

ANALISIS POTENSI ENERGI MATAHARI DENGAN METODE WEIBULL DAN REYLEIGH

TESIS

Diajukan Untuk Memenuhi Tugas Akhir
Dalam Rangka Memperoleh Magister

Oleh

Selly Annisa Binti Zulkarnain
NPM : 1920080004



UMSU
Unggul | Cerdas | Terpercaya

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2022**

PENGESAHAN TESIS

Nama : SELLY ANNISA BINTI ZULKARNAIN
NPM : 1920080004
Program Studi : Magister Teknik Elektro
Konsentrasi : Manajemen Energi Listrik
Judul Tesis : ANALISIS POTENSI ENERGI MATAHARI DENGAN
METODE WEIBULL DAN RAYLEIGH

Pengesahan Tesis

Medan, 02 Juli 2022

Komisi Pembimbing

Pembimbing I

Assoc. Prof. Dr. Ir. SUWARNO, M.T

Pembimbing II

Assoc. Prof. Dr. M.FITRA ZAMBAK, M.Sc

Diketahui

Direktur

Prof. Dr. TRIONO EDDY, S.H., M.Hum

Ketua Program Studi

Assoc. Prof. Dr. Ir. SUWARNO, M.T

PENGESAHAN

**ANALISIS POTENSI ENERGI MATAHARI DENGAN METODE
WEIBULL DAN RAYLEIGH**

SELLY ANNISA BINTI ZULKARNAIN

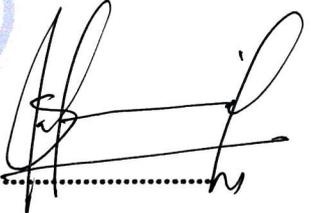
NPM : 1920080004

Program Studi : Magister Teknik Elektro

“Tesis ini telah dipertahankan di Hadapan Komisi Penguji yang dibentuk oleh Program Pascasarjana Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, dinyatakan Lulus dalam Ujian Tesis dan berhak menyandang Gelar Magister Teknik Elektro (M.T) Pada Hari Sabtu, Tanggal 02 Juli 2022”

Komisi Penguji

1. **Assoc. Prof. Dr. Ir. SYAFRUDDIN HASAN, M.Sc**
Ketua

1. 

2. **Assoc. Prof. Dr.Ir . SURYA HARDI, M.Sc**
Sekretaris

2. 

3. **Rohana, ST., M.T.**
Anggota

3. 

UMSU

Unggul | Cerdas | Terpercaya

PERNYATAAN

ANALISIS POTENSI ENERGI MATAHARI DENGAN METODE WEIBULL DAN RAYLEIGH

Dengan ini peneliti menyatakan bahwa :

1. Tesis ini disusun sebagai syarat untuk memperoleh Gelar Magister Pada Program Magister Teknik Elektro Program Pascasarjana Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara merupakan hasil karya peneliti sendiri.
2. Tesis ini adalah asli belum pernah diajukan untuk mendapatkan Gelar Akademik (Sarjana, Magister, dan/atau Doktor), baik di Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara maupun di perguruan lain.
3. Tesis ini adalah murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan Komite Pembimbing dan masukan Tim Penguji.
4. Dalam Karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
5. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya. Apabila di kemudian hari ternyata ditemukan seluruh atau sebagian tesis ini bukan hasil karya peneliti sendiri atau adanya plagiat dalam bagian-bagian tertentu, peneliti bersedia menerima sanksi pencabutan gelar akademik yang peneliti sandang dan sanksi-sanksi lainnya sesuai dengan peraturan perundangan yang berlaku.

Medan, 02 Juli 2022

Peneliti



SELLY ANNISA BINTI ZULKARNAIN

NPM : 1920080004

ABSTRAK

Keterbatasan data radiasi sinar matahari dari stasiun meteorologi di berbagai lokasi di Indonesia karena data hanya dimiliki oleh beberapa lokasi serta tidak merata di seluruh Indonesia membuat pemikiran untuk mencari pendekatan secara empiris yaitu perhitungan secara matematika untuk mengetahui hubungan radiasi matahari dengan data-data atau parameter meteorologi, astronomi dan geografi yang lebih mudah diperoleh. Perhitungan intensitas radiasi matahari di Kota Medan dihitung dengan pendekatan matahari berdasarkan posisi lintang dan ketinggian dari permukaan laut. Metode analisis regresi linear ganda yang digunakan untuk mengetahui korelasi antara parameter cuaca dengan intensitas radiasi matahari adalah analisis regresi linear ganda. Namun, setiap data cuaca diolah kembali dengan menggunakan metode *Weibull* dan *Rayleigh* untuk mendapatkan data frekuensi masing – masing variabel. Perhitungan potensi PLTS atap dilakukan dengan pemetaan yang membutuhkan data intensitas radiasi matahari global dengan satuan (Watt/m^2) beserta luas atap tersedia yang memiliki satuan (m^2). Rata – rata tahunan intensitas radiasi matahari (W/m^2) di Kota Medan adalah $463,61 \text{ W/m}^2$ dimana kecamatan dengan nilai intensitas radiasi matahari tertinggi adalah Medan Tuntungan yaitu, $479,81 \text{ W/m}^2$ dan intensitas radiasi matahari terkecil adalah di kecamatan Medan Belawan $438,77 \text{ W/m}^2$. Parameter cuaca yang mempengaruhi keluaran radiasi matahari di Kota Medan berdasarkan analisis regresi linear ganda adalah suhu udara, kelembapan, curah hujan dan lamanya penyinaran matahari. Daya keluaran yang dapat dihasilkan jika seluruh permukiman wilayah Kota Medan dipasangkan pembangkit listrik tenaga surya model *rooftop* adalah sebesar $748,57 \text{ MW}$ (monokristalin) atau $598,85 \text{ MW}$ (polikristalin), atau $299,43 \text{ MW}$ (*thin film*). Kecamatan Medan Deli adalah kecamatan yang menghasilkan daya keluaran terbesar dengan $62,81 \text{ MW}$ (monokristalin) atau $50,25 \text{ MW}$ (polikristalin), atau $25,12 \text{ MW}$ (*thin film*).

Kata Kunci: Intensitas radiasi matahari, *Weibull* dan *Rayleigh*, PLTS atap, regresi linear sederhana

ABSTRACT

The limitation of solar radiation data from meteorological station in various in Indonesia helps in figuring out to use empirical approach which is mathematical calculation Indonesia because only a few locations have the data and are not evenly distributed throughout Indonesia. It is to determine the relationship of solar radiation with meteorological data or parameters, astronomy and geography which are much easier to obtain. Calculation of the intensity of solar radiation in Kota Medan is calculated with a solar approach based on latitude and altitude from the sea level. Multiple linear regression analysis method used to determine the correlation between weather parameters and solar radiation intensity. However, each weather data is reprocessed using the Weibull and Rayleigh method to obtain the frequency data for each variable. The potential of solar energy using solar rooftop system is carried out by mapping which requires data on global solar radiation intensity in units (Watt/m^2) along with the available roof area (m^2). The average annual intensity of solar radiation (W/m^2) in Kota Medan is 463.61 W/m^2 with the highest value of solar radiation intensity in the district of Medan Tuntungan, 479.81 W/m^2 and the smallest intensity of solar radiation is in district of Medan Belawan, $438,77 \text{ W/m}^2$. The weather parameter that affects the output of solar radiation of Kota Medan based on a multiple linear regression analysis is humidity, temperature and solar radiation frequency. The output power that can be generated if all residential areas of Kota Medan are installed with rooftop solar power plant is $748,57 \text{ MW}$ (monocrystalline) or $598,85 \text{ MW}$ (polycrystalline), or $299,43 \text{ MW}$ (thin film). Medan Deli is the district that produces the largest output power with $62,81 \text{ MW}$ (mono crystalline) or $50,25 \text{ MW}$ (polycrystalline), or $25,12 \text{ MW}$ (thin film).

Keywords: *Irradiance Intensity, Weibull dan Rayleigh, Rooftop Solar System, Regression Linear Analysis*

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1.Latar Belakang Masalah.....	1
1.2.Identifikasi Masalah	6
1.3.Pembatasan Masalah	7
1.4.Rumusan Masalah	7
1.5.Tujuan Penelitian	8
1.6.Manfaat Penelitian	8
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	10
2.1. Landasan Teori.....	10
2.1.1 Radiasi Matahari	11
2.1.2 Potensi Radiasi Matahari	12
2.1.2.1 Solstice	17
2.1.3. Pengaruh Pergerakan Matahari	23
2.1.4. Sistem PLTS	23
2.1.5. Sel Surya	27
2.1.5.1 Keuntungan dan Kelebihan Sel Surya.....	29
2.1.5.2. Jenis Sel Surya	30
2.1.6. Sistem PLTS Off – Grid.....	31
2.1.6.1. Grid - Connected Distributed PV	33
2.1.6.2. Grid - Connected Centralized PV	33
2.1.7. Photovoltaik	34
2.1.7.1. Parameter Pemasangan Photovoltaik	36
2.1.8 Konversi Energi PV	38
2.1.9. Faktor – faktor yang mempengaruhi kinerja PLTS.....	39
2.1.9.1 Perancangan Sistem PLTS Grid Connection	41
2.1.10. Pemetaan Potensi PLTS Atap Berdasarkan Luas Pemukiman	43
2.1.10.1 Perhitungan Daya Keluaran	46
2.1.11 Data Diskrit dan Kontinu	47
2.1.12. Distribusi Peluang Kontinu	48
2.1.12.1 Distribusi Weibull	48
2.1.12.2. Distribusi Rayleigh	53
2.1.13 Uji Kolmogorov – Smirnov (Goodness to Fit)	54
2.1.14 Persamaan Regresi Linear Ganda	55
2.1.15 Indikator Statistik	56
2.1.15.1 Indikator Statistik	57
2.2 Kajian Penelitian yang Relevan	61
2.3 Kerangka Berfikir / Konseptual	65

BAB 3 METODE PENELITIAN.....	68
3.1 Pendekatan Penelitian	68
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian	72
3.3 Populasi dan Sampel	72
3.3.1 Populasi	72
3.3.2 Sampel.....	73
3.4 Teknik Pengumpulan Data Penelitian	73
3.5 Teknik Analisa Data.....	74
BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	76
4.1. Deskripsi Hasil Penelitian	76
4.2 Pembahasan Penelitian	84
BAB 5 PENUTUP	88
5.1 Kesimpulan.....	89
5.2 Saran.....	89
DAFTAR PUSTAKA	91

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Kapasitas Pembangkit Listrik yang Terpasang.....	1
Tabel 4. 1 Luas Wilayah Kota Medan Menurut Kecamatan.....	5
Tabel 4. 2 Koordinat Lintang dan bujur serta ketinggian dari permukaan laut.....	10
Tabel 4. 3 Rata – rata intensitas radiasi matahari selama 12 bulan	75
Tabel 4. 4 Rata – rata intensitas radiasi matahari.....	77
Tabel 4. 5 Rata – rata intensitas radiasi matahari.....	78
Tabel 4. 6 Rata – rata suhu udara di Kota Medan per bulan.....	79
Tabel 4. 7 Rata – rata kelembapan di Kota Medan per bulan	80
Tabel 4. 8 Rata – rata curah hujan di Kota Medan per bulan.....	81
Tabel 4. 9 Area pemukiman (km ²) di Kota Medan.....	85
Tabel 4. 10 Hasil Perhitungan uji kualitas data intensitas radiasi matahari.....	87
Tabel 4. 11 Hasil perhitungan parameter bentuk dan skala	92
Tabel 4. 12 Daya keluaran untuk setiap kecamatan di Kota Medan.....	103

DAFTAR GAMBAR

Lampiran 1 Rata – rata intensitas radiasi matahari	94
Lampiran 2 Rata – rata Suhu udara dan Kelembapan.....	95
Lampiran 3 Rata – rata Curah Hujan dan Lamanya penyinaran matahari.....	96
Lampiran 4 Rata – rata Kecepatan Angin	97
Lampiran 5 Area Pemukiman di Kota Medan.....	98

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Rata – rata intensitas radiasi matahari	94
Lampiran 2 Rata – rata Suhu udara dan Kelembapan.....	95
Lampiran 3 Rata – rata Curah Hujan dan Lamanya penyinaran matahari.....	96
Lampiran 4 Rata – rata Kecepatan Angin	97
Lampiran 5 Area Pemukiman di Kota Medan.....	98

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Indonesia memiliki jumlah penduduk sebanyak 273,87 juta jiwa berdasarkan data 31 Desember 2021 dari badan pusat statistik. Jumlah penduduk yang banyak mempengaruhi konsumsi energi listrik di Indonesia. Hal ini karena kebutuhan energi listrik di Indonesia dari tahun ke tahun meningkat sehingga diperoleh data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) bahwa kapasitas terpasang pembangkit listrik nasional hingga bulan Juni 2020 mencapai 71 Giga Watt (GW). Angka ini naik 1,3 GW jika dibandingkan dengan akhir tahun 2019 lalu yaitu, sebesar 69,7 GW [1]. Data kapasitas pembangkit listrik yang terpasang di seluruh Indonesia yang diverifikasi oleh ESDM dapat dilihat pada Tabel 1.1 [1].

Tabel 1. 1 Kapasitas Pembangkit Listrik yang Terpasang

No.	Jenis Pembangkit Listrik	Kapasitas (MW)
1.	Tenaga dan Uap	35 220
2.	Gas dan Uap	20 537
3.	Air	6 096
4.	Diesel	4 781
5.	Panas Bumi	2 131
6.	Energi Baru Terbarukan Lain - lain	2 200

Data yang diperoleh juga mencatat bahwa pembangkit energi baru terbarukan (EBT) menyumbang 14,69% atau 10.467 Mega Watt (MW) dari total kapasitas terpasang. Meningkatnya peranan energi baru dan terbarukan adalah salah

satu sasaran dari KEN (Kebijakan Energi Nasional), sedangkan sebagai targetnya pada tahun 2025 tercapai bauran energi yang optimal dimana peran energi baru dan terbarukan adalah 23% dan meningkat menjadi 31% pada tahun 2050. Menurut data ESDM, dengan teknologi yang ada saat ini, potensi listrik dari energi terbarukan dapat mencapai 432 GW, atau 7-8 kali dari total kapasitas pembangkit terpasang saat ini [1].

Mayoritas pembangkit listrik energi terbarukan yang ada maupun yang direncanakan mengandalkan tenaga air atau panas bumi. Dari 7 GW kapasitas terpasang yang ada, 66% adalah Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) dan 27% Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP). Demikian pula dari 29 GW rencana penambahan dalam RUPTL, 50% berupa PLTA dan 26% berupa PLTP. Di sisi lain, rencana pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) hanya sebesar 7% walaupun potensinya hampir mencapai 50% potensi energi terbarukan di Indonesia. Berdasarkan data penyinaran matahari yang dihimpun dari 18 lokasi di Indonesia, radiasi surya di Indonesia dapat diklasifikasikan berturut-turut sebagai berikut: untuk kawasan barat dan timur Indonesia dengan distribusi penyinaran di Kawasan Barat Indonesia (KBI) sekitar $4,5 \text{ kWh} / \text{m}^2 / \text{hari}$ dengan variasi bulanan sekitar 10%; dan di Kawasan Timur Indonesia (KTI) sekitar $5,1 \text{ kWh} / \text{m}^2 / \text{hari}$ dengan variasi bulanan sekitar 9% [1]. Pernyataan ini membuat Indonesia tergolong kaya sumber energi matahari. Konversi photovoltaic sel surya yang mengubah energi sinar matahari menjadi energi listrik adalah merupakan pemanfaatan radiasi matahari sebagai sumber energi.

Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) merupakan pedoman untuk memberi arah pengelolaan energi nasional guna mewujudkan kemandirian energi dan ketahanan energi nasional untuk mendukung pembangunan nasional berkelanjutan. Di dalam Hasil proyeksi pemodelan pasokan energi primer pada sektor energi baru dan terbarukan pada tahun 2025 mencapai 400 MTOE atau 23% dan tahun 2050 mencapai 1.012 MTOE atau 31%. Dalam rangka tercapainya target tersebut perlu adanya berbagai kegiatan salah satunya adalah penelitian terkait metoda pemetaan potensi energi listrik tenaga surya atap. PLTS memiliki sifat densitas daya yang rendah, sehingga membutuhkan area pemasangan yang relatif besar. Penggunaan PLTS atap lebih diutamakan dibandingkan dengan PLTS di atas tanah kosong karena tidak perlu ada pembebasan lahan dan mengurangi biaya investasi. Penelitian ini bermanfaat untuk memprediksi daya keluaran yang dihasilkan PLTS atap dari luasan atap permukiman pada wilayah tertentu. Dengan adanya metoda pemetaan potensi energi listrik tenaga surya atap yang akurat, penelitian ini diharapkan menjadi informasi yang berguna bagi para pemegang kepentingan baik industri maupun pemerintah untuk menetapkan program ketahanan energi nasional.

Pemetaan potensi pengembangan PLTS atap berdasarkan luas area pemukiman merupakan estimasi daya keluaran yang dihasilkan PLTS. Daya memiliki satuan Watt/m^2 , dengan kata lain pemetaan potensi PLTS atap membutuhkan data intensitas radiasi matahari global beserta luas atap tersedia. Intensitas radiasi matahari dapat diperkirakan secara empirik dengan pemodelan simulasi dengan memperhitungkan penjumlahan antara radiasi beam dengan radiasi

difusi. Radiasi beam adalah radiasi matahari yang tidak direfleksikan oleh atmosfer sedangkan radiasi difusi adalah radiasi matahari yang telah direfleksikan oleh zat-zat yang terkandung pada atmosfer dan mengarah pada panel surya. Luas atap tersedia merupakan luasan atap yang secara sepenuhnya menyerap cahaya matahari. Luas atap tersedia dihitung dengan mempertimbangkan faktor koreksi fitur dan pengaruh bayangan. Perhitungan daya keluaran mempertimbangkan faktor pengurangan efisiensi modul PV berupa model panel surya, depresiasi, orientasi, dan rugi instalasi.

Namun, data radiasi sinar matahari dari stasiun meteorologi di berbagai lokasi di Indonesia terbatas karena data hanya dimiliki oleh hanya beberapa lokasi serta tidak merata di seluruh Indonesia. Keterbatasan data ini membuat pemikiran untuk mencari pendekatan secara empiris yaitu perhitungan secara matematika untuk mengetahui hubungan radiasi matahari dengan data-data atau parameter meteorologi, astronomi dan geografi yang lebih mudah diperoleh. Hal ini merupakan solusi terbaik karena data tersebut lebih mudah diakses, murah, mudah dan lebih akurat dibandingkan mengukur langsung menggunakan alat pyranometer atau pyrhelimeter. Selain itu besarnya intensitas radiasi di permukaan bumi tergantung dari posisi lintang lokasi, ketebalan awan, topografi dan musim. Pengaruh adanya awan di atmosfer dapat menyebabkan penerimaan radiasi matahari di permukaan bumi bervariasi, dari 40% di daerah basah dengan banyak awan sampai 80% di daerah gurun yang kering. Di Indonesia yang memiliki iklim tropis maka intensitas radiasi matahari dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya yaitu musim, letak geografis dan ketinggian tempat.

Oleh karena itu, perhitungan intensitas radiasi matahari dapat dilakukan di Kota Medan melalui pendekatan matematika dengan menggunakan data dari posisi lintang lokasi dan ketinggian lokasi dari permukaan laut untuk melihat potensi energi matahari di wilayah tersebut. Potensi energi matahari di Kota Medan dianalisa melalui pemetaan lokasi berdasarkan luas pemukiman dimana hasil intensitas radiasi matahari yang telah diperoleh juga dibutuhkan dalam menghitung nilai potensi energi matahari di Kota Medan. Selain itu, hasil keluaran intensitas radiasi matahari sebenarnya dipengaruhi oleh faktor musim, letak geografis dan ketinggian tempat. Data yang diperoleh dari Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG) seperti data suhu udara, curah hujan, kecepatan angin, lamanya penyinaran matahari dan kelembapan udara diolah pendistribusian data per bulan dalam 1 tahun dengan metode *Weibull* dan *Rayleigh* untuk melihat karakteristik data. Pengaruh cuaca terhadap keluaran radiasi matahari dianalisa kembali dengan metode analisis regresi linear sederhana untuk mengetahui parameter cuaca yang paling mempengaruhi keluaran intensitas radiasi matahari di Kota Medan.

Penelitian yang dapat dilaksanakan berdasarkan uraian di atas adalah tentang “***Analisis Potensi Energi Matahari dengan Metode Weibull dan Rayleigh***”.

1.2. Identifikasi Masalah

Berdasarkan paparan pada latar belakang masalah, masalah yang teridentifikasi dari penelitian ini adalah.

1. Berdasarkan laporan status energi bersih Indonesia yang diterbitkan pada tahun 2019, rencana pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) hanya sebesar 7% walaupun potensinya hampir mencapai 50% potensi energi terbarukan di Indonesia. Namun, penerimaan intensitas radiasi matahari yang dihimpun dari 18 lokasi di Indonesia dapat mencapai sekitar 4,5 kWh/m²/hari di Kawasan Barat Indonesia (KBI) dengan variasi bulanan sekitar 10% dan di Kawasan Timur Indonesia (KTI) sekitar 5,1 kWh/m²/hari dengan variasi bulanan sekitar 9%.
2. Data radiasi sinar matahari dari stasiun meteorologi di berbagai lokasi di Indonesia terbatas karena data hanya dimiliki oleh hanya beberapa lokasi serta tidak merata di seluruh Indonesia.
3. Hasil keluaran intensitas radiasi matahari sebenarnya dipengaruhi oleh faktor musim, letak geografis dan ketinggian tempat.
4. Pemetaan potensi energi listrik tenaga surya atap adalah sebagai pemanfaatan radiasi matahari yang dapat mengubah energi sinar matahari menjadi listrik.

