasanya berbentuk batangan yang kemudian diiris menjadi beberapa sel. Berbagai macam peningkatan telah dilakukan untuk meningkatkan efisiensi sel *monocrystalline* hingga mencapai angka 25%. Adapun struktur dari sel *monocrystalline* dapat dilihat pada Gambar 2.2. di bawah (Sørensen et al., 2004).

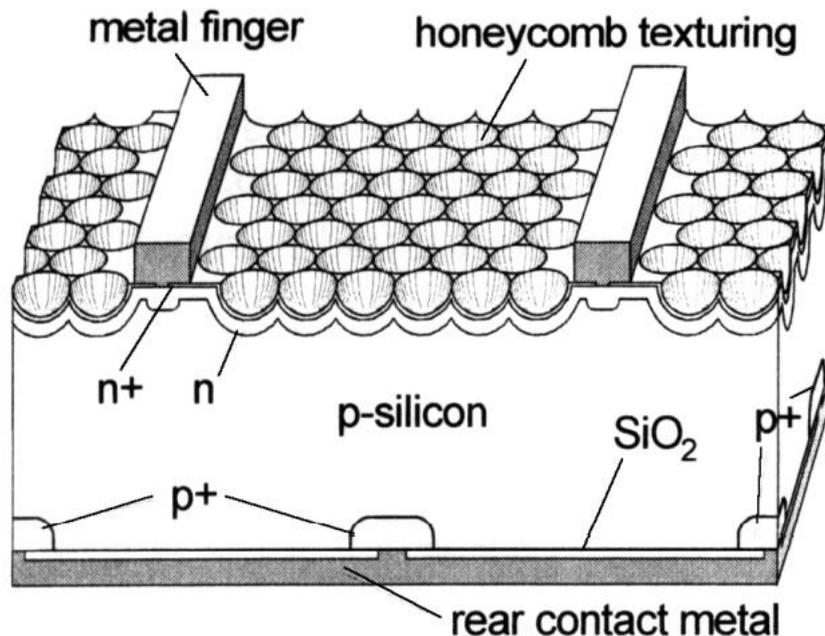


Gambar 2.2. Struktur Sel Surya Monocrystalline (Sørensen et al., 2004).

Pada Gambar 2.2 terlihat bahwa struktur yang *inverted pyramid* menyerupai perangkat dapat meminimalisir pantulan ke arah lain yang tidak menguntungkan sehingga dapat meningkatkan penangkapan cahaya. Selain itu, terdapat juga wilayah *back-side reflecting* yang dapat memantulkan cahaya kembali ke daerah aktif. Derajat doping kemudian diubah di dekat elektroda (area n^+ dan p^+), dan lapisan oksida tipis selanjutnya membantu mencegah elektron mencapai permukaan (proses ini disebut "pasivasi"). Selanjutnya, elektroda atas dapat dikubur agar tidak menghasilkan efek bayangan untuk cahaya yang masuk (Sørensen et al., 2004).

2.2.2. Polycrystalline Silicon Cell

Teknologi lain untuk memproduksi sel surya ialah dengan menggunakan bahan multicrystalline (biasa disebut "polycrystalline"), terdiri dari butiran bahan kristal yang berorientasi acak relatif satu sama lain. Butir kristal dalam sel surya polycrystalline mempertahankan konduktivitas dengan cara yang sama seperti sel monocrystalline, namun pengangkutan elektron yang melintasi batas-batas antar kristal mengurangi konduktivitas sehingga sel menjadi kurang efisien. Namun di sisi lain sel jenis ini dapat diproduksi dengan metode yang lebih sederhana dibanding panel *monocrystalline*. Adapun struktur dari sel surya *polycrystalline* dapat dilihat pada Gambar 2.3. di bawah.



Gambar 2.3. Struktur Sel Surya Polycrystalline (Sørensen et al., 2004).

Struktur sel *polycrystalline* berbentuk sarang lebah seperti pada Gambar 2.3 telah membawa efisiensi hingga 20% pada sel *polycrystalline*. Teknik pembuatan panel surya dengan bahan multikristalin jauh lebih cocok untuk produksi massal karena adanya pengurangan harga. Selain itu, keuntungan sel surya multikristalin *polycrystalline* dibandingkan sel surya *monocrystalline* tampaknya dapat mengkompensasi perbedaan efisiensi 5% (Sørensen et al., 2004).

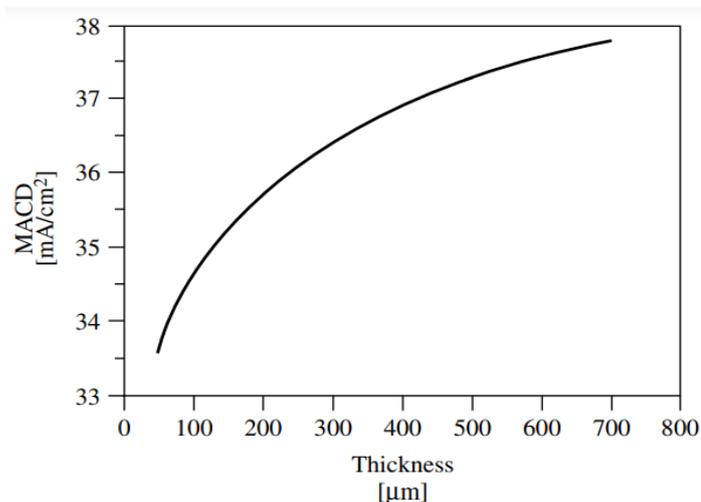
2.2.3. Amorphous Silicon Cells

Di Dundee, Skotlandia, Walter Spear dan Peter LeComber pada tahun 1973 menemukan silikon amorphous yang dibuat menggunakan "*glow discharge*" dalam gas silane (SiH_4) memiliki sifat konduktif tak biasa. *Glow discharge* merupakan ide dasar dari lampu neon, dimana dalam kondisi tertentu, tegangan listrik yang diterapkan pada gas dapat menginduksi arus listrik yang signifikan melalui gas. Silikon amorphous diendapkan sebagai film tipis pada substrat yang dimasukkan ke dalam pelepasan gas silane. Konduktivitas bahan silikon amorphous dapat ditingkatkan secara signifikan dengan mencampurkan beberapa gas phosphine (PH_3) atau beberapa gas diborane (B_2H_6) dengan gas silane. Sama seperti sel surya silikon kristal, doping fosfor dari silikon amorphous telah menginduksi

konduktivitas yang terkait dengan elektron yang bergerak (pada bahan tipe-n), dan doping boron telah menginduksi konduktivitas yang terkait dengan holes yang bergerak (pada bahan tipe-p) (Luque & Hegedus, 2011).

2.2.4. Thin Film Si

Mengurangi ketebalan sel surya akan menghasilkan pengurangan penyerapan sehingga arus foton (photocurrent) berkurang. Untuk mendapatkan gambaran kuantitatif pengurangan arus foton, kita dapat melihat Gambar 2.3. yang memperlihatkan grafik *Maksimum Achievable Current Density (MACD)* untuk nilai ketebalan sel yang berbeda (Luque & Hegedus, 2011).

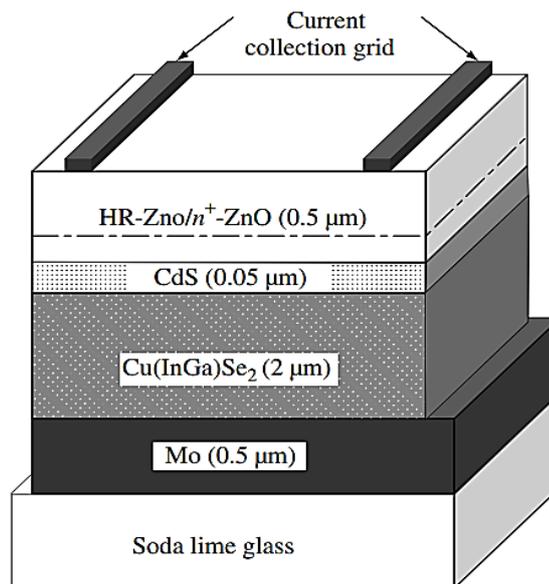


Gambar 2.4. Grafik *Maksimum Achievable Current Density (MACD)* untuk Nilai Ketebalan Sel yang Berbeda (Luque & Hegedus, 2011).

Gambar 2.4. menunjukkan bahwa arus foton akan meningkat seiring dengan peningkatan ketebalan sel surya dan akan mencapai nilai saturasi pada ketebalan 700 μm . Sel yang tipis dapat menyebabkan kerugian pada penurunan arus foton, namun dapat menghasilkan tegangan yang lebih tinggi jika tuntutan rekombinasi permukaan terpenuhi. Jika kondisi terpenuhi, sel yang lebih tipis dapat lebih efisien daripada sel yang lebih tebal. Sel film tipis juga dapat menawarkan keuntungan biaya dikarenakan lebih sedikit jumlah silikon yang digunakan. Pada Gambar 2.4. terlihat bahwa pada ketebalan sekitar 300 μm , nilai kerapatan arus senilai dengan 5% dari nilai saturasi yang mengindikasikan nilai ketebalan ini sesuai untuk fabrikasi sel surya dengan efisiensi tinggi (Luque & Hegedus, 2011).

2.2.5. Cu(InGa)Se₂ Solar Cell

Sel surya dengan bahan dasar Cu(InGa)Se₂ merupakan salah satu teknologi *cost-effective power generation* yang menjanjikan. Salah satu faktor utamanya ialah efisiensi dari sel surya Cu(InGa)Se₂ yang cukup tinggi dengan ketebalan yang relatif tipis. Efisiensi panel mencapai 18,8% dengan pada total luas 0,5 cm². Hasil pengujian juga menunjukkan stabilitas jangka panjang yang sangat baik dalam pengujian di luar ruangan. Sel surya Cu(InGa)Se₂ juga menunjukkan ketahanan radiasi yang tinggi, dibandingkan dengan sel surya berbasis silikon kristal dan dapat dibuat sangat ringan dan fleksibel, sehingga memungkinkan untuk diaplikasikan di luar angkasa. Adapun profil potongan memanjang dari sel surya Cu(InGa)Se₂ dapat dilihat pada Gambar 2.5. (Luque & Hegedus, 2011).

