

**Desain Dan Analisa Unjuk Kerja  
Pembangkit Listrik Tenaga Surya 15 kW  
Dengan Memaksimalkan Final Yield Dan Performance  
Ratio Pada Perkantoran Skala Kecil-sedang**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat  
untuk memperoleh gelar  
Sarjana Teknik



Oleh:

KRISNA HAKIM

NIM. I0716019

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS SEBELAS MARET  
SURAKARTA  
2020**

## ABSTRAK

Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) 15 kW merupakan sebuah hal yang baru dalam penerapan pemanfaatan energi surya berskala sedang, terutama untuk lingkungan kampus di Indonesia yang mana dapat mendukung dan menjadi bukti atas pelaksanaan program *green campus*. Keberadaan PLTS 15 kW ini menjadi sebuah perhatian untuk melakukan analisa lanjutan agar potensi produksi energi listrik spesifik atau *final yield* ( $Y_F$ ) dan unjuk kerja atau *performance ratio* (PR) dari sebuah PLTS dapat dipantau berdasarkan lokasi pemasangannya. Nilai  $Y_F$  dan PR dapat digunakan sebagai acuan dalam melakukan identifikasi, analisis permasalahan operasi dan pengembangan untuk mengelola sebuah PLTS. Nilai optimum  $Y_F$  dan PR pada PLTS 15 kW ini diperoleh dengan cara melakukan simulasi dari sebuah *software* simulator, yang mana ketentuan nilai yang didapat dari lokasi dan konfigurasi pada sebuah sistem yang terpasang tanpa memperhatikan faktor *shading*. Selanjutnya hasil simulasi dibandingkan terhadap hasil produksi real energi listrik pada PLTS 15 kW ini. PLTS 15 kW sendiri terbagi menjadi dua jalur yaitu jalur 5 kW dan 10 kW. Dari hasil simulasi diperoleh nilai pada jalur 5 kW memiliki produksi optimum sebesar 5264,8 kWh dengan PR 83,1% dan pada jalur 10 kW memiliki produksi optimum sebesar 7687,2 kWh dengan PR 83,12%. Sedangkan pada kondisi kenyataan pada jalur 5 kW memproduksi 2295,12 kWh yang mana berbeda 56,41% dengan hasil simulasi dan pada jalur 10 kW memproduksi 3029,558 kWh yang mana berbeda 60,59% dengan hasil simulasi. Gangguan berupa *shading*, debu dan losses pada sistem menyebabkan turunnya produksi energi listrik dan unjuk kerjanya, yaitu  $Y_F$  sebesar 1,57 jam/hari dengan CF sebesar 6,54% pada jalur 5 kW dan  $Y_F$  sebesar 3,86 jam/hari dengan CF sebesar 16,10% pada jalur 10 kW.

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa, atas rahmat dan hidayahnya, penulis dapat menyelesaikan penyusunan tugas akhir dengan judul Desain dan Analisa Unjuk Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya 15 kW Pada Gedung Skala Kecil-Sedang Dengan Memaksimalkan *Final Yield* dan Rasio Performance. Dalam penyusunan tugas akhir ini, tentu perlu melewati serangkaian proses. Sebagaimana kita ketahui bahwa dalam berproses tidak selamanya jalan yang dilalui itu mulus. Namun semakin panjang perjalanan yang ditempuh, maka semakin banyak pengalaman yang didapat sehingga kelak pengalaman tersebut akan menjadi pelajaran yang berharga di masa depan.

Dalam penyusunan tugas akhir ini, empat tahun perkuliahan di Program Studi Teknik Elektro telah penulis lalui. Tugas akhir bukan tentang menyelesaikan sebuah proyek dan menuliskannya, namun di dalamnya terkandung segala aspek materi dan kebijaksanaan yang telah diasah menjadi lebih runcing selama empat tahun lebih perkuliahan di Teknik Elektro. Oleh karena itu, tugas akhir ini penulis persembahkan bagi segala pihak yang telah menjadi bagian dalam perjalanan empat tahun lebih dalam dunia perkuliahan.

Menyelesaikan tugas akhir ini tentu bukanlah perkara mudah. Sebagai wujud apresiasi, melalui kata pengantar ini, penulis hendak menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Orang tua dan keluarga tercinta yang selalu memberikan motivasi dan semangat serta doa restu sehingga penulisan tugas akhir ini dapat terselesaikan.
2. Bapak Subuh Pramono, S.T., M.T. selaku Pembimbing I dan Pembimbing Akademik yang setia memberikan dukungan, ide, arahan, bimbingan, dan motivasi selama perkuliahan di Teknik Elektro, khususnya selama mengerjakan tugas akhir ini hingga selesai.
3. Bapak Chico Hermanu Brillianto Apribowo, S.T., M.Eng. selaku Pembimbing II yang selalu setia memberikan dukungan, ide, arahan, bimbingan, dan motivasi selama pengerjaan tugas akhir ini.
4. Bapak Feri Adriyanto, Ph.D. selaku Kepala Program Studi Teknik Elektro yang telah memberikan ide, saran, arahan, bimbingan, dan motivasi selama mengerjakan tugas akhir ini hingga selesai.

5. Bapak Muhammad Hamka Ibrahim S.T., M.Eng. dan Bapak Jaka Sulistya Budi, S.T. selaku koordinator tugas akhir.
6. Seluruh Dosen Program Studi Teknik Elektro yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat, motivasi, dan inspirasi yang luar biasa selama menjalani masa perkuliahan selama kurang lebih 4 tahun ini.
7. Seluruh teman-teman Teknik Elektro terutama angkatan 2016 yang tidak bisa disebutkan satu persatu yang telah sama-sama berjuang selama 4 tahun ini atas bantuannya yang luar biasa dan semangat yang diberikan untuk segera mendapatkan gelar Sarjana Teknik ini.

Surakarta, 1 Agustus 2020

Krisna Hakim  
I0716019

## DAFTAR ISI

ABSTRAK .....	i
KATA PENGANTAR .....	ii
DAFTAR ISI .....	iv
DAFTAR GAMBAR .....	vii
DAFTAR TABEL .....	viii
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang Masalah .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Manfaat Penelitian .....	3
1.5 Sistematika Penulisan .....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	5
2.1 Penelitian Sebelumnya .....	5
2.2 Potensi Energi Matahari di Indonesia .....	7
2.3 PLTS / <i>Photovoltaic</i> (PV) .....	7
2.3.1 Pengertian Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) .....	7
2.3.2 Prinsip Kerja Sel Surya ( <i>Photovoltaic</i> ) .....	7
2.4 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) .....	9
2.4.1 Sistem Off Grid .....	9
2.4.2 Sistem On Grid .....	10
2.4.3 Sistem Hybrid .....	11
2.5 Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) .....	12
2.5.1 Sel Surya .....	12
2.5.2 Modul Surya .....	16
2.5.3 Penyangga dan Sistem Pelacak .....	20
2.5.4 Inverter .....	21
2.5.5 Charge Controller .....	23
2.5.6 Baterai .....	24
2.6 Sumber Energi Matahari .....	27
2.6.1 Sumber Energi Matahari di Indonesia .....	28
2.6.2 Radiasi .....	29
2.6.3 Inklinasi dan Orientasi Modul Surya .....	29
2.6.4 Sudut Kemiringan Modul Surya .....	29
2.6.5 Temperatur .....	30
2.7 Analisa Unjuk Kerja PLTS .....	30
2.7.1 <i>Final Yield</i> (YF) .....	30
2.7.2 <i>Reference Yield</i> (YR) .....	31
2.7.3 <i>Performance Ratio</i> (PR) .....	31
2.7.4 <i>Capacity Factor</i> (CF) .....	31
2.8 PV <sub>syst</sub> .....	32
2.8.1 Fitur Pada PV <sub>syst</sub> .....	34
BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....	39
3.1 Alat dan Bahan .....	39
3.2 Langkah Penelitian .....	40

3.2.1	Tahap Awal Penelitian .....	42
3.2.2	Pengolahan dan Analisis Data.....	42
3.2.3	Tahap Akhir Penelitian .....	42
3.3	Pemodelan Sistem .....	42
3.3.1	Koordinat Lokasi.....	42
3.3.2	Pemodelan Sistem PLTS.....	43
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN .....	45
4.1	Hasil Perancangan Desain Jaringan PLTS .....	45
4.1.1	Jalur 5 kW .....	45
4.1.2	Jalur 10 kW .....	46
4.2	Hasil Simulasi PVsyst .....	48
4.2.1	Jalur 5 kW .....	48
4.2.2	Jalur 10 kW .....	50
4.3	Perbandingan Simulasi PVsyst dan Kondisi Kenyataan .....	52
4.3.1	Jalur 5 kW .....	52
4.3.2	Jalur 10 kW .....	54
4.3.3	Analisa Penurunan Unjuk Kerja.....	56
BAB V	KESIMPULAN.....	58
4.4	Kesimpulan.....	58
4.5	Saran .....	59
DAFTAR PUSTAKA	.....	60

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Prinsip Kerja Sel Surya [5].....	8
Gambar 2.2 Prinsip Kerja PLTS Sistem <i>Off Grid</i> [5] .....	10
Gambar 2.3 Prinsip Kerja PLTS Sistem <i>On Grid</i> [5] .....	11
Gambar 2.4 Prinsip Kerja PLTS Sistem Hybrid [4] .....	11
Gambar 2.5 Kelas Teknologi Panel Surya [4] .....	13
Gambar 2.6 Modul Surya Jenis Monocrystalline [5] .....	13
Gambar 2.7 Modul Surya Jenis Polycrystalline [5] .....	14
Gambar 2.8 Modul Surya Jenis Thin Film [5] .....	15
Gambar 2.9 Perancangan Rangkaian Secara Seri [8].....	15
Gambar 2.10 Perancangan Rangkaian Secara Paralel [8].....	15
Gambar 2.11 Penjelasan Dasar PV System [5].....	16
Gambar 2.12 Kurva Karakteristik Listrik .....	17
Gambar 2.13 Pengaruh Iradiasi Terhadap.....	18
Gambar 2.14 Pengaruh Iradiasi Terhadap.....	19
Gambar 2.15 Inverter [5].....	21
Gambar 2.16 Konfigurasi Inverter [4] .....	23
Gambar 2.17 Solar Atlas [5] .....	28
Gambar 2.18 Logo Software PVsyst [17] .....	32
Gambar 2.19 Tampilan Menu Awal PVsyst [19].....	33
Gambar 2.20 Tampilan Desain Proyek [19] .....	33
Gambar 2.21 Tampilan Awal Fitur Pemodelan 3D [19].....	34
Gambar 2.22 Tampilan Menu Near Shading Definiton [19] .....	34
Gambar 2.23 Tampilan Jendela Utama 3D Scene [19].....	35
Gambar 2.24 Tampilan Menu Pembuatan Bangunan 3D [19].....	35
Gambar 2.25 Tampilan Jendela Building Object [19] .....	36
Gambar 2.26 Tampilan Jendela Elementary Shading Object [19].....	36
Gambar 2.27 Tampilan Jendela Collector Fields in Sheds [19].....	36
Gambar 2.28 Tampilan Jendela Elementary Shading Object [19].....	37
Gambar 2.29 Tampilan Jendela Utama 3D Scene View [19] .....	37
Gambar 2.30 Diagram Faktor Shading PLTS [19] .....	38
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian .....	41
Gambar 3.2 Koordinat Lokasi PLTS 15 kW.....	42
Gambar 3.3 Pengisian Koordinat Lokasi .....	43
Gambar 3.4 Pemilihan Tipe Instalasi .....	43
Gambar 3.5 Pengisian Spesifikasi Komponen .....	44
Gambar 4.1 Tampak Atas Simulasi PLTS Jalur 5 kW.....	45
Gambar 4.2 Tampak Samping Simulasi PLTS Jalur 5 kW.....	45
Gambar 4.3 Blok Diagram PLTS Jalur 5 kW .....	45
Gambar 4.4 Tampak Atas Simulasi PLTS Jalur 10 kW.....	46
Gambar 4.5 Tampak Samping Simulasi PLTS Jalur 10 kW.....	47
Gambar 4.6 Blok Diagram PLTS Jalur 10 kW .....	47
Gambar 4.7 Grafik Produksi Energi Listrik.....	49
Gambar 4.8 Diagram Alir Rugi-rugi.....	50
Gambar 4.9 Grafik Produksi Energi Listrik.....	51
Gambar 4.10 Diagram Alir Rugi-rugi.....	52
Gambar 4.11 Grafik Perbedaan Produksi Energi Listrik Jalur 5 kW.....	53

Gambar 4.12 Grafik Perbedaan Produksi Energi Listrik Jalur 10 kW.....	55
Gambar 4.13 Kondisi Riil Jalur 5 kW.....	56
Gambar 4.14 Kondisi Riil Jalur 10 kW.....	56



## DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Koefisien Performa Normal .....	48
Tabel 4.2 Potensi Optimum Produksi Energi Listrik .....	50
Tabel 4.3 Koefisien Performa Normal .....	51

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang Masalah**

Semakin berkembangnya teknologi akan semakin mendorong naiknya pemenuhan kebutuhan energi listrik guna mendukung kinerja dari sebuah teknologi tersebut. Di Indonesia sendiri memiliki program percepatan pembangunan infrastruktur ketenagalistrikan yaitu sebesar 35.000 MW yang mana harus segera terpenuhi agar dapat menunjang laju perkembangan teknologi [1]. Salah satu cara untuk memenuhi target tersebut yaitu dengan pembangunan pembangkit listrik dengan memanfaatkan sumber energi jenis energi baru terbarukan (EBT) antara lain dapat diuraikan jenisnya yaitu energi biofuel, energi biomassa, energi panas bumi, energi air, energi angin, energi gelombang laut dan energi matahari. Jenis energi tersebut masuk dalam kategori jenis-jenis energi yang dapat diperbarui. Salah satu jenis energi yang paling potensial untuk diterapkan di Indonesia yaitu jenis energi matahari [2].

Pemanfaatan energi matahari yang diubah menjadi energi listrik untuk pemenuhan kebutuhan konsumen sering disebut dengan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Indonesia sendiri memiliki letak geografis di garis khatulistiwa yang mana menjadikannya sebagai salah satu negara yang sangat potensial dan cocok untuk didirikan sebuah sistem PLTS guna memenuhi suatu kebutuhan energi listrik [3]. Banyak wilayah di Indonesia yang cocok untuk didirikan berbagai macam skala pemasangan sistem PLTS, mulai dari sistem PLTS dengan skala kecil hingga besar. Ruang lingkup penerapannya mulai dari skala rumahan, gedung-gedung (perkantoran), terapan dan tanah lapang yang mana tersebar di seluruh wilayah Indonesia. Untuk mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik diperlukan sebuah alat yang sering disebut dengan modul surya [4].

Modul surya sendiri merupakan suatu komponen yang dapat digunakan untuk mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik dengan menggunakan prinsip yang disebut efek *photovoltaic*. Efek *photovoltaic* sendiri adalah suatu fenomena dimana muncul tegangan listrik karena adanya suatu hubungan atau kontak dari dua elektroda, dimana keduanya dihubungkan dengan

sistem padatan atau cairan saat mendapatkan energi cahaya [5]. Oleh karena itulah, modul surya ini sering disebut dengan sel *photovoltaic* (PV). Modul surya ini sendiri dapat diterapkan untuk memenuhi berbagai macam kebutuhan, baik itu dengan instalasi pemasangan permanen ataupun portabel. Pada umumnya, penerapan jenis pemasangan permanen ini digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik dengan membuat sistem PLTS baik itu pada skala kecil maupun besar. Sedangkan untuk jenis pemasangan portabel, biasanya digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik pada kendaraan listrik, pompa air tenaga surya dan lainnya. Penerapan modul surya untuk memenuhi kebutuhan dengan instalasi pemasangan permanen salah satu contoh nyatanya yaitu PLTS di Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret Surakarta (UNS).

PLTS di Fakultas Teknik UNS sendiri terbagi menjadi dua jalur yaitu jalur 10 KW yang terpasang di area Parkir Fakultas Teknik UNS dan jalur 5 KW yang terpasang di selasar dekat Gedung 3 Fakultas Teknik UNS. Terpasangnya PLTS ini juga sebagai bentuk dukungan mewujudkan UNS sebagai salah satu *green campus* di Indonesia. Tetapi seiring berjalannya waktu, pemasangan PLTS di Fakultas Teknik UNS tersebut masih belum memberikan dampak yang nyata untuk memenuhi kebutuhan listrik yang ada di Fakultas Teknik UNS baik ketika pada saat berada di fase beban puncak maupun ketika mengalami mati listrik. PLTS tersebut belum mampu memberikan suplai sementara untuk mengatasi kondisi-kondisi tersebut. Oleh karena itu diperlukan sebuah analisis lebih lanjut untuk mengetahui potensi produksi listrik, unjuk kerja dan kendala yang dihadapi dalam pengoperasian PLTS tersebut dalam periode tertentu. Analisis dilakukan dengan cara melakukan simulasi yang kemudian dibandingkan dengan kondisi kenyataan.

Dalam melakukan simulasi sistem PLTS dapat dilakukan dengan menggunakan *software* PVsyst yang mana parameteranya dapat diatur sesuai dengan sistem yang telah terpasang maupun sistem yang akan dibangun. Hasil dari simulasi ini selanjutnya akan dibandingkan dengan kondisi kenyataan agar dapat diketahui produksi riil energi listrik, unjuk kerja dan kendala yang ada pada sistem PLTS.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Dari latar belakang masalah diatas maka dapat dirumuskan beberapa pokok permasalahan, yaitu sebagai berikut:

1. Bagaimana caranya untuk melakukan pemodelan simulasi pada sistem PLTS yang telah terpasang di Fakultas Teknik UNS?
2. Bagaimana caranya untuk melakukan analisa unjuk kerja dari sistem PLTS yang telah terpasang di Fakultas Teknik UNS?
3. Bagaimana caranya untuk melakukan perbandingan hasil simulasi dengan kondisi kenyataan dari sistem PLTS yang telah terpasang di Fakultas Teknik UNS?
4. Bagaimana caranya untuk mengetahui kendala-kendala yang dihadapi pada sistem PLTS yang telah terpasang di Fakultas Teknik UNS?

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Melakukan pemodelan simulasi pada sistem PLTS yang telah terpasang di Fakultas Teknik UNS.
2. Melakukan analisa unjuk kerja dari sistem PLTS yang telah terpasang di Fakultas Teknik UNS.
3. Melakukan perbandingan hasil simulasi dengan kondisi kenyataan dari sistem PLTS yang telah terpasang di Fakultas Teknik UNS.
4. Mengetahui kendala-kendala yang dihadapi pada sistem PLTS yang telah terpasang di Fakultas Teknik UNS.

## **1.4 Manfaat Penelitian**

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dapat dijadikan referensi dalam melakukan pemodelan sebuah sistem PLTS.
2. Dapat dijadikan referensi dalam melakukan analisa unjuk kerja untuk pembangunan dan pengoperasian sistem PLTS terutama dalam skala perkantoran atau perguruan tinggi.

3. Dapat memberikan gambaran macam-macam kendala yang dihadapi ketika membangun dan mengoperasikan sistem PLTS terutama dalam skala perkantoran atau perguruan tinggi.

