



**PEMODELAN DAN ANALISIS *BALANCED ENERGY*
FOTOVOLTAIK UNTUK LISTRIK
RUMAH TANGGA 1.300 VA**

THESIS

Oleh :

**Faghanie Sugarizka
181920201003**

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
2022**



**PEMODELAN DAN ANALISIS *BALANCED ENERGY*
FOTOVOLTAIK UNTUK LISTRIK
RUMAH TANGGA 1.300 VA
THESIS**

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan
Program Pendidikan S2 Teknik Elektro
dan mencapai gelar Magister Teknik

Oleh :

**Faghanie Sugarizka
181920201003**

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
2022**

MOTTO

Berlelah-lelahlah, manisya hidup terasa setelah lelah berjuang
(Imam Syafi'i)

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : FAGHANIE SUGARIZKA

NIM : 181920201003

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa proyek akhir yang berjudul: *“Pemodelan dan Analisis Balanced Energy Photovoltaic Untuk Listrik Rumah Tangga 1300 VA”* adalah benar benar hasil karya sendiri, kecuali jika dalam pengutipan substansi disebutkan sumbernya dan belum pernah diajukan pada institusi mana pun serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 29 Juli 2022

Yang menyatakan,

FAGHANIE SUGARIZKA

NIM 181920201003

THESIS

**PEMODELAN DAN ANALISIS *BALANCED ENERGY*
FOTOVOLTAIK UNTUK LISTRIK RUMAH TANGGA
1.300 VA**

Oleh :

Faghanie Sugarizka

181920201003

Pembimbing :

Dosen Pembimbing Utama : Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T

NIP. 19700826 199702 1 001

Dosen Pembimbing Anggota : Dr. Bambang Srikaloko, S.T., M.T

NIP 19710402200312 1 001

PERSETUJUAN PEMBIMBING

Laporan tugas akhir yang berjudul “**Pemodelan Dan Analisis *Balanced Energy* Fotovoltaik Untuk Listrik Rumah Tangga 1.300 VA**” oleh Faghania Sugarizka, NIM. 181920201003, Program Studi Magister Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember, telah disetujui oleh Dosen Pembimbing Utama dan Dosen Pembimbing Anggota pada :

Hari : Jum'at

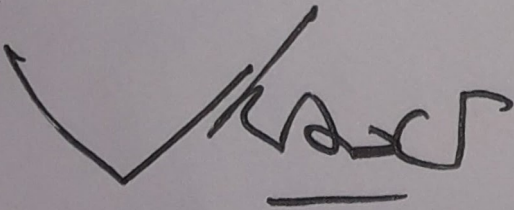
Tanggal : 29 Juli 2022

Tempat : Fakultas Teknik, Universitas Jember

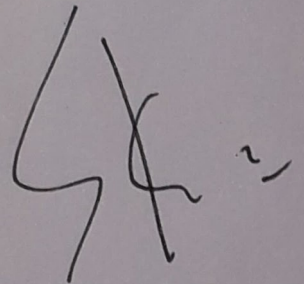
Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Anggota,



Dr. Triwahju Hardianto, ST., MT
NIP 197008261997021001



Dr. Bambang Srikaloko ST, MT
NIP 197104022003121001

LEMBAR PENGESAHAN

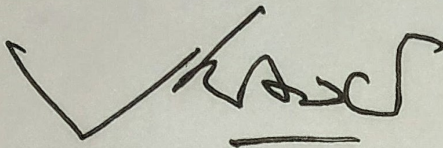
Laporan tugas akhir yang berjudul "*Pemodelan Dan Analisis Balanced Energy Fotovoltaik Untuk Listrik Rumah Tangga 1300VA*" oleh Faghanie Sugarizka, NIM.181920201003, Program Studi Magister Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember, telah diuji dan disahkan pada:

Hari : Jum'at

Tanggal : 29 Juli 2022

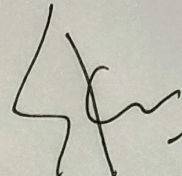
Tempat : Fakultas Teknik, Universitas Jember

Pembimbing Utama



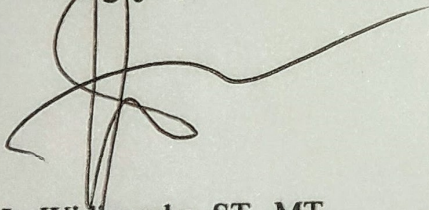
Dr. Triwahju Hardianto, ST., MT
NIP 197008261997021001

Pembimbing Anggota,



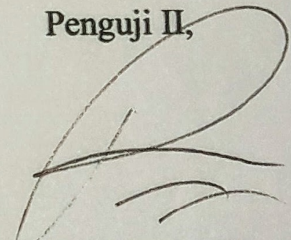
Dr. Bambang Srikaloko, ST, MT
NIP 197104022003121001

Penguji I,



Dr. Ir. Widjonarko, ST., MT
NIP 197109081999031001

Penguji II,



Dr. Ir. Satryo Budi Utomo, ST., MT
NIP 198501262008011002

Mengesahkan,
Dekan Fakultas Teknik,

Dr.Ir. Triwahju Hardianto, ST., MT
NIP. 19700826 199702 1 001

**Pemodelan Dan Analisis *Balanced Energy* Fotovoltaik Untuk
Listrik Rumah Tangga 1.300 VA** (*Modeling And Analysis Balanced
Energy Photovoltaic For HouseHold Electricity 1300 VA*)

Faghanie Sugarizka

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember

ABSTRAK

Semakin menipisnya cadangan bahan bakar fosil dan meningkatnya pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh kebutuhan listrik rumah tangga, transportasi dan sektor lain, telah menjadi masalah global yang serius. Sejumlah besar limbah beracun dan tidak beracun, dihasilkan selama tahap ekstraksi, pemurnian, dan transportasi batubara, minyak dan gas. Beberapa produk sampingannya, seperti senyawa organik yang mudah menguap, senyawa nitrogen dan belerang, dan minyak yang tumpah dapat mencemari udara, air, dan tanah pada tingkat yang berbahaya bagi kehidupan, jika tidak dikelola dengan benar. Pemanasan iklim, pengasaman laut, dan kenaikan permukaan laut adalah perubahan global yang ditingkatkan oleh emisi gas rumah kaca industri seperti karbon dioksida (CO₂) dan metana, serta aerosol partikel mikro seperti karbon hitam. Untuk mengatasi masalah tersebut, salah satu teknologi yang efektif dalam menghasilkan listrik adalah teknologi energi terbarukan yang berbasis pada sinar matahari. Akan tetapi pembangkitan listrik dengan sinar matahari ini terdapat masalah yaitu bahwa intensitas sinar matahari selalu berfluktuasi, sehingga untuk memenuhi energi tersebut diperlukan perencanaan yang matang, yaitu perencanaan yang disesuaikan dengan kebutuhan energi, sistem yang digunakan dan cuaca di lokasi. Kebutuhan energi listrik sangat tergantung dari beban yang digunakan. Namun untuk mengklasifikasi kebutuhan energi listrik tersebut dan mengatur tarifnya, menteri energi dan sumber daya mineral, telah menetapkan 13 klasifikasi beban, yaitu Rumah Tangga.

Kata kunci: Fotovoltaik, *Balanced Energy*, Listrik Rumah Tangga

**Pemodelan Dan Analisis *Balanced Energy* Fotovoltaik Untuk
Listrik Rumah Tangga 1.300 VA** (*Modeling And Analysis Balanced
Energy Photovoltaic For HouseHold Electricity 1300 VA*)

Faghanie Sugarizka

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember

ABSTRACT

The depletion of fossil fuel reserves and the increasing environmental pollution caused by the need for household electricity, transportation and other sectors, have become a serious global problem. A large amount of toxic and non-toxic waste is generated during the extraction, refining and transportation stages of coal, oil and gas. Some of its by-products, such as volatile organic compounds, nitrogen and sulfur compounds, and spilled oil can pollute the air, water and soil at levels that are harmful to life, if not managed properly. Climate warming, ocean acidification, and sea level rise are global changes that are enhanced by emissions of industrial greenhouse gases such as carbon dioxide (CO₂) and methane, as well as aerosols of micro-particles such as carbon black. To overcome this problem, one of the effective technologies in generating electricity is renewable energy technology based on sunlight. However, there is a problem in generating electricity with sunlight, namely that the intensity of sunlight always fluctuates, so that to meet this energy, careful planning is needed, namely planning that is tailored to energy needs, the system used and the weather at the location. Electrical energy needs are very dependent on the load. used. However, to classify these electrical energy needs and regulate the tariff, the minister of energy and mineral resources, has set 13 load classifications, namely Household.

Keywords: Photovoltaic, Balanced Energy, Household Electricity

RINGKASAN

Semakin menipisnya cadangan bahan bakar fosil dan meningkatnya pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh kebutuhan listrik rumah tangga, transportasi dan sektor lain, telah menjadi masalah global yang serius. Sejumlah besar limbah beracun dan tidak beracun, dihasilkan selama tahap ekstraksi, pemurnian, dan transportasi batubara, minyak dan gas. Beberapa produk sampingannya, seperti senyawa organik yang mudah menguap, senyawa nitrogen dan belerang, dan minyak yang tumpah dapat mencemari udara, air, dan tanah pada tingkat yang berbahaya bagi kehidupan, jika tidak dikelola dengan benar. Pemanasan iklim, pengasaman laut, dan kenaikan permukaan laut adalah perubahan global yang ditingkatkan oleh emisi gas rumah kaca industri seperti karbon dioksida (CO₂) dan metana, serta aerosol partikel mikro seperti karbon hitam. Untuk mengatasi masalah tersebut, salah satu teknologi yang efektif dalam menghasilkan listrik adalah teknologi energi terbarukan yang berbasis pada sinar matahari. Akan tetapi pembangkitan listrik dengan sinar matahari ini terdapat masalah yaitu bahwa intensitas sinar matahari selalu berfluktuasi, sehingga untuk memenuhi energi tersebut diperlukan perencanaan yang matang, yaitu perencanaan yang disesuaikan dengan kebutuhan energi, sistem yang digunakan dan cuaca di lokasi kebutuhan energi listrik sangat tergantung dari beban yang digunakan. Namun untuk mengklasifikasi kebutuhan energi listrik tersebut dan mengatur tarifnya, menteri energi dan sumber daya mineral, telah menetapkan 13 klasifikasi beban, yaitu rumah tangga.

PRAKATA

Puji syukur kami panjatkan kehadiran Allah SWT, serta sholawat serta salam penulis haturkan kepada baginda nabi besar Muhammad SAW, keluarga, sahabat, dan orang-orang yang mengikuti sunnahnya. Berkat rahmat dan hidayah-Nya sehingga laporan proyek akhir dengan judul “**Pemodelan Dan Analisis *Balanced Energy* Fotovoltaik Untuk Listrik Rumah Tangga 1.300 VA**” dapat terselesaikan dengan baik. Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat untuk kelulusan strata 2 (S2) pada Jurusan Teknik Elektro, Program Studi Magister Teknik Elektro, Universitas Jember. Dalam pelaksanaan penelitian ini, kami tidak lepas dari kesulitan dan permasalahan baik dari awal hingga akhir. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu terselesaikannya tugas akhir ini, baik secara langsung ataupun tidak langsung, dalam hal moril ataupun materil. Oleh karena itu disampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Triwahyu Hardianto, S.T., M.T selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember yang dalam hal ini juga selaku Dosen pembimbing Utama, yang telah meluangkan waktu dan pikiran guna memberikan masukan serta pengarahan pada tesis ini sehingga penulis dapat menyelesaikannya dengan lebih baik.
2. Bapak Dr. Ir. Bambang Sri Kaloko, S.T., M.T., IPM selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember dalam hal ini juga selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran dan perhatiannya guna memberikan pengarahan demi terselesaikannya tesis ini.
3. Bapak Dr. Ir. Widjonarko, S.T., M.T., IPM selaku Dosen Penguji I yang telah meluangkan waktu memberikan bimbingan serta masukan pada tesis ini demi tercapainya tesis ini menjadi lebih baik.

4. Bapak Dr. Ir. Satryo Budi Utomo, ST., MT selaku Dosen Penguji II yang telah meluangkan waktu memberikan bimbingan serta masukan pada tesis ini demi tercapainya tesis ini menjadi lebih baik dan sempurna.

5. Bapak Ir. Khairul Anam, S.T., M.T., Ph.D., IPM selaku Kepala Program Studi Magister Teknik Elektro, yang telah memberikan dukungan dan memberikan semangat untuk terus melanjutkan studi Magister sampai akhir

6. Orang tua dan kakak tercinta yang mendidik serta mendukung dengan penuh kasih sayang, memberikan dukungan, doa dan senantiasa memberikan semangat serta dorongan kepada penulis.

7. Keluarga besar Teknik Elektro dan teman-teman Magister Teknik Elektro Unej 2018 dan rekan-rekan CDAST Renewable Energy yang telah membantu penulis untuk menyelesaikan tesis ini, serta pihak-pihak lain yang tidak bisa penulis sebut satu persatu.