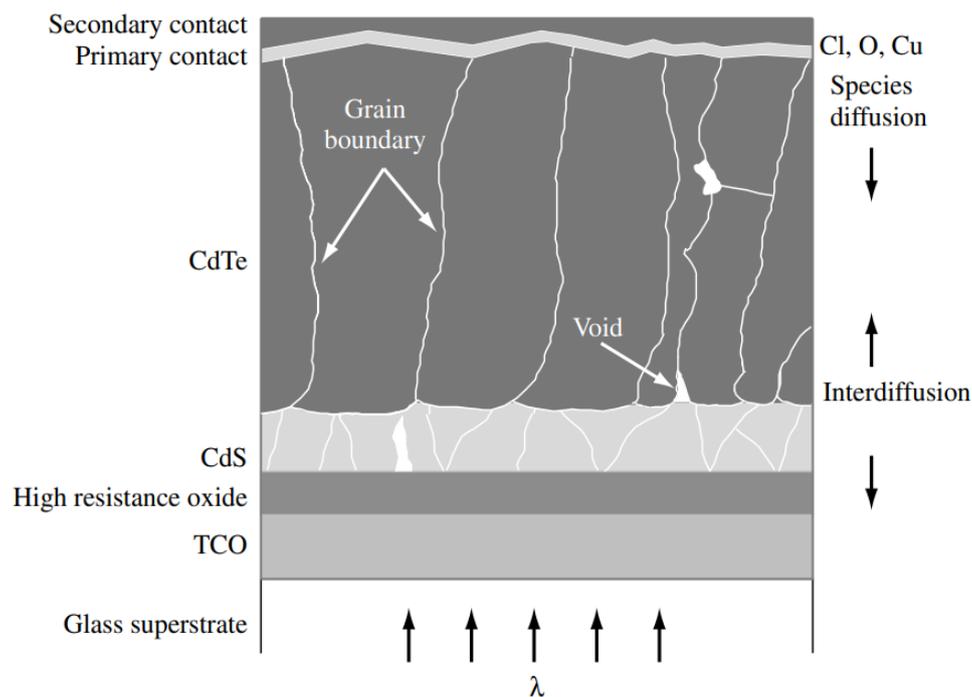


Gambar 2.5. Profil Sel Surya Cu(InGa)Se₂ (Luque & Hegedus, 2011).

Gambar 2.5. menunjukkan struktur standar dari sel surya Cu(InGa)Se₂ dimana struktur terdiri dari *soda lime glass* yang dilapisi oleh lapisan molybdenum (Mo) setebal 0,5 μm sebagai back contact. Setelah lapisan Cu(InGa)Se₂ diendapkan, sebuah terbentuk oleh endapan kimia CdS dengan ketebalan ≤ 50 nm. Kemudian, lapisan *high-resistance* (HR) ZnO dan *doped high-conductivity* ZnO kemudian diendapkan. Dan pada langkah terakhir, suatu lapisan pengumpul arus terhubung secara seri ke atas lapisan dan salah interkoneksi dan sel surya Cu(InGa)Se₂ pun selesai (Luque & Hegedus, 2011).

2.2.6. Cadmium Telluride (CdTe) Solar Cell

Sel surya cadmium telluride (CdTe) adalah berdampak signifikan pada produksi energi surya. Modul film tipis monolitik dengan area besar pada sel surya menunjukkan stabilitas jangka panjang dan kinerja yang sangat baik. Hal ini dikarenakan pada perhitungan efisiensi konversi sel surya ideal pada pita celah (band gap) menunjukkan bahwa CdTe sangat cocok dengan matahari yang memiliki spektral G2 dengan suhu permukaan efektif fotosfer 5700 K, dan luminositas total $3,9 \times 10^{33}$ erg/dtk. CdTe sendiri merupakan senyawa semikonduktor golongan IIB-VIA dengan band gap, $E_g = 1,5$ eV, dan koefisien absorpsi tinggi, $5 \times 10^5/\text{cm}$ yang sangat optimal pada spektrum matahari. Struktur dari sel surya CdTe dapat dilihat pada Gambar 2.6. (Luque & Hegedus, 2011).



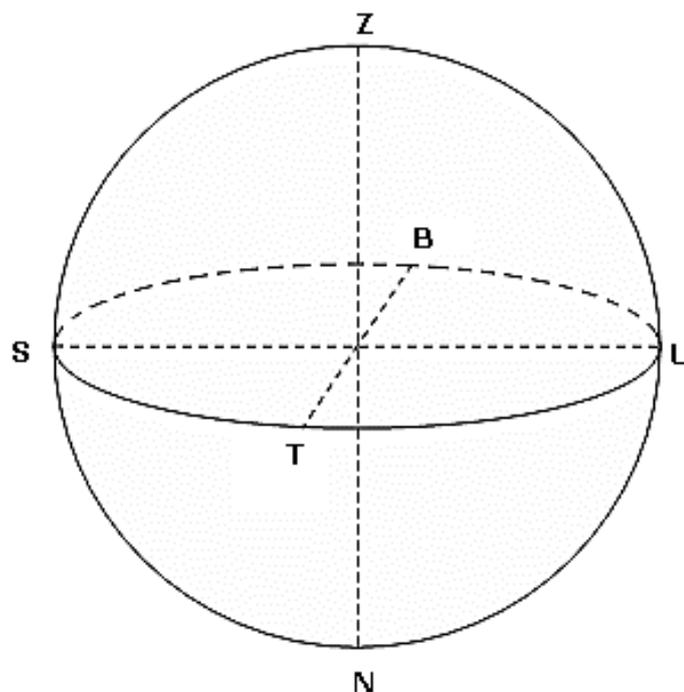
Gambar 2.6. Struktur Sel Surya CdTe (Luque & Hegedus, 2011).

Dari gambar Gambar 2.6. dapat dilihat bahwa Langkah pertama dalam pembuatan sel CdTe adalah melapisi substrat kaca dengan *transparent conducting oxide* (TCO), seperti SnO₂ dan *indium-tin oxide* sebagai *front contact*. Setelah itu, lapisan Cds diendapkan, dimana untuk memperoleh kepadatan arus yang tinggi, lapisan CdS harus dibuat sangat tipis. Kemudian lapisan CdTe diletakkan di atas dan diakhiri dengan *secondary contact* (Luque & Hegedus, 2011).

2.3 Tata Koordinat Bola Langit

Benda langit tidaklah memiliki kedudukan yang tetap, melainkan bergeser secara teratur. Dalam memudahkan penentuan lokasi benda langit, dibuatlah suatu koordinat yang dikenal sebagai tata koordinat bola langit seperti pada Gambar 2.7. Bola langit adalah suatu bola imajiner dimana seluruh bidang langit terproyeksi pada permukaannya, dengan pengamat sebagai pusat (Gautama, 2010).

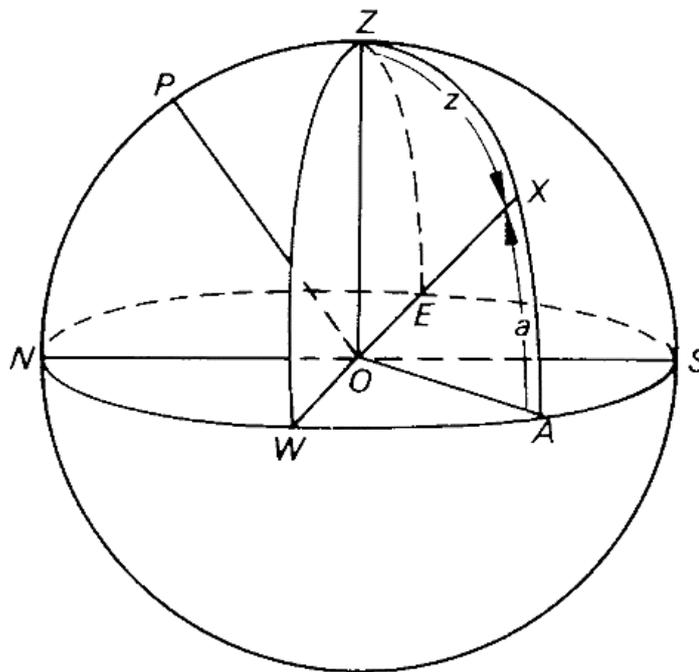
Pada Gambar 2.7. terlihat bahwa pada bola langit terdapat titik-titik, yaitu titik Zenith (Z) yaitu titik yang berada tepat di atas pengamat, titik Nadir (N) yaitu titik yang berada tepat di bawah pengamat dan empat arah mata angin yaitu titik Utara (U), Selatan (S), Timur (E) dan Barat (W). Bola langit terdiri dari 2 lingkaran besar, yaitu Meridian dan Horizon. Lingkaran Meridian merupakan lingkaran yang menghubungkan titik Utara, Zenith, Selatan, dan Nadir. Lingkaran Horizon adalah lingkaran yang menghubungkan empat titik mata angin, yaitu Utara, Timur, Selatan dan Barat. Benda langit yang berada di atas horizon dapat diamati oleh pengamat dan begitupun sebaliknya. Terdapat dua jenis tata koordinat bola langit yang paling sering digunakan, yaitu Tata Koordinat Horizon (Alt-Azimuth) dan Tata Koordinat Equatorial (Gautama, 2010).



Gambar 2.7. Bola Langit (Gautama, 2010)

2.3.1. Tata Koordinat Horizon (Alt-Azimuth)

Pada tata koordinat horizon, pengamat berada di pusat suatu bola dengan benda-benda langit beredar di sekitaran kulit bola seperti terlihat pada Gambar 2.8. Kita bisa menggambarkan koordinat ini sebagai koordinat dimana pengamat yang berada di titik O pada lintang ϕ yang dibawahnya terdapat piringan yang membentang sepanjang pijakannya melewati empat titik mata angin, yakni Utara (N), Timur (E), Selatan (S) dan Barat (W). Piringan ini disebut horizon yang menjadi titik acuan pada Tata Koordinat Horizon (Roy & Clarke, 2003).