### **1.5 Sistematika Penulisan**

Susunan pembahasan oleh penulis pada penulisan Tugas Akhir yang direncanakan adalah sebagai berikut:

BAB I yaitu pendahuluan yang berisikan latar belakang, rumusan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, serta sistematika penulisan laporan.

BAB II yaitu tinjauan pustaka yang berisikan hasil studi penulis dari beberapa literatur mengenai teori – teori yang berkaitan dengan topik pembahasan seperti prinsip dasar sel surya, penjelasan PV sistem, jenis komponen yang digunakan, karakteristik komponen dan juga aplikasi yang digunakan penulis untuk melakukan simulasi.

BAB III yaitu metodologi penelitian akan dibahas mengenai alat dan bahan yang digunakan, tahap-tahap penelitian yang digambarkan melalui diagram alir penelitian dan pemodelan sistem.

BAB IV yaitu hasil dan pembahasan akan dibahas desain dan analisa unjuk kerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya 15 kW pada gedung skala kecil-sedang dengan memaksimalkan *final yield* dan *performance ratio*.

BAB V yaitu kesimpulan akan dibahas mengenai kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan dan juga saran untuk penelitian ini.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Sebelumnya

Setelah peneliti melakukan telaah terhadap beberapa penelitian yang ada, terdapat beberapa penelitian yang memiliki keterkaitan dengan penelitian yang peneliti lakukan yaitu sebagai berikut:

No	Pengarang	Tahun	Judul	Metode	Hasil
1	I. K. Agus Setiawan, I. N. Satya Kumara, I Wayan Sukerayasa [12]	2014	Analisis Unjuk Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Satu MWp Terinterkoneksi Jaringan di Kayubih, Bangli	Menggunakan software PVsyst untuk memodelkan dan melakukan analisis unjuk kerja pada sistem PLTS yang terpasang.	Potensi optimum yang dimiliki PLTS Kayubih sebesar 1.656 MWH per tahun dari hasil simulasi, tetapi terdapat selisih dengan nilai kenyataan yang diakibatkan karena adanya <i>shading</i> .
2	Eka Meilia S, Rosmaliati, I. B. Fery Citarsa [14]	2014	Analisis Unjuk Kerja Sistem Fotovoltaik On Grid Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Gili Trawangan	Dilakukan dengan pengamatan pada beberapa komponen dalam PV system agar dapat menjadi acuan dalam pembangunan PLTS di masa yang akan datang.	Data hasil pengamatan menunjukkan nilai yang lebih kecil dibandingkan dengan data spesifikasi yang terjadi karena memiliki nilai efisiensi yang rendah.
3	G. N. Surya, K. I. N. Satya and I. Rina [16]	2019	Unjuk Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) 26,4 kWp Pada Sistem Smart	Menggunakan aplikasi HelioScope untuk melakukan simulasi	Produksi riil pada PLTS sebesar 3.948,28 kWh lebih rendah 9,53 % dari

			Microgrid UNUD	pembangunan PV system untuk mengetahui produksi energi listrik dan potensi optimumnya.	hasil simulasi yang mana disebabkan oleh benda-benda disekitar PLTS yang menyebabkan <i>shading</i> , tingkat kebersihan modul surya dan perbedaan orientasi PLTS dengan orientasi optimal.
4	A. A. Oday, H. W., Habeeb, M. Y. Dhari [20]	2019	Design and Peformance Analysis of 250 kW Grid-Connected Photovoltaic System in Iraqi Environment Using PVsyst Software	PV <i>system</i> dimodelkan dengan menggunakan PVsyst yang kemudian dilakukan analisa <i>performance</i> .	Dari hasil simulasi menunjukan bahwa pada sistem PLTS tersebut memiliki potensi optimum dalam memproduksi energi listrik sebesar 346.692 kWh/tahun.

Beberapa penelitian diatas memilki persamaan dengan penelitian yang akan peneliti lakukan yaitu mengenai tema yang akan diteliti, yang mana sama-sama menyelesaikan persoalan unjuk kerja sistem PLTS dengan cara simulasi. Sedangkan perbedaannya yaitu terletak pada konsentrasi yang akan dibahas, jenis komponen yang dipakai, jenis rangkaian yang dipakai dalam PV sistem dan skala pemasangan PV sistem. Penelitian yang dilakukan lebih fokus ke pemodelan sistem dengan menggunakan dua jenis komponen modul surya yang berbeda dan menggunakan inverter jenis *hybrid* yang selanjutnya dilakukan perbandingan unjuk kerjanya dengan melakukan simulasi dan perhitungan estimasi kondisi kenyataan sehingga berbeda dari empat penelitian tersebut.

## **2.2 Potensi Energi Matahari di Indonesia**

Indonesia dikenal dengan keragaman budaya dan sumber daya alam (SDA) yang melimpah. Keragaman budaya dan SDA tersebut telah banyak dimanfaatkan oleh bangsa Indonesia seperti munculnya pariwisata budaya, pemanfaatan kekayaan hutan, laut, barang tambang, dan lainnya. Meninjau dari sumber daya alam, Indonesia memiliki beberapa jenis SDA yang telah dimanfaatkan baik yang terbatas maupun yang tidak terbatas. Salah satu pemanfaatan SDA yang tidak terbatas adalah energi matahari yang digunakan untuk pembangkit tenaga surya [6].

Indonesia setiap harinya selalu dilewati oleh matahari dengan intensitas radiasi matahari yang cukup yaitu berkisar antara  $2,56 \text{ kWh/m}^2$  sampai dengan  $5,75 \text{ kWh/m}^2$ , oleh karena itu pembangkitan energi listrik dengan memanfaatkan energi matahari perlu dikembangkan lebih lanjut lagi di Indonesia.

## **2.3 PLTS / *Photovoltaic* (PV)**

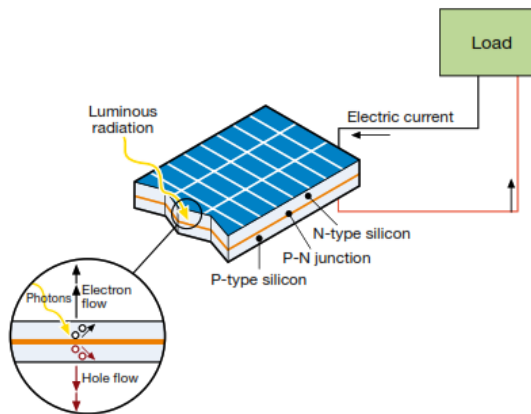
### **2.3.1 Pengertian Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)**

Pembangkit Listrik Tenaga Surya atau yang biasa disingkat menjadi PLTS merupakan sebuah pembangkit listrik yang menggunakan sinar matahari sebagai sumber energi utamanya lalu diubah menjadi energi listrik melalui sel surya.

### **2.3.2 Prinsip Kerja Sel Surya (*Photovoltaic*)**

PLTS adalah suatu pembangkit listrik yang menggunakan sinar matahari melalui sel surya (fotovoltaik) untuk mengkonversikan radiasi sinar foton matahari menjadi energi listrik. Sel surya merupakan lapisan-lapisan tipis terbuat dari bahan semikonduktor silikon (Si) murni, atau bahan semikonduktor lainnya, yang kemudian tersusun menjadi modul surya. Pada gambar 2.1 memperlihatkan bagaimana sel surya bekerja.





Gambar 2.1 Prinsip Kerja Sel Surya [5]

PLTS memanfaatkan cahaya matahari untuk menghasilkan listrik DC, yang dapat diubah menjadi listrik AC apabila diperlukan. Pada umumnya PLTS terdiri atas beberapa komponen utama yaitu, generator sel surya yang merupakan susunan modul surya pada suatu sistem penyangga, lalu inverter yang digunakan untuk mengkonversi arus DC menjadi arus AC baik sistem satu fasa atau tiga fasa untuk kapasitas besar, *charge controller* dan baterai untuk PLTS dengan sistem penyimpanan (*storage*), serta sistem kontrol dan monitoring operasi PLTS [7].

Berdasarkan lokasi pemasangannya sistem PLTS dibagi menjadi dua jenis yaitu, sistem pola tersebar (*distributed PV plant*) dan sistem terpusat (*centralized PV plant*). Berdasarkan aplikasi dan konfigurasinya, secara garis besar PLTS diklasifikasikan menjadi dua yaitu sistem tidak terhubung jaringan (*off-grid PV plant*) atau lebih dikenal dengan PLTS berdiri sendiri (*stand-alone*), dan sistem PLTS terhubung jaringan (*grid-connected PV plant*). Apabila dalam penggunaannya PLTS digabung dengan jenis pembangkit listrik lain maka dapat disebut dengan sistem *hybrid*.

Faktor utama yang mempengaruhi variasi produksi energi listrik PLTS adalah iradiasi matahari, temperatur modul surya, dan *shading* yang terjadi selama waktu operasi. Iradiasi mempengaruhi arus listrik yang dihasilkan PLTS, temperatur modul mempengaruhi tegangan yang dihasilkan PLTS, sedangkan *shading* mempengaruhi iradiasi matahari yang diterima modul surya pada proses pembangkitan, yang sekaligus berpengaruh terhadap unjuk kerja PLTS.

Performa atau unjuk kerja PLTS jika dilihat berdasarkan alat ukur kWh meter sendiri sangatlah mudah untuk dilaporkan, namun ketika tujuannya sebagai

suatu perbandingan kelayakan antar pembangkit-pembangkit, tidaklah sesederhana itu. Pertama-tama dilihat dari segi iklim matahari yang mana berbeda dari satu lokasi dengan lokasi lainnya dan data cuaca tidak selalu dapat diperkirakan lebih detail. Lalu, energi riil yang terpasang pada umumnya tidak diketahui secara persis nilainya sebagai akibat dari efek *shading* yang terjadi. Untuk mengetahui keluaran energi dari suatu sistem PLTS selama periode tahunan atau bulanan didasarkan pada beberapa hal berikut ini, yaitu:

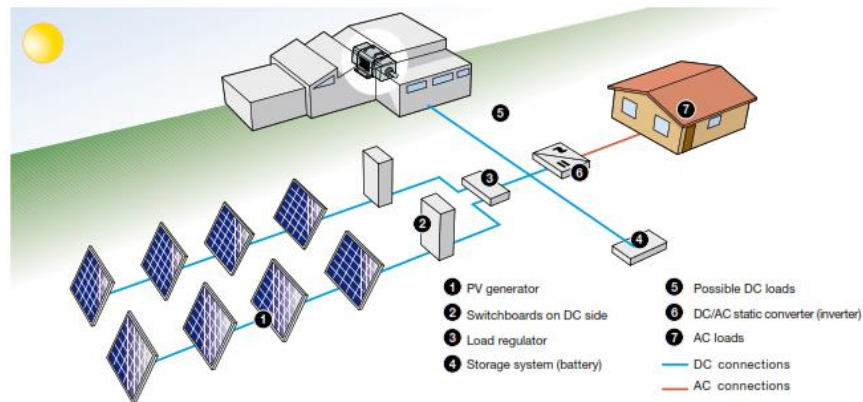
- a. Performa spesifik dalam kWh bersih (*net kWh*) yang terkirim ke jaringan per kW dari daya nominal modul surya yang terpasang sama dengan (*equivalent*) terhadap jumlah dari beban penuh untuk pembangkit.
- b. Faktor kapasitas (*capacity factor*) hal ini didapat sebagai persamaan jam beban penuh sekitar dalam persen (%) dari waktu sebelumnya.
- c. Rasio performa bulanan dan tahunan, digambarkan sebagai jumlah aktual dari energi PLTS ke jaringan pada satu periode, dibagi oleh jumlah teoritis menurut data STC dari modul surya.

## 2.4 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Sistem PLTS dibagi menjadi dua dalam aplikasi dan konfigurasinya yaitu sistem yang tidak terhubung dengan jaringan (*off grid*) yang bisa juga disebut dengan *stand alone* dan sistem yang terhubung dengan jaringan (*on grid*). Tetapi jika sistem PLTS tersebut digabungkan dengan jenis pembangkit listrik lain maka bisa disebut dengan sistem *hybrid* [8].

### 2.4.1 Sistem Off Grid

PLTS dengan sistem *off grid* atau *stand alone* merupakan sebuah sistem pembangkit listrik alternatif yang dapat digunakan untuk daerah terpencil atau pedesaan yang tidak terjangkau oleh jaringan PLN. Sistem ini hanya mengandalkan energi matahari sebagai sumber energi utama dengan menggunakan rangkaian modul surya untuk menghasilkan energi listrik sesuai dengan kebutuhannya. Blok diagram konfigurasi PLTS *off grid* ini dapat dilihat pada gambar 2.2 dibawah ini.

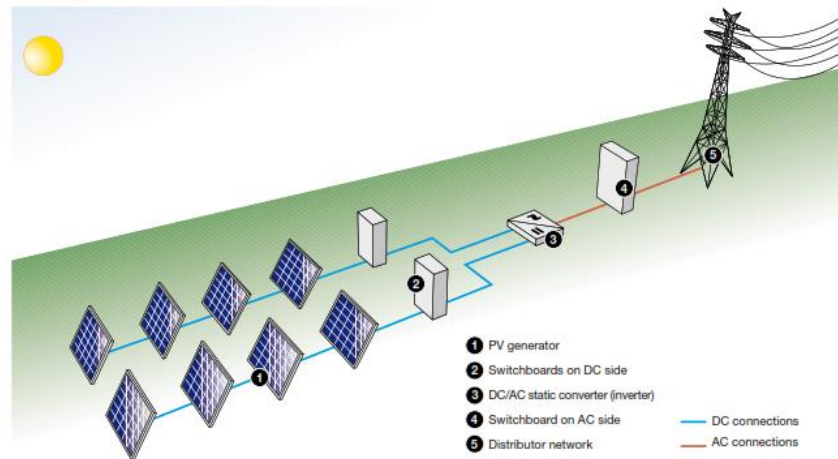


Gambar 2.2 Prinsip Kerja PLTS Sistem *Off Grid* [5]

Pada PLTS dengan sistem *off grid* ini sumber energi listrik yang dihasilkan oleh modul surya pada siang hari akan disimpan dalam baterai yang diatur oleh *solar charge controller* agar tidak terjadi kondisi *over charge*. Besarnya energi listrik yang dihasilkan oleh modul surya ini bergantung pada intensitas penyinaran matahari yang diterima oleh modul surya dan efisiensi *cell* yang dimilikinya. Intensitas matahari maksimum mencapai  $1000 \text{ W/m}^2$  dengan efisiensi *cell* 14% maka daya yang dapat dihasilkan oleh modul surya tersebut sebesar  $140 \text{ W/m}^2$ .

#### 2.4.2 Sistem On Grid

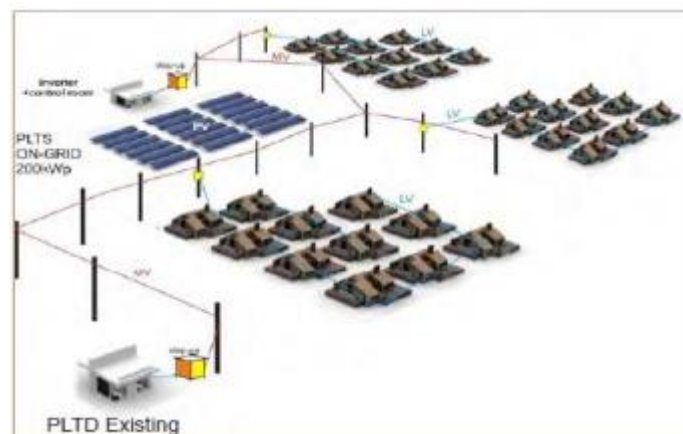
PLTS dengan sistem *on grid* merupakan sebuah solusi penerapan *green energy* yang sangat cocok bagi penduduk perkotaan baik dalam lingkup perumahan ataupun perkantoran. Pada sistem ini menggunakan modul surya untuk menghasilkan energi listrik yang ramah lingkungan dan bebas emisi yang mana jika diterapkan akan dapat mengurangi biaya tagihan listrik dan bisa juga memberikan nilai tambah pada pemiliknya. Sistem ini tetap terhubung dengan jaringan PLN tetapi juga dapat menghasilkan energi listrik sendiri melalui modul surya yang terpasang. Blok diagram konfigurasi PLTS *on grid* ini dapat dilihat pada gambar 2.3 dibawah ini.



Gambar 2.3 Prinsip Kerja PLTS Sistem *On Grid* [5]

### 2.4.3 Sistem Hybrid

PLTS dengan sistem hybrid merupakan sebuah sistem PLTS yang dikombinasikan dengan jenis pembangkit listrik yang memiliki sistem lain, biasanya dikombinasikan dengan jenis pembangkit listrik lain misalnya jenis mikrohidro, tenaga angin, dan genset. Sistem yang banyak dipakai yaitu hybrid PLTS-Genset yang mana pada jenis ini dapat menutupi kelemahan masing-masing jenis pembangkit dalam kondisi tertentu sehingga sistem yang terpasang dapat beroperasi dengan ekonomis dan efisien. Blok diagram konfigurasi PLTS hybrid ini dapat dilihat pada gambar 2.4 dibawah ini.



Gambar 2.4 Prinsip Kerja PLTS Sistem Hybrid [4]

Kombinasi antara PLTS dan genset ini akan mengurangi jam operasi genset sehingga biaya operasi dan perawatannya menjadi lebih murah, sedangkan PLTS dapat digunakan untuk memacu *base load* sehingga tidak dibutuhkan investasi awal yang besar.

## 2.5 Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

PLTS dapat bekerja dengan baik tentunya dengan dukungan dari komponen-komponen penyusunnya, baik itu komponen utama atau pendukung. Penjelasan kompoenen pendukung pada PLTS dapat dijelaskan sebagai berikut.

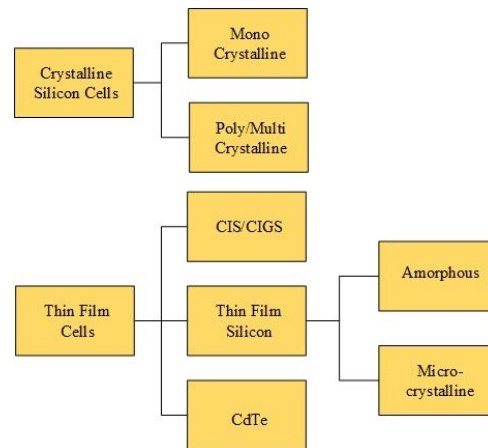
### 2.5.1 Sel Surya

Sel surya atau yang lebih dikenal dengan *solar cell* merupakan sebuah alat yang digunakan untuk mengkonversi energi cahaya matahari (surya) menjadi energi listrik dengan menggunakan prinsip efek *photovoltaic*. Dimana efek *photovoltaic* merupakan sebuah fenomena munculnya tegangan listrik karena adanya suatu hubungan atau kontak dari dua elektroda yang dihubungkan dengan sistem padatan atau cairan saat mendapatkan energi cahaya. Maka sel surya ini dapat pula disebut dengan sel *photovoltaic* (PV).

#### 2.5.1.1 Teknologi Sel Surya

Unjuk kerja sel surya dalam melakukan konversi energi foton dari sinar matahari menjadi energi listrik tidak terlepas dari teknologi yang digunakan oleh sel surya itu sendiri. Teknologi yang dimaksudkan seperti jenis material yang digunakan sebagai bahan utama pembuatan sel surya maupun proses atau teknologi pembuatannya. Bahan semikonduktor jenis silikon merupakan bahan yang paling umum digunakan dalam pembuatan sel surya tetapi seiring perkembangan jaman digunakan juga jenis bahan seperti *cadmium telluride* dan *copper indium (gallium) diselenide*. Setiap bahan memiliki karakteristik yang unik dan memiliki pengaruh kuat terhadap performa sel surya, metode pabrikasi dan segi biaya.