Penulis menyadari bahwa penulisan tesis ini masih jauh dari sempurna, untuk itu penulis mohon kritik, saran dan masukan yang bersifat membangun. Semoga tesis ini dapat bermanfaat dalam mengembangkan ilmu pengetahuan khususnya untuk disiplin Teknik Elektro. Akhir kata semoga laporan ini dapat memberikan manfaat bagi penulis khususnya dan bagi para pembaca yang berminat pada umumnya

Jember, 29 Juli 2022

Penulis

DAFTAR ISI

MOTTO	iii
PERNYATAAN.....	iv
PERSETUJUAN PEMBIMBING.....	vi
LEMBAR PENGESAHAN	vii
ABSTRAK	viii
RINGKASAN	x
PRAKATA.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL.....	xix
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Klasifikasi Golongan Tarif Listrik di Indonesia	5
2.2 Sistem Kelistrikan Rumah Tangga Berbasis Fotovoltaik	5
2.2 Hierarki PV	7
2.3 Prinsip kerja Sel PV	8
2.3 Model dan Karakteristik Sel PV	9
2.3.1 Energi Foton.....	9
2.3.2 Model Ekuivalen Sel PV	10

2.3.3 Karakteristik Sel PV	11
2.4 Model dan Karakteristik Modul PV Seri	12
2.5 Model PV Array	13
2.6 Energi PV Array Satu Tahun	13
2.7 Efisiensi PV Array	14
III. METODOLOGI	17
3.1 Diagram Alir Penelitian	17
3.2 Analisis Energi dan Kapasitas Fotovoltaik	18
3.3 Pencarian dan Akses Data Sumber Data Irradian dan Suhu Dari Internet	18
3.4 Pemodelan dan Simulasi	18
3.4.1 Pemodelan Fotovoltaik	18
3.4.2 Simulasi dan Pengujian	19
3.5 Pengambilan dan Analisis Data	19
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	21
4.1 Analisis Kebutuhan Energi Listrik Pelanggan 1.300 VA	21
4.1.1 Beban Listrik Pelanggan	21
4.1.2 Analisis Kebutuhan Listrik Harian	22
4.1.3 Kebutuhan Energi Listrik Bulanan.....	23
4.1.4 Kebutuhan Energi Listrik Tahunan.....	23
4.2 Data Irradian dan Suhu dari Internet	24
4.3 Pemodelan Irradian, Suhu dan Beban dengan PSIM	26
4.4 Perhitungan Jumlah PV Array	27
4.5 Pemodelan PV	27
4.5.1 Pemodelan PV Array Matematis.....	28

4.5.2	Pemodelan dengan Elemen PV PSIM.....	31
4.6	Pemodelan Baterai	34
4.7	Analisis Model Modul PV	35
4.7.1	Analisis pada Irradian Harian Maksimum	35
4.7.2	Analisis pada Irradian Harian Minimum	38
4.7.3	Analisis Model PV Satu Bulan	39
4.7.4	Analisis Model Modul PV Satu Tahun	40
4.8	Pengujian Sistem PV Array 1.300 VA.....	41
4.8.1	Analisis Jumlah Modul Sistem PV Array Optimal.....	41
4.8.2	Pengujian Model PV Array	42
4.8.3	Analisis <i>Balanced Energy</i> Model PV Array	43
4.8.4	Analisis Tegangan dan Arus Sistem	46
V.	KESIMPULAN	48
	DAFTAR PUSTAKA	49

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sistem kelistrikan rumah tangga [9].....	6
Gambar 2.2 Hierarki PV [10].....	7
Gambar 2.3 Prinsip kerja Sel PV [10].....	8
Gambar 2.4 Model ekuivalen Sel PV [11].....	10
Gambar 2.5 Karakteristik Sel PV.....	11
Gambar 2.6 Bentuk fisik dan spesifikasi Modul PV.....	12
Gambar 2. 7 Model Array PV [11]	13
Gambar 2.6 Grafik hubungan arus dan tegangan pada tiap sel.....	15
Gambar 3.1 Diagram alir Penelitian.....	17
Gambar 3.2 Model Array Fotovoltaik.....	18
Gambar 4.1 Pola beban harian tanggal 5 Januari.....	23
Gambar 4.2 Data irradian tanggal 1 Januari.....	24
Gambar 4.3 Data suhu 5 Januari	24
Gambar 4.4 Data irradian Bulan Desember	25
Gambar 4.5 Data suhu Bulan Desember	25
Gambar 4.6 Data irradian satu tahun	25
Gambar 4.7 Data suhu satu tahun	25
Gambar 4.8 Menu <i>Look up Table</i> pada PSIM.....	26
Gambar 4.9 Model Irradian pada PSIM.....	26
Gambar 4.10 Model PV	28
Gambar 4.11 Pemodelan PV Array Matematis.....	30
Gambar 4.12 Pemodelan modul PV.....	32

Gambar 4.13 Pemodelan Seri dan paralel dengan mengubah parameter	32
Gambar 4.14 Pemodelan Baterai.....	33
Gambar 4.15 Rangkaian pengujian Model Modul PV.....	34
Gambar 4.16 Hasil pengujian <i>balanced energy</i> pada irradian maksimum	37
Gambar 4.17 Hasil pengujian <i>balanced energy</i> pada irradian minimum	38
Gambar 4.18 Pengujian arus baterai modul PV bulanan	39
Gambar 4.19 Pengujian keseimbangan energi modul PV bulanan	40
Gambar 4.20 Pengujian model modul PV untuk satu tahun	41
Gambar 4.21 Rangkaian simulasi PV array untuk rumah 1.300 VA	43
Gambar 4.22. Grafik irradian (S), suhu (T), SOC baterai (SOC) dan daya listrik (PL) untuk Kelistrikan Rumah Tangga 1.300 VA dengan Panel Surya .	44
Gambar 4.22 Perbedaan beban riil dan daya terserap	45
Gambar 4.23. Grafik Daya (P), Tegangan Beban (VLV), Arus Beban (IL), Arus Panel Surya (IPV), arus Baterai (IBAT) dan untuk Kelistrikan Rumah Tangga 1.300 VA dengan Panel Surya	47

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Jumlah Pelanggan, Daya Tersambung dan Energi yang Dikonsumsi per Golongan Tarif	2
Tabel 2.1 Spesifikasi PV array	15
Tabel 4.1 Beban listrik	21
Tabel 4.2 Pencatatan KVA meter tanggal 5 Januari 2022	22
Tabel 4.3 Jumlah modul PV beban 1.300 VA dari berbagai kondisi.....	41

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Semakin menipisnya cadangan bahan bakar fosil dan meningkatnya pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh kebutuhan listrik rumah tangga, transportasi dan sektor lain, telah menjadi masalah global yang serius. Sejumlah besar limbah beracun dan tidak beracun, dihasilkan selama tahap ekstraksi, pemurnian, dan transportasi batubara, minyak dan gas. Beberapa produk sampingannya, seperti senyawa organik yang mudah menguap, senyawa nitrogen dan belerang, dan minyak yang tumpah dapat mencemari udara, air, dan tanah pada tingkat yang berbahaya bagi kehidupan, jika tidak dikelola dengan benar. Pemanasan iklim, pengasaman laut, dan kenaikan permukaan laut adalah perubahan global yang ditingkatkan oleh emisi gas rumah kaca industri seperti karbon dioksida (CO₂) dan metana, serta aerosol partikel mikro seperti karbon hitam [1].

Untuk mengatasi masalah tersebut, salah satu teknologi yang efektif dalam menghasilkan listrik adalah teknologi energi terbarukan yang berbasis pada sinar matahari. Akan tetapi pembangkitan listrik dengan sinar matahari ini terdapat masalah yaitu bahwa intensitas sinar matahari selalu berfluktuasi, sehingga untuk memenuhi energi tersebut diperlukan perencanaan yang matang, yaitu perencanaan yang disesuaikan dengan kebutuhan energi, sistem yang digunakan dan cuaca di lokasi [2-9].

Kebutuhan energi listrik sangat tergantung dari beban yang digunakan. Namun untuk mengklasifikasi kebutuhan energi listrik tersebut dan mengatur tarifnya, menteri energi dan sumber daya mineral, telah menetapkan 13 klasifikasi beban, yaitu **(a)** Rumah Tangga, meliputi 5 golongan yakni R-1/TR 900 VA – RTM, R-1/TR 1.300 VA, R-1/TR 2.200 VA, R-2/TR 3.500 VA s.d 5.500 VA, dan R-3/TR 6.600 VA ke atas (tarif listrik rumah tangga), **(b)** Bisnis Besar, meliputi 2 golongan yakni B-2/TR 6.600 VA s.d 200 kVA dan B-3/TM di atas 200 kVA (tarif listrik bisnis besar), **(c)** Industri Besar, meliputi 2 golongan yakni 2 I-3/ TM di atas 200 kVA dan I-4/ TT 30.000 kVA ke atas (tarif listrik industri besar), **(d)** Pemerintah, meliputi 3 golongan yakni P-1/TR 6.600 VA s.d 200 kVA, P-2/TM di

atas 200 kVA, dan P-3/TR (tarif listrik lembaga pemerintah), (e) Layanan Khusus, hanya ada 1 golongan yakni 1 L/TR, TM, TT (tarif listrik khusus) [10].

Tabel 1 Jumlah Pelanggan, Daya Tersambung dan Energi yang Dikonsumsi per Golongan Tarif

Golongan Tarif	Pelanggan	Tersambung (MVA)	Terjual (MWh)
S-1	198	0,04	0,33
S-2	1.743.879	4.593,13	5.177,20
S-3	2.195	1.838,13	2.920,86
R-1	70.838.134	62.244,14	99.181,70
R-2	1.496.302	6.265,85	8.374,00
R-3	272.047	3.586,61	4.599,82
B-1	3.238.531	5.810,00	7.645,65
B-2	669.223	13.410,65	17.906,11
B-3 **)	8.416	10.136,63	15.523,07
I-1	73.478	327,07	243,37
I-2	42.708	4.017,82	5.801,87
I-3	14.436	21.349,18	50.447,74
I-4	100	5.452,35	15.746,87
P-1	216.608	1.911,01	2.652,85
P-2	1.800	1.554,79	1.981,92
P-3	296.231	1.260,45	3.634,88
Traksi T-1	77	365,02	292,44
Curah C-1	23	34,45	100,29
Layanan Khusus	85.647	520,90	1.351,78
Total	79.000.033	144.678,22	243.582,75

Diantara klasifikasi tersebut, maka pelanggan rumah tangga R1 dengan daya 900, 1.300 dan 2200 VA saat ini merupakan pelanggan yang menggunakan energi listrik paling banyak, seperti tampak pada Tabel 1 [11]. Pelanggan 1.300 VA merupakan pelanggan yang sangat berkembang, baik dilihat dari penggunaan daya maupun kemandirian energi (tidak disubsidi), oleh karena itu agar penggunaan energi terbarukan memiliki pasar yang baik, maka perencanaan energi terbarukan perlu diarahkan pada pelanggan beban 1.300 VA ini.

Sistem yang banyak digunakan untuk menghasilkan energi listrik dari sinar matahari adalah sistem yang menggunakan panel surya. Umumnya sistem terdiri dari elemen utama yaitu solar panel, *charge controller*, baterai, inverter dan sistem kontrol. Permasalahan utama yang ada pada sistem ini adalah bagaimana menentukan kapasitas solar panel sehingga energi yang diperlukan tercukupi secara mandiri dari solar panel dan ketergantungan dari energi fosil dapat dihilangkan [4-9]. Penentuan kapasitas solar panel tentu terkait erat dengan pengeluaran untuk pembelian solar panel. Penentuan kapasitas solar panel juga sangat penting dikalkulasi dengan cermat, mengingat akhir-akhir ini cuaca berubah sangat fluktuatif, ditambah lagi pada beberapa tahun terakhir ini musim kemarau panjang sudah tidak terjadi lagi.

Berkaitan dengan masalah tersebut, maka pada tesis ini dikembangkan model dan analisis keseimbangan energi listrik rumah tangga dengan daya 1.300 VA yang berbasis pada *Solar Photovoltaic Array* atau *Photovoltaic* (PV) atau Fotovoltaik. Untuk kepentingan yang hal tersebut, maka data sangat diperlukan adalah irradiant dan temperatur, karakteristik PV, beban, dan baterai, sedangkan data terkait inverter dan solar charger bisa diabaikan. Data beban, pola beban, PV dan baterai akan diperoleh dari observasi dan pengukuran, sedangkan data irradiant dan suhu akan dicari dari internet. Data-data tersebut selanjutnya dibuat model dan simulatornya, dengan harapan mudah untuk digunakan dalam proses analisis sistem.

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang masalah yang telah diuraikan sebelumnya, maka rumusan masalah pada Tesis adalah:

1. Bagaimana pemodelan fotovoltaik, baterai, beban, irradiant dan suhu, serta analisisnya untuk pencapaian *balanced energy*.
2. Bagaimana analisis *balanced energy* dari model sistem kelistrikan rumah tangga 1.300 VA yang dibuat.

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian adalah untuk menghasilkan sistem kelistrikan rumah tangga yang berbasis pada Fotovoltaik untuk daya 1.300 V atau daya lainnya, sehingga kontribusi sumber energi terbarukan semakin tinggi.

1.4 Batasan Masalah

1. Penelitian ini hanya menggunakan simulasi PSIM yang data-data referensi untuk iradiance, suhu dan waktu diambil dari internet/web
2. Data beban berdasarkan hasil observasi atau hasil analisis eksperimen

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Klasifikasi Golongan Tarif Listrik di Indonesia

Berdasarkan Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia No. 26 Tahun 2016 tentang Tarif Tenaga Listrik Yang Disediakan oleh PT Perusahaan Listrik Negara (Persero), maka klasifikasi golongan tarif di Indonesia terbagi dalam 13 kelompok [10]. Sedangkan dari golongan tarif tersebut, maka kelompok 1 sampai 3, merupakan pelanggan dengan jumlah dan pengguna energi listrik terbanyak, sebagaimana sudah disampaikan pada Tabel 1.