Gambar 2.8. Tata Koordinat Horizon (Roy & Clarke, 2003)

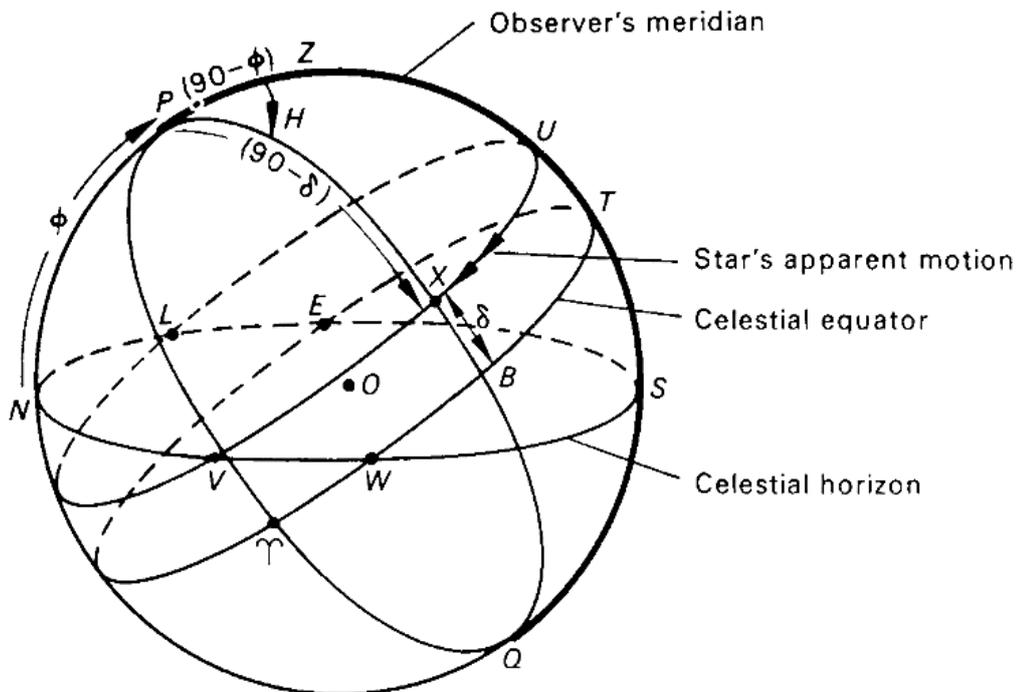
Terdapat dua koordinat dalam tata koordinat horizon, yaitu Azimuth dan Altitude. Adapun penjelasannya sebagai berikut (Karttunen et al., 2016):

- Altitude (a) merupakan sudut yang diukur dari horizon sepanjang garis vertikal menuju ke bintang. Pada Gambar 2.8., altitude merupakan besar sudut antara titik A yang merupakan representasi bintang di bidang horizon ke titik X dimana bintang berada. Altitude bernilai $0^\circ - 90^\circ$ jika letak benda langit berada di atas horizon dan $0^\circ - -90^\circ$ jika letaknya bawah horizon.
- Azimuth (A) merupakan jarak sudut benda langit sepanjang bidang horizon dari suatu titik atau arah tertentu. Terdapat beberapa pendapat mengenai arah

pengukuran azimuth. Azimuth kadang dihitung baik ke arah selatan maupun ke arah utara, baik searah jarum jam maupun berlawanan arah jarum jam. Namun yang paling umum, azimuth diukur dari arah Selatan ke arah Barat. Pada Gambar 2.8., nilai azimuth merupakan besar sudut yang dibentuk antara titik Selatan (S) ke titik A yang merupakan representasi bintang di bidang horizon.

2.3.2. Tata Koordinat Ekuatorial

Jika kita memperpanjang bidang ekuator bumi, maka bidang tersebut akan memotong bola langit pada lingkaran besar yang dikenal sebagai ekuator langit. Pada Gambar 2.9. bidang ekuator langit merupakan lingkaran yang memiliki titik T sebagai kulminasi atas (titik tertinggi) dan memotong bidang horizon pada titik Barat (W) dan Timur (E). Bidang inilah yang kemudian menjadi acuan dari koordinat ekuatorial. Pada kenyataannya, benda langit terbit dan terbenam pada lintasan berbentuk lingkaran kecil yang paralel dengan bidang ekuator. Pada Gambar 2.9. terlihat bintang X tidak terbit dan terbenam tepat di titik Timur dan Barat sesuai dengan bidang equator, melainkan sedikit bergeser dimana bintang X terbit di titik L dan terbenam di titik V (Roy & Clarke, 2003).



Gambar 2.9. Tata Koordinat Ekuatorial (Roy & Clarke, 2003)

Terdapat dua ordinat dalam tata koordinat horizon, yaitu *Hour Angle* dan Deklinasi. Adapun penjelasannya sebagai berikut:

- a. Deklinasi (δ) merupakan jarak sudut benda langit dari bidang ekuator di sepanjang garis meridian ke arah bintang. Pada Gambar 2.9., deklinasi merupakan besar sudut antara titik B pada bidang ekuator ke titik X pada lintasan bintang atau sama dengan jarak antara titik T ke titik U. Deklinasi akan bernilai positif jika benda langit berada di sebelah utara ekuator dan akan bernilai negatif jika berada di sebelah selatan bidang ekuator (Roy & Clarke, 2003).
- b. *Hour Angle (HA)* atau biasa disebut sudut jam menunjukkan letak suatu benda langit dari titik kulminasinya, yang diukur dengan satuan jam, dimana $1^h = 15^\circ$. HA diukur dari titik kulminasi atas lintasan suatu benda langit ke arah barat menuju ke benda langit tersebut. Pada Gambar 2.9., HA merupakan besar sudut antara titik U sebagai titik kulminasi atas lintasan bintang dan titik X dimana bintang berada. HA dapat dituliskan dengan format 24 jam (00:00 – 23:59) atau 12 jam (-12:00 – 12:00), dimana pada format 12 jam HA bernilai positif menandakan benda langit telah melewati titik kulminasi atas dan berada di belahan bumi Barat, sedang nilai negatif menandakan sebaliknya (Gautama, 2010).

Nilai *Hours Angle (HA)* dapat dituliskan dengan Pers. 2.9. (Sørensen et al., 2004):

$$HA = \frac{2\pi(12-t_{zone})}{24} - (\lambda - \lambda_{zone}) - TEQ \quad (2.9)$$

Di mana t_{zone} adalah waktu lokal dan λ_{zone} adalah bujur meridian sesuai dengan zona waktu. Koreksi TEQ (equation of time) merupakan faktor koreksi yang dipengaruhi oleh jarak tanggal pengamatan dari tanggal 1 Januari (n) dan dapat dituliskan dengan Pers. 2.10. (Sørensen et al., 2004):

$$\begin{aligned} TEQ &= - 0.0113 - 0.0019 \times n, n \leq 20 \\ &= - 0.0227 - 0.0393 \cos(0.0357(n - 43)), 20 < n \leq 135, \\ &= - 0.0061 + 0.0218 \cos(0.0449(n - 135)), 135 < n \leq 240, \\ &= 0.0275 + 0.0436 \cos(0.0360(n - 306)), 240 < n \leq 335, \end{aligned}$$

$$= - 0.0020 \times (\text{day} - 359), n > 335. \quad (2.10)$$

Nilai sudut jam suatu benda langit cenderung berubah tiap waktunya. Oleh karenanya di tentukanlah suatu ordinat yang cenderung konstan, yang kemudian dikenal sebagai *Asensio rekta* (α). *Asensio rekta* menunjukkan bujur suatu bintang ketika titik Aries Υ tepat berkulminasi atas pada pukul 12.00 waktu lokal atau biasa dikenal sebagai *vernal equinox*. Titik aries merupakan perpotongan antara lingkaran ekliptika dan horizon yang berpotongan di rasi Aries (walau saat ini telah bergeser akibat gerak presesi bumi). Faktor gerak semu harian benda langit dikoreksi terhadap waktu lokal dan faktor gerak semu tahunan benda langit dikoreksi dengan suatu variabel yang disebut *Local Sidereal Time (LST)* atau waktu bintang, yang menyatakan letak titik Aries pada waktu itu. Adapun nilai LST dapat dituliskan dengan Pers. 2.11. (Gautama, 2010):

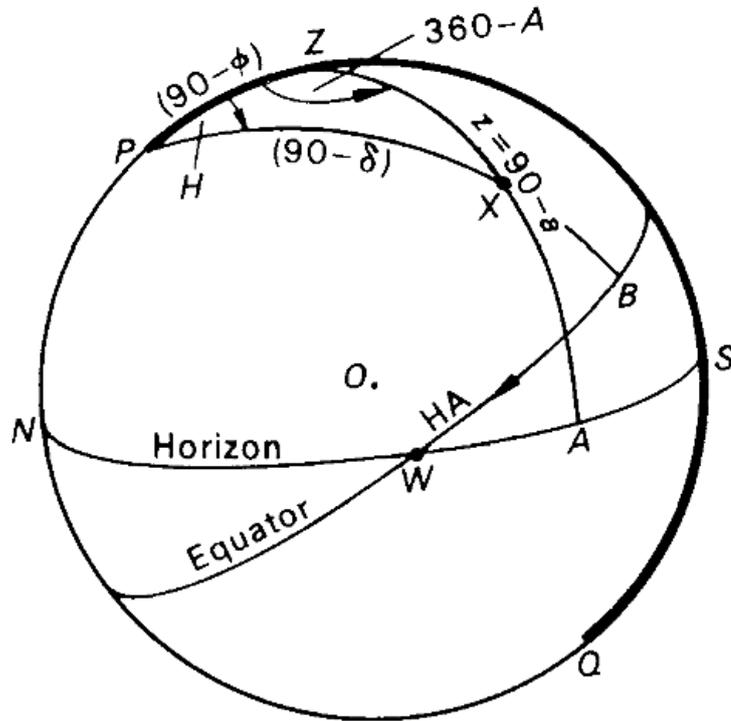
$$LST = \frac{\text{date} - 23 \text{ September}}{365} \times 24 \text{ jam}$$

$$LST = \alpha + HA \quad (2.11)$$

Dimana LST adalah *Local Sidereal Time* , *date* adalah jarak hari waktu pengamatan dari tanggal 23 September, α adalah koordinat *Asensio rekta* benda langit, dan HA adalah koordinat *Hours Angle* benda langit.