1.3. Pembatasan Masalah

Pembatasan masalah dalam menjalankan penelitiannya ini adalah:

1. Data intensitas radiasi matahari dihitung berdasarkan posisi lintang Kota Medan per kecamatan per bulan dari jam 8 pagi sampai 6 sore dan ketinggian lokasi dari permukaan laut.
2. Data intensitas radiasi matahari untuk Kota Medan dari satelit pvgis selama 1 tahun dari 1 Januari 2021 sehingga 31 Desember 2021 juga digunakan sebagai perbandingan dengan data intensitas radiasi matahari yang dihitung dengan pendekatan matematika.
3. Penelitian tidak membahas pengaruh keluaran energi matahari berdasarkan jenis pv dan faktor lain selain berdasarkan hasil intensitas radiasi matahari.
4. Penelitian hanya membahas pengaruh cuaca di Kota Medan terhadap intensitas radiasi matahari di Kota Medan berdasarkan data cuaca dari BMKG yaitu, suhu udara, kelembapan udara, curah hujan, lamanya penyinaran matahari, dan kecepatan angin dengan menggunakan metode *Weibull* dan *Reyleigh* serta metode analisis digunakan analisis regresi linear ganda.

1.4. Rumusan Masalah

Rumusan masalah penelitian ini adalah:

1. Bagaimana menganalisa variasi intensitas radiasi matahari di Kota Medan per kecamatan selama 1 tahun dan data cuaca di Kota Medan dengan metode analisis *Weibull* dan *Rayleigh*.

2. Bagaimana pengaruh cuaca di Kota Medan terhadap intensitas radiasi matahari?
3. Bagaimana pemetaan potensi energi listrik tenaga surya di Kota Medan berdasarkan luas pemukiman sebagai pemanfaatan radiasi matahari.

1.5. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisa variasi intensitas radiasi matahari di Kota Medan per kecamatan selama 1 tahun dan data data cuaca di Kota Medan dengan metode analisis *Weibull* dan *Rayleigh*.
2. Menganalisa pengaruh cuaca di Kota Medan terhadap intensitas radiasi matahari.
3. Mengetahui pemetaan potensi energi listrik tenaga surya di Kota Medan berdasarkan luas pemukiman sebagai pemanfaatan radiasi matahari.

1.6. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat bagi berbagai pihak, yaitu:

- a. Universitas

Penelitian ini dapat dijadikan sebagai referensi untuk melaksanakan penelitian lanjutan tentang analisis potensi energi terbarukan.

- b. Pemerintah Kota

Diharapkan dapat menjadi dasar perhitungan untuk pengembangan potensi listrik yang lebih ekonomis dan ramah lingkungan di masa yang akan datang.

c. Mahasiswa

Menambah wawasan bagi mahasiswa bagaimana memanfaatkan potensi energi di sekeliling untuk di manfaatkan sebagai sumber energi yang bermanfaat bagi umat manusia

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Landasan Teori

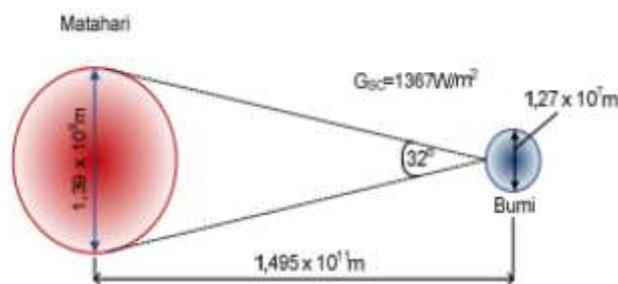
Sel surya memiliki prinsip kerja efek fotolistrik yaitu suatu materi akan melepaskan elektron jika permukaan materi tersebut terkena pancaran cahaya. Energi elektron yang terlepas dari materi tersebut sangat bergantung pada energi cahaya yang menyinarinya sedangkan jumlah elektron yang terlepas tidak bergantung pada energi tersebut tetapi bergantung pada intensitas cahaya yang menyinari permukaan materi tersebut. Semakin besar intensitas cahaya yang menyinari semakin besar jumlah elektron yang terlepas dari materi, kemudian jumlah elektron yang terlepas menentukan besarnya arus yang dihasilkan dan semakin besar arus yang dihasilkan maka semakin besar pula daya yang dihasilkan, Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin besar IRM maka daya listrik yang dihasilkan oleh panel surya juga berbanding lurus. Apabila IRM rendah maka daya keluaran panel surya juga rendah, sehingga kinerja suatu panel tidak maksimum.

Variasi intensitas radiasi matahari selama suatu periode dapat dijelaskan dengan teori fungsi distribusi probabilitas Weibull dan Rayleigh. Penggunaan fungsi kerapatan probabilitas untuk pemodelan kecepatan angin telah banyak dilakukan melalui beberapa studi di banyak negara. Di antara fungsi kerapatan tersebut adalah Weibull, Rayleigh, Gamma, Lognormal, Eksponensial, dan Gaussian. Fungsi Weibull digunakan secara luas dalam studi energi angin karena pendekatannya dianggap cocok untuk memodelkan kecepatan angin. Selain itu juga karena cakupannya yang luas dalam keserbagunaan, fleksibilitas dan

kemanfaatannya untuk menggambarkan variasi kecepatan angin. Selain Fungsi Weibull, fungsi Rayleigh juga sering diaplikasikan dalam studi tentang kejadian angin. Jika di suatu wilayah kurang cocok memakai distribusi Weibull maka distribusi Rayleigh menjadi pilihan berikutnya. Karakteristik tersebut terutama meliputi distribusi kejadiannya yang selanjutnya dapat dipakai untuk meramalkan intensitas radiasi matahari dan memberi informasi untuk kepentingan navigasi.

2.1.1 Radiasi Matahari

Salah satu fenomena alam yang memiliki manfaat bagi kelangsungan makhluk hidup di bumi adalah matahari. Energi yang dipancarkan oleh matahari setiap menit sebesar 56×10^{26} kalori. Bumi menerima sebesar $2,55 \times 10^{18}$ kalori atau hanya $\frac{1}{2} \times 10^9$ dari energi tersebut. Sinar matahari mengambil waktu sekitar 8 menit 20 detik untuk sampai ke permukaan bumi. Matahari mempunyai jarak rata – rata dari permukaan bumi $1,495 \times 10^8$ m dan diameter $11,39 \times 10^6$ m seperti pada Gambar 2.1 [19].



Gambar 2. 1 Hubungan antara matahari dan bumi

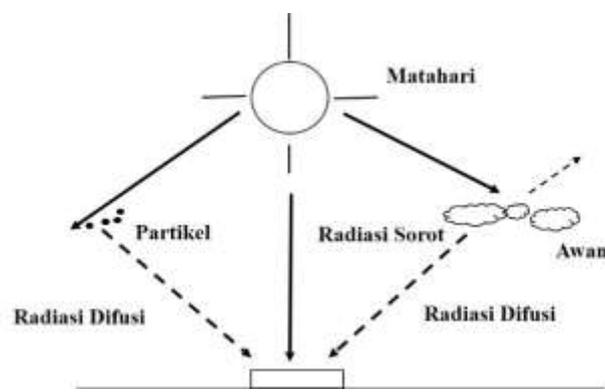
Proses thermonuklir yang terjadi di matahari menghasilkan pancaran energi yang dikenali sebagai radiasi matahari. Bentuk sinar dan gelombang elektromagnetik adalah bentuk dari energi radiasi matahari. Sinar bergelombang pendek dan sinar bergelombang panjang merupakan jenis spektrum radiasi matahari dimana, sinar gelombang pendek adalah sinar x, sinar gamma, sinar ultra violet, sedangkan sinar gelombang panjang adalah sinar infra merah [3]. Beberapa penelitian yang relevan tentang radiasi matahari yang telah dilakukan sebelumnya adalah sebagai berikut:

1. Nanang Endriatno, DKK (2019). Melakukan penelitian tentang Analisis Potensi Energi Matahari Di kota Kendari.
2. Muliadi, DKK (2018). Melakukan penelitian tentang Estimasi Intensitas Radiasi Matahari di Wilayah kota Makasar.
3. Baharudin, M. dan Ishak, T. (2012). Melakukan penelitian Tentang Analisis Ketersediaan Radiasi Matahari di Kota Makassar.

2.1.2 Potensi Radiasi Matahari

Radiasi adalah mekanisme perpindahan panas yang terjadi ketika tidak ada bahan (medium) yang mengangkut panas dari satu permukaan suatu benda ke permukaan lainnya. Perpindahan panas dihasilkan oleh gelombang elektromagnetik dan dapat menempati ruang hampa. Definisi lain dari radiasi adalah bentuk energi yang dipancarkan oleh suatu benda pada suhu di atas nol mutlak, satu-satunya bentuk energi yang dapat merambat di ruang hampa alam semesta [2].

Radiasi matahari yang mencapai bumi telah dilemahkan oleh refleksi dan propagasi atmosfer bumi. Seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2, radiasi yang mencapai permukaan bumi, radiasi yang tidak berubah arah, dan radiasi yang berubah arah karena pemantulan dan hamburan disebut radiasi difusi (diffuse radiation) seperti pada Gambar 2.2 [19].



Gambar 2. 2 Radiasi Pada Permukaan Bumi

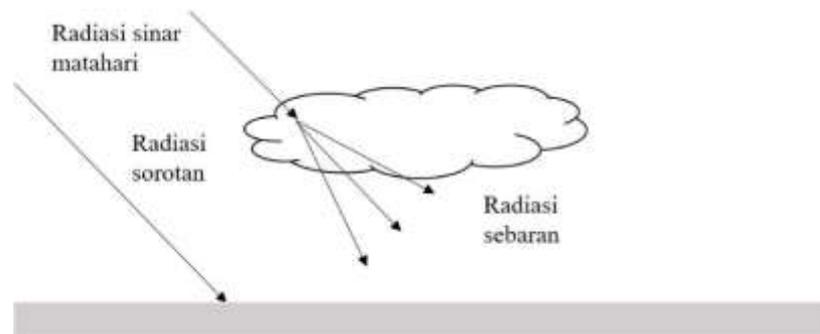
Ada tiga macam cara radiasi matahari sampai ke permukaan bumi, yaitu :

- a. Radiasi langsung (Beam/Direct Radiation) adalah radiasi yang mencapai bumi tanpa perubahan arah atau radiasi yang diterima oleh bumi dalam arah sejajar sinar datang.
- b. Radiasi hambur (Diffuse Radiation) adalah radiasi yang mengalami perubahan akibat pemantulan dan penghamburan.
- c. Radiasi total (Global Radiation) adalah penjumlahan radiasi langsung (direct radiation) dan radiasi hambur (diffuse radiation).

Radiasi yang dipancarkan oleh matahari ke setiap sudut di angkasa berbentuk gelombang elektromagnetik yang membawa energi dengan kecepatan cahaya. Radiasi matahari ini mengalami penyerapan, pemantulan, dan hamburan di semua lokasi 7 vertikal horizontal penjarannya yang memasuki atmosfer bumi. Hal tersebut ditimbulkan oleh adanya banyak aktifitas seperti cuaca dan iklim. Selain radiasi matahari yang sampai ke permukaan berbeda di setiap tempat disebabkan oleh geometri bumi, jaraknya terhadap matahari, keadaan geografis, perbedaan lintang, dan bujur, dan komposisi atmosfer.

Radiasi dipancarkan dari matahari ke setiap sudut alam semesta dalam bentuk gelombang elektromagnetik yang membawa energi dengan kecepatan cahaya. Radiasi matahari ini diserap, dipantulkan, dan dihamburkan di tujuh lokasi rambatan vertikal dan horizontal yang masuk ke atmosfer bumi. Hal ini disebabkan oleh banyak kegiatan seperti cuaca dan iklim. Juga, tergantung pada bentuk bumi, jarak dari matahari, kondisi geografis, garis lintang dan garis bujur, dan komposisi matahari, jumlah radiasi matahari yang mengenai permukaan bumi bervariasi dari satu tempat ke tempat lain. Atmosfer disebut dengan radiasi matahari yang tersedia di luar atmosfer bumi, atau sering juga konstanta radiasi matahari sebesar 1.353 W/m^2 , dikurangi intensitas dari penyerapan dan pemantulan atmosfer sebelum mencapai permukaan bumi. Ozon di atmosfer menyerap radiasi dengan panjang gelombang pendek (ultraviolet), sedangkan karbon dioksida dan uap air menyerap radiasi dengan panjang gelombang panjang (inframerah). Selain mengurangi radiasi terestrial langsung atau langsung dari penyerapan ini, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3, ada juga radiasi yang disebarkan oleh molekul gas

atmosfer, debu, dan uap air sebelum mencapai Bumi. Ini disebut radiasi hamburan [19].



Gambar 2. 3 Radiasi sebaran dan radiasi sorotan yang mengenai permukaan bumi

Dengan adanya faktor-faktor diatas menyebabkan radiasi yang diterima permukaan bumi memiliki intensitas yang berbeda-beda setiap saat. Faktor-faktor yang mempengaruhi penerimaan radiasi matahari di permukaan bumi adalah:

a. Jarak antara matahari dan bumi.

Bumi mengelilingi matahari (berevolusi) dengan lintasan yang berbentuk elips. Revolusi bumi berakibat terjadinya kemiringan sumbu bumi yang selalu searah sehingga menyebabkan adanya pergantian musim dan perubahan lamanya siang dan malam [2].

b. Panjang hari dan sudut datang .

Radiasi matahari yang di terima permukaan bumi pada suatu waktu tertentu disebabkan oleh sudut datang matahari. Perbedaan tempat menurut lintang dapat menyebabkan perbedaan periode penerimaannya yang disebut panjang hari. Sudut datang sinar matahari selalu berubah setiap saat. Semakin besar sudut

datang sinar matahari makin besar pula intensitas radiasi matahari yang diterima bumi.

c. Pengaruh atmosfer bumi.

Pada waktu radiasi matahari memasuki atmosfer menuju permukaan bumi (daratan dan lautan), radiasi tersebut akan dipengaruhi oleh gas-gas aerosol serta awan yang ada di atmosfer, sebagian akan dipantulkan kembali ke luar angkasa, sebagian akan diserap dan sisanya akan diteruskan ke permukaan bumi berupa radiasi langsung maupun radiasi baur (diffuse). Sumber-sumber aerosol atmosfer yaitu partikel-partikel padat yang mengapung di atmosfer. Awan juga merupakan komponen penting dalam mempengaruhi penerimaan radiasi matahari oleh permukaan bumi. Lama matahari bersinar cerah (jam) selama sehari disebut lama penyinaran yang ditentukan oleh ada atau tidaknya penutupan awan.

d. Lama Penyinaran Matahari

Lama penyinaran matahari (sunshine duration) adalah lamanya matahari bersinar sampai permukaan bumi dalam periode satu hari yang diukur dalam jam. Periode satu hari disebut panjang hari (jangka waktu matahari berada di atas 20 horison). Lama matahari bersinar ini dalam periode harian adalah bervariasi dari bulan ke bulan. Pengukuran durasi sinar matahari merupakan jenis pengukuran radiasi yang tertua, tetapi meskipun demikian, penyinaran matahari tetap bermanfaat karena dua hal. Pertama, durasi penyinaran adalah salah satu parameter yang penting dari iklim suatu tempat (lokasi). Penggunaan data ini misalnya dalam bidang pertanian, perkebunan, karena durasi sinar matahari

berpengaruh terhadap pertumbuhan tanaman. Kedua, dari data durasi penyinaran matahari dapat diturunkan fluksi total dari radiasi matahari yang jatuh pada permukaan horizontal dari suatu lokasi [2].

2.1.2.1 Titik Balik Matahari (*Solstice*)

Merupakan saat dimana perbedaan panjang siang dan malam mencapai maksimum. Panjang siang dan malam berubah-ubah secara periodik dari hari ke hari. Dalam satu tahun, pada waktu tertentu siang akan lebih panjang dari malam, dan sebaliknya. Dua kali dalam satu tahun, siang dan malam sama panjang. Perbedaan panjang siang dan malam, dan perubahannya dari hari ke hari sepanjang tahun lebih mudah diamati dari daerah-daerah lintang tinggi, namun di daerah dengan lintang rendah pun dapat diamati walaupun selisihnya sedikit. Terjadinya perubahan panjang siang dan malam ini disebabkan oleh bidang khatulistiwa bumi yang tidak sebidang dengan bidang orbitnya (yang dinamakan 16 ekliptika), tetapi membentuk sudut sekitar $23,5^\circ$. Kedua bidang ini (khatulistiwa dan ekliptika) membentuk sudut, sedangkan bumi mengelilingi matahari, maka pada waktu-waktu tertentu, matahari berada di sebelah utara khatulistiwa, dan di waktu yang lain di sebelah selatan khatulistiwa [2]. Perbedaan panjang siang dan malam ini selain bergantung pada ketinggian matahari dari khatulistiwa, juga ditentukan oleh lintang geografis lokasi dipermukaan bumi, semakin jauh dari khatulistiwa bumi, semakin besar perbedaan panjang siang dan malam. Negara-negara yang berada pada lintang tinggi, saat matahari terbenam atau terbit dalam satu tahun bisa berbeda beberapa

jam. Indonesia yang berada di sekitar khatulistiwa, hampir tidak merasakan perbedaan lamanya siang dan malam.

Adapun rumus-rumus yang digunakan untuk perhitungan intensitas radiasi matahari total, radiasi langsung dan radiasi difusi, seperti dibawah ini:

1. Radiasi global yang tiba pada permukaan yang tegak lurus terhadap arah sinar matahari (G_{on})

Variasi Perbedaan pada jarak matahari dan bumi akibat dari lintasan bumi yang berbentuk elips, menyebabkan variasi radiasi permukaan diluar atmosfer bumi (Variation of extraterrestrial radiation). Persamaan sederhana diberikan oleh Spencer (1971) yang memberikan akurasi persamaan ($\pm 0.01\%$) seperti pada persamaan (2.1) [15].

$$G_{on} = G_{sc} (1,000110 + 0,034221 \cos B + 0,001280 \sin B + 0,000719 \cos 2B + 0,000077 \sin 2B) \quad (2.1)$$

Dimana:

G_{sc} = Nilai konstanta matahari ($1\,367\text{ W/m}^2$)

$$B = (n - 1) \frac{360}{365}$$

n = jumlah hari sepanjang tahunnya (Misalnya 3 Januari, $n = 3$)

n adalah urutan hari pada suatu tahun. Berdasarkan bulan yang diketahui ditampilkan pada Tabel 2.1 [4].

Tabel 2. 1 Nilai n pada tanggal ke-i mengikut bulan

Bulan	Nilai n pada tanggal ke-i
Januari	I
Februari	31 + i
Maret	59 + i
April	90 + i
Mei	120 + i
Juni	151 + i
Juli	181 + i
Agustus	212 + i
September	243 + i
Oktober	273 + i
November	304 + i
Desember	334 + i

2. *Solar time* atau jam matahari

Solar time atau jam matahari Adalah waktu berdasarkan pergerakan semu matahari di langit pada tempat tertentu. Jam matahari (disimbolkan ST) berbeda dengan penunjukkan jam biasa (standard time, disimbolkan STD).

Hubungannya adalah:

$$ST = STD + 4 (L_{st} - L_{loc}) + E \quad (2.3)$$

Dimana:

L_{st} = standar meridian waktu indonesia bagian barat (105°)

L_{loc} = derajat bujur kabupaten yang sedang dihitung ($^\circ BT$)

Jika daerah yang dihitung ada pada bujur timur, maka gunakan tanda minus didepan angka 4 dan jika bujur barat adalah tanda plus. Dalam satuan menit dirumuskan oleh Spencer (1971) [15]:

$$E = 229,2 (0,00075 + 0,001868 \cos B - 0,032077 \sin B - 0,014615 \cos 2B - 0,04089 \sin 2B) \quad (2.4)$$

Parameter B dihitung dengan menggunakan persamaan (2.2)

3. Sudut Jam

Sudut jam ω adalah sudut pergeseran semu matahari dari garis siang. Perhitungan berdasarkan jam matahari (ST), setiap berkurang 1 jam, ω berkurang 15° dan setiap bertambah 1 jam, ω bertambah 15° . Artinya tepat pukul 12.00 siang, $\omega = 0$, pukul 11.00 pagi $\omega = -15^\circ$ dan pukul 14.00, $\omega = 30^\circ$.

4. Sudut Deklinasi

Sudut deklinasi adalah kemiringan sumbu matahari terhadap garis normalnya, Sudut deklinasi dapat dihitung dengan persamaan yang diajukan Cooper (1969)

:

$$\delta = 23,45 \sin \left(\frac{360}{365} (284 + n) \right) \quad (2.5)$$

Dimana:

n = jumlah hari sepanjang tahun (Misalnya 3 Januari, $n = 3$), n adalah urutan hari pada suatu tahun

5. Sudut Zenith

Sudut Zenith adalah sudut antara garis vertikal keatas dan garis matahari atau sudut jatuh radiasi langsung pada permukaan horizontal .

$$\cos\theta_z = \cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega + \sin\phi \cdot \sin\delta \quad (2.6)$$

Dimana:

Sudut latitud (ϕ) = koordinat lintang, tanda positif menunjukkan ke arah atas ,
sedangkan tanda minus dikoordinat latitud menuju kutub selatan ($^{\circ}$ LS).