Sel surya salah satunya terbuat dari teknologi irisan silikon (*silicon wafers*) yang mana pembuatannya dilakukan dengan cara memotong atau mengiris tipis silikon dari balok batang silikon. Sel surya juga bisa terbuat dari teknologi *thin film* yang mana lapisan tipis dari bahan semikonduktor ini diendapkan pada *lowcost substrates*. Sel surya selanjutnya digolongkan sesuai dengan Batasan struktur dari bahan semikonduktornya seperti *monocrystalline*, *multicrystalline (polycrystalline)* atau *amorphous material*.



Gambar 2.5 Kelas Teknologi Panel Surya [4]

a. Crystalline Silikon (c-Si)

Teknologi pertama yang berhasil dikembangkan oleh para peneliti adalah teknologi yang menggunakan bahan silikon kristal tunggal. Teknologi ini mampu menghasilkan sel surya dengan efisiensi yang sangat tinggi. Teknologi *crystalline silikon* ini dibagi menjadi dua, yaitu sebagai berikut:

1. Monocrystalline

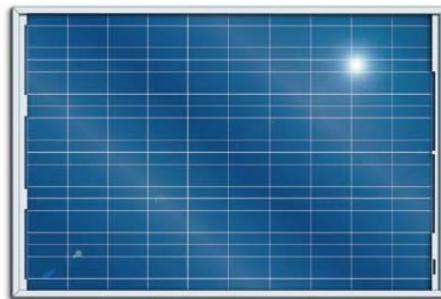
Sel *monocrystalline* biasanya terbuat dari batang silikon tunggal berbentuk silinder yang kemudian diiris tipis menjadi bentuk *wafers* dengan ketebalan sekitar 200-250  $\mu\text{m}$  dan pada permukaan atasnya dibuat alur-alur mikro (*microgrooves*) yang bertujuan untuk meminimalkan rugi-rugi refleksi atau pantulan. Keunggulan dari jenis ini yaitu efisiensinya yang lebih baik (15-20%) serta lebih tahan lama, tidak membutuhkan banyak ruang, tahan lama dan cocok digunakan pada daerah yang sering dilanda hujan. Tetapi jenis ini memiliki beberapa kelemahan yaitu harganya mahal dan terdapat banyak limbah ketika sel silikon dipotong selama pembuatan.



Gambar 2.6 Modul Surya Jenis Monocrystalline [5]

## 2. Polycrystalline

Sel *polycrystalline* terbuat dari sisa-sisa silikon yang dicampur dengan material lain kemudian disatukan dengan cara dilelehkan lalu dicetak dalam bentuk *wafers*, biasanya sel surya jenis ini berbentuk persegi dengan ketebalan 180-300  $\mu\text{m}$ . *Polycrystalline* dibuat dengan tujuan untuk menurunkan harga produksi sehingga memperoleh sel surya dengan harga yang lebih murah namun tingkat efisiensi sel surya ini tidak lebih baik dari *polycrystalline* yaitu sebesar 12-14%. Jenis ini juga memiliki keunggulan yaitu limbah silikon yang dihasilkan lebih sedikit, tetapi memiliki kekurangan yaitu tampilannya kurang estetik karena berwarna biru yang berbintik-bintik.



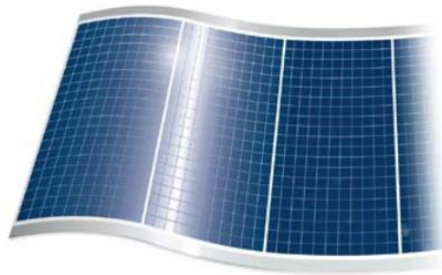
Gambar 2.7 Modul Surya Jenis Polycrystalline [5]

### b. Thin Film

Teknologi kedua yaitu sel surya yang dibuat dengan teknologi *thin film*. Teknologi jenis ini dibuat dengan maksud untuk mengurangi biaya pembuatan sel surya mengingat teknologi ini hanya menggunakan kurang dari 1% bahan baku silikon jika dibandingkan dengan bahan baku untuk tipe *silicon wafers*. Metode yang paling sering dipakai dalam pembuatan silikon jenis lapisan tipis ini yaitu dengan *plasma-enhanced chemical vapor deposition* (PECVD) dari gas silane dan hydrogen. Lapisan yang dibuat dengan metode ini menghasilkan silikon yang tidak memiliki arah orientasi kristal atau yang dikenal sebagai *amorphous silicon* (non kristal).

Selain menggunakan material dari silikon, sel surya jenis *thin film* ini juga dibuat dari bahan semikonduktor lainnya yang memiliki efisiensi solar sel tinggi seperti *cadmium telluride* (CdTe), *amorphous silicon* (a-Si), *cadmium sulfide* (CdS), *gallium arsenide* (GaAs), *copper indium selenide* (CIS) dan *copper indium*

*gallium selenide* (CIGS). Efisiensi tertinggi saat ini yang bisa dihasilkan oleh sel surya jenis *thin film* ini yaitu sebesar 19.5% yang berasal dari solar sel CIGS. Keunggulan lainnya dengan menggunakan jenis *thin film* ini adalah semikonduktor sebagai lapisan sel surya bisa dideposisi pada substrat yang lentur sehingga menghasilkan sebuah *device* sel surya yang fleksibel.



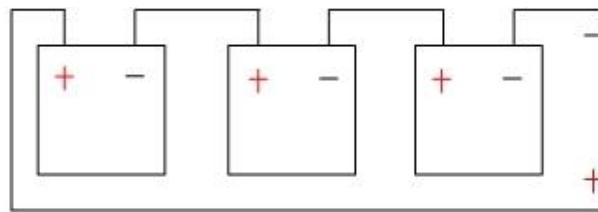
Gambar 2.8 Modul Surya Jenis Thin Film [5]

#### 2.5.1.2 Sistem Instalasi Sel Surya

Terdapat dua sistem dalam instalasi sel surya, yaitu sebagai berikut:

##### a. Rangkaian Seri

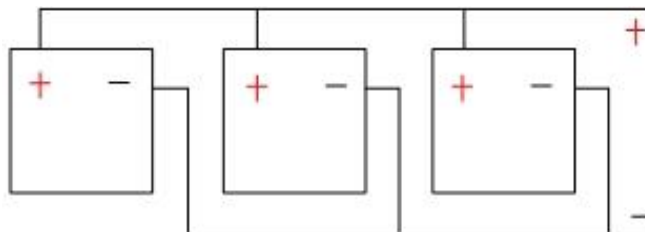
Hubungan seri suatu sel surya didapat apabila bagian depan (+) sel surya utama dihubungkan dengan bagian belakang (-) sel surya kedua.



Gambar 2.9 Perancangan Rangkaian Secara Seri [8]

##### b. Rangkaian Paralel

Rangkaian parallel sel surya didapat apabila terminal kutub positif dan negatif sel surya dihubungkan satu sama lain.

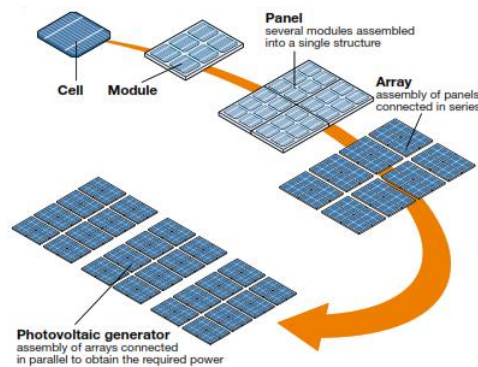


Gambar 2.10 Perancangan Rangkaian Secara Paralel [8]



### 2.5.2 Modul Surya

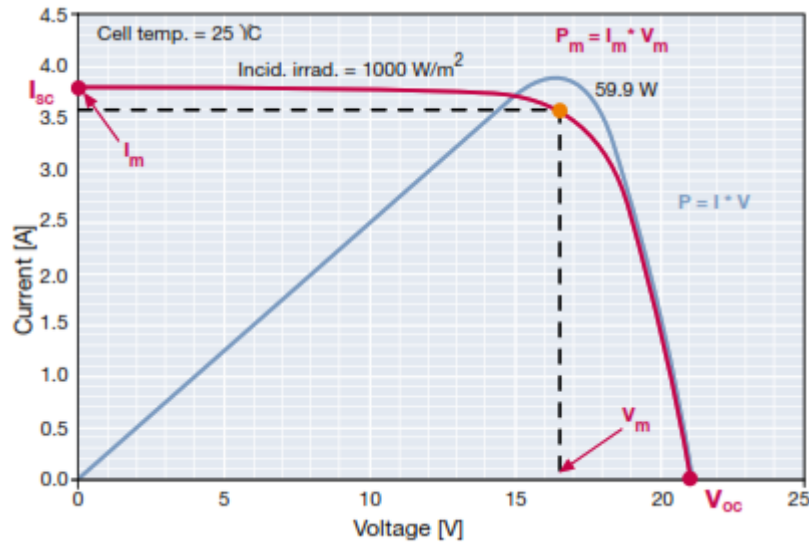
Modul surya merupakan komponen PLTS yang tersusun dari beberapa sel surya yang dirangkai sedemikian rupa, baik dirangkai seri maupun parallel dengan maksud dapat menghasilkan daya listrik tertentu dan disusun pada satu bingkai (*frame*) dan dilaminasi atau diberikan lapisan pelindung. Kemudian susunan dari beberapa modul surya yang terpasang sedemikian rupa pada penyangga disebut *array*. Modul surya yang terangkai seri dari sel-sel surya ditujukan untuk meningkatkan atau dalam hal ini dapat dikatakan menggabungkan tegangan (VDC) yang dihasilkan setiap selnya. Sedangkan untuk arusnya dapat didesain sesuai kebutuhan dengan memperhatikan luas permukaan sel.



Gambar 2.11 Penjelasan Dasar PV System [5]

#### 2.5.2.1 Karakteristik Listrik dari Modul Surya

Karakteristik listrik dari sebuah modul surya secara umum dapat dilihat dari besarnya arus hubung singkat (*short circuit current*) dan tegangan rangkaian terbuka (*open circuit voltage*). Hal ini bertujuan untuk mengetahui besarnya daya puncak (*peak power*) yang dapat dicapai. Secara sederhana, karakteristik dari modul surya ini diterangkan lewat kurva arus terhadap tegangan (I-V Curve).



Gambar 2.12 Kurva Karakteristik Listrik  
Pada Modul Surya [5]

Ketika modul mendapatkan pancaran sinar matahari, tegangan yang dihasilkan dapat diukur pada kutub positif dan negative dengan menggunakan voltmeter. Saat itu tidak ada arus yang mengalir karena sistem belum terhubung dengan beban. Jadi pengukuran ini disebut dengan *open circuit voltage* ( $V_{oc}$ ). Ketika penerapan beban atau pengisian baterai tersambung diantara kedua terminal maka arus akan mengalir dari modul menuju beban. Saat hal itu terjadi maka tegangan modul lebih kecil daripada  $V_{oc}$ .

Dengan menambahkan beban yang tersambung secara parallel, maka arus lebih banyak mengalir dan tegangan menjadi rendah. Untuk arus tertinggi yang dapat dihasilkan modul, kedua terminal modul dapat disambungkan secara langsung, dengan demikian tegangan yang terjadi adalah 0 (nol/zero), dan saat ini apabila diukur dengan amperemeter maka dapat diketahui arus maksimum modul tersebut yang disebut dengan *short circuit current*  $I_{sc}$ .

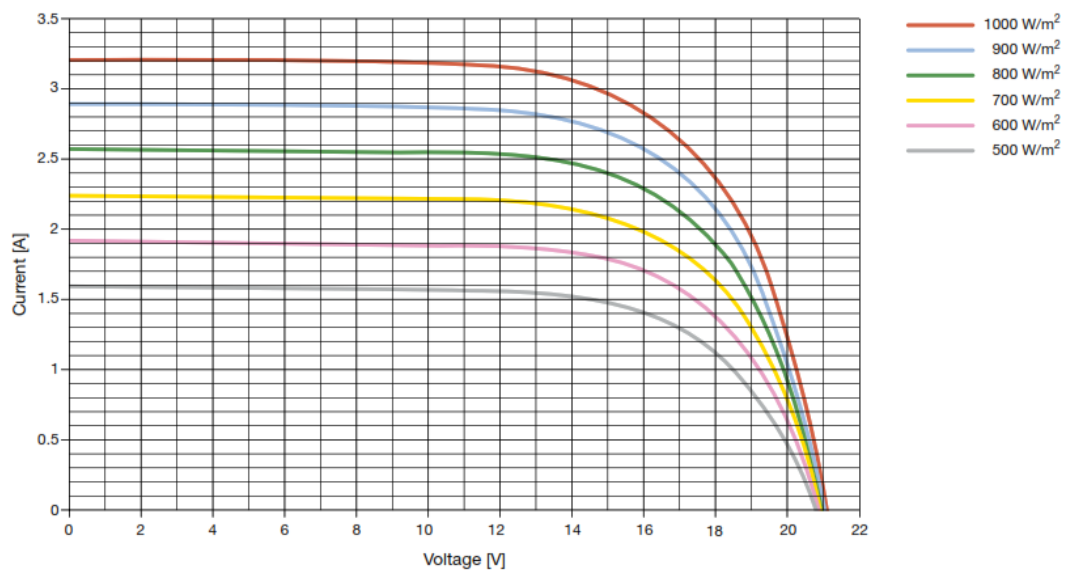
Salah satu spesifikasi yang terdapat pada modul surya (diberikan oleh pabrik pembuat) yaitu *power* maksimum. Daya listrik ini dapat diperoleh dengan cara menghasilkan arus dan tegangan. Untuk mendapatkan *peak power* dari modul maka tegangan dan arus harus maksimum, dan ini terdapat pada kurva I-V untuk 1000 W/m [5].

### 2.5.2.2 Variasi dalam Produksi Energi Modul Surya

Faktor utama yang mempengaruhi modul surya pada suatu PLTS dalam proses produksi energi listrik yaitu sebagai berikut:

- a. Iradiasi (besarnya intensitas sinar matahari) pada modul surya.

Pengaruh iradiasi terhadap produksi energi listrik pada modul surya dapat dilihat pada gambar 2.13 berikut, yang memperlihatkan fungsi peristiwa iradiasi terhadap kurva karakteristik tegangan (V) dan arus (I).



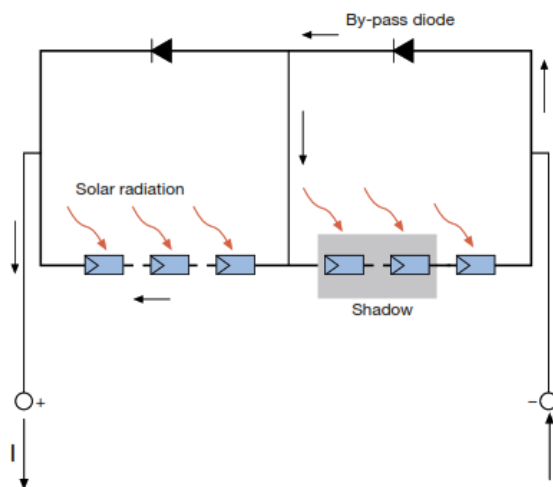
Gambar 2.13 Pengaruh Iradiasi Terhadap Tegangan dan Arus Modul Surya [5]

Ketika iradiasi menurun, arus yang dihasilkan oleh modul surya akan menurun dengan proporsional, sedangkan variasi dari tegangan tanpa beban sangatlah kecil. Sebagai suatu kenyataan, efisiensi dari konversi pada modul surya tidak terpengaruh oleh iradiasi yang bervariasi asalkan masih dalam batas standar operasi dari modul surya, yang berarti bahwa efisiensi konversi adalah sama untuk keduanya, baik dalam kondisi cerah begitu juga kondisi mendung. Oleh karena itu kecilnya energi listrik yang dihasilkan modul surya saat langit dalam kondisi mendung dapat dijadikan acuan bukannya penurunan efisiensi melainkan penurunan produksi arus listrik karena iradiasi matahari yang rendah.

- b. Bayangan (*shading*)

Berbicara mengenai area yang digunakan oleh modul surya pada suatu PLTS, sebagian darinya (satu atau lebih sel) mungkin dibayangi atau terhalangi

oleh pepohonan, daun yang jatuh, asap, kabut, awan, atau panel surya yang terpasang di dekatnya. Pada kasus *shading* ini, modul surya yang tertutupi akan berhenti memproduksi energi listrik dan berubah menjadi beban pasif. Sel ini akan berlaku seperti diode dalam kondisi memblok arus yang diproduksi oleh sel lain dalam hubungan seri dan akan membahayakan keseluruhan produksi dari modul surya tersebut, terlebih dapat merusak modul akibat adanya panas yang berlebih. Dalam hal ini menghindari permasalahan yang lebih besar akibat *shading* pada suatu *string*, maka diantisipasi dengan menggunakan diode *bypass* yang terpasang parallel pada masing-masing modul (ABB QT Vol. 10).



Gambar 2.14 Pengaruh Iradiasi Terhadap  
Tegangan dan Arus Modul Surya [5]

### 2.5.2.3 Konversi Energi

Dalam mengolah energi matahari menjadi energi listrik, terdapat beberapa rumusan yang bisa digunakan dalam proses pengolahan tersebut yaitu sebagai berikut:

#### a. Besar energi matahari yang diterima modul surya

Besar energi matahari yang diterima modul surya dapat dilakukan dengan perhitungan intensitas cahaya matahari yang masuk ( $P_{in}$ ) yaitu:

$$P_{in} = I_{rad} \times A_{panel} \quad (1)$$

Dimana :

$P_{in}$  = energi/daya masuk ke panel surya (Watt)

$I_{rad}$  = intensitas radiasi matahari ( $W/m^2$ )

$A_{panel}$  = luas permukaan panel ( $m^2$ )

b. Besar energi listrik yang dihasilkan modul surya

Besar energi listrik yang dihasilkan dari modul surya ( $P_{out}$ ) dapat dihitung dengan mengukur tegangan dan arus keluaran modul surya sehingga energi yang dihasilkan merupakan daya keluaran dari panel surya. Dapat digunakan rumus sebagai berikut yaitu:

$$P_{out} = V \times I \quad (2)$$

Dimana :

$P_{out}$  = energi/daya keluaran dari panel surya (Watt)

$V$  = tegangan yang dihasilkan (Volt)

$I$  = kuat arus (Ampere)

c. Besar efisiensi yang dihasilkan modul surya

Besar efisiensi yang dihasilkan modul surya dapat dihitung dengan rumusan sebagai berikut:

$$\text{Efisiensi} = \frac{\text{Besar energi yang keluar } (P_{out})}{\text{Besar energi yang datang } (P_{in})} \quad (3)$$

### 2.5.3 Penyangga dan Sistem Pelacak

Modul surya harus terpasang pada suatu struktur atau kerangka untuk menjaganya tetap terarah pada arah yang tepat agar tersusun lebih rapi dan terlindungi. Struktur pemasangan modul surya bisa pada struktur yang tetap (*fixed*) atau dengan sistem pelacak sinar matahari (*tracking system*). Berikut ini merupakan penjelasan dari sistem tersebut:

a. Fixed mounting systems

Jenis *fixed mounting systems* ini menjaga array modul surya pada sudut kemiringan yang tetap menghadap pada suatu sudut tetap dari arah matahari yang telah ditentukan. Sudut kemiringan dan arah (orientasi) pada umumnya disesuaikan berdasarkan lokasi pemasangan PLTS. Sistem ini memiliki keunggulan yaitu sederhana, murah dan biaya perawatannya lebih sedikit daripada sistem jenis *tracking*.

b. Tracking systems

Jenis *tracking systems* merupakan sebuah sistem yang tersusun dari sebuah komponen sistem yang dapat digunakan untuk mengarahkan panel surya atau pemantul cahaya secara terpusat terhadap matahari. Panel surya tersebut dapat memaksimalkan tegangan yang akan dihasilkan.