2.3.3. Transformasi Koordinat Horizon – Ekuator

Salah satu permasalahan utama dalam koordinat bola langit ialah kadangkala kita membutuhkan posisi benda langit pada suatu sistem koordinat, namun kita hanya mengetahui koordinat benda langit pada sistem koordinat lainnya. Sebagai contoh, saat kita mengamati benda langit maka akan lebih mudah menggunakan koordinat horizon, namun karena tidak bersifat global maka seringkali informasi koordinat benda langit tersedia pada koordinat ekuatorial. Metode Transformasi Koordinat Horizon – Ekuator atau sebaliknya yang sering digunakan ialah metode segitiga bola yang dapat dilihat pada Gambar 2.10. (Roy & Clarke, 2003).



Gambar 2.10. Segitiga Bola (Roy & Clarke, 2003)

Pada Gambar 2.10. terlihat bahwa terdapat dua jenis tata koordinat bola yang digambarkan, yaitu tata koordinat Horizon dan Equatorial. Masing-masing koordinat pada kedua tata koordinat kemudian saling membentuk sebuah segitiga bola PXZ. Pada Gambar 2.10. terlihat bahwa masing-masing sisi segitiga mewakili besar sudut tertentu, dimana sisi PZ bernilai $90^\circ - \phi$ (lintang), PX bernilai $90^\circ - \delta$ (deklinasi), ZX bernilai $90^\circ - a$ (altitude). Sudut segitiga juga mewakili besar sudut tertentu, dimana sudut PZX mewakili $360^\circ - A$ (Azimuth) dan sudut ZPX mewakili HA (*Hours Angle*) (Roy & Clarke, 2003).

Berdasarkan segitiga PZX pada Gambar 2.10., dengan formula cosinus, maka didapatkanlah transformasi koordinat Horizon ke Ekuator sebagai Pers. 2.12 dan Pers. 2.13. (TOASTI (Tim Olimpiade Astronomi Indonesia), 2015).

$$\sin(\delta) = \sin(a) \sin(\phi) + \cos(a) \cos(\phi) \cos A \quad (2.12)$$

$$\frac{\sin HA}{\sin(90^\circ - a)} = \frac{\sin A}{\sin(90^\circ - \delta)} \quad (2.13)$$

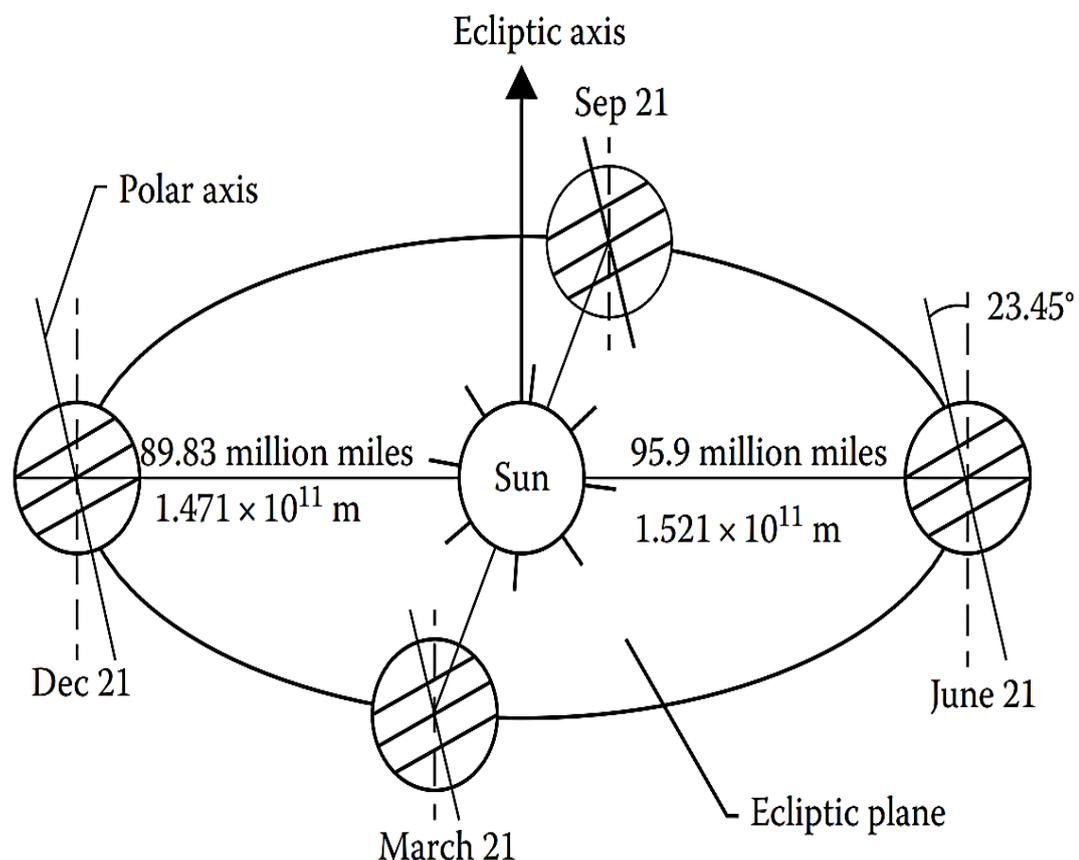
Didapatkan pula persamaan transformasi koordinat Ekuator ke Horizon sebagai Pers. 2.14. (TOASTI (Tim Olimpiade Astronomi Indonesia), 2015).

$$\sin(a) = \sin(\delta) \sin(\phi) + \cos(\delta) \cos(\phi) \cos HA \quad (2.14)$$

Dimana ϕ adalah besar sudut lintang pengamat, δ adalah sudut deklinasi, a adalah sudut altitude, A adalah sudut azimuth, dan HA adalah *Hours Angle*.

2.4 Gerak Semu Tahunan Matahari

Bumi berevolusi mengelilingi matahari dalam selang waktu 1 tahun. Pada gambar 2.11. dapat dilihat bahwa jarak antara bumi dan matahari bervariasi sepanjang tahunnya, dimana jarak minimum sebesar $1,471 \cdot 10^{11}$ m saat winter solstice (21 Desember) dan maksimum sebesar $1,521 \cdot 10^{11}$ m pada summer solstice (21 Juni). Selain itu, kemiringan sumbu putar matahari sebesar $23,45^\circ$ menyebabkan bervariasinya intensitas cahaya yang diterima di masing-masing permukaan bumi tiap waktu. Sudut yang dibentuk antara garis lurus orbit bumi-matahari dengan bidang ekuator bumi disebut deklinasi matahari δ_\odot (Goswami & Kreith, 2016).



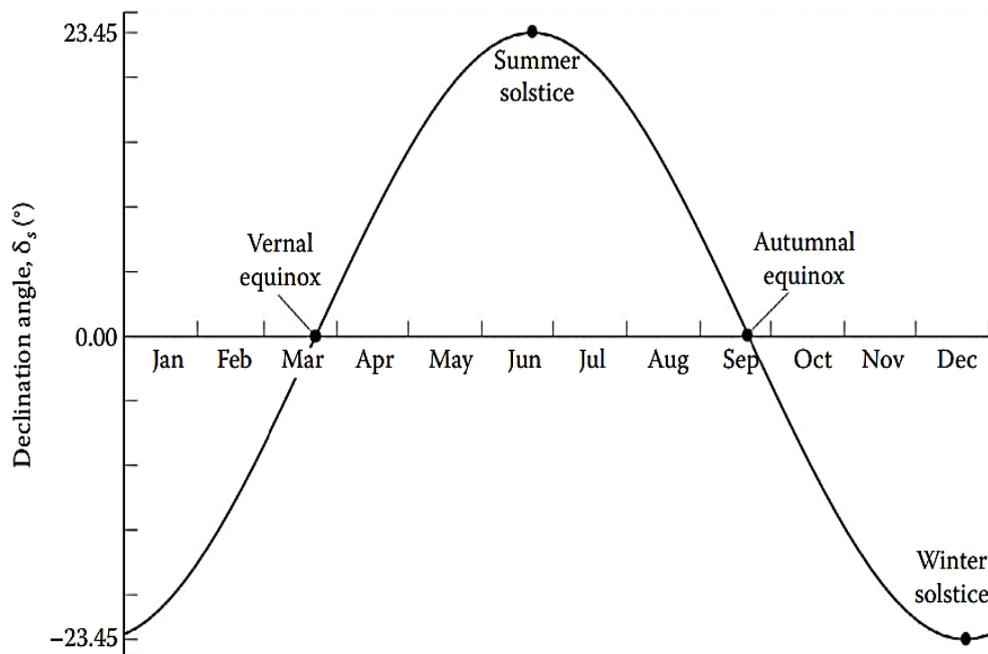
Gambar 2.11. Gerak Bumi Mengelilingi Matahari (Goswami & Kreith, 2016).

Sudut δ_{\odot} bervariasi di antara $-23,45^{\circ}$ hingga $23,45^{\circ}$, dimana seperti terlihat pada Gambar 2.11., δ_{\odot} bernilai $+23,45^{\circ}$ terjadi pada sekitar tanggal 21 Juni dan δ_{\odot} bernilai $-23,45^{\circ}$ terjadi pada sekitar tanggal 21 Desember. Adapun pada tanggal 21 Maret dan 21 September, garis orbit bumi mengelilingi matahari akan berimpit dengan bidang equator, sehingga δ_{\odot} bernilai 0. Variasi δ_{\odot} dalam setahun dapat dirumuskan dengan Pers. 2.15. (Goswami & Kreith, 2016).

$$\delta_{\odot} = 23,45^{\circ} \sin [360(284 + n)/365]^{\circ} \quad (2.15)$$

dimana n merupakan jarak hari dari tanggal 1 Januari, dimana $n_{1 \text{ Januari}} = 1$ dan nilai 365 pada persamaan merupakan jumlah hari dalam setahun.

Jika Pers. 2.15. diplotkan dalam setahun, maka akan diperoleh kurva perubahan nilai δ_{\odot} seperti terlihat pada Gambar 2.12. Kurva pada Gambar 2.12. merupakan kurva sinusoidal dengan nilai maksimum $+23,45^{\circ}$ dan minimum $-23,45^{\circ}$. Sesuai dengan penjelasan sebelumnya, δ_{\odot} akan bernilai maksimum pada *summer solstice* (21 Juni) dan minimum pada *winter solstice* (21 Desember) serta akan berada di titik nol pada *vernal equinox* (21 Maret) dan *autumnal equinox* (21 September) (Goswami & Kreith, 2016).