6. Fraksi Radiasi Langsung Pada Kondisi Cerah

Hottel (1976) merumuskan fraksi radiasi langsung yang pada kondisi cerah menggunakan persamaan berikut:

$$\tau_b = a_0 + a_1 \exp\left(\frac{-k}{\cos\theta_z}\right) \quad (2.7)$$

a_0 , a_1 , dan k , digunakan untuk ketinggian hingga 23 km diberikan oleh persamaan (2.8):

$$\begin{aligned} a_0^* &= 0,4237 - 0,00821 (6 - A)^2 \\ a_1^* &= 0,5055 - 0,00595 (6,5 - A)^2 \\ k^* &= 0,271 - 0,01858 (2,5 - A)^2 \end{aligned} \quad (2.8)$$

Faktor koreksi untuk jenis iklim ditunjukkan pada Tabel 2.2 dan diperoleh dari persamaan (2.9) [4].

$$r_0 = \left(\frac{a_0}{a_0^*}\right) : r_1 = \left(\frac{a_1}{a_1^*}\right) : r_k = \left(\frac{k}{k^*}\right) \quad (2.9)$$

Tabel 2. 2 Faktor koreksi berdasarkan jenis iklim

Jenis Iklim	r_0	r_1	K
Tropical	0,95	0,98	1,02
Midlatitude Summer	0,97	0,99	1,02
Subartic Summer	0,99	0,99	1,01
Midlatitude Winter	1,03	1,01	1,00

Dimana:

r_0 = Rasio nol

r_1 = Rasio urutan satu

K = konstanta

7. Fraksi Radiasi Difusi pada Kondisi Cerah

$$\tau_d = 0,271 - 0,294\tau_b \quad (2.10)$$

8. Radiasi Langsung pada Kondisi Cerah

$$G_{cl.b} = G_{on} \cdot \cos\theta_z \tau_b \quad (2.11)$$

9. Radiasi Difusi pada Kondisi Cerah

$$G_{cl.d} = G_{on} \cdot \cos\theta_z \tau_d$$

10. Radiasi Total pada Kondisi Cerah

$$G_{cl} = G_{cl.b} + G_{cl.d} \quad (2.12)$$

2.1.3. Pengaruh Pergerakan Matahari

Antara variasi yang disebabkan oleh kemiringan sumbu bumi dan gerakannya di sekitar matahari adalah:

1. Tempat yang berbeda di bumi, yang menghasilkan musim menerima variasi intensitas dan durasi sinar matahari.

2. Gerak jelas matahari melintasi langit.

Gerak Rotasi Bumi adalah Rotasi Gerak Bumi berputar pada porosnya. Arah berotasi dengan arah dari barat ke timur selama 23 jam 56 menit 4 detik. Akibat rotasi bumi:

- a. Gerak harian benda langit dari timur ke barat (terbit di timur, terbenam di barat; terjadinya pergantian siang malam).
- b. Terjadi pepatan bumi di arah kutubnya (momentum sudut lebih besar pada daerah equator).
- c. Efek Coriolis pada arah angin.
- d. Perubahan arah ayunan bandul.
- e. Perubahan arah arus laut sepanjang equator bumi.

2.1.4. Sistem PLTS

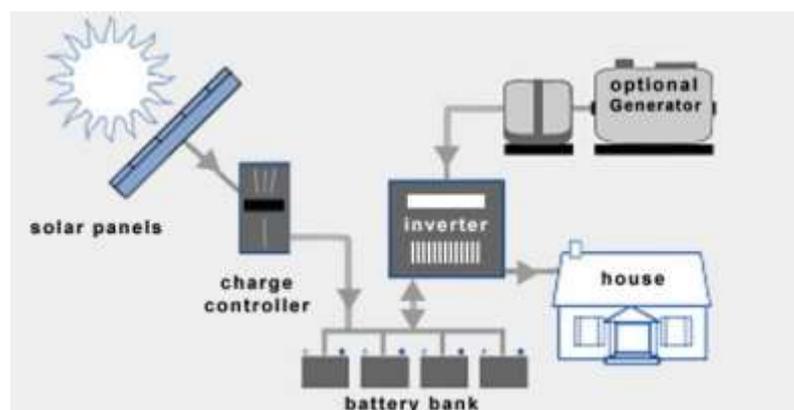
Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah peralatan pembangkit listrik yang memanfaatkan cahaya matahari dengan mengubah cahaya matahari menjadi listrik. PLTS sering juga disebut Solar Cell, atau Solar Photovoltaik, atau Solar Energi. PLTS merupakan sistem pembangkit yang tergolong mudah, murah,

ramah lingkungan dan terbarukan. Suatu proses penyimpanan energi listrik yang dihasilkan oleh modul solar cell atau Photovoltaic terjadi pada sistem pembangkit ini. Energi listrik biasanya disimpan disimpan pada baterai dalam bentuk energi elektrokimia. Pada proses penyimpanan energi tersebut, diperlukan suatu alat yang berfungsi mengatur proses tadi agar tidak terjadi pengisian berlebih pada baterai (overcharge) yang dapat menyebabkan kerusakan pada baterai.

Instalasi listrik tenaga surya sebagai pembangkit listrik, terdiri dari komponen penting sebagai berikut:

1. Panel surya (solar cell)
2. Pengatur pengisian baterai (battery charge regulator (BCR))
3. Baterai

Pembangkit listrik tenaga surya konsepnya sederhana, yaitu mengubah cahaya matahari menjadi energi listrik. Sistem PLTS dapat dilihat pada Gambar 2.4 [5].



Gambar 2. 4 Sistem PLTS

Cahaya matahari merupakan salah satu bentuk energi dari sumber daya alam. Sumber daya alam matahari ini sudah banyak digunakan untuk memasok daya listrik di satelit komunikasi melalui sel surya. Sel surya ini dapat menghasilkan energi listrik dalam jumlah yang tidak terbatas langsung diambil dari matahari, tanpa ada bagian yang berputar dan tidak memerlukan bahan bakar. Sehingga sistem sel surya sering dikatakan bersih dan ramah lingkungan. Bandingkan dengan sebuah generator listrik, ada bagian yang berputar dan memerlukan bahan bakar untuk dapat menghasilkan listrik. Suaranya bising, selain itu gas yang dihasilkan dapat menimbulkan efek gas rumah kaca (green house gas) yang pengaruhnya dapat merusak ekosistem planet bumi kita.

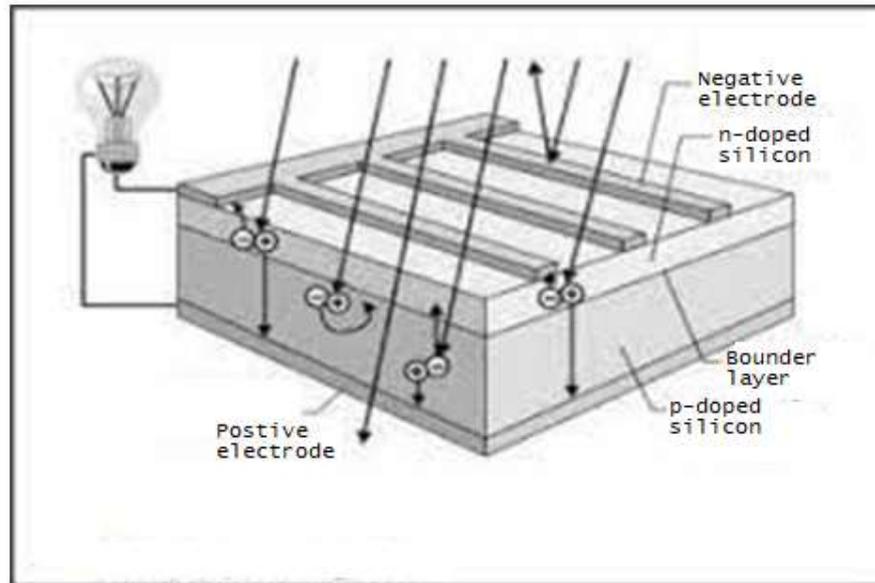
Sistem sel surya yang dapat digunakan di permukaan bumi terdiri dari panel sel surya, rangkaian kontroler pengisian (charge controller), dan aki (baterai) 12 volt yang maintenance free. Panel sel surya merupakan modul yang terdiri dari beberapa sel surya yang dihubungkan seri dan paralel tergantung ukuran dari kapasitas yang diperlukan. Rangkaian kontroler pengisian aki dalam sistem sel surya merupakan rangkaian elektronik yang mengatur proses pengisian aki. Kontroler ini dapat mengatur tegangan aki dalam selang tegangan 12 volt. Bila tegangan turun sampai 10.8 volt berarti sisa tegangan pada aki 2.2 volt, maka kontroler akan mengisi aki dengan panel surya sebagai sumber dayanya. Tentu saja proses pengisian itu akan terjadi bila berlangsung pada saat ada cahaya matahari. Jika penurunan tegangan terjadi pada malam hari, maka kontroler akan memutuskan pemasokan energi listrik. Setelah proses pengisian itu berlangsung selama beberapa jam, tegangan aki itu akan naik bila tegangan aki itu mencapai 12 volt, maka

kontroler akan menghentikan proses pengisian aki itu. Rangkaian kontroler pengisian aki, sebenarnya mudah untuk dirakit sendiri. Tapi, biasanya rangkaian kontroler ini sudah tersedia dipasaran. Memang harga kontroler itu cukup mahal kalau dibeli sebagai unit sendiri. Kebanyakan sistem sel surya itu hanya dijual dalam bentuk paket lengkap itu jelas lebih murah dibandingkan dengan bila merakit sendiri. Biasanya panel surya itu diletakkan dengan posisi lurus menghadap matahari. Padahal bumi itu bergerak mengelilingi matahari, agar dapat terserap secara maksimum sinar matahari itu harus diusahakan selalu jatuh tegak lurus pada permukaan panel surya.

Bahan sel surya sendiri terdiri dari kaca pelindung dan material adhesive transparan yang melindungi bahan sel surya dari keadaan lingkungan kemudian material anti-refleksi untuk menyerap lebih banyak cahaya dan mengurangi jumlah cahaya yang dipantulkan, semikonduktor P-type dan N-type (terbuat dari campuran silikon) untuk menghasilkan medan listrik, saluran awal dan saluran akhir (terbuat dari logam tipis) untuk mengirim elektron ke peralatan listrik. Cara kerja sel surya sendiri sebenarnya identik dengan piranti semikonduktor dioda. Ketika cahaya bersentuhan dengan sel surya dan diserap oleh bahan semi-konduktor, terjadi pelepasan elektron. Apabila elektron tersebut bisa menempuh perjalanan menuju bahan semi-konduktor pada lapisan yang berbeda, terjadi perubahan sigma gaya-gaya pada bahan. Gaya tolakan antar bahan semi-konduktor, menyebabkan aliran medan magnetlistrik. Dan menyebabkan elektron dapat disalurkan ke saluran awal dan akhir untuk digunakan pada peralatan listrik.

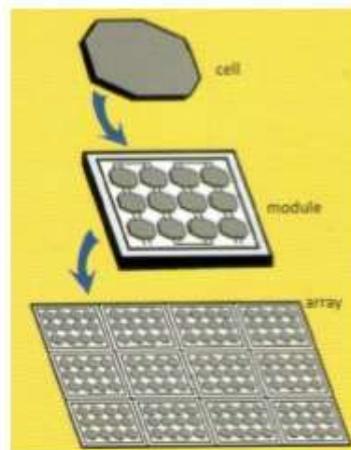
2.1.5. Sel Surya

Sel surya adalah sebuah komponen elektronik yang dapat mengubah energi cahaya gelombang pendek menjadi energi listrik, perubahan energi ini disebabkan sebuah proses yang di sebut efek photovoltaic. Efek photovoltaic sendiri adalah pelepasan muatan positif dan negatif dalam material padat melalui cahaya. Jadi secara tidak langsung output berupa arus dan tegangan dipengaruhi oleh besarnya intensitas cahaya. Pada sel surya terdapat sambungan (junction) antara dua lapisan tipis yang terbuat dari bahan semikonduktor yang masing-masing diketahui sebagai semikonduktor jenis “P” (positif) dan semikonduktor jenis “N” (Negatif). Silikon jenis P merupakan lapisan permukaan yang dibuat sangat tipis supaya cahaya matahari dapat menembus langsung mencapai junction. Bagian P ini diberi lapisan nikel yang berbentuk cincin, sebagai terminal keluaran positif. Dibawah bagian P terdapat bagian jenis N yang dilapisi dengan nikel juga sebagai terminal keluaran negatif. Ketika cahaya mengenai permukaan sel surya, beberapa foton dari cahaya diserap oleh atom semikonduktor untuk membebaskan elektron dari ikatan atomnya, sehingga menjadi elektron yang bebas bergerak. Adanya perpindahan elektron inilah yang menyebabkan terjadinya arus listrik. Hubungan sel surya, panel surya dapat dilihat pada Gambar 2.5 [11].



Gambar 2. 5 Hubungan Sel Surya, Panel Surya

Array adalah Gabungan dari beberapa sel surya disebut panel surya. Sebuah panel surya umumnya terdiri dari 32-40 sel surya, tergantung ukuran panel. Gabungan dari panel-panel ini akan membentuk suatu “Array”.



Gambar 2. 6 Susunan pembuatan panel surya, dari sel surya, modul dan panel (array)

2.1.5.1 Keuntungan dan Kelebihan Sel Surya

a. Keuntungan

Sel surya dapat memberikan keuntungan dibandingkan dengan sumber-sumber tenaga lainnya, seperti generator diesel, fosil dan lain-lain. Berikut adalah keuntungannya:

1. Tidak membutuhkan bahan bakar untuk beroperasi. Hal ini menguntungkan karena tidak menyebabkan gangguan pada lingkungan karena tidak menyebabkan polusi akibat proses pemakaian bahan bakar, dan tidak mengeluarkan suara mesin yang bergerak sehingga tidak mengganggu lingkungan.
2. Sel surya memiliki ketahanan dan kestabilan yang sudah teruji waktu operasinya cukup lama.
3. Sel surya dapat dengan mudah di bangun di daerah terpencil dan dapat di pindahkan peletakannya.

b. Kerugian

Di samping memiliki keuntungan sel surya juga memiliki beberapa kerugian, yaitu:

1. Terlalu bergantung pada matahari, sehingga sangat terpengaruh oleh keadaan cuaca dalam produksi listriknya.
2. Biaya pembangunannya cukup mahal.
3. Membutuhkan komponen tambahan untuk mengonversi dan memperbesar output listriknya.

2.1.5.2. Jenis Sel Surya

Jenis-jenis sel surya digolongkan berdasarkan teknologi pembuatannya dibagi dalam tiga jenis, yaitu:

a. Monokristal

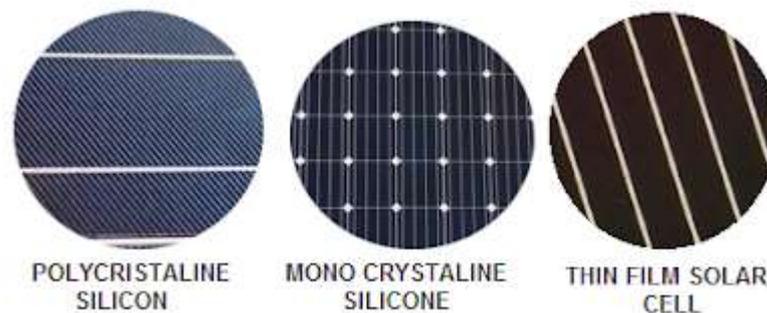
Sel surya yang terdiri atas p-n Junction monokristal silicon atau yang disebut juga monocrystalline PV, mempunyai kemurnian yang tinggi yaitu 99,999%. Efisiensi sel fotovoltaik jenis silicon monokristal mempunyai efisiensi konversi yang cukup tinggi yaitu sekitar 16 sampai 17%.

b. Polikristal

Polikristal PV atau sel surya yang bermateri polokristal dikembangkan atas alasan mahalnya materi monokristal per kilogram. Efisiensi konversi sel surya jenis silicon polikristal berkisar antara 12% hingga 15%.

c. Amorfous

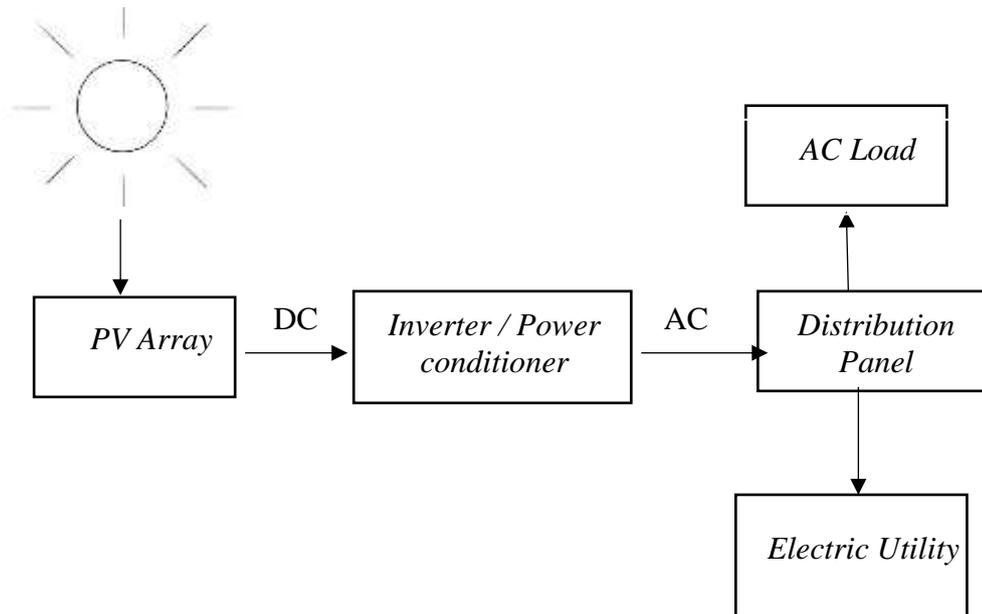
Sel surya bermateri Amorphous Silicon merupakan teknologi fotovoltaik dengan lapisan tipis atau thin film. Ketebalannya sekitar 10 μ m (micron) dalam bentuk modul surya. Efisiensi sel dengan silicon amorfous berkisar 6% sampai dengan 9% [23].



Gambar 2. 7 Bentuk permukaan sel surya berdasarkan jenis sel surya

2.1.6. Sistem PLTS *Off – Grid*

PLTS *on-grid* atau *grid-connected pv plant* merupakan sistem PLTS yang terhubung dengan jaringan yang dibagi menjadi dua, yaitu sistem dengan penyimpanan (*storage*) atau disebut *grid-connected pv with a battery back up*, menggunakan baterai sebagai cadangan dan penyimpanan tenaga listrik dan tanpa baterai sebagai cadangan dan penyimpanan tenaga listrik dan tanpa baterai atau disebut *grid – connected pv without a battery back up*. Apabila jaringan mengalami kegagalan untuk periode tertentu maka baterai pada PLTS *on-grid* berfungsi sebagai suplai tenaga listrik untuk beban listrik dan sebagi suplai tenaga listrik ke jaringan listrik negara (PLN) apabila ada kelebihan daya listrik (*excess power*) yang dibangkitkan PLTS. Berdasarkan aplikasinya sistem ini dibagi menjadi dua yaitu, *grid – connected distributed pv* dan *grid – connected centralized pv* (Setiawan, 2014). Diagram sistem PLTS *grid – connected* dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Diagram sistem PLTS *grid – connected*

Prinsip kerja PLTS sistem – *on grid* dapat diuraikan berikut ini:

1. Sinar matahari pada siang hari dikonversikan menjadi energi listrik arus searah (DC) oleh modul surya yang terpasang. Listrik arus DC tersebut dari PV dapat diubah menjadi arus bolak – balik oleh komponen yang disebut inverter sebagai mensuplai berbagai peralatan rumah tangga. Pada siang hari, kebutuhan energi listrik berbagai peralatan disuplai langsung oleh modul surya. Kelebihan energi dapat dijual ke PLN sesuai kebijakan jika kondisi kelebihan energi.
2. Pada malam hari atau jika kondisi cuaca mendukung maka peralatan akan tetap disuplai PLN. Hal ini dimungkinkan karena sistem ini tetap terkoneksi dengan jaringan PLN.

Selain itu sistem PLTS *on-grid* yaitu, disebut sebagai *grid – connected pv system with battery backup* ini dapat menggunakan baterai sebagai cadangan

atau *backup* energi. Sistem ini berfungsi sebagai *backup* energi listrik untuk menjaga kontinuitas operasional peralatan – peralatan elektronik. Jika suatu saat terjadi kegagalan pada suplai listrik PLN (pemadaman listrik) maka peralatan elektronik dapat beroperasi secara normal dalam jangka waktu tertentu tanpa adanya gangguan.

2.1.6.1. Grid - Connected Distributed PV

Sistem PLTS yang menyediakan daya listrik untuk pelanggan yang terhubung dengan jaringan listrik yang spesifik. Contoh penggunaan PLTS pada kawasan rumah yang terhubung jaringan tegangan rendah (JTR) 230/400 V AC. Sebagai salah satu sumber tenaga listrik, setiap rumah masing memiliki PLTS selain terhubung dan memperoleh pasokan tenaga listrik dari jaringan listrik negara (PLN). Setiap rumah atau bangunan memiliki sejumlah beban listrik yang dihasilkan oleh PLTS sangat dekat dengan area beban listrik. Jadi energi listrik yang dihasilkan oleh PLTS memiliki nilai lebih tinggi daripada listrik yang dihasilkan oleh PLN.

2.1.6.2. Grid - Connected Centralized PV

Pembangkitan tenaga listrik yang terpusat sebagai suplai pasokan tenaga listrik yang besar ke jaringan listrik PLN adalah *Grid – connected PV* yang merupakan sistem *PLTS on-grid*. Sistem ini lebih cocok untuk membangkitkan daya listrik yang besar ke jaringan listrik sistem tegangan menengah, maupun tegangan tinggi,terlebih jauh dengan beban listrik. Rugi-rugi daya pada sisi

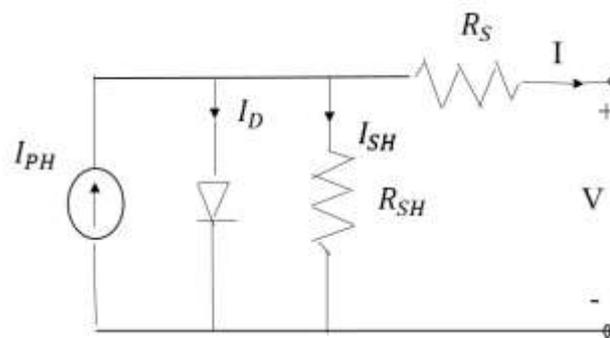
pembangkitan lebih kecil daripada pola tersebar dikarenakan letaknya terpusat walaupun dalam penyaluran pada jaringan PLN menuju beban tetap terjadi rugi-rugi penyaluran. Selain itu untuk kontrol dan monitoring lebih baik karena dalam satu area.