Tabel 2.1 Golongan Tarif Listrik

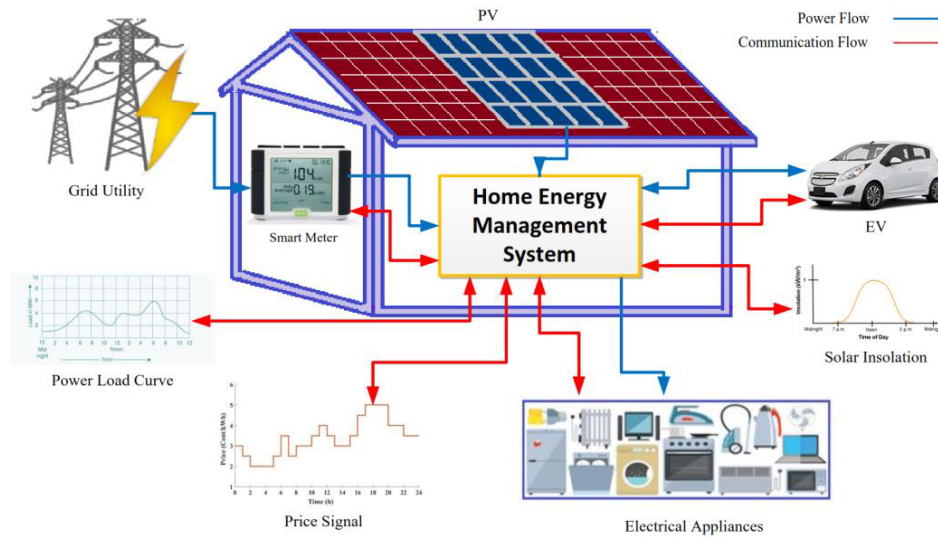
NO.	GOL. TARIF	BATAS DAYA
1.	R-1/TR	900 VA-RTM
2.	R-1/TR	1.300 VA
3.	R-1/TR	2.200 VA
4.	R-2/TR	3.500 VA s.d. 5.500 VA
5.	R-3/TR	6.600 VA ke atas
6.	B-2/TR	6.600 VA s.d. 200 kVA
7.	B-3/TM	di atas 200 kVA
8.	I-3/TM	di atas 200 kVA
9.	I-4/TT	30.000 kVA ke atas
10.	P-1/TR	6.600 VA s.d. 200 kVA
11.	P-2/TM	di atas 200 kVA
12.	P-3/TR	-
13.	L/TR, TM, TT	-

2.2 Sistem Kelistrikan Rumah Tangga Berbasis Fotovoltaik

Sistem kelistrikan rumah tangga berbasis Fotovoltaik dalam penelitian ini menunjukkan bahwa rumah dapat menyediakan listrik dengan energi utama berasal dari panel surya. Aliran daya dikontrol sedemikian rupa sehingga daya secara optimal dapat dipenuhi dari panel surya.

Representasi skema sistem kelistrikan rumah tangga berbasis Fotovoltaik ditunjukkan pada Gambar 2.1, yang terdiri dari peralatan rumah tangga, kendaraan

listrik atau *Electric Vehicle (EV)*, sistem fotovoltaik atau *Photovoltaic (PV)*, kurva beban harian, kurva intensitas cahaya matahari matahari harian, sinyal harga harian, utilitas jaringan, pengukur pintar, dan sistem kontrol untuk mengelola dan mengontrol aliran daya antara jaringan utilitas [9].



Gambar 2.1 Sistem kelistrikan rumah tangga [9]

Strategi manajemen energi untuk rumah pintar yang mengintegrasikan EV dan PV dibuat untuk meminimalkan biaya listrik rumah tangga dan meratakan kurva beban listrik rumah tangga. Delapan strategi manajemen energi dikembangkan, dibagi menjadi dua tahapan [9].

Tahap A, yang beroperasi dalam tiga mode tergantung pada tidak tersedianya pembangkit PV (yaitu, daya PV sama dengan nol), dan Tahap B, yang beroperasi dalam lima mode tergantung pada ketersediaan daya PV (yaitu, daya PV lebih besar dari nol). Parameter EV, harga waktu penggunaan, permintaan daya rumah tangga yang bervariasi terhadap waktu, dan profil pembangkitan PV digunakan sebagai input untuk penentuan strategi guna memastikan bahwa biaya listrik dan kurva daya dapat diminimalkan, sementara dari sisi kebutuhan daya juga masih bisa dipenuhi.

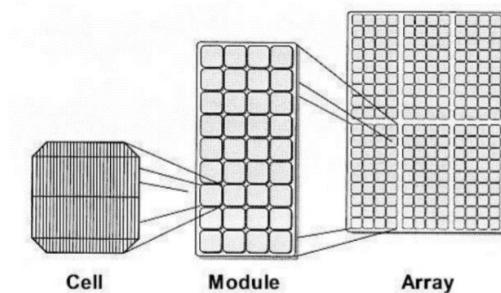
Penelitian tersebut telah memberikan hasil analisis bahwa biaya listrik harian untuk sistem rumah pintar terintegrasi PV dapat membawa manfaat ekonomi yang signifikan bagi pemilik rumah, di mana biaya listrik harian dikurangi dari \$ 32,7 menjadi \$ 28,1, atau \$ 4,6.

2.2 Hierarki PV

Energi matahari adalah sumber energi dari hampir semua energi di bumi. Manusia, semua hewan dan tumbuhan lainnya, bergantung pada matahari untuk pemanas dan makanan. Namun, orang juga memanfaatkan energi matahari dengan berbagai bentuk. Bahan bakar fosil, yang berupa batu bara dan minyak bumi, merupakan materi tanaman dari zaman geologis masa lalu yang saat ini digunakan untuk transportasi dan pembangkit listrik. Demikian pula, biomassa mengubah energi matahari menjadi bahan bakar, yang kemudian dapat digunakan untuk panas, transportasi atau listrik.

Fotovoltaik (PV) adalah metode sederhana dan elegan untuk memanfaatkan energi matahari. Perangkat PV (sel surya) unik karena secara langsung mengubah radiasi matahari yang terjadi menjadi listrik, tanpa kebisingan, polusi, atau bagian yang bergerak, menjadikannya kuat, andal, dan tahan lama.

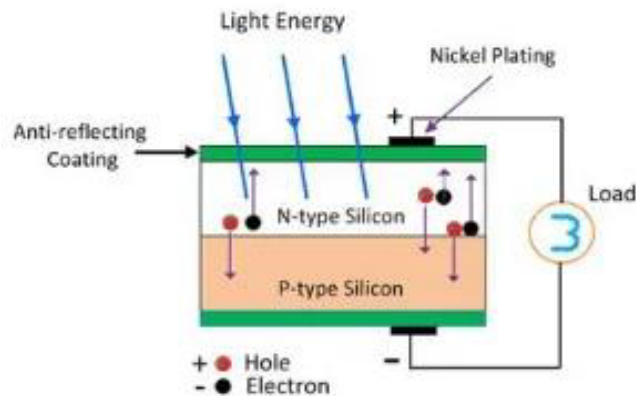
Panel fotovoltaik atau panel surya (*PV Panel*) terdiri dari sel fotovoltaik atau sel surya (*PV Cell*) yang terhubung bersama, sedangkan **Solar Photovoltaic Array** atau **Fotovoltaik (PV Array)** adalah sistem yang terdiri dari sekelompok panel surya yang terhubung bersama [10]. Gambar 2.2 memperlihatkan hierarki tersebut.



Gambar 2.2 Hierarki PV [10]

2.3 Prinsip kerja Sel PV

Sel PV memiliki fungsi mengubah intensitas sinar matahari menjadi energi listrik. Sel PV menghasilkan daya listrik dengan tegangan dan arus yang tertentu. Sel PV yang mengubah intensitas cahaya menjadi listrik. Saat intensitas cahaya berkurang (berawan, hujan, mendung) arus listrik yang dihasilkan juga akan berkurang. Prinsip kerja sel PV dapat dijelaskan dengan gambar 2.3.



Gambar 2.3 Prinsip kerja Sel PV [10]

Bahan semi konduktor dalam sel PV didoping untuk membentuk struktur PN sebagai medan listrik internal. Silikon tipe-P (positif) memiliki kecenderungan untuk melepaskan elektron dan memperoleh lubang sedangkan silikon tipe-N (negatif) menerima elektron. Ketika sinar matahari mengenai sel, foton dalam cahaya mengeksitasi beberapa elektron dalam semikonduktor menjadi pasangan lubang-elektron (negatif-positif). Karena ada medan listrik internal, pasangan ini diinduksi untuk berpisah. Akibatnya elektron berpindah ke elektroda negatif sedangkan hole berpindah ke elektroda positif. Jika pada sistem ada kawat penghantar menghubungkan elektroda negatif, beban, dan elektroda positif secara seri, maka akan ada arus listrik dihasilkan untuk memasok beban.

2.3 Model dan Karakteristik Sel PV

2.3.1 Energi Foton

Sinar matahari adalah bentuk radiasi elektromagnetik dan cahaya tampak yang kita lihat adalah bagian kecil dari spektrum elektromagnetik. Cahaya dapat dianggap terdiri dari paket atau partikel energi, yang disebut foton. Foton, seperti semua partikel mekanika kuantum lainnya seperti elektron, proton, dll, paling akurat digambarkan sebagai paket gelombang. Paket gelombang didefinisikan sebagai kumpulan gelombang yang dapat berinteraksi sedemikian rupa sehingga paket gelombang dapat muncul terlokalisasi secara spasial (dengan cara yang sama seperti gelombang persegi yang dihasilkan dari penambahan jumlah gelombang sinus yang tak terbatas), atau mungkin bergantian muncul hanya sebagai gelombang. Dalam kasus di mana paket gelombang terlokalisasi secara spasial, ia bertindak sebagai partikel. Oleh karena itu, tergantung pada situasinya, foton dapat muncul sebagai gelombang atau partikel dan konsep ini disebut dualitas gelombang-partikel.

Ada hubungan terbalik antara energi foton (E) dan panjang gelombang cahaya (λ) yang diberikan oleh persamaan [10]:

$$E = h c / \lambda \dots\dots\dots(2.1)$$

Dengan h adalah konstanta Planck, $h = 6,626 \times 10^{-34}$ joule·s dan c adalah kecepatan cahaya, $c = 2,998 \times 10^8$ m/s atau $hc = 1,99 \times 10^{25}$ joule-m

Ketika membahas partikel seperti foton atau elektron, satuan energi yang umum digunakan adalah elektron-volt (eV). Elektron volt adalah energi yang diperlukan untuk menaikkan elektron dalam tegangan 1 volt, sehingga foton dengan energi 1 eV = $1,602 \times 10^{-19}$ J. Oleh karena itu, kita dapat menulis ulang konstanta di atas untuk hc dalam bentuk eV:

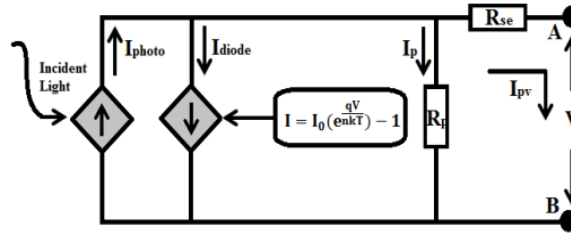
$$hc = (1,99 \times 10^{-25} \text{ joule-m}) \times (1 \text{ eV} / 1,602 \times 10^{-19} \text{ joule}) = 1,24 \times 10^{-6} \text{ eV-m}$$
$$hc = (1,24 \times 10^{-6} \text{ eV-m}) \times (10^6 \text{ m} / \text{m}) = \underline{1,24 \text{ eV-}\mu\text{m}}$$

Dengan demikian maka energi foton yang dihasilkan dapat dituliskan kembali menjadi:

$$E (\text{eV}) = 1,24 / \lambda(\mu\text{m}) \dots\dots\dots(2.2)$$

2.3.2 Model Ekuivalen Sel PV

Model ekuivalen secara konvensional untuk sel PV, dan terdiri dari dioda anti-paralel, satu arus sumber, hambatan. Model sel PV tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Model ekuivalen Sel PV [11]

Dengan menerapkan hukum Kirchhoff arus dalam model yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 arus PV total adalah [11]:

$$I_{pv} = I_{photo} - I_{diode} - I_p \dots\dots\dots(2.3)$$

dimana I_{photo} adalah arus radiasi atau arus foto photo ketika sel PV terkena sinar matahari. Arus foto ini bervariasi secara linier terhadap radiasi matahari pada suhu tertentu. I_{dioda} adalah arus dioda antiparalel, dan menghasilkan arus non-linier pada sel PV. Arus yang mengalir melalui resistor shunt diwakili oleh I_p . Dengan menggantikan persamaan untuk I_p dan I_{diode} dalam Persamaan, dan PV, maka persamaan menjadi [11]:

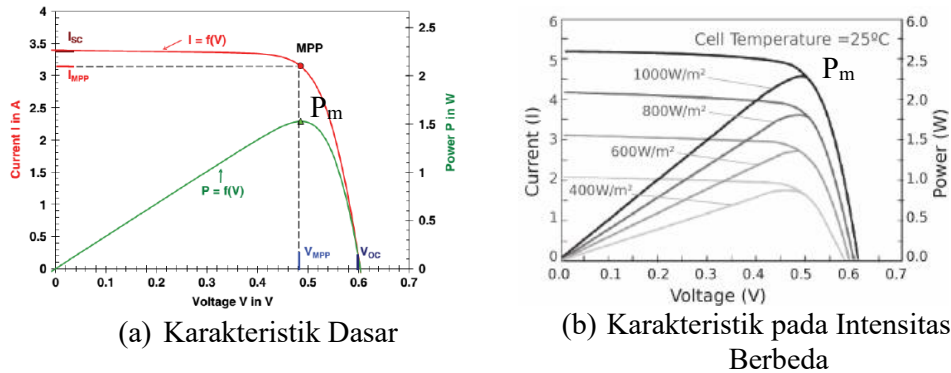
$$I_{pv} = I_{photo} - I_0 \left(e^{\frac{q(V + I_{pv}R_{se})}{nkT}} - 1 \right) - \left(\frac{V + I_{pv}R_{se}}{R_p} \right) \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana $q = 1,602 \times 10^{-19}$ C, faktor idealitas dioda adalah diwakili oleh n , konstanta Boltzmann direpresentasikan sebagai $k = 1.3806503 \times 10^{-23}$ J/K, I_0 adalah arus

saturasi dari dioda, suhu sel PV diwakili oleh T , R_p & R_{se} mewakili resistansi shunt dan seri pada sel PV.

