TUGAS AKHIR – TF 181801

ANALISA PERFORMANSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA OFF-GRID DI DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA ITS

ARYESHAH AKBAR
NRP. 02311640000063

Dosen Pembimbing:
Dr. Ridho Hantoro, S.T, M.T.

Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

FINAL PROJECT - TF 181801

PERFORMANCE ANALYSIS OF OFF-GRID PHOTOVOLTAIC SYSTEM IN ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT ITS

ARYESHAH AKBAR
NRP. 02311640000063

Supervisor:
Dr. Ridho Hantoro, S.T, M.T.

Department Of Engineering Physics
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama	: Aryeshah Akbar
NRP	: 02311640000063
Departemen / Prodi	: Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika
Fakultas	: Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FTIRS)
Perguruan Tinggi	: Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "***ANALISA PERFORMANSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA OFF-GRID DI DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA ITS***" adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya-benarnya.

Surabaya, 21 Juli 2020

Yang membuat pernyataan,

Aryeshah Akbar

NRP. 02311640000063

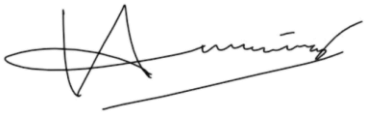
Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

ANALISA PERFORMANSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA OFF-GRID DI DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA ITS

Oleh:



Aryeshah Akbar

NRP. 02311640000063

Surabaya,

Menyetujui,

Pembimbing I

Dr. Ridho Hantoro S.T., M.T.

NIP. 19761223 200501 1 001

Mengetahui,
Kepala Departemen
Teknik Fisika FT-IRS ITS

Dr. Suyanto, S.T, M.T.

NIP. 19711113 319951 002

Halaman ini sengaja dikosongkan

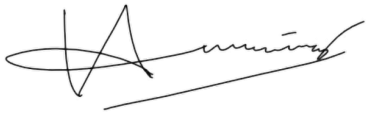
LEMBAR PENGESAHAN

ANALISA PERFORMANSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA OFF-GRID DI DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA ITS

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Progam Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FT-IRS)
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:



ARYESHAH AKBAR

NRP. 02311640000063

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Ridho Hantoro S.T, M.T ..... (Pembimbing I)
2. Gunawan Nugroho S.T, M.T, PhD ..... (Ketua Penguji)
3. Ir. Sarwono, M.M ..... (Penguji I)
4. Ir. Zulkifli, M.Sc ..... (Penguji II)
5. Erna Septyaningrum S.T, M.T ..... (Penguji III)

SURABAYA

2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

ANALISA PERFORMANSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA OFF-GRID DI DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA ITS

Nama	**:**	**Aryeshah Akbar**
NRP	**:**	**02311640000063**
Departemen	**:**	**Teknik Fisika FT-IRS ITS**
Dosen Pembimbing	**:**	**Dr. Ridho Hantoro S.T, M.T.**

ABSTRAK

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan pembangkit listrik yang kemampuan produksinya sangat tergantung oleh lingkungan dan konfigurasi sistem serta beban yang harus dipenuhi sistem tersebut. Pada penelitian ini, dilakukan studi untuk mengetahui performansi aktual PLTS Teknik Fisika ITS serta pengaruh pemberian variasi konfigurasi array modul PV dan variasi profil pembebanan terhadap performa sistem. Penelitian dilakukan dengan melakukan analisa performansi aktual sistem yang didasarkan pada data yang diperoleh dengan pengukuran langsung, kemudian pengaruh variasi konfigurasi array modul PV dan variasi profil pembebanan terhadap performa sistem dianalisa menggunakan *software*. Hasil studi menunjukkan performansi aktual sistem yang direpresentasikan oleh nilai *performance ratio* yakni sebesar 69,1%, nilai ini berada dibawah standar untuk PLTS yakni 80%. Berdasarkan simulasi ditemukan bahwa variasi konfigurasi array PV berpengaruh terhadap *shading loss* dan *ohmic wiring loss*. Kemudian variasi profil pembebanan yang diberikan kepada sistem mempengaruhi energi yang dihasilkan array PV, SOC minimum dan maksimum baterai, serta *loss of load probability* sistem. Kombinasi yang menghasilkan performa terbaik pada sistem yakni konfigurasi array PV 2 seri 3 string dan profil pembebanan 200 W selama 12 jam dari pukul 18.00 hingga 06.00 dengan nilai *performance ratio* 87,31%.

Kata Kunci: PLTS, Performansi, Konfigurasi Array PV, Profil Pembebanan

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERFORMANCE ANALYSIS OF OFF-GRID PHOTOVOLTAIC SYSTEM IN ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT ITS

Name	**:**	**Aryeshah Akbar**
NRP	**:**	**02311640000063**
Department	**:**	**Engineering Physics FT-IRS ITS**
Supervisors	**:**	***Dr. Ridho Hantoro S.T, M.T.***

ABSTRACT

Solar Power Plant is a type of power plant which ability to generate energy is very dependent on the environment condition, system configuration, and the load that needs to be satisfied by the system. The purpose of this study is to determine the actual performance of Teknik Fisika ITS Solar Power Plant and the effect of different PV array configuration and different load profile to the system performance. The system's actual performance was analyzed according to the measured data and the effect of PV array configuration and load profile was analyzed using simulation tool. The study shows that the actual system performance which is represented by the performance ratio value of 69,1%. This value is well below the strandard performance ratio for solar power plant which is 80%. Simulation depicts that the variation of PV array configuration affects shading loss and ohmic wiring loss of the array. Furthermore, the load profile variation affects the PV array generated energy, minimum and maximum SOC of the battery, and the loss of load probability of the system. The combination that results in the best performance was PV array that was constructed of 2 module in series and 3 parallel strings to supply 200 Watt of load which is used for 12 hours a day from 18.00 to 06.00 with the performance ratio of 87,31%.

Keywords: Photovoltaic, Performance, PV Array Configuration, Load Profile

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas karunia yang telah diberikan. Sehingga laporan ini bisa diselesaikan dalam rangka memenuhi kewajiban kuliah tugas akhir pada semester delapan Departement Teknik Fisika ITS. Banyak bantuan dan dukungan kepada penulisan sehingga laporan ini dapat diselesaikan dengan judul *"***ANALISA PERFORMANSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA OFF-GRID DI DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA ITS"**
Diucapkan pula terima kasih kepada:

1. Keluarga penulis, Papa Ahya Rusdi, Almarhum Mama Esthi Tunggul Bhirawati, dan Kakak Aysha Mareta Karlina
2. Ibu Lizda Johar Mawarani selaku dosen wali
3. Bapak Ridho Hantoro dan Ibu Erna Septyaningrum selaku dosen pembimbing
4. Kepada seluruh teman teman Kelompok Studi Energi dan Asisten Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan

Pada penulisan laporan ini masih memiliki banyak kesalahan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan. Semoga laporan ini bermanfaat baik bagi penulis maupun pembaca. Akhir kata penulis ucapkan mohon maaf atas kesalahan yang dilakukan selama pelaksanaan sampai penyusunan laporan ini.

Surabaya, 21 Juli 2020

Aryeshah Akbar

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL……i
COVER PAGE..... iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI v
LEMBAR PENGESAHAN vii
LEMBAR PENGESAHAN ix
ABSTRAK..... xi
ABSTRACT..... xiii
KATA PENGANTAR xv
DAFTAR ISI..... xvii
DAFTAR GAMBAR xix
DAFTAR TABEL..... xxiii
BAB I PENDAHULUAN..... 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Tujuan.....3
1.4 Batasan Masalah.....3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI..... 5
2.1 Sel Fotovoltaik 5
2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya 6
2.3 Parameter Performansi PLTS Off-Grid.....13
2.4 Pengaruh Konfigurasi Array Modul PV Terhadap Performansi PLTS Off-Grid 20
2.5 Pengaruh Profil Pembebanan Terhadap Performansi PLTS Off-Grid 21
2.6 Pengaruh *Shading* Terhadap Performansi PLTS Off-Grid.....24

2.7 Pengaruh *snail trail* terhadap performansi PLTS Off-Grid 25
BAB III METODOLOGI PENELITIAN 27
3.1 Studi literatur 29
3.2 Pengumpulan Data Sistem 29
3.3 Pengambilan Data Lingkungan dan Profil Pembebanan 29
3.4 Pengambilan Data Keluaran Sistem 30
3.5 Simulasi Sistem Menggunakan *Software* 30
3.6 Analisa Performansi 34
3.7 Penarikan Kesimpulan dan Saran 34
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 35
4.1 Deskripsi Sistem PLTS Teknik Fisika 35
4.2 Analisa Performansi Aktual PLTS Teknik Fisika 41
4.3 Validasi Simulasi 48
4.4 Parameter Input Simulasi 51
4.5 Analisa Performansi Dengan Variasi Profil Pembebanan 55
4.6 Analisa Performansi Dengan Variasi Konfigurasi Array Modul PV 63
4.7 Penentuan Variasi Terbaik 79
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 81
5.1 Kesimpulan 81
5.2 Saran 81
DAFTAR PUSTAKA 83
LAMPIRAN A 87
LAMPIRAN B 89
LAMPIRAN C 93
BIODATA PENULIS 111

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Sel Fotovoltaik 5
Gambar 2. 2 Cara kerja PLTS *on-grid* 6
Gambar 2. 3 Cara kerja PLTS *off-grid* 7
Gambar 2. 4 Hirarki sel, modul, dan array PV (Zooba & Bansaal, 2011) 8
Gambar 2. 5 Lapisan modul PV 9
Gambar 2. 6 Grafik *duty cycle* PWM 10
Gambar 2. 7 Perubahan bentuk gelombang oleh inverter (a) Listrik DC (b) Listrik AC *square, modified sine,* dan *pure sine wave* 12
Gambar 2. 8 Karakteristik kurva I-V sel surya 14
Gambar 2. 9 Pengaruh radiasi matahari pada kurva I-V 14
Gambar 2. 10 Pengaruh radiasi matahari pada kurva P-V 15
Gambar 2. 11 *Energy flow sankey diagram* (Hamburg, n.d.) 19
Gambar 2. 12 Grafik *mismatch* modul PV 21
Gambar 2. 13 Profil pembebanan harian (Sharma, Haque, & Aziz, 2019) 22
Gambar 2. 14 SOC baterai harian (Treado, The effect of electric load profiles on the performance of off-grid residential hybrid renewable energy systems, 2015) 23
Gambar 2. 15 Kurva P-V pada kondisi *partial shading* (Teo, Tan, & Mok, 2018) 24
Gambar 2. 16 Contoh *snail trail* pada modul PV 25
Gambar 3. 1 Diagram alir metodologi penelitian 28
Gambar 3. 2 Pengukuran (a) Suhu Lingkungan (b) Irradiasi Matahari 30
Gambar 3. 3 Pengukuran Voc dan Isc 30
Gambar 3. 4 Pendefinisian koordinat 31
Gambar 3. 5 Pendefinisian profil pembebanan 32
Gambar 3. 6 Pendefinisan komponen sistem 33
Gambar 3. 7 Penggambaran geometri medan 33
Gambar 3. 8 *Running* Simulasi 34
Gambar 4. 1 PLTS Teknik Fisika (a) Array PV (b) Panel Box 35
Gambar 4. 2 Denah Rooftop Pascasarjana 36

Gambar 4. 3 Wiring Diagram PLTS Teknik Fisika ITS 37
Gambar 4. 4 (a) Peletakkan Modul PV (b) *mounting* array PV 39
Gambar 4. 5 Daya vs Irradiasi 29 April 43
Gambar 4. 6 Energi array PV terukur 43
Gambar 4. 7 Performance Ratio 29 April sampai 5 Mei 44
Gambar 4. 8 Snail trail pada (a) modul PV 1 (b) modul PV 2 45
Gambar 4. 9 Susunan Sel PV pada Modul 46
Gambar 4. 10 Sel PV yang mengalami *snail trail* (a) Modul PV 1 (b)Modul PV 2 46
Gambar 4. 11 *Snail trail* pada (a) modul PV #17 (b) modul PV #18 (c) modul PV #23 (d) modul PV #24 (Dolara, 2016) 47
Gambar 4. 12 Daya pengukuran vs simulasi 29 April 49
Gambar 4. 13 Energi terukur dan energi tersimulasi 50
Gambar 4. 14 Data Lingkungan Input Simulasi 52
Gambar 4. 15 Orientasi array PV 53
Gambar 4. 16 Pendefinisian Konfigurasi Array PV 54
Gambar 4. 17 (a) Gambar 3D lingkungan (b) Tampak lingkungan asli 55
Gambar 4. 18 Energi efektif array PV 56
Gambar 4. 19 *Energy Loss Diagram* 57
Gambar 4. 20 Grafik Pembebanan 100 W 12 jam malam 58
Gambar 4. 21 Grafik Pembebanan 100 W 12 Jam Siang 59
Gambar 4. 22 Grafik Pembebanan 100 W 6 Jam Siang dan 6 Jam Malam 59
Gambar 4. 23 Grafik Pembebanan 200 W 12 Jam Malam 60
Gambar 4. 24 Grafik Pembebanan 200 W 12 Jam Siang 60
Gambar 4. 25 Grafik Pembebanan 200 W 6 Jam Siang dan Malam 61
Gambar 4. 26 LOL Probability 62
Gambar 4. 27 Perbandingan energi tersalurkan ke baterai dan energi terbuang 63
Gambar 4. 28 Shading akibat pepohonan pada pukul (a) 06.15 (b) 06.30 (c) 07.00 (d) 10.15 66
Gambar 4. 29 Shading akibat tangki air pada pukul (a) 15.15 (b) 15.30 (c) 16.00 (d) 17.30 67
Gambar 4. 30 Pengaruh shading pada array 1x6 68

Gambar 4. 31 Kurva I-V array PV 1x6 pada kondisi *partial shading* 70
Gambar 4. 32 Pengaruh shading pada array 2x3 71
Gambar 4. 33 Kurva I-V array PV 2x3 pada kondisi *partial shading* 72
Gambar 4. 34 Pengaruh shading pada array 3x2 73
Gambar 4. 35 Kurva I-V array PV 3x2 pada kondisi *partial shading* 75
Gambar 4. 36 Array 1x6 76
Gambar 4. 37 Array 2x3 76
Gambar 4. 38 Array 3x2 77
Gambar 4. 39 *Performance Ratio* Simulasi 79

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Spesifikasi Modul PV *monocrystalline silicon* 39
Tabel 4. 2 Spesifikasi SCC 40
Tabel 4. 3 Spesifikasi Baterai 41
Tabel 4. 4 Spesifikasi Inverter 41
Tabel 4. 5 Data 29 April 42
Tabel 4. 6 Energi keluaran modul PV (Dolara, 2016) 48
Tabel 4. 7 Perbandingan Energi Terukur dan Energi Tersimulasi 50
Tabel 4. 8 Matriks Variasi Simulasi 51
Tabel 4. 9 Perbandingan SOC Baterai 61
Tabel 4. 10 *Loss* akibat *shading* 64
Tabel 4. 11 *Shading factor* array 1x6 69
Tabel 4. 12 *Shading factor* array 2x3 71
Tabel 4. 13 Shading factor array 3x2 74
Tabel 4. 14 *Ohmic Wiring Loss* 75
Tabel 4. 15 Total Loss Konfigurasi Array 78

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan akan energi listrik di Indonesia setiap tahun semakin meningkat. Dengan *demand* yang tinggi dibutuhkan pula *supply* yang tinggi untuk memunuhi kebutuhan akan listrik tersebut. Untuk menghindari potensi terjadinya krisis energi, pemerintah meningkatkan pembangunan infrastruktur pembangkit listrik namun menurut data dari Dirjen Ketenagalistrikan Indonesia tahun 2018, pembangkit listrik berbahan bakar batu bara masih memiliki bauran energi tertinggi dengan presentase 62,76% dari seluruh pembangkit listrik di Indonesia (Ketenagalistrikan, 2018). Kemudian ada pula fakta bahwa PLTU batu bara menghasilkan emisi gas buang CO_2 yang berbahaya apabila dihirup oleh manusia. Dalam jangka pendek, apabila manusia menghirup CO_2 lebih dari 600 ppm dapat mengakibatkan gangguan pernafasan dan menurunnya kemampuan unuk berfikir dan juga merupakan gas rumah kaca yang berkontribusi pada pemanasan global dan perubahan iklim di bumi (P.N. Bierwith, 2019). Untuk itu diperlukan sumber energi alternatif yang terbarukan dan bersih, salah satunya yakni pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Indonesia memiliki potensi energi matahari yang sangat besar yakni pada rentang 4 kWh/m^2 hingga 5 kWh/m^2 atau setara dengan daya sebesar 112.000 GWp (KESDM, 2012), namun yang dimanfaatkan menjadi energi listrik sebesar 60,19 MWp hingga tahun 2018 dan hanya menyumbang 0,09% saja dari bauran energi listrik nasional.

PLTS adalah pembangkit yang mengubah energi matahari menjadi energi listrik dan bersifat terbarukan. Topologi sistem PLTS pada dasarnya dapat terhubung ke jaringan listrik secara langsung (*on grid*) dan dapat pula bersifat berdiri sendiri dan tidak terhubung ke jaringan listrik (*offgrid*) atau disebut juga dengan sistem *standalone*. Pada sistem *offgrid*, sistem PLTS terdiri dari beberapa komponen seperti *charge controller*, *battery bank*, *inverter*, dan sistem proteksi yang masing-masing komponen memiliki efisiensi masing-masing dalam proses utama yaitu membangkitkan listrik.

Meskipun PLTS bersifat pembangkit listrik terbarukan, namun performa PLTS sangat *intermitten*, artinya sangat bergantung dengan kondisi lingkungan dalam pembangkitannya seperti irradiasi total matahari yang diterima, suhu lingkungan, kelembaban relatif (RH), kondisi adanya debu, serta spektrum cahaya matahari yang diteima (S & K, 1992). Degradasi kualitas komponen seiring berjalannya waktu, kesalahan desain dan *maintenance* yang berujung pada kegagalan sistem juga berpengaruh pada performa sistem secara keseluruhan seperti yang dijelaskan oleh Diaz et. al (Diaz, Pena, Munoz, & Arias, 2011). Pada penelitian ini disimpulkan bahwa *fractional power loss* meningkat dari 2% hingga 12% seiring waktu penggunaan sel surya. Kemudian faktor berikutnya yang mempengaruhi keandalan sebagai suatu parameter performa suatu pembangkit listrik adalah pembebanan yang diberikan kepada sistem. Profil pembebanan harian yang dibandingkan dengan produksi energi dari matahari mempengaruhi *State Of Charge* (SOC) baterai sehingga mempengaruhi kemampuan sistem untuk memenuhi kebutuhan beban (Treado, The effect of electric load profiles on the performance of off-grid residential hybrid renewable energy systems, 2015). Faktor lain yang menyebabkan menurunnya keluaran energi sistem PLTS adalah adanya ketidaksesuaian (*mismatch*) pada susunan array modul PV satu dan lainnya (ND & AK, 2007). Faktor-faktor tersebut merupakan beberapa sumber-sumber rugi energi (*energy loss*) yang terjadi sehingga performansi dapat ditingkatkan. Sumber-sumber rugi energi tersebut secara rinci diberikan pada suatu *energy loss diagram*.

Terdapat berbagai faktor yang mempengaruhi performansi, maka setiap PLTS akan memiliki performansi yang berbeda, meskipun secara topologi dan spesifikasi komponennya identik (Perlman & Andy McNamara, 2005) sehingga diperlukan suatu evaluasi performansi untuk site PLTS tertentu. Oleh karena itu pada penelitian ini dilakukan analisa performansi pada PLTS *off-grid* di Departemen Teknik Fisika ITS. PLTS ini memiliki kapasitas 1,38 kWp dan listrik keluarannya saat ini digunakan sebagai penerangan pada bangunan Pascasarjana. Analisa performansi dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui performansi sistem aktual melalui data pengukuran. Kemudian dilakukan pula analisa performansi dengan variasi konfigurasi array modul PV dan variasi profil pembebanan dari hasil

simulasi sehingga didapatkan konfigurasi array modul PV dan profil pembebanan terbaik yang mampu meningkatkan performansi sistem PLTS.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

a. Bagaimana performansi aktual PLTS Teknik Fisika ITS berdasarkan data dari hasil pengukuran?
b. Bagaimana pengaruh variasi konfigurasi array modul PV dan profil pembebanan terhadap performansi PLTS Teknik Fisika ITS berdasarkan simulasi?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah:

a. Mengetahui performansi aktual PLTS Teknik Fisika ITS berdasarkan data hasil pengukuran.
b. Mengetahui pengaruh konfigurasi array modul PV dan profil pembebanan terhadap performansi PLTS Teknik Fisika ITS berdasarkan simulasi.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

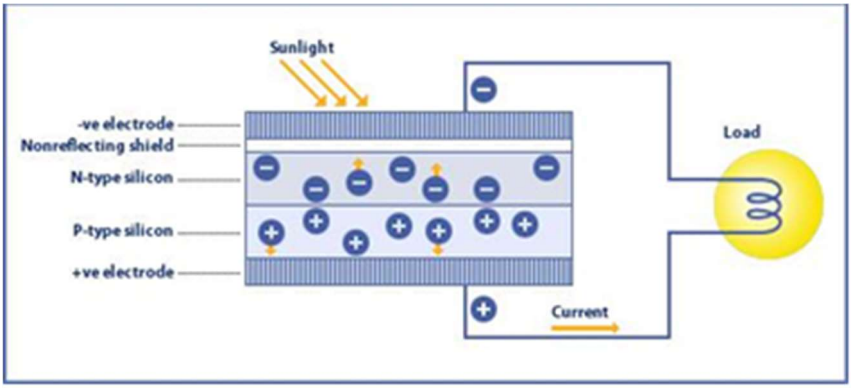
a. Sistem PLTS yang dianalisa adalah sistem *off grid* di Departemen Teknik Fisika ITS, Surabaya.
b. Analisa performansi aktual dilakukan berdasarkan data yang diperoleh dari pengukuran dan pengamatan langsung pada PLTS Teknik Fisika ITS.
c. Analisa pengaruh variasi konfigurasi array modul PV dan profil pembebanan dilakukan menggunakan *software*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Sel Fotovoltaik

Fotovoltaik (PV) adalah suatu proses konversi energi cahaya secara langsung menjadi energi listrik oleh material semikonduktor (Zooba & Bansaal, 2011). Komponen utama dari sistem PV adalah sel surya atau sel PV. Cahaya merupakan gelombang elektromagnetik yang memiliki panjang gelombang dan energi tertentu. Apabila sel PV menerima cahaya dengan energi yang lebih tinggi dari energi gap semikonduktor, maka akan terjadi eksitasi elektron yang apabila dialirkan pada rangkaian eksternal (beban) akan menjadi arus listrik.



Gambar 2. 1 Sel Fotovoltaik

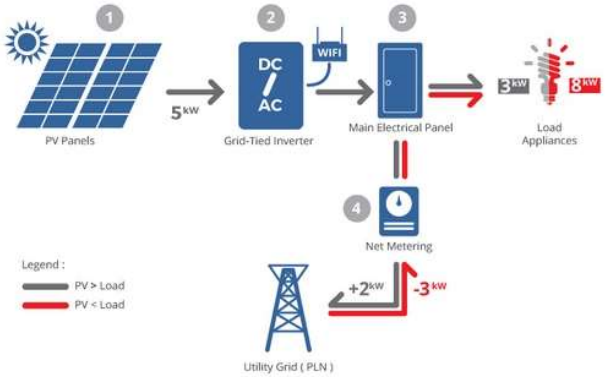
Gambar 2.1 menunjukkan struktur sel PV. Suatu sel PV terdiri dari beberapa lapisan yang disebut dengan *wafer*. Prinsip utama konversi energi terjadi pada *p-n junction*. *P-N junction* adalah semikonduktor tipe-n dan semikonduktor tipe-p yang disusun bertumpuk. Semikonduktor tipe-n adalah semikonduktor yang memiliki kelebihan elektron sedangkan semikonduktor tipe-p adalah semikonduktor yang mengalami kekurangan elektron, atau dapat dikatakan kelebihan *hole*. Energi dari cahaya matahari diterima oleh elektron pada semikonduktor tipe-n sehingga energi dari elektron tersebut naik dari pita valensi ke pita konduksi (eksitasi) sehingga menjadi elektron bebas dan meninggalkan *hole* (kekosongan). Elektron tersebut dialirkan ke rangkaian luar menghasilkan arus listrik searah (*Direct Current*) DC.

Adanya *p-n junction* menghasilkan medan listrik yang menyebabkan *hole* tersebut mengalami difusi dan berpindah ke semikonduktor tipe-p untuk bergabung kembali dengan elektronnya setelah elektron tersebut dialirkan ke beban.

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

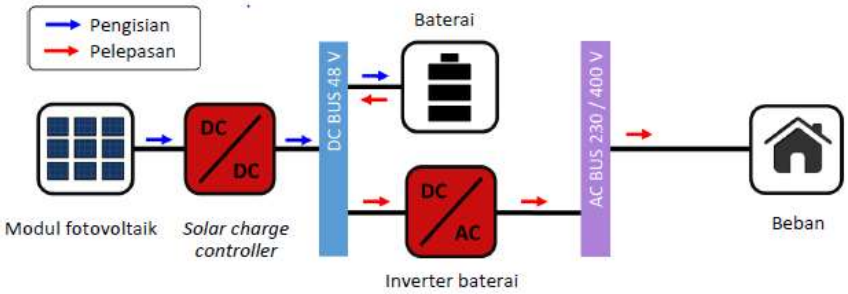
Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah suatu sistem yang terdiri dari beberapa komponen yang berfungsi untuk mengubah energi matahari menjadi energi listrik yang dapat digunakan oleh beban. Modul PV menghasilkan energi listrik DC. Hampir semua perangkat listrik komersial menggunakan listrik bolak balik (*Alternating* Current) AC sebagai sumber daya awalnya, oleh karena itu listrik keluaran modul PV harus diubah terlebih dahulu menjadi listrik arus AC oleh *Inverter*.

Secara topologi perkabelan (*wiring*) dan komponen yang digunakan, PLTS dibagi menjadi dua jenis yaitu sistem *on-grid* dan *off-grid*. PLTS *on-grid* adalah PLTS yang terhubung ke jaringan distribusi listrik (untuk Indonesia, terhubung ke PLN) seperti pada gambar 2.2. Dengan adanya hubungan ini maka apabila ada kelebihan energi listrik yang dihasilkan dapat disalurkan ke jaringan. Sebaliknya apabila pasokan listrik dari PLTS tidak mampu memenuhi beban, listrik dapat diambil dari jaringan.



Gambar 2. 2 Cara kerja PLTS *on-grid*

PLTS *off-grid* adalah PLTS yang tidak terhubung ke jaringan distribusi listrik, karena itu PLTS *off-grid* berdiri sendiri atau disebut dengan *stand-alone*. Semua beban atau perangkat listrik yang digunakan mendapatkan energi listrik dari PLTS, oleh karena itu sistem ini membutuhkan media penyimpanan energi berupa baterai untuk memenuhi kebutuhan bebannya mengingat modul PV hanya memproduksi listrik pada siang hari saja.



Gambar 2. 3 Cara kerja PLTS *off-grid*

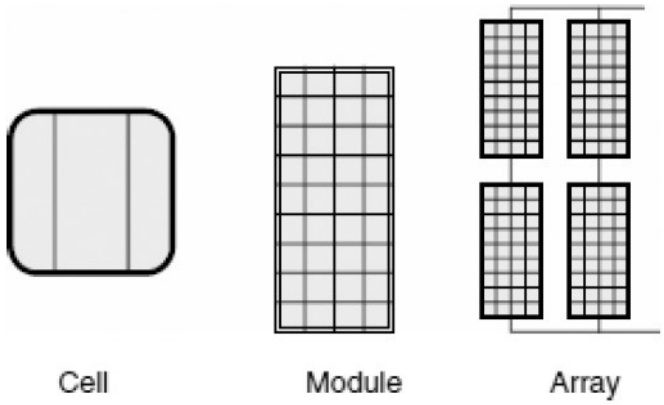
Gambar 2.3 menunjukkan cara kerja PLTS *off-grid*. Sebelum energi listrik keluaran modul PV disimpan di baterai, dibutuhkan komponen *Solar Charge Controller* yang berfungsi untuk mengatur arus listrik yang mengalir ke baterai. Hal ini berguna untuk menghindari baterai dari *overcharging* yang disebabkan oleh *overvoltage* ataupun kondisi *undervoltage* yakni pemakaian (*discharge*) baterai yang berlebih sehingga baterai terkuras habis, sehingga baterai mampu bertahan untuk umur yang lebih lama. Secara lebih rinci, masing masing komponen pada PLTS *off-grid* adalah sebagai berikut.

2.2.1 Modul Fotovoltaik

Modul fotovoltaik merupakan susunan dari sel-sel surya yang disusun secara seri maupun paralel dengan tujuan menghasilkan tegangan dan arus keluaran yang diinginkan. Satu sel surya mampu menghasilkan tegangan 0,5 Volt sampai 0,6 Volt. Untuk meningkatkan tegangan keluaran, sel-sel surya disusun secara seri sehingga tegangan keluaran modul PV mampu digunakan oleh beban atau disimpan di

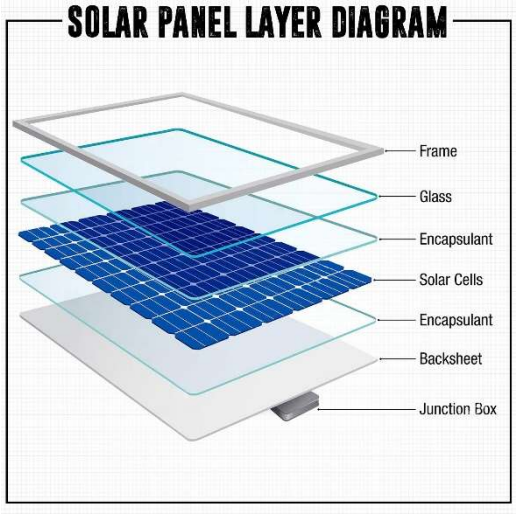
baterai. Karena itulah modul atau modul PV biasanya beroperasi pada tegangan 12 Volt atau 24 Volt. Satu modul PV biasanya memiliki 33 sampai 36 sel surya yang disusun secara seri menjadi *string* yang kemudian disusun paralel dengan *string* lain untuk meningkatkan keluaran arusnya.

Modul-modul PV ini kemudian dapat kembali disusun secara seri ataupun paralel dengan modul lain, menyesuaikan dengan tegangan operasi yang diinginkan serta arus keluaran yang akan mempengaruhi kinerja komponen lain seperti kabel, *breaker*, dan *solar charge controller*. Susunan modul-modul surya ini disebut dengan *PV array*. Keterkaitan antar sel PV, modul PV, dan array PV diberikan oleh gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Hirarki sel, modul, dan array PV (Zooba & Bansaal, 2011)

Selain sel surya, modul PV terdiri atas beberapa lapisan lain seperti kaca anti refleksi, material enkapsulasi, logam kontak, dan junction box sebagai tempat keluarnya kabel yang akan dihubungkan dengan rangkaian luar. Lapisan-lapisan tersebut seperti pada gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Lapisan modul PV

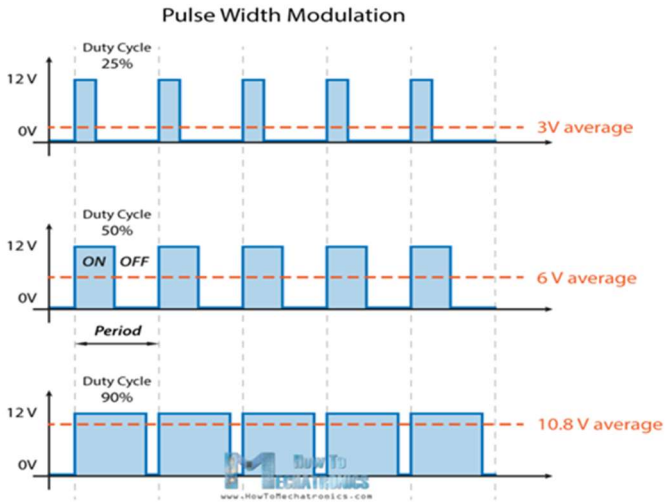
Berdasarkan bahan penyusunnya, secara garis besar sel surya dibedakan menjadi dua yaitu sel surya berbasis silikon dan sel surya non silikon. Sel surya no silikon ini jarang digunakan secara umum karena beberapa pertimbangan seperti GaAs yang bersifat beracun. Sementara sel surya dengan material penyusun silikon sangat mudah untuk dijumpai di pasaran karena silikon sendiri tersedia cukup banyak di alam. Sel surya berbasis silikon dikelompokkan menjadi 3 yaitu silikon monokristalin, silikon polikristalin, dan *thin film solar cell*.