2.1.7. Photovoltaik

Photovoltaik merupakan sumber baru terbarukan yang dapat menghasilkan energi listrik tanpa menghasilkan polusi ataupun merusak lingkungan, karena *photovoltaik* langsung mengubah radiasi matahari menjadi energi listrik. Cara kerja *photovoltaik* mirip dengan piranti semikonduktor dioda *p-n junction* yang memiliki 2 buah bahan semikonduktor, tipe-p dan tipe-n. Dengan menggunakan *photo-electric effect* dari bahan semikonduktor yang pada umumnya terbuat dari silikon (Si) dan Germanium (Ge), photovoltaik dapat langsung mengkonversi sinar matahari menjadi listrik searah (dc). Bila *photovoltaik* itu dikenakan pada sinar matahari, maka timbul yang dinamakan elektron dan *hole*. Elektron-elektron dan *hole-hole* yang timbul di sekitar *pn junction* bergerak berturut-turut ke arah lapisan n dan ke arah lapisan p. Sehingga pada saat elektron-elektron dan hole-hole itu melintasi *pn junction*, timbul beda potensial pada kedua ujung photovoltaik. Jika pada kedua ujung photovoltaik diberi beban maka timbul arus listrik yang mengalir melalui beban.

Jika photovoltaik ideal, maka cukup dimodelkan dengan sumber arus yang parallel dengan dioda. Tetapi, pada kenyataannya tidak ada photovoltaik yang ideal di dunia nyata, maka ditambahkan resistansi seri (R_s) dan resistansi parallel (R_p)

sebagai representasi *loss* pada photovoltaik. R_s merepresentasikan resistansi dari material semikonduktor dan R_p merepresentasikan rugi-rugi yang disebabkan oleh arus bocor yang menembus melalui lintasan resistif paralel ke peralatan. R_s memiliki nilai resistansi yang sangat kecil, sedangkan R_p memiliki nilai resistansi yang sangat tinggi. Karena nilai R_p yang sangat tinggi, maka dapat diabaikan. Photovoltaik dapat dimodelkan menjadi rangkaian ekuivalen seperti Gambar 2.9 [7].



Gambar 2. 9 Rangkaian Ekuivalen Photovoltaik

Daya yang dikeluarkan photovoltaik sangat terpengaruh oleh temperatur. Kenaikan temperatur pada photovoltaik dapat menyebabkan penurunan *rating* photovoltaik, atau yang biasa disebut *derating*. *Derating* mengurangi daya output yang seharusnya dikeluarkan photovoltaik. Dengan rangkaian pada Gambar 2.9, maka persamaan arus adalah pada persamaan berikut:

$$I = I_{ph} - I_s \left\{ \exp \frac{q(V+R_s I)}{NKT} - 1 \right\} - \frac{(V+R_s I)}{R_{sh}} \quad (2.13)$$

Keterangan:

I_{ph} : *Photocurrent*

I_s : Arus dioda balik saturasi

q : *electron charge*

V : Voltase yang melewati dioda

K : Konstanta Boltzmann's ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$)

N : Ideal faktor dioda

R_s, R : Seri masing – masing resistor

2.1.7.1. Parameter Pemasangan Photovoltaik

Faktor pengoperasian maksimum solar cell sangat tergantung pada :

1. *Temperatur Ambient.*
2. Radiasi solar matahari.
3. Kecepatan angin bertiup.
4. Keadaan atmosfer bumi.
5. Orientasi panel atau array PV (photovoltaik).
6. Posisi letak sel surya (*array*) terhadap matahari (*titl angle*) [10].

2.1.7.2. Temperatur PV Modul

Sebuah sel surya dapat beroperasi secara maksimum jika temperatur sel tetap normal (pada 25°C), kenaikan temperatur lebih tinggi dari temperatur normal pada panel surya akan melemahkan *voltage*. Setiap kenaikan temperatur sel surya 1°C (dari 25°C) akan berkurang sekitar 0.5% pada total tenaga yang dihasilkan atau akan melemah dua kali lipat untuk kenaikan temperatur sel per 10°C [9].

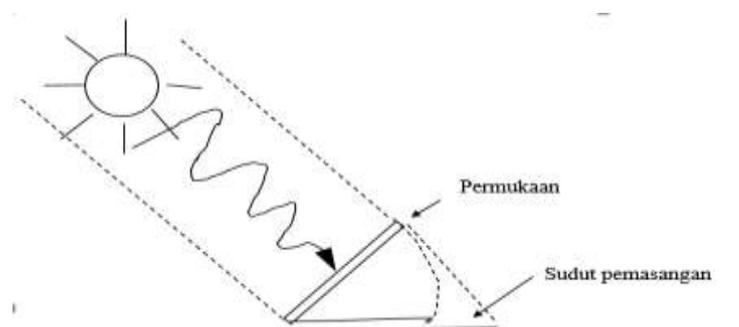
Kecepatan tiup angin disekitar lokasi PV dapat membantu mendinginkan permukaan temperatur kaca – kaca PV *array*. Keadaan atmosfer bumi, berawan,

mendung, jenis partikel debu udara, asap, uap air, kabut dan polusi menentukan hasil arus listrik dari deretan PV.

2.1.7.3. Orientasi Panel atau Array

Orientasi dari rangkaian PV (*array*) ke arah matahari secara optimum adalah penting agar panel atau deretan PV dapat menghasilkan energi maksimum. Selain arah orientasi, sudut orientasi dari panel atau deretan PV juga sangat mempengaruhi hasil energi maksimum. Sebagai petunjuk garis untuk lokasi yang terletak di belahan utara latitude (seperti Indonesia) maka panel atau deretan PV sebaiknya diorientasikan ke utara, orientasi ke timur-barat juga dapat menghasilkan sejumlah energi dari panel-panel PV tetapi tidak akan mendapatkan energi matahari optimum [8].

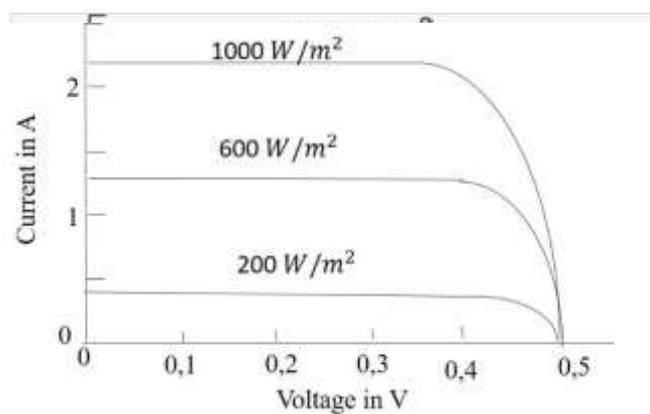
sudut orientasi matahari mempertahankan sinar matahari jatuh ke sebuah permukaan panel surya secara tegak lurus akan mendapatkan energi maksimum $\pm 1000\text{W/m}^2$ atau 1 kW/m^2 . Gambar posisi sudut panel pada sudut orientasi matahari dapat dilihat pada Gambar 2.10 [8].



Gambar 2. 10 Sudut panel PV dalam posisi datar.

Keluaran tegangan dan arus listrik yang dihasilkan sel surya akan menurun apabila jumlah energi cahaya matahari yang diterima sel surya berkurang atau intensitas radiasi matahari melemah. Penurunan tegangan relatif lebih kecil dibandingkan penurunan arus listrik.

Pengaruh intensitas radiasi matahari terhadap tegangan dan arus pada panel surya dapat dilihat pada Gambar 2.11.

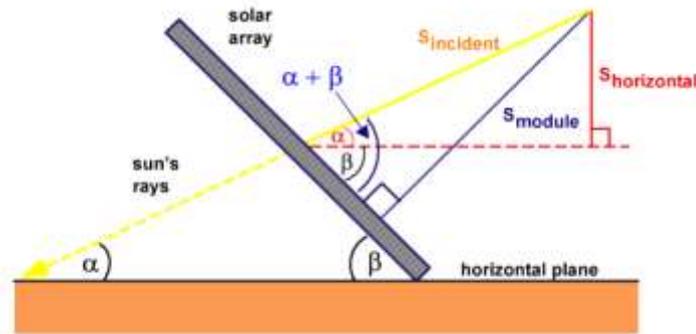


Gambar 2. 11 Pengaruh intensitas radiasi matahari terhadap tegangan dan arus pada panel surya

2.1.8 Konversi Energi PV

Output listrik dari modul PV tergantung pada listrik, panas, spektral surya, dan sifat optik dari modul (atau *array*) serta sudut dan jumlah radiasi tertentu. Jumlah radiasi masukan memiliki linear (langsung) berpengaruh pada arus keluaran dari modul PV. Pengaruh variasi dalam spektrum matahari di modul output relatif kecil untuk nilai massa udara antara 1 dan 2 untuk kristal modul PV. Metode empiris yang tersedia untuk memperkirakan efek dari perubahan spektrum matahari

pada arus modul PV. Permukaan yang terlalu miring tidak normal untuk menerima radiasi dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2. 12 Posisi *solar array* dengan permukaan yang terlalu miring

Modul silikon PV kristal, efek kerugian optik signifikan bagi timbulnya sudut lebih besar dari 55° . Untuk permukaan yang tidak lazim pada insiden sinar matahari, kepadatan radiasi, berkurang, karena geometri, dengan faktor sama dengan cosinus dari sudut insiden seperti ditunjukkan pada Gambar 2.12. Selain kerugian cosinus ini radiasi masukan, kolektor besar sudut menyebabkan kerugian optik akibat pemantulan dari permukaan modul PV. Ini kerugian optik menghasilkan radiasi insiden lebih rendah dari sel PV bawah kaca.

2.1.9. Faktor – faktor yang mempengaruhi kinerja PLTS

Faktor – faktor yang mempengaruhi produksi energi listrik PLTS:

1. Radiasi

Radiasi matahari adalah sinar yang dipancarkan dari matahari ke permukaan bumi, yang disebabkan oleh adanya emisi bumi dan gas pijar panas matahari.

Radiasi mempengaruhi variasi arus dan tegangan . Semakin tinggi radiasi maka, semakin besar pula arus dan tegangan yang dihasilkan.

2. Sudut Kemiringan

Menentukan arah sudut kemiringan modul surya harus disesuaikan dengan letak geografis lokasi pemasangan modul surya tersebut. Penentuan sudut pemasangan modul surya ini berguna untuk membenarkan penghadapan modul surya ke arah garis khatulistiwa. Pemasangan modul surya ke arah khatulistiwa dimaksudkan agar modul surya mendapatkan penyinaran yang optimal.

3. Orientasi Modul Surya

Penempatan modul surya tidak boleh kurang dari 10° atau melebihi 45° . Orientasi dari rangkaian modul surya (*array*) ke arah matahari adalah penting, agar modul surya (*array*) dapat menghasilkan energi yang maksimum. Mialnya, lokasi yang terletak di belahan bumi utara maka modul surya sebaiknya diorientasikan ke selatan. Begitu pula untuk lokasi yang terletak di belahan bumi selatan maka modul surya diorientasikan ke utara.

4. Temperatur

Kinerja sel PLTS dipengaruhi oleh suhu tersebut bahwa semakin tinggi suhu sel maka semakin rendah produksi energi. Sebagai aturan sederhana, kenaikan suhu sebesar 10°C menurunkan output daya yang efektif dari sistem PV sekitar 4% - 5%. Pada saat terjadi temperatur yang tinggi, sel –sel surya kurang efisien. Energi output dari modul dipengaruhi oleh temperatur pada sel –sel surya yang beroperasi. Saat panas sel –sel surya meningkat, tegangan yang melintasi setiap sel akan jatuh dan ketika tegangan menurun maka daya juga akan menurun.

2.1.9.1 Perancangan Sistem PLTS *Grid Connection*

Dalam perancangan ada beberapa kriteria penentuan desain pada penelitian PLTS sistem PLTS ada beberapa tahap yang digunakan:

1. Penilaian lokasi

Bagian pertama dari penilaian situs adalah untuk mengkarakterisasi kondisi fisik lokasi PLTS yaitu, menentukan lintang, bujur, ketinggian, orientasi atap gedung, denah atap, menunjukkan atap yang digunakan untuk instalasi PLTS, menghitung total luas, kemiringan dan sistem pemasangan.

2. Penilaian Radiasi Matahari

Perhitungan radiasi matahari berdasarkan perhitungan secara global atau langsung yang diambil selama siang hari. Perhitungan biasanya menggunakan pyranometer atau pyrhelimeter. Di beberapa lokasi, data ini dikumpulkan lebih dari 20 tahun. Dalam perhitungan berdasarkan data satelit yang terdapat pada meteorological database, termasuk database online yang memiliki informasi tentang radiasi matahari ini. Diantaranya adalah *Photovoltaic Geographical System (PVGIS)* dan database dari *Surface Meteorological and Solar Energy (SMSE)* dari *NASA*.

3. Analisa bayangan (*Shading*)

Penting untuk memahami bayangan (*shading*) pada atap, terutama di daerah perkotaan di mana bangunan sekitarnya dan struktur dapat menghasilkan bayangan di atas atap. Bahkan sebagian kecil dari bayangan (*shading*) pada PLTS dapat secara signifikan mengurangi *output* energi yang dihasilkan. Semua

bagian atap secara idealnya harus tidak terdapat bayangan selama minimal 6 jam sehari antara itu 09:00 – 03:00.

4. Pemilihan Modul

Terdapat tiga jenis utama dari modul surya PV yang tersedia di pasar komersial yaitu, *monocrystalline*, *polycrystalline* dan *Thin film*. Pemilihan modul surya sangat penting dalam menentukan design sistem, pemeliharaan modul surya ditentukan berdasarkan efisiensi modul, area modul dan biaya.

a. Menghitung nilai efisiensi

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{PSI \times A} \times 100\% \quad (2.14)$$

Dengan:

η = Efisiensi modul surya (%)

P_{MPP} = Daya maksimum keluaran modul (Wp)

PSI = *Peak Sun Insolation* atau STC yang bernilai 1000 W/m²

A = Luas permukaan modul surya (m²)

b. Menghitung daya puncak dan modul surya

$$P_{Kwp} = \frac{\text{Energi harian (kWh)}}{\text{Iridiasi harian } \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}\right)} \times PSI \left(\frac{1\text{kW}}{\text{m}^2}\right) \quad (2.15)$$

c. Menghitung jumlah modul

$$\text{Jumlah modul} = \frac{\text{Daya Puncak Modul (total Wp)}}{\text{Daya Output } \left(\frac{\text{Wp}}{\text{modul}}\right)} \quad (2.16)$$

d. Menghitung Luas Area

$$\text{Area (m}^2\text{)} = \text{Jumlah Modul} \times \text{Luas Modul} \quad (2.17)$$

5. Pemilihan Inverter

Pemilihan inverter berkaitan dengan kapasitas modul yang terpasang. Inverter mengubah listrik DC dari panel surya PV untuk listrik AC dengan memaksimalkan output PLTS. Inverter yang akan digunakan diupayakan kapasitas kerjanya mendekati kapasitas daya yang dilayani, sehingga efisiensi kerja inverter menjadi maksimal sesuai kebutuhan daya yang dilayani.

2.1.10. Pemetaan Potensi PLTS Atap Berdasarkan Luas Pemukiman

Penentuan batasan lokasi kajian merupakan penentuan lokasi dimana terdapat pengukuran radiasi matahari dilakukan. Lokasi tersebut merupakan pemukiman rumah dimana tempat tersebut memungkinkan untuk dipasangkan panel surya atap. Penentuan koordinat lokasi permukiman dilakukan dengan cara *mapping* luas pemukiman yang terdapat pada cakupan wilayah kajian dalam kasus ini peneliti mengambil sampel wilayah Daerah Aliran Sungai (DAS) Ciwulan di Kabupaten Tasikmalaya.

1. Penentuan Luas Area Pemukiman

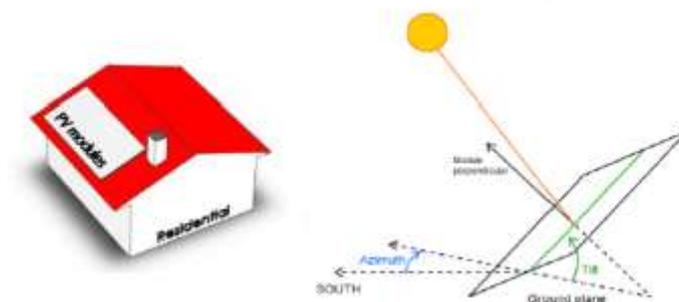
Penentuan Luas Area Permukiman: Area Pemukiman diukur dengan menggunakan informasi dari Badan Informasi Geospasial. Dilakukan penentuan area dari suatu wilayah, kemudian dari area kecamatan tersebut diukur luas permukiman yang terdapat dalam polygon wilayah kecamatan. Luas area pemukiman ini menjadi dasar perhitungan potensi pengembangan pembangkit listrik tenaga surya atap pada wilayah tersebut.

2. Data Intensitas Radiasi Matahari Global

Intensitas radiasi matahari global diperhitungkan secara empiris dilakukan dengan perhitungan-perhitungan yang sesuai dengan literatur yang tersedia. Perhitungan ini membutuhkan data berupa koordinat, ketinggian serta keadaan iklim dari lokasi yang akan dihitung besaran intensitas radiasinya.

3. Perhitungan Luas Atap Tersedia

Tahapan penentuan asumsi fasilitas pembangkit listrik tenaga surya jenis rooftop. Konfigurasi panel surya seperti luas atap tersedia untuk dipasangkan modul PV dan penentuan orientasi panel surya berguna untuk memberikan estimasi keluaran potensi energi. Dalam perhitungan potensi pembangkit listrik tenaga surya, terdapat rugi-rugi listrik yang timbul akibat beberapa faktor seperti konfigurasi atap perumahan dan pemilihan modul PV. Perlu dilakukan pemodelan atau standarisasi model perumahan seperti gambar dibawah. Model perumahan berupa atap dua sisi dengan kemiringan sekitar $\theta = 30^\circ$ terhadap permukaan tanah [11].



Gambar 2. 13 Model standar perumahan dan orientasi *tilt angle* dan *azimuth angle*

Terdapat beberapa pendekatan atau faktor koreksi (C) dalam perhitungan luas permukaan atap tersedia sebagai potensi pembangkit listrik tenaga surya atap, diantaranya [11]:

1. Faktor koreksi karena penggunaan lahan pemukiman sebagai atap (C_{RT}). Diasumsikan hanya sebelah sisi dari atap yang dipasangkan solar PV, sehingga 50% dari luas pemukiman rumah tangga merupakan luasan atap.
2. Faktor koreksi fitur atap (C_F) dimana tidak semua luasan atap dapat dipasangkan modul PV karena sudah terdapat jendela, cerobong asap, atau lainnya. Nilai C_F adalah 0.7.
3. Faktor koreksi penggunaan atap untuk sistem solar termal (C_{ST}). Umumnya di Indonesia tidak ada penggunaan sistem solar termal, sehingga nilai C_{ST} adalah 1.
4. Faktor koreksi terhadap eksploitasi area atap (C_{COV}) melibatkan bayangan beruntun dari seri modul PV. Harus ditetapkan jarak antar modul agar efek ini dapat diminimalisasi. Besarnya C_{COV} ini adalah 0.45.
5. Faktor koreksi akibat bayangan (C_{SH}) oleh bangunan lain yang berpotensi mengganggu penyerapan radiasi matahari. Besarnya C_{SH} ini adalah 0.46.

Sehingga luas atap tersedia:

$$S_{roofavailable} = C_{RT} \times C_F \times C_{ST} \times C_{COV} \times C_{SH} \times S_{roof} \cos \theta \quad (2.18)$$

Dimana :

C_{RT} = Faktor koreksi penggunaan lahan

C_F = Faktor Koreksi fitur atap

C_{ST} = Faktor koreksi penggunaan atap

C_{COV} = Faktor koreksi terhadap eksploitasi area atap

C_{SH} = Faktor koreksi akibat bayangan

$S_{roof} \cos \theta$ = Luas atap tersedia kemiringan atap ($^{\circ}$)

2.1.10.1 Perhitungan Daya Keluaran

Perhitungan daya keluaran yang dihasilkan pembangkit listrik tenaga surya mengasumsikan adanya rugi-rugi energi yang diakibatkan oleh beberapa faktor, diantaranya: rugi akibat efisiensi model PV, rugi akibat depresiasi model PV, rugi akibat sudut tilt dan azimuth, dan rugi instalasi.

Terdapat beberapa pendekatan akibat rugi-rugi yang ditimbulkan oleh modul PV, diantaranya [11]:

1. Efisiensi model PV (η_{MOD}). Model PV yang berbeda akan menghasilkan perbedaan produksi listrik yang berbeda untuk intensitas radiasi yang sama. Secara umum, terdapat 3 teknologi modul PV, yakni: mono crystalline, polycrystalline, dan thin film. Menurut berbagai penelitian nilai efisiensi untuk setiap modul PV adalah: mono-crystalline $\eta_{MC} = 15\%$, poly-crystalline $\eta_{PC} = 12\%$ and thin film $\eta_{TF} = 6\%$.
2. Efisiensi akibat depresiasi atau penurunan keandalan dalam rentang waktu tertentu (η_{TH}). Menurut penelitian, besarnya η_{TH} adalah sebesar 0.9 untuk semua teknologi modul PV.
3. Faktor koreksi akibat sudut instalasi modul PV (sudut azimuth dan sudut tilt) (η_{AZ}). Menurut penelitian, besarnya η_{AZ} adalah sebesar 0.9 untuk semua teknologi modul PV.

4. Faktor koreksi akibat rugi-rugi lainnya (η_{inst}) seperti kemungkinan debu yang menghalangi modul PV, rugi akibat panel elektrik, dan rugi akibat inverter. Menurut penelitian, besarnya η_{inst} adalah sebesar 0.9 untuk semua teknologi modul PV.