Gambar 2.12. Perubahan Nilai Deklinasi Matahari (δ_s) Sepanjang Tahun (Goswami & Kreith, 2016)

2.5 Perhitungan Radiasi Matahari

Dalam pemodelan struktur dan arsitektur dari suatu pembangkit listrik tenaga surya, pengetahuan mengenai besar radiasi matahari yang jatuh ke permukaan panel surya menjadi penting. Dikarenakan orbit matahari tidak berbentuk lingkaran sempurna, melainkan elips, maka faktor koreksi ε diperlukan, sehingga besaran nilai radiasi matahari di luar atmosfer (G_0) dapat dirumuskan sebagai Pers. 2.16. (Šúri & Hofierka, 2004).

$$G_0 = I_0 \varepsilon \quad (2.16)$$

Di mana I_0 merupakan konstanta matahari yang menyatakan besaran nilai radiasi matahari di luar atmosfer bumi pada jarak rata-rata bumi ke matahari dan memiliki nilai $1,367 \text{ W/m}^2$. Adapun nilai ε pada Pers. 2.16. dirumuskan sebagai Pers. 2.17. (Šúri & Hofierka, 2004).

$$\varepsilon = 1 + 0.03344 \cos\left(\frac{2\pi j}{365.25} - 0.048869\right) \quad (2.17)$$

Di mana nilai j pada Pers. 2.17. merupakan jumlah hari dihitung dari 1 Januari (pada tanggal 31 Desember, $j = 365.25$). Selanjutnya, untuk nilai besar sinaran radiasi matahari pada kondisi langit cerah dan tidak berawan (B_{0c}) dirumuskan sebagai Pers. 2.18. (Šúri & Hofierka, 2004).

$$B_{0c} = G_0 \exp\{-0.8662 T_{LK} m \delta_R(m)\} \quad (2.18)$$

Di mana radiasi matahari di luar atmosfer (G_0) didapatkan dari Pers. 2.16. Adapun nilai T_{LK} merupakan faktor kekeruhan Linke (*Linke Turbidity*), m merupakan massa relatif optikal udara dan parameter $\delta_R(m)$ merupakan ketebalan optikal Rayleigh pada massa relatif optikal udara m . Selanjutnya, nilai m pada Pers. 2.18. dirumuskan sebagai Pers. 2.19. (Šúri & Hofierka, 2004).

$$m = \frac{(p/p_0)}{\left(\sin h^{ref} + 0.50572(h^{ref} + 6.07995)^{-1.6354}\right)} \quad (2.19)$$

Di mana p/p_0 merupakan faktor koreksi ketinggian lokasi pengamatan dari permukaan laut z dan h^{ref} merupakan koreksi dari ketinggian matahari sebenarnya (h) akibat pengaruh efek refraksi atmosfer. Nilai p/p_0 dan h^{ref} pada Pers. 2.19. masing-masing dirumuskan sebagai Pers. 2.20. dan Pers. 2.21. (Šúri & Hofierka, 2004).

$$p/p_0 = \exp(-z/8434.5) \quad (2.20)$$

$$h^{ref} = h + \frac{0.061359(0.1594+1.123h+0.06565h^2)}{1+28.9344h+277.3971h^2} \quad (2.21)$$

$\delta_R(m)$ pada Pers. 2.18. memiliki nilai yang bervariasi bergantung pada nilai massa relatif optikal udara (m) pada Pers. 2.19. Adapun hubungan antara nilai $\delta_R(m)$ dan m dirumuskan sebagai Pers. 2.22. (Ŝúri & Hofierka, 2004).

untuk $m \leq 20$:

$$\delta_R(m) = \frac{1}{6.6296+1.7513m-0.1202m^2+0.0065m^3-0.00013m^4}$$

untuk $m > 20$:

$$\delta_R(m) = 1/(10.4 + 0.718m) \quad (2.22)$$

Dengan demikian, seluruh variabel yang dibutuhkan untuk mendapatkan nilai besar sinaran radiasi matahari pada kondisi langit cerah dan tidak berawan (B_{0c}) pada Pers. 2.18. telah dijabarkan pada Pers. 2.19.-2.22. Setelah mendapatkan nilai B_{0c} , kita kemudian dapat menentukan besar nilai *flux* matahari yang jatuh ke suatu permukaan yang memiliki inklinasi (kemiringan) tertentu (B_{ic}) dengan Pers. 2.23. (Ŝúri & Hofierka, 2004).

$$B_{ic} = B_{0c} \cos(\theta_S) \quad (2.23)$$

Di mana nilai B_{0c} dapat diperoleh dari Pers. 2.18. dan θ_S merupakan *solar incidence angle* yang merupakan sudut yang dibentuk antara arah datang sinar matahari dengan bidang yang disinarnya (dibahas lebih lanjut pada Sub Bab 2.6). Pada kasus radiasi yang jatuh bidang horizontal (B_{hc}), nilai θ_S sama dengan jarak zenith (θ_z), dimana nilai $\theta_z = 90^\circ - a$ atau dapat dirumuskan sebagai Pers. 2.24. (Ŝúri & Hofierka, 2004).

$$B_{hc} = B_{0c} \cos(\theta_z) = B_{0c} \cos(90^\circ - a) = B_{0c} \sin(a) \quad (2.24)$$

Di mana a merupakan besar sudut altitude matahari yang telah dibahas pada Subbab 2.3.1. Dengan menghubungkan Pers. 2.23 dan Pers. 2.24 didapatkan hubungan antara *flux* matahari yang jatuh ke suatu permukaan miring (B_{ic}) dengan *flux* matahari yang jatuh ke suatu permukaan horizontal (B_{hc}) sebagai Pers. 2.25. (Ŝúri & Hofierka, 2004).

$$B_{ic} = B_{hc} \sin(\theta_S) / \sin(a) \quad (2.25)$$

2.6 Solar Incidence Angle (θ_s)

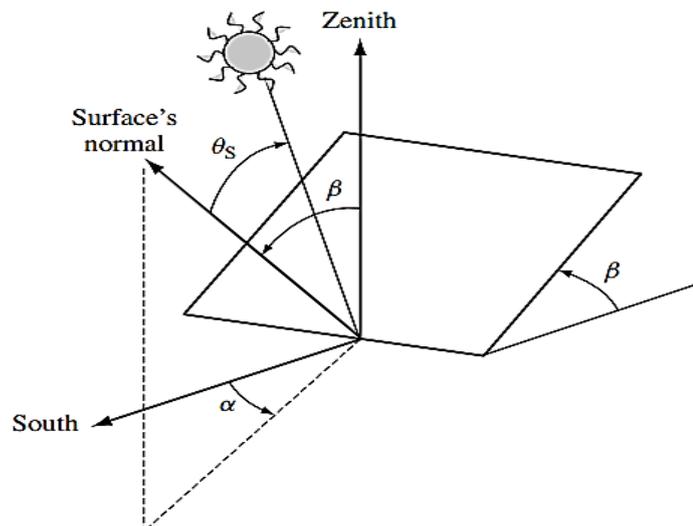
Solar Incidence Angle (θ_s) adalah sudut antara sinaran matahari terhadap garis normal dengan suatu bidang yang disinarninya (panel surya) yang dapat dilihat pada Gambar 2.13. Nilai θ_s menentukan besar *flux* matahari yang jatuh ke atas panel surya (Pers. 2.15). Adapun θ_s dapat dituliskan dengan Pers. 2.26. (Luque & Hegedus, 2011).

$$\begin{aligned} \cos \theta_s = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - [\text{sign}(\phi)] \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \alpha \\ & + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos HA + [\text{sign}(\phi)] \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \alpha \cos HA \\ & + \cos \delta \sin \alpha \sin HA \sin \beta \end{aligned} \quad (2.26)$$

Di mana δ merupakan besar sudut deklinasi matahari, ϕ merupakan besar sudut lintang pengamat, α merupakan besar sudut asimuth matahari, dan HA merupakan besar sudut jam. Sudut δ , ϕ , α , dan HA telah dibahas pada Sub Bab 2.3. Adapun β merupakan kemiringan bidang (panel surya) dari bidang horizontal.

Pada kasus permukaan bidang yang dimiringkan ke arah ekuator langit (menghadap utara pada belahan Bumi Selatan, dan sebaliknya), nilai $\alpha = 0$ sehingga Pers. 2.26 dapat disederhanakan menjadi Pers. 2.27. (Luque & Hegedus, 2011).

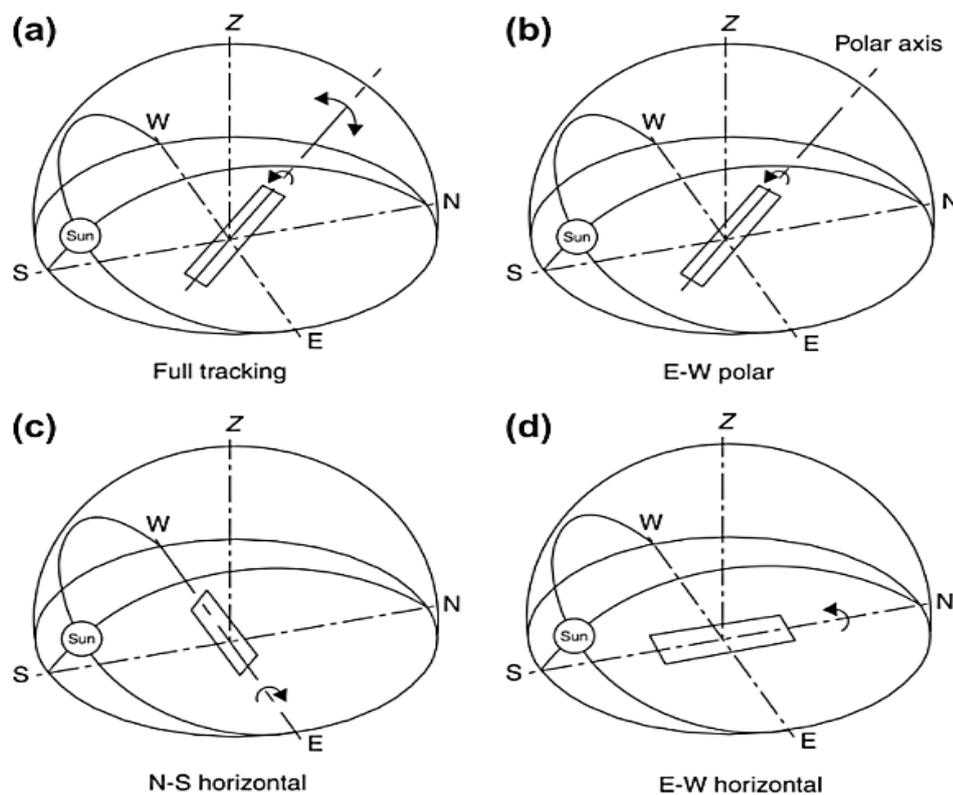
$$\begin{aligned} \cos \theta_s = & [\text{sign}(\phi)] \sin \delta \sin(\text{abs}(\phi) - \beta) + \cos \delta \cos(\text{abs}(\phi) - \beta) \\ & \cos(HA) \end{aligned} \quad (2.27)$$