2.2.2 *Solar Charge Controller*

Solar Charge Controller (SCC) adalah peralatan elektronik pada sistem PLTS yang berfungsi untuk mengatur lalu lintas arus listrik dari modul surya ke baterai, dan dari baterai ke beban. Saat pengisian baterai, SCC mengatur arus yang masuk ke baterai. Apabila baterai sudah penuh, maka arus listrik dari modul surya tidak akan dimasukkan ke baterai. Hal ini untuk menghindari o*vercharging* yang dapat mengurangi umur baterai. Alat ini juga mengatur arus yang dibebaskan dari baterai ke beban. Jika energi pada baterai tinggal 20-30% (tergantung *Depth of Discharge*), maka aliran listrik ke beban akan diputus. Ada dua jenis SCC, yaitu PWM dan MPPT.

Pada SCC PWM, ketika *State of Charge* (SOC) baterai mendekati penuh, SCC akan secara bertahap menurunkan jumlah daya yang masuk ke baterai dengan

cara memanipulasi *duty cycle* sinyal listrik untuk mengurangi kejenuhan pada baterai tersebut. SCC PWM memiliki harga yang lebih murah dibandingkan dengan MPPT. Kekurangan SCC PWM antara lain yaitu ukuran tegangan SCC harus sesuai dengan tegangan bank baterai, dan kapasitas SCC sistem PWM biasanya terbatas pada kisaran 50 sampai sekitar 60 ampere. Selain itu, jika cuaca mendung, tegangan out SCC Sistem PWM akan mengikuti Modul Surya. Prinsip kerja PWM diberikan oleh gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Grafik *duty cycle* PWM

SCC MPPT adalah kontroler yang menggunakan algoritma MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) untuk memaksimalkan daya yang dapat dihasilkan oleh modul PV. Seperti diketahui bahwa karakteristik daya keluaran sel surya dipengaruhi oleh radiasi sinar matahari dan suhu permukaan sel surya, diperlukan sebuah algoritma untuk mencari titik daya maksimum dan menjaga pada titik kerja tersebut. Terdapat beberapa cara untuk menjejak titik daya maksimum tersebut seperti *Perturb and Observe* (Midya, Krein, Turnbull, Reppa, & Kimball, 1996), *Incremental Conductance* (Kerekes, Teodorescu, & Blaabjerg, 2004), *Dynamic Approach* (Mohan, Undeland, Robbins, & P., 1995), *Suhue Methods* (Kerekes, Teodorescu, & Blaabjerg, 2004).

2.2.3 Baterai

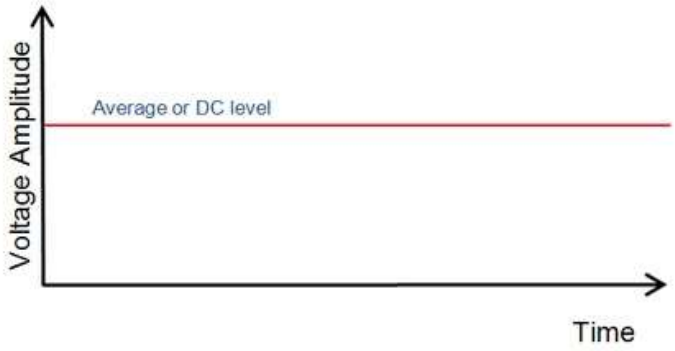
Baterai adalah komponen yang berfungsi menyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh modul surya yang tidak segera digunakan oleh beban. Energi yang disimpan dapat digunakan saat periode radiasi matahari rendah atau pada malam hari. Baterai, atau yang disebut juga accumulator atau aki dapat diartikan sebagai sel listrik yang berlangsung proses elektrokimia secara bolak-balik dengan nilai efisiensi yang tinggi (Chang, 2013).

Baterai menyimpan energi listrik dalam bentuk energi kimia. Baterai yang sering digunakan dalam aplikasi PLTS adalah maintenance-free lead acid battery berjenis VRLA (Valve Regulated Lead Acid). Kapasitas energi per kilogramnya relatif kecil. Baterai lead acid terbagi kedalam gua jenis yaitu sealed atau biasa disebut aki kering dan non sealed. Perbedaan kedua jenis tersebut adalah adanya mekanisme pengembunan pada jenis sealed untuk menjada uap dari cairan elektrolit terbuang ke udara. Kemampuan dari suatu baterai ditentukan oleh kapasitasnya yang diukur dalam satuan Amperehour (Ah). Baterai dengan kapasitas 100 Ah apabila melakukan discharge atau penggunaan 100 Ampere akan habis dalam waktu satu jam. Jumlah energi yang mampu disimpan dalam baterai didapatkan dengan perkalian antara kapasitas dan tegangan baterai hingga menghasilkan satuan Watthour (Wh).

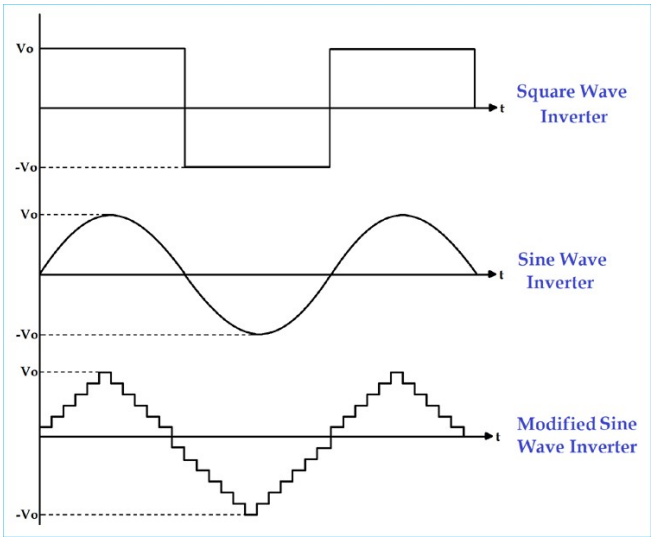
Parameter lain yang penting pada baterai adalah *Depth of Discharge* (DoD). DoD adalah batasan energi yang boleh digunakan dari baterai. Untuk baterai lead acid, nilai maksimumnya adalah 80%. Artinya baterai tersebut tidak boleh digunakan lebih dari 80% kapasitasnya agar umur baterai tersebut dapat bertahan lama. Kemampuan baterai untuk bertahan pada jangka waktu tertentu tergantung dengan jumlah cycle nya. Satu cycle adalah satu kali charge dan discharge. Besarnya DoD sangat mempengaruhi jumlah cycle total yang mampu dicapai oleh suatu baterai. State of Charge menyatakan perbandingan antara sisa energi yang masih dapat digunakan dengan energi pada kapasitas penuh yang dinyatakan dalam persen. 100% menunjukkan baterai penuh dan 0% menunjukkan baterai kosong (complete discharge).

2.2.4 Inverter

Inverter adalah komponen yang berfungsi mengubah tegangan input DC menjadi tegangan AC. Sumber tegangan input DC inverter dapat berupa sel surya, baterai, atau sumber tegangan DC lainnya. Output dari inverter umumnya 120 V atau 220 V dengan frekuensi 50 Hz atau 60 Hz. Jenis Inverter pada umumnya ditentukan oleh bentuk gelombang output yang dihasilkan.



(a)



(b)

Gambar 2. 7 Perubahan bentuk gelombang oleh inverter (a) Listrik DC (b) Listrik AC *square, modified sine,* dan *pure sine wave*

Bentuk gelombang output dapat berupa gelombang kotak (*square wave*), modifikasi gelombang kotak (*modified sine wave*), atau gelombang sinus murni (*pure sine wave*) seperti yang diberikan oleh gambar 2.7. Untuk PLTS yang

terhubung dengan jaringan, inverter yang digunakan adalah inverter khusus yang disebut grid tie inverter atau synchronous inverter.

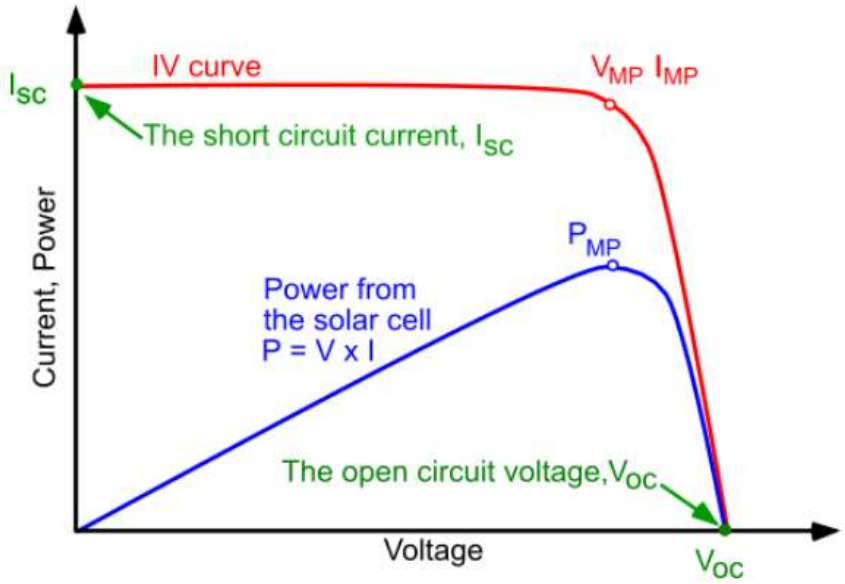
2.3 Parameter Performansi PLTS Off-Grid

2.3.1 Efisiensi Sel Surya

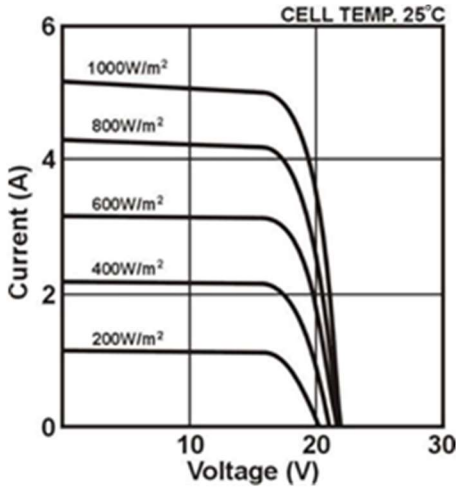
Efisiensi panel surya merupakan rasio keluaran listrik dari panel surya terhadap energi datang (*incident*) dari sinar matahari. Sebuah sel surya yang terpapar sinar matahari akan memiliki perbedaan potensial (tegangan) pada elektroda positif dan negatifnya dalam keadaan terbuka (*open* circuit) yang apabila dihubungkan (*short circuit*) akan terjadi aliran arus listrik. Efisiensi panel surya dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain luas permukaan panel (A), irradiasi matahari datang (Pincident), dan tegangan (Vmax) serta arus (Imax) yang dihasilkan oleh panel surya tersebut. Secara matematis diberikan oleh persamaan (2.1).

$$\eta_{pv} = \frac{Vmax\ (Volt) \times Imax\ (Ampere)}{Pincident\ (\frac{W}{m^2}) \times\ A(m^2)} \tag{2.1}$$

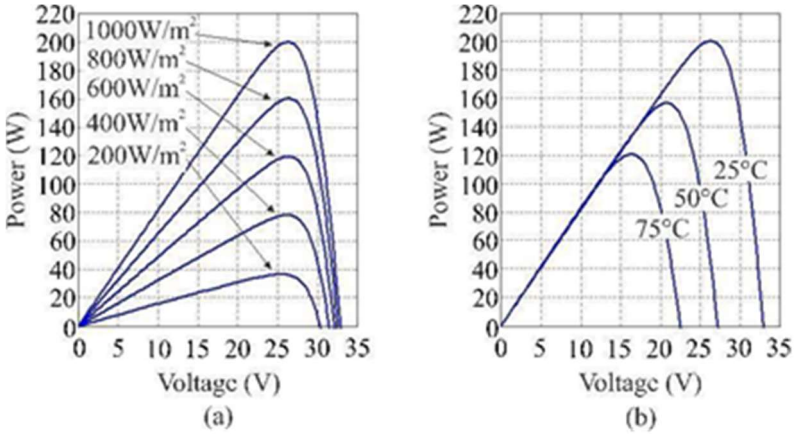
Perkalian antara tegangan maksimum dan arus maksimum menghasilkan daya maksimum (*maximum power*) dimana tegangan maksimum didapatkan ketika *open* circuit, disebut dengan *open circuit voltage* (Voc) dan arus maksimum didapatkan ketika *short circuit*, disebut dengan *short circuit current* (Isc). Hubungan antara daya maksimum dengan Voc dan Isc merupakan karakteristik dasar suatu panel surya yang digambarkan oleh *I-V Curve* seperti pada gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Karakteristik kurva I-V sel surya



Gambar 2. 9 Pengaruh radiasi matahari pada kurva I-V



Gambar 2. 10 Pengaruh radiasi matahari pada kurva P-V

Radiasi sinar matahari akan mempengaruhi arus yang dihasilkan oleh sel surya. Semakin tinggi radiasi matahari maka semakin tinggi pula arus listrik yang dihasilkan. Gambar 2.9 dan gambar 2.10 menunjukkan pengaruh radiasi matahari terhadap panel surya yang tersusun atas 36 sel monocrystalline. Dari kedua gambar tersebut dapat dilihat bahwa semakin besar irradiasi matahari (mendekati 1000 W/m^2) maka daya yang dihasilkan oleh sel surya juga akan mendekati maksimal, begitu pula sebaliknya.

2.3.2 Efisiensi Baterai

Efisiensi baterai dapat dinyatakan sebagai perbandingan antara kapasitas pengosongan (*discharge*) dan kapasitas pengisian (*charge*) (Chang, 2013). Secara matematis diberikan oleh persamaan (2.2).

$$\eta_{battery} = \frac{\int P_d dt}{\int P_c \, dt} \tag{2.2}$$

Salah satu parameter penting dalam performansi baterai adalah *State Of Charge* (SOC). SOC secara umum adalah rasio kapasitas baterai (Q(t)) terhadap kapasitas nominalnya (Qn). Qn didapatkan dari spesifikasi baterai dan merepresentasikan muatan maksimum yang mampu disimpan pada baterai. Secara umum SOC dinyatakan oleh persamaan (2.3).

$$SOC(t) = \frac{Q(t)}{Q_n} \tag{2.3}$$

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menghitung SOC baterai adalah *open circuit voltage (OCV) method*. Metode ini memberikan hubungan antara SOC dengan OCV pada persamaan (2.4).

$$Voc(t) = a_1 \times SOC(t) + a_o \tag{2.4}$$

Dimana SOC(t) adalah SOC baterai pada waktu t, a_0 adalah tegangan terminal baterai pada SOC 0%, dan a_1 didapatkan ketika mengetahui nilai a_0 dan tegangan terminal ketika SOC 100%. Metode ini dapat dilakukan apabila baterai memiliki SOC yang linear dengan OCV. Kondisi ini ditemukan pada baterai *lead acid*, namun tidak demikian untuk baterai *lithium-ion* (Coleman, Lee, & C. Zhu, 2007).

2.3.3 Efisiensi *Solar Charge Controller*

Efisiensi SCC dapat dinyatakan sebagai perbandingan antara energi yang masuk ke SCC dengan energi yang keluarkan untuk pengisian baterai. Secara matematis dirumuskan dengan persamaan (2.5).

$$\eta_{scc} = \frac{\int P_{out}\, dt}{\int P_{in}\, dt} \tag{2.5}$$

2.3.4 Efisiensi Inverter

Efisiensi *inverter* dinyatakan sebagai perbandingan antara energi keluaran *inverter* dengan energi masukan *inverter*. Energi masukan berupa listrik DC dan energi keluaran adalah listrik AC. Secara matematis dirumuskan oleh persamaan (2.6).

$$\eta_{inverter} = \frac{\int P_{out}\, dt}{\int P_{in}\, dt} \tag{2.6}$$

2.3.5 Efisiensi Total Sistem

Efisiensi total pada sistem PLTS *off-grid* merupakan gabungan dari efisiensi masing-masing kopmonen penyusun PLTS. Secara matematis dirumuskan oleh persamaan (2.7).

$$\eta_{system} = \eta_{pv} \times \eta_{scc} \times \eta_{battery} \times \eta_{inverter} \quad (2.7)$$

2.3.6 *Performance Ratio*

Performance ratio merupakan salah satu variabel penting yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja suatu pembangkit pistrik. Secara spesifik, *performance ratio* adalah perbandingan antara energi aktual keluaran sistem dengan energi keluaran teoritis dari suatu pembangkit listrik, dalam hal ini Pembangkit Listrik Tenaga Surya. *Performance ratio* dinyatakan dalam satuan persen dan dapat juga dikatakan sebagai quality factor. Pada suatu pembangkit listrik tenaga surya, yang dimaksud dengan *performance ratio* adalah perbandingan antara energi total yang diterima seluruh luas permukaan panel surya yang terpasang dengan energi listrik yang dihasilkannya.

Semakin tinggi nilai *performance ratio*, maka semakin efisien pula operasi pembangkit listrik. Namun dalam kenyataannya, nilai *performance ratio* 100% tidak dapat dicapai karena dalam kondisi di lapangan terdapat berbagai energy loss yang disebabkan oleh kondisi lingkungan dan komponen.

Nilai *performance ratio* berfungsi untuk menyatakan seberapa efisien dan andal suatu sistem pembangkit listrik. Dengan nilai performance ratio, kita dapat membandingkan performa pembangkit dengan pembangkit lain dan juga untuk merencanakan predictive maintenance sesuai dengan performance ratio dan analisa yang didapatkan. Secara matematis, nilai performance ratio diberikan pada persamaan (2.8).

$$PR = \frac{Output\ energi\ aktual\ (kWh)}{Output\ energi\ teoritis\ (kWh)} \times 100\% \quad (2.8)$$

Nilai output energi teoritis dapat dihitung menggunakan dua metode. Metode pertama yaitu dengan memperhitungkan nilai irradiasi yang diterima luasan panel surya dan efisiensi panel surya, yang diberikan oleh persamaan (2.9).

$$PR = \frac{Output\ energi\ aktual\ (kWh)}{Insolasi\ Matahari \times Luasan\ (m^2) \times Efisiensi(\%)} \times 100\% \quad (2.9)$$

Metode kedua yaitu dengan memperhitungkan nilai effective sun hour (ESH) dan kapasitas panel surya terpasang, yaitu diberikan pada persamaan (2.10).

$$PR = \frac{Output\ energi\ aktual\ (kW\ \ )}{ESH\ (h) \times Kapasitas\ terpasang(kW)} \times 100\% \quad (2.10)$$

Effective Sun Hour atau Peak Sun Hour adalah durasi ketika irradiasi matahari bernilai 1000 W/m2 dalam satu hari. Secara matematis, ESH didapatkan dengan persamaan (2.11).

$$ESH = \frac{Irradiasi\ rata{-}rata\left({}^{W}/_{m^2}\right) \times 12h}{1000\ {}^{W}/_{m^2}} \quad (2.11)$$

2.3.7 Loss of Load Probability

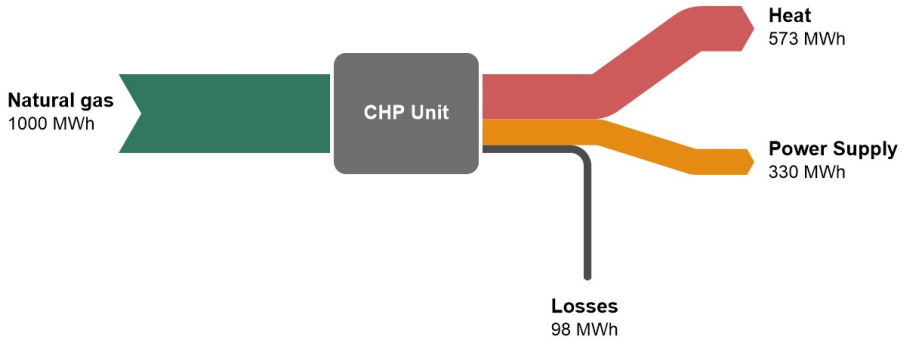
Dalam pemanfaatan energi matahari sebagai pembangkitan energi listrik, teradapat satu kendala utama yaitu *intermittency* sumber energi matahari yang diartikan sebagai suatu kondisi tidak stabilnya energi matahari yang diterima oleh permukaan bumi dikarenakan faktor cuaca. Untuk itu sangat penting untuk mengetahui *reliability* atau keandalan suatu sistem PLTS. Parameter keandalan yang digunakan pada penelitian ini adalah *Loss of load Probability* (LOL). LOL adalah kemungkinan SOC baterai pada waktu t bernilai sama dengan atau kurang dari nilai minimum SOC yang diperbolehkan yang disebabkan oleh energi terproduksi sistem lebih rendah dari energi yang dibutuhkan (*demand*). Secara matematis LOL merupakan rasio dari semua energi defisit dari total kebutuhan beban (*load demand*) selama periode Δt pada persamaan (2.12). (Hongxing, Lu, & Burnett, 2003)

$$LOL(\Delta t, Apv, Cn) = \frac{\sum_{t=1}^{T} DE(t,Apv,Awt,Cn) \times \Delta t}{\sum_{t=1}^{T} Pload(t) \times \Delta t} \quad (2.12)$$

Dimana DE(t,Apv,Cn) adalah defisit energi pada jam ke-t, luas area panel Apv, dan kapasitas nominal baterai Cn. Dikatakan defisit energi ketika total energi yang tersedia selama interval waktu [(t-Δt), t] dan energi yang tersimpan pada awal interval tidak cukup (*insufficient*) untuk memenuhi *load demand* selama interval waktu tersebut.

2.3.8 Energy Flow Diagram

Energy flow diagram (diagram alir energi) atau biasa disebut dengan *energy flow charts* adalah suatu diagram yang digunakan untuk menunjukkan aliran energi pada proses konversi energi secara visual yang merepresentasikan kuantitas (jumlah) energi tersebut. Di dalam diagram alir energi pada dasarnya terdapat tiga komponen energi yakni energi awal yang masuk ke sistem, energi keluaran sistem yang digunakan oleh konsumen, dan energi keluaran sistem yang tidak dapat digunakan atau dikatakan rugi energi (*losses*). Gambar 2.11 menunjukkan bentuk umum *energy flow diagram*.

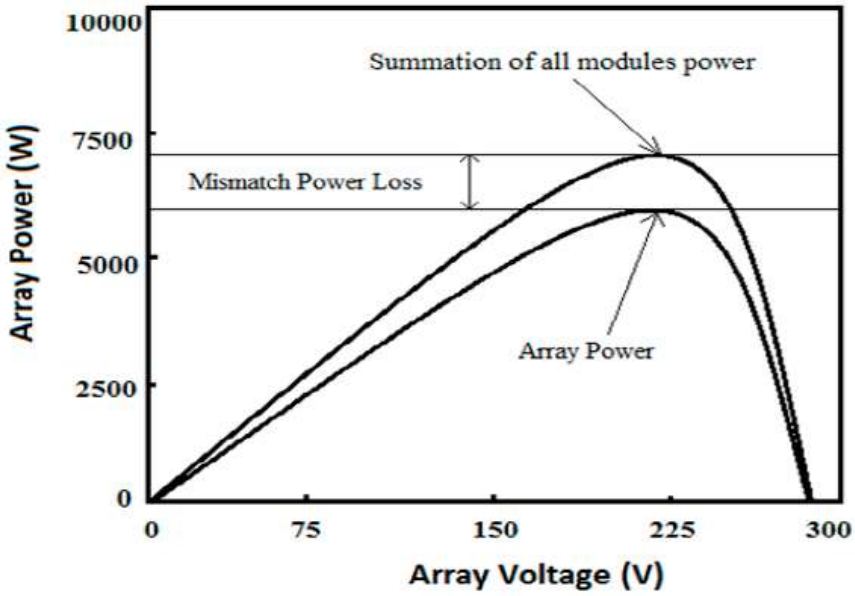


Gambar 2. 11 *Energy flow sankey diagram* (Hamburg, n.d.)

Diagram alir energi pada umumnya digambarkan sebagai *Sankey diagram*. *Sankey diagram* adalah diagram dimana ketebalan anak panah merepresentasikan jumlah energi yang mengalir seperti pada gambar 11. Pada suatu diagram, energi harus memiliki satuan yang sama seperti kWh, MWh, PJ, BTU, atau Mtoe. Jika ada beberapa jenis energi, biasanya masing-masing anak panah memiliki kode warna yang berbeda.

2.4 Pengaruh Konfigurasi Array Modul PV Terhadap Performansi PLTS Off-Grid

Pada suatu array PV, masing-masing modul pada umumnya memiliki karakteristik I-V yang berbeda meskipun memiliki *rating* daya yang sama. Parameter karakteristik I-V yang diperhitungkan adalah Voc (tegangan rangkaian terbuka), Isc (arus hubung singkat), Vm (tegangan maksimum), Im (arus maksimum), dan Pm (daya maksimum). I-V *mismatch* adalah keadaan ketika terdapat perbedaan parameter-parameter tersebut diantara masing-masing modul PV yang dapat menyebabkan MML (*mismatch losses*) pada suatu array PV. Ada beberapa faktor yang menyebabkan *mismatch* diantaranya kesalahan manufaktur, permukaan yang tidak rata, perubahan warna permukaan, dan retak pada permukaan yang menyebabkan rugi energi sekitar 4% hingga 7% (Deline, Marion, Granata, & Gonzales, 2011).



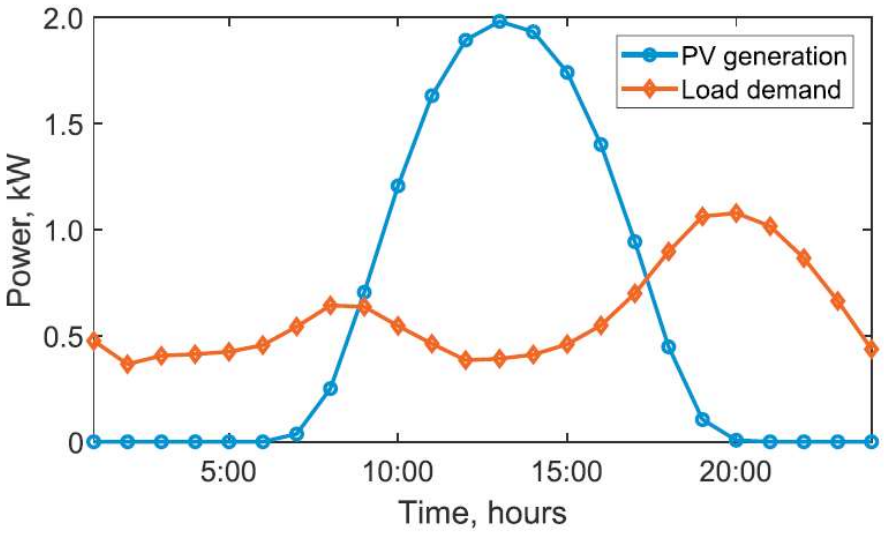
Gambar 2. 12 Grafik *mismatch* modul PV

Gambar 2.12 menunjukkan grafik *mismatch* pada modul PV. Di sisi lain, irradiasi yang tidak merata (*uniform*) atau *shading* pada sebagian permukaan PV merupakan faktor lingkungan yang menyebabkan I-V *mismatch* pada array modul PV (Teo, Tan, & Mok, 2018). Gambar 12 menunjukkan bahwa jumlah total daya dari semua modul pada suatu array PV bernilai lebih tinggi dari daya ketika sudah modul-modul tersebut sudah disusun menjadi array, perbedaan daya inilah yang didefinisikan sebagai *mismatch power*. Oleh karena itu untuk mengurangi MML dikarenakan *mismatch*, sangat penting untuk meningkatkan daya keluaran array dengan cara menyusun array tersebut dengan teknik konfigurasi yang optimal.

2.5 Pengaruh Profil Pembebanan Terhadap Performansi PLTS Off-Grid

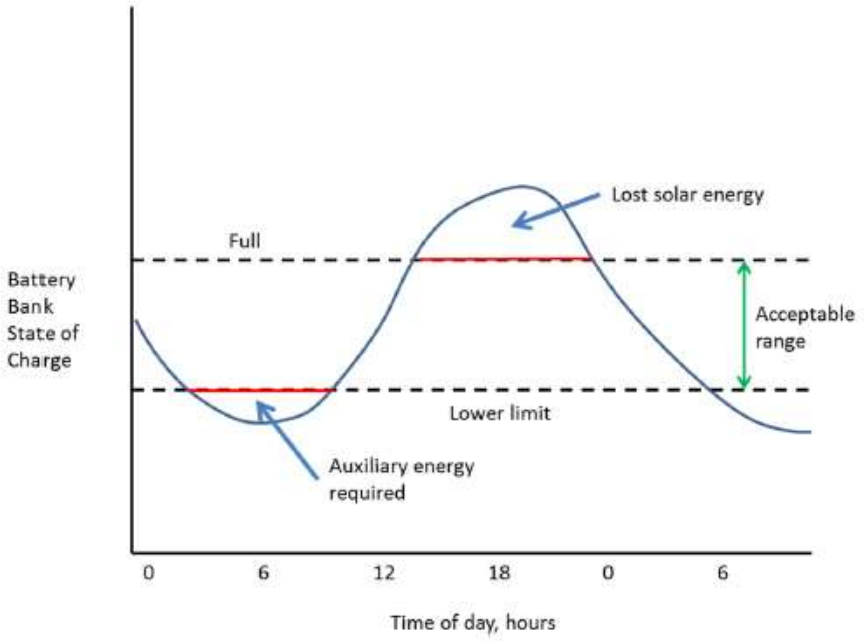
Pembebanan yang diberikan pada suatu sistem pembangkit *off-grid* pada umumnya terdiri atas beban penerangan (lampu), perangkat elektronik, dan terminal kosong yang dapat digunakan sewaktu-waktu. Beban beban tersebut biasanya hanya digunakan pada waktu-waktu tertentu saja, misalnya penerangan yang digunakan pada malam hari. Kemudian ada pula beban yang digunakan ketika

dibutuhkan saja seperti mesin cuci. Di sisi lain ada pula beban yang harus beroperasi penuh selama 24 jam seperti kulkas yang dikategorikan sebagai *constant load*. Kombinasi dari seluruh beban dan waktu pemakaiannya dalam satu hari akan menghasilkan *electric load profile* atau profil pembebanan yang harus dipenuhi oleh suatu sistem pembangkit listrik *off grid*, dalam hal ini PLTS. Contoh profil pembebanan dalam satu hari yang diambil di salah satu rumah di Australia Selatan diberikan oleh gambar 2.13.



Gambar 2. 13 Profil pembebanan harian (Sharma, Haque, & Aziz, 2019)

Profil pembebanan sangat mempengaruhi performansi PLTS Off-Grid karena besar daya dan *timing* dari beban relatif terhadap besar daya dan *timing* energi matahari yang tersedia menentukan kemampuan PLTS untuk memenuhi beban tersebut. Ada dua keadaan yang mengindikasikan performansi yang buruk dengan keterkaitannya terhadap SOC (*State Of Charge*) baterai yakni bank baterai kosong (*undercharge*) dan bank baterai terlalu penuh (*overcharge*) seperti diilustrasikan gambar 2.14.