2.3.3 Karakteristik Sel PV

Pada persamaan (2.4), jika pada keluaran sel PV terdapat arus yang paling besar pada saat terkena cahaya matahari konstan, maka arus tersebut disebut arus maksimum (I_m), yaitu arus yang dapat diberikan sel surya tanpa ada kerusakan. Sedangkan pada saat arus maksimum tersebut keluaran dihubung singkat dan terjadi arus yang lebih besar, maka arus tersebut disebut arus hubung singkat (I_{sc}). Begitu juga untuk tegangan, biasanya tegangan rangkaian terbuka sel surya hampir sama dengan 0,5 sampai 0,6 V, dan biasanya dinotasikan dengan V_{oc} . Gambar 2.5 memperlihatkan karakteristik sel PV. Sedangkan tegangan yang paling besar yang bias dihasilkan dengan ada beban adalah tegangan maksimum (V_m).



Gambar 2.5 Karakteristik Sel PV

Daya listrik maksimum yang dapat dihasilkan oleh satu sel surya terjadi pada titik tekuk kurva karakteristik. Hal ini ditunjukkan pada $v-i$ karakteristik sel surya dengan notasi P_m dan titik $V-I$ yang menghasilkan daya maksimum tersebut disebut Titik Daya Maksimum atau Maximum Power Point (MPP).

Perbandingan daya listrik maksimum sel PV dengan input daya radiasi ke sel PV yang dinyatakan dalam persentase, disebut dengan efisiensi sel PV. Jika dianggap bahwa daya radiasi di bumi adalah sekitar 1000 watt/meter persegi maka jika luas permukaan sel yang terkena cahaya matahari adalah A , maka total daya

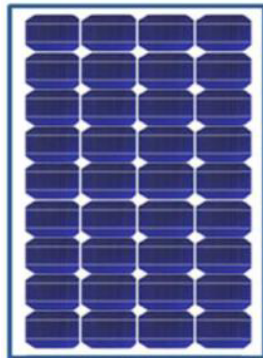
radiasi pada sel akan menjadi 1000 A watt. Oleh karena itu efisiensi sel PV dapat dinyatakan pada persamaan (2.5). Secara teoritis, efisiensi bias mencapai 35%, tetapi pada kenyataannya, saat ini sel PV memiliki efisiensi antara 12-17%.

$$Efficiency(\eta) = \frac{P_m}{P_{in}} \approx \frac{P_m}{1000A} \dots\dots\dots (2.5)$$

2.4 Model dan Karakteristik Modul PV Seri

Jumlah sel PV yang terhubung seri, dinotasikan N_s . Misalnya, panel BP Solar BP170B terdiri dari: $N_s=72$, dan panel SunPower SPR-76R-BLK-U terdiri dari: $N_s=24$. Gambar 2.6 memperlihatkan bentuk fisik dan spesifikasi salah satu modul PV, yaitu MSX60. Arus keluaran panel PV ($I_{pv,S}$), dalam hal ini adalah keluaran arus modul PV ketika sel N_s terhubung secara seri, dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$I_{pv,P} = I_{photo} - I_0 \left(e^{\frac{q(V_P + I_{pv,P}R_{se})}{N_s n k T}} - 1 \right) - \left(\frac{V_P + I_{pv,P}R_{se}N_s}{N_s R_p} \right) \dots\dots\dots (2.6)$$



Description	MSX 60
Maximum Power (P_{max})	60W
Voltage @ P_{max} (V_{max})	17.1V
Current at @ P_{max} (I_{max})	3.5A
Guaranteed Minimum P_m	58W
Short Circuit current (I_{sc})	3.8A
Open Circuit voltage (V_{oc})	21.1 V
Temperature co-eff of V_{oc}	-(80±10) mV/°C
Temperature co-eff of I_{sc}	(0.065±0.15) %/°C

Gambar 2.6 Bentuk fisik dan spesifikasi Modul PV

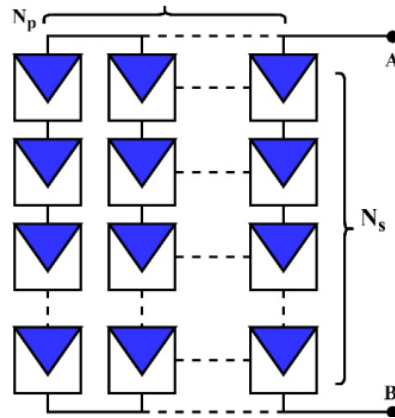
Persamaan (2.6) diperluas ke sembarang nilai N_s , dan itu adalah berlaku untuk semua modul PV. Jika N_{ps} mewakili jumlah panel terhubung secara seri, dan N_{pvs} mewakili jumlah sel PV yang terhubung seri di setiap panel, maka persamaan N_s dapat ditulis menjadi:

$$N_s = N_{ps} * N_{pvs} \dots\dots\dots(2.7)$$

2.5 Model PV Array

Dalam array PV, modul PV dihubungkan secara seri dan paralel. Konfigurasi dari array PV ditunjukkan pada Gambar 2.7. Jumlah seri yang terhubung dinotasikan N_s (dalam Modul PV), sedangkan PV yang terhubung paralel dinotasikan N_p . Hubungan antara arus dan tegangan array PV ini adalah [11] :

$$I_{ar} = N_p I_{photo} - N_p I_0 \left(e^{\frac{q(V_{ar} + I_{ar} \frac{N_s R_{se}}{N_p})}{N_s n k T}} - 1 \right) - \left(\frac{V_{ar} + I_{ar} R_{se} \frac{N_s}{N_p}}{\frac{N_s R_p}{N_p}} \right) \dots\dots\dots (2.8)$$



Gambar 2. 7 Model Array PV [11]

2.6 Energi PV Array Satu Tahun

Untuk menghitung daya listrik pada array PV dalam satu tahun dapat digunakan rumus umum sebagai berikut [12]:

$$E = A * r * H * PR \dots\dots\dots (2.9)$$

Dimana:

E = Energi (kWh)

A = Luas total Fotovoltaik(m²)

r = efisiensi Fotovoltaik(%)

H = Radiasi matahari rata-rata tahunan pada panel miring

PR = Rasio kinerja, koefisien rugi-rugi (antara 0,5-0,9, nilai umum = 0,75)

Keterangan:

Parameter	Definisi	Keterangan
R	adalah hasil Fotovoltaik yang diberikan oleh rasio : daya listrik (dalam kWp) dari satu Fotovoltaik dibagi dengan luas satu panel	Efisiensi Fotovoltaik modul PV 250 Wp dengan luas 1,6 m ² adalah 15,6%. Perhatikan bahwa rasio nominal ini diberikan untuk kondisi uji standar (STC) : radiasi=1000 W/m ² , suhu sel=25 derajat celsius, Kecepatan angin=1 m/s, AM=1,5.
H	adalah radiasi matahari rata-rata tahunan pada panel miring. Antara 200 kWh/m ² .y (Norwegia) dan 2600 kWh/m ² .y (Arab Saudi)	Indonesia 1000 kWh/m ² .y
PR (Performance Ratio)	adalah nilai yang sangat penting untuk mengevaluasi kualitas instalasi fotovoltaik karena memberikan kinerja instalasi secara independen dari orientasi, kemiringan panel. Ini mencakup semua kerugian.	<ul style="list-style-type: none"> - Kerugian inverter (4% hingga 10%) - Kehilangan suhu (5% hingga 20%) - Kehilangan kabel DC (1 sampai 3 %) - Kabel AC rugi (1 sampai 3 %) - Cuaca 0 % sampai 80% - Kerugian pada radiasi lemah 3-7% - Kerugian akibat debu/salju (2%)

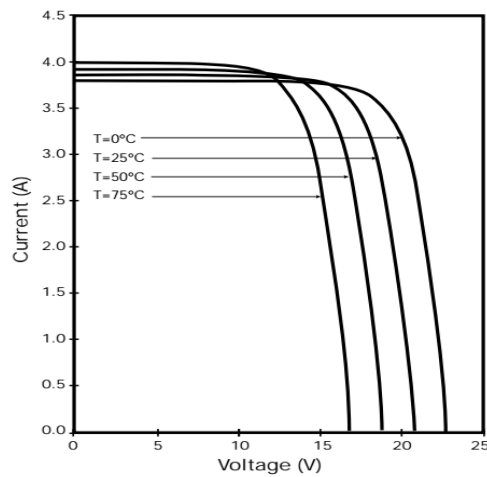
2.7 Efisiensi PV Array

Salah satu karakteristik yang penting pada PV array adalah efisiensi. Efisiensi array fotovoltaik merupakan prosentase perbandingan antara energi foton yang diterima oleh fotovoltaik dari sinar matahari dengan energi listrik yang dihasilkan oleh fotovoltaik, atau perbandingan antara persamaan (2.9) dengan persamaan (2.2). Jika dituliskan dalam efisiensi daya persamaan tersebut menjadi sebagai berikut.

$$\eta = \frac{P_{SolarCell}}{P_{Sun}} \dots\dots\dots(2.10)$$

Tabel 2.1 Spesifikasi PV array

Maximum power (P_{max})	60W
Voltage @ P_{max} (V_{mp})	17.1V
Current @ P_{max} (I_{mp})	3.5A
Guaranteed minimum P_{max}	58W
Short-circuit current (I_{sc})	3.8A
Open-circuit voltage (V_{oc})	21.1V
Temperature coefficient of open-circuit voltage	$-(80 \pm 10) \text{mV}/^\circ\text{C}$
Temperature coefficient of short-circuit current	$(0.065 \pm 0.015) \%/^\circ\text{C}$
Temperature coefficient of power	$-(0.5 \pm 0.05) \%/^\circ\text{C}$
NOCT	$47 \pm 2^\circ\text{C}$



Gambar 2.6 Grafik hubungan arus dan tegangan pada tiap sel

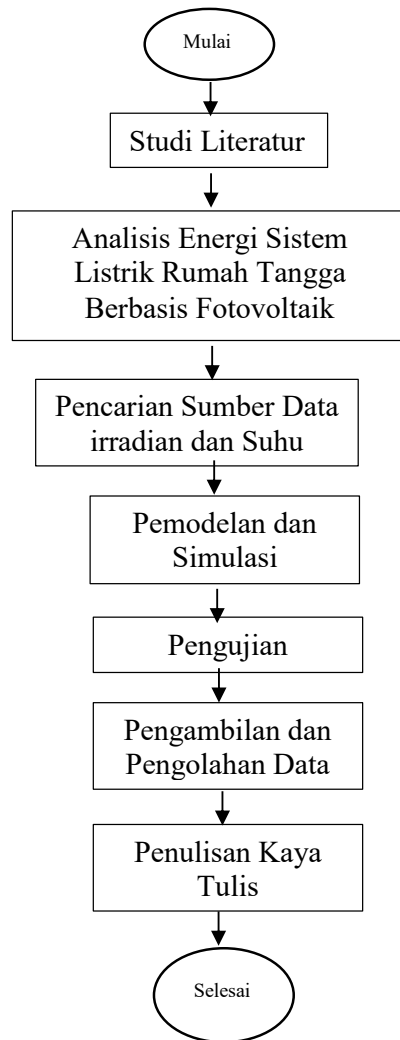
Pada penelitian ini digunakan panel modul fotovoltaik multikristalin 60-watt seri MSX dari BP Solar. MSX 60 menyediakan daya maksimum nominal 60 watt, dan sangat cocok untuk aplikasi fotovoltaik tradisional seperti telekomunikasi, daerah dan klinik terpencil, pompa, dan alat bantu navigasi darat. Modul PV ini terdiri dari 36 sel surya silikon multikristalin yang dikonfigurasi sebagai dua rangkaian seri dari 18 sel; Sel dilaminasi di antara lembaran etilena vinil asetat (EVA) dan kaca tempered 3mm dengan transmisivitas tinggi. Dimensi dari modul ini adalah 110,5 X 50,2 cm.

Tabel 2.1 memperlihatkan spesifikasi dari Modul PV yang dimaksudkan, sedangkan Gambar 2.6 memperlihatkan grafik hubungan arus dan tegangan pada tiap sel yang ada pada modul PV.

III. METODOLOGI

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian dilakukan dengan tahap-tahap sebagai mana digambarkan dengan diagram alir pada Gambar 3.1. Masing-masing tahap teknis akan dirinci pada sub bagian tersendiri pada bab ini.