Sistem ini memiliki dua jenis pergerakan yaitu pengikut matahari dengan dua arah gerak (ke arah timur-barat) dan pengikut matahari dengan empat arah gerak (ke arah timur-barat dan utara-selatan). Pengikut matahari (*solar tracker*) yang memiliki dua arah (timur-barat) biasanya digunakan pada daerah-daerah yang terletak diluar garis khatulistiwa (*equinox*) dan titik balik matahari (*solstice*). Hal ini dilakukan karena posisi matahari pada daerah tersebut selalu condong ke arah utara dan selatan. Sedangkan pengikut matahari yang memiliki empat arah gerak (timur-barat dan utara-selatan) biasanya digunakan pada daerah yang dilalui oleh garis khatulistiwa atau dalam titik balik matahari. Hal ini dilakukan karena posisi matahari dalam setiap tahunnya bergerak condong ke arah utara maupun selatan.

#### 2.5.4 Inverter



Gambar 2.15 Inverter [5]

Inverter merupakan sebuah alat yang berfungsi untuk mengubah arus DC menjadi arus AC. Pada PLTS, inverter berfungsi sebagai pengkondisi tenaga listrik (*power condition*) dan sistem kontrol yang merubah arus listrik searah (DC) yang dihasilkan oleh modul surya menjadi listrik arus bolak-balik (AC) yang nantinya akan mengontrol kualitas daya listrik yang dikeluarkan untuk dikirim ke beban atau jaringan listrik. Terdapat dua macam sistem inverter pada PLTS yaitu:

1. Inverter 1 fasa untuk sistem PLTS yang bebannya kecil.
2. Inverter 3 fasa untuk sistem PLTS yang besar dan terhubung dengan jaringan PLN.

Berdasarkan karakteristik dari performa yang dibutuhkan, inverter untuk sistem PLTS berdiri sendiri (*stand alone*) dan *grid connected* memiliki karakteristik yang berbeda, yaitu:

1. Pada PLTS *stand alone*, inverter harus mampu mensuplai tegangan AC yang konstan pada variasi produksi dari modul surya dan tuntutan beban (*load demand*) yang dipikul.
2. Pada PLTS *grid connected*, inverter dapat menghasilkan kembali tegangan yang sama persis dengan tegangan jaringan pada waktu yang sama untuk mengoptimalkan dan memaksimalkan keluaran energi yang dihasilkan oleh modul surya.

#### 2.5.4.1 Konsep Hubungan Inverter

Konsep hubungan inverter menjelaskan tentang bentuk rangkaian inverter pada suatu sistem PLTS terhadap pembangkitan daya listrik oleh modul surya dan hubungan antara inverter dengan beban atau jaringan. Secara umum ada dua kelas inverter yaitu inverter sentral atau disebut *central* dan *string inverters*.

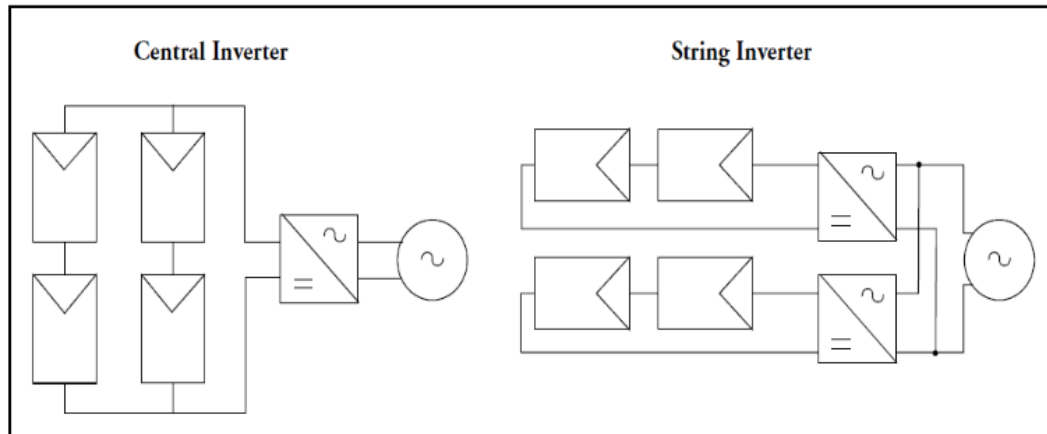
##### a. Inverter Central

Inverter central biasanya digunakan pada berbagai sistem PLTS skala menengah dan skala besar. Inverter central menyajikan instalasi yang lebih handal dan sederhana namun memiliki kekurangan yaitu ketidaksepadanan rugi-rugi (*mismatch losses*) meningkat yang disebabkan variasi tegangan dan arus dari modul surya pada *array* yang sama dan ketiadaan dari *maximum power point tracking* (MPPT) untuk setiap *string*. Hal ini mungkin menyebabkan masalah pada *array* yang memiliki kemiringan dan sudut orientasi beragam atau majemuk berkaitan dengan iradiasi, bayangan atau tipe modul surya yang berbeda. Inverter central biasanya merupakan sistem tiga fasa dan dilengkapi dengan transformator frekuensi jaringan (*grid frequency transformer*). Selain itu inverter central menggunakan konfigurasi *master slave* yaitu beberapa inverter tidak akan bekerja atau padam ketika iradiasi dalam keadaan rendah, sedangkan inverter lainnya tetap bekerja sesuai atau mendekati pembebanan yang optimal. Ketika radiasi tinggi, semua beban dibagikan dan ditanggung oleh semua inverter.

##### b. Inverter String

Inverter string menggunakan inverter yang berlipat ganda untuk *string array* yang berlipat ganda juga. Penggunaan inverter string sangat banyak dan meningkat karena inverter string dapat mengatasi Batasan daya yang luas dan lebih murah dalam proses pabrikasinya daripada jenis inverter central. Sistem ini sangat cocok

untuk kondisi modul surya yang tidak bisa dipasang pada orientasi yang sama, berbeda spesifikasi, atau perbedaan iradiasi yang diterima. Sistem ini memiliki kelebihan yaitu lebih mudah dalam perbaikan dan penggantian, karena tidak diperlukan personil dan spesialis, dan waktu yang dibutuhkan tidak selama sistem sentral, jadi tidak banyak hasil produksi energi yang terbuang saat perbaikan.



Gambar 2.16 Konfigurasi Inverter [4]

### 2.5.5 Charge Controller

*Charge controller* merupakan sebuah komponen dalam sistem PLTS yang berfungsi sebagai pengatur arus listrik (*current regulator*) baik terhadap arus yang masuk dari panel surya maupun arus dari beban keluar atau yang digunakan. Fungsinya yaitu untuk menjaga kondisi baterai agar tidak terjadi *over charging* dan mengatur tegangan serta arus dari panel surya ke baterai. Fungsi dan fitur dari *solar charge controller* yaitu sebagai berikut:

1. Saat tegangan pengisian di baterai telah mencapai keadaan penuh, maka *controller* akan menghentikan arus listrik yang masuk ke dalam baterai untuk mencegah *over charge*, dengan demikian ketahanan baterai akan jauh lebih tahan lama. Di dalam kondisi ini, listrik yang tersuplai dari panel surya akan langsung terdistribusi ke beban atau peralatan listrik dalam jumlah tertentu sesuai dengan konsumsi daya peralatan listrik.
2. Saat tegangan di baterai dalam keadaan hampir kosong, maka *controller* berfungsi menghentikan pengambilan arus listrik dari baterai oleh beban atau peralatan listrik. Dalam kondisi tegangan tertentu (umumnya sekitar 10% sisa tegangan di baterai), maka pemutusan arus beban dilakukan oleh *controller*. Hal ini menjaga baterai dan mencegah kerusakan pada sel-sel baterai. Pada



kebanyakan model *controller*, indicator lampu akan menyala dengan warna tertentu (umumnya berwarna merah atau kuning) yang menunjukkan bahwa baterai dalam proses *charging*. Dalam kondisi ini, bila sisa arus di baterai kosong (dibawah 10%), maka pengambilan arus listrik dari baterai akan diputus oleh *controller*, maka peralatan listrik atau beban tidak dapat beroperasi. Keadaan ini disebut *overdischarge* akibat beban yang dipikul cukup besar.

3. Pada *controller* tipe-tipe tertentu dilengkapi dengan digital meter dengan indikator yang lebih lengkap untuk memonitor berbagai macam kondisi yang terjadi pada sistem PLTS yang dapat terdeteksi dengan baik.

### 2.5.6 Baterai

Baterai merupakan sebuah komponen yang digunakan pada sistem PLTS dengan fungsi untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan modul surya. Energi listrik yang disimpan pada baterai ditujukan sebagai sumber cadangan ketika modul surya sedang tidak menghasilkan energi listrik seperti pada saat malam hari dan cuaca mendung. Satuan kapasitas energi yang dihasilkan pada baterai adalah *ampere hour* (Ah), dengan maksud arus maksimum yang dapat dikeluarkan oleh baterai selama satu jam. Proses pengosongan baterai (*discharge*) tidak boleh dikosongkan hingga titik maksimum karena akan mempengaruhi usia pakai (*life time*) dari baterai tersebut. Batas pengosongan dari baterai tersebut dengan *depth of discharge* (DOD) yang dinyatakan dalam satuan persen. Suatu baterai memiliki DOD 80% ini berarti bahwa hanya 80% dari energi yang tersedia dapat dipergunakan dan 20% tetap berada dalam cadangan. Semakin dalam DOD yang diberlakukan pada suatu baterai maka akan semakin pendek pula siklus dari baterai tersebut.

Baterai dapat diartikan sebagai gabungan dari sel-sel yang terhubung seri. Secara umum ada dua jenis baterai yang digunakan untuk keperluan *solar electric systems* yaitu baterai *lead acid* (accu) dan *nickel cadmium*. Kedua jenis baterai tersebut memiliki komponen yang hampir sama hanya saja berbeda dalam jenis elektroda yang dipakai dan jenis elektrolit yang digunakan untuk membangkitkan reaksi elektrokimia. Baterai jenis *lead acid* menggunakan lempengan yang terbuat dari material *lead* dan elektrolit yang digunakan yaitu  $H_2SO_4$  (asam sulfat) dengan

efisiensi 80%. Sedangkan baterai jenis *nickel cadmium* menggunakan material *cadmium* sebagai elektroda negatif dan *nickel* sebagai elektroda positif dengan elektrolit yang digunakan yaitu potassium hidroksida yang memiliki efisiensi 70%.

Baik baterai jenis *lead acid* maupun *nickel cadmium* secara umum memiliki empat bagian penting. Keempat bagian tersebut mempunyai fungsi yang berbeda-beda dalam menunjang proses penyimpanan energi maupun pengeluaran energi. Empat bagian tersebut terdiri dari:

1. Elektroda
2. Pemisah atau separator
3. Elektrolit
4. Wadah Sel

Dari sekian banyak jenis baterai, jenis *lead acid* lebih banyak digunakan pada sistem PLTS karena ketersediaan ukuran (Ah) yang ada lebih banyak, lebih murah, dan karakteristik performanya yang cocok. Pada umumnya baterai sebagai penyimpanan energi dibagi menjadi dua kategori yaitu:

1. *Primary batteries* yaitu dapat menyimpan energi dan mengirim energi listrik ke beban tetapi tidak dapat diisi kembali (*recharge*). Jenis baterai ini tidak digunakan pada PLTS. Beberapa jenis dari *primary batteries* yaitu sebagai berikut:

- a. Baterai Zinc-Carbon

Baterai Zinc-Carbon juga sering disebut dengan baterai *heavy duty* yang sering dijumpai di pasaran. Baterai jenis ini terdiri dari bahan zinc yang berfungsi sebagai terminal negatif dan juga sebagai pembungkus baterainya. Sedangkan terminal positifnya terbuat dari karbon yang berbentuk batang (rod). Baterai jenis ini relatif memiliki harga yang murah dibandingkan dengan jenis lainnya.

- b. Baterai Alkaline

Baterai alkaline ini memiliki daya tahan yang lebih lama tetapi juga memiliki harga yang lebih mahal disbanding dengan jenis baterai Zinc-Carbon. Elektrolit yang digunakan yaitu potassium hydroxide yang merupakan zat alkali.

c. Baterai Lithium

Baterai primer jenis lithium menawarkan kinerja yang lebih baik dibandingkan jenis-jenis baterai primer lainnya. Baterai lithium dapat disimpan lebih dari 10 tahun dan dapat bekerja pada suhu yang sangat rendah. Karena keunggulannya tersebut, baterai jenis ini sering digunakan untuk aplikasi memory backup pada mikrokomputer maupun jam tangan. Baterai ini biasanya dibuat menyerupai bentuk uang logam.

d. Baterai Silver Oxide

Baterai silver oxide merupakan jenis baterai yang tergolong mahal dalam harganya. Hal ini dikarenakan tingginya harga silver (perak). Baterai silver oxide dapat dibuat untuk menghasilkan energi yang tinggi tetapi dengan bentuk yang relatif kecil dan ringan. Baterai jenis ini sering dibuat dalam bentuk menyerupai uang logam dan biasanya diterapkan pada jam tangan dan kalkulator.

2. *Secondary batteries* yaitu dapat menyimpan dan mengirim energi listrik ke beban dan dapat juga diisi kembali (*recharge*). Jenis baterai ini digunakan pada sistem PLTS. Beberapa jenis dari *secondary batteries* yaitu sebagai berikut:

a. Baterai Lithium Ion (Li-Ion)

Didalam baterai ini, ion lithium bergerak dari elektroda negative ke elektroda positif saat dilepaskan dan kembali saat diisi ulang. Baterai Li-ion memakai senyawa lithium interkalasi sebagai bahan elektrodanya yang mana berbeda dengan lithium metalik yang dipakai pada baterai lithium non isi ulang. Baterai Li-ion umumnya dijumpai pada barang-barang elektronik yang sering dibeli konsumen di pasaran. Baterai ini merupakan jenis baterai isi ulang yang paling populer untuk peralatan elektronik portabel karena memiliki salah satu kepadatan energi terbaik tanpa efek memori dan mengalami kehilangan isi yang lambat saat tidak digunakan. Selain digunakan pada peralatan elektronik konsumen, baterai Li-ion juga sering digunakan oleh industri militer, kendaraan listrik dan dirgantara. Sejumlah penelitian berusaha memperbaiki teknologi baterai Li-ion tradisional, berfokus pada kepadatan energi, daya tahan, biaya dan keselamatan intrinsik.

b. Baterai Lithium Polymer (Li-Po)

Hampir sama dengan baterai Li-ion akan tetapi baterai Li-Po tidak menggunakan cairan sebagai elektrolit melainkan menggunakan elektrolit polimer kering yang berbentuk seperti lapisan plastic film tipis. Lapisan film ini disusun berlapis-lapis diantara anoda dan katoda yang mengakibatkan pertukaran ion. Dengan metode ini baterai Li-Po dapat dibuat dalam berbagai bentuk dan ukuran. Diluar dari kelebihan arsitektur baterai Li-Po terdapat juga kekurangan yaitu lemahnya aliran pertukaran ion yang terjadi melalui elektrolit polimer kering. Hal ini menyebabkan penurunan pada *charging* dan *discharging rate*. Masalah ini sebenarnya bisa diatasi dengan memanaskan baterai sehingga menyebabkan pertukaran ion menjadi lebih cepat, namun metode ini dianggap tidak dapat untuk diaplikasikan pada keadaan sehari-hari. Seandainya para ilmuwan dapat memecahkan masalah ini maka resiko keamanan pada baterai jenis lithium akan sangat berkurang.

c. Baterai Lead Acid

Baterai *lead acid* atau biasa disebut dengan aki merupakan salah satu jenis baterai yang menggunakan asam timbal sebagai bahan kimianya. Secara umum terdapat dua jenis baterai *lead acid* ini yaitu *starting battery* dan *deep cycle battery*.

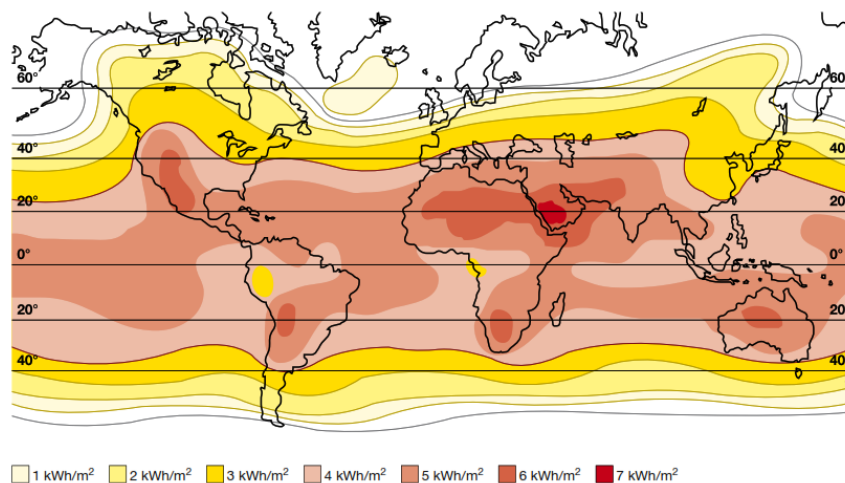
d. Baterai Nickel-Metal Hydride (Ni-MH)

Baterai jenis ini dibuat dengan komponen yang lebih terjangkau dan ramah lingkungan. Baterai Ni-MH menggunakan ion hidrogen untuk menyimpan energinya tetapi tidak seperti baterai Li-ion yang menggunakan ion lithium. Baterai Ni-MH terdiri dari campuran nikel dan logam lain seperti titanium. Baterai ini biasanya mengandung pula komponen logam lain seperti mangan, aluminium, kobalt, zirconium dan vanadium. Logam-logam tersebut pada umumnya berfungsi sebagai penangkap ion hidrogen yang dilepaskan untuk memastikan tidak mencapai fase gas.