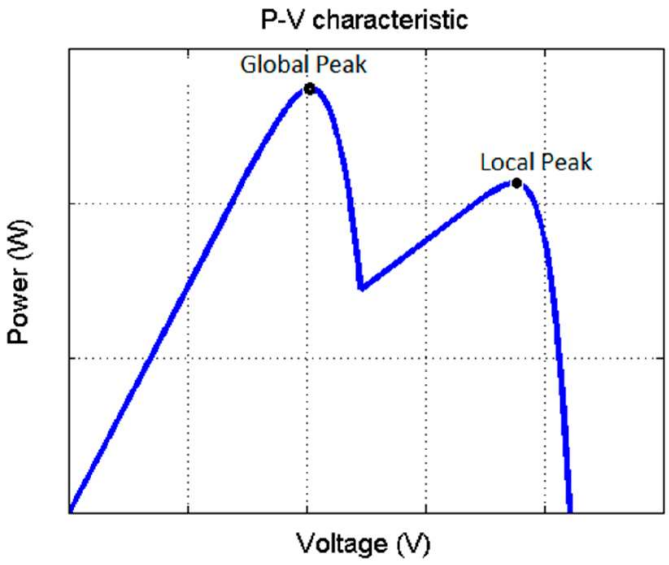
Gambar 2. 14 SOC baterai harian (Treado, The effect of electric load profiles on the performance of off-grid residential hybrid renewable energy systems, 2015)

Gambar 2.14 menunjukkan SOC baterai seiring terjadinya pengisian (*charge*) oleh sistem pembangkit dan pengosongan (*discharge*) oleh beban selama satu hari. Pada sistem yang baik, SOC harus berada pada kondisi terisi penuh (100%) hingga ter*discharge* sebagian namun tidak boleh lebih besar dari batas *Depth of Discharge* (DoD) dari baterai tersebut yang biasanya memiliki nilai 40% hingga 60%. Apabila SOC berada dibawah batas, maka untuk memenuhi kebutuhan beban diperlukan sumber energi cadangan (*auxillary*) yang biasanya dipenuhi oleh generator diesel (genset). Dapat terjadi pula keadaan dimana SOC sudah 100% namun sistem masih menerima energi surplus dari cahaya matahari sehingga energi tersebut pun tidak dapat digunakan. Kombinasi dari SOC dan pembebanan ini pada akhirnya mempengaruhi energi yang diterima oleh sistem dan energi yang tersalurkan ke beban sehingga berpengaruh kepada keandalan kemampuan sistem untuk memenuhi bebannya, yang direpresentasikan oleh parameter LOL.

2.6 Pengaruh *Shading* Terhadap Performansi PLTS Off-Grid

Pada luas permukaan modul PV pada suatu PLTS, beberapa modul PV atau sebagian dari modul PV mungkin terkena bayangan (*shading*) oleh pepohonan, daun yang jatuh, asap, kabut, awan, atau panel surya yang terpasang di dekatnya. Pada kasus *shading* ini, sel 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. Kemudian hal tersebut juga dapat merusak modul akibat adanya panas yang berlebih. Dalam hal ini menghindari permasalahan yang lebih besar akibat shading pada suatu string, maka diantisipasi dengan penggunaan diode by-pass yang terpasang paralel pada masing-masing modul.

Ketika irradiasi yang diterima oleh seluruh permukaan array PV bernilai sama (*uniform*), kurva P-V hanya akan memiliki satu puncak yang merepresentasikan daya maksimum array PV. Namun ketika sebagian array PV terkena bayangan (*partial shading*), kurva P-V akan memiliki beberapa puncak seperti pada gambar 2.15. *Global peak* merepresentasikan daya maksimum suatu *string* PV dan *local peak* merupakan daya maksimum dari modul PV yang terkena *shading*.

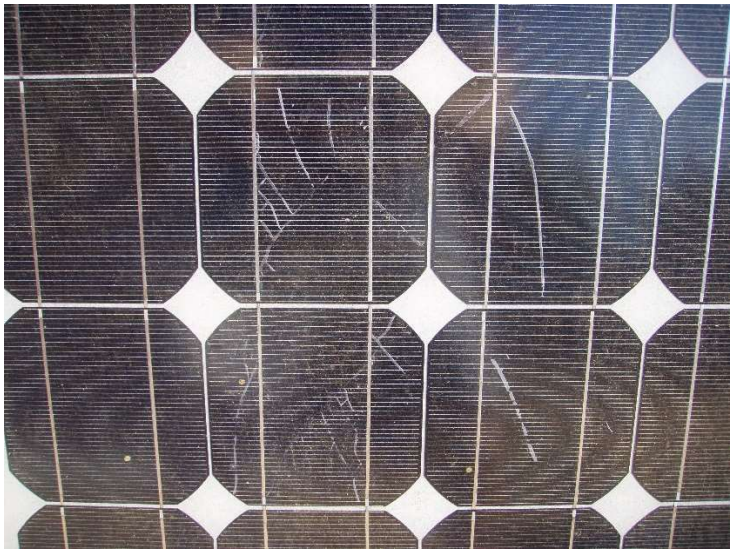


Gambar 2. 15 Kurva P-V pada kondisi *partial shading* (Teo, Tan, & Mok, 2018)

2.7 Pengaruh *snail trail* terhadap performansi PLTS Off-Grid

Performansi suatu modul PV akan mengalami penurunan seiring pemakaiannya, fenomena ini disebut dengan degradasi. Degradasi dapat terjadi karena pada kondisi asli, modul PV tidak bekerja pada STC (*Standard Test Condition*) yakni irradiasi 1000 W/m^2 dan suhu 25^{o}C melainkan pada suhu dan kelembaban yang beragam. Kondisi yang tidak ideal ini dapat menyebabkan beberapa kerusakan seperti perubahan warna pada lapisan *encapsulant*, pembentukan gelembung pada lapisan *encapsulant*, adanya titik panas atau *hotspot*, dan terjadinya retakan serta perubahan warna pada sel PV yang disebut dengan *snail trail*. *Snail trail* dapat terjadi pada beberapa bulan setelah penggunaan modul PV dan dapat terjadi pada bagian depan atau pinggir dari sel surya (Kontges, 2012) seperti pada gambar 2.16.

Beberapa penelitian terdahulu telah mempelajari tentang penyebab *snail trail* dan efeknya terhadap produksi energi suatu modul PV. (Meyer, 2013) menemukan bahwa *snail trail* disebabkan oleh reaksi kimia antara *fingers* atau logam penghubung sel PV kelembaban udara sekitar. Pengaruh fenomena ini terhadap performansi modul PV dipelajari oleh (Morlier, Haase, & Kontges, 2016) dan ditemukan bahwa *snail trail* yang terjadi pada sel PV berdampak pada hilang daya modul PV sebesar 6% hingga 22%.

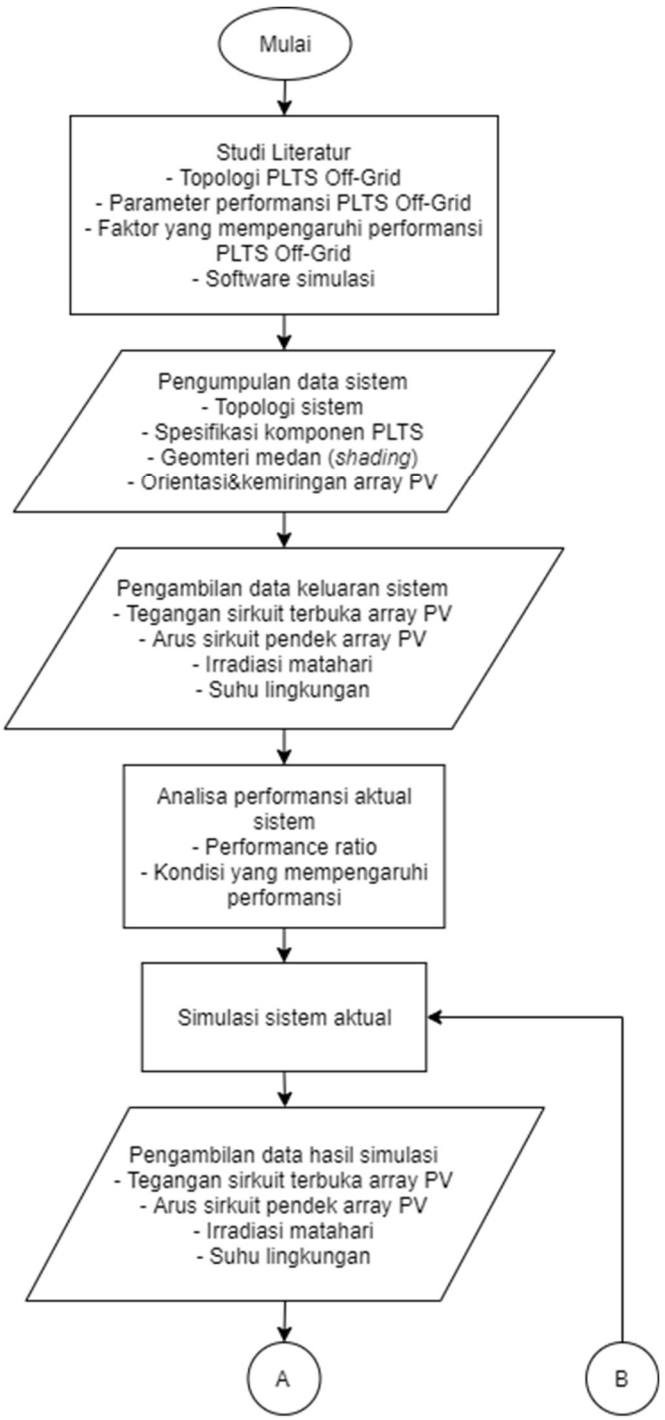


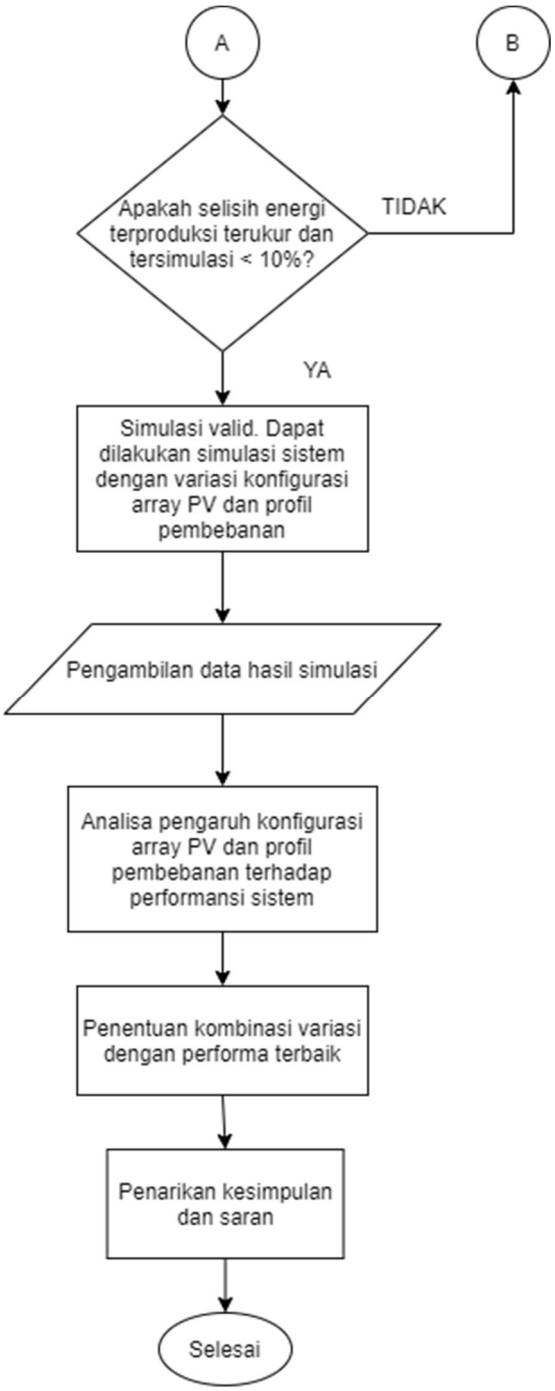
Gambar 2. 16 Contoh *snail trail* pada modul PV

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian analisa performansi PLTS Off-Grid ini dilakukan melalui tahapan-tahapan sesuai diagram alir pada gambar 3.1.





Gambar 3. 1 Diagram alir metodologi penelitian

3.1 Studi literatur

Studi literatur dilakukan untuk memahami konsep-konsep yang terkait dan berhubungan dengan penelitian ini. Sumber studi literatur berupa buku dan paper-paper ilmiah terkait topologi PLTS *off-grid*, parameter performansi PLTS *off-grid*, faktor yang mempengaruhi performansi PLTS *off-grid*, dan software yang akan digunakan sebagai alat simulasi sistem.

3.2 Pengumpulan Data Sistem

Dilakukan pengumpulan data terkait sistem PLTS off-grid yang telah terpasang di Departemen Teknik Fisika. Data yang dikumpulkan yakni topologi sistem berupa wiring diagram, spesifikasi masing-masing komponen PLTS, geometri medan dimana array PV ditempatkan yang akan mempengaruhi shading, serta orientasi (arah) serta kemiringan array PV.

3.3 Pengambilan Data Lingkungan dan Profil Pembebanan

Dilakukan pengambilan data lingkungan yakni data irradiasi matahari dan suhu lingkungan. Pengukuran irradiasi matahari dilakukan menggunakan Solar Power Meter SPM-111SD dan pengukuran suhu lingkungan menggunakan Environment Meter Krisbow KW06-291 dengan spesifikasi alat ukur terlampir. Pengukuran irradiasi mathari dan suhu lingkungan dilakukan disamping array PV seperti pada gambar 3.2 (a) dan (b).

(a)

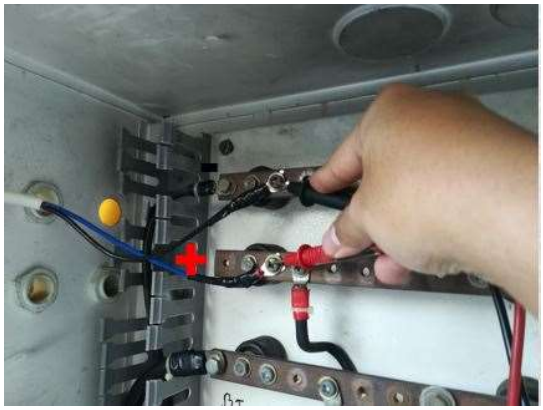
(b)

Gambar 3. 2 Pengukuran (a) Suhu Lingkungan (b) Irradiasi Matahari

Data ini akan menjadi parameter lingkungan pada simulasi. Diambil pula data terkait beban-beban yang digunakan mencakup daya, durasi, dan jam berapa saja beban tersebut digunakan sehingga didapatkan beberapa variasi profil beban yang juga akan digunakan sebagai parameter simulasi. Data diambil dengan interval 60 menit dari pukul 06.00 sampai 18.00 selama 7 hari.

3.4 Pengambilan Data Keluaran Sistem

Dilakukan pengambilan data keluaran sistem yakni data tegangan sirkuit terbuka dan arus sirkuit pendek array PV. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan Multimeter Fluke 175 dengan spesifikasi terlampir. Pengukuran tegangan dilakukan dengan cara menghubungkan probe positif multimeter ke busbar positif array PV pada panel box dan probe negatif mutimeter ke busbar negatif array PV seperti pada gambar 3.3. Tahap ini bertujuan untuk mengetahui performa aktual dari sistem. Data diambil dengan interval 60 menit dari pukul 06.00 sampai 18.00 selama 7 hari.



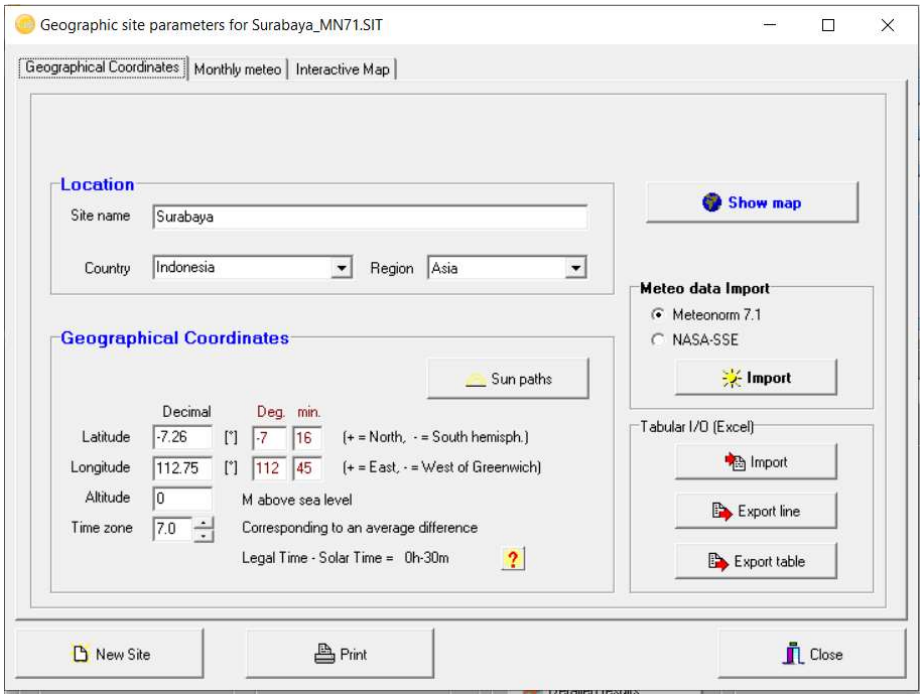
Gambar 3. 3 Pengukuran Voc dan Isc

3.5 Simulasi Sistem Menggunakan *Software*

Sistem yang telah terpasang dimodelkan pada software sesuai dengan topologi dan spesifikasi komponen yang telah didapatkan pada tahap sebelumnya. Data lingkungan yang telah didapatkan pada tahap sebelumnya menjadi kondisi operasi pada simulasi.. Geometri medan penempatan array PV digambar pada software untuk mengetahui efek shading yang terjadi. Setelah dilakukan simulasi

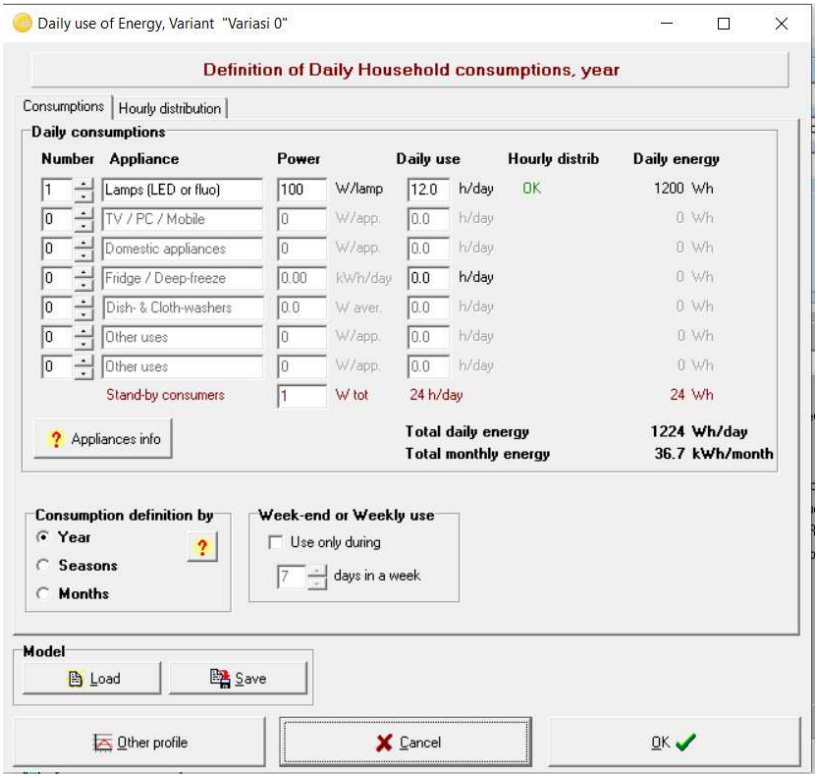
untuk sistem dengan topologi aktual, dilakukan simulasi dengan variasi konfigurasi array modul PV dan profil pembebanan untuk mengetahui performansi sistem pada kondisi yang berbeda. Untuk sistem *off-grid* atau *standalone*, langkah-langkah simulasi adalah sebagai berikut.

1. Pendefinisian koordinat sesuai dengan lokasi terpasangnya sistem PLTS, seperti pada gambar 3.4



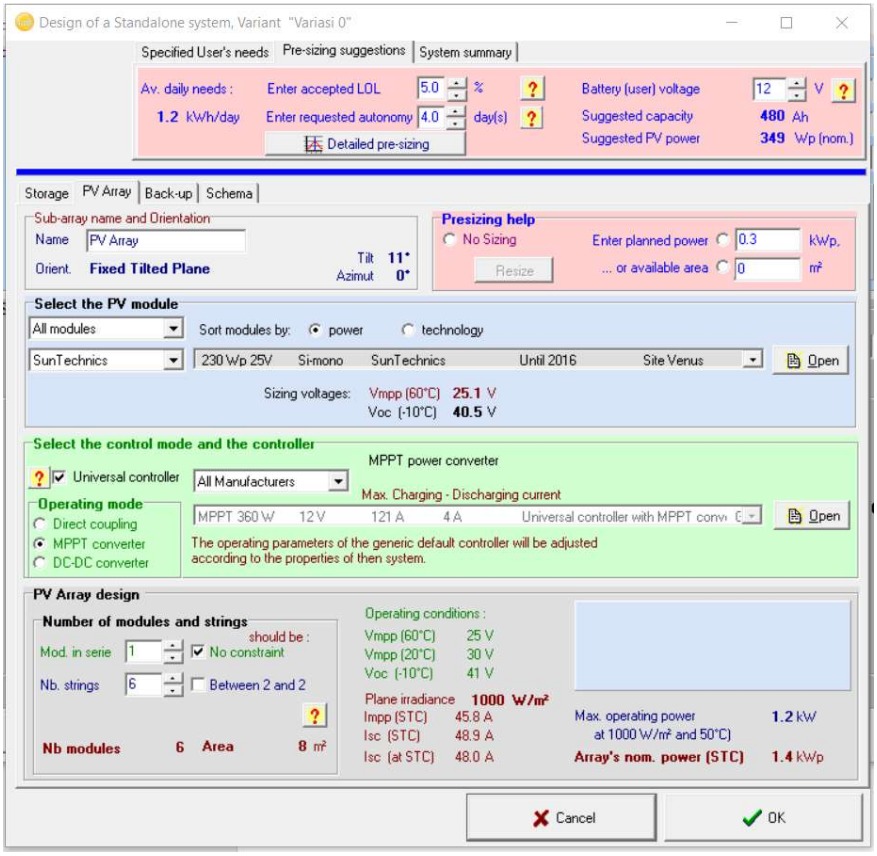
Gambar 3. 4 Pendefinisian koordinat

2. Pemberian profil pembebanan terkait dengan konsumsi daya, durasi, serta waktu penggunaan beban seperti pada gambar 3.5.



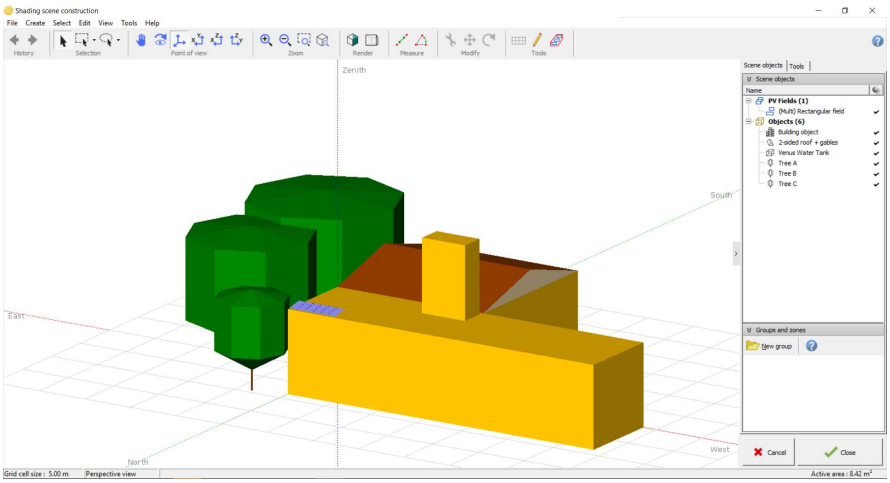
Gambar 3. 5 Pendefinisian profil pembebanan

3. Pendefinisian komponen sistem yang digunakan meliputi array modul PV serta konfigurasinya, baterai, dan *solar charge controller* seperti pada gambar 3.6.



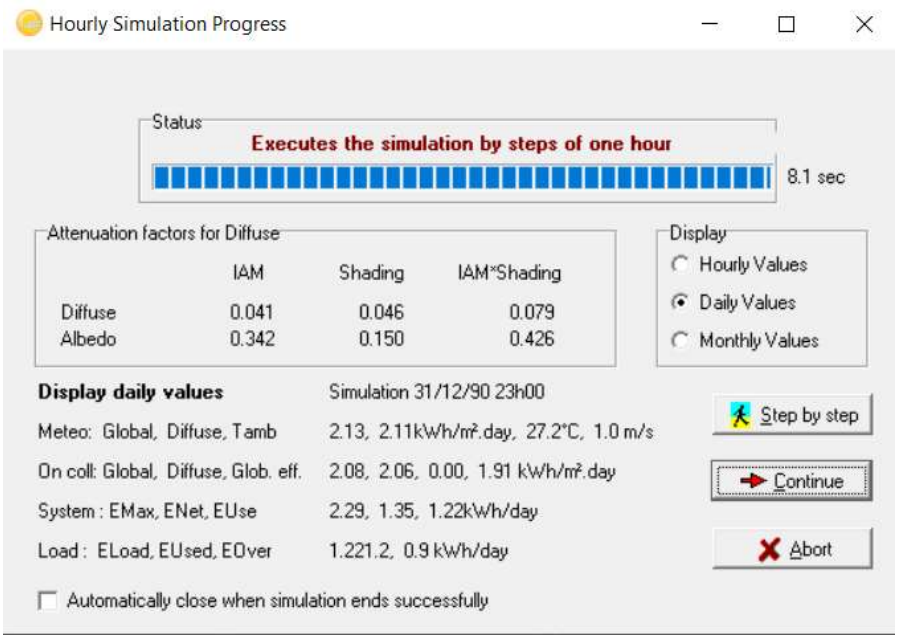
Gambar 3. 6 Pendefinisan komponen sistem

4. Penggambaran geometri medan yang akan mempengaruhi *shading* pada array modul PV seperti pada gambar 3.7.



Gambar 3. 7 Penggambaran geometri medan

5. *Run* simulasi untuk melakukan simulasi sistem yang telah didefinisikan seperti pada gambar 3.8.



Gambar 3. 8 *Running* Simulasi

3.6 Analisa Performansi

Dilakukan dilakukan analisa performansi yang didasarkan pada beberapa parameter. Parameter tersebut yakni *performance ratio*, kemampuan sistem memenuhi beban yang direpresentasikan oleh *Loss of Load Probability* (LOL), *energy loss diagram*, serta penentuan konfigurasi array modul PV dan profil pembebanan yang menghasilkan performa sistem terbaik.

3.7 Penarikan Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan analisa data dan pembahasan yang telah dilakukan, ditarik kesimpulan yang menjawab rumusan masalah penelitian. Diberikan pula saran untuk penelitian-penelitian selanjutnya agar mendapatkan hasil yang lebih baik ataupun untuk penelitian yang lebih dalam.

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

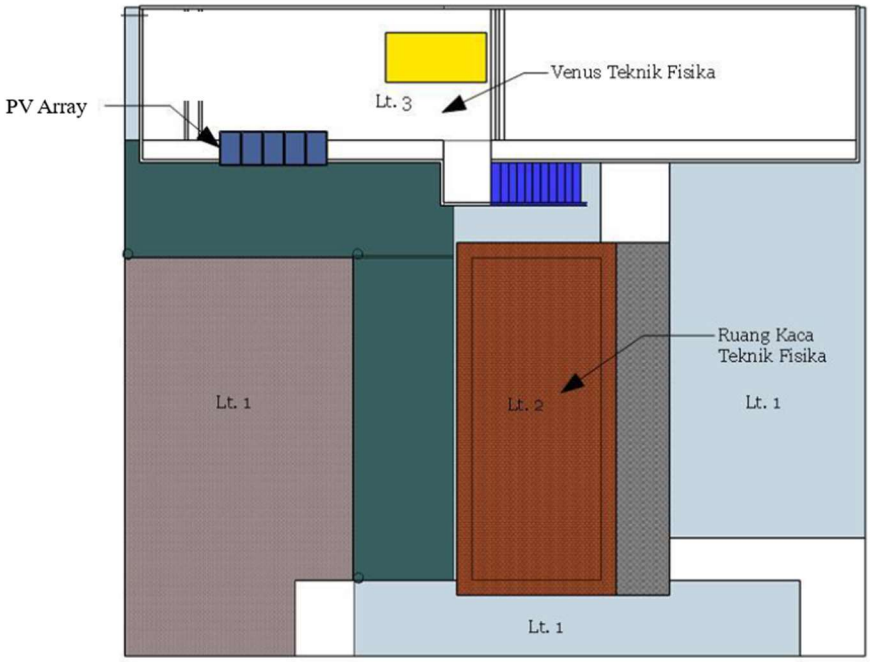
4.1 Deskripsi Sistem PLTS Teknik Fisika

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya yang dianalisa terletak di Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem (FTIRS), Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. PLTS ini memiliki kapasitas total 1380 Wattpeak dan tidak terhubung ke jaringan atau berdiri sendiri (standalone/off-grid). Listrik yang dihasikan oleh PLTS digunakan sebagai penerangan di Gedung Pascasarjana Teknik Fisika. Gambar 4.1 (a) menunjukkan kondisi array PV PLTS Teknik Fisika saat ini dan gambar 4.1 (b) menunjukkan panel box PLTS Teknik Fisika.

(a) (b)

Gambar 4. 1 PLTS Teknik Fisika (a) Array PV (b) Panel Box

Array modul PV terletak di area *rooftop* yang terhubung ke panel box yang terletak di lantai 2 Gedung Pascasarjana Teknik Fisika ITS. Array modul PV diletakkan pada kerangka tetap (*fixed mounting*) seperti pada denah yang ditunjukkan gambar 4.2.

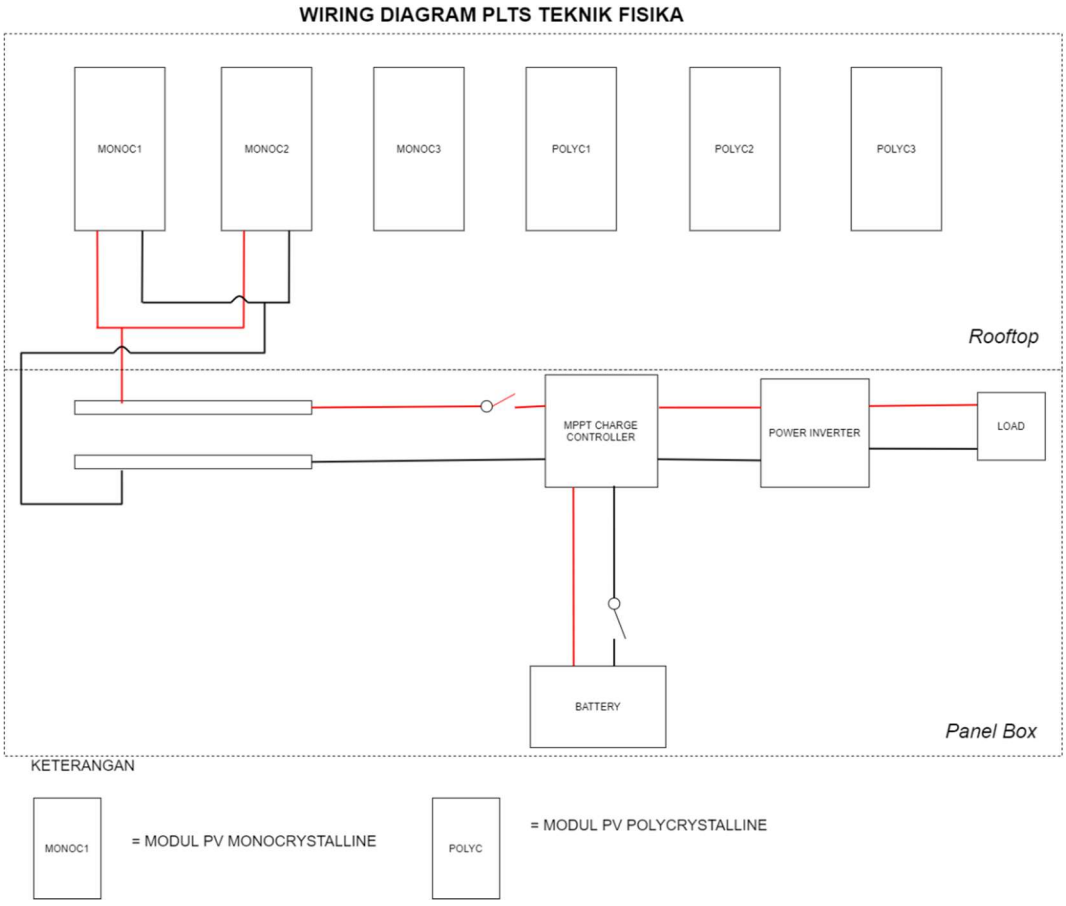


Gambar 4. 2 Denah Rooftop Pascasarjana

4.1.1 Topologi PLTS Teknik Fisika

PLTS Teknik Fisika ITS memiliki kapasitas total 1380 Wattpeak yang disusun atas 6 modul PV dengan kapasitas masing-masing 230 Wattpeak. Namun saat ini jumlah modul yang beroperasi hanya 2 modul dengan kapasitas total 460 Wattpeak. Modul PV yang digunakan menghasilkan *maximum power voltage* atau tegangan daya maksimum (Vmpp) sebesar 30 V dan *maximum power current* atau arus daya maksimum (Impp) sebesar 7,5 A. Pada sistem ini 2 modul PV disusun secara seri menjadi 1 *string* kemudian 3 *string* disusun paralel menjadi 1 *array*. Konfigurasi array modul PV tersebut menghasilkan tegangan keluaran array 30 V dan arus keluaran array 15 A pada daya maksimumnya.