Sehingga total potensi daya yang dihasilkan adalah:

$$Output\ Daya = IR \times S_{roof\ available} \times \eta_{mod} \times \eta_{TH} \times \eta_{AZ} \times \eta_{inst} \quad (2.19)$$

Dimana :

IR = Intensitas radiasi matahari global (W/m^2)

η_{mod} = Efisiensi modul PV (%)

η_{TH} = Efisiensi akibat depresiasi (%)

η_{AZ} = faktor koreksi akibat sudut instalasi modul PV

η_{inst} = faktor koreksi akibat rugi-rugi

2.1.11 Data Diskrit dan Kontinu

Data diskrit adalah data yang diperoleh bukan dengan cara mengukur tetapi dengan menghitung atau membilang seperti jumlah meja di ruangan A adalah 20 buah, jumlah orang di toko B ada 12, dan terdapat 30 buah bangunan di kota C. Data diskrit merupakan data dari kategori yang memiliki bilangan pada skala tidak dapat ditempatkan bilangan rasional atau bilangan desimal. Contohnya, pernyataan bahwa 5 anak laki – laki dalam ruangan D tidak dapat dinyatakan sebagai $4 \frac{1}{2}$ atau 4,5 anak, karena bilangan-bilangan yang dihasilkan merupakan jumlah kategori.

Data kontinu adalah data yang diperoleh dari hasil pengukuran yaitu, besarnya dapat menempati semua nilai yang ada di antara dua titik. Data ini

memiliki ciri adanya kesinambungan antaranya suatu bilangan dengan bilangan lain. Bilangan ini ditempatkan pada skala bilangan dimana kedudukan suatu bilangan pada skala itu bersambung satu sama lain. Kesinambungan itu dapat diuji melalui bisa tidaknya menempatkan bilangan rasional atau desimal antara satuan-satuan bilangan tersebut. Misalnya, data skor tes, bilangan yang digunakan bisa berupa bilangan bulat, rasional atau desimal; hasil pengukuran tinggi badan seseorang, luas daerah A sebesar 425,7 km, kecepatan mobil 60/km jam, dan sebagainya.

2.1.12. Distribusi Peluang Kontinu

Distribusi peluang kontinu adalah peubah acak yang dapat memperoleh semua nilai pada skala kontinu. Ruang sampel kontinu adalah bila ruang sampel mengandung titik sampel yang tak terhingga banyaknya. Syarat dari distribusi kontinu adalah apabila fungsi $f(x)$ adalah fungsi padat peluang peubah acak kontinu X yang didefinisikan di atas himpunan semua bilangan riil R bila:

1. $f(x) \geq 0$ untuk semua $x \in R$
2. $\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1$
3. $P(a < X < b) = \int_a^b f(x) dx$

2.1.12.1 Distribusi Weibull

Distribusi yang diperkenalkan oleh Waloddi Weibull ini mempunyai ciri khusus adanya parameter bentuk dan skala masing-masing dilambangkan α dan β . Fungsi distribusi probabilitasnya adalah:

$$f(x, \alpha, \beta) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha} \left[\left(\frac{x}{\alpha} \right)^{\beta-1} \right] \exp \left[- \left(\frac{x}{\alpha} \right)^{\beta} \right], & 0 < x < \infty \\ 0 & \end{cases} \quad (2.20)$$

Keterangan:

α = Parameter skala

β = parameter bentuk

Menurut Otaya (2016) distribusi *Weibull* ini sifatnya fleksibel dalam grafiknya karena tergantung parameter bentuk dan skalanya. Parameter bentuk adalah jenis khusus dari parameter numerik yang menunjukkan bentuk dari kurva. Sedangkan parameter skala adalah jenis khusus dari parameter numerik yang menunjukkan besarnya distribusi data. Semakin besar nilai parameter skala maka distribusi data akan semakin menyebar dan sebaliknya.

Kedua – dua parameter pada distribusi *Weibull* ini dapat diperoleh dengan metode *median rank regression*. Fungsi distribusi kumulatif *Weibull* merupakan fungsi non – linear yang akan ditransformasikan ke fungsi linier dengan menggunakan transformasi logaritma, yaitu:

$$F(x) = 1 - \exp \left(- \frac{x}{\beta} \right)^{\alpha} \quad (2.21)$$

$$1 - F(x) = \exp \left(- \frac{x}{\beta} \right)^{\alpha} \text{ atau}$$

$$\frac{1}{1 - F(x)} = \exp \left[\left(\frac{x}{\beta} \right)^{\alpha} \right]$$

$$\ln \left(\frac{1}{1 - F(x)} \right) = \left(\frac{x}{\beta} \right)^{\alpha}$$

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-F(x)}\right)\right] = \alpha \ln x - \alpha \ln \beta$$

Model *rank regression*-nya misalkan x_1, x_2, \dots, x_n adalah sampel acak berukuran n dengan statistik terurut $x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n)}$ dengan asumsi bahwa sampel berdistribusi Weibull dua parameter dengan parameter α dan β tidak diketahui, dimana $\hat{\beta}_0$ dan $\hat{\beta}_1$ menyatakan estimator dari α dan β .

Untuk sampel berukuran n dari distribusi *Weibull* dengan statistik terurut $x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n)}$, persamaan (2.22) menjadi:

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-\hat{F}(x_i)}\right)\right] = \alpha \ln x_{(i)} - \alpha \ln \beta \quad (2.22)$$

dimana $i=1, 2, \dots, n$ adalah nomor urut ke- i dan $F(x_i)$ adalah estimator non-parametrik dari $F(x_i)$, yaitu estimator *median rank* $F(x_i) = \frac{i-0,3}{n+0,4}$. Dari persamaan (2.23) dapat ditentukan model regresi sebagai berikut:

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-\hat{F}(x_i)}\right)\right] = \alpha \ln x_{(i)} - \alpha \ln \beta + e_i \quad (2.23)$$

$$Y_i = \ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-\hat{F}(x_i)}\right)\right]$$

$$X_i = \ln x_{(i)}$$

$$\beta_1 = \alpha$$

$$\beta_0 = -\alpha \ln \beta$$

Sehingga persamaan (2.16) dapat ditulis sebagai berikut:

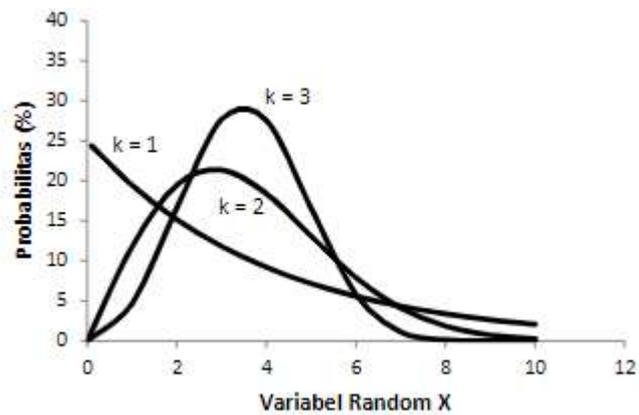
$$\hat{Y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_i + e_i \quad (2.24)$$

Parameter bentuk merupakan parameter yang membantu menentukan bentuk distribusi. Beberapa distribusi, seperti eksponensial atau normal, tidak memiliki parameter bentuk karena mereka memiliki bentuk standar yang tidak berubah. Dalam kasus distribusi normal, bentuknya selalu bentuk lonceng akrab. Pengaruh parameter bentuk distribusi yang tercermin dalam bentuk pdf, fungsi keandalan dan fungsi tingkat kegagalan.

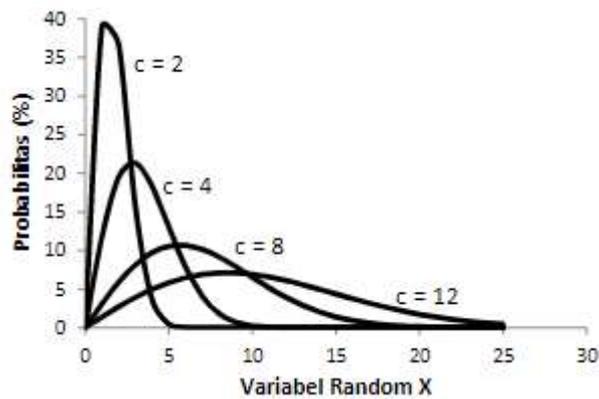
Parameter skala adalah jenis yang paling umum dari parameter. Mayoritas distribusi dalam keandalan atau bidang analisis *survival* memiliki parameter skala. Dalam kasus satu-parameter distribusi, parameter satunya adalah parameter skala. Skala parameter mendefinisikan di mana sebagian besar distribusi terletak, atau bagaimana mengulurkan distribusinya. Dalam kasus distribusi normal, parameter skala adalah standar deviasi.

Karakteristik distribusi *Weibull* dapat dilihat dari nilai parameter bentuk dan skala yang masing-masing dilambangkan α atau k dan β atau c . Pengaruh kedua parameter terhadap karakteristik distribusi *weibull* dapat dilihat pada Gambar 2.14 dan Gambar 2.15. Pada gambar 2.14 terdapat 3 kurva dengan nilai c yang sama namun dengan nilai k yang berbeda. Jika nilai $k = 1$ maka yang ditampilkan kurva yang asimtotis dengan sumbu horisontal dan vertikal karena berupa persamaan eksponensial. Pada kondisi ini distribusi menjadi bentuk distribusi Eksponensial. Sedangkan untuk nilai $k = 2$ menyebabkan distribusi menjadi jenis distribusi

Rayleigh. Pada Gambar 2.15 terdapat 4 kurva yang dibuat dari nilai k yang sama tetapi dengan nilai c yang berbeda. Nilai c semakin kecil maka kurva semakin runcing [12]. Bentuk dasar dari kurva relatif sama namun ukuran (skala) dari kurva berbeda. Berikut adalah Gambar 2.14 and Gambar 2.15.



Gambar 2. 14 Kurva pengaruh nilai skala bentuk (k) terhadap karakteristik distribusi weibull



Gambar 2. 15 Kurva pengaruh nilai skala parameter (c) terhadap karakteristik distribusi weibull

dua parameter adalah:

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad (2.25)$$

Dimana $\frac{1}{\alpha} > 0$, $x > 0$

Keterangan:

α = Parameter skala

β = parameter bentuk

2.1.12.2. Distribusi *Rayleigh*

Metode distribusi *Rayleigh* adalah distribusi khusus dari distribusi *Weibull* dimana jika data yang kurang akurat untuk diolah penyebaran data dengan distribusi *Weibull* maka metode distribusi *Rayleigh* menjadi pilihan lain dalam melihat probabilitas variabel data. Namun, parameter bentuk (k) dari distribusi *Rayleigh* sudah ditetapkan sebagai $k = 2$ dan skala parameter (b) dapat diperoleh dengan menggunakan estimasi parameter dengan metode kemungkinan maksimum.

$$b = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{2n}} \quad (2.26)$$

Dan fungsi densitas *Rayleigh* dapat dihitung dengan rumus seperti berikut:

$$f(x) = \frac{x}{b^2} e^{\left(\frac{-x^2}{2b^2}\right)}, x \geq 0, b > 0 \quad (2.27)$$

Fungsi distribusi kepadatan kumulatif *Weibull* diperoleh dari persamaan di bawah

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x^2}{2b^2}\right)\right) \quad (2.28)$$

Parameter distribusi *Rayleigh* juga dapat ditransformasikan dalam bentuk regresi linear sederhana:

$$Y_i = \beta_1 + \beta_1 x_i \quad (2.29)$$

dengan $Y_i = x_i$, $\beta_0 = 0$, $\beta_1 = b$ dan $X_i = \sqrt{-2 \cdot \ln(1 - F(x_i))}$ dengan

$i = 1, 2, \dots, n$. x_i = variabel bebas. Misalkan untuk $i = 1$

$$Y_1 = X_1$$

$$X_1 = \sqrt{-2 \cdot \ln(1 - F(x_1))}$$

2.1.13 Uji Kolmogorov – Smirnov (Goodness to Fit)

Uji normalitas digunakan untuk mengetahui apakah populasi data berdistribusi normal atau tidak. Prinsip dari uji *kolmogorov-smirnov* adalah menghitung selisih absolut antara distribusi frekuensi kumulatif sampel ($F_0(x)$) dengan distribusi normal baku [$S_n(x)$]. Dalam uji *kolmogorov-smirnov*, diambil hipotesis:

H_0 : Residual berdistribusi normal

H_1 : Residual tidak berdistribusi normal

Dengan menggunakan taraf signifikan α dan statistik uji *DN*, atau nilai *sig* pada *output* SPSS, diambil keputusan bahwa H_0 akan ditolak jika $DN < D(\alpha)$ dimana *DN* merupakan nilai tertinggi dari $|F_0(x) - S_n(x)|$.

2.1.14 Persamaan Regresi Linear Ganda

Hubungan antara satu variabel terikat (Y) dengan dua atau lebih variabel bebas dapat dijelaskan dengan menggunakan model persamaan regresi linear berganda. Tujuan dari uji regresi linier berganda adalah untuk memprediksi nilai variabel terikat (Y) apabila nilai – nilai variabel bebasnya (X_1, X_2, \dots, X_n) diketahui. Disamping itu juga untuk dapat mengetahui bagaimanakah arah hubungan variabel tak bebas dengan variabel – variabel bebasnya. Persamaan regresi linier berganda secara matematik diekspresikan oleh:

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n \quad (2.30)$$

Dimana:

Y = variabel terikat (nilai variabel yang akan diprediksi)

a = konstanta

b_1, b_2, \dots, b_n = Nilai koefisien regresi

X_1, X_2, \dots, X_n = Variabel bebas

Jika terdapat 2 variabel bebas, yaitu X_1 dan X_2 , maka bentuk persamaan regresinya adalah:

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 \quad (2.31)$$

Keadaan – keadaan bila koefisien – koefisien regresi, yaitu b_1 dan b_2 mempunyai nilai:

- a. Nilai = 0, Dalam hal ini variabel Y tidak dipengaruhi oleh X_1 dan X_2
- b. Nilainya negatif = Hubungan terjadi dengan arah terbalik antara variabel terikat Y dengan variabel X_1 dan X_2 .

- c. Nilainya positif = Terjadi hubungan yang searah antara variabel tak bebas Y dengan variabel X_1 dan X_2 .

Koefisien – koefisien regresi b_1 dan b_2 serta konstanta a dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$a = \frac{(\sum Y) - (b_1 \times \sum x_1) - (b_2 \times \sum x_2)}{n}$$

$$b_1 = \frac{[(\sum x_2^2 \times \sum x_1 y) - (\sum x_2 y \times \sum x_1 x_2)]}{[(\sum x_1^2 \times \sum x_2^2) - (\sum x_1 \times x_2)^2]}$$

$$b_2 = \frac{[(\sum x_1^2 \times \sum x_2 y) - (\sum x_1 y \times \sum x_1 x_2)]}{[(\sum x_1^2 \times \sum x_2^2) - (\sum x_1 \times x_2)^2]} \quad (2.32)$$

2.1.15 Indikator Statistik

Indikator statistik adalah representasi data statistik untuk waktu, tempat, atau karakteristik relevan lainnya yang ditentukan, dikoreksi untuk setidaknya satu dimensi (biasanya ukuran) sehingga memungkinkan perbandingan yang bermakna.

Ini adalah ukuran ringkasan yang terkait dengan masalah atau fenomena utama dan berasal dari serangkaian fakta yang diamati. Indikator dapat digunakan untuk mengungkapkan posisi relatif atau menunjukkan perubahan positif atau negatif.

2.1.15.1 Indikator Statistik

Mengukur kekuatan hubungan antar variable predictor X dan response Y, dilakukan analisis korelasi yang hasilnya dinyatakan oleh suatu bilangan yang dikenal dengan koefisien korelasi. Biasanya analisis regresi sering dilakukan bersama-sama dengan analisis korelasi. Persamaan koefisien korelasi

(r) diekspresikan oleh :

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n X_i Y_i - (\sum_{i=1}^n X_i)(\sum_{i=1}^n Y_i)}{\sqrt{[n \sum_{i=1}^n X_i^2 - (\sum_{i=1}^n X_i)^2][n \sum_{i=1}^n Y_i^2 - (\sum_{i=1}^n Y_i)^2]}} \quad (2.32)$$

2.1.15.2 Koefisien Determinasi (R²)

Menurut Kuncoro (2013:246) Uji koefisien korelasi digunakan untuk mengukur seberapa jauh kemampuan model dalam menerangkan variasi variabel terikat. Nilai koefisien determinasi / R² berada pada rentang angka nol (0) dan satu (1) Jika nilai koefisien determinasi yang mendekati angka nol (0) berarti kemampuan model dalam menerangkan variabel terikat sangat terbatas. Sebaliknya apabila nilai koefisien determinasi variabel mendekati satu (1) berarti kemampuan variabel bebas dalam menimbulkan keberadaan variabel terikat semakin kuat.

2.1.16 Uji Signifikansi dan Hipotesis

Pengujian hipotesis dimaksudkan untuk melihat apakah suatu hipotesis yang diajukan ditolak atau dapat diterima. Hipotesis merupakan asumsi atau

pernyataan yang mungkin benar atau salah mengenai suatu populasi. Dengan mengamati seluruh populasi, maka suatu hipotesis akan dapat diketahui apakah suatu penelitian itu benar atau salah. Untuk keperluan praktis, pengambilan sampel secara acak dari populasi akan sangat membantu. Dalam pengujian hipotesis terdapat asumsi/ pernyataan istilah hipotesis nol. Hipotesis nol merupakan hipotesis yang akan diuji, dinyatakan oleh H_0 dan penolakan H_0 dimaknai dengan penerimaan hipotesis lainnya yang dinyatakan oleh H_1 . Jika telah ditentukan Koefisien Determinasi (r^2), maka selanjutnya dilakukan uji signifikan hipotesis yang diajukan. Uji ini dapat menggunakan Uji-t ; Uji-F ; Uji-z atau Uji Chi Kuadrat. Dengan uji signifikansi ini dapat diketahui apakah variable bebas/ predictor/ independent (X) berpengaruh secara signifikan terhadap variable tak bebas/ response/ dependent (Y). Arti dari signifikan adalah bahwa pengaruh antar variable berlaku bagi seluruh populasi. Dalam modul ini hanya dibahas uji signifikansi menggunakan uji-t. Antara langkah dalam melaksanakan uji – t :

1. Langkah-langkah yang perlu dilakukan dalam uji-t pada regresi linier adalah:

Menentukan Hipotesis $H_0 : \beta = 0$; variabel X tidak berpengaruh signifikan/nyata terhadap Y $H_1 : \beta \neq 0$; variabel X berpengaruh signifikan/nyata terhadap Y.

2. Menentukan tingkat signifikansi (α) Tingkat signifikansi, α yang sering digunakan adalah $\alpha = 5\%$ ($\alpha = 0,05$).

3. Menghitung nilai t hitung menggunakan rumus : $t_{hit} = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$

4. Menentukan daerah penolakan H_0 (daerah kritis)

Bentuk pengujian dua arah, sehingga menggunakan uji-t dua arah :

H_0 akan ditolak jika $t_{hit} > t_{tab}$ atau $-(t_{hit}) < -(t_{tab})$, berarti H_1 diterima.

H_0 akan diterima jika $-(t_{hit}) < t_{tab} < t_{hit}$, berarti H_1 ditolak.

5. Menentukan t_{table} (mempergunakan table Uji-t), Tabel Uji-t untuk $\alpha = 5\%$

Dan derajat kebebasan (df) = $n - k$; (n =jumlah sampel/pengukuran, k adalah jumlah variabel (variabel bebas + variabel terikat).

6. Kriteria pengujian t_{hitung} dan t_{tabel}

Bila nilai $t_{hit} < t_{tab}$, maka H_0 diterima, H_1 ditolak

Bila nilai $t_{hit} > t_{tab}$, maka H_0 ditolak, H_1 diterima

7. Kesimpulan hasil uji signifikansi

Uji hipotesis F merupakan pengujian untuk melihat pengaruh semua variabel bebas yang digunakan dalam penelitian secara bersamaan memiliki pengaruh terhadap variabel terikat. Rumus uji hipotesis untuk uji F adalah sebagai berikut:

$$F_{ht} = \frac{R^2/k}{\frac{(1-R^2)}{(n-k-1)}} \quad (2.33)$$

Dimana:

R : Koefisien korelasi ganda

k : Jumlah variabel independent

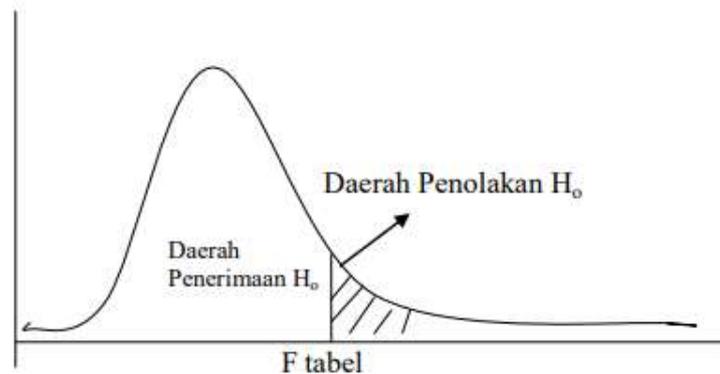
n : Jumlah anggota sampel

Kriteria pengambilan keputusan adalah sebagai berikut:

- H_0 ditolak jika F statistik $< 0,05$ atau $F_{hitung} > F_{tabel}$
- H_0 diterima jika F statistik $> 0,05$ atau $F_{hitung} < F_{tabel}$

Grafik dari hasil analisa uji F ditunjukkan pada Gambar 2.16.

Gambar 2.16 menunjukkan grafik dari hasil analisa uji F [8].