## 2.6 Sumber Energi Matahari

Sebelum membuat rancangan dan membangun sebuah PLTS diperlukan pengetahuan mengenai potensi dari sumber energi matahari yang ada pada suatu

daerah tertentu. Hal tersebut perlu dilakukan karena potensi dari sumber energi matahari yang dimiliki tiap daerah berbeda-beda [9]. Cara atau sumber untuk memperoleh data tentang potensi energi matahari pada suatu daerah terbagi menjadi dua, yaitu data yang berasal dari satelit dan yang berasal dari pengukuran langsung pada lokasi dengan menggunakan solarimeter atau *thermal pyranometer* yang dikombinasikan dengan sensor silikon. Data yang didapat dari pengukuran pada lokasi secara langsung dapat digunakan sebagai kalibrasi terhadap sumber data lain agar level akurasi dan kepastiannya semakin meningkat. Jumlah tenaga surya yang tersedia per satuan luas biasa disebut dengan istilah radiasi. Lalu radiasi matahari sendiri adalah hasil dari penjumlahan penyinaran matahari selama periode waktu [5]. Berdasarkan *solar atlas*, Indonesia memiliki jumlah radiasi matahari sebesar 4 kWh/m<sup>2</sup> - 5 kWh/m<sup>2</sup> yang dapat dilihat pada gambar 2.17 dibawah ini.



Gambar 2.17 Solar Atlas [5]

### 2.6.1 Sumber Energi Matahari di Indonesia

Data yang telah dikumpulkan dari berbagai lokasi di Indonesia menunjukkan bahwa sumber energi matahari di Indonesia dapat dibagi berdasarkan wilayah yaitu sebagai berikut:

1. Kawasan Barat Indonesia (KBI) = 4,5 kWh/m<sup>2</sup>/hari, variasi bulanan sekitar 10%.
2. Kawasan Timur Indonesia (KTI) = 5,1 kWh/m<sup>2</sup>/hari dengan variasi bulanan sekitar 9%.
3. Rata-rata Indonesia = 4,8 kWh/m<sup>2</sup>/hari dengan variasi bulanan sekitar 9%.

### **2.6.2 Radiasi**

Radiasi mempengaruhi variasi arus dan tegangan. Terdapat hubungan antara variasi pada radiasi dan variasi pada hubungan arus. Tegangan pada rangkaian terbuka tidak berubah secara drastis terhadap radiasi. Namun, bagaimanapun tetap terjadi sedikit peningkatan pada saat kenaikan radiasi. Semakin tinggi radiasi maka semakin besar pula arus dan tegangan yang dihasilkan. Salah satu faktor yang mempengaruhi jumlah radiasi yang sampai pada modul adalah terjadinya bayangan-bayangan yang dapat menghalangi radiasi sampai kepada modul surya seperti bayangan pohon, bayangan awan, bayangan bangunan dan lain-lain.

### **2.6.3 Inklinasi dan Orientasi Modul Surya**

Penempatan modul surya untuk mendapatkan energi maksimum sebaiknya dihadapkan ke arah selatan, walaupun dihadapkan ke arah timur atau barat juga memungkinkan untuk mendapat energi matahari tetapi jumlah listrik yang dihasilkan akan lebih rendah. Selain itu, sudut peletakan modul surya tidak boleh kurang dari 10 derajat atau melebihi 45 derajat. Orientasi dari rangkaian modul surya ke arah matahari merupakan sebuah hal yang penting agar modul surya dapat menghasilkan energi yang maksimum. Misalnya, untuk 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.

### **2.6.4 Sudut Kemiringan Modul Surya**

Sudut kemiringan memiliki dampak yang besar terhadap tingkat radiasi matahari yang diterima pada permukaan modul surya. Untuk sudut kemiringan tetap, daya maksimum selama satu tahun akan diperoleh ketika sudut kemiringan modul surya sama dengan lintang lokasi. Sistem pengaturan berfungsi untuk memberikan sebuah kontrol dan pengaman dalam sistem PLTS sehingga sistem pembangkit tersebut dapat bekerja secara efisien dan optimal. Peralatan pengaturan pada sistem PLTS ini dapat dibuat secara manual, yaitu dengan cara selalu menempatkan kearah matahari. Dapat juga dibuat secara otomatis, mengingat sistem ini banyak dipergunakan untuk daerah terpencil yang dibuat dengan rangkaian elektronik. Tetapi jika ditinjau dari kepraktisan dan kemudahan

perawatan, posisi pemasangan modul surya direkomendasikan secara tetap dengan sudut kemiringan tertentu [10].

Dalam menentukan arah dan sudut kemiringan dari modul surya seharusnya disesuaikan dengan letak geografis lokasi pemasangan modul surya tersebut. Penentuan ini berguna untuk membenarkan posisi penghadapan sebuah modul surya ke arah garis khatulistiwa. Pemasangan modul surya ke arah khatulistiwa ini dimaksudkan agar modul surya mendapatkan penyinaran yang optimal. Modul surya yang terpasang di khatulistiwa (lintang =  $0^\circ$ ) yang diletakkan secara mendatar (*tilt angle* =  $0^\circ$ ) akan menghasilkan energi maksimum.

### 2.6.5 Temperatur

Kinerja sel surya dipengaruhi oleh suhu tersebut bahwa semakin tinggi suhu sel maka akan semakin rendah produksi energinya. Sel surya dapat mencapai suhu tinggi ketika radiasi matahari berada pada titik terkuat di musim panas sekitar tengah hari yang mana suhu dapat mencapai  $70^\circ\text{C}$  [11]. Panas yang hilang melalui bagian belakang modul dengan konveksi alami. Untuk alasan ini, penting untuk menghindari pemasangan sel surya dengan membatasi aliran udara dibawah modul. Sebagai aturan sederhana, kenaikan suhu sebesar  $10^\circ\text{C}$  akan menurunkan output daya yang efektif dari sistem modul surya sekitar 4% - 5% pada saat terjadi suhu yang tinggi, sel-sel surya yang beroperasi. Saat panas panel sel-sel surya meningkat, tegangan yang melintasi setiap sel akan jatuh dan ketika tegangan menurun maka daya juga akan menurun.

## 2.7 Analisa Unjuk Kerja PLTS

Berdasarkan IEC 61724: *Photovoltaic system performance monitoring-guidelines for measurement, data exchange and analysis*, parameter unjuk kerja PLTS ditampilkan ke dalam formula sebagai berikut, yaitu:

### 2.7.1 Final Yield ( $Y_F$ )

Hasil akhir atau *final yield* ( $Y_F$ ) ditetapkan dalam periode tahunan, bulanan, atau harian dari keluaran bersih (*net*) energi AC pada sistem dibagi dengan daya puncak dari PV array yang terpasang pada kondisi pengujian standar (STC) pada iradiasi surya  $1000\text{ W/m}^2$  dan temperature sel  $25^\circ\text{C}$  dengan formula berikut ini [12]:

$$Y_F = \frac{E_{PV}}{P_0} (kWh_{AC} / kWp_{DC}) \quad (4)$$

Dimana:

$Y_F$  = *final yield*

$P_0$  = daya puncak [ $kWp_{DC}$ ]

$E_{PV}$  = energi ke jaringan [ $kWh_{AC}$ ]

### 2.7.2 Reference Yield ( $Y_R$ )

Hasil acuan atau *reference yield* ( $Y_R$ ) adalah total dari insulasi matahari pada suatu bidang ( $H_T$ ) dalam satuan  $kWh/m^2$  dibagi dengan iradiasi *array* acuan ( $1 kW/m^2$ ), oleh karena itu *reference yield* adalah jumlah dari *peak sun - hours* atau dapat dirumuskan sebagai berikut [13]:

$$Y_R = \frac{H_T}{G_{STC}} (kWh/m^2 / kWp) \quad (5)$$

Di mana:

$Y_R$  = *reference yield*

$H_T$  = iradiasi pada bidang *array* [ $kWh/m^2$ ]

$G_{STC}$  = iradiasi referensi STC [ $1 kW/m^2$ ]

### 2.7.3 Performance Ratio (PR)

Kualitas dari suatu PLTS dapat juga diuraikan oleh *performance ratio* (PR). PR biasanya dinyatakan dalam presentase, yang menunjukkan rugi total pada sistem saat mengkonversi dari DC menjadi keluaran AC atau dapat dirumuskan sebagai berikut [14]:

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} \quad (6)$$

Di mana:

PR = *performance ratio*

$Y_F$  = *final yield*

$Y_R$  = *reference yield*

### 2.7.4 Capacity Factor (CF)

Faktor kapasitas atau *capacity factor* dari PLTS biasanya dinyatakan dalam presentase merupakan sebuah rasio dari keluaran energi aktual dalam periode satu



tahun dengan keluaran jika beroperasi pada daya nominal selama setahun penuh (24 jam setiap hari selama setahun) atau dapat dirumuskan sebagai berikut [15]:

$$CF = \frac{Y_F}{8760} \quad (7)$$

## 2.8 PVsyst



Gambar 2.18 Logo Software PVsyst [17]

PVsyst merupakan paket *software* yang digunakan untuk proses pembelajaran, pengukuran (*sizing*), dan analisis data dari sistem PLTS secara lengkap. PVsyst dikembangkan oleh Universitas Genewa, yang terbagi ke dalam sistem terinterkoneksi jaringan (*grid-connected*), sistem berdiri sendiri (*stand-alone*), siste pompa (*pumping*), dan jaringan arus searah untuk transportasi publik (*DC-grid*). PVsyst juga dilengkapi *database* dari sumber data meteorology yang luas dan beragam, serta data komponen PLTS [16]. Beberapa contoh sumber data meteorologi yang dapat digunakan pada PVsyst ini yaitu bersumber dari MeteoNorm V 6.1 (interpolasi 1960-1990 atau 1981-2000), NASA-SSE (1983-2005), PVGIS (untuk Eropa dan Afrika), Satel-Light (untuk Eropa), TMY2/3 dan SolarAnywhere (untuk USA), EPW (untuk Kanada), RetScreen, Helioclim, dan SolarGIS (berbayar) [17].

Untuk dapat memprediksi dan menganalisa potensi produksi energi dan unjuk kerja PLTS digunakanlah fitur desain proyek pada PVsyst. Pada fitur ini simulasi akan dijalankan dengan cara membuat terlebih dahulu desain dari sistem PLTS sesuai dengan sistem yang terpasang. Langkah dalam membuat desain proyek adalah sebagai berikut, yaitu:

### a. Menetapkan proyek

Dengan cara menentukan jenis proyek atau jenis PLTS seperti pada gambar 2.18 yaitu diantaranya *grid connected*, *stand alone*, *pumping*, dan *dc grid*. Dilanjutkan dengan membuat desain proyek baru dan mendefinisikan proyek

seperti nama proyek, lokasi dan data meteorologi seperti pada gambar 2.19 berikut [18].

b. Menetapkan perbedaan sistem (*system variant*)

Dengan cara menentukan orientasi terlebih dahulu seperti jenis penyangga panel surya, kemiringan panel, dan *azimuth*. Lalu menentukan sistem PLTS dengan cara memilih jenis dan jumlah inverter dan modul surya. Selain itu terdapat parameter opsional seperti pemilihan profil horizon sesuai lokasi yang dapat ditambahkan dengan impor data dari software lain [19].

c. Menjalankan simulasi untuk mendapatkan hasil simulasi



Gambar 2.19 Tampilan Menu Awal PVsyst [19]

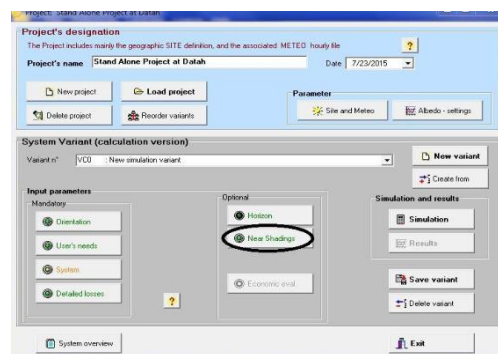


Gambar 2.20 Tampilan Desain Proyek [19]

### 2.8.1 Fitur Pada PVsyst

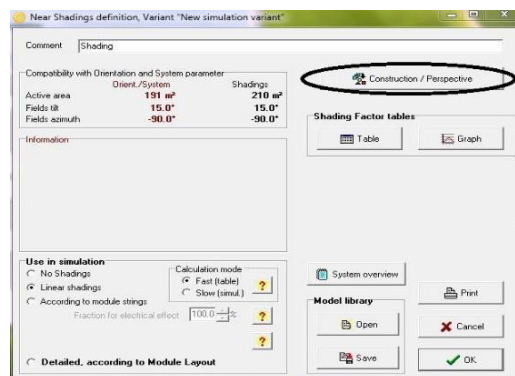
Salah satu fitur yang terdapat pada software PVsyst yaitu dapat melakukan pemodelan dengan menyesuaikan bentuk atau kondisi PLTS di lapangan ke dalam bentuk 3D [20]. Fitur ini berfungsi untuk mengukur faktor *near shading* dengan menggunakan pemodelan dalam bentuk 3D atau yang disebut dengan *near shading 3D construction*. Hal terpenting dalam melakukan pemodelan dalam bentuk 3D ini yaitu harus mengetahui terlebih dahulu kondisi PLTS di lapangan seperti luas lahan PLTS, luas PV array, luar bangunan, jarak antara bangunan dengan PV array dan juga jarak antara PV array dengan pepohonan yang dapat memunculkan bayangan atau *shading* yang jatuh pada PV array [21]. Adapun tahapan-tahapan dalam melakukan pemodelan 3D ini diantaranya yaitu sebagai berikut [22]:

1. Klik tombol “Near Shading” pada jendela “Project; New Project” seperti pada gambar 2.21 untuk melakukan pemodelan *shading* pada lokasi PLTS.



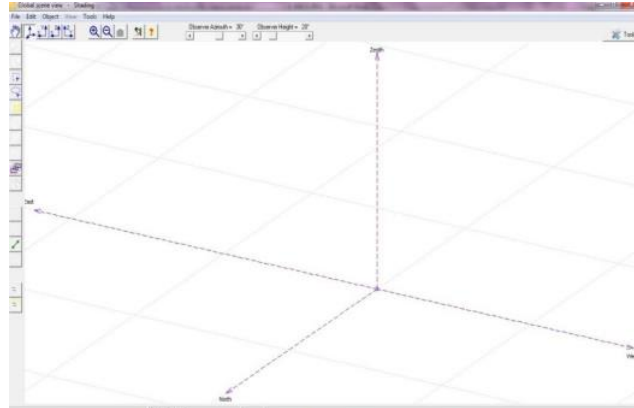
Gambar 2.21 Tampilan Awal Fitur Pemodelan 3D [19]

2. Setelah itu akan muncul jendela “Near Shading Definition” seperti pada gambar 2.22, lalu klik “Construction/Perspective” untuk melakukan pemodelan *shading* sesuai lokasi PLTS dalam bentuk 3D.



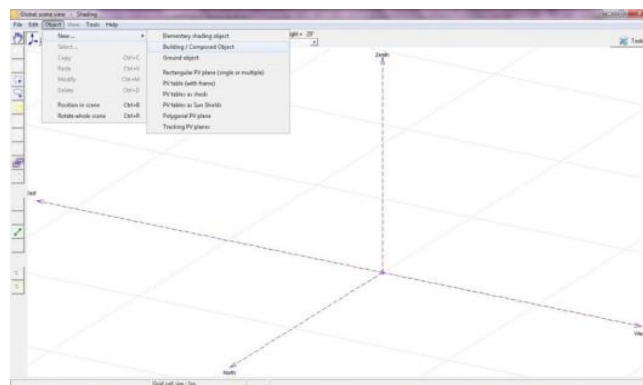
Gambar 2.22 Tampilan Menu Near Shading Definicion [19]

3. Kemudian akan muncul jendela utama 3D scene seperti pada gambar 2.23. Pada jendela ini kita dapat mulai melakukan pemodelan *shading* PLTS dalam bentuk 3D.



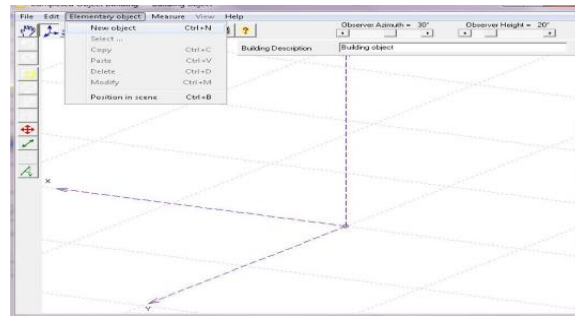
Gambar 2.23 Tampilan Jendela Utama 3D Scene [19]

4. Pada jendela utama 3D scene kita dapat melakukan desain PLTS namun pertama kali kita harus menentukan berapa luas lahan yang digunakan PLTS di lapangan yaitu dengan cara pilih “*Object*” pada menu kemudian “*New*” lalu pilih “*Building/Composed Object*” seperti pada gambar 2.24.



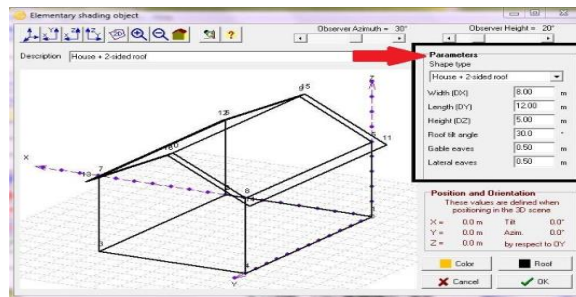
Gambar 2.24 Tampilan Menu Pembuatan Bangunan 3D [19]

5. Setelah menentukan luas lahan yang digunakan, selanjutnya pada jendela “*Building Object*” kita dapat menentukan objek atau bangunan dengan cara pilih “*Elementary Object*” pada menu kemudian pilih “*New Object*” seperti pada gambar 2.25.



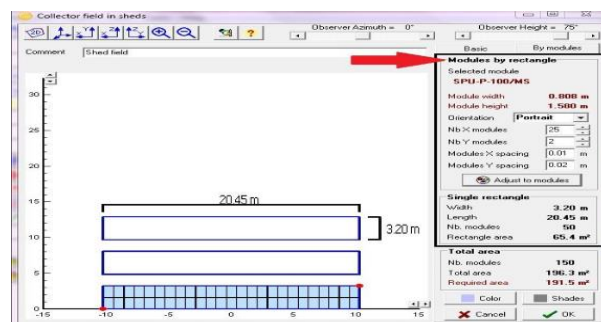
Gambar 2.25 Tampilan Jendela Building Object [19]

6. Lalu akan muncul jendela “*Elementary Shading Object*” seperti pada gambar 2.26. Setelah itu pilih “*House + 2 Sided Roof*” dan menentukan parameter ukuran dari bangunan sesuai kondisi bangunan di lapangan seperti lebar, panjang dan tinggi bangunan.



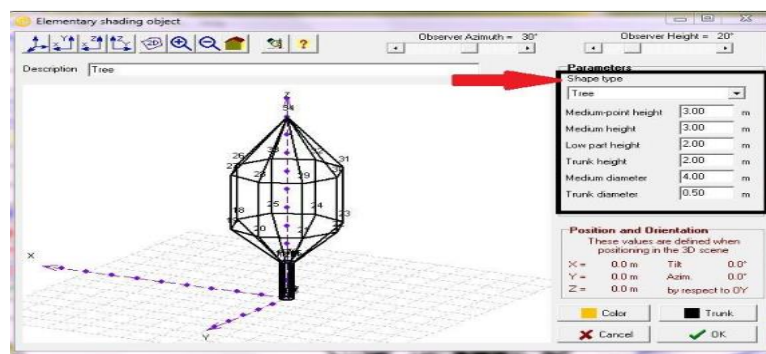
Gambar 2.26 Tampilan Jendela Elementary Shading Object [19]

7. Selanjutnya kita dapat membuat perspektif konstruksi panel surya sesuai dengan konstruksi di lapangan yaitu dengan cara klik “*Object*” kemudian “*New*” lalu pilih “*PV Plan in Sheds*”. Setelah itu akan muncul jendela “*Collector Fields in Sheds*” seperti gambar 2.27. Kemudian klik “*basic*” untuk mengatur panjang dan lebar PV array disesuaikan dengan pengukuran yang telah kita lakukan lalu klik “*by module*” untuk mengatur orientasi dan jumlah panel surya yang digunakan. Setelah itu klik OK.