Secara topologi PLTS Teknik Fisika ITS tidak terhubung dengan jaringan, melainkan berdiri sendiri atau disebut dengan *stand alone* atau *off grid*. Pada sistem *off grid* semua listrik yang dibutuhkan oleh beban didapatkan dari sistem PLTS, oleh karena itu pada sistem ini dibutuhkan baterai sebagai tempat penyimpanan energi listrik sehingga beban dapat menyala pada malam hari. Dalam pengisian (*charging*) baterai dibutuhkan komponen yakni *solar charge controller* (SCC) yang berfungsi mengatur tegangan dan arus yang mengalir dari array PV ke baterai untuk menghindari *overcharge* dan *undercharge*. Listrik yang dihasilkan oleh array PV dan disimpan di baterai merupakan listrik arus searah atau *direct current* (DC), untuk dapat digunakan oleh beban lampu yang membutuhkan listrik arus bolah balik atau *alternating current* (AC) maka diperlukan komponen *Inverter* yang berfungsi merubah listrik DC menjadi listrik AC sehingga dapat digunakan oleh beban.



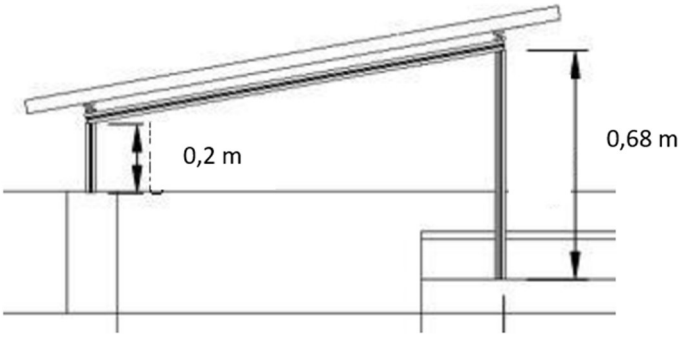
Gambar 4. 3 Wiring Diagram PLTS Teknik Fisika ITS

Listrik DC yang dihasilkan oleh array PV dialirkan ke baterai melalui SCC untuk disimpan. Kemudian dari baterai listrik akan mengalir ke Inverter untuk diubah menjadi listrik AC sampai akhirnya dapat digunakan oleh beban. Skema topologi ini disebut dengan *off grid dc coupling* dan digambarkan oleh wiring diagram pada gambar 4.3. Keluaran listrik yang dihasilkan oleh PLTS ini digunakan langsung oleh beban yakni satu lampu yang mengkonsumsi daya 100 W dan digunakan pada malam hari sebagai penerangan dari pukul 18.00 hingga pukul 06.00 keesokan harinya atau selama 12 jam.

4.1.2 Spesifikasi Komponen Utama PLTS Teknik Fisika

Sebagai sebuah sistem *off grid*, PLTS Teknik Fisika memiliki komponen utama yakni modul PV (*photovoltaic)*, *Solar Charge Controller*, Baterai, dan Inverter. Modul PV yang digunakan memiliki sel surya berbasis silikon. 3 modul PV berbasis *monocrystalline silicon* dan 3 modul PV lainnya berbasis *polycrystalline silicon*. Peletakkan modul-modul PV serta *mounting* nya diberikan oleh gambar 4.4 (a). Gambar 4.4 (b) menunjukkan *mounting* atau kerangka yang digunakan sebagai tempat meletakkan array PV.

(a)



(b)

Gambar 4. 4 (a) Peletakkan Modul PV (b) *mounting* array PV

Modul *monocrystalline* yang digunakan merupakan produksi SunTechnics dan menghasilkan daya maksimum 230 Wp dan memiliki spesifikasi seperti pada tabel 4.1. *Solar Charge Controller* (SCC) yang digunakan berbasis MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) produksi Apollo Solar. SCC ini dapat beroperasi pada tegangan sistem 12 V, 24 V, 36 V, atau 48 V dengan arus keluaran maksimal 80 A. Spesifikasi SCC yang digunakan diberikan oleh tabel 4.2.

Tabel 4. 1 Spesifikasi Modul PV *monocrystalline silicon*

Brand	SunTechnics
Series	ENR-P 230W
Maximum Power (Pmpp)	230 W
Output Tolerance	+/- 3%
Rated Voltage (Vmpp)	30,0 V
Rated Current (Impp)	7,5 A
Open Circuit Voltage (Voc)	36,2 V
Short Circuit Current (Isc)	8,0 A
Maximum System Voltage	1000 V
Operating Temperature	-40 oC to 85 oC
Dimension	1650mm X 990mm X 50 mm
Weight	19.8 kg
Cell Type	Polycrystalline
Cell Size	156mm X 156mm
Cell Number	60

Tabel 4.1 (lanjutan)

Glass Type	Tempered
Glass Thickness	3.2mm
Encapsulant Type	EVA
Junction Box Protection Class	IP 65

*spesfikasi pada kondisi STC: Insolation 1000 W/m^2, AM 1.5, Cell T 25ºC

Tabel 4. 2 Spesifikasi SCC

Brand	Apollo Solar
Series	T80HV Turbo Charger
Maximum Output Current	80 A
Battery Voltages	12, 24, 36, or 48 VDC nominal
Max PV Input Current	70 A
Maximum PV Input Voltage	180 VDC (Voc), 160 VDC (Vmp)
Minimum PV Input Voltage	18.5 VDC for 12 V batteries
	37.1 VDC for 24 V batteries
	74.2 VDC for 48 V batteries
Maximum PV Array Power	5120 Watts for 48 V batteries
	2560 Watts for 24 V batteries
	1280 Watts for 12 V batteries
Charge Regulation Modes	Bulk, Absorption, Float, Standby, Auto, Manual
Efficiency	99% at 20 A out to 98% at 75 A out
Battery Temperature Compensation	6.0 mV per oC per 2 V cell
Operating Temperature	-40 oC to +60oC
Standby Power	Less than 2 Watts
Unit Dimensions	386mm X 216mm X 112mm
Weight	7.3 kg

Baterai yang saat ini terpasang pada sistem berjumlah satu dan memiliki kapasitas 100 Ah dengan tegangan 12 Volt. Baterai yang digunakan memiliki material *lead acid* dengan teknologi *Valve Regulated Lead Acid* atau baterai kering. Spesifikasi baterai diberikan oleh tabel 4.3. Inverter yang terpasang pada sistem adalah *off grid inverter* dengan daya keluaran maksimal 1200 VA. Inverter

mengubah listrik arus searah DC 12 Volt menjadi listrik bolak balik AC 220 Volt dengan gelombang sinus sempurna (*pure sine wave*). Spesifikasi inverter diberikan oleh tabel 4.4.

Tabel 4. 3 Spesifikasi Baterai

Brand	Kijo Battery
Model Number	JM12-100
Battery Type	Valve Regulated Lead Acid
Nominal Voltage	12 V
Nominal Capacity	100 Ah
Certificate	CE/UL/ISO9001/ISO14001/Rohs
Dimension	330mm X 171mm X 216mm
Weight	28 kg

Tabel 4. 4 Spesifikasi Inverter

Brand	Phoenix Inverter
Model Number	C 12/1200
Input Voltage Range	9,5 VDC - 17 VDC
Output Voltage	230 VAC ± 2%
Cont. Output Power at 25ºC	1200 VA
	1000 W
Peak Power	2400 W
Maximum Efficiency	92%/94%
Zero Load Power	8W/10W
Operating Temperature	-40ºC to +65ºC
Dimensions	375mm X 214mm X 110mm
Weight	10 kg
Safety	EN 60335-1, EN 60335-2-29

4.2 Analisa Performansi Aktual PLTS Teknik Fisika

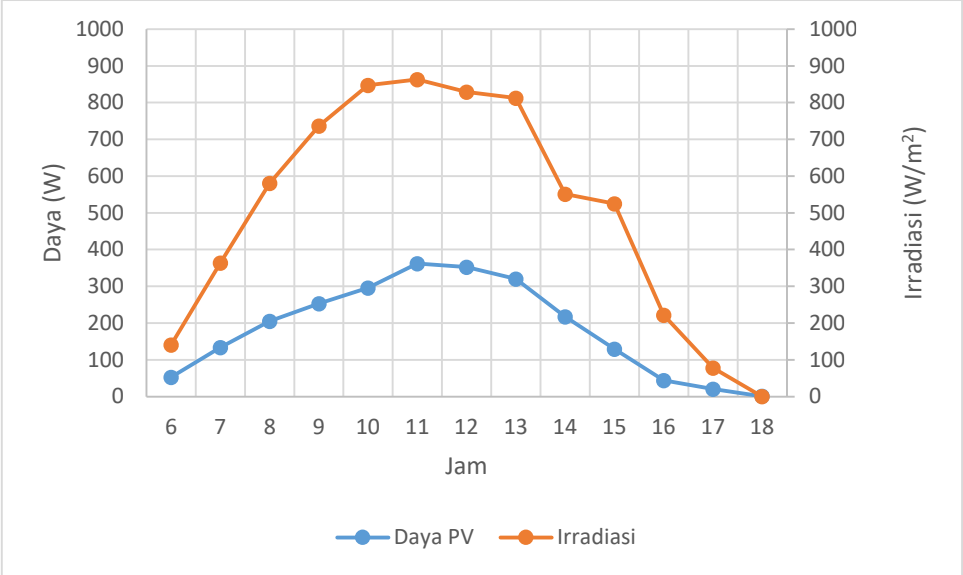
Analisa performansi aktual dilakukan berdasarkan data pengukuran yang dilakukan dari tanggal 29 April 2020 hingga 5 Mei 2020. Besaran yang diukur adalah tegangan sirkuit terbuka (Voc) array PV, arus hubungan pendek (Isc) array

PV, serta irradiasi matahari. Pengambilan data dilakukan dari pukul 06.00 hingga 18.00 dengan interval 1 jam. Data yang diperoleh pada tanggal 29 April diberikan pada tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Data 29 April

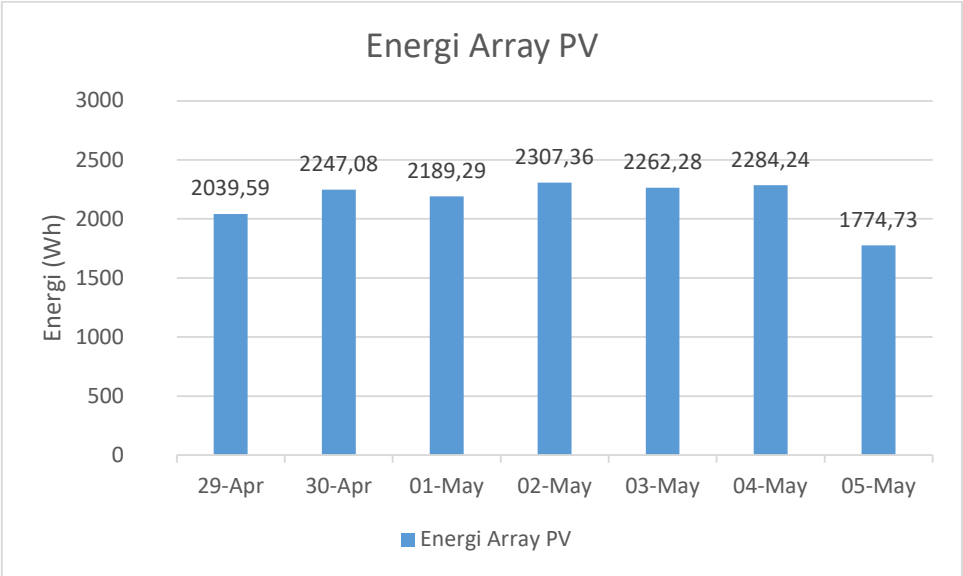
Jam	Voc (V)	Isc (A)	P (W)	Irradiasi (W/m^2)
6	30,33	1,73	52,47	140,30
7	30,45	4,4	133,98	363,40
8	30,25	6,78	205,09	580,89
9	30,8	8,23	253,48	736,31
10	31,2	9,48	295,77	847,70
11	31,88	11,36	362,15	863,29
12	31,17	11,3	352,22	828,61
13	31,65	10,12	320,29	812,50
14	29,67	7,32	217,18	551,01
15	29,95	4,32	129,38	525,30
16	28,12	1,56	43,86	221,90
17	26,52	0,77	20,42	78,03
18	25,86	0,04	1,03	0

Untuk mempermudah analisa, dari data tersebut dibuat grafik antara daya yang dihasilkan array PV dengan irradiasi matahari yang diberikan oleh gambar 4.5 yang menunjukkan bahwa pada tanggal 29 April, daya terbesar diperoleh pada pukul 11.00 dengan daya 362,16 Watt dan irradiasi tertinggi yang juga diperoleh pada pukul 11.00 sebesar 863,29 W/m^2.



Gambar 4. 5 Daya vs Irradiasi 29 April

Dari nilai daya dan irradiasi setiap jam tersebut, dapat diperoleh nilai energi yang dihasilkan dan irradiasi matahari total dalam satu hari dengan menghitung luas area dibawah kurva (integrasi). Integrasi dilakukan dengan bantuan *software* Origin sehingga nilai energi terproduksi dan irradiasi matahari total harian dari tanggal 29 April hingga 5 Mei yang diberikan oleh gambar 4.6.



Gambar 4. 6 Energi array PV terukur

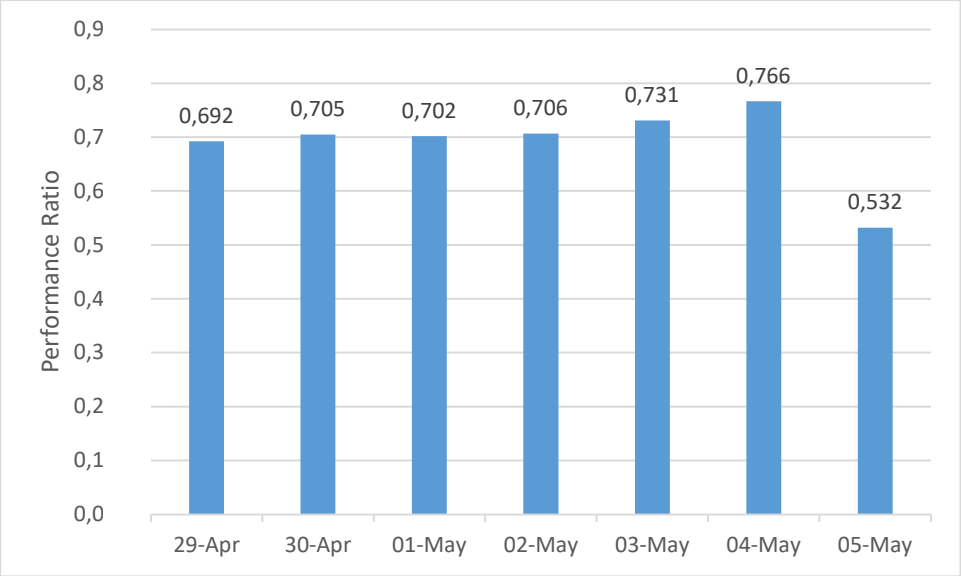
Hasil pada tabel 4.5 menunjukkan bahwa energi terbesar diproduksi pada tanggal 2 Mei dengan nilai 2307,36 Wh dan terkecil pada tanggal 5 Mei dengan nilai 1774,73 Wh. Total energi terproduksi selama durasi pengambilan data adalah 15,105 kWh. Berdasarkan nilai energi terukur, dapat dihitung koefisien performansi yakni *performance ratio* menggunakan persamaan (2.9),

$$PR = \frac{Keluaran\ energi\ aktual\ (kWh)}{Irradiasi\ Matahari\ (kWh)\ \times Luasan\ (m^2) \times Efisiensi\ sel\ (\%)} \times 100\%$$

Luasan modul PV dan efisiensi sel didapatkan dari spesifikasi modul PV yang digunakan yakni memiliki panjang 1,65 m dan lebar 0,99 m sehingga

$$Luasan = 1{,}65\ m \times 0{,}99\ m \times 2\ modul = 3{,}267\ m^2$$

dan efisiensi sel 16% maka didapatkan nilai *performance* ratio dari tanggal 29 April hingga 5 Mei diperoleh seperti pada gambar 4.7.



Gambar 4. 7 Performance Ratio 29 April sampai 5 Mei

Grafik menunjukkan performance ratio tertinggi diperoleh pada tanggal 4 Mei dengan nilai 0,766 atau 76,6% sedangkan nilai terendah diperoleh tanggal 5 Mei dengan nilai 0,532 atau 53,2%. Rata-rata performance ratio tanggal 29 April

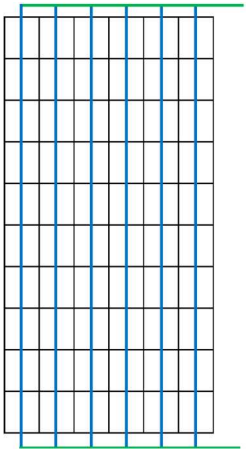
hingga 5 Mei adalah 0,691 atau 69,1%. Sistem PV dengan performa yang baik dapat memiliki performance ratio hingga 80% (Technology), dengan standar tersebut maka performa PLTS Teknik Fisika ITS dikategorikan *underperform.* Kemungkinan penyebab penurunan performa adalah ditemukannya *snail trail*, yakni perubahan warna pada permukaan modul yang bentuknya seperti garis seperti ditunjukkan pada gambar 4.8.

(a)

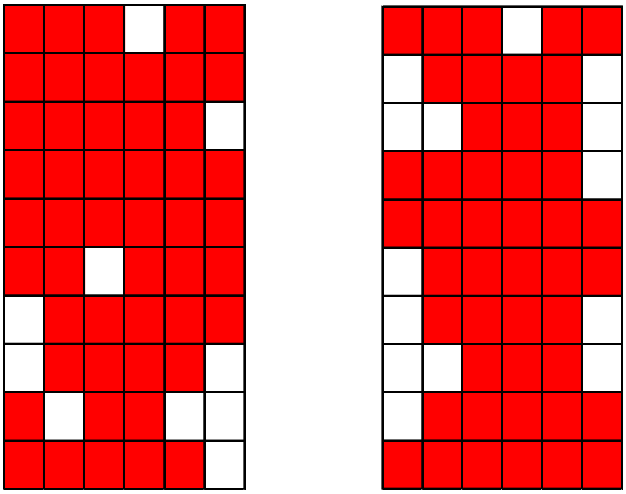
(b)

Gambar 4. 8 Snail trail pada (a) modul PV 1 (b) modul PV 2

Gambar 4.8 menunjukkan kondisi fisik modul PV 1 (a) dan modul PV 2 (b) dimana ditemukan *snail trail* pada beberapa sel PV di kedua modul PV. Modul PV 1 dan modul PV 2 memiliki spesifikasi yang identik dengan jumlah total sel yakni 60 sel PV. Susunan seri-paralel sel-sel tersebut diberikan oleh gambar 4.9. Satu sel PV digambarkan dengan garis hitam, susunan seri digambarkan dengan garis biru dan susunan paralel digambarkan dengan garis hijau. Dari 60 sel PV pada setiap modul PV, sel-sel yang mengalami *snail trail* diberikan oleh gambar 4.10.



Gambar 4. 9 Susunan Sel PV pada Modul

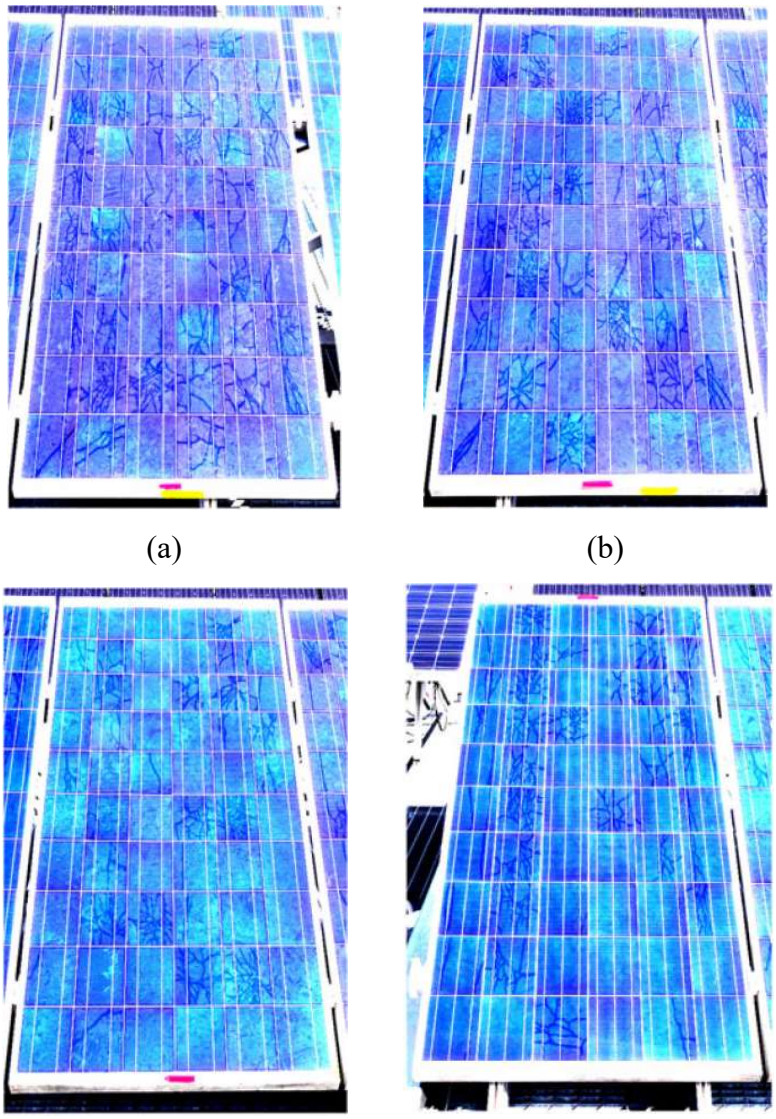


(a) (b)

Gambar 4. 10 Sel PV yang mengalami *snail trail* (a) Modul PV 1 (b)Modul PV 2

Pada gambar 4.10, sel PV yang mengalami *snail trail* digambarkan dengan kotak warna merah. Dari gambar 4.10 (a) ditemukan bahwa pada modul PV 1,

sejumlah 50 sel mengalami *snail trail* dan pada 10 sel tidak teramati adanya *snail trail*. Sedangkan gambar 4.10 (b) menunjukkan bahwa pada modul PV 2, sejumlah 46 sel mengalami *snail trail* dan pada 14 sel tidak teramati adanya *snail trail*. Pengaruh *snail trail* terhadap energi keluaran modul PV telah dilakukan pada penelitian (Dolara, 2016) yang membandingkan energi keluaran 4 modul PV yang mengalami *snail trail* dengan 1 modul PV yang tidak mengalami *snail trail* sebagai modul referensi. 4 modul PV dengan *snail trail* yang digunakan diberi kode modul PV #17, #18, #23, dan #24 juga tersusun atas 60 sel PV dengan sel yang mengalami *snail trail* diberikan oleh gambar 4.11.



(a) (b)

(c) (d)

Gambar 4. 11 *Snail trail* pada (a) modul PV #17 (b) modul PV #18 (c) modul PV #23 (d) modul PV #24 (Dolara, 2016)

Dari gambar 4.11, pada modul PV #17 sejumlah 50 sel mengalami *snail trail*, pada modul PV #18 sejumlah 39 sel mengalami *snail trail*, pada modul #23 sejumlah 31 sel mengalami *snail trail*, dan pada modul #24 sejumlah 39 sel mengalami *snail trail*. Keluaran energi dari 4 modul PV dan modul referensi tersebut diberikan oleh tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Energi keluaran modul PV (Dolara, 2016)

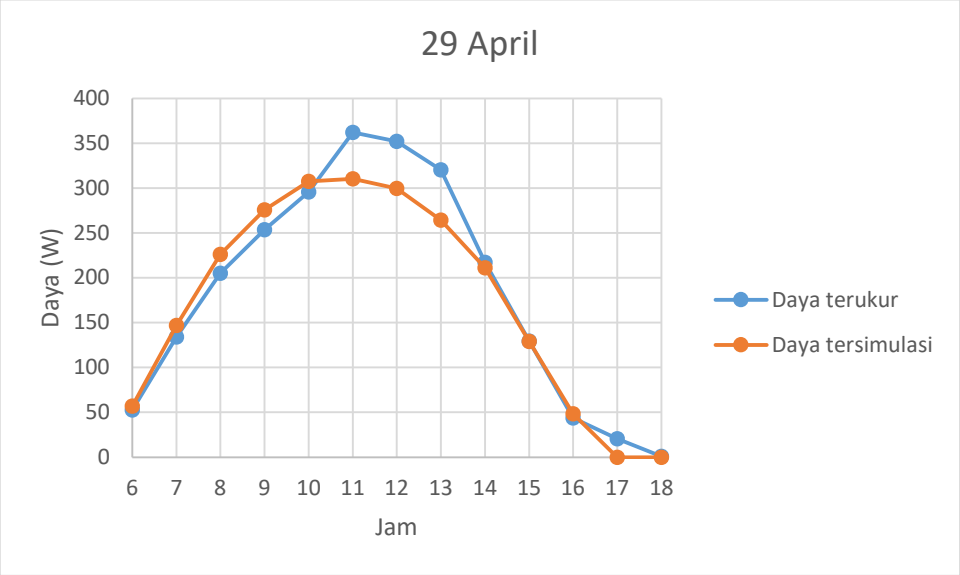
			REFPV	#17		#18		#23		#24	
Month	Number of considered days	Solar irradiance (Wh/m^2)	$Y_{f,m}$ (h)	$Y_{f,m}$ (h)	$RY_{f,m}$	$Y_{f,m}$ (h)	$RY_{f,m}$	$Y_{f,m}$ (h)	$RY_{f,m}$	$Y_{f,m}$ (h)	$RY_{f,m}$
April	9	50.11	48.47	33.82	69.8%	33.96	70.1%	38.41	79.2%	39.31	81.1%
May	25	147.79	130.66	92.94	71.1%	92.43	70.7%	103.75	79.4%	107.59	82.3%
June	14	100.52	84.15	59.93	71.2%	59.52	70.7%	66.16	78.6%	70.12	83.3%
July	13	89.66	75.28	55.27	73.4%	53.38	70.9%	59.73	79.3%	62.72	83.3%
August	19	97.96	85.85	64.41	75.0%	62.77	73.1%	68.57	79.9%	72.22	84.1%
TOTAL	80	486.05	424.42	306.37	72.2%	302.05	71.2%	336.62	79.3%	351.96	82.9%

Pada tabel 4.6, nilai Y menunjukkan *energy yield* per 1 kW (kWh/kW) dan nilai RY menunjukkan perbandingan antara *energy yield* modul PV yang ditinjau dengan *energy yield* modul PV referensi. Nilai RY dalam hal ini memiliki makna yang sama seperti *performance ratio* karena keduanya merupakan perbandingan antara *energy yield* aktual modul PV dengan *energy yield* ideal modul PV. Nilai RY pada modul PV #17, #18, #23, dan #24 berturut-turut adalah 72,2%, 71,2%, 79,3%, dan 82,9%. Nilai-nilai tersebut hampir sama dengan nilai *performance ratio* aktual yang didapatkan pada penelitian ini yaitu 69,1% dengan selisih terkecil 2,1%, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa pada PLTS Teknik Fisika ITS *snail trail* memang merupakan salah satu faktor yang menybebakan turunnya nilai *performance ratio*.

4.3 Validasi Simulasi

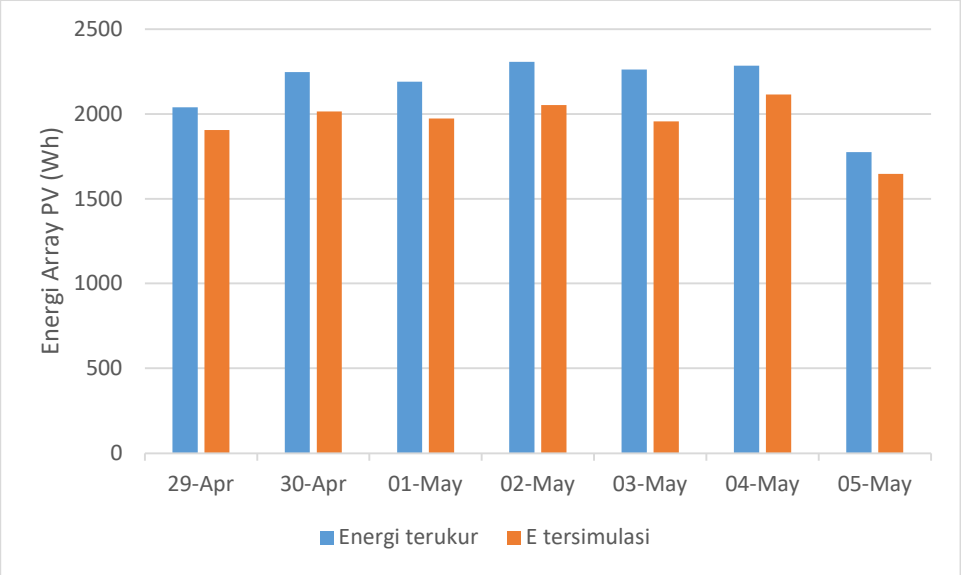
Validasi simulasi dilakukan dengan membandingkan energi keluaran array PV yang diperoleh dari hasil pengukuran dengan energi keluaran array PV hasil simulasi pada konfigurasi array modul PV yang identik yakni 2 modul PV dengan susunan paralel sesuai dengan kondisi eksisting. Data pengukuran yang digunakan sesuai dengan data yang telah dibahas pada subbab 4.2. Gambar 4.12 menunjukkan

perbandingan daya array PV hasil pengukuran dan hasil simulasi pada tanggal 29 April.



Gambar 4. 12 Daya pengukuran vs simulasi 29 April

Dari gambar 4.12 terlihat bahwa secara garis besar terdapat kesamaan pada *trend* daya array PV dari pukul 06.00 hingga 18.00, namun tetap terdapat selisih antara nilai daya array PV terukur dan tersimulasi. Untuk melakukan validasi simulasi, dilakukan perhitungan selisih antara energi array PV terukur dan tersimulasi selama satu hari. Energi yang dihasilkan selama satu hari merupakan hasil integrasi antara daya terhadap waktu, atau dapat diperoleh dari luas daerah dibawah grafik. Nilai luas daerah dibawah grafik dihitung menggunakan *tools peak analyzer* pada software *Origin.* Hasil integrasi diberikan oleh gambar 4.13.