Gambar 3.1 Diagram alir Penelitian

Studi literature meliputi upaya untuk mendapatkan literatur tentang analisis kebutuhan energi, mendapatkan sumber data irradian dan suhu, penentuan

kapasitas PV yang harus dipasang, pemodelan serta simulasi dengan mengacu pada penelitian sebelumnya/artikel.

3.2 Analisis Energi dan Kapasitas Fotovoltaik

Kebutuhan energi pada pelanggan 1.300 VA diamati berdasarkan beban terpasang dan waktu menyala. Dari data beban dan waktu menyala, maka dapat ditentukan energi yang diperlukan. Data beban dan waktu menyala dibuat dalam bentuk tabel.

Setelah mendapatkan data energi harian, selanjutnya akan dihitung kebutuhan energi bulanan dan tahunan. Dari data kebutuhan energi, maka dapat diperkirakan kebutuhan luasan PV dengan menggunakan persamaan (2.9).

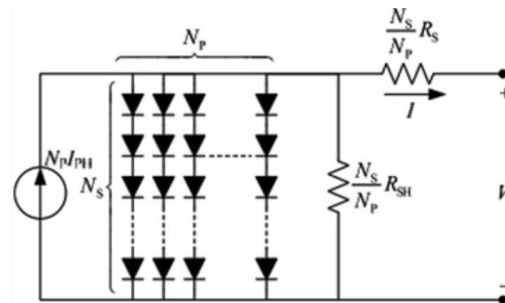
3.3 Pencarian dan Akses Data Sumber Data Irradian dan Suhu Dari Internet

Untuk mendapatkan data irradian dan suhu yang digunakan sebagai masukan pada PV, maka dari internet dicari web yang terkait dengan kata kunci **irradiation data**. Dari penelusuran tersebut akan dicoba diakses dan akan dipilih sumber yang mudah diakses serta memiliki kesesuaian data yang tinggi.

3.4 Pemodelan dan Simulasi

3.4.1 Pemodelan Fotovoltaik

Fotovoltaik mengubah sinar matahari (foton) menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik. Fotovoltaik dihubungkan secara seri-paralel (array) untuk mendapatkan nilai arus dan tegangan yang dibutuhkan. Skema dari pemodelan mengacu pada sel PV diperlihatkan pada Gambar 3.2 berikut.



Gambar 3.2 Model Array Fotovoltaik

Dengan mengacu pada pustaka di bab 2 dan dengan memperhatikan Gambar 3.2, maka dapat PV array dapat dimodelkan dengan persamaan di bawah, dengan I_{photo} atau I_{ph} dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

$$I_{ar} = N_p I_{photo} - N_p I_0 \left(e^{\frac{q(V_{ar} + I_{ar} \frac{N_s R_{se}}{N_p})}{N_s n k T}} - 1 \right) - \left(\frac{V_{ar} + I_{ar} R_{se} \frac{N_s}{N_p}}{\frac{N_s R_p}{N_p}} \right) \dots\dots(3.2)$$

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i(T - 298)] \times I_r / 1000 \dots\dots(3.3)$$

Dalam hal ini I_{ph} : photo-current (A); I_{sc} : short circuit current (A); K_i : short-circuit current PV pada 25 °C (25+273=298 °K) dan pada irradian 1000 W/m²; T : operating temperature (K) dan I_r : solar irradiation (W/m²). Selain itu besar arus diode dapat ditentukan dari persamaan (3.2) dan (3.3).

$$I_0 = I_{rs} \left[\frac{T}{T_r} \right]^3 \exp \left[\frac{q \times E_{g0}}{nk} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \right] \dots\dots(3.4)$$

$$I_{rs} = I_{sc} / [\exp(qV_{OC} / N_s k n T) - 1] \dots\dots(3.5)$$

I_0 adalah arus saturasi pada suhu tertentu, T_r : nominal temperature = 298.15°K, I_{rs} : arus module reverse saturation, q : electron charge = 1.6×10⁻¹⁹C; V_{oc} : open circuit voltage (V); N_s : jumlah sel seri; n : faktor diode ideal; k : konstanta Boltzmann; E_{g0} : energi gap semikonductor, = 1.1 eV.

3.4.2 Simulasi dan Pengujian

Setelah dilakukan pemodelan, maka sistem akan disimulasikan dengan PSIM. Simulasi akan memberikan gambaran sistem secara keseluruhan dan akan dilakukan perbaikan jika pada sistem masih ada ketidak sesuaian. Jika simulasi sudah sesuai, maka akan dilakukan pengujian dengan pengambilan data sesuai keperluan analisis data.

3.5 Pengambilan dan Analisis Data

Model selanjutnya akan diuji dan divalidasi menggunakan simulasi guna mendapatkan model yang valid. Simulasi model keseluruhan akan menggunakan

masukannya pola radiasi sinar matahari dan suhu harian, bulanan dan tahunan. Data diambil dari laman *Photovoltaic Geographical Information System* (https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#) dengan pilihan lokasi Universitas Jember dan pada rentang data antara tahun 2007-2016. Hasil simulasi selanjutnya digunakan untuk analisis data, dengan analisis dilakukan terutama untuk keseimbangan energi atau *balanced energy*.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Kebutuhan Energi Listrik Pelanggan 1.300 VA

4.1.1 Beban Listrik Pelanggan

Untuk mengetahui kebutuhan energi pada pelanggan 1.300 VA, maka perlu diketahui terlebih dahulu data beban yang terpasang pada pelanggan, yang dalam hal ini adalah peralatan listrik rumah tangga. Tabel 4.1 memperlihatkan beban dan daya yang diperlukan pada pelanggan rumah tangga yang menjadi obyek penelitian.

Tabel 4.1 Beban listrik

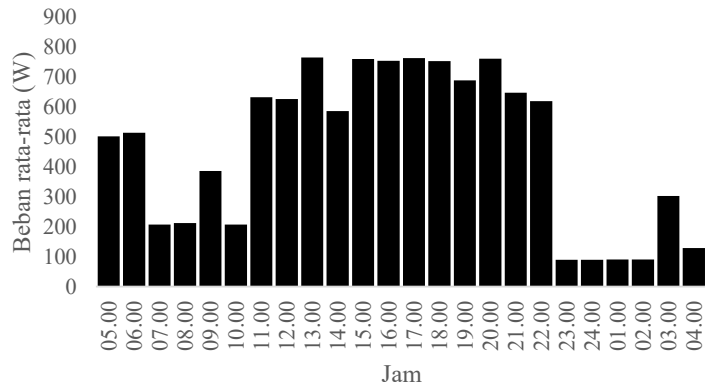
No.	Nama Beban	Beban (W)	No.	Nama Beban	Beban (W)
1	Kulkas	80	16	Lampu kamar bawah depan	12
2	pompa air bawah	300	17	Lampu Kamar bawah Tengah	10
3	pompa air atas	300	18	Lampu Ruang Keluarga Bawah	10
4	TV bawah	80	19	Lampu Teras Bawah	15
5	TV Kamar Makan	80	20	Lampu Teras Atas	10
6	Ketel Air	350	21	Lampu Ruang atas	10
7	Rice cooker	350	22	Lampu Kamar Mandi Bawah	10
8	Lap top 1	65	23	Lampu Kamar Mandi Atas	10
9	Lap top 2	65	24	Lampu Ruag Atas	15
10	Charger HP	15	25	Lampu Kamar atas Kanan	10
11	Lampu kamar belakang	7	26	Lampu Kamar atas Kiri	10
12	Lampu Dapur	10	27	Lampu Taman Atas	14
13	Lampu ruang makan	15	28	Lampu Garasi	10
14	Lampu Ruang Tamu	15	29	AC	760
15	Lampu Ruang Bawah Tengah	22	30	Kipas Angin	60

4.1.2 Analisis Kebutuhan Listrik Harian

Berdasarkan pola penyalan beban selama satu hari pada tanggal 5 Januari 2022, maka hasil pencatatan KVA meter diperlihatkan pada Tabel 1, sedangkan grafik pola beban rata-rata tiap jam yang dihasilkan tampak seperti pada Gambar 4.2. Tampak bahwa penyerapan daya tinggi terjadi pada siang hari, karena penggunaan pendingin ruang (Air Conditioner (AC)) yang menyerap daya 750 VA pada saat kompresor menyala dan 150 VA pada saat kompresor tidak menyala. Beban tinggi tersebut mendekati kapasitas puncak sistem kelistrikan, yaitu 1.270 VA.

Tabel 4.2 Pencatatan KVA meter tanggal 5 Januari 2022

Jam	Angka KVA Meter	Energi digunakan (W.jam)
04.00	546,62	
05.00	546,12	502
06.00	545,60	514
07.00	545,40	207
08.00	545,19	212
09.00	544,80	386
10.00	544,59	207
11.00	543,96	632
12.00	543,33	626
13.00	542,57	765
14.00	541,98	586
15.00	541,22	760
16.00	540,47	754
17.00	539,71	763
18.00	538,95	753
19.00	538,26	689
20.00	537,50	761
21.00	536,86	647
22.00	536,24	619
23.00	536,15	89
24.00	536,06	89
01.00	535,97	91
02.00	535,88	91
03.00	535,57	302
04.00	535,45	129



Gambar 4.1 Pola beban harian tanggal 5 Januari

Berdasarkan hasil pengukuran, energi yang digunakan dalam satu hari pengujian (Wth) adalah 11,174 KVAH. Jika harga energi listrik sebagaimana ketentuan adalah Rp 1.515,72/kWh, maka pengeluaran untuk pembelian energi listrik dalam satu hari adalah sebesar Rp 16.936,00.

4.1.3 Kebutuhan Energi Listrik Bulanan

Berdasarkan kebutuhan energi harian, maka dapat diperkirakan kebutuhan energi bulanan, yaitu dengan mengalikan kebutuhan energi harian dikalikan dengan 30 hari. Berdasarkan pada asumsi tersebut, maka kebutuhan energi bulanan adalah sebesar 335,205 KVAH. Jika harga energi sebesar Rp 1.515,72/kWh, maka untuk satu bulan, pengeluaran untuk energi adalah sebesar Rp 508.076,923.

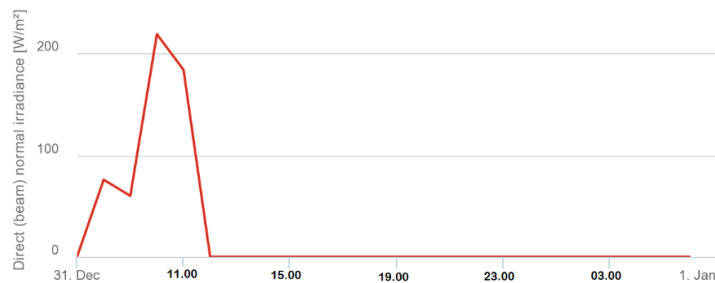
4.1.4 Kebutuhan Energi Listrik Tahunan

Dengan asumsi yang sama dengan kebutuhan energi bulanan, maka kebutuhan energi untuk satu tahun dapat dihitung dengan mengalikan energi harian dikalikan dengan 365 hari, dan didapatkan kebutuhan energi sebesar 4.078,328 KVAH. Dan jika dirupiahkan, maka pengeluaran untuk energi untuk satu tahun adalah sebesar Rp 6.181.602,558.

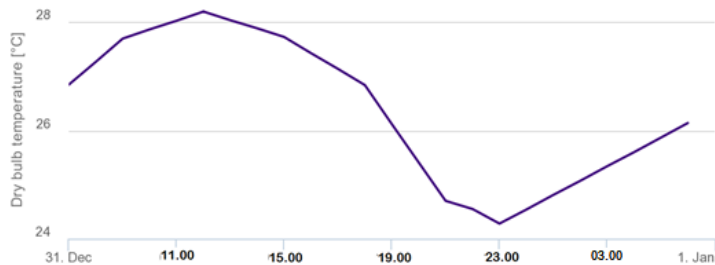
4.2 Data Irradian dan Suhu dari Internet

Hasilnya akan ditemukan sejumlah web diantaranya <https://solcast.com/>, <http://www.soda-pro.com/>, <https://solargis.com/>, <https://www.ncei.noaa.gov/>, <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>, dan <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>. Diantara web tersebut, maka web yang terakhir yaitu <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis> merupakan web yang mudah diakses serta dapat memberikan data yang lebih sesuai.

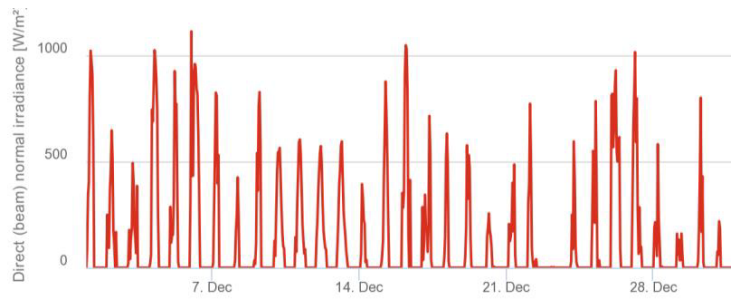
Pada web tersebut, selain lokasi, dapat juga ditentukan kurun waktu data yang diinginkan, walaupun data yang ditampilkan adalah data sampai tahun 2016. Contoh data irradian dan suhu harian, bulanan dan tahunan yang didapatkan dalam bentuk grafik disajikan pada Gambar 4.2 sampai 4.7.