Gambar 2.16 Grafik Uji F

a. *Root Mean Square Error (RMSE)*

Root Mean Square Error adalah salah uji indikator statistik yang digunakan untuk mengukur kebaikan model setelah diperoleh suatu model. RMSE merupakan alat seleksi model berdasarkan pada error hasil estimasi. *Error* yang ada menunjukkan seberapa besar perbedaan hasil estimasi dengan nilai yang akan diestimasi. Nilai ini akan digunakan untuk menentukan model mana yang terbaik. Definisi RMSE dapat ditulis sebagai berikut:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum(X-Y)^2}{n}} \quad (2.32)$$

Dengan :

n = jumlah data

X = Nilai observasi

Y = Nilai prediksi

a. Nash Sutcliffe Efficient (NSE)

Nash-Sutcliffe Model Efficiency (ENS) digunakan untuk mengevaluasi model hasil simulasi. Dalam Kriterianya, simulasi dianggap layak jika nilai ENS > 0,75, memuaskan apabila nilai berada diantara 0,36 – 0,75, dan dikatakan kurang layak apabila nilai < 0,36. *Nash-Sutcliffe Model Efficiency* (ENS) dapat dilihat pada persamaan berikut.

$$E_{NS} = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{abs.i} - Q_{cal.i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{abs.i} - \bar{Q}_{abs.i})^2} \right] \quad (2.33)$$

Dimana Q_{abs} adalah debit aktual yang terukur (m^3/det), Q_{cat} adalah debit hasil simulasi SWAT (m^3/det), dan \bar{Q}_{cat} adalah rata – rata hasil simulasi (m^3/det).

2.2 Kajian Penelitian yang Relevan

Terdapat beberapa penelitian yang relevan dari konsep dan judul penelitian, telah dilakukan oleh peneliti – peneliti sebelumnya, misalnya penelitian yang dilakukan oleh Wahyu Widiyanto (2013), penelitian Andre Pranata S. Depari (2018) dan Albert Gifson, Masbah RT Siregar dan Mohammad Priyo Pambudi yang dilakukan pada tahun 2020:

1. Penelitian oleh Wahyu Widiyanto (2013), membahas tentang penyebaran probabilitas yang biasa dipakai dalam analisis energi angin yaitu distribusi Weibull. Jenis distribusi ini diterapkan untuk menganalisis data angin di Pesisir Cilacap. Data angin yang diolah adalah data dari BMKG Cilacap selama dua tahun (2009 s.d. 2011). Pada wilayah tersebut diperoleh hasil bahwa probabilitas kecepatan angin mengikuti fungsi Weibull dan Rayleigh dengan relatif cukup

baik. Nilai parameter bentuk diperoleh $k = 3,26$, sedangkan parameter skala berturut-turut untuk Weibull adalah $c = 3,64$ dan Rayleigh $Cr = 2,44$. Dengan nilai $k \geq 3$ mengindikasikan bahwa pada daerah tersebut memiliki sifat angin yang teratur dan tidak mengalami banyak variasi kecepatan terhadap waktu. Selain itu diperoleh kecepatan angin rerata di Pesisir Cilacap adalah 3,3 m/d.

2. Penelitian yang dilakukan Andre Pranata S. Depari bertujuan mengetahui pengaruh kecepatan angin dan kelembaban udara terhadap keluaran yang dihasilkan oleh panel surya komersil dengan terlebih dahulu merancang bangun perangkat monitoring untuk memperoleh data yang diinginkan. Metode penelitian digunakan dalam penelitian adalah
3. Merancang, mengukur, mengobservasi dan membandingkan pengukuran menggunakan alat ukur Arduino Meter dan PC sebagai monitor. Mikrokontroller menerima pembacaan data parameter panel surya dari modul sensor dan dikirim ke komputer melalui komunikasi serial koneksi RS232. Data hasil pembacaan sensor ditampilkan dalam bentuk Excel tiap 3 detik, yang kemudian dapat diolah untuk analisa data dari parameter yang dibutuhkan. Pada sistem alat ukur ini pemantauan karakteristik panel surya membaca keadaan lingkungan sekitar panel surya dan hasil keluaran dari panel surya secara real time melalui sensor yang dikontrol oleh Arduino sebagai mikrokontroller nya. Hasil pembacaan sistem monitoring panel surya ini akan ditampilkan pada PC yang terintegrasi ke spreadsheet excel.
4. Penelitian yang dilakukan oleh Albert Gifson, Masbah RT Siregar dan Mohammad Priyo Pambudi yang dilakukan pada tahun 2020 menganalisa

optimasi nilai output sel surya untuk perancangan sistem Pembangkit listrik Tenaga Surya (PLTS) On Grid dengan membangkitkan 60 % dari kapasitas beban di area Learning Farm. Metode dan tahapan penelitian ini menggunakan sifat penelitian eksperimental yang mengacu pada metode kuantitatif dengan perancangan analisa kebutuhan daya listrik menggunakan PLTS di Ecopark Ancol, melalui pendekatan perhitungan dan pengukuran dan menerapkan pada rancang bangun rangkaian dan komponen PLTS yang akan digunakan di ecopark Ancol.

Berdasarkan penelitian yang sudah pernah diteliti sebelumnya, penelitian ini juga mencoba untuk meneliti potensi energi matahari di Kota Medan dengan metode Weibull dan Rayleigh. Radiasi matahari didefinisikan sebagai energi yang dipancarkan oleh matahari dalam bentuk gelombang elektromagnetik mencapai permukaan bumi. Radiasi matahari yang dipancarkan ke bumi dapat dikonversikan oleh sel surya kemudian, dikonversi ke energi listrik. Namun, keterbatasan data radiasi sinar matahari dari stasiun meteorologi di berbagai lokasi di Indonesia karena data hanya dimiliki oleh beberapa lokasi serta tidak merata di seluruh Indonesia. Keterbatasan data ini yang membuat pemikiran untuk mencari pendekatan secara empiris yaitu perhitungan secara matematika untuk mengetahui hubungan radiasi matahari dengan data-data atau parameter meteorologi, astronomi dan geografi yang lebih mudah diperoleh. Perhitungan intensitas radiasi matahari di Kota Medan dihitung dengan pendekatan matahari berdasarkan posisi lintang dan ketinggian dari permukaan laut. Data dihitung untuk wilayah Kota Medan per kecamatan untuk melihat kecamatan di Medan yang memiliki nilai intensitas radiasi

matahari tertinggi dan terendah. Hasil perhitungan data diuji keakuratan data berdasarkan uji validasi statistik yaitu, koefisien determinasi (r^2), root mean square error (RMSE) dan nash sutchlife efficiency (NSE) dengan membandingkan data yang dicatat per hari dari satelit pvgis.

Korelasi antara data cuaca di Kota Medan yang diperoleh dari stasiun BMKG dan intensitas radiasi matahari dianalisis untuk mengetahui pengaruh parameter cuaca seperti suhu udara, curah hujan, kecepatan angin, lamanya penyinaran matahari dan kelembapan udara terhadap hasil keluaran radiasi di Kota Medan. Metode analisis yang digunakan untuk mengetahui korelasi antara parameter cuaca dengan intensitas radiasi matahari adalah analisis regresi linear sederhana.

Karakteristik intensitas matahari diolah kembali menggunakan metode Weibull dan Rayleigh untuk mendapatkan nilai estimasi potensi energi matahari di Kota Medan. Pemetaan potensi pengembangan PLTS atap berdasarkan luas area pemukiman merupakan estimasi daya keluaran yang dihasilkan PLTS. Daya memiliki satuan Watt, dengan kata lain pemetaan potensi PLTS atap membutuhkan data intensitas radiasi matahari global dengan satuan (Watt/m^2) beserta luas atap tersedia yang memiliki satuan (m^2). Luas atap tersedia merupakan luasan atap yang secara sepenuhnya menyerap cahaya matahari. Luas atap tersedia dihitung dengan mempertimbangkan faktor koreksi fitur dan pengaruh bayangan. Perhitungan daya keluaran mempertimbangkan faktor pengurangan efisiensi modul PV berupa model panel surya, depresiasi, orientasi, dan rugi instalasi [11].

2.3 Kerangka Berfikir / Konseptual

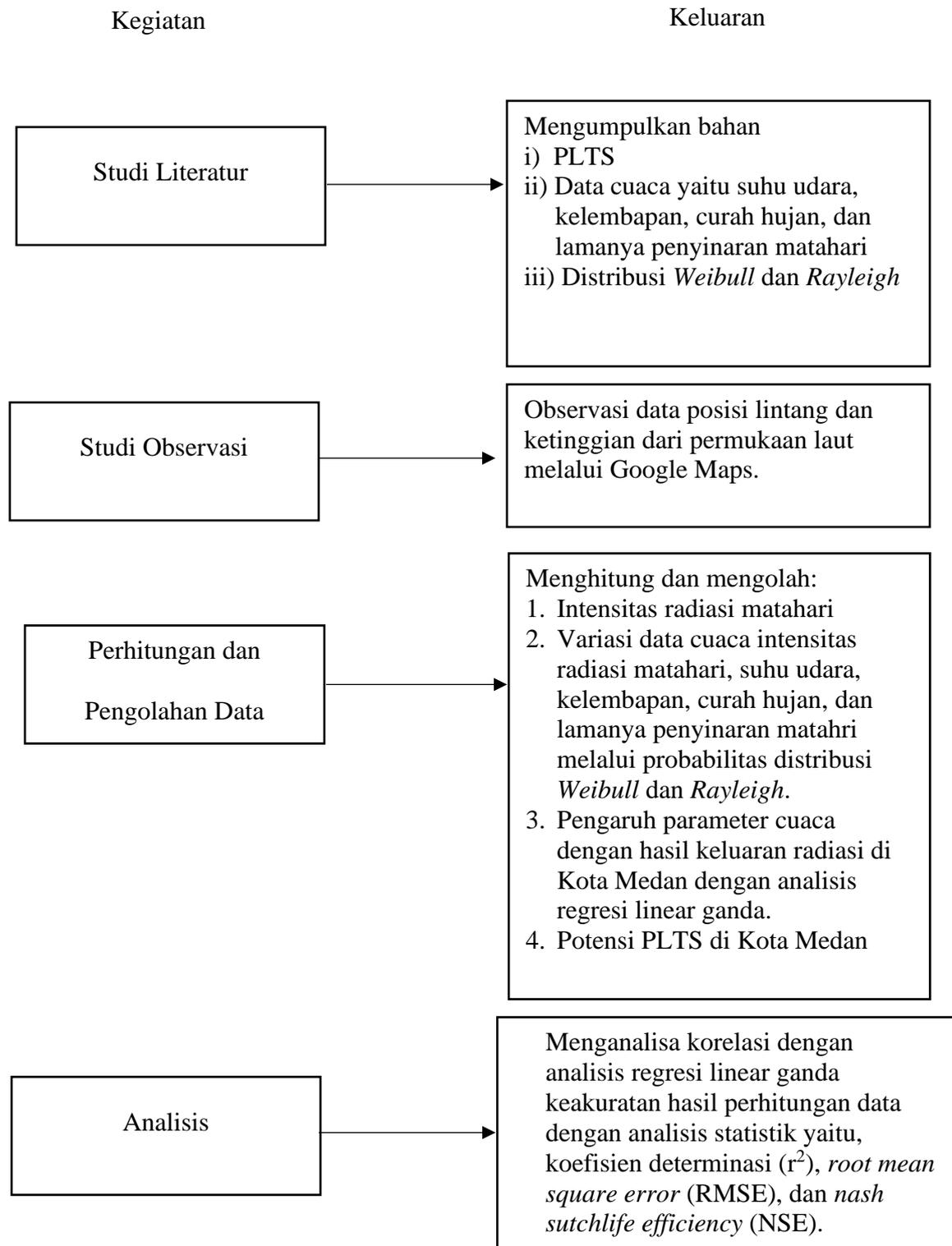
Penelitian ini juga mencoba untuk meneliti potensi energi matahari di Kota Medan dengan metode Weibull dan Rayleigh. Radiasi matahari didefinisikan sebagai energi yang dipancarkan oleh matahari dalam bentuk gelombang elektromagnetik mencapai permukaan bumi. Radiasi matahari yang dipancarkan ke bumi dapat dikonversikan oleh sel surya kemudian, dikonversi ke energi listrik. Namun, keterbatasan data radiasi sinar matahari dari stasiun meteorologi di berbagai lokasi di Indonesia karena data hanya dimiliki oleh beberapa lokasi serta tidak merata di seluruh Indonesia. Keterbatasan data ini yang membuat pemikiran untuk mencari pendekatan secara empiris yaitu perhitungan secara matematika untuk mengetahui hubungan radiasi matahari dengan data-data atau parameter meteorologi, astronomi dan geografi yang lebih mudah diperoleh. Perhitungan intensitas radiasi matahari di Kota Medan dihitung dengan pendekatan matahari berdasarkan posisi lintang dan ketinggian dari permukaan laut. Data dihitung untuk wilayah Kota Medan per kecamatan untuk melihat kecamatan di Medan yang memiliki nilai intensitas radiasi matahari tertinggi dan terendah. Hasil perhitungan data diuji keakuratan data berdasarkan uji validasi statistik yaitu, koefisien determinasi (r^2), root mean square error (RMSE) dan nash sutchlife efficiency (NSE) dengan membandingkan data yang dicatat per hari dari satelit pvgis.

Korelasi antara data cuaca di Kota Medan yang diperoleh dari stasiun BMKG dan intensitas radiasi matahari dianalisis untuk mengetahui pengaruh parameter cuaca seperti suhu udara, curah hujan, kecepatan angin, lamanya penyinaran matahari dan kelembapan udara terhadap hasil keluaran radiasi di Kota

Medan. Metode analisis yang digunakan untuk mengetahui korelasi antara parameter cuaca dengan intensitas radiasi matahari adalah analisis regresi linear sederhana.

Karakteristik intensitas matahari diolah kembali menggunakan metode *Weibull* dan *Rayleigh* untuk mendapatkan nilai estimasi potensi energi matahari di Kota Medan. Pemetaan potensi pengembangan PLTS atap berdasarkan luas area pemukiman merupakan estimasi daya keluaran yang dihasilkan PLTS. Daya memiliki satuan Watt, dengan kata lain pemetaan potensi PLTS atap membutuhkan data intensitas radiasi matahari global dengan satuan (Watt/m^2) beserta luas atap tersedia yang memiliki satuan (m^2). Luas atap tersedia merupakan luasan atap yang secara sepenuhnya menyerap cahaya matahari.

Luas atap tersedia dihitung dengan mempertimbangkan faktor koreksi fitur dan pengaruh bayangan. Perhitungan daya keluaran mempertimbangkan faktor pengurangan efisiensi modul PV berupa model panel surya, depresiasi, orientasi, dan rugi instalasi [11]. Diagram kerangka berfikir dapat dilihat pada Gambar 2.17.



Gambar 2. 16 Diagram kerangka berfikir

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif, yaitu penelitian yang menekankan analisis pada data – data numerik yang diolah dengan metode statistika. Metode penelitian kuantitatif adalah metode penelitian dengan pendekatan deduktif yaitu berasal dari teori umum yang diimplementasikan atau diuji untuk kasus khusus atau disebut uji empiris berlandaskan pada filsafat positivisme, digunakan untuk meneliti pada populasi atau sampel tertentu, pengumpulan data menggunakan instrumen penelitian, analisis data bersifat kuantitatif/statistik, dengan tujuan untuk menguji variabel yang telah ditetapkan. Penelitian kuantitatif dalam penelitian ini dilakukan untuk mengetahui nilai variabel, baik satu variabel atau lebih (independen) tanpa atau dengan membuat perbandingan atau menghubungkan dengan variabel yang lain. Tinjauan pustaka dimanfaatkan untuk dijadikan panduan agar rumusan dan tujuan penelitian dapat sesuai dengan fakta di lapangan.

Teknik pengujian hasil dari penelitian ini adalah dengan cara menggunakan uji indikator statistik yaitu determinasi koefisien (R^2), RMSE dan NSE untuk melihat mengukur seberapa jauh kemampuan model dalam menerangkan variasi variabel terikat. Perhitungan probabilitas penyebaran data adalah dengan menggunakan metode *Weibull* dan *Rayleigh* namun sebelum dihitung probabilitas data maka diuji dahulu dengan menggunakan uji Kolmogorov - Smirnov untuk mengecek kesesuaian data pada distribusi *Weibull* dan *Rayleigh*. Korelasi antara

data cuaca di Kota Medan yang diperoleh dari stasiun BMKG dan intensitas radiasi matahari dianalisis untuk mengetahui pengaruh parameter cuaca seperti suhu udara, curah hujan, kecepatan angin, lamanya penyinaran matahari dan kelembapan udara terhadap hasil keluaran radiasi di Kota Medan. Metode analisis yang digunakan untuk mengetahui korelasi antara parameter cuaca dengan intensitas radiasi matahari adalah analisis regresi linear ganda.

Karakteristik intensitas matahari diolah kembali menggunakan metode Weibull dan Rayleigh untuk mendapatkan nilai estimasi potensi energi matahari di Kota Medan. Pemetaan potensi pengembangan PLTS atap berdasarkan luas area pemukiman merupakan estimasi daya keluaran yang dihasilkan PLTS. Daya memiliki satuan Watt, dengan kata lain pemetaan potensi PLTS atap membutuhkan data intensitas radiasi matahari global dengan satuan (Watt/m^2) beserta luas atap tersedia yang memiliki satuan (m^2).

Dalam pelaksanaan penelitian ini, dilakukan beberapa langkah – langkah tahapan. Tahapan proses penelitian yang dilakukan dapat digambarkan pada *flowchart* seperti Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Flowchart penelitian

Pada flowchart penelitian (Gambar 3.1) tahapan proses penelitian dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Mengumpulkan data posisi lintang dan ketinggian dari permukaan laut di Kota Medan per kecamatan yang diambil dari *Google Earth*. Selain itu mengumpulkan data cuaca dari BMKG yaitu, suhu udara, kelembapan, lamanya penyinaran matahari, curah hujan dan kecepatan angin setiap bulan selama 1 tahun dari tanggal 1 Januari 2021 sehingga 31 Desember 2021. Hal ini juga dilakukan untuk pengumpulan data intensitas radiasi matahari di Kota Medan per hari dari satelit *pvgis* selama 1 tahun dari 1 Januari 2021 sehingga 31 Desember 2021.
2. Menghitung secara teori intensitas radiasi matahari di Kota Medan per kecamatan dan hasil perhitungan dianalisa dengan membandingkan intensitas radiasi matahari di Kota Medan secara perhitungan dengan yang melalui data satelit *pvgis* dari Januari sehingga Desember. Perbandingan dilakukan untuk menguji validasi data dengan menggunakan uji indikator statistik yaitu, determinasi koefisien (r^2), *Root Mean Square Error* (RMSE), dan *nash sutchlife Efficiency* (NSE).
3. Jika data intensitas radiasi matahari secara perhitungan terbukti valid maka, data tersebut diolah kembali dengan metode distribusi *Weibull* dan *Rayleigh*. Hasil probabilitas fungsi distribusi kepadatan peluang dan kepadatan kumulatif digunakan dalam melihat karakteristik dan nilai yang diambil sebagai frekuensi tertinggi di setiap bulan. Di samping data cuaca dari BMKG yaitu, suhu udara, kelembapan, lamanya penyinaran matahari, curah hujan dan kecepatan angin

juga diolah dengan distribusi *Weibull* dan *Rayleigh* untuk melihat karakteristik data setiap bulan selama 1 tahun.

4. Data yang telah diolah dianalisa kembali menggunakan analisis regresi linear ganda untuk mengetahui parameter cuaca yang mempengaruhi keluaran radiasi di Kota Medan.
5. Potensi PLTS di Kota Medan dihitung berdasarkan pemetaan lokasi dengan menggunakan data luas pemukiman dan intensitas radiasi matahari.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Tempat yang dijadikan lokasi penelitian adalah Kota Medan dan kecamatan Kota Medan yang berjumlah 21 kecamatan.

Waktu penelitian adalah perhitungan analisa yang diteliti selama 1 tahun dari bulan Januari hingga Desember.

3.3 Populasi dan Sampel

Populasi adalah keseluruhan obyek atau subyek penelitian. Sedangkan sampel dan sampling adalah bagian dari jumlah yang dimiliki oleh populasi serta cara mengambil sampel yang mewakili dari populasi .

3.3.1 Populasi

Arikunto mendefinisikan bahwa: “Populasi adalah keseluruhan subyek penelitian.” Sedangkan menurut Sugiyono “Populasi adalah wilayah generalisasi yang terdiri dari obyek atau subyek yang menjadi kuantitas dan karakteristik

tertentu yang ditetapkan oleh peneliti untuk dipelajari dan kemudian ditarik kesimpulannya”. Populasi dalam penelitian ini adalah data intensitas radiasi matahari dan data cuaca yaitu suhu udara, kelembapan, curah hujan, lamanya penyinaran matahari, dan kecepatan angin dicatat dan didokumentasikan per hari setiap bulan selama 1 tahun.

3.3.2 Sampel

Sampel adalah bagian dari jumlah dan karakteristik yang dimiliki oleh populasi tersebut. Sampel dalam penelitian ini adalah rata – rata intensitas radiasi matahari dan data cuaca yaitu suhu udara, kelembapan, curah hujan, lamanya penyinaran matahari, dan kecepatan angin setiap bulan selama 1 tahun.

3.4 Teknik Pengumpulan Data Penelitian

Teknik pengumpulan data yang dilakukan dalam penelitian ini, adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Studi literatur ini digunakan untuk mencari data penelitian mengenai analisis potensi energi surya yang meliputi studi faktor – faktor yang mempengaruhi PLTS dan parameter cuaca yang mempengaruhi intensitas radiasi matahari.

2. Pengumpulan Data

Melakukan pengumpulan data mengenai:

1. Posisi lintang Kota Medan per kecamatan serta ketinggian lokasi dari permukaan laut.
2. Intenstitas radiasi matahari dari satelit pvgis di Kota Medan dari tanggal 1 Januari hingga 31 Desember.
3. Data cuaca dari BMKG yaitu, suhu udara, kelembapan, curah hujan, kecepatan angin, dan lamanya penyinaran matahari.
4. Luas pemukiman di Kota Medan.

3. Pengolahan Data dan Analisa

Melakukan perancangan data yang telah dikumpulkan dan menganalisis data tersebut serta melakukan pengujian dengan data tersebut.

3.5 Teknik Analisa Data

Teknik analisis data merupakan suatu langkah yang paling menentukan dari suatu penelitian, karena analisa data berfungsi untuk menyimpulkan hasil penelitian. Teknik analisis data dalam penelitian ini dilakukan sebagai berikut:

1. Tahap Penelitian

Pada tahap ini peneliti melakukan proses penelitian yang berupa merencanakan pengambilan data mengenai analisis potensi energi surya dengan menghitung keluaran daya dari PLTS berdasarkan luas pemukiman dan intensitas radiasi matahari.