Gambar 4. 13 Energi terukur dan energi tersimulasi

Berdasarkan hasil integrasi kurva, didapatkan energi terukur adalah 2039,59 Wh dan energi tersimulasi adalah 1904,75 Wh. Metode yang sama dilakukan untuk mencari energi keluaran untuk tanggal 29 April hingga 5 Mei 2020 dan didapatkan hasil seperti pada tabel 4.7.

Tabel 4. 7 Perbandingan Energi Terukur dan Energi Tersimulasi

Tanggal	Energi terukur (Wh)	Energi tersimulasi (Wh)	Selisih (%)
29-Apr	2039,58	1904,75	6,61
30-Apr	2247,08	2014,87	10,33
01-May	2189,28	1972,15	9,91
02-May	2307,36	2051,88	11,07
03-May	2262,27	1955,20	13,57
04-May	2284,24	2114,76	7,41
05-May	1774,72	1646,71	7,21
Selisih rata-rata			9,44

Pada tabel 4.7, terdapat perbedaan antara nilai energi terukur dan energi tersimulasi yang dinyatakan dengan nilai selisih. Nilai selisih bervariasi dari yang terkecil bernilai 6,61% pada tanggal 29 April hingga yang terbesar bernilai 13,57%

pada tanggal 3 Mei sehingga didapatkan nilai selisih rata-rata antara energi terukur dan tersimulasi adalah 9,44%.

4.4 Parameter Input Simulasi

Pada penelitian ini, dilakukan studi untuk mengetahui konfigurasi array modul PV dan profil pembebanan yang akan memberikan performa terbaik pada PLTS Teknik Fisika ITS. PLTS ini tersusun atas 6 modul surya, sehingga konfigurasi yang dapat divariasikan berjumlah total 4 variasi yakni 1 seri 6 string paralel (1x6), 2 seri 3 string paralel (2x3), 3 seri 2 string paralel (3x2), dan 6 seri 1 string paralel (6x1). Namun, konfigurasi 6x1 tidak dapat dilakukan karena pada konfigurasi tersebut tegangan keluaran array pada daya maksimal (Vmp) akan bernilai 180 VDC dan nilai tersebut melebihi spesifikasi tegangan maksimal masukan SCC yakni 160 VDC sehingga total menjadi 3 variasi.

Variasi profil pembebanan yang divariasikan menggunakan dua metode yakni konsumsi daya beban (*amplitude modulation*) dan waktu serta durasi pemakaian beban (*time shifting*) (Treado, The effect of electric load profiles on the performance of off-grid residential hybrid renewable energy systems, 2015). Konsumsi daya beban divariasikan 100 Watt dan 200 Watt. Waktu pemakaian beban divariasikan pukul 18.00 hingga 06.00 (12 jam malam), 06.00 hingga 18.00 (12 jam siang), kemudian 21.00 hingga 03.00 dan 09.00 hingga 15.00 (6 jam malam dan 6 jam siang). Kombinasi variasi yang telah disampaikan diberikan oleh tabel 4.8.

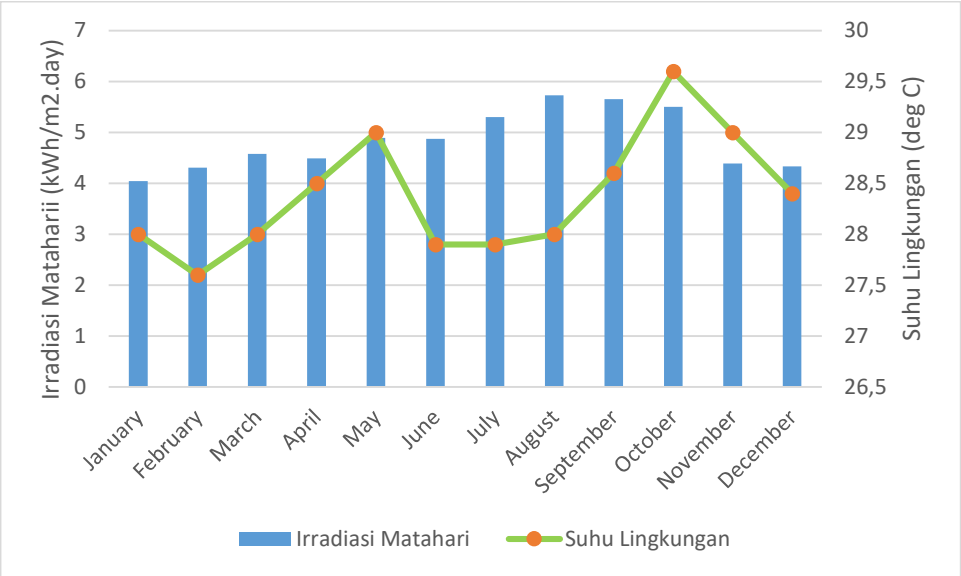
Tabel 4. 8 Matriks Variasi Simulasi

Variasi	Kode	Array	Beban (W)	Waktu	Durasi (h)	Energi (Wh)
0	VC0	1x6	100	18.00-06.00	12	1200
1	VC1			06.00-18.00		
2	VC2			09.00-15.00;21.00-03.00		
3	VC3		200	18.00-06.00	12	2400
4	VC4			06.00-18.00		
5	VC5			09.00-15.00;21.00-03.00		
6	VC6	2x3	100	18.00-06.00	12	1200
7	VC7			06.00-18.00		
8	VC8			09.00-15.00;21.00-03.00		

Tabel 4.8 (lanjutan)

9	VC9	2x3	200	18.00-06.00	12	2400
10	VCA			06.00-18.00		
11	VCB			09.00-15.00;21.00-03.00		
12	VCC	3x2	100	18.00-06.00	12	1200
13	VCD			06.00-18.00		
14	VCE			09.00-15.00;21.00-03.00		
15	VCF		200	18.00-06.00	12	2400
16	VCG			06.00-18.00		
17	VCH			09.00-15.00;21.00-03.00		

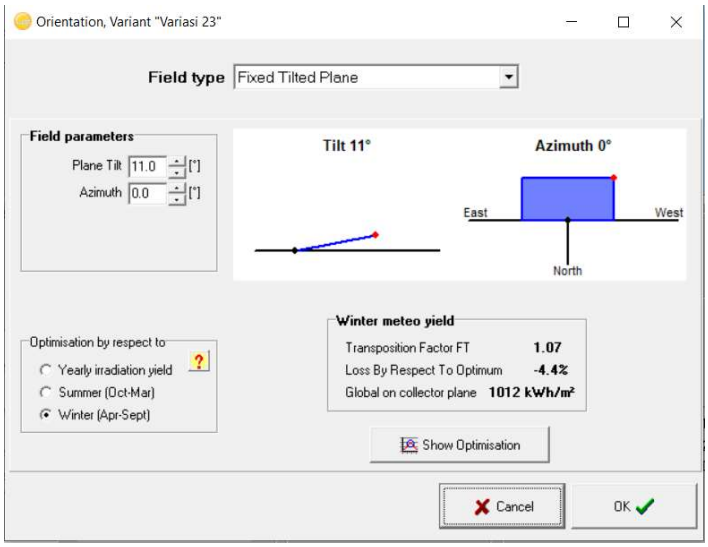
Parameter input simulasi pertama yakni koordinat lokasi *site* yang akan disimulasikan. Koordinat yang diberikan pada simulasi yakni koordinat Kota Surabaya yakni 7,26° Lintang Selatan dan 112,75° Bujur Timur. Informasi ini menentukan irradiasi matahari, suhu lingkungan, serta kecepatan angin yang akan menjadi input simulasi. Data-data tersebut diambil dari database yakni Meteonorm versi 7.1 dan dihasilkan data lingkungan untuk interval setiap jam, setiap hari, dan setiap bulan selama satu tahun. Data lingkungan rata-rata setiap bulan diberikan oleh gambar 4.14.



Gambar 4. 14 Data Lingkungan Input Simulasi

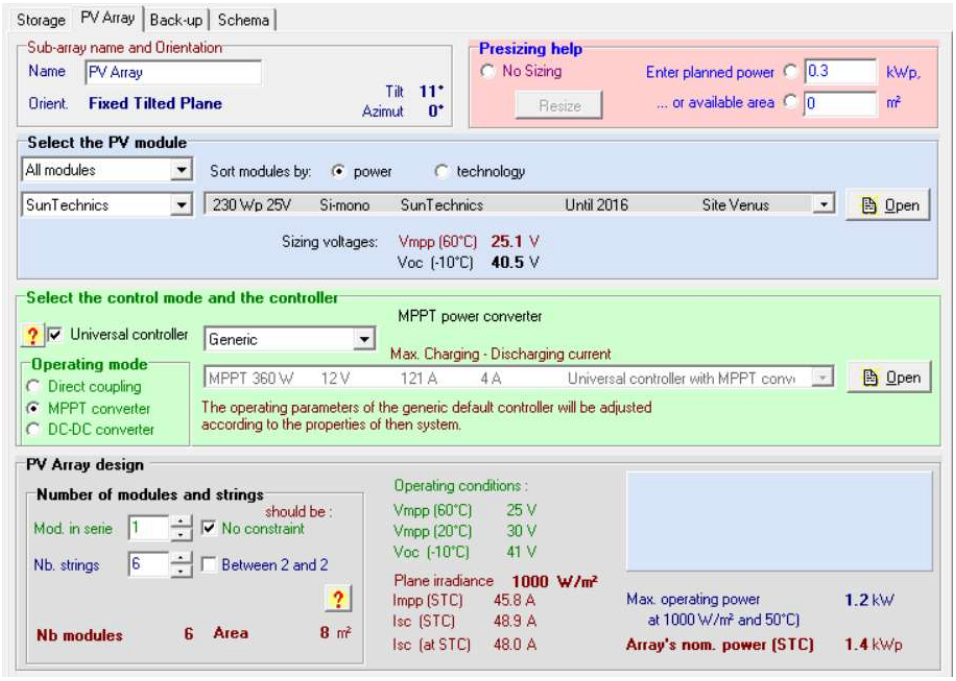
Gambar 4.14 menunjukkan irradiasi (balok biru) dan suhu lingkungan (garis hijau) selama satu tahun yang menjadi input pada simulasi. Dari grafik dapat dilihat

bahwa untuk lokasi *site*, irradiasi maksimum diperolah pada bulan Agustus dengan nilai rata rata irradiasi 5,73 kWh/m^2 per hari dan irradiasi minimum diperoleh pada bulan Januari dengan nilai rata-rata irradiasi 4,04 kWh/m^2 per hari. Irradiasi total selama satu tahun hasil simulasi adalah 1700,3 kWh/m^2. Orientasi array PV didefinisikan sesuai dengan denah yang telah dibuat dengan array PV menghadap ke arah utara dan kemiringan modul 11^o seperti pada gambar 4.15.



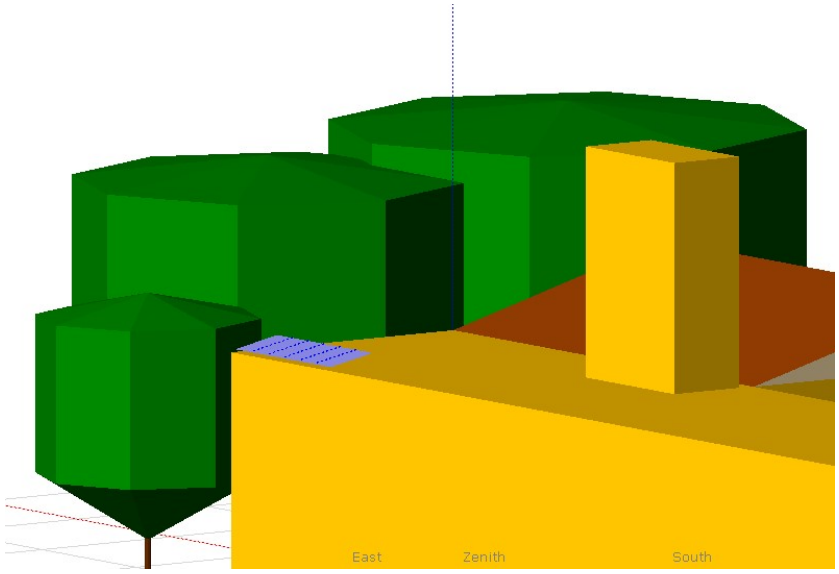
Gambar 4. 15 Orientasi array PV

Pemberian profil beban (*load*) kepada sistem sesuai dengan variasi konsumsi daya dan waktu pemakaian pada matriks variasi simulasi. Dilakukan pendefinisian komponen komponen yang digunakan pada PLTS *off grid* yakni modul PV, SCC, dan baterai. Untuk modul PV didefinisikan spesifikasi modul yang digunakan dan konfigurasi antar modul (seri atau paralel) sehingga terbentuk array sesuai dengan matrix variasi simulasi seperti pada gambar 4.16.



Gambar 4. 16 Pendefinisian Konfigurasi Array PV

Module in series merupakan jumlah modul yang disusun secara seri. *Number of strings* menunjukkan jumlah susunan paralel pada array. Kemudian pada simulasi diperhitungkan pula efek *shading* dari lingkungan sekitar, untuk itu dilakukan penggambaran 3 dimensi untuk lingkungan sekitar array PV pada simulasi yang diberikan oleh gambar 4.17.



(a)

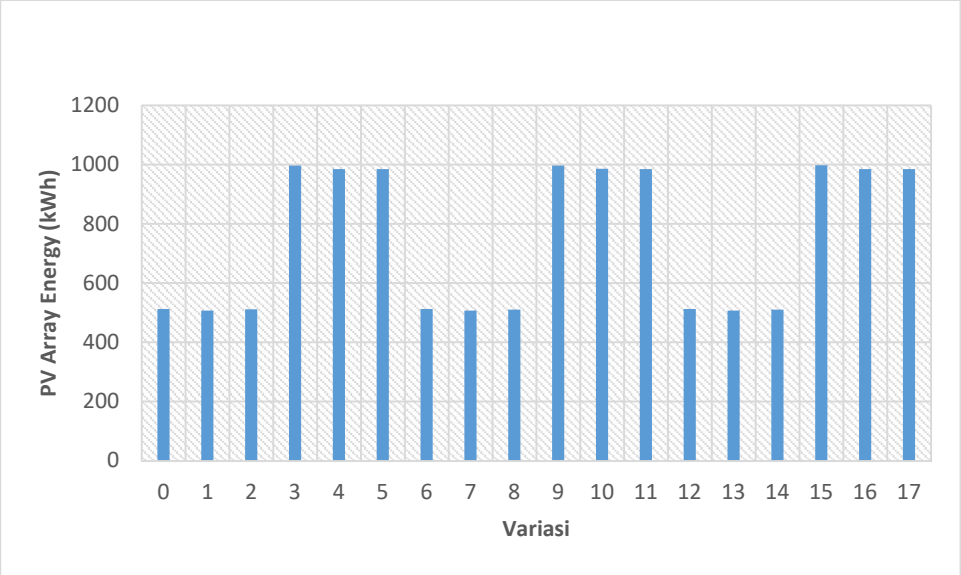
(b)

Gambar 4. 17 (a) Gambar 3D lingkungan (b) Tampak lingkungan asli

Pada gambar 4.17 (a) kode warna biru menunjukkan permukaan array PV, warna hijau menunjukkan pepohonan yang terletak pada sisi timur array PV, dan wana kuning menunjukkan tangki air yang berada di barat array PV. Dimensi dan orientasi gambar pada simulasi disesuaikan dengan kondisi nyata pada gambar 4.15 (b). Efek *shading* disimulasikan sehingga didapatkan *loss* akibat *shading* untuk setiap sudut *altitude* (ketinggian) dan *azimuth* (arah horizontal) yang berkorelasi dengan posisi matahari di langit.

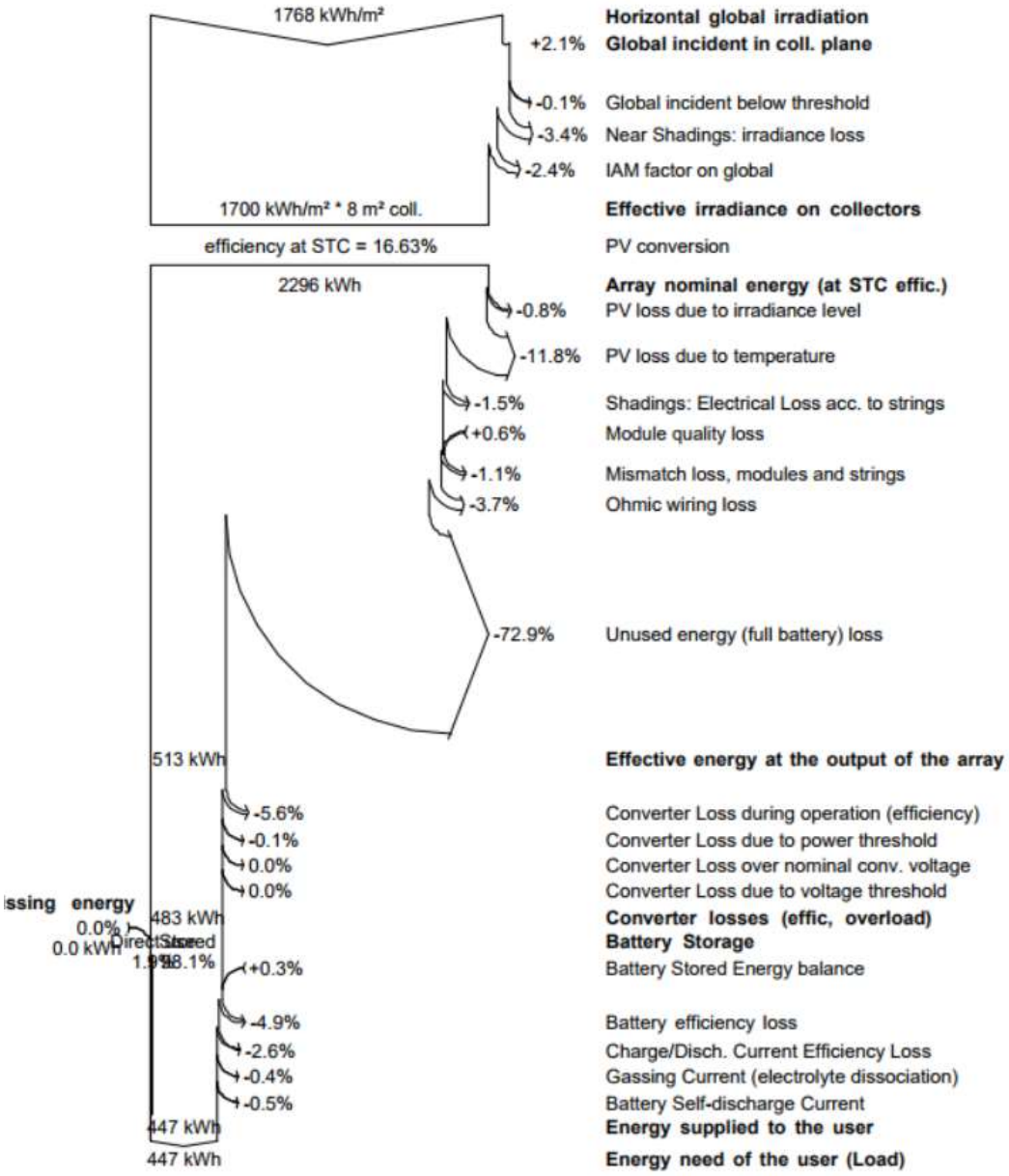
4.5 Analisa Performansi Dengan Variasi Profil Pembebanan

Sistem disimulasikan sehingga didapatkan data produksi sistem selama satu tahun. Energi total yang dihasilkan oleh array PV selama satu tahun untuk setiap variasi diberikan oleh grafik pada gambar 4.16. Dari gambar 4.18 dapat dilihat perbedaan antara energi yang dihasilkan array PV untuk beban yang berbeda dimana secara keseluruhan, sistem yang memenuhi beban 200 Watt menghasilkan energi yang lebih besar daripada pembebanan 100 Watt. Pada pembebanan 100 Watt rata-rata energi yang dihasilkan adalah sebesar 509,87 kWh sedangkan pada pembebanan 200 Watt energi yang dihasilkan rata-rata sebesar 988,77 kWh.



Gambar 4. 18 Energi efektif array PV

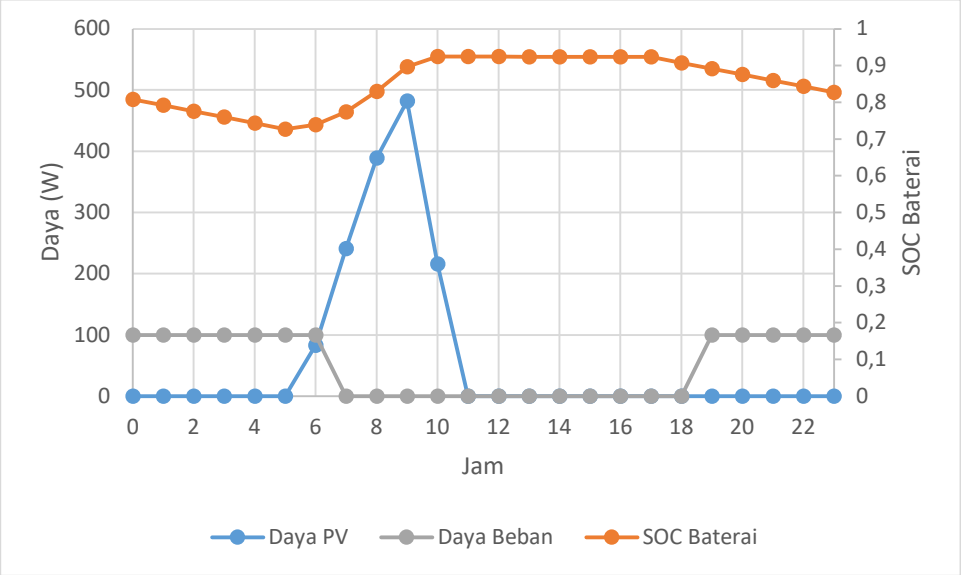
Namun, energi yang dihasilkan array tidak dapat menjadi gambaran performa sistem karena tidak seluruh energi yang dihasilkan array tersampaikan ke beban. Aliran energi dari energi matahari yang diterima hingga energi listrik yang tersampaikan ke beban pada variasi 0 diberikan oleh *energy loss diagram* pada gambar 4.19.



Gambar 4. 19 *Energy Loss Diagram*

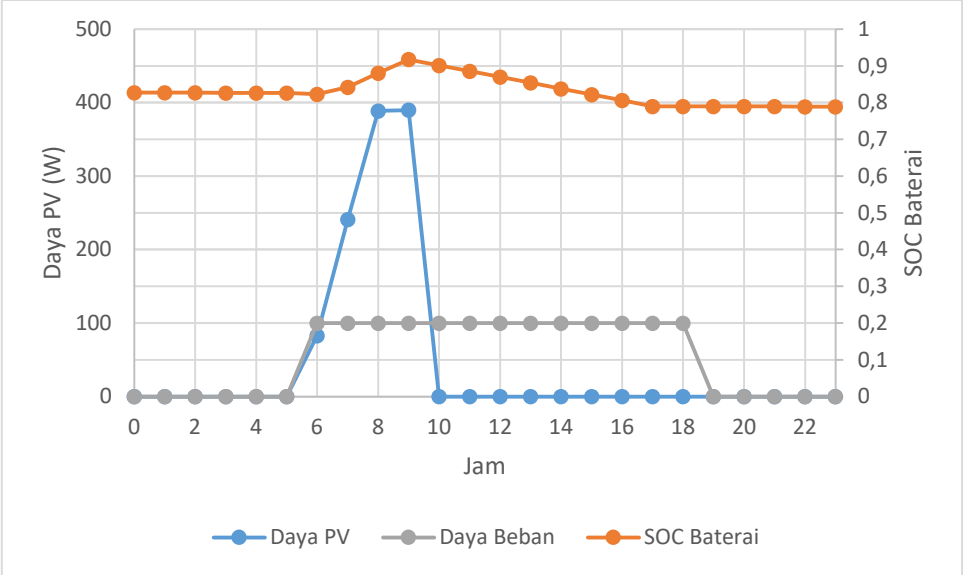
Pada gambar 4.20 didapatkan bahwa array PV pada STC (*Standard Test Condition*) menghasilkan energi 2296 kWh namun karena *loss* dari *shading*, *wiring*, dan efek suhu maka array PV menghasilkan energi 1863,8 kWh. Namun energi sebenarnya yang berada pada *output* array dan tersimpan ke baterai hanya 513 kWh sampai pada akhirnya digunakan oleh beban 447 kWh. Sebesar 72,9% energi yang dihasilkan menjadi *full battery loss*, yakni keadaan dimana array PV masih

menghasilkan energi sedangkan kondisi baterai sudah penuh sehingga energi tersebut terbuang (*unused*). Kondisi ini dapat dilihat pada gambar 4.21.



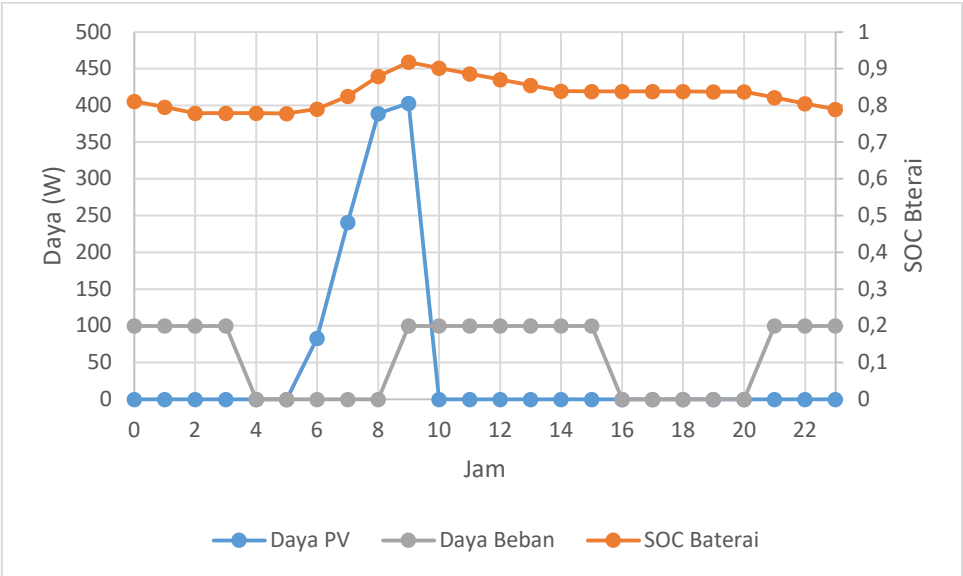
Gambar 4. 20 Grafik Pembebanan 100 W 12 jam malam

Gambar 4.20 menunjukkan hubungan antara daya masuk dari PV dengan SOC baterai dan konsumsi daya oleh beban pada profil pembebanan 100 Watt selama 12 jam malam hari. Grafik menunjukkan daya PV mulai terproduksi pukul 06.00 dan mengalami puncak pada pukul 09.00 dengan daya 482 Watt. Kemudian pukul 10.00 baterai penuh dan berada pada SOC 92,45% sehingga menyebabkan daya dari PV menurun hingga menjadi 0 dan tidak memproduksi lagi meskipun matahari masih menyinari modul PV hingga sore hari. Ketika beban digunakan pada pukul 18.00 SOC baterai mulai menurun hingga mencapai SOC terendah yakni 72,66% pada pukul 05.00 sebelum pada pukul 06.00 daya dari PV kembali mengisi baterai. Pada pemberian profil beban 100 Watt selama 12 jam siang hari yang diberikan oleh gambar 4.21, konsumsi daya beban berada pada waktu yang bersamaan dengan produksi energi dari PV sehingga ketika energi dari baterai digunakan oleh beban, baterai juga menerima energi dari PV yang menyebabkan SOC baterai turun hanya sampai nilai 78,9%.



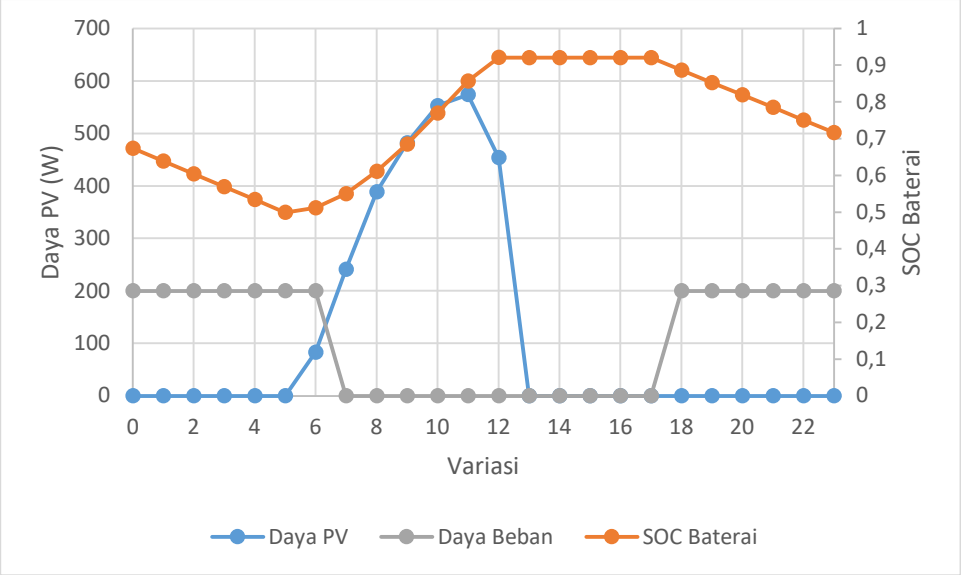
Gambar 4. 21 Grafik Pembebanan 100 W 12 Jam Siang

Pada profil pembebanan 100 Watt 6 jam siang dan 6 jam malam hari diperoleh SOC terendah berada pukul 05.00 yakni pada 77,83%. Nilai ini lebih tinggi dari SOC untuk profil pembebanan 100 Watt 12 jam malam pada waktu yang sama yakni 72,66% dan ditunjukkan oleh gambar 4.22.

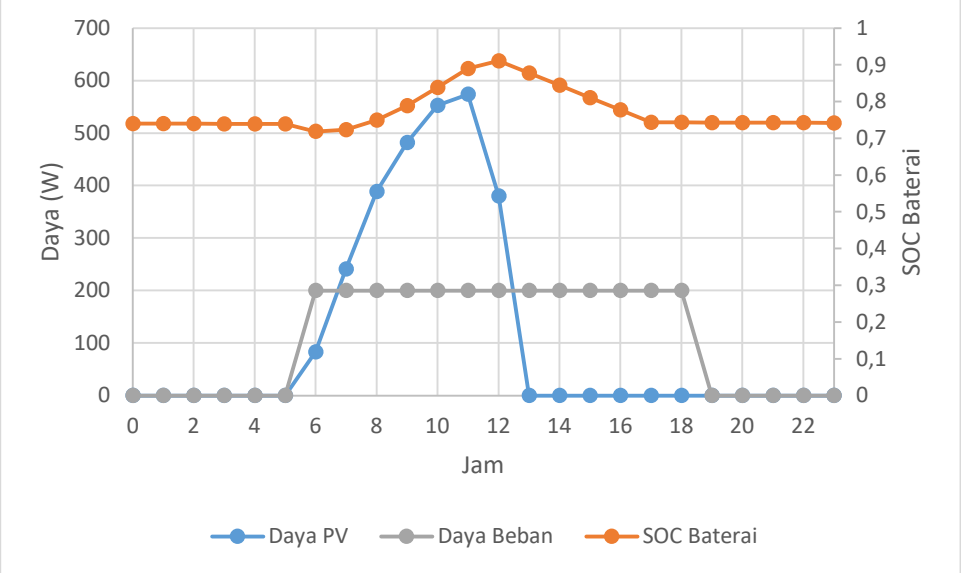


Gambar 4. 22 Grafik Pembebanan 100 W 6 Jam Siang dan 6 Jam Malam

Nilai SOC pada profil pembebanan 200 Watt 12 jam malam memiliki perbedaan jelas dengan beban 100 Watt yakni pada SOC terendahnya yakni 49,95% sedangkan SOC tertinggi berada pada nilai 92,02% dan diberikan oleh gambar 4.23. Profil pembebanan 200 Watt 12 jam siang memiliki SOC terendah 71,87% dan SOC tertinggi berada pada 91,12% dan diberikan oleh gambar 4.24.