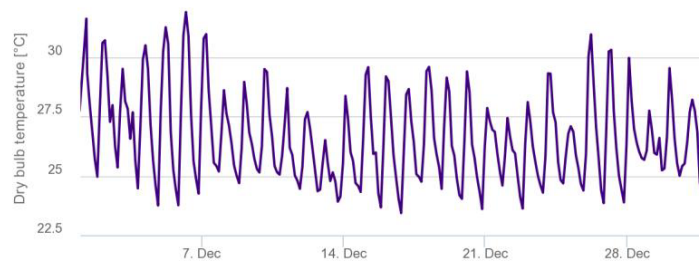
Gambar 4.2 Data irradian tanggal 1 Januari



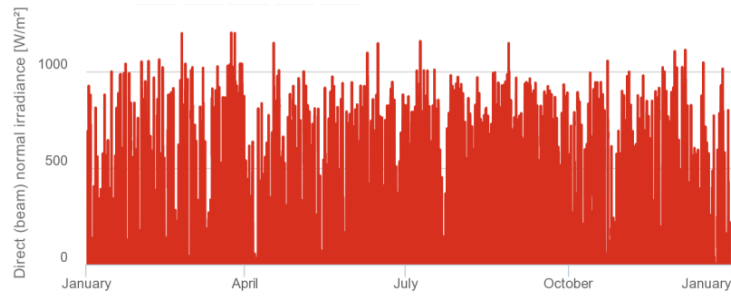
Gambar 4.3 Data suhu 5 Januari



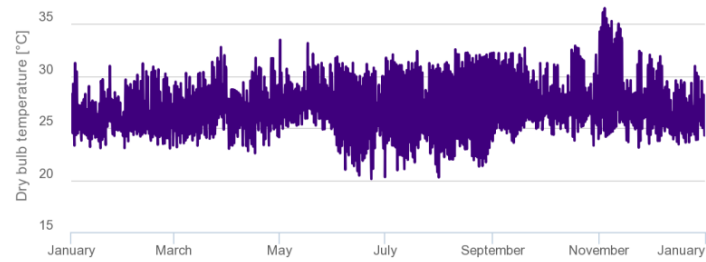
Gambar 4.4 Data irradian Bulan Desember



Gambar 4.5 Data suhu Bulan Desember



Gambar 4.6 Data irradian satu tahun

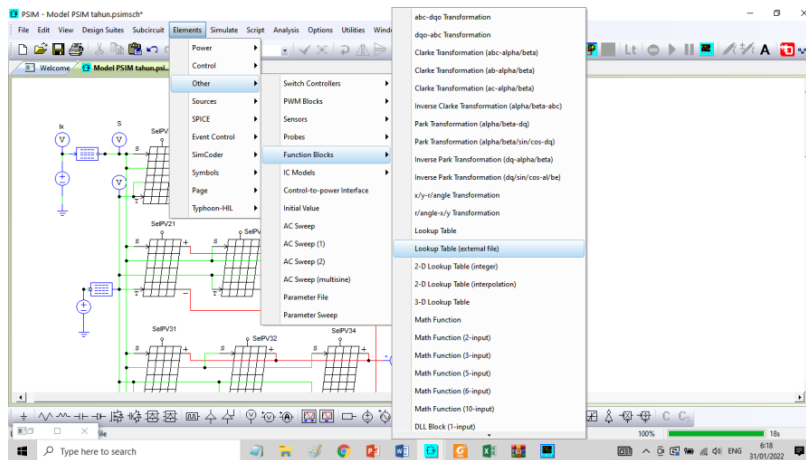


Gambar 4.7 Data suhu satu tahun

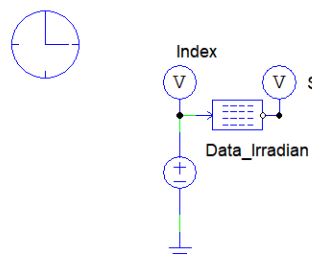
4.3 Pemodelan Irradian, Suhu dan Beban dengan PSIM

Data yang didapatkan selanjutnya harus bisa dibaca oleh simulator. Dengan simulator PSIM, maka data tersebut dimodelkan dengan menggunakan **look up table** yang ada pada menu **Element –Other-Functional Block-Look up Table (External File)** sebagaimana tampak pada Gambar 4.8. Sedangkan model irradian diperlihatkan pada Gambar 4.9. Model untuk suhu dan beban mirip dengan model irradian, hanya berbeda data; begitu juga untuk yang jangka waktu harian, bulanan dan tahunan.

Dalam look up table, hal utama yang harus diperhatikan adalah penggunaan index dan file data yang harus dalam bentuk tabel atau ekstensi .tbl. Index akan merepresentasikan waktu, sehingga jumlah index harus sama dengan jumlah waktu. Sedangkan pembentukan file dalam ekstensi .tbl dilakukan dengan mengubah file .csv menjadi .tbl pada note.



Gambar 4.8 Menu *Look up Table* pada PSIM



Gambar 4.9 Model Irradian pada PSIM

4.4 Perhitungan Jumlah PV Array

Untuk menghitung kapasitas PV Array yang digunakan, acuan yang digunakan adalah persamaan (2.9) dan Tabel 2.1. Asumsi-asumsi yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Energi yang masuk Baterai **harus lebih besar** energi yang digunakan beban
2. Daya listrik PV kali rata2 lama penyinaran **harus lebih besar** energi masuk baterai
3. Digunakan rumus Rumus $A > E/(r * H * PR)$, dengan

E = Energi (kWh)

A = Luas total Fotovoltaik(m²)

r = efisiensi Fotovoltaik(%)

H = Radiasi matahari rata-rata tahunan pada panel

PR = Rasio kinerja, koefisien rugi-rugi (antara 0,5-0,9, nilai umum = 0,75)

Dengan menggunakan data efisiensi diambil efisiensi yang moderat (r) = 22%; serta dengan intensitas cahaya matahari (irradiant) rata-rata (H) =900 kWh/m.y; koefisien rugi-rugi (PR)=0.64; Beban tahunan =4.078,328 KVAH dan satu modul PV memiliki luas = 0,502 X 1,105= 0,555 m²

$$A > 4.078,328/(22\% * 900 * 0.64)$$

$$A > 32,2$$

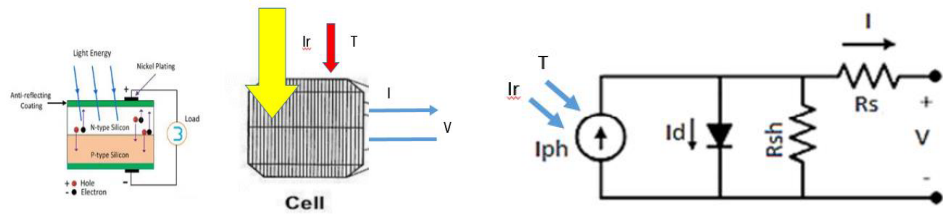
Jadi jumlah PV =32,2/0.555 = 58,01 dibulatkan 58 Modul PV

4.5 Pemodelan PV

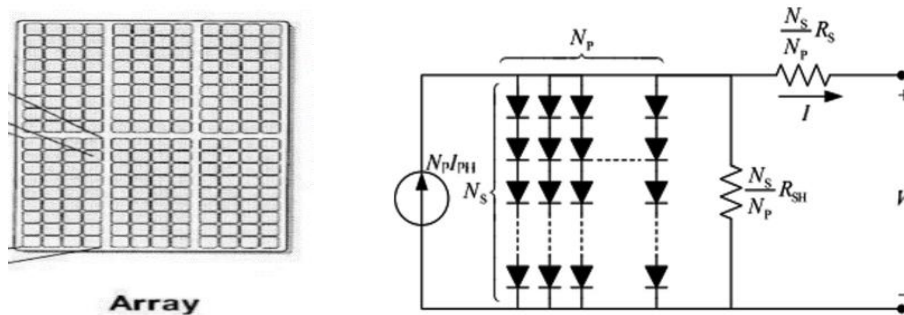
Ada dua cara pemodelan yang bisa dilakukan, yaitu dengan simulasi, yang merupakan pemodelan dengan mengambil elemen dari simulator, dan pemodelan matematis, yaitu dengan menggunakan elemen fungsi matematika.

4.5.1 Pemodelan PV Array Matematis

Pemodelan didasarkan pada model sel PV tunggal sebagaimana diperlihatkan pada gambar 4.10 (a). Lalu sejumlah N_s sel PV tersebut disusun secara seri, dan sejumlah N_p susunan seri tersebut kemudian diparalel, sehingga pemodelan menjadi seperti gambar 4.10 (b).



(a) Model Sel PV



(b) Model PC Array

Gambar 4.10 Model PV

Dalam PV array tersebut terdapat parameter=parameter PV sebagai berikut:

- Jumlah seri sel modul surya, N_s yaitu jumlah sel surya yang disambung secara seri.
- Jumlah paralel sel modul surya, N_p , yaitu jumlah sel surya yang disambung secara seri.
- Standar Intensitas Cahaya S_0 , yaitu kondisi irradiansi pengujian standar dalam W/m^2 . Nilainya biasanya $1000 W/m^2$ atau yang disebutkan di lembar data pabrikan.
- Tref adalah suhu pada kondisi uji standar, dalam $25^\circ C$ atau $278^\circ K$.
- Resistansi seri R_s setiap sel surya, dalam Ohm.

- f) Resistansi shunt R_{sh} setiap sel surya, dalam Ohm.
- g) Arus hubung singkat I_{sc0} masing-masing sel surya pada suhu referensi T_{ref} , dalam A.
- h) Arus saturasi dioda I_{s0} masing-masing sel surya pada suhu referensi T_{ref} , dalam A
- i) Energi pita setiap sel surya, dalam eV. Itu sekitar 1,12 untuk silikon kristal, dan sekitar 1,75 untuk silikon amorf.
- j) Faktor idealitas A setiap sel surya, disebut juga koefisien emisi. Nilainya sekitar 2 untuk silikon kristal, dan kurang dari 2 untuk silikon amorf.
- k) Koefisien K_i yang didefinisikan sebagai intensitas cahaya yang mempengaruhi suhu sel surya.

Dengan menggunakan parameter yang disebutkan di atas dan dengan mengacu pada gambar skematik model dan berdasarkan hasil penelusuran pustaka, maka pemodelan akan menggunakan persamaan (4.1) sampai (4.4). Hasil pemodelan tampak pada gambar 4.11.

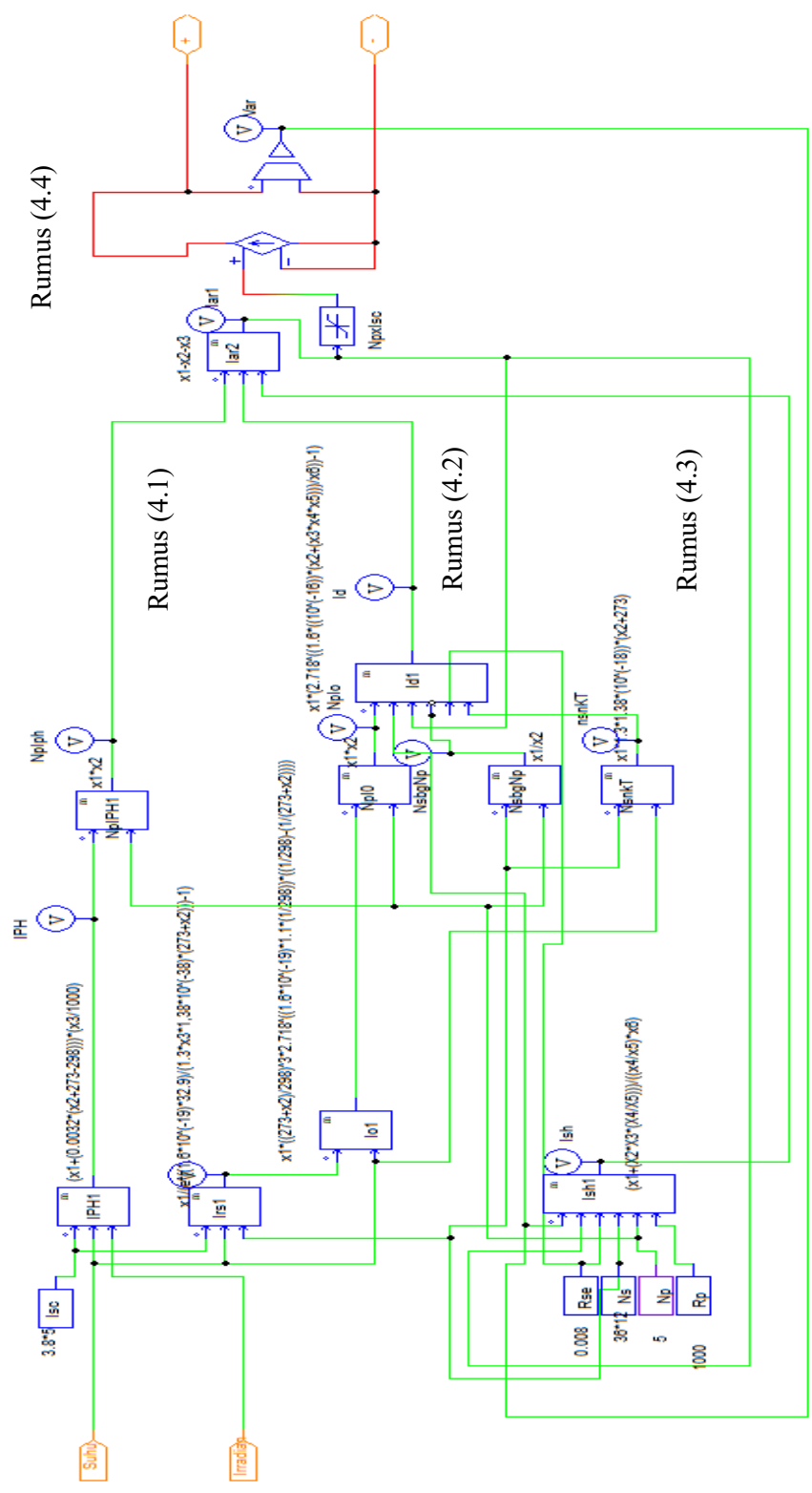
$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i(T - 298)] \times I_r/1000 \quad (4.1)$$

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{e^{\left(\frac{q \cdot V_{oc}}{n \cdot N_s \cdot K \cdot T}\right)} - 1} \quad (4.2)$$

$$I_0 = I_{rs} \cdot \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 \cdot \exp\left[\frac{q \cdot E_{g0} \cdot (1/T_n - 1/T)}{n \cdot K}\right] \quad (4.3)$$

$$I_{ar} = N_p I_{ph_{seri}} - N_p I_0 \left(e^{\frac{q(V_{ar} + I_{ar} \frac{N_s R_{se}}{N_p})}{N_s n k T}} - 1 \right) - \left(\frac{V_{ar} + I_{ar} R_{se} \frac{N_s}{N_p}}{\frac{N_s R_p}{N_p}} \right) \quad (4.4)$$

Dengan muatan elektron ($q = 1,6 \times 10^{-19}$); dan k adalah konstanta Boltzmann ($k = 1.3806505 \times 10^{-23}$).