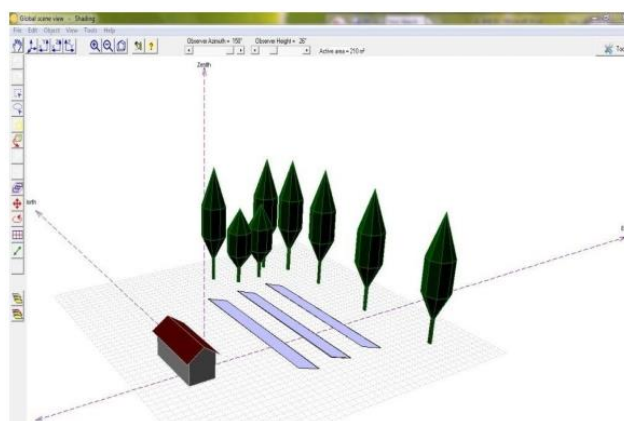
Gambar 2.27 Tampilan Jendela Collector Fields in Sheds [19]

8. Setelah itu kita juga dapat membuat perspektif pohon yang disesuaikan dengan kondisi lingkungan PLTS. Pohon merupakan salah satu faktor yang mengakibatkan adanya *shading*, oleh karena itu perspektif pepohonan ini dapat dibuat dengan cara klik “*object*” kemudian “*new*” lalu pilih “*elementary shading object*”. Setelah itu akan muncul jendela “*elementary shading object*” seperti pada gambar 2.28. Kemudian pilih “*tree*” pada kolom *shape type* lalu sesuaikan panjang, lebar dan tingi pohon setelah dilakukan pengukuran di lapangan. Kemudian kita tentukan berapa jumlah pohon yang terdapat pada lokasi PLTS. Setelah itu klik OK.



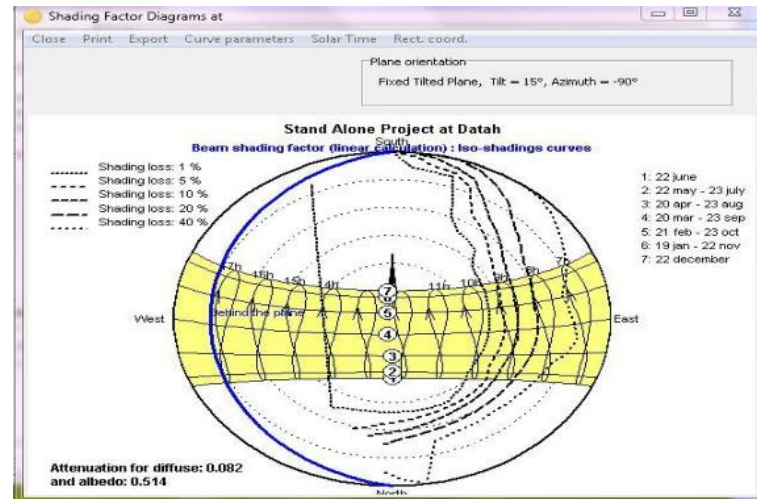
Gambar 2.28 Tampilan Jendela Elementary Shading Object [19]

9. Sesuaikan letak dan jarak semua objek seperti pohon, PV array dan bangunan yang terdapat di lokasi seperti pada gambar 2.29, lalu *close* kemudian klik “*table*” pada kolom “*shading factor table*” untuk mengetahui jumlah “*factor shading*” dalam bentuk tabel atau linear.



Gambar 2.29 Tampilan Jendela Utama 3D Scene View [19]

10. Kemudian pilih “graph” pada kolom *shading factor table* untuk mengetahui kurva faktor *shading* PLTS, lalu akan muncul jendela “*shading factor diagram*” seperti pada gambar 2.30, lalu klik OK.



Gambar 2.30 Diagram Faktor Shading PLTS [19]

## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **3.1 Alat dan Bahan**

Dalam penelitian digunakan sebuah perangkat keras berupa laptop dengan spesifikasi sebagai berikut:

Sistem Operasi	: Windows 7 Pro 64-bit
Prosesor	: Intel Core i3-7 @1,8GHz
Memory	: 6 GB
VGA	: Intel HD Graphics 4000

Kemudian perangkat lunak yang dipakai untuk mendukung jalannya penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Browser Google Chrome
2. PVsyst Versi 6.7.0
3. Microsoft Word
4. Microsoft Excel
5. Microsoft Visio

Sedangkan komponen-komponen yang dipakai pada penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Panel Surya
  - a. Solarimba 100 Wp (Monocrystalline)
    - Nominal Max. Power ( $P_{max}$ ) : 100 W
    - Open Circuit Voltage ( $V_{oc}$ ) : 21,6 V
    - Short Circuit Current ( $I_{sc}$ ) : 6,1 A
    - Maximum Power Voltage ( $V_{mp}$ ) : 18 V
    - Maximum Power Current ( $I_{mp}$ ) : 5,56 A
    - Dimensi : 1196 x 541 x 30 mm
    - Jumlah : 40 buah
    - Efisiensi : 18%



b. Canadian Solar 330 Wp (Polycrystalline)

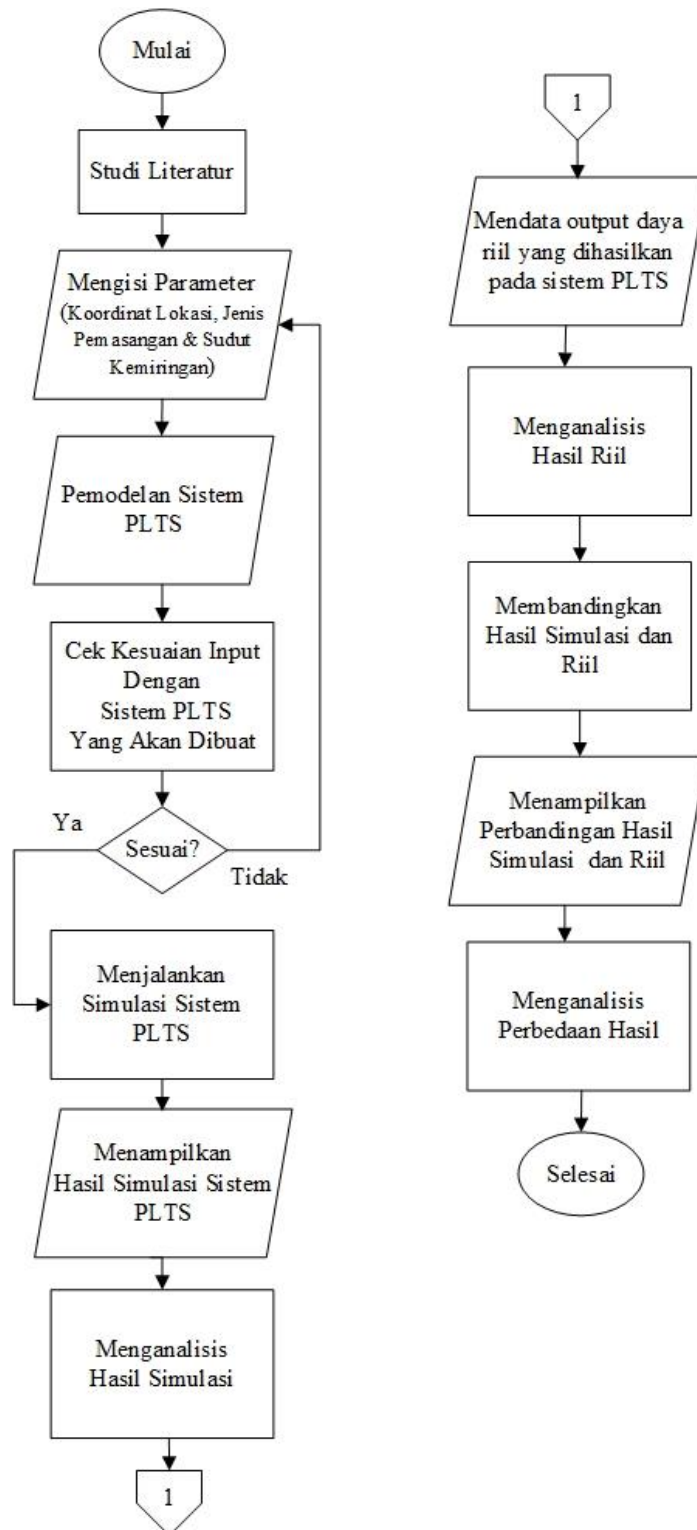
- Nominal Max. Power ( $P_{\max}$ ) : 330 W
- Maximum Power Current ( $I_{\text{mp}}$ ) : 8,88 A
- Open Circuit Voltage ( $V_{\text{oc}}$ ) : 45,6 V
- Short Circuit Current ( $I_{\text{sc}}$ ) : 9,45 A
- Maximum Power Voltage ( $V_{\text{mp}}$ ) : 37,2 Vs
- Dimensi : 1960 x 992 x 40 mm
- Jumlah : 16 buah
- Efisiensi : 16,97%

2. Inverter MPP 5 KVA

- Rated Power : 5500 kVA
- Dimensi : 110 x 450 x 445 mm

### 3.2 Langkah Penelitian

Metodologi penelitian merupakan kerangka pemecahan masalah dengan cara pengolahan dan analisis data. Secara umum metodologi penelitian disusun untuk mencapai tujuan penelitian yang telah ditetapkan, maka keseluruhan kegiatan penelitian dirancang untuk mengikuti diagram alir seperti tampak pada gambar 3.1 berikut ini.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

Setelah melakukan pemecahan masalah sesuai dengan diagram alir penelitian pada gambar 3.1, secara garis besar penelitian ini dikerjakan melalui tiga tahap yaitu sebagai berikut:

### 3.2.1 Tahap Awal Penelitian

Tahapan ini merupakan tahapan awal untuk mengidentifikasi masalah yang akan diselesaikan diawali dengan menentukan topik pembahasan. Kemudian, menentukan rumusan masalah yang akan diselesaikan. Setelah itu, menentukan tujuan dan ruang lingkup penelitian agar peneliti mengetahui langkah – langkah yang akan dikerjakan. Lalu dilakukan studi literatur dan pengumpulan data.

### 3.2.2 Pengolahan dan Analisis Data

Tahapan ini merupakan tahapan dalam mengolah data yang telah didapat dari hasil studi lapangan yang berada di Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret Surakarta yang dibandingkan dengan hasil simulasi. Data tersebut diolah sesuai dengan literatur yang telah dikumpulkan dan dengan teori-teori yang telah ada pada penelitian sebelumnya.

### 3.2.3 Tahap Akhir Penelitian

Tahapan ini merupakan tahapan akhir dari serangkaian penelitian yang berisi penarikan kesimpulan dan saran yang didapat oleh penulis dari penelitian yang telah dikerjakan.

## 3.3 Pemodelan Sistem

Pada penelitian ini, langkah - langkah yang harus dilakukan untuk melakukan simulasi pemodelan sistem PLTS yaitu sebagai berikut:

### 3.3.1 Koordinat Lokasi



Gambar 3.2 Koordinat Lokasi PLTS 15 kW

Hal pertama yang harus dilakukan sebelum melakukan pemodelan sistem yaitu penentuan koordinat lokasi dari sebuah sistem yang akan dibangun. Dalam penelitian ini sistem yang akan dibangun terletak di Fakultas Teknik Universitas

Sebelas Maret Surakarta yang mana secara geografi terletak pada koordinat - 7,561328 LS dan 110,854319 BT dengan ketinggian  $\pm 93$  mdpl dapat dilihat pada gambar 3.2 diatas. Sistem memiliki kapasitas total 15 kW yang mana dibagi menjadi dua jalur, yaitu jalur 5 kW yang terletak di Selasar Gedung 3 FT UNS dan jalur 10 kW yang terletak di Parkiran FT UNS.

### 3.3.2 Pemodelan Sistem PLTS

Dalam melakukan pemodelan sistem PLTS ini meliputi beberapa tahap yaitu tahap pengisian koordinat lokasi pada gambar 3.3, lalu pemilihan jenis pemasangan sistem PLTS pada gambar 3.4, dan pengisian spesifikasi komponen yang akan digunakan pada sistem PLTS dapat dilihat pada gambar 3.5.

Gambar 3.3 Pengisian Koordinat Lokasi

Pada gambar 3.3, dilakukan proses pengisian koordinat lokasi dari sebuah sistem yang akan dibangun meliputi letak negara, letak benua, nilai *latitude*, nilai *longnitude*, nilai *altitude* dan zona waktunya.

Gambar 3.4 Pemilihan Tipe Instalasi

Pada gambar 3.4, dilakukan proses pemilihan tipe instalasi dari sebuah sistem yang akan dibangun meliputi jenis instalasi dan sudut kemiringannya.

The screenshot displays the 'Global System configuration' window, which is divided into several sections for configuring a solar system.

- Global system summary:** A table at the top right showing summary statistics:
 

Nb. of modules	xx	Nominal PV Power	xx kWp
Module area	xx m²	Maximum PV Power	xx kWdc
Nb. of inverters	xx	Nominal AC Power	xx kWac
- PV Array:**
  - Sub-array name and Orientation:** Name is 'PV Array', Orientation is 'Fixed Tilted Plane', Tilt is '20°', and Azimuth is '0°'.
  - Select the PV module:** A dropdown menu shows 'Available Now' and 'Canadian Solar Inc.' with an 'Open' button.
  - Select the inverter:** A dropdown menu shows 'Available Now' and 'SolarEdge' with an 'Open' button.
  - Number of inverters:** Set to '1'.
  - Operating Voltage:** 300-600 V.
  - Global Inverter's power:** 0 kWac.
- Design the array:**
  - Number of modules and strings:** Includes fields for 'Mod. in series' and 'Nb. strings'.
  - Operating conditions:** Shows Vmp, Vpp, and Voc values.
  - Plane irradiance:** 1000 W/m².
  - Max. in data:** Includes 'Max. operating power (at max. irrad. and 50°C)' and 'STC'.
  - Array nom. Power (STC):** 0 kWp.

Gambar 3.5 Pengisian Spesifikasi Komponen

Pada gambar 3.5, dilakukan proses pengisian spesifikasi komponen dari sebuah sistem yang akan dibangun meliputi pemilihan jenis inverter, jenis modul surya, jumlah modul surya dan penentuan jenis rangkaian sistem yang akan dipasang.

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Hasil Perancangan Desain Jaringan PLTS

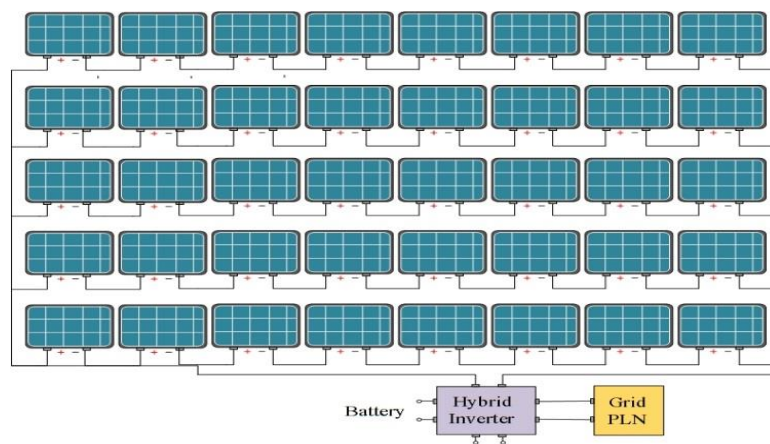
##### 4.1.1 Jalur 5 kW



Gambar 4.1 Tampak Atas Simulasi PLTS Jalur 5 kW



Gambar 4.2 Tampak Samping Simulasi PLTS Jalur 5 kW

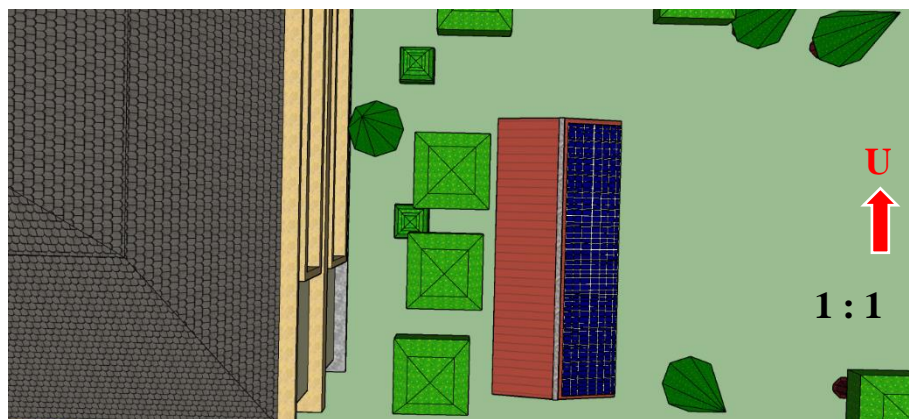


Gambar 4.3 Blok Diagram PLTS Jalur 5 kW

Pada gambar 4.1 menunjukkan hasil simulasi PLTS dengan pandangan tampak atas sedangkan pada gambar 4.2 dengan pandangan tampak samping yang mana sistem tersebut dipasang pada ketinggian 3 m dan memiliki total luas permukaan sebesar  $6,8 \text{ m}^2$ , lalu gambar 4.3 menunjukkan rangkaian pemasangan komponen pada sistem PLTS untuk jalur 5 kW, dimana pada sistem tersebut menggunakan modul surya merk Solarimba 100 Wp jenis *monocrystalline* dengan jumlah 40 buah yang terpasang seri-paralel. Tiap delapan buah modul surya disusun secara seri menjadi satu rangkaian lalu digabungkan menjadi satu rangkaian *string* parallel yang terhubung pada sebuah inverter dengan kapasitas total 5,5 kW. Ujung dari rangkaian sistem tersebut yaitu terhubung dengan sistem *grid* PLN.