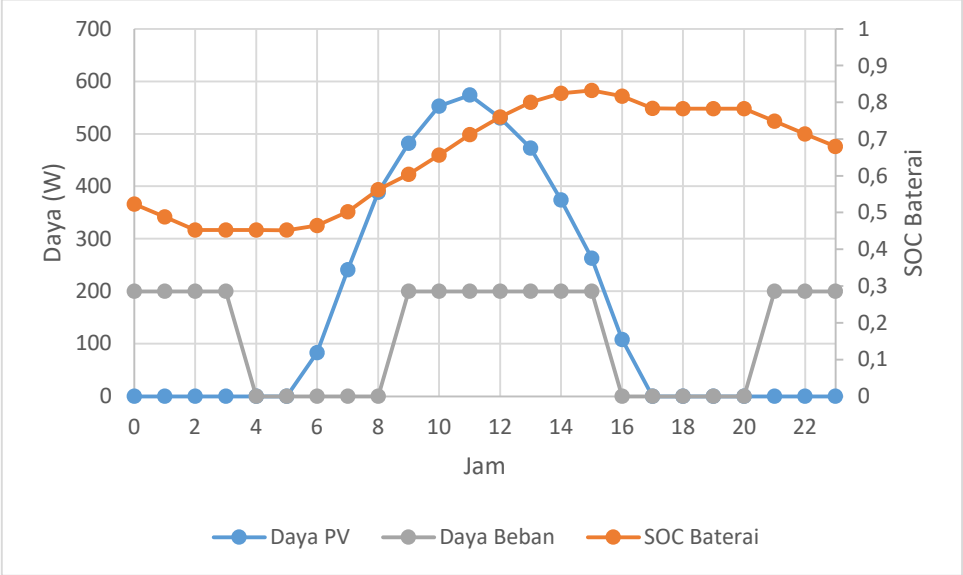


Gambar 4. 23 Grafik Pembebanan 200 W 12 Jam Malam



Gambar 4. 24 Grafik Pembebanan 200 W 12 Jam Siang

Pada profil pembebanan terakhir yakni 200 Watt selama 6 jam siang dan 6 jam didapatkan bahwa array PV menghasilkan energi dari pukul 06.00 hingga 16.00, lebih lama dari profil pembebanan lainnya, namun SOC terendah didapatkan lebih rendah dibandingkan profil pembebanan lain yakni 45,21% dan SOC tertinggi hanya pada nilai 83,25% seperti pada gambar 4.25. Perbandingan SOC tertinggi dan terendah untuk variasi profil pembebanan secara lengkap diberikan oleh tabel 4.9.



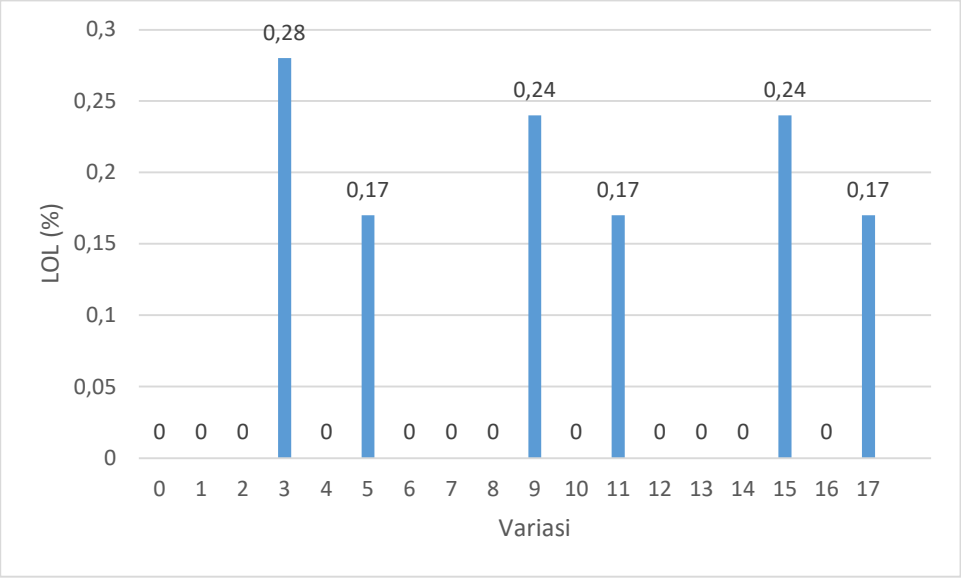
Gambar 4. 25 Grafik Pembebanan 200 W 6 Jam Siang dan Malam

Tabel 4. 9 Perbandingan SOC Baterai

Profil Pembebanan	SOC Min	SOC Max
100 Watt 12 Jam Malam	72,66%	92,45%
100 Watt 12 Jam Siang	78,90%	91,76%
100 Watt 6 Jam Siang dan Malam	77,83%	91,79%
200 Watt 12 Jam Malam	49,95%	92,02%
200 Watt 12 Jam Siang	71,87%	91,12%
200 Watt 6 Jam Siang dan Malam	45,21%	83,25%

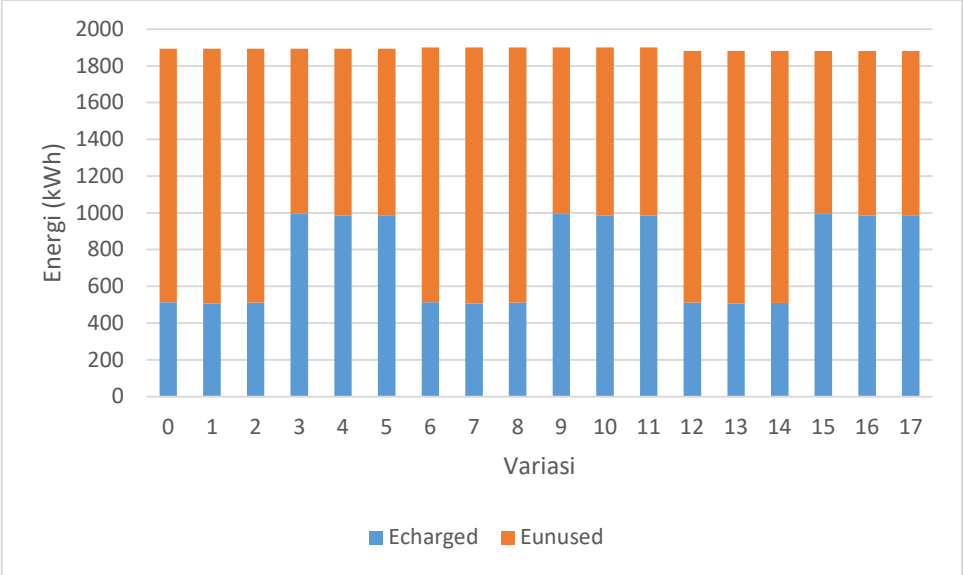
Baterai yang digunakan memiliki *depth of discharge* (DOD) 60%, hal ini menyebabkan SCC memutus aliran listrik ke beban ketika SOC baterai mencapai

atau berada dibawah 40% untuk menghindari *undercharging* (PVsyst) sehingga kebutuhan beban tidak terpenuhi (*loss of load*) yang dinyatakan dalam satuan jam. Perbandingan antara kebutuhan beban yang tidak terpenuhi dengan kebutuhan beban total disebut dengan *loss of load probability* (LOL Pr), dapat menunjukkan kemungkinan sistem tidak mampu memenuhi bebannya. Nilai LOL Pr untuk setiap variasi selama satu tahun operasi diberikan oleh gambar 4.26.



Gambar 4. 26 LOL Probability

Dari gambar 4.24 didapatkan bahwa untuk semua profil pembebanan 100 Watt, LOL Pr bernilai 0% atau seluruh kebutuhan beban dapat terpenuhi oleh sistem. LOL Pr bernilai 0% juga ditemukan pada profil pembebanan 200 Watt 12 jam siang hari yakni variasi 4, 10, dan 16. Sedangkan LOL Pr tertinggi dimiliki oleh variasi 3 dengan nilai 0,28%. Sedangkan pada SOC maksimum, SCC juga akan memutus aliran listrik ke baterai untuk menghindari *overcharging* sehingga dalam kondisi ini energi listrik yang dihasilkan oleh array PV pun terbuang. Perbandingan antara energi yang dihasilkan PV, energi yang dialirkan ke baterai, dan terbuang diberikan oleh diagram balok pada gambar 4.27.



Gambar 4. 27 Perbandingan energi tersalurkan ke baterai dan energi terbuang

Pada gambar 4.25 keseluruhan balok merupakan energi yang dihasilkan array PV, balok berwarna biru adalah energi yang teralirkan ke baterai dan balok berwarna oranye menunjukkan energi yang terbuang karena baterai telah penuh. Dari diagram terlihat bahwa energi yang tersampaikan ke baterai pada profil pembebanan 200 Watt selalu lebih besar daripada energi yang tersampaikan ke baterai pada profil pembebanan 100 Watt dimana energi teralirkan ke baterai terbesar diperoleh pada variasi 15 yakni pada profil pembebanan 200 Watt dengan pemakaian 12 jam malam hari. Energi teralirkan ke baterai terkecil diperoleh pada variasi 0 yakni pada profil pembebanan 100 Watt dengan pemakaian 12 jam malam hari.

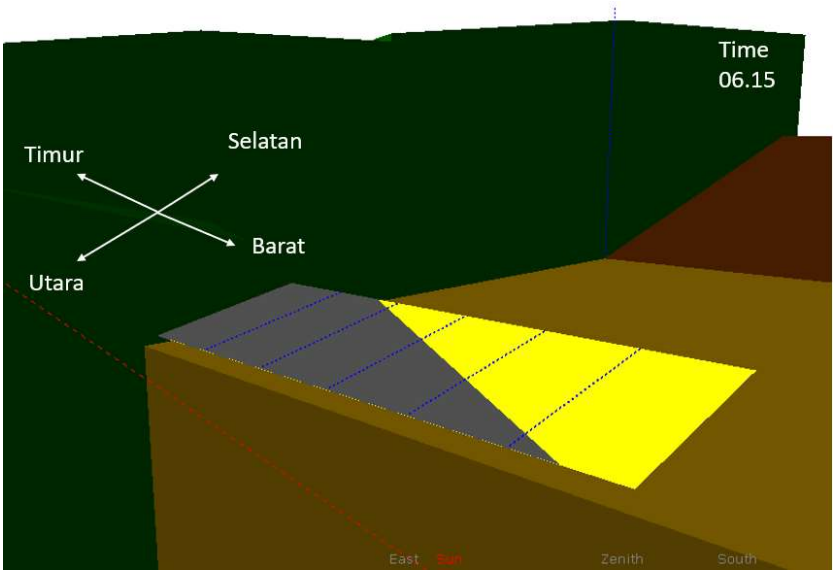
4.6 Analisa Performansi Dengan Variasi Konfigurasi Array Modul PV

Karena energi efektif yang dihasilkan array tergantung pada beban dan SOC baterai, maka gambar 4.16 tidak dapat digunakan sebagai perbandingan untuk mengetahui pengaruh konfigurasi array modul PV terhadap energi yang dihasilkan. Pengaruh konfigurasi array modul PV terhadap performa sistem dapat diketahui dari nilai *loss* yang ada pada setiap konfigurasi. *Loss* yang berasal dari konfigurasi yakni efek *partial shading* dan *ohmic wiring loss*. *Loss* akibat *partial shading* untuk masing-masing konfigurasi diberikan oleh tabel 4.10.

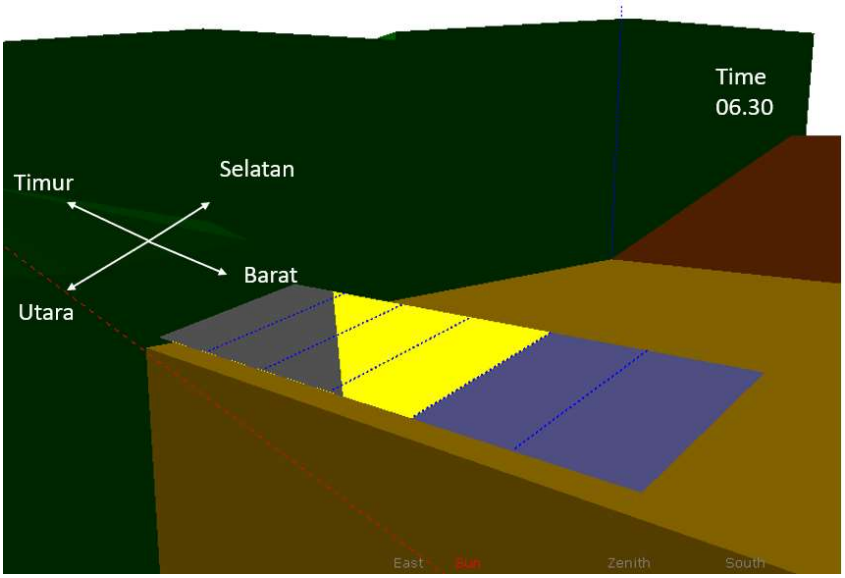
Tabel 4. 10 *Loss* akibat *shading*

Array		Shading Irradiance loss	Shading String Loss
Series	String		
1	6	-3,40%	-1,50%
2	3	-3,40%	-2,50%
3	2	-3,40%	-4%

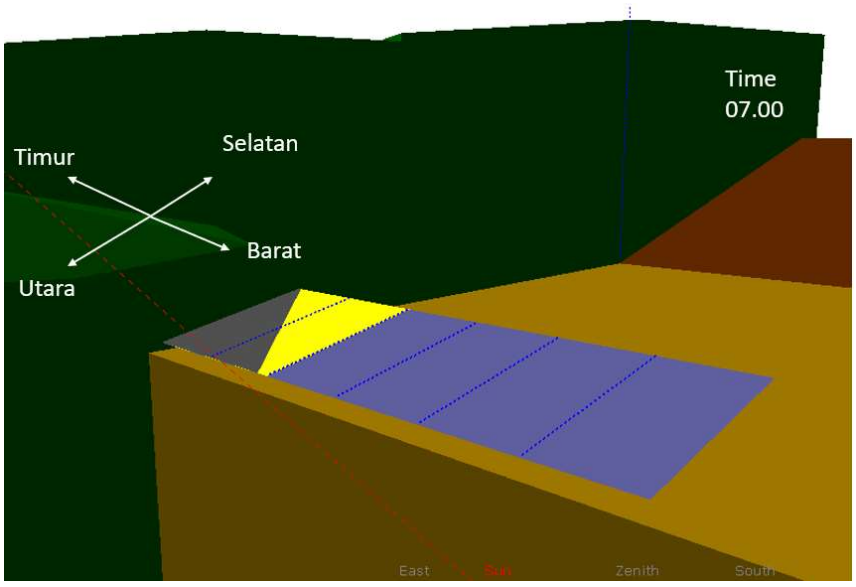
Tabel 4.10 menunjukkan dua jenis *shading* yang menjadi penyebab *loss*. Dapat dilihat bahwa *shading irradiance loss* untuk semua variasi berada pada nilai yang sama yakni 3,4%, namun pada *shading string loss* (SSL) diperoleh nilai yang berbeda dimana pada konfigurasi 1x6 didapatkan nilai SSL 1,5%, konfigurasi 2x3 bernilai 2,5%, dan konfigurasi 3x2 sebesar 4%. Berdasarkan hasil simulasi, didapatkan ada dua objek yang menjadi penyebab *shading*, yakni pepohonan yang berada di sebelah timur array PV dan tangki air yang berada di sebelah barat array PV. Pepohonan memberikan *shading* pada pagi hari yakni dari pukul 06.00 hingga *shading* sepenuhnya hilang pada pukul 10.15 seperti yang ditunjukkan gambar 4.28.



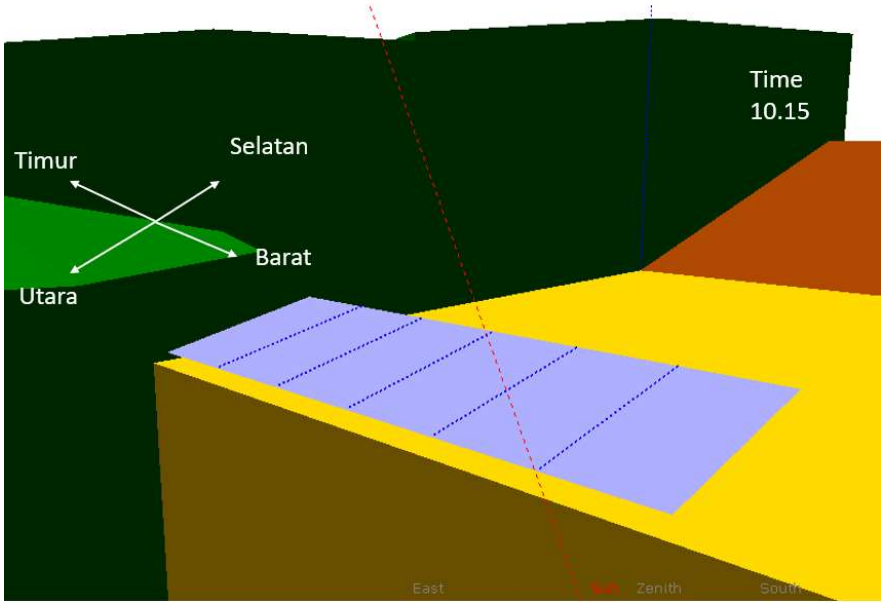
(a)


Time
06.30
Timur
Selatan
Barat
Utara
East
Sun
Zenith
South

(b)


Time
07.00
Timur
Selatan
Barat
Utara
East
Sun
Zenith
South

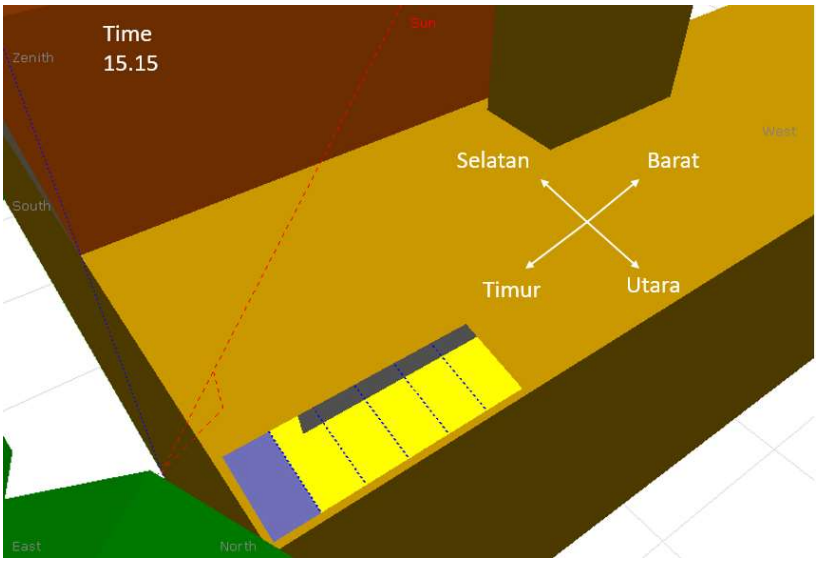
(c)



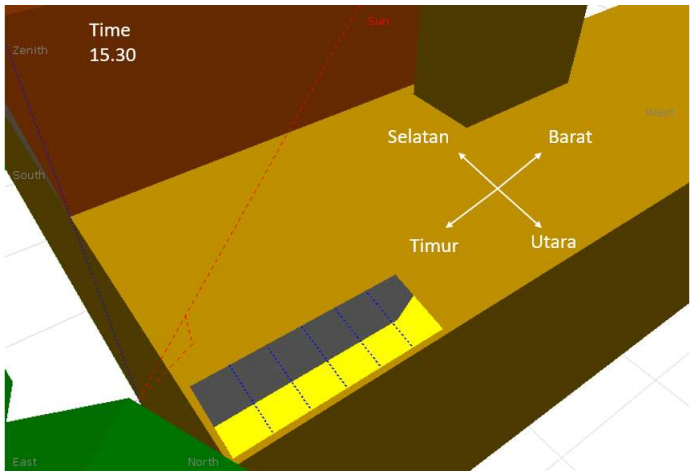
(d)

Gambar 4. 28 Shading akibat pepohonan pada pukul (a) 06.15 (b) 06.30 (c) 07.00 (d) 10.15

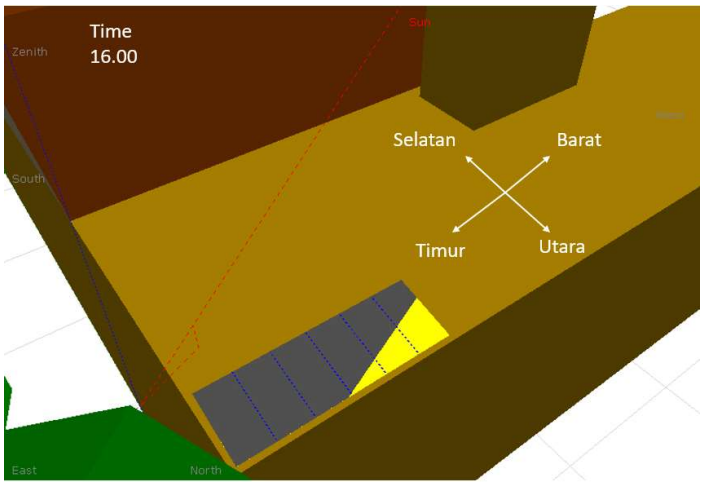
Shading akibat pepohonan terjadi sepanjang tahun, namun *shading* akibat tangki air hanya terjadi ketika matahari sedang mengalami deklinasi ke arah selatan saja yakni pada bulan September hingga Maret. *Shading* akibat tangki air terjadi pada sore hari mulai pukul 15.15 hingga *shading* pada seluruh area array pada pukul 17.30 seperti yang ditunjukkan gambar 4.29.



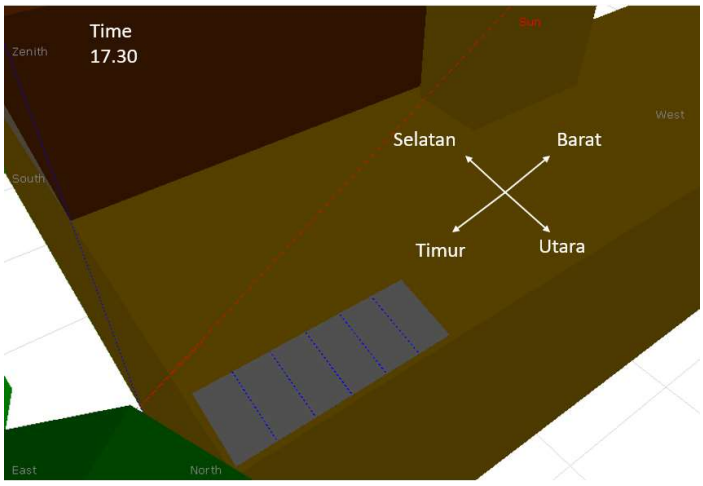
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 4. 29 Shading akibat tangki air pada pukul (a) 15.15 (b) 15.30 (c) 16.00 (d) 17.30

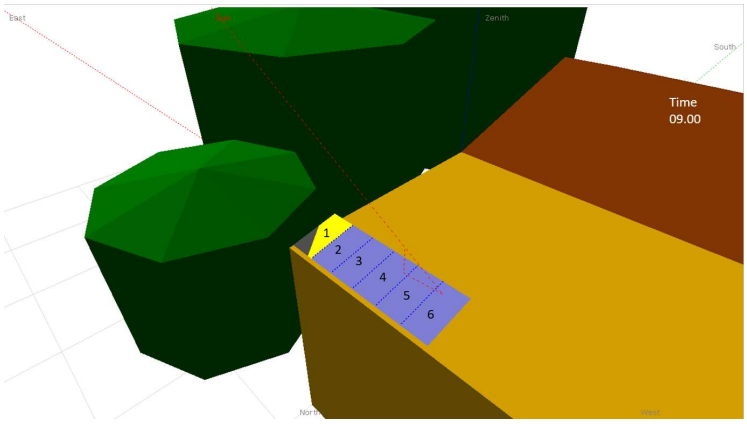
Hubungan matematis antara *shading factor* array PV dengan daya yang dihasilkan diberikan oleh penelitian (Qasim, 2017) pada persamaan (4.1)

$$SF = \left[1 - \frac{P_{shade}}{P_{sys}}\right] \times \frac{A_{sys}}{A_{shade}} \quad \text{.....(4.1)}$$

Dimana SF adalah *shading* factor, P_{sys} dan A_{sys} adalah daya nominal sistem dan luas permukaan total array PV, A_{shade} adalah luas permukaan yang terkena *shading* dan P_{shade} adalah daya yang terproduksi pada kondisi *shading* tersebut. Berdasarkan persamaan (4.1) maka daya yang dihasilkan PV dengan pengaruh *shading* diberikan oleh persamaan (4.2).

$$P_{shad} = \left[1 - SF \times \frac{A_{shade}}{A_{sys}}\right] \times P_{sys} \quad \text{.....(4.2)}$$

Pada konfigurasi array PV 1x6, 6 modul PV masing-masing disusun secara paralel satu sama lain hingga menghasilkan 6 string. Pada desain, 1 string dibedakan dengan garis putus-putus. Ketika 1 string mengalami *shading* (dilambangkan dengan warna abu-abu), string tersebut akan mengalami penurunan performa (pada gambar dilambangkan dengan warna kuning). Pada konfigurasi 1x6, karena setiap modul tersusun secara paralel satu sama lain maka *shading* pada modul 1 tidak akan mempengaruhi string lain seperti pada gambar 4.30. Hal ini dapat terlihat pada nilai *shading factor* yang dialami oleh seluruh permukaan array PV yang diberikan oleh tabel 4.11.

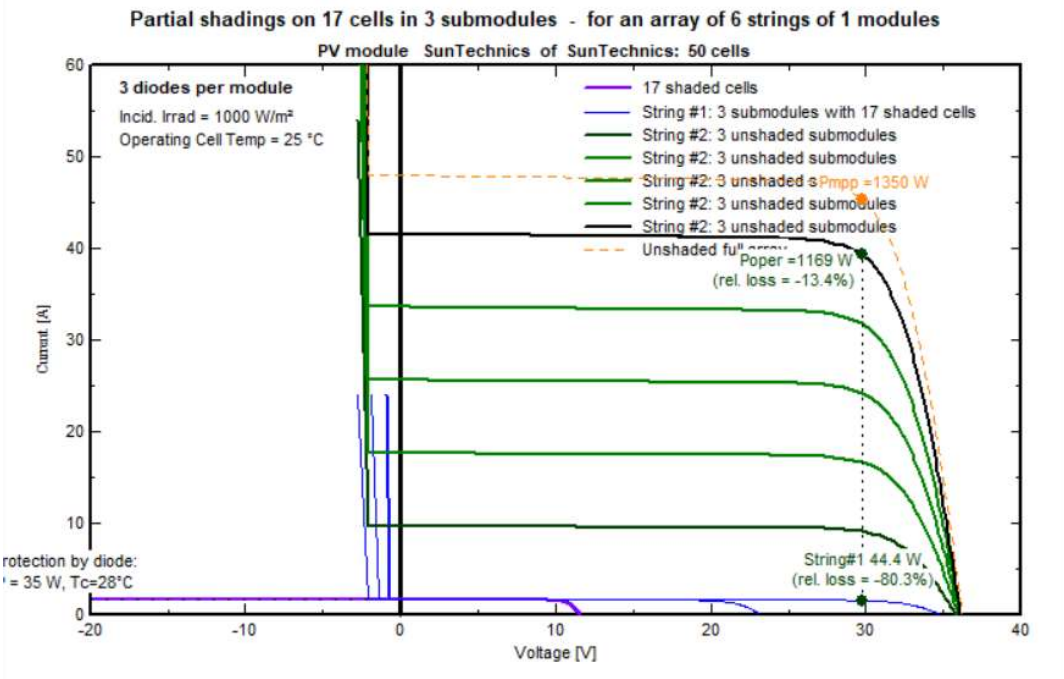


Gambar 4. 30 Pengaruh shading pada array 1x6

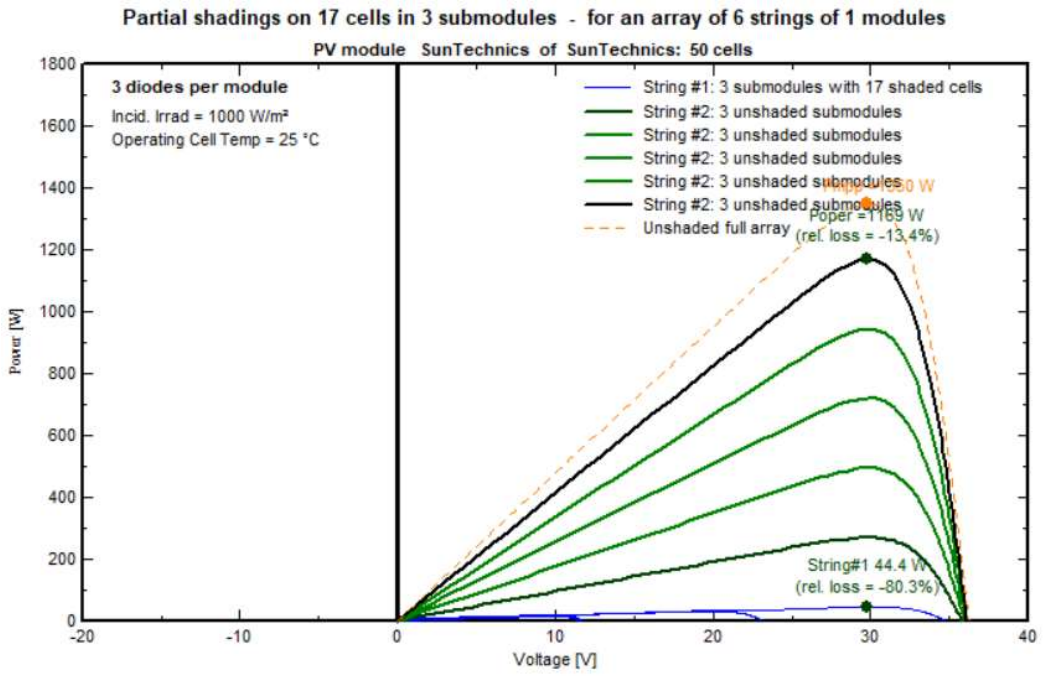
Tabel 4. 11 *Shading factor* array 1x6

Jam	Linear Shading Factor	String Shading Factor
07.00	0,237	0,5
08.00	0,072	0,333
09.00	0,021	0,167
10.00	0,003	0,167
11.00	0	0

Linear shading factor merupakan fraksi luas array PV yang terkena *shading* sedangkan *string shading factor* merupakan efek *shading* sebenarnya. Pada pukul 07.00 bayangan hanya menutupi 0,237 bagian permukaan array PV namun bayangan tersebut telah mengenai 3 modul PV, sehingga *string shading factor* bernilai 0,5 karena 3 modul PV adalah 0,5 dari keseluruhan array yang berjumlah 6 modul PV. Pada pukul 08.00 bayangan menutupi 0,072 bagian permukaan array PV namun bayangan tersebut mengenai 2 modul PV sehingga *string shading factor* bernilai 0,33 dan seterusnya. Pengaruh *shading* terhadap kurva I-V dan kurva P-V pada konfigurasi array PV 1x6 berturut-turut diberikan oleh gambar 4.31 (a) dan (b).