Gambar 2.13. Diagram *Solar Incidence Angle* (θ_s). (Luque & Hegedus, 2011)

2.7 Solar Tracker

Solar tracker merupakan suatu sistem yang pada umumnya dipasang baik pada *solar collector* maupun panel surya. Sistem ini memiliki fungsi untuk membuat permukaan panel surya dapat mengikuti arah datangnya pancaran matahari. Dengan demikian, nilai *Solar Incidence Angle* (θ_s), seperti yang dibahas pada Subbab 2.6., antara panel dan arah sinaran matahari dapat dijaga senantiasa minimum. Sistem tracking pada umumnya terdiri atas dua *axis* (*Dual Axis Solar Tracker*) dan satu *axis* (*Single Axis Solar Tracker*), dimana untuk *sistem single axis* terdapat beberapa variasi. Adapun beberapa jenis sistem *solar tracker* dapat dilihat pada Gambar 2.14. (Kalogirou, 2014).



Gambar 2.14. Jenis-Jenis Sistem *Solar Tracker*. (Kalogirou, 2014)

2.7.1. Full Tracking

Skenario ini ditunjukkan pada Gambar 2.14.(a). Pada skenario *Full Tracking*, sistem *tracking* memiliki pergerakan pada 2 *axis* yang memungkinkan permukaan panel surya untuk senantiasa mengarah ke arah datang matahari. Pada kasus ini

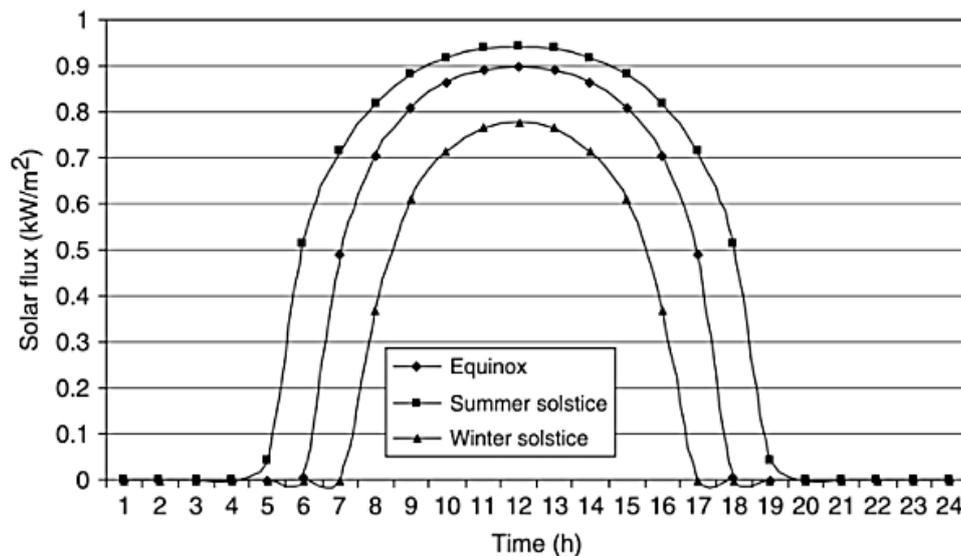
senantiasa $\theta = 0^0$ sehingga nilai solar incidence angle θ_s dapat dirumuskan sebagai Pers. 2.28. (Kalogirou, 2014).

$$\cos(\theta_s) = 1 \quad (2.28)$$

Pada scenario ini, nilai kemiringan bidang (panel surya) dari bidang horizontal (β) akan senantiasa sama dengan atau dapat dirumuskan sebagai Pers. 2.29. (Duffie & Beckman, 2013).

$$\beta = \theta_z = 90 - a \quad (2.29)$$

Dimana θ_z merupakan jarak zenith, dan a adalah altitude. Dengan demikian, nilai radiasi yang ditangkap permukaan dapat senantiasa dijaga maksimum. Adapun variasi flux matahari dengan metode full tracking pada beberapa situasi dapat dilihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15. Variasi Flux Matahari pada Sistem *Full Tracking* ($\varphi = 35^0 LU$) (Kalogirou, 2014)

Dari Gambar 2.15. dapat dilihat bahwa scenario *full tracking* secara keseluruhan dapat meningkatkan daya lebih baik dari model tracker lainnya yang akan dibahas pada bagian berikutnya. Dapat dilihat scenario *full tracking* dapat meningkatkan daya dengan baik di tiap kondisi, baik itu saat Equinox (21 Maret atau 23 September), Summer Solstice (21 Juni) dan Winter Solstice (21 Desember). Hal ini dikarenakan, selain dapat mengikuti pergerakan harian matahari pada arah E-W, *full tracking* juga dapat mengikuti pergerakan tahunan matahari pada arah N-

S sehingga perbedaan intensitas radiasi yang jatuh ke permukaan panel surya dalam rentang setahun tidak berbeda jauh.

2.7.2. Horizontal E-W axis with Single N-S Daily Adjustment

Pada scenario ini, panel surya diam dalam waktu sehari-hari. Sistem *tracking* hanya akan melakukan satu kali pengaturan arah N-S tiap harinya (*Single N-S Daily Adjustment*) dimana pergerakan berpusat di sumbu E-W. Dengan demikian maka panel surya akan selalu tegak lurus dengan arah datang sinar matahari pada waktu siang hari. Adapun nilai θ_s dan β pada scenario ini dapat dirumuskan dengan Pers. 2.30. dan Pers. 2.31. (Duffie & Beckman, 2013).

$$\cos(\theta_s) = \sin^2(\delta) + \cos^2(\delta) \cos(HA) \quad (2.30)$$

$$\beta = |\phi - \delta| \quad (2.31)$$

Di mana δ merupakan besar sudut deklinasi matahari, ϕ merupakan besar sudut lintang pengamat, dan HA merupakan besar sudut jam.

2.7.3. Polar N-S axis with E-W tracking (E-W Polar)

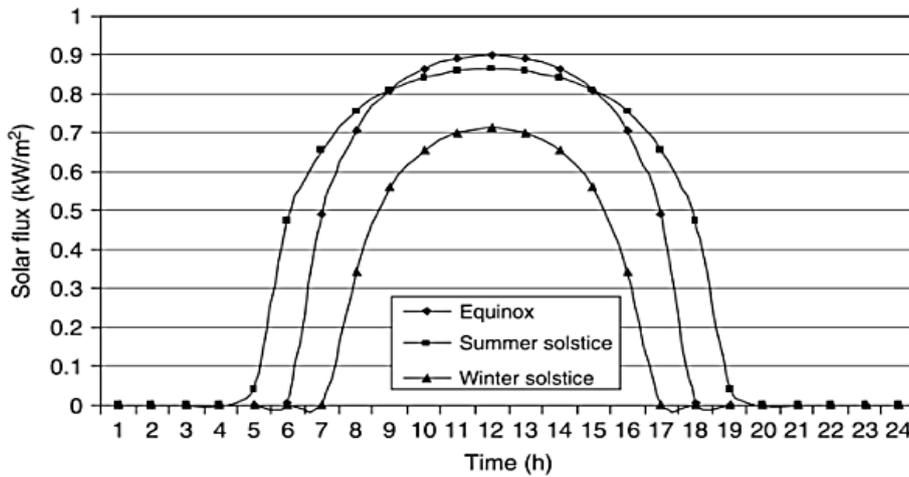
Skenario ini ditunjukkan pada Gambar 2.14.(b). Pada skenario *E-W Polar, tracking* memiliki 1 sumbu yang sejajar dengan kutub langit pada lokasi pengamatan yang memiliki pergerakan ke arah Timur-Barat. Akibat sumbunya yang sejajar dengan kutub langit maka variasi nilai θ hanya dipengaruhi oleh perubahan deklinasi matahari sehingga nilai solar incidence angle θ_s dapat dirumuskan sebagai Pers. 2.32. (Kalogirou, 2014).

$$\cos(\theta) = \cos(\delta) \quad (2.32)$$

Pada scenario ini, nilai kemiringan panel surya dari bidang horizontal (β) akan senantiasa sama dengan ϕ atau dapat dirumuskan sebagai Pers. 2.33. (Duffie & Beckman, 2013).

$$\tan(\beta) = \frac{\tan(\phi)}{\cos(\gamma)} \quad (2.33)$$

Di mana ϕ merupakan besar sudut lintang pengamat, dan γ merupakan besar *sudut surface azimuth angle* yang merupakan jarak antara permukaan dengan garis normal. Adapun variasi flux matahari dengan metode *E-W Polar* pada beberapa situasi dapat dilihat pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16. Variasi Flux Matahari pada Sistem *Tracking* E-W Polar ($\varphi = 35^\circ LU$) (Kalogirou, 2014)

Dari gambar dapat dilihat bahwa pada metode tracking E-W Polar, nilai flux matahari pada saat Winter Solstice (21 Desember) lebih kecil dibanding keadaan lainnya. Adapun nilai flux matahari saat summer solstice lebih besar dibanding equinox pada waktu pagi dan sore hari, namun pada siang hari (pukul 9:00 – 15:00), flux matahari yang diterima saat equinox lebih besar. Hal ini dikarenakan sistem E-W polar telah dimiringkan terlebih dahulu sesuai dengan lintang pengamat, sehingga saat Equinox (21 Maret atau 23 September) dimana nilai δ matahari bernilai 0, pada pertengahan hari matahari akan berada tepat di atas panel surya. Hal ini berbeda dengan saat Summer Solstice dimana nilai δ bernilai $23,45^\circ$ dan Winter Solstice dimana nilai δ bernilai $-23,45^\circ$ sehingga saat siang hari, panel surya masing-masing membentuk sudut $23,45^\circ$ dan $-23,45^\circ$ terhadap matahari seperti yang telah dirumuskan pada Pers. 2.32.