Gambar 4.11 Pemodelan PV Array Matematis

Gambar 4.11 dihasilkan setelah melakukan beberapa kali evaluasi terhadap simulasi yang dibuat. Dari evaluasi yang dilakukan terdapat beberapa catatan terkait dengan pemodelan, diantaranya adalah :

- 1) Pemodelan dibangun menggunakan blok matematik yang ada di menu elemen **Other sub** menu **Function Bloks**.
- 2) Pada persamaan (4.1) dan (4.2), nilai I_{sc} yang digunakan harus disesuaikan dengan jumlah paralel modul seri yang digunakan, menjadi persamaan (4.5).

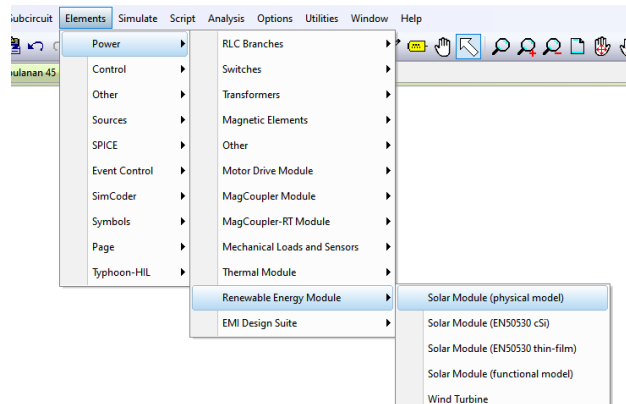
$$I_{sc} = N_p \cdot I_{sc} \quad (4.5)$$

- 3) Untuk membuat persamaan matematika (4.1) sampai dengan (4.5) menjadi daya listrik, maka digunakan blok **Voltage-controlled current source**.
- 4) Masukan Irradian dan suhu dibuat variabel yang di luar model dengan menghubungkannya melalui **Input Signal Port**.
- 5) Keluaran model yang merupakan port + dan - dihubungkan ke **Bi-Directional Port**

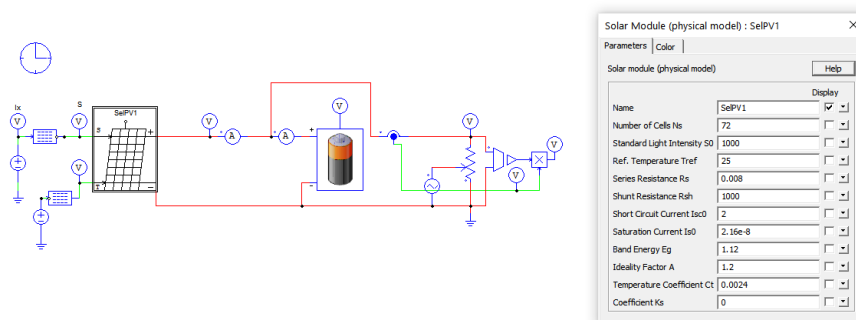
4.5.2 Pemodelan dengan Elemen PV PSIM

Pemodelan PV dengan menggunakan elemen PSIM dilakukan dengan mengambil komponen PV pada PSIM dan dengan penyesuaian jumlah sel yang diseri. Tampak pada Gambar 4.11 pengambilan model PV dari PSIM dan model rangkaian modul PV.

Untuk menambah kapasitas PV, maka model tersebut dapat diseri dan atau diparalel. Sambungan seri/paralel tersebut dapat dilakukan secara langsung maupun dengan mengubah parameter. Secara langsung yang dimaksudkan adalah model tinggal digandeng. Sedangkan mengubah parameter adalah dengan melakukan perubahan parameter sebagai representasi jumlah seri atau paralel yang digunakan dalam suatu modul.

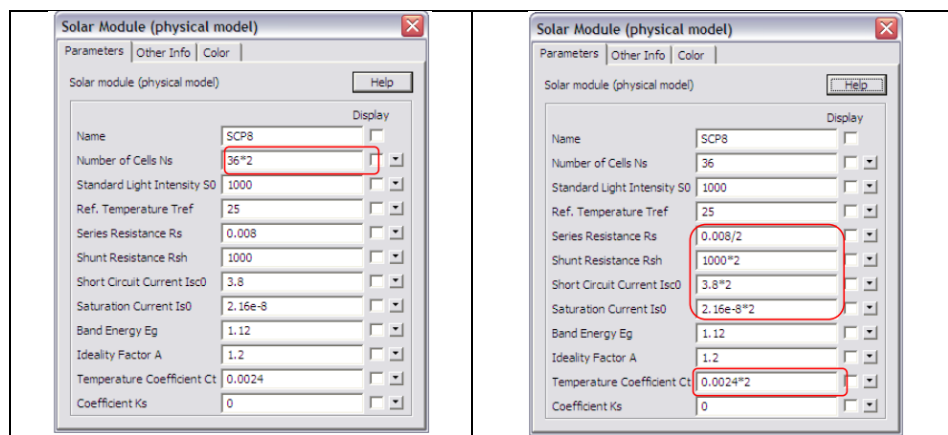


(a) Elemen PV pada PSIM yang digunakan untuk model



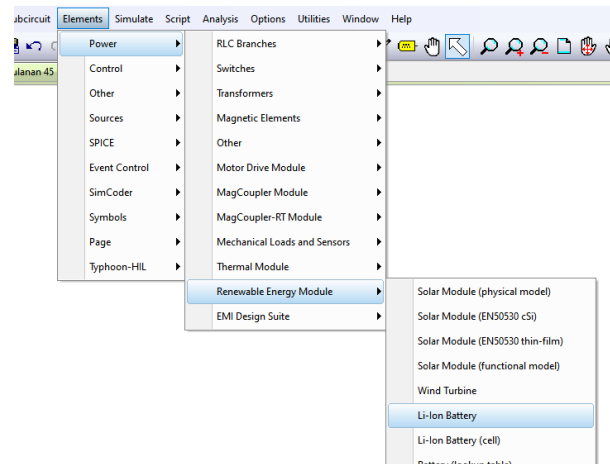
(b) Model rangkaian modul PV

Gambar 4.12 Pemodelan modul PV

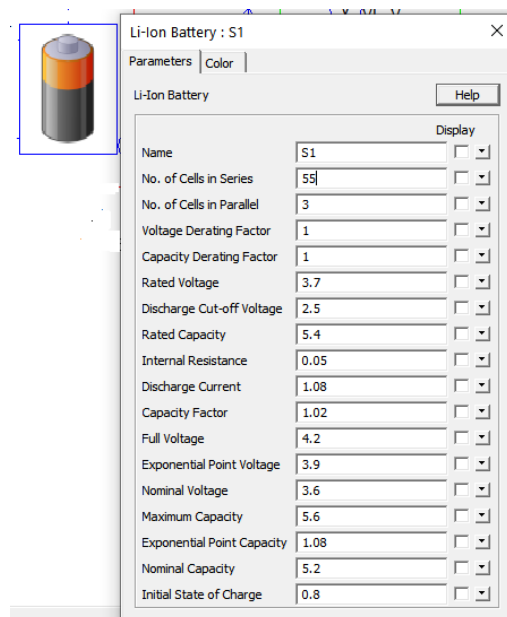


Gambar 4.13 Pemodelan Seri dan paralel dengan mengubah parameter

Ketika melakukan seri/paralel dengan mengubah parameter, maka untuk seri perubahan hanya dilakukan dengan menambah jumlah serinya seperti tampak pada Gambar 4.13 kiri, yang menambahkan menjadi 2 seri. Sedangkan gambar yang kanan merupakan parameter yang harus diubah ketika menambah dalam kombinasi paralel, yang dalam contoh dua modul PV yang diparalel.



(a) Elemen baterai Li Ion pada PSIM



(b) Model baterai Li Ion pada PSIM

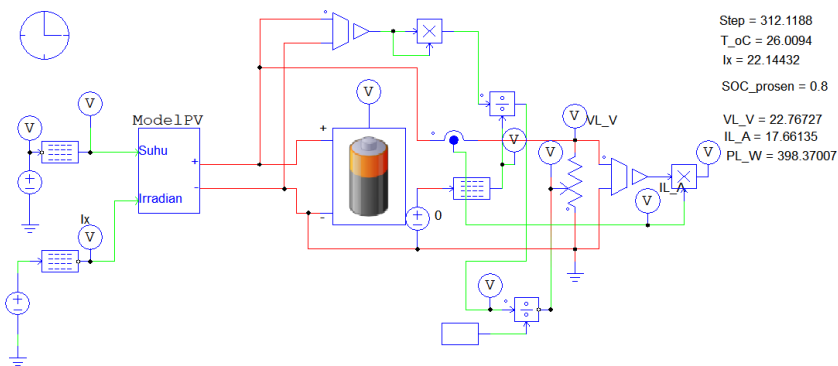
Gambar 4.14 Pemodelan Baterai

4.6 Pemodelan Baterai

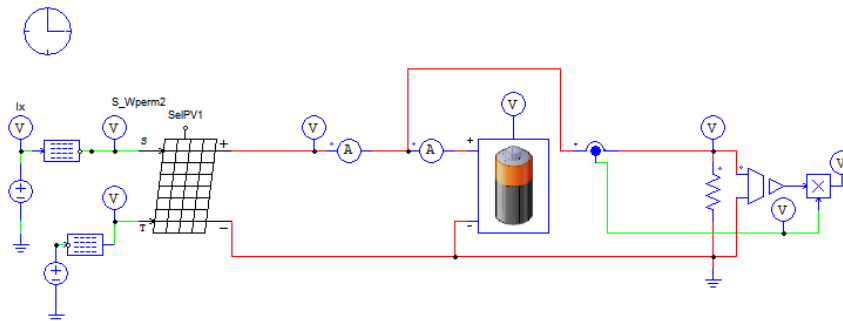
Baterai dimodelkan dengan menggunakan elemen baterai Lithium Ion pada PSIM sebagaimana tampak pada Gambar 4.14. Penyesuaian perlu dilakukan terutama pada jumlah seri dan paralel baterai, yang disesuaikan dengan dinamika energi yang disimpan dan dikeluarkan. Untuk keperluan tegangan tertentu, maka jumlah baterai seri (B_s) bisa disesuaikan dengan persamaan (4.6), sedangkan untuk menambah kapasitas daya baterai bisa digunakan penambahan paralel (B_p) dengan persamaan (4.7).

$$B_s = V_{\text{sistem}} / \text{Rated Voltage} \quad (4.6)$$

$$B_p = \text{Energi rata-rata sistem per jam} / (\text{Kapasitas Baterai} \times B_s) \quad (4.7)$$



(a) Model Matematis



(b) Model Blok PV

Gambar 4.15 Rangkaian pengujian Model Modul PV

4.7 Analisis Model Modul PV

Model Modul PV yang digunakan memiliki jumlah sel seri sebanyak 36. Rangkaian simulasi PSIM pada pengujian ini diperlihatkan pada Gambar 4.15. Dalam pengujian ini akan dicari besarnya energi yang dihasilkan oleh satu modul PV pada irradian berdasarkan data yang diperoleh.

4.7.1 Analisis pada Irradian Harian Maksimum

Untuk analisis pada irradian harian maksimum, digunakan data irradian (S) dan suhu (T) sebagaimana tampak pada Gambar 4.16 bagian atas. Sedangkan untuk proses pengujian digunakan rangkaian 3.14. Pada pengujian ini beban (R), diubah-ubah secara coba-coba, sehingga dalam satu hari didapatkan SOC pada baterai kembali pada posisi semula atau memiliki keseimbangan energi (*balanced energy*).