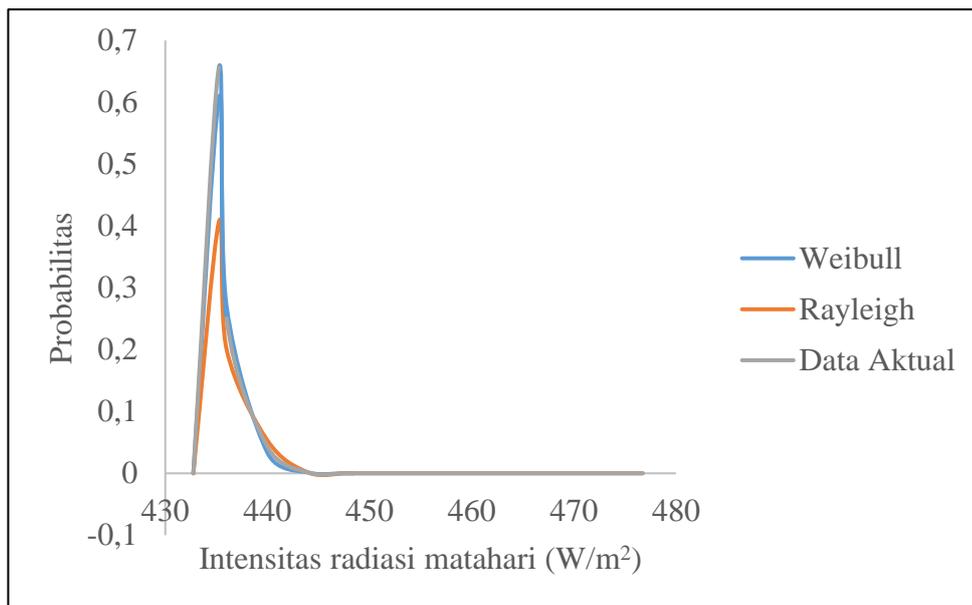
2. Instrumen Penelitian

Instrumen penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah data intensitas radiasi matahari di Kota Medan per kecamatan beserta data cuaca yang diperoleh dari BMKG yaitu, suhu udara, kelembapan, lamanya penyinaran matahari, kecepatan angin, dan curah hujan.

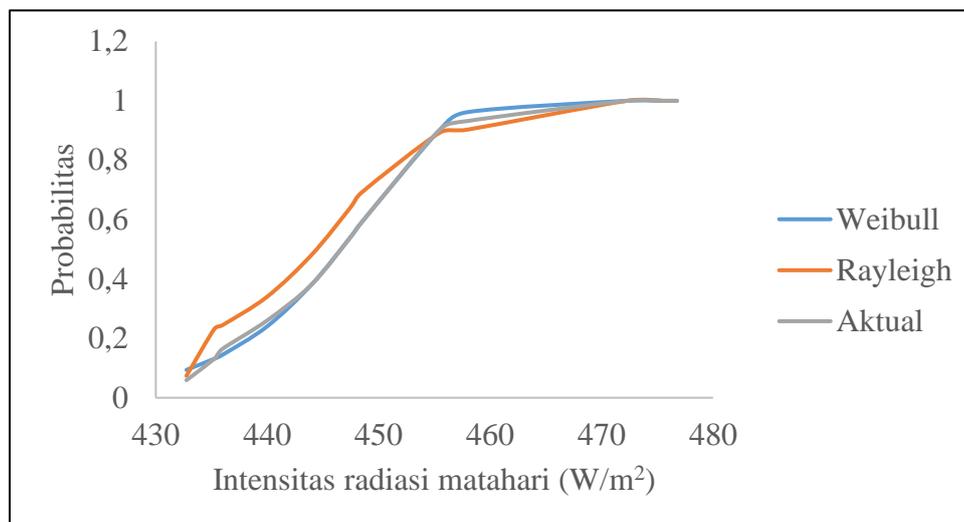
BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1. Deskripsi Hasil Penelitian

Variasi data intensitas radiasi matahari yang diolah menggunakan metode distribusi peluang *Weibull* diperoleh nilai $k = 1,6$ dan $c = 4,4$ dan menunjukkan grafik yang menyerupai data aktual. Selain itu, variasi data intensitas radiasi matahari yang diolah menggunakan metode distribusi peluang *Rayleigh* diperoleh nilai $k = 2$ dan $c = 3$. Grafik PDF dan CDF intensitas radiasi matahari menggunakan analisis *Weibull* dan *Rayleigh* dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2.



Gambar 4. 1 Grafik PDF *Weibull* dan *Rayleigh* intensitas radiasi matahari

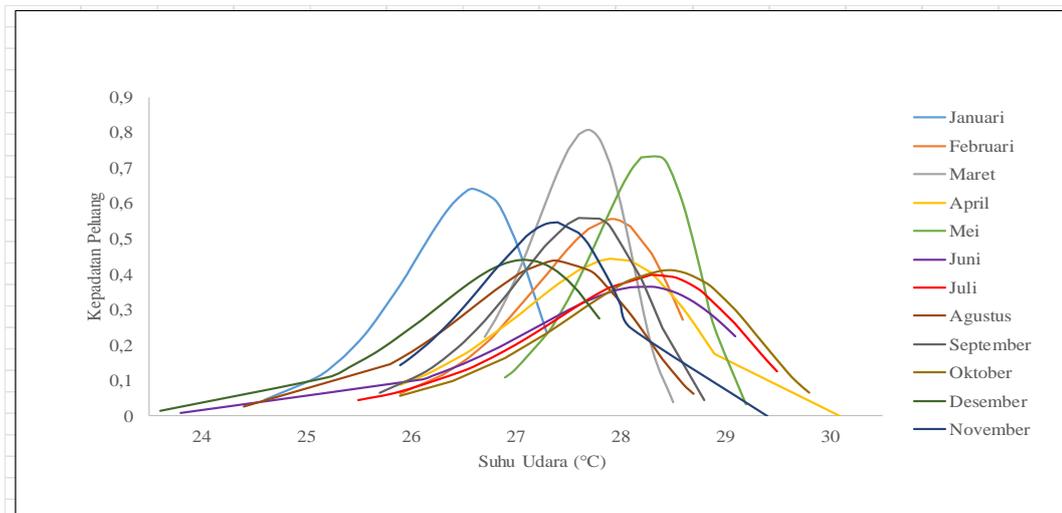


Gambar 4. 2 Grafik CDF *Weibull* dan *Rayleigh* intensitas radiasi matahari

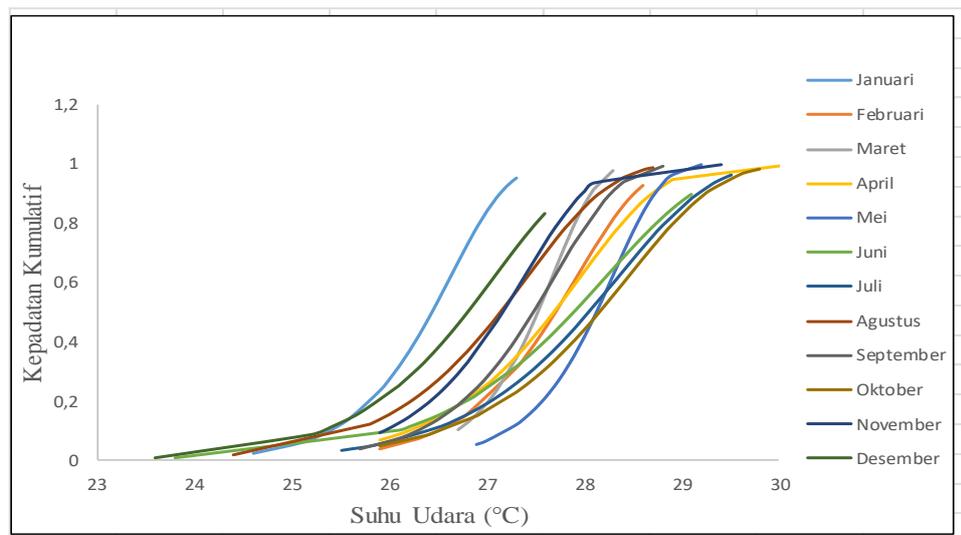
Karakteristik data setiap parameter cuaca dan intensitas radiasi matahari yang dianalisa menggunakan distribusi fungsi *weibull* dan *rayleigh* ditampilkan dalam bentuk grafik agar memudahkan dalam mengambil kesimpulan data frekuensi bagi variabel yang diteliti.

1. Suhu Udara (°C)

Hasil perhitungan dari fungsi kepadatan peluang (PDF) dan fungsi kepadatan kumulatif (CDF) dari metode distribusi *weibull* ditampilkan dalam bentuk diagram batang yang dapat dilihat pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4.



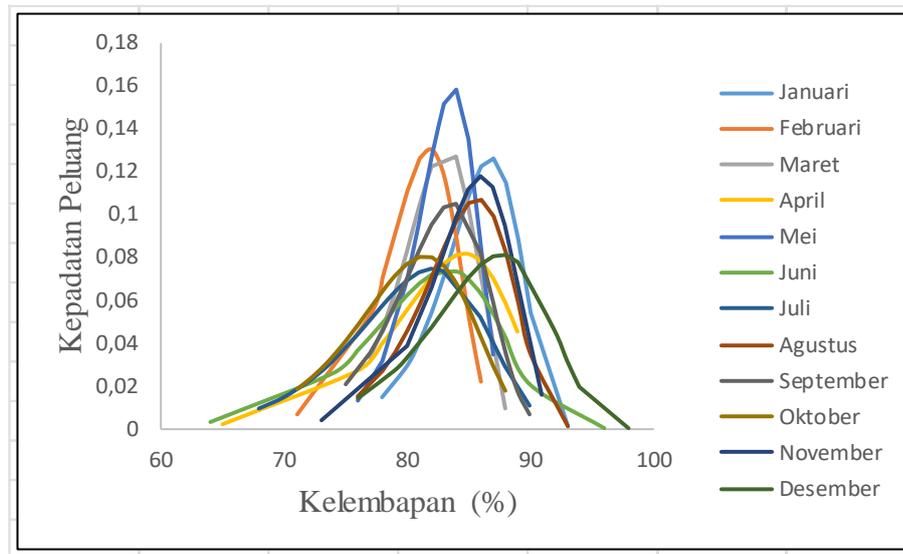
Gambar 4. 3 Diagram batang hasil fungsi kepadatan peluang suhu udara per bulan berdistribusi *weibull*



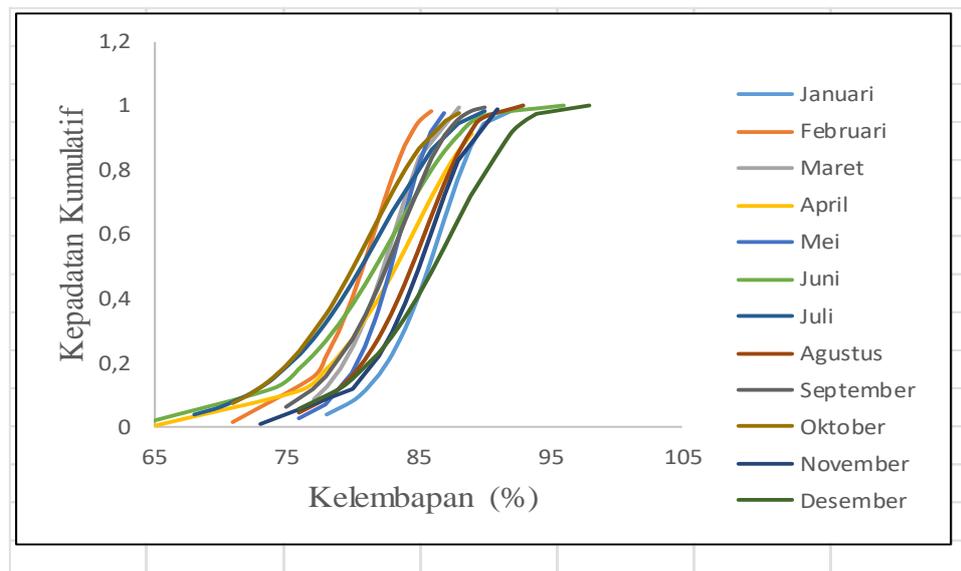
Gambar 4. 4 Diagram batang hasil fungsi kepadatan kumulatif suhu udara per bulan berdistribusi *weibull*

2. Kelembapan

Hasil perhitungan dari fungsi kepadatan peluang (PDF) dan fungsi kepadatan kumulatif (CDF) dari metode distribusi *weibull* ditampilkan dalam bentuk diagram batang yang dapat dilihat pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6.



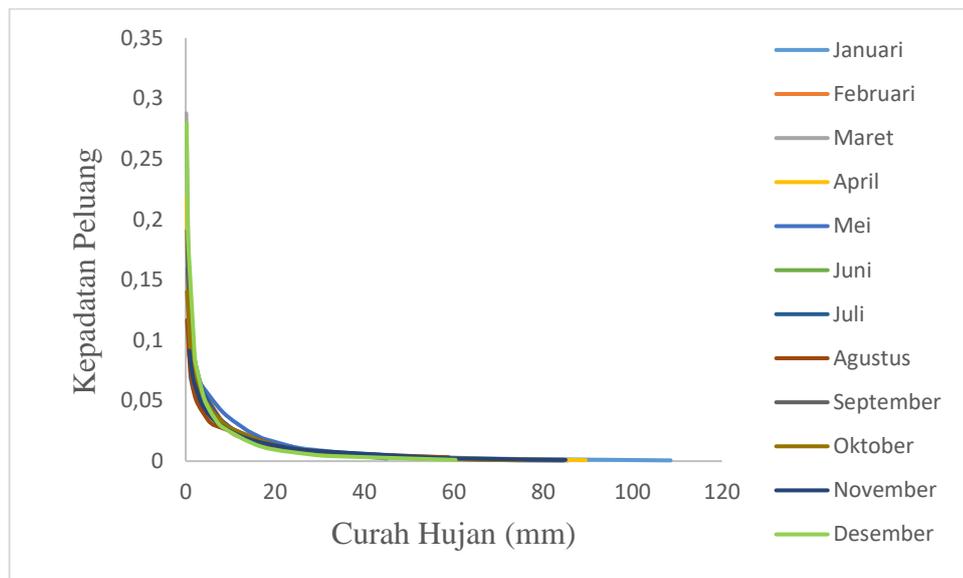
Gambar 4. 5 Diagram batang hasil fungsi kepadatan peluang kelembapan per bulan berdistribusi *weibull*



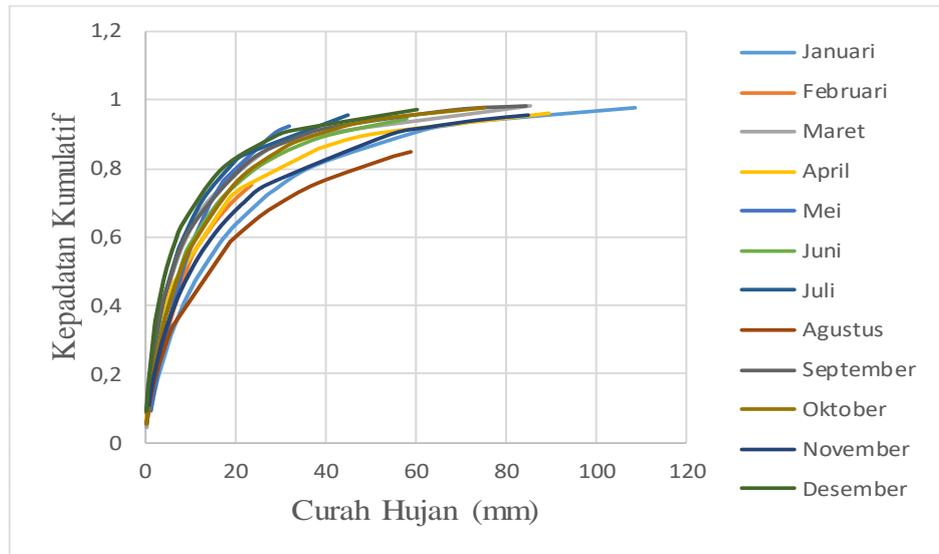
Gambar 4. 6 Diagram batang hasil fungsi kepadatan kumulatif kelembapan per bulan berdistribusi *weibull*

3. Curah Hujan (mm)

Hasil perhitungan dari fungsi kepadatan peluang (PDF) dan fungsi kepadatan kumulatif (CDF) dari metode distribusi *weibull* ditampilkan dalam bentuk diagram batang yang dapat dilihat pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8.



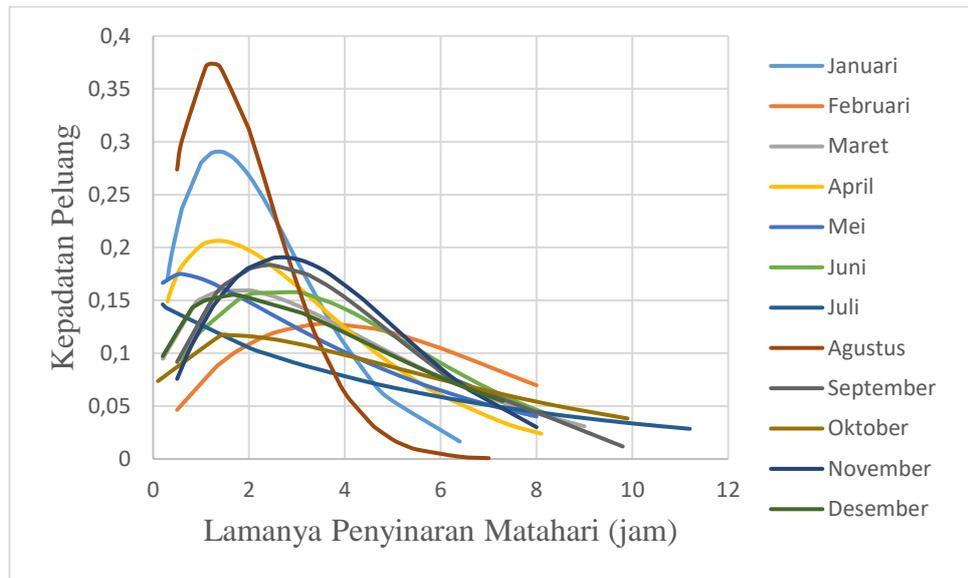
Gambar 4. 7 Diagram batang hasil fungsi kepadatan peluang Curah hujan per bulan berdistribusi *weibull*



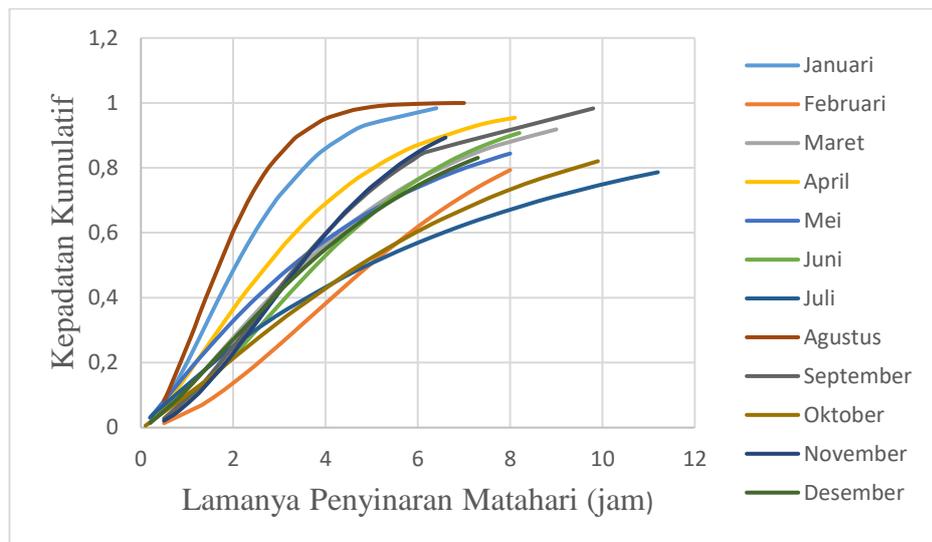
Gambar 4. 8 Diagram batang hasil fungsi kepadatan kumulatif Curah hujan per bulan berdistribusi *weibull*

4. Lamanya Penyinaran Matahari (jam)

Data lamanya penyinaran matahari setelah diuji dengan uji Kolmogorov – Smirnov menunjukkan hasil bahwa data ini sesuai digunakan dalam kedua – dua fungsi distribusi *Weibull* maupun *Rayleigh* namun, hasil uji kualitas data dengan determinasi koefisien menunjukkan bahwa hasil frekuensi atau probabilitas dari fungsi distribusi *Weibull* lebih baik berbanding dengan *Rayleigh*. Hasil uji kualitas data ditampilkan pada bagian Lampiran. Hasil perhitungan dari fungsi kepadatan peluang (PDF) dan fungsi kepadatan kumulatif (CDF) dari metode distribusi *weibull* ditampilkan dalam bentuk diagram batang yang dapat dilihat pada Gambar 4.9 dan Gambar 4.10.