2.7.4. Vertical axis with Azimuth Tracking

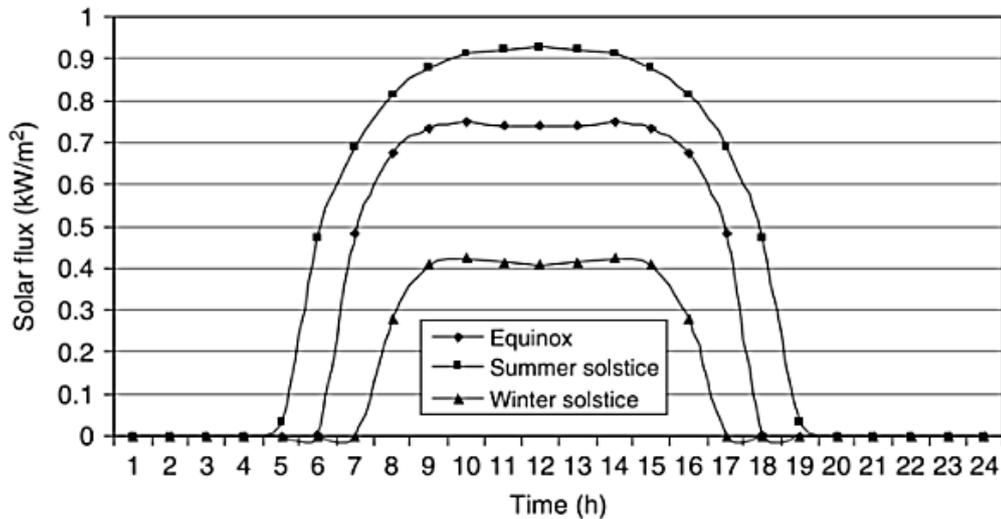
Pada scenario *tracking* ini, kemiringan panel surya dari bidang horizontal (β) tetap, dimana panel surya akan bergerak mengikuti Azimuth matahari pada sumbu vertikal (sumbu yang menghubungkan Zenith dan Nadir) sehingga nilai merupakan besar *sudut surface azimuth angle* senantiasa sama dengan Azimuth ($\gamma = A$). Adapun nilai solar incidence angle θ_s dapat dirumuskan sebagai Pers. 2.34. (Duffie & Beckman, 2013).

$$\cos(\theta_s) = \cos(\theta_z) \cos(\beta) + \sin(\theta_z) \sin(\beta) \quad (2.34)$$

Dimana θ_z merupakan jarak zenith dan β merupakan kemiringan panel surya terhadap bidang horizontal.

2.7.5. Horizontal E-W axis with N-S tracking (N-S Horizontal)

Skenario ini ditunjukkan pada Gambar 2.14.(c). Pada skenario N-S *Horizontal*, sistem *tracking* memiliki 1 sumbu yang sejajar dengan garis penghubung titik Timur-Barat yang memiliki pergerakan pada arah Utara-Selatan. Dengan demikian, sistem *tracking* dapat senantiasa menghadap matahari pada saat kulminasi atas, namun tidak dapat mengikuti pergerakan harian matahari. Skenario ini cukup efektif pada kondisi *summer solstice* dikarenakan tinggi matahari saat kulminasi atas yang cukup tinggi, namun kurang efektif pada kondisi *winter solstice* karena alasan sebaliknya. Dengan demikian, dapat diperoleh variasi flux matahari seperti pada Gambar 2.17. (Kalogirou, 2014).



Gambar 2.17. Variasi Flux Matahari pada Sistem *Tracking* N-S Horizontal ($\varphi = 35^\circ LU$) (Kalogirou, 2014)

Adapun nilai θ_s dan β pada scenario ini dapat dirumuskan dengan Pers. 2.35. dan Pers. 2.36. (Duffie & Beckman, 2013).

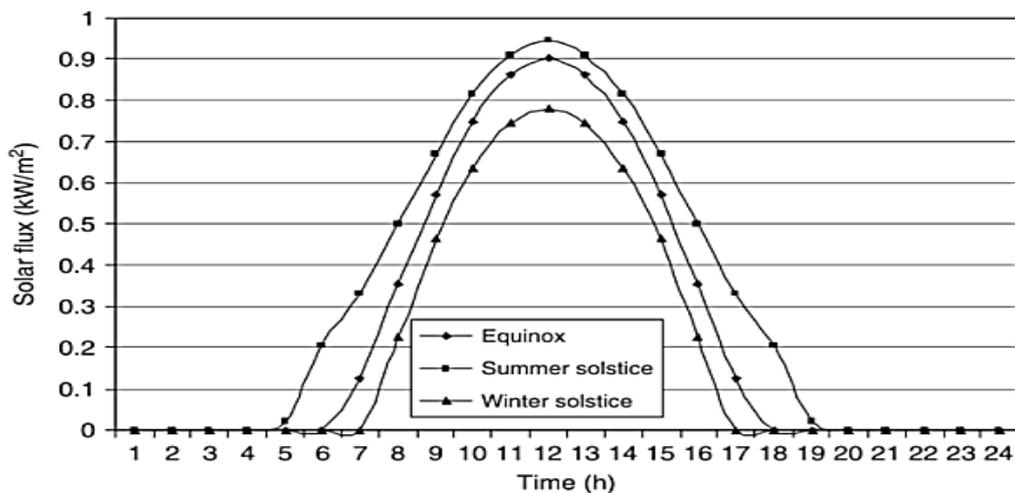
$$\cos(\theta_s) = \sqrt{1 - \cos^2(\delta) \sin^2(HA)} \quad (2.35)$$

$$\tan(\beta) = \tan(\theta_z) |\cos(A)| \quad (2.36)$$

Di mana δ merupakan besar sudut deklinasi matahari, HA merupakan besar sudut jam, θ_z merupakan jarak zenith, dan A merupakan besar sudut azimuth.

2.7.6. Horizontal N-S axis with E-W tracking (E-W Horizontal)

Skenario ini ditunjukkan pada Gambar 2.14.(d). Pada skenario E-W *Horizontal, tracking* memiliki 1 sumbu yang sejajar dengan garis penghubung titik Utara-Selatan yang memiliki pergerakan pada arah Timur-Barat. Dengan demikian, tracking dapat senantiasa mengikuti pergerakan matahari dari Timur ke Barat, namun tidak dapat mengikuti perubahan posisi matahari akibat gerak semu tahunan matahari. Skenario ini cukup efektif digunakan jika ingin mendapatkan flux matahari secara menyeluruh dalam kurun waktu sehari namun tidak mampu mendapatkan flux matahari secara maksimum di sekitar kulminasi atas. Dengan demikian diperoleh variasi flux matahari pada Gambar 2.18. (Kalogirou, 2014).



Gambar 2.18. Variasi Flux Matahari pada Sistem *Tracking* E-W Horizontal ($\varphi = 35^\circ LU$) (Kalogirou, 2014)

Adapun nilai θ_s dan β pada scenario ini dapat dirumuskan dengan Pers. 2.37. dan Pers. 2.38. (Duffie & Beckman, 2013).

$$\cos(\theta_s) = \sqrt{\cos^2(\theta_z) + \cos^2(\delta) \sin^2(HA)} \quad (2.37)$$

$$\tan(\beta) = \tan \theta_z |\cos(\gamma - A)| \quad (2.38)$$

Di mana δ merupakan besar sudut deklinasi matahari, HA merupakan besar sudut jam, θ_z merupakan jarak zenith, A merupakan besar sudut azimuth dan γ merupakan besar sudut *surface azimuth angle*.

Secara keseluruhan, perbandingan antara flux matahari yang diterima oleh masing-masing jenis tracking dijabarkan pada Tabel 2.1.

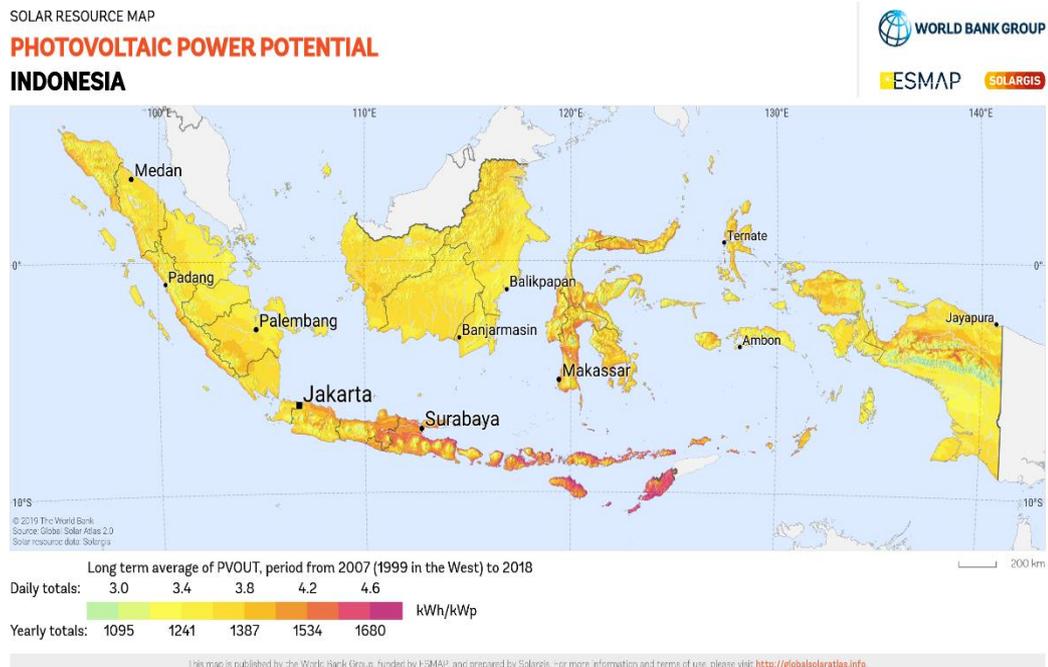
Tabel 2.1. Perbandingan Flux Matahari pada berbagai Jenis Sistem Tracking ($\varphi = 35^{\circ} LU$) (Kalogirou, 2014)