(a)



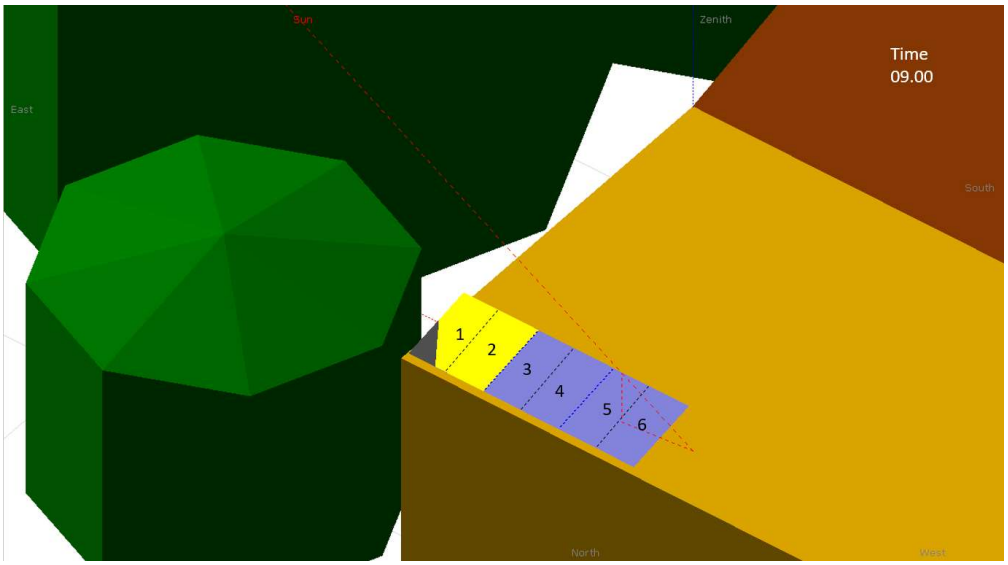
(b)

Gambar 4. 31 Kurva I-V (a) dan kurva P-V (b) array 1x6 pada kondisi *partial shading*

Gambar 4.31 (a) menunjukkan kurva I-V (arus-tegangan) array PV 1x6 pada irradiasi matahari 1000 W/m^2 dan suhu 25 ^{o}C dengan kondisi *partial shading* pada modul PV #1. Satu modul PV terbagi menjadi 3 *submodules* yang masing-masing memiliki satu dioda *bypass*. Gambar 4.31 (b) menunjukkan kurva P-V (daya-tegangan) dimana terlihat bahwa kondisi tanpa *shading* diberikan oleh kurva garis putus-putus berwarna kuning dan titik daya maksimum (*maximum power point*) MPP berada pada 1350 Watt, namun pada kondisi keseluruhan modul PV #1 terkena *shading*, dapat dilihat bahwa MPP berada pada 1169 Watt yang ditunjukkan oleh kurva berwarna hitam.

Pada konfigurasi array 2x3, modul PV #1 dan modul PV #2 disusun seri menjadi string #1, modul PV #3 dan modul PV #4 disusun seri menjadi string #2, modul PV #5 dan modul PV #6 disusun seri menjadi string #3. String #1, string #2, dan string #3 disusun paralel menjadi array. Pada konfigurasi ini, ketika modul PV #1 mengalami *shading*, maka modul PV #2 pun mengalami penurunan performa karena tersusun secara seri dengan modul PV #1 sehingga secara keseluruhan string

#1 mengalami penurunan performa (Teo, Tan, & Mok, 2018) seperti yang ditampilkan gambar 4.32. Hal ini dapat dilihat dari nilai *shading factor* yang diberikan pada tabel 4.12 dan berdampak pada terjadinya *loss* yang lebih besar dibandingkan dengan konfigurasi 1x6.

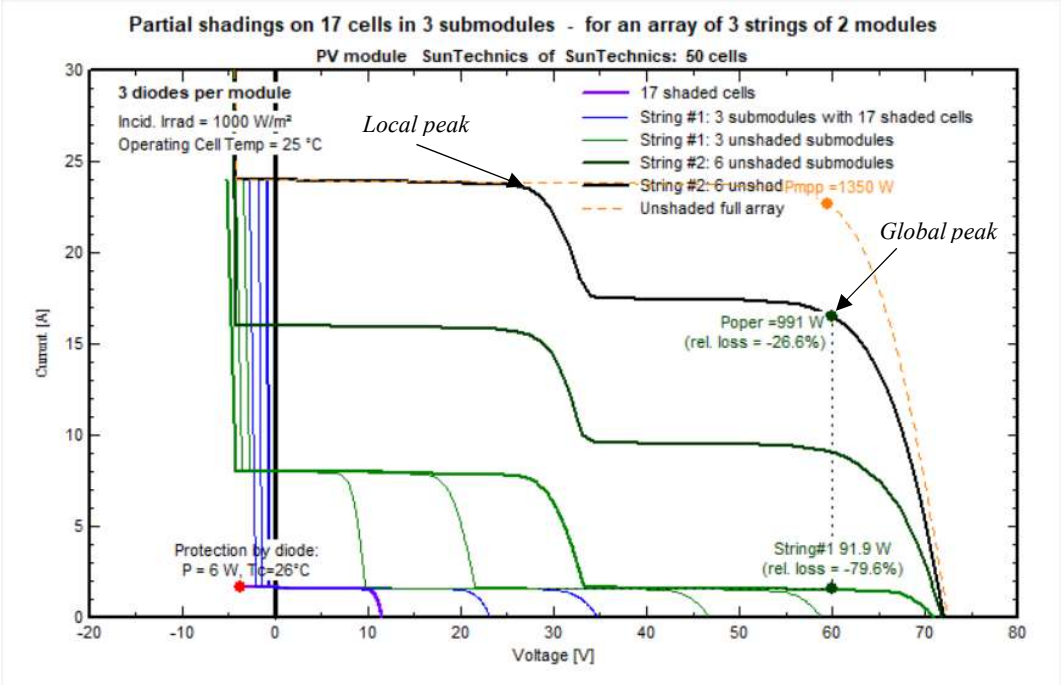


Gambar 4. 32 Pengaruh shading pada array 2x3

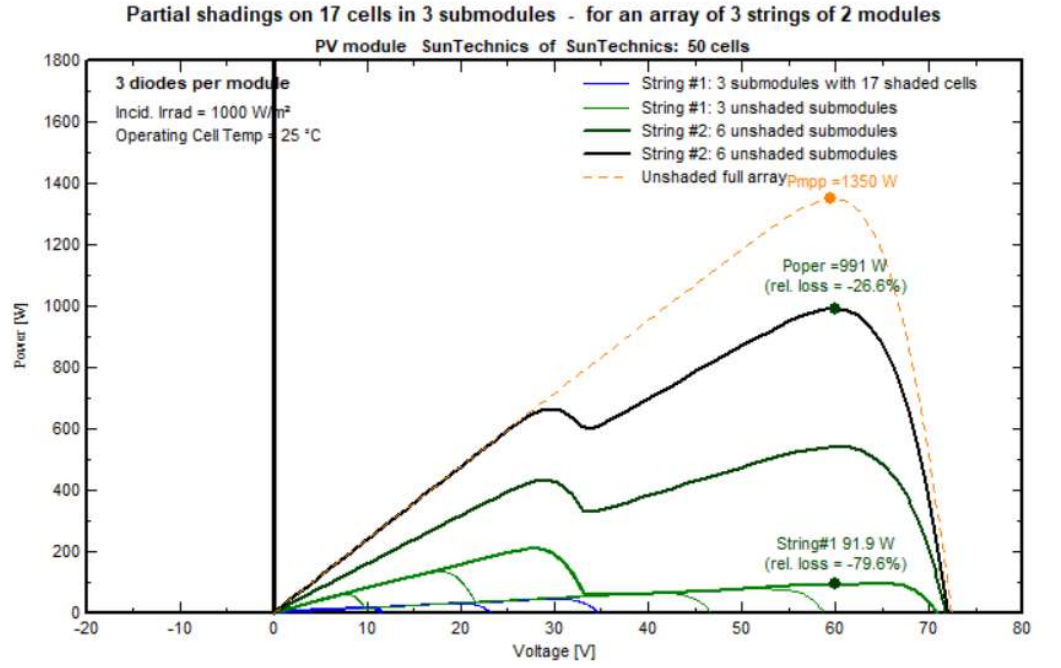
Tabel 4. 12 *Shading factor* array 2x3

Jam	Linear Shading Factor	String Shading Factor
07.00	0,237	0,667
08.00	0,072	0,333
09.00	0,021	0,333
10.00	0,003	0,333
11.00	0	0

Pada tabel 4.12 terlihat bahwa pada pukul 09.00 bayangan hanya menutupi modul PV #1 saja namun modul PV #2 pun terkena efeknya sehingga *string shading factor* bernilai 0,333 karena tersusun secara seri dalam satu string. Pengaruh *shading* terhadap kurva I-V dan kurva P-V pada konfigurasi array PV 2x3 berturut-turut diberikan oleh gambar 4.33 (a) dan (b)



(a)

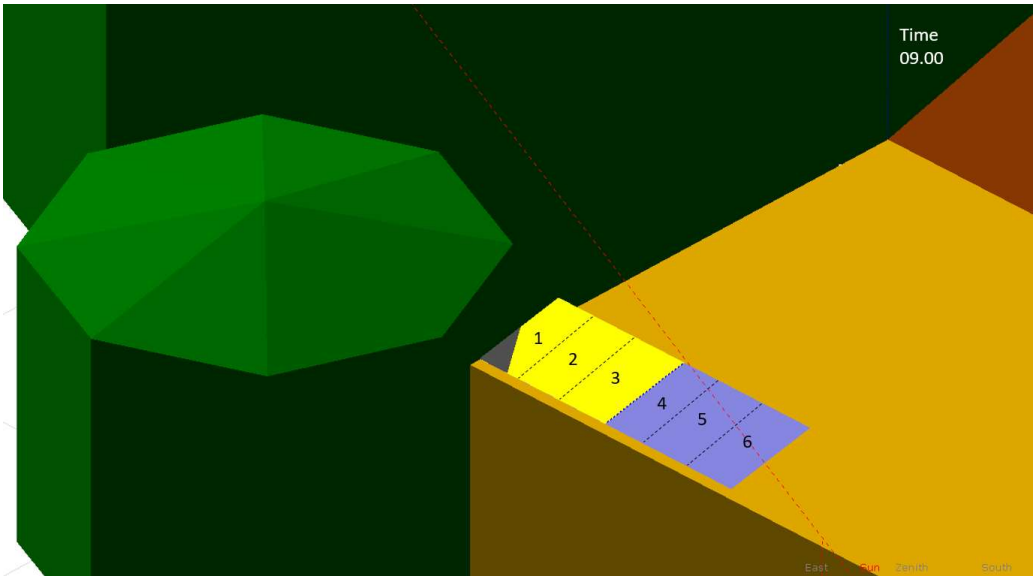


(b)

Gambar 4. 33 Kurva I-V (a) dan kurva P-V (b) array 2x3 pada kondisi *partial shading*

Pada konfigurasi array 2x3, dari gambar 4.33 terlihat bahwa sesuai dengan teori pada kurva P-V terdapat dua *peak*, yakni *local peak* yang berada pada tegangan maksimum satu modul PV yakni 30 Volt dan *global peak* yang terjadi pada tegangan 60 Volt yang disebabkan oleh susunan seri pada array PV (susunan seri menyebabkan penambahan tegangan). Karena array beroperasi pada tegangan 60 Volt, maka MPP terletak pada *global peak* tersebut sehingga terlihat pada gambar 4.33 bahwa MPP untuk kondisi *partial shading* pada modul PV #1 berada pada nilai 991 Watt.

Pada konfigurasi array 3x2 modul PV #1, modul PV #2, dan modul PV #3 disusun seri menjadi string 1 kemudian modul PV #4, modul PV #5, dan modul PV #6 disusun seri menjadi string 2. String 1 dan string 2 disusun paralel menjadi array. Pada konfigurasi ini, ketika modul 1 mengalami *shading*, maka modul 2 dan modul 3 juga akan mengalami penurunan performa karena tersusun seri dengan modul 1 seperti pada gambar 4.33. Hal ini dapat dilihat pada nilai *shading factor* yang diberikan oleh tabel 4.13 dan berdampak pada *loss* yang lebih besar dibandingkan dengan konfigurasi 1x6 dan 2x3.

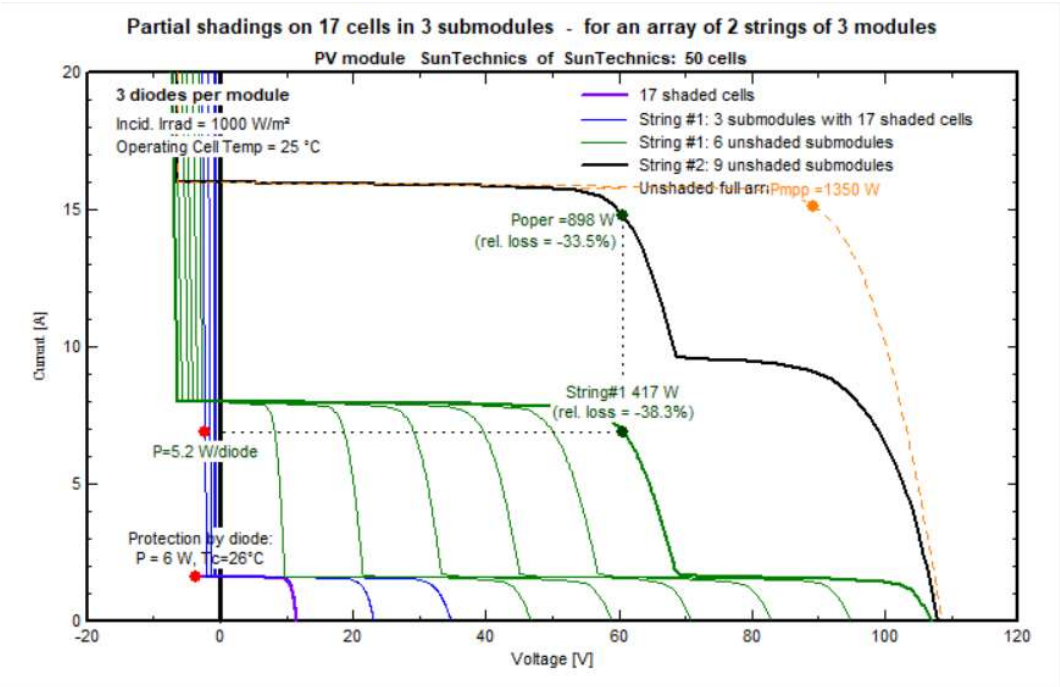


Gambar 4. 34 Pengaruh shading pada array 3x2

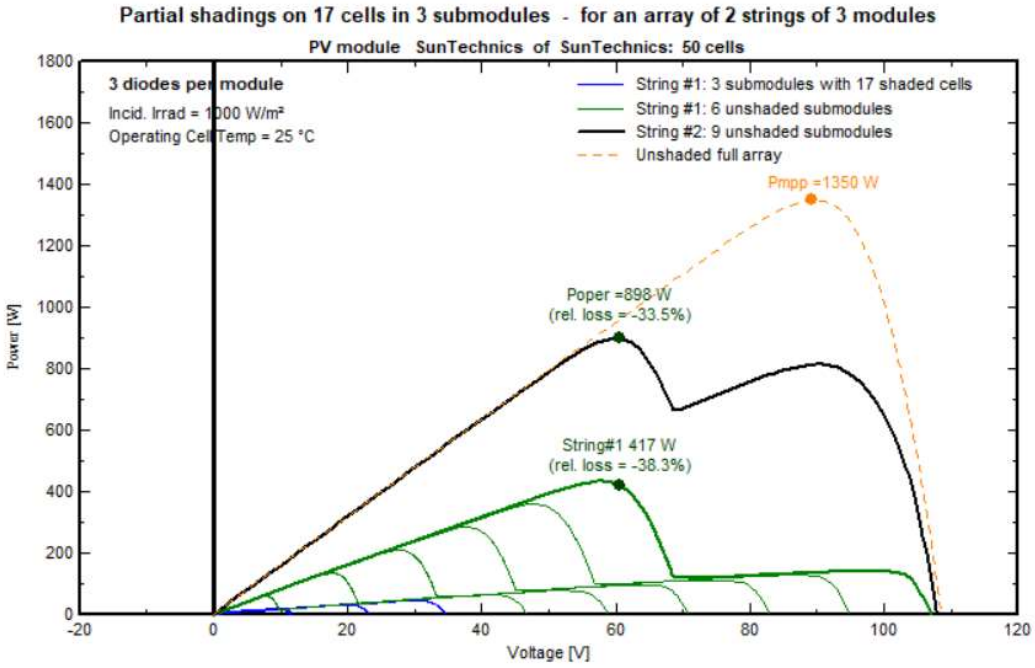
Tabel 4. 13 Shading factor array 3x2

Jam	Linear Shading Factor	String Shading Factor
07.00	0,237	0,5
08.00	0,072	0,5
09.00	0,021	0,5
10.00	0,003	0,5
11.00	0	0

Pada tabel 4.13 terlihat bahwa *string shading factor* dari pukul 07.00 hingga 10.00 bernilai 0,5 karena *shading* pada modul 1 berdampak pula pada modul PV 2 dan 3. Sehingga *loss* yang terjadi akibat *partial shading* lebih besar dibandingkan susunan array PV 1x3 dan 2x3. Pengaruh *shading* terhadap kurva I-V pada konfigurasi array PV 3x2 diberikan oleh gambar 4.35. Dalam kondisi *partial shading* pada modul PV #1, MPP kondisi operasi pada kurva I-V bergeser dari 1350 Watt di tegangan 90 Volt menjadi 898 Watt pada tegangan operasi 60 Volt.



(a)



(b)

Gambar 4. 35 Kurva I-V (a) dan kurva P-V (b) array 3x2 pada kondisi *partial shading*

Kemudian konfigurasi array modul PV juga berpengaruh kepada *ohmic wiring loss*, yakni *loss* yang disebabkan oleh resistansi kabel dari array PV hingga masuk ke SCC. Nilai *ohmic wiring loss* untuk masing-masing variasi diberikan oleh tabel 4.14.

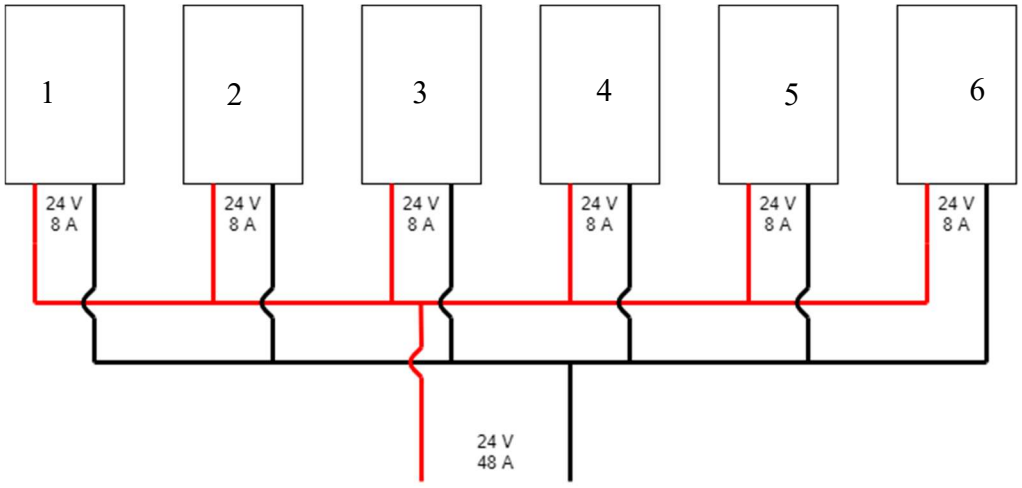
Tabel 4. 14 *Ohmic Wiring Loss*

Array		Ohmic Wiring Loss
Series	String	
1	6	-3,70%
2	3	-2,40%
3	2	-1,90%

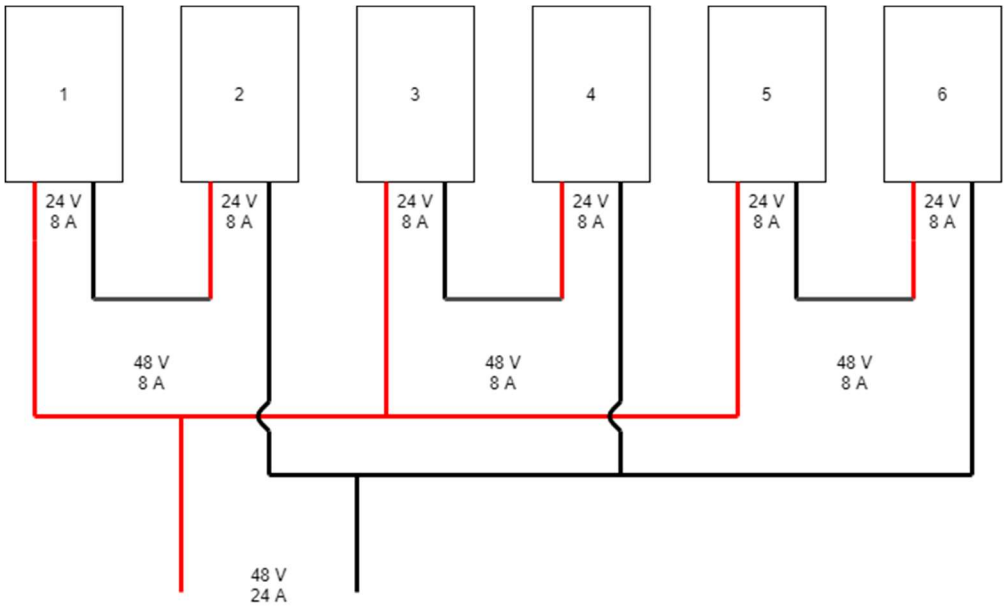
Nilai *ohmic wiring loss* dipengaruhi oleh resistansi kabel dan arus yang mengalir melalui kabel tersebut, dengan hubungannya diberikan pada persamaan (4.3) (PVsyst), dimana Ploss merupakan daya yang hilang, Rwire adalah resistansi kabel, dan Iarray adalah arus yang mengalir pada kabel dari array PV (PVsyst). Pada konfigurasi 1x6, masing-masing modul PV disambungkan secara paralel

dengan modul PV yang lain sehingga tegangan dan arus pada array PV diberikan oleh gambar 4.36.

$$P_{loss} = R_{wire} \times {I_{array}}^2 \quad \text{.....(4.3)}$$

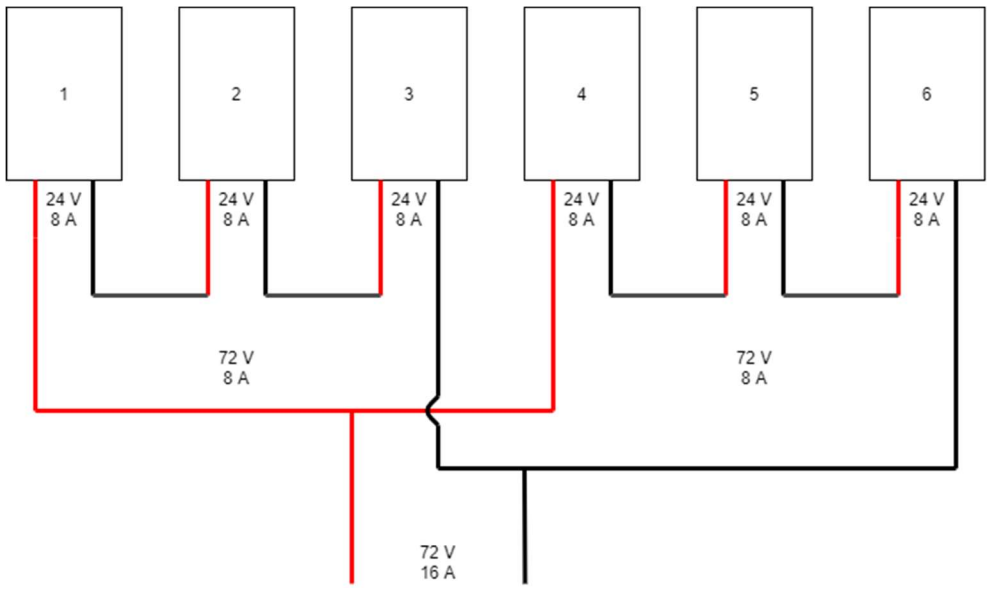


Gambar 4. 36 Array 1x6



Gambar 4. 37 Array 2x3

Sesuai dengan gambar 4.36, satu modul PV beroperasi pada tegangan 24 Volt dan menghasilkan arus maksimum 8 Ampere sehingga ketika disusun secara paralel akan terjadi kenaikan arus sehingga pada ujung array PV diperoleh tegangan 24 Volt dan arus 48 Ampere. Pada konfigurasi 2x3, 2 modul PV disusun secara seri menjadi 1 string kemudian 3 string disusun paralel menjadi 1 array seperti pada gambar 4.37. Pada gambar 4.37 dua modul PV yang disusun seri menjadi 1 string dengan tegangan 48 Volt dan arus 8 Ampere. 3 string disusun paralel sehingga diujung array diperoleh tegangan 48 Volt dan arus 24 Ampere. Konfigurasi 3x2 diberikan oleh gambar 4.38.



Gambar 4. 38 Array 3x2

Pada gambar 4.38, 3 modul PV disusun seri menjadi 1 string dengan tegangan 72 Volt dan arus 8 Ampere, kemudian 2 string disusun paralel sehingga pada ujung array didapatkan tegangan 72 Volt dan arus 16 Ampere. Dengan nilai arus pada setiap konfigurasi array tersebut, maka daya yang hilang untuk masing-masing konfigurasi adalah

$$P_{loss} = R_{wire} \times {I_{array}}^2$$

$$P_{loss}(1x6) = 2304\ R_{wire}$$

$$P_{loss}(2x3) = 24\ R_{wire}$$

$$P_{loss}(3x2) = 16\ R_{wire}$$

Dari hasil perhitungan daya yang hilang, dengan asumsi panjang dan jenis kabel (Rwire) yang sama untuk setiap variasi sama maka *ohmic wiring loss* dari terbesar hingga terkecil berturut-turut terjadi pada konfigurasi 1x6, 2x3, 3x2. Hasil ini bersesuaian dengan hasil simulasi. *Loss* total akibat *shading* dan *ohmic wiring* diberikan oleh tabel 4.15.

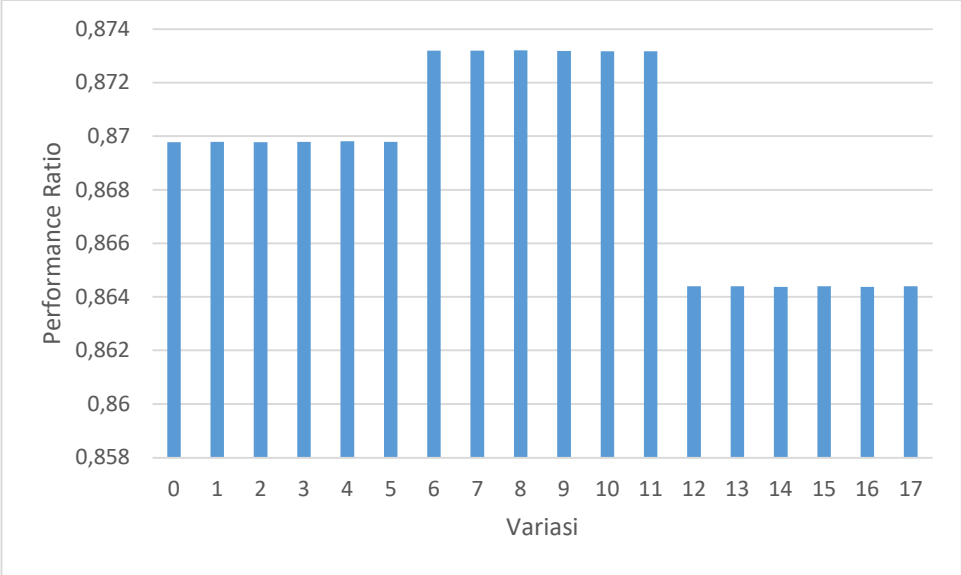
Tabel 4. 15 Total Loss Konfigurasi Array

Array		Shading Irradiance Loss	Shading String Loss	Ohmic Wiring Loss	Total Loss
Series	String				
1	6	-3,40%	-1,50%	-3,70%	-8,60%
2	3	-3,40%	-2,50%	-2,40%	-8,30%
3	2	-3,40%	-4%	-1,90%	-9,30%

Dari tabel 4.15 didapatkan bahwa *total loss* akibat kombinasi *shading* dan *wiring* paling kecil diperoleh pada array 2x3. Parameter performansi yang terakhir yakni nilai *performance ratio* yang dihitung menggunakan persamaan (2.9),

$$PR = \frac{Keluaran\ energi\ PV\ (kWh)}{Irradiasi\ Matahari\ (kWh/m^2)\ \times Luasan\ (m^2) \times Efisiensi\ sel\ (\%)} \times 100\%$$

Dengan nilai keluaran energi PV merupakan penjumlahan antara energi efektif array PV dan energi *full battery loss*. Irradiasi matahari total berdasarkan pembahasan subbab 4.4 bernilai 1700,3 kWh/m^2. Luasan array PV seperti yang telah dibahas pada subbab 4.2 yakni sebesar 3,267 m^2 dan efisiensi sel modul PV 16% maka didapatkan nilai PR seperti pada gambar 3.34.



Gambar 4. 39 *Performance Ratio* Simulasi

Gambar 4.39 menunjukkan bahwa secara keseluruhan PR tertinggi dimiliki oleh konfigurasi array 2x3 dan PR terendah diperoleh pada array 3x2. Hal ini sesuai dengan perhitungan total loss akibat konfigurasi array PV pada pembahasn sebelumnya. Performance ratio terbesar diperoleh pada variasi 9 dengan nilai 0,8731 atau 87,31% yakni pada array dengan konfigurasi 2 seri 3 string paralel (2x3).

4.7 Penentuan Variasi Terbaik

Pada subbab 4.5 ditemukan bahwa pemberian variasi profil pembebanan berpengaruh terhadap energi yang dihasilkan array PV, SOC minimum dan maksimum baterai, dan *loss of load probability* (LOL). Energi array PV terbesar didapatkan pada pembebanan 200 Watt 12 jam malam hari, yakni variasi 3, 9, dan 15. Pada variasi tersebut, nilai LOL terendah didapatkan pada variasi 9 dan 15 dengan nilai 0,24%. LOL 0% memang diperoleh pada semua pembebanan 100 Watt, namun energi yang terbuang pada pembebanan 100 Watt juga sangat besar seperti yang telah dibahas.

Kemudian pada subbab 4.6 dibahas mengenai variasi konfigurasi array PV yang berpengaruh kepada *partial shading loss* dan *ohmic wiring loss*. *Partial shading loss* terkecil diperoleh pada konfigurasi 1x6, namun *ohmic wiring loss*

terkecil dimiliki oleh konfigurasi 3x2. Kombinasi kedua *loss* tersebut menghasilkan *total loss* terkecil yang diperoleh pada konfigurasi 2x3, yakni pada variasi 6, 7, 8, 9, 10, dan 11 dengan nilai PR tertinggi dimiliki oleh variasi 9. Oleh karena itu, berdasarkan temuan dari subbab 4.5 dan 4.6 dapat disimpulkan bahwa kombinasi konfigurasi array PV dan profil pembebanan yang menghasilkan performansi terbaik didapatkan pada variasi 9, yakni konfigurasi array PV 2 seri 3 string (2x3) dan pembebanan 200 Watt selama 12 jam dari pukul 18.00 hingga 06.00.