Gambar 4. 9 Diagram batang PDF Lamanya penyinaran matahari per bulan berdistribusi weibull



Gambar 4. 10 Diagram batang CDF Lamanya penyinaran matahari per bulan berdistribusi weibull

Hasil perhitungan uji kualitas data intensitas radiasi matahari ditampilkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Hasil Perhitungan uji kualitas data intensitas radiasi matahari di Kota Medan

No	Nilai Aktual (X)	Nilai Observasi (Y)	R ²	RMSE	NSE
1	435,25	439,75	0,95	5,73	0,98
2	448,5	456,75			
3	475,5	473,32			
4	476,75	474,59			
5	458	459,16			
6	435,5	447,81			
7	444	445,83			
8	435,75	438,93			
9	472,25	476,42			
10	455,5	456,47			
11	447,5	453,78			
12	432,75	439			

Berikut adalah perhitungan nilai koefisien regresi dan hasil berikut diperoleh dengan bantuan analisis data melalui *Microsoft Excel*. Berikut adalah hasil data yang diperoleh pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Nilai Koefisien untuk analisis regresi linear berganda

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	2037,767797	843,026557	2,417205	0,060325
26,33	-14,94946668	17,44073191	-0,85716	0,430515
85,42	-12,94690003	4,912631772	-2,63543	0,04623
19,24	-0,679993557	1,175865103	-0,57829	0,588135
2,1	-23,26720853	9,354985768	-2,48715	0,055354
1,13	0,358079506	18,65987955	0,01919	0,985432

Hasil pengolahan data untuk uji simultan (F) disajikan pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Uji Simultan (F)

	<i>df</i>	<i>Sum of squares</i>	<i>Mean Squares</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	5	1533,366	306,6732	2,002674	0,232089071
Residual	5	765,6592	153,1318		
Total	10	2299,025			

Berdasarkan tabel 4.4, diperoleh nilai koefisien determinasi adalah 0,67, artinya sebesar 67% faktor-faktor nilai intensitas radiasi matahari dapat dijelaskan oleh suhu udara, kelembapan ,lama penyinaran matahari, curah hujan , dan kecepatan angin. Sedangkan sisanya 34% dapat dijelaskan oleh faktor-faktor lain yang tidak diteliti dalam penelitian ini. Berikut adalah nilai koefisien determinasi pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Nilai koefisien determinasi

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0,816678367
R Square	0,666963555
Adjusted R Square	0,33392711
Standard Error	12,37464478
Observations	11

4.2 Pembahasan Penelitian

Pengaruh parameter cuaca terhadap keluaran radiasi matahari di Kota Medan dianalisa dengan analisis regresi linear ganda. Nilai setiap parameter cuaca per bulan dihitung probabilitas melalui hasil distribusi probabilitas PDF dan CDF

dari distribusi weibull maupun rayleigh sedangkan radiasi matahari diambil dari rata – rata radiasi matahari per bulan di Kota Medan.

Nilai koefisien yang diperoleh melalui analisis regresi linear berganda adalah sebagai berikut:

b_1 = Suhu Udara

b_2 = Kelembapan

b_3 = Curah Hujan

b_4 = Lama Penyinaran Matahari

b_5 = Kecepatan Angin

Nilai koefisien yang diperoleh dapat membentuk persamaan regresi yaitu,

$$\text{Intensitas Radiasi Matahari} = 2037,77 - 14,95 - 12,95 - 0,68 - 23,27 + 0,36 \quad (4.4)$$

Persamaan regresi (4.4) dapat diartikan sebagai berikut:

1. Nilai koefisien untuk variabel suhu udara bernilai negatif sebesar 14,95. Hal ini menunjukkan bahwa dengan mengasumsikan diabaikannya variabel bebas lainnya, jika variabel suhu udara meningkat sebesar 1% maka dapat mempengaruhi penurunan nilai intensitas radiasi matahari sebesar 14,95.
2. Nilai koefisien untuk variabel kelembapan bernilai negatif sebesar 12,95. Hal ini menunjukkan bahwa dengan mengasumsikan diabaikannya variabel bebas lainnya, jika variabel kelembapan meningkat sebesar 1% maka dapat mempengaruhi penurunan nilai intensitas radiasi matahari sebesar 12,95.
3. Nilai koefisien untuk variabel curah hujan bernilai negatif sebesar 0,68. Hal ini menunjukkan bahwa dengan mengasumsikan diabaikannya variabel bebas

- lainnya, jika variabel curah hujan meningkat sebesar 1% maka dapat mempengaruhi penurunan jumlah intensitas radiasi matahari sebesar 0,68.
4. Nilai koefisien untuk variabel lama penyinaran matahari bernilai positif sebesar 23,27. Hal ini menunjukkan bahwa dengan mengasumsikan diabaikannya variabel bebas lainnya, jika variabel lama penyinaran matahari meningkat sebesar 1% maka dapat mempengaruhi peningkatan jumlah intensitas radiasi matahari sebesar 23,27.
 5. Nilai koefisien untuk variabel kecepatan angin bernilai positif sebesar 0,36. Hal ini menunjukkan bahwa dengan mengasumsikan diabaikannya variabel bebas lainnya, jika variabel kecepatan angin meningkat sebesar 1% maka dapat mempengaruhi peningkatan jumlah intensitas radiasi matahari sebesar 0,36 .

Pengambilan uji hipotesis melalui hasil data pada Tabel 4.3 dapat dibuat kesimpulan melalui analisis uji T yaitu:

Hipotesis awal dan hipotesis alternatif pada uji T adalah:

H_0 : secara parsial tidak ada pengaruh signifikan variabel rata – rata suhu udara, kelembapan, curah hujan, lamanya penyinaran matahari, dan kecepatan angin terhadap intensitas radiasi matahari.

H_1 : secara parsial terdapat pengaruh signifikan variabel rata – rata suhu udara, kelembapan, curah hujan, lamanya penyinaran matahari, dan kecepatan angin terhadap intensitas radiasi matahari.

Nilai T tabel dengan derajat kebebasan 5 dan derajat kepercayaan 0,05 untuk uji dua sisi sehingga adalah dengan demikian, untuk:

a) Variabel Suhu Udara

Berdasarkan Tabel 4.15 diperoleh nilai T-Value = - 0,86 dan P-Value = 0,43 sehingga $T\text{-Value} > T_{\text{tabel}} (-0,86 < 2,57)$ dan $P\text{-Value} > 0,05$, artinya H_0 ditolak. Dengan demikian, variabel suhu udara secara parsial berpengaruh signifikan terhadap variabel intensitas radiasi matahari.

b) Variabel kelembapan

Berdasarkan Tabel 4.15 diperoleh nilai T-Value = -2,63 dan P-Value = 0,046 sehingga $T\text{-Value} < -T_{\text{tabel}} (-2,63 < 2,57)$ dan $P\text{-Value} < 0,05$, artinya H_0 ditolak. Dengan demikian, variabel kelembapan secara parsial berpengaruh signifikan terhadap variabel intensitas radiasi matahari.

c) Variabel Lama Penyinaran Matahari

Berdasarkan Tabel 4.15 diperoleh nilai T-Value = -2,49 dan P-Value = 0,055 sehingga $T\text{-Value} < -T_{\text{tabel}} (-2,49 < 2,57)$ dan $P\text{-Value} > 0,05$, artinya H_0 ditolak. Dengan demikian, variabel lama penyinaran matahari secara parsial berpengaruh signifikan terhadap variabel intensitas radiasi matahari.

d) Variabel Curah Hujan Berdasarkan Gambar 7 diperoleh nilai T-Value = 2,487 dan P-Value = 0,055, sehingga $T\text{-Value} < T_{\text{tabel}} (0,65 < 2,57)$ dan $P\text{-Value} > 0,05$, artinya H_0 diterima. Dengan demikian, variabel curah hujan secara parsial tidak berpengaruh signifikan terhadap variabel intensitas radiasi matahari.

e) Variabel kecepatan angin berdasarkan Gambar 7 diperoleh nilai T-Value = 0,019 dan P-Value = 0,098 sehingga $T\text{-Value} > -T_{\text{tabel}} (0,019 > -2,00758)$ dan $P\text{-Value} > 0,05$, artinya H_0 diterima. Dengan demikian, variabel kecepatan angin secara parsial berpengaruh signifikan terhadap variabel intensitas radiasi matahari.

Hipotesis awal dan hipotesis alternatif pada uji F adalah:

H₀ : variabel suhu udara, kelembapan, lama penyinaran matahari, curah hujan, dan kecepatan angin tidak mempunyai pengaruh yang signifikan secara bersama-sama terhadap variabel intensitas radiasi matahari.

H₁ : variabel suhu udara, kelembapan, lama penyinaran matahari, curah hujan, dan kecepatan angin mempunyai pengaruh yang signifikan secara bersama-sama terhadap variabel produktivitas. Berdasarkan Tabel 4.3, dapat diketahui bahwa nilai F_{hitung} adalah 2,003 dan F_{tabel} dengan derajat kebebasan (df), untuk $df_1 = 5$ dan df_2 dan derajat kepercayaan adalah 5,05. Dengan demikian, $F_{hitung} < F_{tabel}$ sehingga H₀ diterima, artinya variabel suhu udara, kelembapan, lama penyinaran matahari, curah hujan, dan kecepatan angin secara bersama-sama tidak mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap variabel intensitas radiasi matahari.

Daya keluaran yang dapat dihasilkan jika seluruh permukiman wilayah Kota Medan dipasangkan pembangkit listrik tenaga surya model rooftop adalah sebesar 298,62 MW (monokristalin) atau 238,69 MW (polikristalin), atau 119,45 MW (*thin film*). Kecamatan Medan Marela adalah kecamatan yang menghasilkan daya keluaran terbesar dengan 21,09 MW (mono kristalin) atau 16,87 MW (polikristalin), atau 8,44 MW (*thin film*)

BAB 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian dengan menggunakan distribusi *Weibull* dan *Rayleigh* dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil analisis distribusi probabilitas *Weibull* dan *Rayleigh* diperoleh bahwa data cuaca yang teratur di Kota Medan adalah suhu udara dan lamanya penyinaran matahari karena nilai k lebih dari 3 atau nilai c mendekati 2.
2. Parameter cuaca yang mempengaruhi keluaran radiasi matahari di Kota Medan berdasarkan analisis regresi linear ganda adalah suhu udara, lamanya penyinaran matahari, dan kelembapan.
3. Daya keluaran yang dapat dihasilkan jika seluruh permukiman wilayah Kota Medan dipasangkan pembangkit listrik tenaga surya model rooftop adalah sebesar 748,57 MW (monokristalin) atau 598,85 MW (polikristalin), atau 299,43 MW (*thin film*). Kecamatan Medan Deli adalah kecamatan yang menghasilkan daya keluaran terbesar dengan 62,81 MW (monokristalin) atau 50,25 MW (polikristalin), atau 25,12 MW (*thin film*).

5.2 Saran

Berdasarkan dari simpulan dan implikasi di atas, dapat diajukan saran sebagai pengembangan kelanjutan dari penelitian ini antara lain

1. Melaksanakan penelitian lanjut analisis potensi energi matahari menggunakan metode *Weibull* dan *Rayleigh* dengan menggunakan perangkat lunak *Matlab* yang dapat mempercepat perhitungan dan analisis.
2. Melaksanakan penelitian tentang hubungan sudut miring solar panel, intensitas radiasi matahari dan cuaca terhadap daya keluar yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga surya dengan menggunakan metode *weibull* dan *Rayleigh*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IESR, "Laporan Status Energi Bersih Indonesia: Potensi, Kapasitas Terpasang, dan Rencana Pembangunan Pembangkit Listrik Energi Terbarukan ", Jakarta, 2019.
- [2] M. R. Yuliatmaja, "Kajian Lama Penyinaran Matahari dan Pergerakan Semu Matahari Saat Solstice Di Semarang (Studi Kasus Badan Meteorologi dan Geofisika Stasiun Klimatologi Semarang Pada Bulan Juni dan September Tahun 2005 Sampai dengan 2007)," *Skripsi*, p.71, 2009.
- [3] Djenal, D.P., "Monitoring System of Solar Radiation Intensity 10", Jakarta, 2015.
- [4] T.B. Sitorus, Farel H Napitupulu, Himsar Ambarita, "Korelasi temperatur Udara dan Intensitas Radiasi Matahari Terhadap Performansi Mesin Pendingin Siklus Adsorpsi Tenaga Matahari", Djenal, D.P., 2015, "Monitoring System of Solar Radiation Intensity 10", *Jurnal Ilmiah. T.Mesin*, Vol.1, pp 8- 17, 2014.
- [5] Sigit Sukmajati, Muhammad Hafidz, "Perancangan Dan Analisis Pembangkit Listrik Tenaga Surya Kapasitas 10 MW On Grid Di Yogyakarta" *Jurnal Energi & Kelistrikan*, pp 49 – 63, Vol.7, No.1, 2015.
- [6] J.S. Silaen, J.Windarta, and D.Denis, "Pengujian Dan Implementasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Rooftop Kapasitas 1215 WP Dengan Sistem On Grid Studi Kasus Perumahan Sambiroto Asri Kota Semarang", *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol.1, no.4, May, 2021.
- [7] Tarak Salmiet al, "Simulink Based Modelling of Solar Photovoltaic Cell", *International Journal of Renewable Energy, Research Matlab*, Vol.2, No.2, 2012.
- [8] Sunaryo, "Analisis Daya Listrik Yang Dihasilkan Panel Surya Ukuran 216 Cm x 121 CM Berdasarkan Intensitas Cahaya", *SNTT*, pp 29 – 37, 2014.
- [9] Wulandari, T.I. "Rancang Bangun Sistem Penggerak Pintu air dengan Memanfaatkan Energi Alternatif Matahari", *Jurnal Teknik Elektro Industri PPNS*, Surabaya, 2010.
- [10] Brilliant Dwinata, Gagan G. Tabah, Beyrra Triasdian, "Pemetaan Potensi Energi Listrik Tenaga Surya Berdasarkan Luas Area Permukiman", *Seminar Nasional – XIX ISSN 1693-3168 Rekayasa dan Aplikasi Teknik Mesin di Industri Kampus ITENAS*. 2020.

- [11] Luca Bergamasco, Pietro Asinari, “Scalable methodology for the photovoltaic solar energy potential assessment based on available roof surface area : application to Piedmont Region (Italy)”, *Solar Energy*, Vol.85, pp 1041 - 1055, 2011.
- [12] Wahyu Widiyanto, “Analisis Probabilitas Kecepatan Angin untuk Pesisir Cilacap dengan Menerapkan Distribusi Weibull dan Rayleigh”, *J.Dinamika Rekayasa*, Vol.9, pp 10 -16, Universitas Jenderal Soedirman,2013.
- [13] K. H. Khwee, “Pengaruh Temperatur Terhadap Kapasitas Daya Panel Surya,” *Elkha*, vol. 5, no. 2, pp. 23–26, 2013.
- [14] A. Kecepatan Angin Menggunakan Distribusi Weibull di Kawasan Blang Bintang Aceh Besar, E. Yusibani, dan Gunawati Jurusan Fisika, and F. Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, “Wind Speed Analysis using Weibull Distribution in the Region Blang Bintang Aceh Besar,” *J. Aceh Phys. Soc.*, vol. 5, no. 2, pp. 7–13, 2016.
- [15] A. Ilmar Ramadhan, E. Diniardi, and S. Hari Mukti, “Analisis Desain Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Kapasitas 50 WP,” vol. 37, no. 2, pp. 59–63, 2016.
- [16] R. Baharuddin, “Rancang Bangun Sistem Mini Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Portable,” *JIT (Jurnal Teknol. Terpadu)*, vol. 9, no. 1, pp. 65–70, 2021.
- [17] M. Saleh, Adiguna, and A. Safentry, “Analisa Perkiraan Kemampuan Daya Yang Di Butuhkan Untuk Perencanaan Pembangkit Listrik Teenaga Surya (PLTS),” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2017.
- [18] D. Fuaddin and A. Daud, “Rancangan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya On-Grid Kapasitas 20 kWp untuk Residensial,” *J. Tek. Energi*, vol. 10, no. 1, pp. 53–57, 2021.
- [19] Y. Prabowo, S. Broto, G. P. Utama, G. Gata, and Y. Yuliazmi, “Pengenalan dan Penerapan Pembangkit Listrik Tenaga Surya di Desa Muara Kilis Kabupaten Tebo Jambi,” *Abdimas J. Pengabd. Masy. Univ. Merdeka Malang*, vol. 5, no. 1, pp. 70–78, 2020.
- [20] R. Yendra, M. Marizal, W. I. Sawitri, A. P. Desvina, and Rahmadeni, “Distribusi Weibull Vs Distribusi Rayleigh Pada Pemodelan Kecepatan Angin,” *Semin. Nas. Teknol. Informasi, Komun. dan Ind.*, no. November, pp. 639–642, 2018.

- [21] B. Hoxha, R. Selimaj, and S. Osmanaj, "An experimental study of Weibull and Rayleigh distribution functions of wind speeds in Kosovo," *Telkomnika (Telecommunication Comput. Electron. Control.*, vol. 16, no. 5, pp. 2451–2457, 2018.
- [22] L. G. Otaya, "Distribusi Probabilitas Weibull Dan Aplikasinya," *J. Manaj. Pendidik. Islam*, vol. 4, no. 2, pp. 44–66, 2016.
- [23] J. Windarta, E. Wista Sinuraya, A. Zaenal Abidin, A. Era Setyawan, and Angghika, "Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Berbasis Homer di SMA Negeri 6 Surakarta Sebagai Sekolah Hemat Energi dan Ramah Lingkungan," *Pros. Semin. Nas. MIPA 2019 Univ. Tidar*, pp. 21–36, 2019.
- [24] V. Katinas, M. Marčiukaitis, G. Gecevičius, and A. Markevičius, "Statistical analysis of wind characteristics based on Weibull methods for estimation of power generation in Lithuania," *Renew. Energy*, vol. 113, pp. 190–201, 2017.
- [25] I. T. Hazhiah, S. Sugito, and R. Rahmawati, *Estimasi Parameter Distribusi Weibull Dua Parameter Menggunakan Metode Bayes*, vol. 5, no. 1. 2012. doi: 10.14710/medstat.5.1.27-
- [26] M. Walidi Juma'a, L. M. Limantara, and S. Wahyuni, "Estimasi Tinggi Curah Hujan dari Data Klimatologi Menggunakan Model Artificial Neural Network (Ann) di Kabupaten Badung Bali Selatan," 2021.

Lampiran 1: Rata – rata intensitas radiasi matahari selama 12 bulan di Kota Medan per kecamatan

Kecamatan	Rata – rata Intensitas Radiasi Matahari (watt/m ²)	Kecamatan	Rata – rata intensitas Radiasi Matahari (watt/m ²)
Medan Tuntungan	479,81	Medan Sunggal	461,48
Medan Johor	476,12	Medan Helvetia	458,92
Medan Amplas	468,12	Medan Petisah	458,61
Medan Denai	452,91	Medan Barat	453,89
Medan Area	459,23	Medan Timur	452,90
Medan Kota	466,35	Medan Perjuangan	454,79
Medan Maimun	462,30	Medan Tembung	455,65
Medan Polonia	461,41	Medan Deli	448,15
Medan Baru	463,28	Medan Labuhan	441,40
Medan Selayang	470,64	Medan Marelan	440,53
		Medan Belawan	438,77

Lampiran 2: Rata – rata intensitas radiasi matahari di Kota Medan
dari satelit pvgis dan perhitungan teori

Bulan	Rata- rata intensitas radiasi matahari (W/m^2) dari satelit pvgis
Januari	424,67
Februari	433,03
Maret	424,03
April	362,18
Mei	312,41
Juni	298,54
Juli	305,65
Agustus	333,06
September	359,93
Oktober	370,44
November	373,11
Desember	356,79

Bulan	Rata- rata intensitas radiasi matahari (W/m^2) dari perhitungan teori
Januari	450,23
Februari	472,92
Maret	486,26
April	481,03
Mei	462,80
Juni	449,19
Juli	457,84
Agustus	471,01
September	478,44
Oktober	467,42
November	447,56
Desember	438,64

Lampiran 3: Rata – rata suhu udara and kelembapan di Kota Medan

No	Bulan	Rata – rata suhu udara (°C)
1	Januari	26,33
2	Februari	27,59
3	Maret	27,44
4	April	27,55
5	Mei	28,05
6	Juni	27,73
7	Juli	27,89
8	Agustus	27,01
9	September	27,37
10	Oktober	28,00
11	November	27,05
12	Desember	26,66

No	Bulan	Rata - rata Kelembapan (%)
1	Januari	85,42
2	Februari	80,36
3	Maret	81,84
4	April	82,50
5	Mei	82,61
6	Juni	81,30
7	Juli	80,03
8	Agustus	84,10
9	September	82,10
10	Oktober	79,39
11	November	84,63
12	Desember	85,55

Lampiran 4: Rata – rata curah hujan dan lamanya penyinaran matahari di Kota Medan

No	Bulan	Rata - rata Curah Hujan (mm)
1	Januari	19,24
2	Februari	4,00
3	Maret	7,73
4	April	12,01
5	Mei	6,64
6	Juni	10,03
7	Juli	5,50
8	Agustus	17,20
9	September	10,63
10	Oktober	9,28
11	November	16,77
12	Desember	5,81

No	Bulan	Rata - rata lamanya penyinaran matahari (jam)
1	Januari	2,10
2	Februari	5,14
3	Maret	3,85
4	April	2,98
5	Mei	3,74
6	Juni	4,15
7	Juli	5,16
8	Agustus	2,74
9	September	3,42
10	Oktober	4,95
11	November	3,68
12	Desember	3,47

Lampiran 4: Rata – rata kecepatan angin di Kota Medan per bulan

No	Bulan	Rata - rata Kecepatan Angin (m/s)
1	Januari	1,13
2	Februari	1,57
3	Maret	1,32
4	April	1,30
5	Mei	1,26
6	Juni	1,28
7	Juli	1,23
8	Agustus	1,00
9	September	1,67
10	Oktober	1,77
11	November	1,60
12	Desember	1,65

Lampiran 5: Area pemukiman (km²) di Kota Medan menurut sumber Google Earth

No	Kecamatan	Area Pemukiman (km ²)
1	Medan Tuntungan	11,62
2	Medan Johor	12,23
3	Medan Amplas	8,83
4	Medan Denai	9,96
5	Medan Area	4,10
6	Medan Kota	5,89
7	Medan Maimun	2,97
8	Medan Polonia	5,84
9	Medan Baru	5,11
10	Medan Selayang	12,85
11	Medan Sunggal	10,98
12	Medan Helvetia	11,44
13	Medan Petisah	5,36
14	Medan Barat	5,32
15	Medan Timur	7,78
16	Medan Perjuangan	3,86
17	Medan Tembung	7,0
18	Medan Deli	15,32
19	Medan Labuhan	12,61
20	Medan Marelان	15,35
21	Medan Belawan	4,15