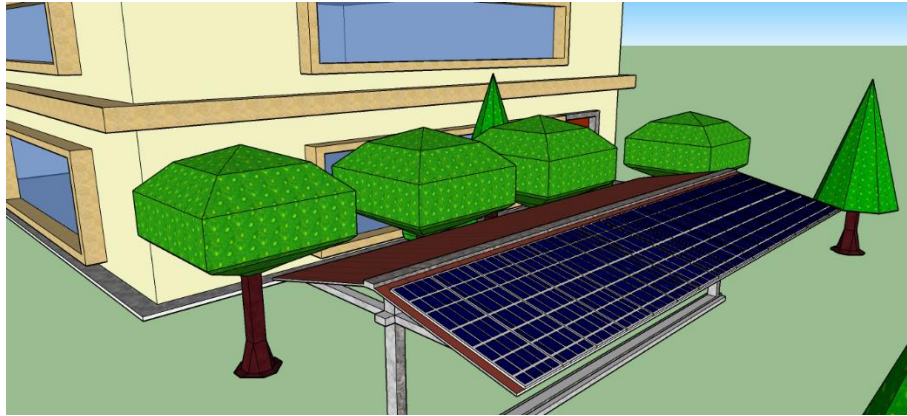
Dengan terpasangnya modul surya 100 Wp sebanyak 40 buah maka kapasitas total yang dapat dicapai oleh sistem PLTS jalur 5 kW ini yaitu sebesar 4000 Wp yang mana belum dikurangi dengan *losses* pada sistem tersebut. Hal tersebut menunjukkan bahwa untuk mencapai kapasitas maksimal dari sebuah inverter yang terpasang pada sistem PLTS masih diperlukan modul surya 100 Wp maksimal sebanyak 10 buah lagi atau dengan kata lain jika sistem PLTS jalur 5 kW tersebut menggunakan modul surya 100 Wp sebanyak 40 buah maka secara perhitungan tidak akan dapat mencapai kapasitas maksimal dari sistem PLTS tersebut.

#### 4.1.2 Jalur 10 kW

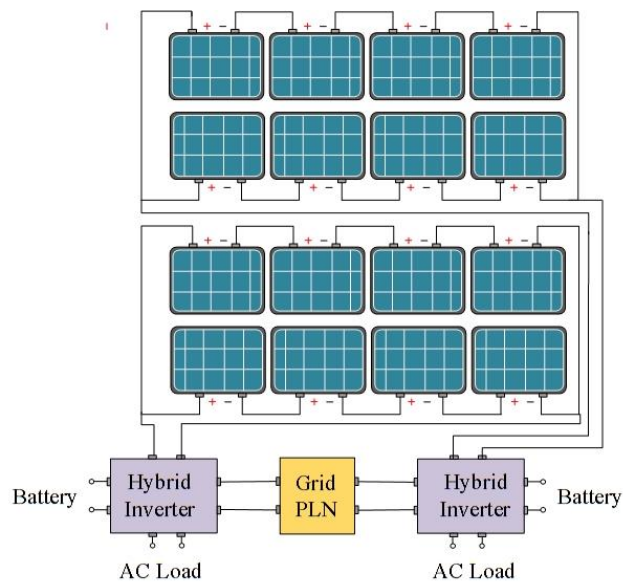


Gambar 4.4 Tampak Atas Simulasi PLTS Jalur 10 kW





Gambar 4.5 Tampak Samping Simulasi PLTS Jalur 10 kW



Gambar 4.6 Blok Diagram PLTS Jalur 10 kW

Pada gambar 4.4 menunjukkan hasil simulasi PLTS dengan pandangan tampak atas sedangkan gambar 4.5 dengan pandangan tampak samping yang mana sistem tersebut dipasang pada ketinggian 3 m dan memiliki total luas permukaan sebesar 20 m<sup>2</sup>, lalu pada gambar 4.6 menunjukkan rangkaian pemasangan komponen pada sistem PLTS untuk jalur 10 kW, dimana pada sistem tersebut menggunakan modul surya merk Canadian Solar 330 Wp jenis *polycrystalline* dengan jumlah 16 buah yang terpasang seri-paralel. Tiap empat buah modul surya disusun secara seri menjadi satu rangkaian lalu tiap dua rangkaian seri dihubungkan menjadi satu rangkaian *string* parallel yang terhubung pada sebuah inverter dengan kapasitas total 5,5 kW. Dimana pada jalur 10 kW ini memiliki dua buah inverter dan ujung dari rangkaian sistem tersebut yaitu terhubung dengan sistem *grid* PLN.



Dengan terpasangnya modul surya 330 Wp sebanyak 16 buah maka kapasitas total yang dapat dicapai oleh sistem PLTS jalur 10 kW ini yaitu sebesar 5280 Wp yang mana belum dikurangi dengan *losses* pada sistem tersebut. Hal tersebut menunjukkan bahwa untuk mencapai kapasitas maksimal dari sebuah inverter yang terpasang pada sistem PLTS masih diperlukan modul surya 330 Wp maksimal sebanyak 14 buah lagi atau dengan kata lain jika sistem PLTS jalur 10 kW tersebut menggunakan modul surya 330 Wp sebanyak 16 buah maka secara perhitungan tidak akan dapat mencapai kapasitas maksimal dari sistem PLTS tersebut.

## 4.2 Hasil Simulasi PVsyst

### 4.2.1 Jalur 5 kW

Berdasarkan dari simulasi yang telah dilakukan maka dapat diperoleh data pada jalur 5 kW memiliki potensi optimum dalam menghasilkan energi listrik yaitu sebesar 5264,8 kWh per tahun dengan rincian seperti pada tabel 4.1 dan rasio performa sebesar 81,4 % seperti pada tabel 4.2 dengan ketentuan tidak terdapat *shading* pada lokasi terpasang.

Tabel 4.1 Potensi Optimum Produksi Energi Listrik

Pada Jalur 5 kW

Month	GlobHor kWh/m <sup>2</sup>	DiffHor kWh /m <sup>2</sup>	T Amb °C	GlobInc kWh /m <sup>2</sup>	GlobEff kWh /m <sup>2</sup>	E Load kWh	E User kWh	E Grid kWh
January	128,2	75,92	27,20	144,2	109,5	155,7	50,83	322,8
February	120,2	73,68	26,93	112,0	187,8	140,7	42,94	323,8
March	143,4	81,62	27,38	141,0	136,3	155,7	51,84	407,1
April	144,5	75,35	27,69	151,1	146,5	150,7	53,49	438,0
May	159,1	71,50	28,30	178,8	173,9	155,7	58,96	522,7
June	150,6	58,69	27,53	175,6	171,0	150,7	57,95	514,8
July	162,5	66,38	27,55	186,9	182,0	155,7	58,11	551,4
August	165,4	73,58	27,71	179,5	174,5	155,7	57,95	524,8
September	170,0	73,30	27,93	171,9	166,8	150,7	58,11	495,6
October	170,5	89,84	28,57	161,9	156,4	155,7	60,25	463,3
November	136,9	87,29	27,79	123,8	118,9	150,7	56,49	349,8
December	139,3	89,32	27,45	122,9	117,7	155,7	54,01	350,5
Year	1790,4	916,47	27,68	1819,7	1761,4	1833,8	660,97	5264,8

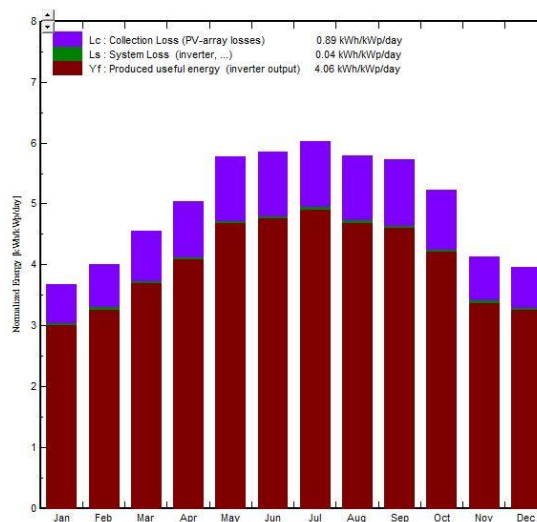
Tabel 4.1 Koefisien Performa Normal

Pada Jalur 5 kW

Month	Y <sub>r</sub> kWh /m <sup>2</sup> . day	L <sub>c</sub>	Y <sub>a</sub> kWh/kWp/d	L <sub>s</sub>	Y <sub>f</sub> kWh/kWp/d	L <sub>cr</sub>	L <sub>sr</sub>	PR
January	3,68	0,632	3,05	0,038	3,01	0,172	0,010	0,818

February	4,00	0,686	3,31	0,038	3,27	0,172	0,009	0,819
March	4,55	0,811	3,74	0,038	3,70	0,178	0,008	0,813
April	5,04	0,905	4,13	0,037	4,10	0,180	0,007	0,813
May	5,77	1,041	4,73	0,038	4,69	0,180	0,007	0,813
June	5,85	1,044	4,81	0,038	4,77	0,178	0,006	0,815
July	6,03	1,077	4,95	0,038	4,92	0,179	0,006	0,815
August	5,79	1,054	4,74	0,038	4,70	0,182	0,007	0,812
September	5,73	1,076	4,65	0,038	4,61	0,188	0,007	0,806
October	5,22	0,959	4,26	0,038	4,22	0,184	0,007	0,809
November	4,13	0,704	3,42	0,038	3,39	0,171	0,009	0,820
December	3,97	0,666	3,30	0,038	3,26	0,168	0,009	0,823
Year	4,99	0,889	4,10	0,038	4,06	0,178	0,009	0,814

Grafik produksi PLTS dengan jangka waktu satu tahun pada jalur 5 kW dapat dilihat pada gambar 4.3 dan diagram alir rugi-rugi PLTS pada jalur 5 kW dapat dilihat pada gambar 4.4.



Gambar 4.7 Grafik Produksi Energi Listrik  
Pada Jalur 5 kW

Dimana:

$Y_F$  = Final Yield

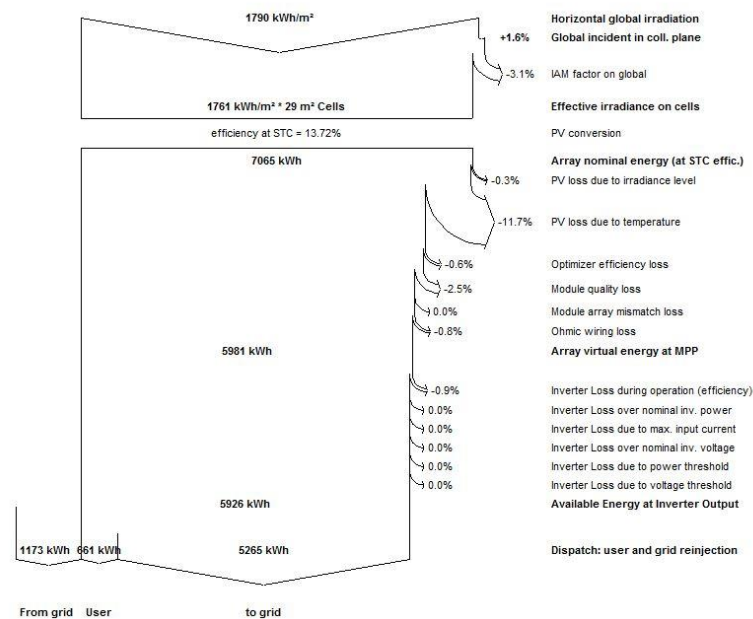
$L_S$  = System Loss (Inverter)

$L_C$  = Collection Loss (PV-Array)

Pada gambar 4.3 menunjukkan bahwa produksi energi listrik selama satu tahun pada jalur 5 kW yaitu:

1. Memiliki nilai rata-rata  $Y_F$  sebagai energi listrik yang keluar dari inverter dan dapat digunakan sebesar 4,06 kWh/kWp/hari.
2. Memiliki nilai rata-rata  $L_S$  sebagai nilai *losses* dari sistem inverter sebesar 0,04 kWh/kWp/hari.

3. Memiliki nilai rata-rata  $L_C$  sebagai nilai *losses* dari PV array yaitu sebesar 0,89 kWh/kWp/hari.



Gambar 4.8 Diagram Alir Rugi-rugi

Pada Jalur 5 kW

#### 4.2.2 Jalur 10 kW

Berdasarkan dari simulasi yang telah dilakukan maka dapat diperoleh data pada jalur 10 kW memiliki potensi optimum dalam menghasilkan energi listrik yaitu sebesar 7687,2 kWh per tahun dengan rincian seperti pada tabel 4.3 dan rasio performa sebesar 83,0 % seperti pada tabel 4.4 dengan ketentuan tidak terdapat *shading* pada lokasi terpasang.

Tabel 4.2 Potensi Optimum Produksi Energi Listrik

Pada Jalur 10 kW

Month	GlobHor kWh/m <sup>2</sup>	DiffHor kWh /m <sup>2</sup>	T Amb °C	GlobInc kWh /m <sup>2</sup>	GlobEff kWh /m <sup>2</sup>	E Load kWh	E User kWh	E Grid kWh
January	128,3	75,89	27,20	144,5	111,0	62,74	24,64	480,9
February	120,2	73,67	26,93	112,2	109,0	56,67	21,43	474,0
March	143,3	81,64	27,38	141,1	137,6	62,74	24,17	594,9
April	144,4	75,39	27,69	151,1	147,6	60,72	23,78	637,9
May	159,0	71,57	28,30	178,8	175,0	62,74	24,80	756,4
June	150,6	58,69	27,53	175,4	172,1	60,72	24,33	745,3
July	162,4	66,49	27,55	186,7	183,0	62,74	25,12	793,3
August	165,7	73,43	27,71	179,8	176,1	62,74	25,13	760,1
September	169,9	73,37	27,93	171,9	168,2	60,72	24,33	722,3
October	170,4	89,92	28,57	162,0	158,0	62,74	25,71	680,0
November	136,7	87,30	27,79	124,0	120,3	60,72	25,39	522,0
December	139,2	89,33	27,45	123,2	119,2	62,74	25,09	520,1

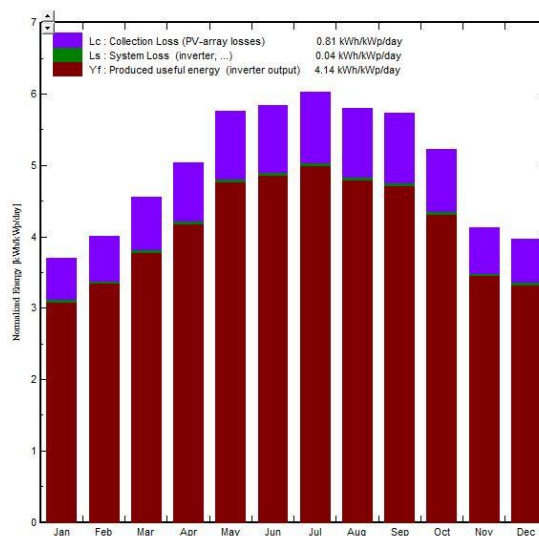
Year	1790,2	916,69	27,68	1820,4	1777,2	738,76	293,93	7687,2
------	--------	--------	-------	--------	--------	--------	--------	--------

Tabel 4.3 Koefisien Performa Normal

Pada Jalur 10 kW

Month	$Y_r$ kWh /m <sup>2</sup> day	$L_c$	$Y_a$ kWh/kWp/d	$L_s$	$Y_f$ kWh/kWp/d	$L_{cr}$	$L_{sr}$	PR
January	3,69	0,573	3,12	0,033	3,09	0,155	0,009	0,836
February	4,01	0,621	3,39	0,034	3,35	0,155	0,009	0,836
March	4,55	0,734	3,82	0,037	3,78	0,161	0,008	0,831
April	5,04	0,820	4,22	0,039	4,18	0,163	0,008	0,829
May	5,76	0,946	4,81	0,042	4,77	0,164	0,007	0,829
June	5,85	0,945	4,90	0,043	4,86	0,162	0,007	0,831
July	6,02	0,978	5,04	0,043	5,00	0,162	0,007	0,830
August	5,80	0,959	4,84	0,042	4,80	0,165	0,007	0,827
September	5,73	0,973	4,76	0,042	4,71	0,170	0,007	0,823
October	5,23	0,874	4,35	0,040	4,31	0,167	0,008	0,825
November	4,13	0,644	3,49	0,035	3,46	0,156	0,008	0,836
December	3,97	0,609	3,37	0,034	3,33	0,153	0,009	0,838
Year	4,99	0,807	4,18	0,039	4,14	0,162	0,008	0,830

Grafik produksi PLTS dengan jangka waktu satu tahun pada jalur 10 kW dapat dilihat pada gambar 4.5 dan diagram alir rugi-rugi PLTS pada jalur 10 kW dapat dilihat pada gambar 4.6.



Gambar 4.9 Grafik Produksi Energi Listrik

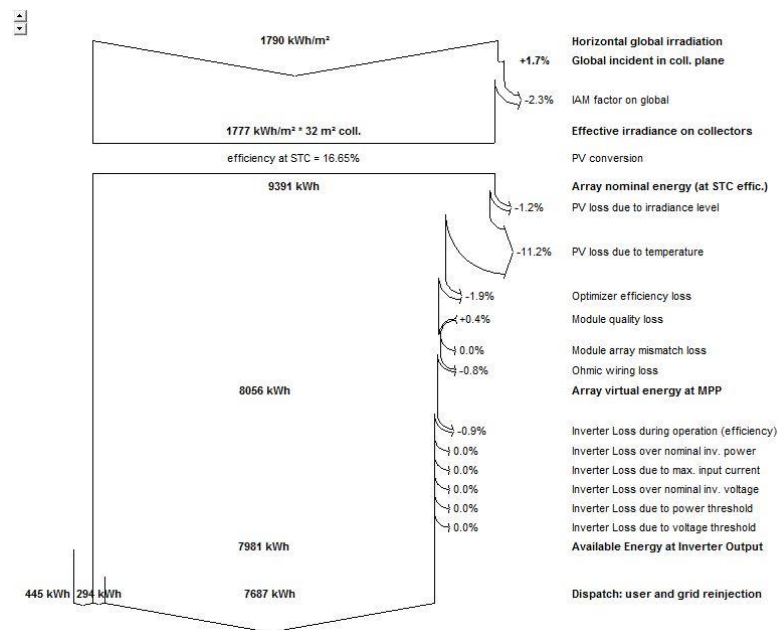
Pada Jalur 10 kW

Dimana:

 $Y_F$  = Final Yield $L_S$  = System Loss (Inverter) $L_C$  = Collection Loss (PV-Array)

Pada gambar 4.5 menunjukkan bahwa produksi energi listrik selama satu tahun pada jalur 10 kW yaitu:

1. Memiliki nilai rata-rata  $Y_F$  sebagai energi listrik yang keluar dari inverter dan dapat digunakan sebesar 4,14 kWh/kWp/hari.
2. Memiliki nilai rata-rata  $L_S$  sebagai nilai *losses* dari sistem inverter sebesar 0,04 kWh/kWp/hari.
3. Memiliki nilai rata-rata  $L_C$  sebagai nilai *losses* dari PV array yaitu sebesar 0,81 kWh/kWp/hari.