Tracking Mode	Solar Energy Received (kWh/m ²)			Percentage to Full Tracking		
	E	SS	WS	E	SS	WS
Full Tracking	8,43	10,60	5,70	100	100	100
E-W Polar	8,43	9,73	5,23	100	91,7	91,7
N-S horizontal	7,51	10,36	4,47	89,1	91,7	60,9
E-W horizontal	6,22	7,85	4,91	73,8	74,0	86,2

E = equinoxes, SS = Summer Solstice, WS = Winter Solstice

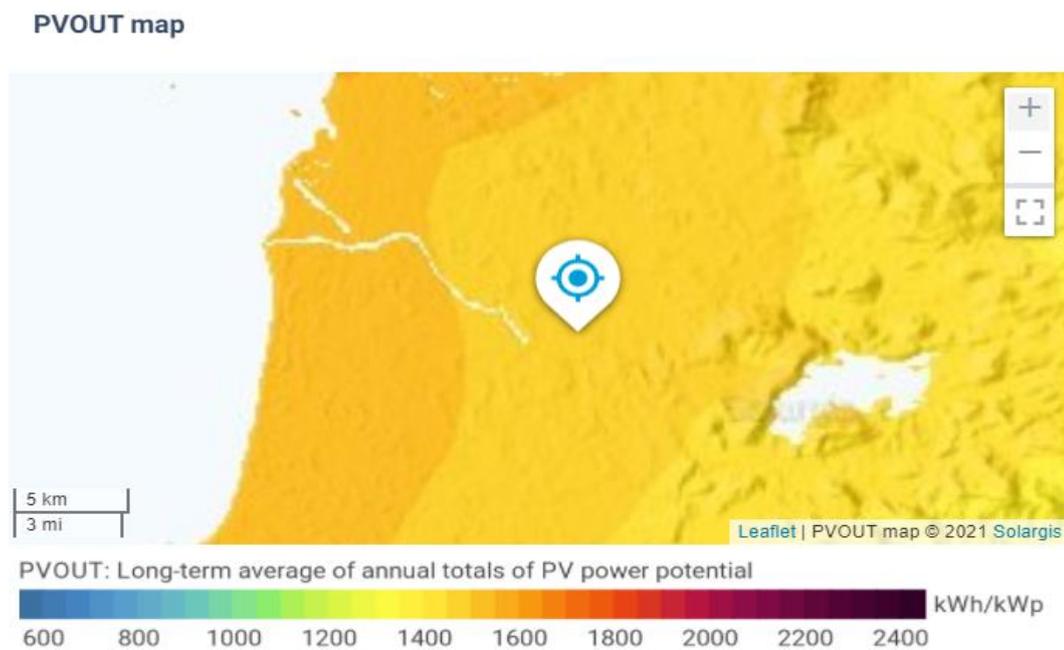
2.8 Potensi Energi Surya di Lokasi Pengambilan Data

Indonesia memiliki potensi energi surya yang cukup besar. Pada Gambar 2.19. diperlihatkan gambar peta potensi pembangkitan energi surya Indonesia yang diakses dari website Global Solar Atlas. Pada gambar terlihat bahwa Indonesia memiliki potensi energi surya berkisar antara sekitar 3.0 hingga 4.6 kWh/m² per hari atau 1095 hingga 1680 kWh/m² per tahun (Global Solar Atlas, 2021).



Gambar 2.19. Peta Rata-Rata Jangka Panjang (dari tahun 2007 hingga 2018) Potensi Pembangkitan Energi Surya di Indoonesia (Global Solar Atlas, 2021).

Pengambilan data dilakukan di Rooftop Gedung Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin yang berada di Desa Borongloe, Kecamatan Bontomarannu, Kabupaten Gowa, Provinsi Sulawesi Selatan, Indonesia dengan koordinat $-5^{\circ}13'58''$ LS $119^{\circ}30'12''$ BT. Pada Gambar 2.20. kita dapat melihat peta rata-rata jangka panjang potensi energi surya di sekitar wilayah pengambilan data.



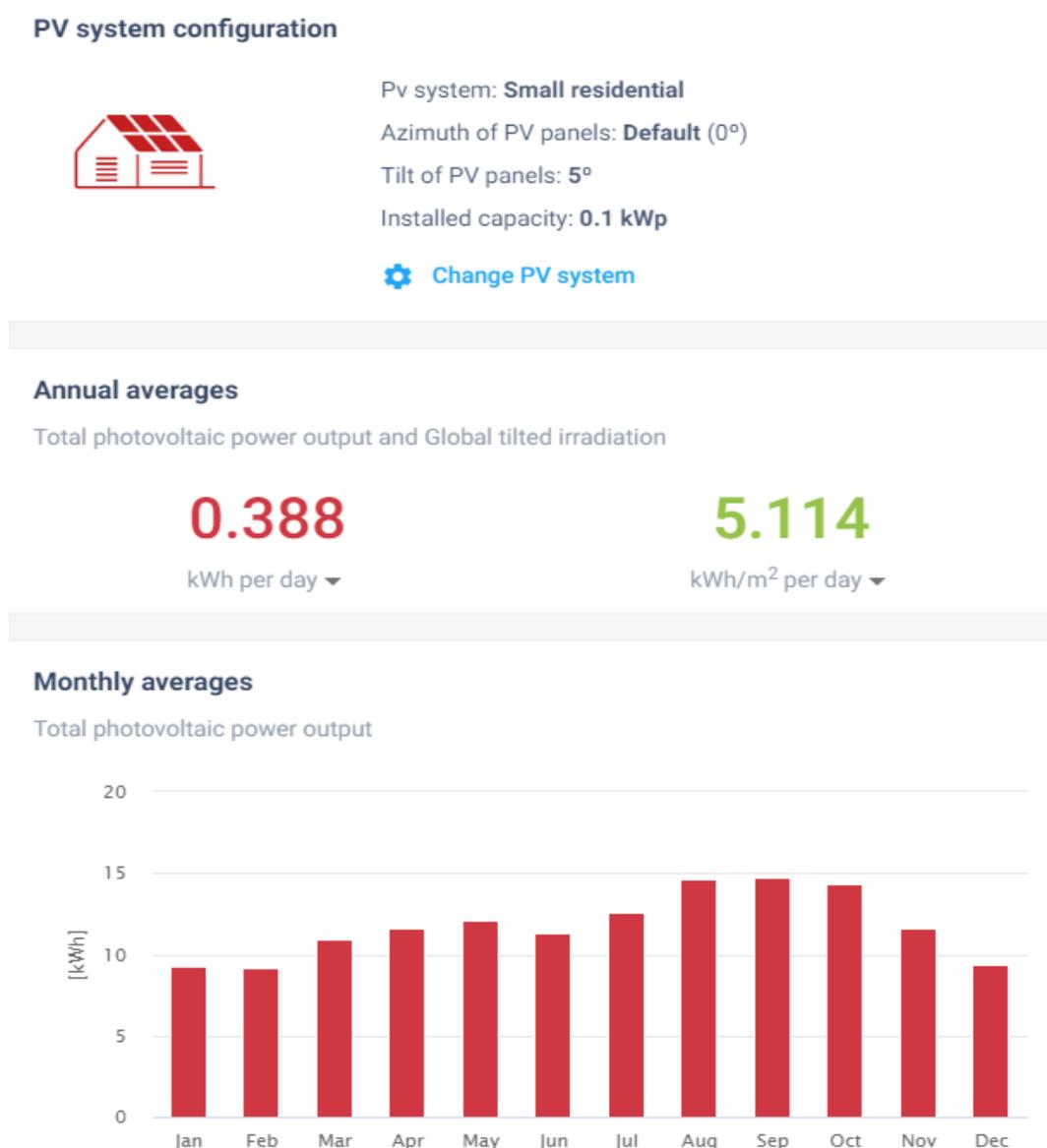
Gambar 2.20. Peta Rata-Rata Jangka Panjang Potensi Pembangkitan Energi Surya Tahunan di Sekitar Lokasi Pengambilan Data (Global Solar Atlas, 2021).

Pada Gambar 2.20 terlihat bahwa lokasi di sekitar pengambilan data berwarna jingga kekuningan. Adapun dari hasil *pinpoint* di lokasi pengamatan didapatkan data matahari yang terlihat pada Tabel 2.2. di bawah.

Tabel 2.2. Data Matahari di Lokasi Pengamatan (Global Solar Atlas, 2021).

Variable	Per Day Data	Per Year Data
Direct Normal Irradiation (DNI)	4,004 kWh/m ² /day	1461,4 kWh/m ² /year
Global Horizontal Irradiation (GHI)	5,062 kWh/m ² /day	1847,8 kWh/m ² /year
Diffuse Horizontal Irradiation (DIF)	2,184 kWh/m ² /day	797,0 kWh/m ² /year
Global Tilted Irradiation at Optimum Angle (GTI _{opta})	5,130 kWh/m ² /day	1872,4 kWh/m ² /year
Optimum Tilt of PV Modules	10 / 0°	
Air Temperature	27,5 °C	
Terrain Elevation	22 m	

Pada website Global Solar Atlas terdapat fitur *PV System Configuration* yang mendukung simulasi sistem pembangkit energi surya. Simulasi sistem pembangkit listrik tenaga surya kapasitas 100 Wp dengan kemiringan *tilt angle* 5° dan *azimuth* 0° kemudian dilakukan untuk memberikan gambaran terhadap pengambilan data pada panel surya statis. Hasil simulasi menunjukkan sistem memiliki rata-rata potensi pembangkitan tahunan sebesar 5,114 kWh/m²/day atau setara sekitar 0,388 kWh/day seperti terlihat pada Gambar 2.21. Pada gambar diperlihatkan juga variasi total potensi pembangkitan tiap bulan.



Gambar 2.21. Simulasi PLTS 100 Watt dengan *Tilt Angle* 5° dan *Azimuth* 0° pada Fitur *PV System Configuration* di Global Solar Atlas (Global Solar Atlas, 2021).

Pada Bab II diatas telah dijelaskan secara rinci mengenai teori-teori yang menjadi referensi dari penelitian ini. Teori-teori ini nantinya akan menjadi pondasi untuk mengembangkan metode-metode dalam rangka membangun penelitian ini. Pada Bab III yang selanjutnya akan dibahas, terdapat pemaparan mengenai metode-metode yang dikembangkan oleh penulis dengan berdasarkan pada referensi-referensi yang telah dibahas pada Bab II.