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa data dan pembahasan, maka kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

a. Berdasarkan pengukuran dari tanggal 29 April 2020 hingga 5 Mei 2020 ditemukan bahwa PLTS Teknik Fisika ITS menghasilkan energi sebesar 15,1 kWh dengan nilai *performance ratio* sebesar 69,1%.
b. Berdasarkan simulasi ditemukan bahwa pemberian variasi profil pembebanan mempengaruhi energy terproduksi array PV, SOC minimum dan maksimum baterai, dan kemampuan sistem memenuhi beban (*loss of load probability*). Kemudian pemberian variasi konfigurasi array PV berpengaruh terhadap nilai *shading loss* dan *ohmic wiring loss*. Performansi sistem terbaik diperoleh pada konfigurasi array 2 seri 3 string dan profil pembebanan 200 Watt selama 12 jam dari pukul 18.00 hingga 06.00 dengan nilai *performance ratio* 87,31%.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk peneletian lanjutan terkait topik ini adalah sebagai berikut

a. Pada analisa performansi aktual sebaiknya dilakukan dengan pembebanan, sehingga dapat dianalisa pula performansi aktual baterai (SOC) dan kemampuan sistem untuk memenuhi beban (LOL) selain *performance ratio* sebagai parameter performansi sistem.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

Chang, W.-Y. (2013). The state of charge estimating methods for battery: a review. *ISRN Applied Mathematics, 2013*, 1-7.

Coleman, M., Lee, C. K., & C. Zhu, W. G. (2007). State of charge determination from EMF voltage estimation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 54*(5), 2550-2557.

D. Mahmoud, H. V. (2017). The impact of cracks on photovoltaic power performance. *Journal of Science : Advanced Materials and Devices, 2*, 199-209.

Deline, C., Marion, B., Granata, J., & Gonzales, S. (2011). Performance and economic analysis of distributed power electronics in photovoltaic systems. *Contract, 275*(3000), 303.

Diaz, P., Pena, R., Munoz, J., & Arias, C. (2011). Field analysis of solar PV-based collective systems for rural electrification. *Energy, 36*(16), 2509.

Dolara, A. (2016). Snail Trails and Cell Microcrack Impact on PV. *IEEE Journal of Photovoltaics*.

Hamburg, i. (n.d.). (ifu Hamburg, Member of iPoint Group) Retrieved January 31, 2020, from https://www.ifu.com/en/e-sankey/energy-flow-diagram/

Hongxing, Y., Lu, L., & Burnett, L. (2003). Weather data and probability analysis of hybrid photovoltaic wind power generation systems in Hongkong. *Journal of Renewable Energy, 34*(10), 1813-1824.

Kerekes, S. D., Teodorescu, R., & Blaabjerg, F. (2004). Improved MPPT Method For Rapidly Changing Environmental Conditions.

KESDM. (2012, June 19). *www.esdm.go.id*. (Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral) Retrieved January 29, 2020, from https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/matahari-untuk-plts-di-indonesia

Ketenagalistrikan, D. J. (2018). *Statistik Ketenagalistrikan.* Jakarta: Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral.

Kontges, M. (2012). Snail tracks, worm marks, and cell cracks. *Photovoltaic Solar Energy Conference Exhibit*.

Meyer, S. (2013). Silver nanoparticles cause snail trails in photovoltaic modules. *Solar Energy Mater Solar Cells*, 171-175.

Midya, P., Krein, P. T., Turnbull, R. J., Reppa, R., & Kimball, J. (1996). Dynamic maximum power point tracker for photovoltaic applications. *27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*.

Mohan, N., Undeland, T., Robbins, M., & P., W. (1995). *Power Electronics Converters, Applications, And Design.* New York: John Wiley & Sons, Inc.

Morlier, A., Haase, F., & Kontges, M. (2016). Impact of cracks in multicrystalline silicon solar cells on PV module power-A simulation study based on field data. *IEEE J. Photovotaics*, 28-33.

Nayak, S., Kumar, S., & Changmai, P. (2019). A mathematical model to estimate the maximum power output of a total cross tied connected PV array during partial shading condition. *IET Renewable Power Generation*.

ND, K., & AK, R. (2007). An investigation of mismatch losses in solar photovoltaic cell networks. *Energy, 32*(9), 755.

P.N. Bierwith, P. (2019). Carbon dioxide toxicity and climate change: a major unapprehended risk for human health. *Environmental health*.

Perlman, J., & Andy McNamara, D. S. (2005). *Analysis of PV system performance versus modeled expectations across a set of identycal PV systems.* New York: Big Apple Solar Installation Commitment.

PVsyst. (n.d.). PVsyst Help.

Qasim, M. T. (2017). Analysis of Shading Impact Factor for Photovoltaic Modules.

S, N., & K, E. (1992). Spectral effects on PV-device rating. *Solar Energy Materials & Solar Cells, 47*, 85-94.

Sharma, V., Haque, M. H., & Aziz, S. M. (2019). PV generation and load profile data of net zero energy homes in South Australia. *Data in brief, 25*, 104235.

Technology, S. S. (n.d.). *Performance Ratio, Quality Factor for the PV Plant.*

Teo, J., Tan, R., & Mok, V. (2018). Impact of partial shading on the PV characteristics and the maximum power of a photovoltaic string. *Energies, 11*, 1860.

Treado, S. (2015). The effect of electric load profiles on the performance of off-grid residential hybrid renewable energy systems. *Energies, 8*, 11120-11138.

Treado, S. (2015). The effect of electric load profiles on the performance of off-grid residential hybrid renewable energy systems. *Energies, 8*, 11120-11138.

Zooba, A. F., & Bansaal, R. (2011). *Handbook of Renewable Energy Engineering.* Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

LAMPIRAN A

1. *Datasheet* Multimeter Digital Fluke 175

Function	Range	Resolution	Accuracy
AC volts	600 mV	0,1 mV	1% + 3 (45 Hz to 500 Hz)
	6 V	0,001 V	
	60 V	0,01 V	
	600 V	0,1 V	
	1000 V	1 V	2% + 3 (500 Hz to 1 kHz)
DC volts	600 mV	0,1 mV	0,15% + 2
	6 V	0,001 V	
	60 V	0,01V	
	600 V	0,1 V	
	1000 V	1 V	
AC amps (45 Hz to 1 kHz)	60 mA	0,01 mA	1,5% + 3
	400 mA	0,1 mA	
	6 A	0,001 A	
	10 A	0,01 A	
DC amps	60 mA	0,01 mA	1% + 3
	400 mA	0,1 mA	
	6 A	0,001 A	
	10 A	0,01 A	

2. *Datasheet* Solar Power Meter SPM-1116SD

Function	Solar Power
	Transmission (%)
	Solar Power Integration
Spectral Response	400 nm to 1100 nm
Measuring Unit	Solar Power : W/m^2 or $Btu/(ft^2.h)$
	Transmission : %
	Solar Power Integration : W/m^2 or $Btu/(ft^2.h)$
Solar Power Range	2000 W/m^2 or 634 $Btu/(ft^2.h)$
Solar Power Resolution	0,1 W/m^2 (for power < 1000 W/m^2
	1 W/m^2 for power > 1000 W/m^2
Solar Power Accuracy	± 10 W/m^2 or 3 $Btu/(ft^2.h)$
Angular Accuracy	Cosine corrected < 5% for angles < 60^o

3. *Datasheet* Environment Meter Krisbow KW06-291

Power	9V Battery
Dimension	248 x 65 x 45 mm
Weight	365 g
Thermometer	
Measuring Range	-200 to 1372 ºCelsius (for thermocouple type K); -30 to 100ºCelsius (for air temperature)
Resolution	0.1 ºCelsius
Accuracy	+/- 0.15 ºC (for thermocouple); +/- 1 ºC (for air)

LAMPIRAN B

Data pengukuran 29 April 2020

Jam	Voc (V)	Isc (A)	Daya (W)	Irradiasi (W/m^2)	Suhu Lingkungan (^oC)
6	30,33	1,73	52,4709	140,30	24,39
7	30,45	4,4	133,98	363,40	25,81
8	30,25	6,78	205,095	580,89	27,30
9	30,8	8,23	253,484	736,31	28,65
10	31,2	9,48	295,776	847,70	29,83
11	31,88	11,36	362,1568	863,29	30,68
12	31,17	11,3	352,221	828,61	31,24
13	31,65	10,12	320,298	812,50	31,46
14	29,67	7,32	217,1844	551,01	31,350
15	29,95	4,32	129,384	525,30	30,73
16	28,12	1,56	43,8672	221,90	29,76
17	26,52	0,77	20,4204	78,03	28,69
18	25,86	0,04	1,0344	0	27,96

Data pengukuran 30 April 2020

Jam	Voc (V)	Isc (A)	Daya (W)	Irradiasi (W/m^2)	Suhu Lingkungan (^oC)
6	29,43	2,18	64,1574	155,10	23,88
7	30,2	5,21	157,342	401,11	25,4
8	30,12	8,53	256,9236	624,00	26,96
9	30,46	9,42	286,9332	797,69	28,40
10	31,24	11,05	345,202	900,09	29,61
11	31,67	11,65	368,9555	922,79	30,5
12	31,55	11,57	365,0335	887,60	31,08
13	31,78	10,13	321,9314	876,50	31,32
14	31,12	8,67	269,8104	682,29	31,17
15	30,21	5,44	164,3424	557,20	30,51
16	29,9	2,23	66,677	231,39	29,47
17	27,8	0,09	2,502	73,22	28,32
18	25,93	0,04	1,0372	0	27,74

Data pengukuran 1 Mei 2020

Jam	Voc (V)	Isc (A)	Daya (W)	Irradiasi (W/m^2)	Suhu Lingkungan (^oC)
6	29,55	2,22	65,601	156,50	25,71
7	29,95	5,26	157,537	385,90	27,4
8	30,78	6,87	211,4586	613,09	29,17
9	30,43	8,55	260,1765	774,10	30,8
10	30,99	11,48	355,7652	875,90	32,18
11	31,45	11,92	374,884	931,80	33,29
12	31,61	11,37	359,4057	884,30	34,02
13	31,93	10,26	327,6018	782,51	34,41
14	30,97	8,82	273,1554	698,90	34,37
15	30,45	5,16	157,122	567,49	33,77
16	30,11	2,11	63,5321	240,09	32,73
17	28,78	0,43	12,3754	75,43	31,55
18	26,54	0,02	0,5308	0	30,89

Data pengukuran 2 Mei 2020

Jam	Voc (V)	Isc (A)	Daya (W)	Irradiasi (W/m^2)	Suhu Lingkungan (^oC)
6	29,75	2,24	66,64	162,00	26,55
7	30,12	5,43	163,5516	412,51	28,11
8	30,96	7,13	220,7448	647,19	29,73
9	30,88	8,74	269,8912	825,70	31,22
10	31,61	12,66	400,1826	935,49	32,49
11	31,55	12,65	399,1075	965,90	33,45
12	31,43	12,17	382,5031	928,00	34,09
13	32,28	10,54	340,2312	905,60	34,39
14	32,12	8,38	269,1656	720,61	34,32
15	30,98	4,75	147,155	584,10	33,74
16	30,43	2,33	70,9019	143,20	32,76
17	29,76	0,54	16,0704	71,56	31,66
18	25,55	0,04	1,022	0,00	30,96

Data pengukuran 3 Mei 2020

Jam	Voc (V)	Isc (A)	Daya (W)	Irradiasi (W/m^2)	Suhu Lingkungan (^oC)
6	29,72	2,11	62,7092	158,60	26,62
7	29,42	5,38	158,2796	394,90	28,17
8	30,34	8,67	263,0478	611,09	29,75
9	30,96	9,77	302,4792	769,40	31,2
10	31,55	10,84	342,002	880,50	32,45
11	31,98	11,65	372,567	909,39	33,4
12	31,63	11,07	350,1441	873,20	34,02
13	31,61	10,28	324,9508	779,11	34,35
14	32,14	7,86	252,6204	701,21	34,3
15	31,87	4,93	157,1191	564,31	33,72
16	30,65	1,88	57,622	231,80	32,74
17	29,94	1,12	33,5328	79,98	31,63
18	26,13	0,05	1,3065	0,00	30,87

Data pengukuran 4 Mei 2020

Jam	Voc (V)	Isc (A)	Daya (W)	Irradiasi (W/m^2)	Suhu Lingkungan (^oC)
6	29,56	2,11	62,3716	156,79	26,93
7	30,67	5,12	157,0304	382,29	28,43
8	30,23	7,54	227,9342	596	29,96
9	31,3	10,45	327,085	767	31,4
10	31,33	11,53	361,2349	868	32,63
11	31,49	11,77	370,6373	889,7	33,55
12	31,57	11,13	351,3741	858,7	34,18
13	31,75	10,52	334,01	863	34,49
14	31,99	8,55	273,5145	675,9	34,43
15	32,2	5,1	164,22	458,5	33,87
16	28,45	2,34	66,573	135,19	32,94
17	26,23	0,247	6,47881	70,33	31,89
18	25,87	0,09	2,3283	0	31,24

Data pengukuran 5 Mei 2020

Jam	Voc (V)	Isc (A)	Daya (W)	Irradiasi (W/m^2)	Suhu Lingkungan (^oC)
6	29,76	2,14	63,6864	174,09	26,08
7	29,53	4,93	145,5829	434,89	27,73
8	30,44	6,63	201,8172	678,8	29,44
9	31,52	9,22	290,6144	856,59	30,98
10	31,93	10,41	332,3913	966	32,31
11	31,8	10,65	338,67	1002,7	33,3
12	31,64	10,47	331,2708	955,2	33,97
13	31,64	9,15	289,506	838,9	34,28
14	30,21	2,2	66,462	759,4	34,22
15	32,16	2,18	70,1088	513,8	33,64
16	31,57	1,14	35,9898	255,8	32,61
17	28,43	0,95	27,0085	77,54	31,42
18	26,78	0,03	0,8034	0	30,76

LAMPIRAN C

Main results simulasi variasi 0

	GlobHor	GlobEff	E Avail	EUnused	E Miss	E User	E Load
	kWh/m²	kWh/m²	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
January	125,2	111,2	123,9	81,7	0	37,94	37,94
February	120,7	109,8	121	84,1	0	34,27	34,27
March	142,1	132,9	147,6	106,7	0	37,94	37,94
April	134,8	131,7	143,8	104,1	0	36,72	36,72
May	151,7	154,8	168,8	127,9	0	37,94	37,94
June	146	152,4	166,4	126,8	0	36,72	36,72
July	164,4	171,2	185,8	144,8	0	37,94	37,94
August	177,5	180	195,5	154,2	0	37,94	37,94
September	169,4	163,3	177	137,2	0	36,72	36,72
October	170,5	158,4	172,9	132	0	37,94	37,94
November	131,7	117,7	130,9	91,4	0	36,72	36,72
December	134,2	116,9	130,3	89,5	0	37,94	37,94
Year	1768,1	1700,3	1863,8	1380,4	0	446,76	446,76

Main results simulasi variasi 1

	GlobHor	GlobEff	E Avail	EUnused	E Miss	E User
	kWh/m²	kWh/m²	kWh	kWh	kWh	kWh
January	125,2	111,2	124	82,6	0	37,94
February	120,7	109,8	121,1	84,5	0	34,27
March	142,1	132,9	147,6	107,3	0	37,94
April	134,8	131,7	143,9	104,9	0	36,72
May	151,7	154,8	168,9	128,3	0	37,94
June	146	152,4	166,4	127,3	0	36,72
July	164,4	171,2	185,8	145,1	0	37,94
August	177,5	180	195,5	154,8	0	37,94
September	169,4	163,3	177	137,7	0	36,72
October	170,5	158,4	173	132,1	0	37,94
November	131,7	117,7	130,9	91,3	0	36,72
December	134,2	116,9	130,3	90,2	0	37,94
Year	1768,1	1700,3	1864,3	1386,1	0	446,76

Main results simulasi variasi 2

	GlobHor	GlobEff	E Avail	EUnused	E Miss	E User	E Load
	kWh/m²	kWh/m²	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
January	125,2	111,2	124	82,4	0	37,94	37,94
February	120,7	109,8	121,1	84,2	0	34,27	34,27
March	142,1	132,9	147,6	106,9	0	37,94	37,94
April	134,8	131,7	143,8	104,6	0	36,72	36,72
May	151,7	154,8	168,9	127,8	0	37,94	37,94
June	146	152,4	166,4	126,9	0	36,72	36,72
July	164,4	171,2	185,8	144,7	0	37,94	37,94
August	177,5	180	195,5	154,4	0	37,94	37,94
September	169,4	163,3	177	137,2	0	36,72	36,72
October	170,5	158,4	172,9	131,8	0	37,94	37,94
November	131,7	117,7	130,8	91	0	36,72	36,72
December	134,2	116,9	130,3	89,9	0	37,94	37,94
Year	1768,1	1700,3	1864	1381,9	0	446,76	446,76

Main results simulasi variasi 3

	GlobHor	GlobEff	E Avail	EUnused	E Miss	E User	E Load
	kWh/m²	kWh/m²	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
January	125,2	111,2	121,6	42,7	0,928	74,22	75,14
February	120,7	109,8	118,9	48,4	0,044	67,83	67,87
March	142,1	132,9	145	64,9	0,469	74,67	75,14
April	134,8	131,7	141,3	64	0	72,72	72,72
May	151,7	154,8	166,3	86,5	0	75,14	75,14
June	146	152,4	163,9	86,1	0	72,72	72,72
July	164,4	171,2	183,1	102,9	0	75,14	75,14
August	177,5	180	192,9	112,6	0	75,14	75,14
September	169,4	163,3	174,5	96,9	0	72,72	72,72
October	170,5	158,4	170,4	90,2	0	75,14	75,14
November	131,7	117,7	128,6	52,8	0	72,72	72,72
December	134,2	116,9	127,8	48,5	0,756	74,39	75,14
Year	1768,1	1700,3	1834,4	896,5	2,197	882,56	884,76

Main results variasi 4

	GlobHor	GlobEff	E Avail	EUnused	E Miss	E User	E Load
	kWh/m²	kWh/m²	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
January	125,2	111,2	121,7	43,5	0	75,14	75,14
February	120,7	109,8	119	49,8	0	67,87	67,87
March	142,1	132,9	145,1	66	0	75,14	75,14
April	134,8	131,7	141,6	66,1	0	72,72	72,72
May	151,7	154,8	166,5	87,7	0	75,14	75,14
June	146	152,4	164	87,9	0	72,72	72,72
July	164,4	171,2	183,3	104,5	0	75,14	75,14
August	177,5	180	193,1	113,9	0	75,14	75,14
September	169,4	163,3	174,6	98	0	72,72	72,72
October	170,5	158,4	170,4	89,3	0	75,14	75,14
November	131,7	117,7	128,5	51,7	0	72,72	72,72
December	134,2	116,9	127,9	49,7	0	75,14	75,14
Year	1768,1	1700,3	1835,8	908,3	0	884,76	884,76

Main results simulasi variasi 5

	GlobHor	GlobEff	E Avail	EUnused	E Miss	E User	E Load
	kWh/m²	kWh/m²	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
January	125,2	111,2	121,7	43,5	0	75,14	75,14
February	120,7	109,8	119	49,3	0	67,87	67,87
March	142,1	132,9	145,1	65,7	0,278	74,87	75,14
April	134,8	131,7	141,5	65,7	0	72,72	72,72
May	151,7	154,8	166,4	87,1	0	75,14	75,14
June	146	152,4	164	87,6	0	72,72	72,72
July	164,4	171,2	183,2	103,7	0	75,14	75,14
August	177,5	180	192,9	113,4	0	75,14	75,14
September	169,4	163,3	174,6	98,1	0	72,72	72,72
October	170,5	158,4	170,4	90,9	0	75,14	75,14
November	131,7	117,7	128,6	53,4	0	72,72	72,72
December	134,2	116,9	127,9	50,1	0,486	74,66	75,14
Year	1768,1	1700,3	1835,4	908,6	0,764	884	884,76

Main results simulasi variasi 6

	GlobHor	GlobEff	E Avail	EUnused	E Miss	E User
	kWh/m²	kWh/m²	kWh	kWh	kWh	kWh
January	125,2	111,2	125,1	82,9	0	37,94
February	120,7	109,8	121,5	84,5	0	34,27
March	142,1	132,9	148,7	107,9	0	37,94
April	134,8	131,7	144,5	104,7	0	36,72
May	151,7	154,8	169,7	128,8	0	37,94
June	146	152,4	165,8	126,3	0	36,72
July	164,4	171,2	184,7	143,9	0	37,94
August	177,5	180	196,4	155,1	0	37,94
September	169,4	163,3	177,2	137,4	0	36,72
October	170,5	158,4	173,9	133	0	37,94
November	131,7	117,7	132,1	92,6	0	36,72
December	134,2	116,9	131,6	90,8	0	37,94
Year	1768,1	1700,3	1871,4	1388	0	446,76

Main results simulasi variasi 7

	GlobHor	GlobEff	E Avail	EUnused	E Miss	E User	E Load
	kWh/m²	kWh/m²	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
January	125,2	111,2	125,2	83,7	0	37,94	37,94
February	120,7	109,8	121,5	84,9	0	34,27	34,27
March	142,1	132,9	148,8	108,5	0	37,94	37,94
April	134,8	131,7	144,6	105,6	0	36,72	36,72
May	151,7	154,8	169,7	129,2	0	37,94	37,94
June	146	152,4	165,9	126,8	0	36,72	36,72
July	164,4	171,2	184,8	144,2	0	37,94	37,94
August	177,5	180	196,4	155,7	0	37,94	37,94
September	169,4	163,3	177,3	137,8	0	36,72	36,72
October	170,5	158,4	174	133,2	0	37,94	37,94
November	131,7	117,7	132,1	92,5	0	36,72	36,72
December	134,2	116,9	131,6	91,5	0	37,94	37,94
Year	1768,1	1700,3	1871,8	1393,7	0	446,76	446,76

Main results simulasi variasi 8

	GlobHor	GlobEff	E Avail	EUnused	E Miss	E User	E Load
	kWh/m²	kWh/m²	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
January	125,2	111,2	125,1	83,6	0	37,94	37,94
February	120,7	109,8	121,5	84,7	0	34,27	34,27
March	142,1	132,9	148,8	108,1	0	37,94	37,94
April	134,8	131,7	144,6	105,3	0	36,72	36,72
May	151,7	154,8	169,7	128,8	0	37,94	37,94
June	146	152,4	165,8	126,4	0	36,72	36,72
July	164,4	171,2	184,7	143,8	0	37,94	37,94
August	177,5	180	196,4	155,4	0	37,94	37,94
September	169,4	163,3	177,2	137,4	0	36,72	36,72
October	170,5	158,4	173,9	132,8	0	37,94	37,94
November	131,7	117,7	132	92,2	0	36,72	36,72
December	134,2	116,9	131,6	91,2	0	37,94	37,94
Year	1768,1	1700,3	1871,6	1389,8	0	446,76	446,76

Main results simulasi variasi 9

	GlobHor	GlobEff	E Avail	EUnused	E Miss	E User	E Load
	kWh/m²	kWh/m²	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
January	125,2	111,2	122,8	43,9	0,877	74,27	75,14
February	120,7	109,8	119,3	48,6	0	67,87	67,87
March	142,1	132,9	146,2	66,2	0,474	74,67	75,14
April	134,8	131,7	142,1	64,8	0	72,72	72,72
May	151,7	154,8	167,2	87,3	0	75,14	75,14
June	146	152,4	163,3	85,5	0	72,72	72,72
July	164,4	171,2	182,1	101,8	0	75,14	75,14
August	177,5	180	193,7	113,4	0	75,14	75,14
September	169,4	163,3	174,7	97,3	0	72,72	72,72
October	170,5	158,4	171,4	91,2	0	75,14	75,14
November	131,7	117,7	129,8	54	0	72,72	72,72
December	134,2	116,9	129,1	49,8	0,72	74,42	75,14
Year	1768,1	1700,3	1841,8	903,6	2,072	882,69	884,76

Main results simulasi variasi 10

	GlobHor	GlobEff	E Avail	EUnused	E Miss	E User	E Load
	kWh/m²	kWh/m²	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
January	125,2	111,2	122,9	44,6	0	75,14	75,14
February	120,7	109,8	119,5	50,1	0	67,87	67,87
March	142,1	132,9	146,3	67,2	0	75,14	75,14
April	134,8	131,7	142,3	66,8	0	72,72	72,72
May	151,7	154,8	167,3	88,6	0	75,14	75,14
June	146	152,4	163,5	87,4	0	72,72	72,72
July	164,4	171,2	182,3	103,5	0	75,14	75,14
August	177,5	180	193,9	114,9	0	75,14	75,14
September	169,4	163,3	174,9	98,3	0	72,72	72,72
October	170,5	158,4	171,3	90,1	0	75,14	75,14
November	131,7	117,7	129,7	52,7	0	72,72	72,72
December	134,2	116,9	129,2	51	0	75,14	75,14
Year	1768,1	1700,3	1843,2	915,1	0	884,76	884,76

Main results simulasi variasi 11

	GlobHor	GlobEff	E Avail	EUnused	E Miss	E User	E Load
	kWh/m²	kWh/m²	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
January	125,2	111,2	122,9	44,4	0	75,14	75,14
February	120,7	109,8	119,5	50	0	67,87	67,87
March	142,1	132,9	146,3	66,9	0,288	74,86	75,14
April	134,8	131,7	142,3	66,5	0	72,72	72,72
May	151,7	154,8	167,2	87,9	0	75,14	75,14
June	146	152,4	163,4	87,1	0	72,72	72,72
July	164,4	171,2	182,2	102,6	0	75,14	75,14
August	177,5	180	193,8	114,3	0	75,14	75,14
September	169,4	163,3	174,8	98,3	0	72,72	72,72
October	170,5	158,4	171,4	91,9	0	75,14	75,14
November	131,7	117,7	129,8	54,4	0	72,72	72,72
December	134,2	116,9	129,3	51,4	0,456	74,69	75,14
Year	1768,1	1700,3	1842,8	915,7	0,743	884,02	884,76

Main results simulasi variasi 12

	GlobHor	GlobEff	E Avail	EUnused	E Miss	E User	E Load
	kWh/m²	kWh/m²	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
January	125,2	111,2	124,9	82,7	0	37,94	37,94
February	120,7	109,8	120,4	83,6	0	34,27	34,27
March	142,1	132,9	147,9	107	0	37,94	37,94
April	134,8	131,7	142,8	102,9	0	36,72	36,72
May	151,7	154,8	167,6	126,7	0	37,94	37,94
June	146	152,4	162,1	122,6	0	36,72	36,72
July	164,4	171,2	180,2	139,4	0	37,94	37,94
August	177,5	180	193,7	152,8	0	37,94	37,94
September	169,4	163,3	175,6	135,6	0	36,72	36,72
October	170,5	158,4	173,5	132,5	0	37,94	37,94
November	131,7	117,7	132,2	92,7	0	36,72	36,72
December	134,2	116,9	131,7	90,9	0	37,94	37,94
Year	1768,1	1700,3	1852,3	1369,4	0	446,76	446,76

Main results simulasi variasi 13

	GlobHor	GlobEff	E Avail	EUnused	E Miss	E User	E Load
	kWh/m²	kWh/m²	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
January	125,2	111,2	124,9	83,4	0	37,94	37,94
February	120,7	109,8	120,4	83,9	0	34,27	34,27
March	142,1	132,9	147,9	107,6	0	37,94	37,94
April	134,8	131,7	142,8	103,9	0	36,72	36,72
May	151,7	154,8	167,6	127,1	0	37,94	37,94
June	146	152,4	162,1	123	0	36,72	36,72
July	164,4	171,2	180,2	139,7	0	37,94	37,94
August	177,5	180	193,7	153,1	0	37,94	37,94
September	169,4	163,3	175,6	136,1	0	36,72	36,72
October	170,5	158,4	173,5	132,7	0	37,94	37,94
November	131,7	117,7	132,2	92,6	0	36,72	36,72
December	134,2	116,9	131,7	91,6	0	37,94	37,94
Year	1768,1	1700,3	1852,8	1374,7	0	446,76	446,76

Main results simulasi variasi 14

	GlobHor	GlobEff	E Avail	EUnused	E Miss	E User	E Load
	kWh/m²	kWh/m²	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
January	125,2	111,2	124,9	83,3	0	37,94	37,94
February	120,7	109,8	120,4	83,6	0	34,27	34,27
March	142,1	132,9	147,9	107,3	0	37,94	37,94
April	134,8	131,7	142,8	103,6	0	36,72	36,72
May	151,7	154,8	167,6	126,7	0	37,94	37,94
June	146	152,4	162,1	122,7	0	36,72	36,72
July	164,4	171,2	180,2	139,4	0	37,94	37,94
August	177,5	180	193,7	152,8	0	37,94	37,94
September	169,4	163,3	175,6	135,8	0	36,72	36,72
October	170,5	158,4	173,4	132,3	0	37,94	37,94
November	131,7	117,7	132,1	92,3	0	36,72	36,72
December	134,2	116,9	131,7	91,4	0	37,94	37,94
Year	1768,1	1700,3	1852,5	1371,1	0	446,76	446,76

Main results simulasi variasi 15

	GlobHor	GlobEff	E Avail	EUnused	E Miss	E User	E Load
	kWh/m²	kWh/m²	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
January	125,2	111,2	122,5	43,6	0,892	74,25	75,14
February	120,7	109,8	118,2	47,4	0	67,87	67,87
March	142,1	132,9	145,3	65,5	0,588	74,56	75,14
April	134,8	131,7	140,3	63,1	0	72,72	72,72
May	151,7	154,8	165	85	0	75,14	75,14
June	146	152,4	159,5	81,5	0	72,72	72,72
July	164,4	171,2	177,5	96,7	0	75,14	75,14
August	177,5	180	191,1	110,7	0	75,14	75,14
September	169,4	163,3	173,1	95,7	0	72,72	72,72
October	170,5	158,4	170,9	90,8	0	75,14	75,14
November	131,7	117,7	129,9	54,1	0	72,72	72,72
December	134,2	116,9	129,2	49,8	0,712	74,43	75,14
Year	1768,1	1700,3	1822,7	883,9	2,192	882,57	884,76

Main results simulasi variasi 16

	GlobHor	GlobEff	E Avail	EUnused	E Miss	E User	E Load
	kWh/m²	kWh/m²	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
January	125,2	111,2	122,6	44,3	0	75,14	75,14
February	120,7	109,8	118,3	49	0	67,87	67,87
March	142,1	132,9	145,4	66,3	0	75,14	75,14
April	134,8	131,7	140,5	65,2	0	72,72	72,72
May	151,7	154,8	165,2	86,5	0	75,14	75,14
June	146	152,4	159,7	83,7	0	72,72	72,72
July	164,4	171,2	177,7	98,8	0	75,14	75,14
August	177,5	180	191,2	112,2	0	75,14	75,14
September	169,4	163,3	173,2	96,9	0	72,72	72,72
October	170,5	158,4	170,8	89,6	0	75,14	75,14
November	131,7	117,7	129,8	53,1	0	72,72	72,72
December	134,2	116,9	129,3	50,7	0	75,14	75,14
Year	1768,1	1700,3	1824	896,4	0	884,76	884,76

Main results simulasi variasi 17

	GlobHor	GlobEff	E Avail	EUnused	E Miss	E User	E Load
	kWh/m²	kWh/m²	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
January	125,2	111,2	122,6	44,1	0	75,14	75,14
February	120,7	109,8	118,3	48,9	0	67,87	67,87
March	142,1	132,9	145,4	66	0,312	74,83	75,14
April	134,8	131,7	140,5	64,8	0	72,72	72,72
May	151,7	154,8	165,1	85,7	0	75,14	75,14
June	146	152,4	159,7	83,4	0	72,72	72,72
July	164,4	171,2	177,6	98,1	0	75,14	75,14
August	177,5	180	191,1	111,7	0	75,14	75,14
September	169,4	163,3	173,2	96,8	0	72,72	72,72
October	170,5	158,4	170,9	91,4	0	75,14	75,14
November	131,7	117,7	129,9	54,5	0	72,72	72,72
December	134,2	116,9	129,4	51,4	0,443	74,7	75,14
Year	1768,1	1700,3	1823,7	896,8	0,756	884	884,76

BIODATA PENULIS

Penulis lahir pada tanggal 18 Maret 1999 di Depok, Jawa Barat. Penulis menempuh pendidikan di SDIT Taman Ilmu (2003 – 2010), SMPN 2 Depok (2010 – 2013), dan SMAN 2 Depok (2013 – 2016). Penulis melanjutkan studi di Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif sebagai Asisten Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan. Penulis memiliki pengalaman magang di PT. PJB Unit Pembangkitan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Cirata, Jawa Barat pada tahun 2019. Penulis dapat dihubungi melalui email : aryeshahakbar@gmail.com.