Gambar 4.10 Diagram Alir Rugi-rugi  
Pada Jalur 10 kW

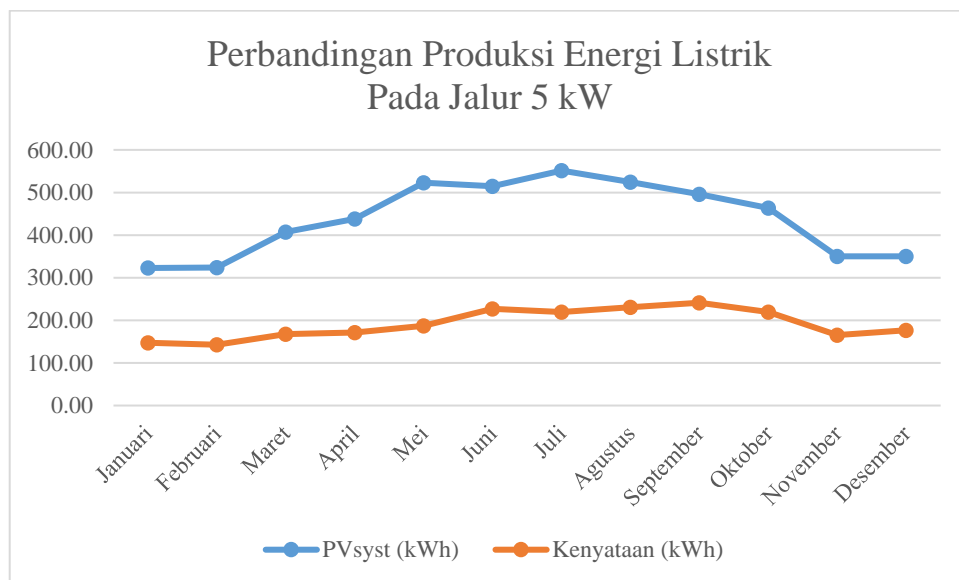
### 4.3 Perbandingan Simulasi PVsyst dan Kondisi Kenyataan

#### 4.3.1 Jalur 5 kW

Perbandingan antara hasil simulasi menggunakan PVsyst dengan kondisi kenyataan dapat dianalisa bahwa produksi riil energi listrik dalam waktu setahun pada jalur 5 kW dari sistem PLTS yang terpasang memiliki selisih sebesar 56,41% lebih rendah daripada hasil simulasi. Hasil yang diperoleh dari hasil simulasi menunjukkan nilai sebesar 5.264,8 kWh sedangkan produksi riil energi listrik sebesar 2.295,12 kWh. Rincian perbandingan produksi energi listrik pada jalur 5 kW dapat dilihat pada tabel 4.5 berikut ini.

Tabel 4.5 Perbandingan Produksi Energi Listrik  
Pada Jalur 5 kW

Bulan	PVsyst	Riil	Selisih	Selisih
	E_Grid (kWh)	E_Grid (kWh)	E_Grid (kWh)	%
Januari	322,800	146,940	175,860	54,48
Februari	323,800	142,680	181,120	55,94
Maret	407,100	167,400	239,700	58,88
April	438,000	171,000	267,000	60,96
Mei	522,700	187,200	335,500	64,19
Juni	514,800	226,800	288,000	55,94
Juli	551,400	219,480	331,920	60,19
Agustus	524,800	230,640	294,160	56,05
September	495,600	241,200	254,400	51,33
Oktober	463,300	219,480	243,820	52,63
November	349,800	165,600	184,200	52,66
Desember	350,500	176,700	173,800	49,59
Total Produksi	5.264,8	2.295,12	2.969,680	56,41



Gambar 4.11 Grafik Perbedaan Produksi Energi Listrik Jalur 5 kW

Unjuk kerja dari sistem PLTS yang terpasang pada jalur 5 kW tersebut juga akan terkena dampak akibat turunnya produksi energi listrik. Pada sistem tersebut memiliki nilai performa spesifik sebesar 1,57 jam/hari, yang mana lebih rendah dari hasil simulasi yaitu sebesar 4,06 jam/hari. Selain itu, faktor kapasitas pada sistem tersebut dalam menghasilkan energi aktual selama sehari penuh (24 jam) memiliki nilai sebesar 6,54 % yang mana lebih rendah dari hasil simulasi. Rincian performa spesifik dan faktor kapasitas pada jalur 5 kW dapat dilihat pada tabel 4.6 berikut ini.

Tabel 4.6 Performa Spesifik dan Faktor Kapasitas  
Pada Jalur 5 kW

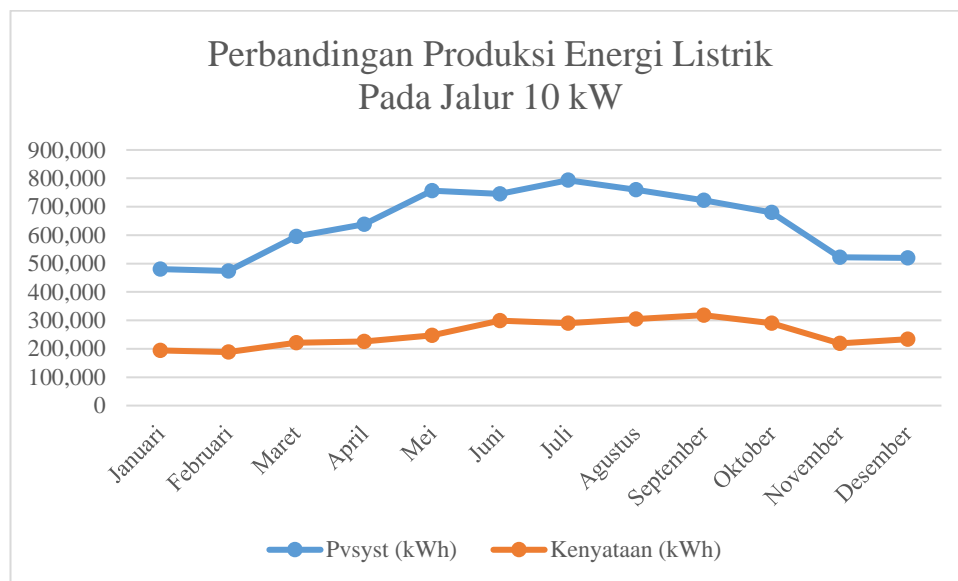
Bulan	PVsyst	Riil	$Y_F$ (P)	$Y_F$ (R)	CF (P)	CF (R)
	E_Grid (kWh)	E_Grid (kWh)	(h/d)	(h/d)	(%)	(%)
Januari	322,800	146,940	3,01	1,18	12,54	4,93
Februari	323,800	142,680	3,27	1,22	13,63	5,12
Maret	407,100	167,400	3,70	1,35	15,42	5,62
April	438,000	171,000	4,10	1,42	17,08	5,93
Mei	522,700	187,200	4,69	1,56	19,54	6,49
Juni	514,800	226,800	4,77	1,89	19,88	7,87
Juli	551,400	219,480	4,92	1,77	20,50	7,37
Agustus	524,800	230,640	4,70	1,86	19,58	7,74
September	495,600	241,200	4,61	2,00	19,21	8,37
Oktober	463,300	219,480	4,22	1,77	17,58	7,37
November	349,800	165,600	3,39	1,38	14,13	5,75
Desember	350,500	176,700	3,26	1,42	13,58	5,93
Total Produksi	5.264,8	2.295,12	4,06	1,57	16,89	6,54

#### 4.3.2 Jalur 10 kW

Perbandingan antara hasil simulasi menggunakan PVsyst dengan kondisi kenyataan dapat dianalisa bahwa produksi riil energi listrik dalam waktu setahun pada jalur 10 kW dari sistem PLTS yang terpasang memiliki selisih sebesar 60,59% lebih rendah daripada hasil simulasi. Hasil yang diperoleh dari hasil simulasi menunjukkan nilai sebesar 7.687,200 kWh sedangkan produksi riil energi listrik sebesar 3.029,558 kWh. Rincian perbandingan produksi energi listrik pada jalur 10 kW dapat dilihat pada tabel 4.7 berikut ini.

Tabel 4.7 Perbandingan Produksi Energi Listrik  
Pada Jalur 10 kW

Bulan	PVsyst	Riil	Selisih	Selisih
	E_Grid (kWh)	E_Grid (kWh)	E_Grid (kWh)	%
Januari	480,900	193,961	286,939	59,67
Februari	474,000	188,338	285,662	60,27
Maret	594,900	220,968	373,932	62,86
April	637,900	225,720	412,180	64,62
Mei	756,400	247,104	509,296	67,33
Juni	745,300	299,376	445,924	59,83
Juli	793,300	289,714	503,586	63,48
Agustus	760,100	304,445	455,655	59,95
September	722,300	318,384	403,916	55,92
Oktober	680,000	289,714	390,286	57,39
November	522,000	218,592	303,408	58,12
Desember	520,100	233,244	286,856	55,15
Total Produksi	7.687,200	3.029,558	4.657,641	60,59



Gambar 4.12 Grafik Perbedaan Produksi Energi Listrik Jalur 10 kW

Unjuk kerja dari sistem PLTS yang terpasang pada jalur 10 kW tersebut juga akan terkena dampak akibat turunnya produksi energi listrik. Pada sistem tersebut memiliki nilai performa spesifik sebesar 3,86 jam/hari, yang mana lebih rendah dari hasil simulasi yaitu sebesar 4,14 jam/hari. Selain itu, faktor kapasitas pada sistem tersebut dalam menghasilkan energi aktual selama sehari penuh (24 jam) memiliki nilai sebesar 16,10% yang mana lebih rendah dari hasil simulasi. Rincian performa spesifik dan faktor kapasitas pada jalur 10 kW dapat dilihat pada tabel 4.8 berikut ini.

Tabel 4.8 Performa Spesifik dan Faktor Kapasitas  
Pada Jalur 10 kW

Bulan	PVsyst	Riil	$Y_F$ (P)	$Y_F$ (R)	CF (P)	CF (R)
	E_Grid (kWh)	E_Grid (kWh)	(h/d)	(h/d)	(%)	(%)
Januari	480,900	193,961	3,09	3,30	12,87	13,76
Februari	474,000	188,338	3,35	3,06	13,96	12,77
Maret	594,900	220,968	3,78	3,46	15,75	14,42
April	637,900	225,720	4,18	3,21	17,42	13,39
Mei	756,400	247,104	4,77	4,00	19,876	16,69
Juni	745,300	299,376	4,86	4,05	20,25	16,89
Juli	793,300	289,714	5,00	4,69	20,83	19,57
Agustus	760,100	304,445	4,80	4,05	20,00	16,89
September	722,300	318,384	4,71	4,40	19,63	18,34
Oktober	680,000	289,714	4,31	4,84	17,96	20,19
November	522,000	218,592	3,46	3,51	14,42	14,83
Desember	520,100	233,244	3,33	3,70	13,88	15,46
Total Produksi	7.687,200	3.029,558	4,14	3,86	17,24	16,10



#### 4.3.3 Analisa Penurunan Unjuk Kerja

Produksi energi listrik yang tidak optimum pada sistem ini disebabkan oleh beberapa hal yaitu perbedaan iklim iradiasi, rendahnya nilai iradiasi matahari yang diterima oleh sistem PLTS karena adanya *shading*, adanya debu dan kurangnya perawatan secara berkala. Hal tersebut berdampak pada turunnya nilai unjuk kerja spesifiknya dalam waktu satu tahun yaitu sebesar 1,57 jam per hari dengan faktor kapasitas sebesar 6,54 % untuk jalur 5 kW dan sebesar 3,86 jam per hari dengan faktor kapasitas sebesar 16,10% untuk jalur 10 kW.

*Shading* yang ada pada sistem PLTS ini menyebabkan turunnya sinar matahari yang didapat, baik itu karena bayangan dari gedung atau pohon dan debu yang menempel pada modul surya. Kondisi tersebut bisa dilihat pada gambar 4.7 dan gambar 4.8 berikut.



Gambar 4.13 Kondisi Riil Jalur 5 kW



Gambar 4.14 Kondisi Riil Jalur 10 kW

Berikut beberapa parameter yang menjadi alasan terjadinya perbedaan hasil produksi energi listrik dari simulasi dan kenyataan yang memiliki nilai cukup signifikan, yaitu sebagai berikut:

	Simulasi	Kenyataan
Kondisi	Standar Test Condition (STC) : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Iradiasi = <math>1000 \text{ W/m}^2</math></li> <li>• Temperature = <math>25 \text{ }^{\circ}\text{C}</math></li> </ul>	Bergantung cuaca
Pemasangan	Tanah Lapang	Gedung Perkantoran
Sudut Kemiringan	$20^{\circ}$	$25^{\circ}$
Skenario	Tanpa <i>shading</i>	Terdapat <i>shading</i> (pohon, debu, gedung)
Kapasitas	Memaksimalkan kapasitas sistem PLTS yang ada	Tidak memaksimalkan kapasitas sistem PLTS yang ada

## BAB V

### KESIMPULAN

#### 4.4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan tersebut maka dapat ditarik kesimpulan yaitu:

1. Pemodelan PLTS 15 kW Fakultas Teknik UNS ini dilakukan berdasarkan kondisi kenyataan yang mana pada jalur 5 kW terpasang modul surya jenis *monocrystalline* 100 Wp sejumlah 40 buah sehingga memiliki kapasitas total 4000 Wp dan pada jalur 10 kW terpasang modul surya jenis *polycrystalline* 330 Wp sejumlah 16 buah sehingga memiliki kapasitas total 5280 Wp. Kedua jalur tersebut disusun secara seri-paralel yang disesuaikan dengan kapasitas dari inverter tetapi karena kurangnya memaksimalkan potensi dari kapasitas yang ada menyebabkan produksi energi listriknya menjadi tidak optimal.
2. PLTS 15 kW Fakultas Teknik UNS memiliki potensi optimum untuk memproduksi energi listrik selama satu tahun pada jalur 5 kW sebesar 5264,8kWh dengan rasio performance 81,4 % dan pada jalur 10 kW sebesar 7687,2 kWh dengan rasio performance 83,0 % dengan catatan tanpa memperhitungkan faktor *shading*.
3. Produksi energi listrik PLTS 15 kW Fakultas Teknik UNS selama kurun waktu satu tahun lebih kecil dibandingkan potensi optimum produksi energi listrik dari hasil simulasi, yaitu sebesar 2.295,12 kWh dengan selisih sebesar 56,41% terhadap hasil simulasi senilai 5.264,8 kWh pada jalur 5 kW dan sebesar 3.029,558 kWh dengan selisih sebesar 60,59% terhadap hasil simulasi senilai 7.687,200 kWh pada jalur 10 kW.
4. Produksi energi listrik yang tidak optimum ini disebabkan oleh beberapa hal yaitu perbedaan iklim, rendahnya nilai iradiasi matahari yang diterima oleh sistem PLTS karena adanya *shading*, adanya debu dan kurangnya perawatan secara berkala. Hal tersebut berdampak pada turunnya nilai unjuk kerja spesifiknya dalam waktu satu tahun yaitu sebesar 1,57 jam per hari dengan faktor kapasitas sebesar 6,54 % untuk jalur 5 kW dan sebesar 3,86 jam per hari dengan faktor kapasitas sebesar 16,10 % untuk jalur 10 kW.

#### **4.5 Saran**

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka terdapat beberapa masukan saran yang dapat digunakan pada penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Membuat model sistem PLTS secara 3D.
2. Menambahkan lagi modul surya sesuai kapasitas inverter yang terpasang agar dapat memaksimalkan lagi potensi pada sistem PLTS yang telah terpasang.
3. Melakukan pemasangan baterai dan beban pada inverter agar dapat memaksimalkan fitur yang tersedia pada inverter.
4. Melakukan perawatan rutin terhadap sistem PLTS.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] KESDM RI, Blueprint Pengelolaan Energi Nasional (BP-PEN) 2006-2025, Jakarta, 2006.
- [2] PT. PLN (Persero), Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT. PLN (Persero) 2019-2028.
- [3] BPPT, Indonesia Energy Outlook, Jakarta: Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, 2019.
- [4] Tetra Tech, Panduan Studi Kelayakan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Terpusat, Jakarta Selatan: USAID, 2018.
- [5] ABB QT, Technical Application Papers No. 10 Photovoltaic Plants, 2010.
- [6] R. Sianipar, "Dasar Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya," *JETri*, vol. XI, pp. 61-78, 2014.
- [7] S. B. Mohamad, "Potensi Dan Peranan PLTS Sebagai Energi ALternatif Masa Depan Di Indonesia," *Jurnal Sains dan Teknologi Indonesia*, vol. XIV, pp. 146-152, 2012.
- [8] S. Sigit and H. Mohammad, "Perancangan Dan Analisis Pembangkit Listrik Tenaga Surya Kapasitas 10 MW On Grid Di Yogyakarta," *Jurnal Energi & Kelistrikan*, vol. VII, pp. 49-63, 2015.
- [9] A. D. S. Thiago, C. S. J. Sandro, I. S. P. Renata and A. D. S. Solonildo, "Design And Construction Of A Didactic Standalone Photovoltaic Plant," *International Journal Of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)*, vol. V, no. 10, pp. 29-38, 2018.
- [10] P. T. M. Azis and Muhlizar, "Penentuan Kemiringan Sudut Optimal Panel Surya," *Jurnal Optimalisasi*, vol. III, 2017.
- [11] Suriadi and S. Mahdi, "Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Terpadu Menggunakan Software PVsyst Pada Komplek Perumahan Di Banda Aceh," *Jurnal Rekayasa Elektrika*, vol. IX, pp. 77-80, 2010.
- [12] S. I. K. Agus, K. I. N. Satya and I. S. Wayan, "Analisis Unjuk Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Satu MWp Terinterkoneksi Jaringan Di Kayubihi, Bangli," *Teknologi Elektro*, vol. XIII, 2014.
- [13] K. Sujain, C. Deepika and K. D. Devendra, "A Comparative Analysis Of Different Thermal Parameter Arrangements With Silicon Polycrystalline Using PVsyst," *International Journal Of Engineering And Applied Sciences (IJEAS)*, vol. IV, pp. 20-29, 2017.
- [14] S. Eka Meilia, Rosmaliati and F. C. Ida Bagus, "Analisis Unjuk Kerja Sistem Fotovoltaik On-Grid Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Gili Terawangan," *Dielektrika*, vol. I, pp. 82-95, 2014.
- [15] R. M. Nirrmahl and P. Jagadeesh, "Performance Assesment Of A 619 kW Photovoltaic Power Plant In The Northeast Of Peninsular Malaysia," *Indonesian Journal Of Electrical Engineering And Computer Science*, vol. XX, pp. 9-15, 2019.

- [16] G. N. Surya, K. I. N. Satya and I. Rina, "Unjuk Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) 26,4 kWp Pada Sistem Smart Microgrid Unud," *Jurnal SPEKTRUM*, vol. VI, pp. 1-9, 2019.
- [17] PVsyst, "www.pvsyst.com," PVsyst, 14 Februari 2015. [Online]. Available: [http://www.pvsyst.com/images/pdf/PVsyst\\_Tut](http://www.pvsyst.com/images/pdf/PVsyst_Tut). [Accessed 28 Januari 2020].
- [18] G. Ashish, K. Anita and J. Dheeraj, "Design and Simulation of 20 MW Photovoltaic Power Plant Using PVsyst," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. XIX, pp. 58-65, 2020.
- [19] U. Azis and S. Bintang, *Buku Petunjuk Praktikum Mata Kuliah Pembangkitan Sistem Tenaga Listrik*, Surakarta, 2019.
- [20] A. Oday A, H. Waleed H, M. Dhari Y, J. Kanaan A and S. Hussain, "Design and Performance Analysis of 250 kW Grid Connected Photovoltaic System in Iraqi Environment Using PVsyst Software," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEI)*, vol. VII, pp. 415-421, 2019.
- [21] D. Nibedita, P. Nitai and K. S. Pradip, "Design of Interior Daylighting Shading Control Using LV and PVsyst Software," *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*, vol. XIV, pp. 388-401, 2015.
- [22] G. B. Andre, C. d. O. N. Denise and J. A. Cristiane de, "Economic Feasibility Study Of Photovoltaic Panels Installation by PVsyst 6.73 Smulator," *International Journal Of Advanced Engineering Research And Science (IJAERS)*, vol. V, no. 9, pp. 154-162, 2018.