Setelah dilakukan perubahan resistor beberapa kali, didapatkan bahwa kondisi SOC yang dapat kembali ke semula, seperti tampak dalam Gambar 3.14, adalah sebesar 23,5 Ohm. Pada kondisi irradian maksimum ini, daya rata-rata (PL) selama 24 jam adalah sebesar 23,26 W, sehingga energi yang dihasilkan oleh satu modul PV selama satu hari adalah sebesar :

$$\begin{aligned} W &= P \times t \\ &= 23,26 \times 24 \text{ W.jam} = 553,264 \text{ W.jam.} \end{aligned}$$

Jika lama cahaya matahari efektif diasumsikan 10 jam, yaitu mulai pukul 06.00 – 16.00, maka energi yang dihasilkan oleh PV tiap jam adalah:

$$\begin{aligned} W_j &= W / t \\ &= 553,264 / 10 = 55,33 \text{ W.jam} \end{aligned}$$

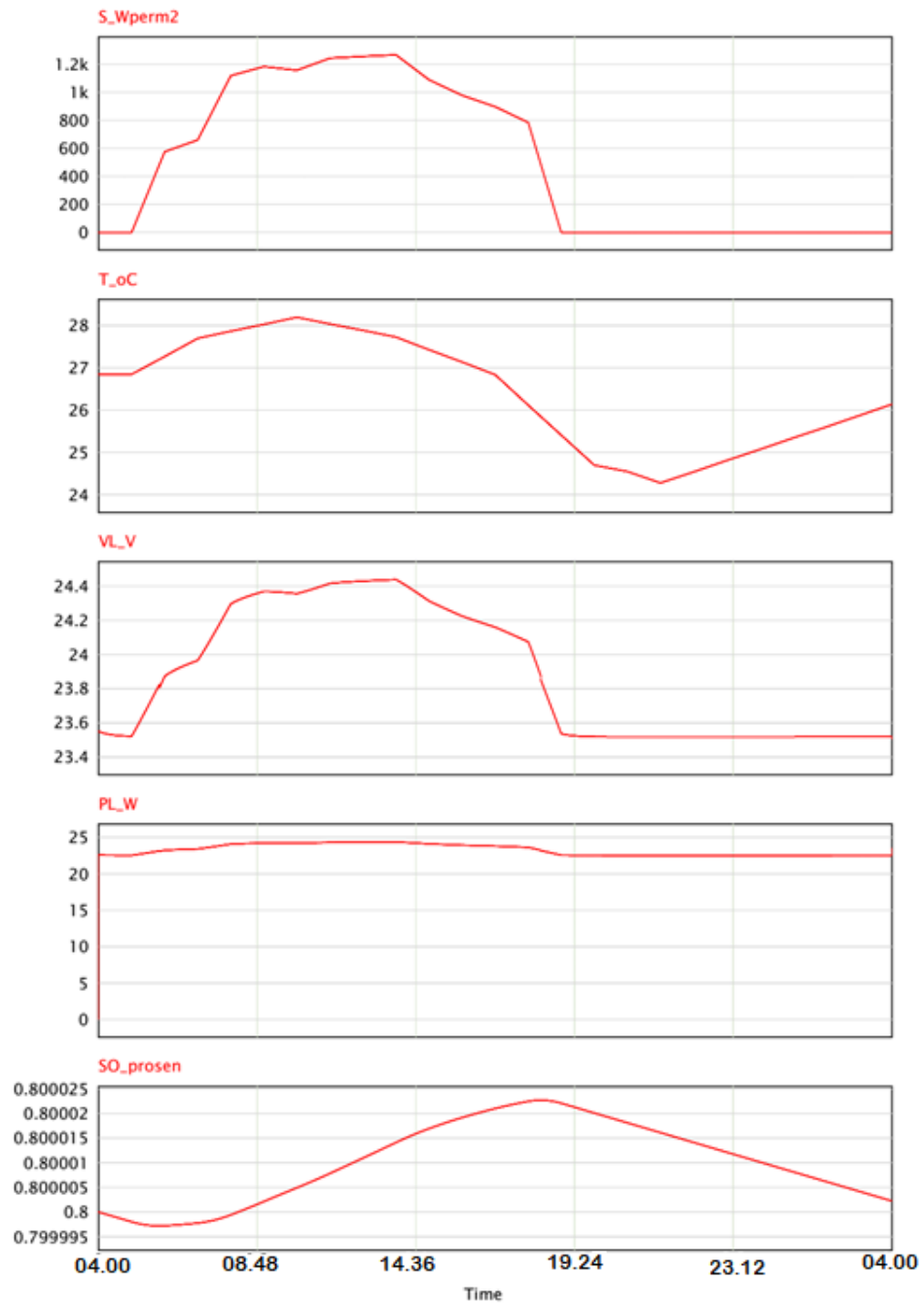
atau memiliki kapasitas daya operasional (Pop) sebesar: 55,33 W.

Dengan kapasitas daya operasional tersebut, maka Modul PV memiliki Rasio kinerja atau koefisien rugi-rugi (PR) sebagai berikut:

$$PR = (Pop/P_{max}) \times 100\% = (55,33/60) \times 100\% = 92,21\%$$

Jika dikaitkan dengan kebutuhan energi pada pelanggan listrik 1.300 VA yang sebesar 11,174 KVAH perhari, dan jika diasumsikan beban resistor murni, maka keperluan energi total per hari (Wth) adalah sebesar 11.174 W.jam. Dari nilai energi ini dapat dihitung kebutuhan modul PV (N) pada irradian maksimum adalah:

$$\begin{aligned} N &= W_{th} / W_j = 11.174 \text{ W.jam} / 553,264 \text{ W.jam} \\ &= 20,19 \text{ modul PV atau jika dibulatkana } 21 \text{ modul PV.} \end{aligned}$$

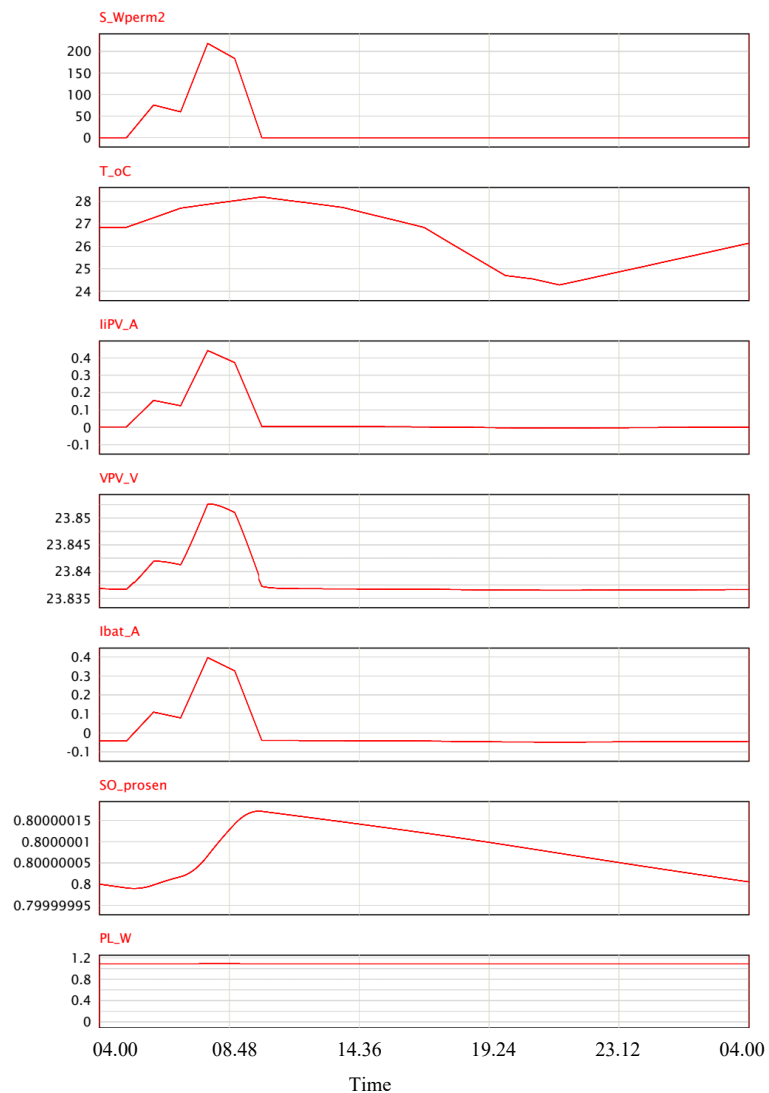


Gambar 4.16 Hasil pengujian *balanced energy* pada irradian maksimum

4.7.2 Analisis pada Irradian Hari Minimum

Dengan cara yang sama dengan bagian 4.5.1, dan dengan data irradian minimum sebagaimana tampak pada Gambar 4.16 bagian atas, maka untuk kondisi keseimbangan energi, pada modul PV dalam irradian minimum akan menghasilkan energi sebesar 24 W.jam, atau sebesar 1 W selama 24 jam. Pada kondisi ini beban yang menyebabkan kondisi SOC kembali ke semula adalah sebesar 500 Ohm.

Berdasarkan hasil tersebut, maka kebutuhan modul PV (N) jika kondisi irradian minimum adalah sebesar 11.174 W.jam dibagi $(1 \text{ W} \times 24 \text{ jam}) = 465,58$ modul PV atau jika dibulatkan 466 modul PV.



Gambar 4.17 Hasil pengujian *balanced energy* pada irradian minimum

4.7.3 Analisis Model PV Satu Bulan

Analisis model model PV bulanan dilakukana dengan cara yang sama dengan analisis model sebelumnya, hanya saja data irradian dan suhu yang digunakan adalah data yang diambil untuk satu bulan, yaitu bulan Januari. Data tersebut diperlihatkan pada Gambar 4.18 bagian atas.

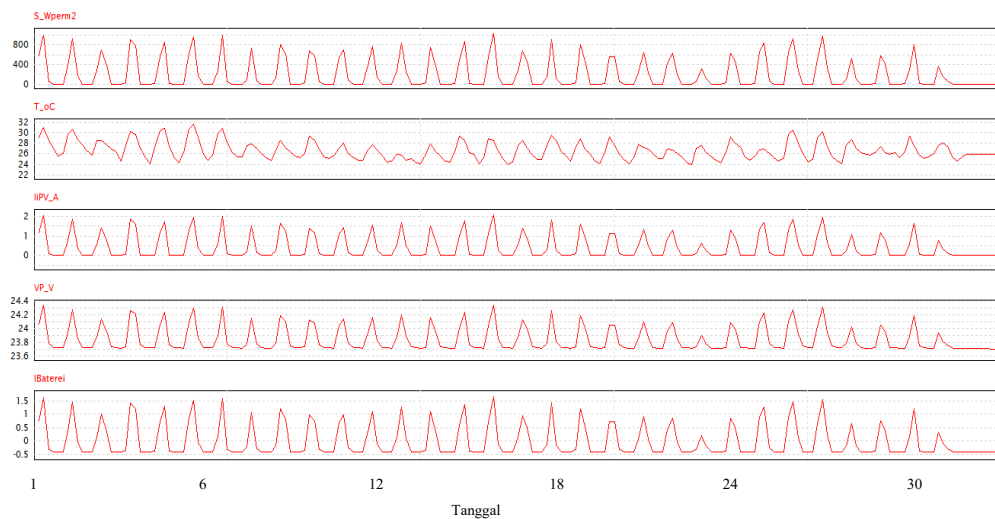
Pada pengujian ini didapatkan bahwa untuk kondisi *balanced energy*, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 4.19, terjadi pada daya rata-rata adalah 9,7 W atau pada beban $R=56$ Ohm. Kondisi ini didapatkan dengan *trial error* nilai resistor, sehingga SOC dapat kembali ke nilai awal.

Dengan hasil itu, maka energi selama satu bulan yang dihasilkan/yang digunakan untuk beban (Wtb) adalah sebesar

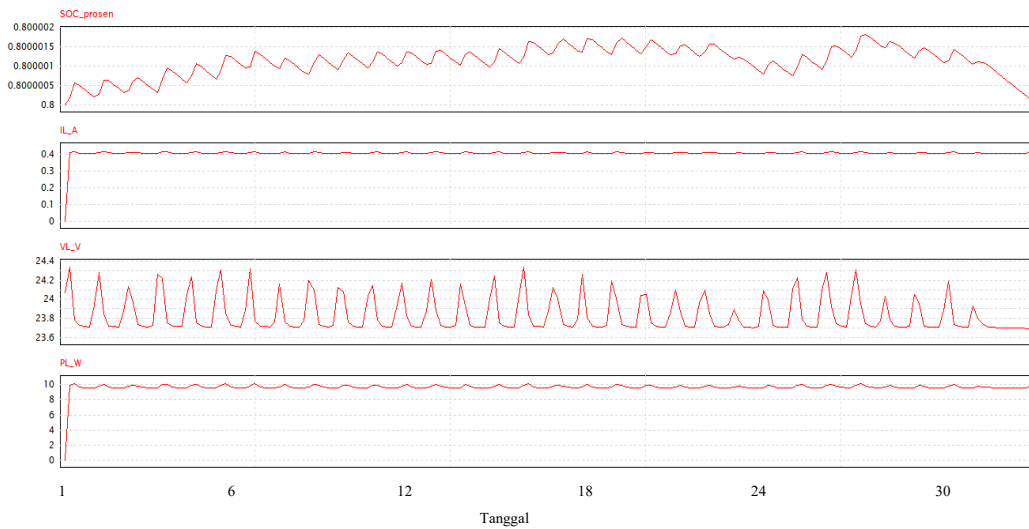
$$W_{tb} = P \times t \times h = 9,7 \text{ W} \times 24 \text{ jam} \times 30 \text{ hari} = 7.857 \text{ W.jam.}$$

Jika dikaitkan dengan kebutuhan modul PV (N) , maka kebutuhan modul PV berdasarkan kondisi ini adalah

$$N = [W_{tb} / (P \times 24)] = 11.174 \text{ W.jam} / (9,7 \text{ W} \times 24 \text{ jam}) = 48 \text{ buah.}$$



Gambar 4.18 Pengujian arus baterai modul PV bulanan



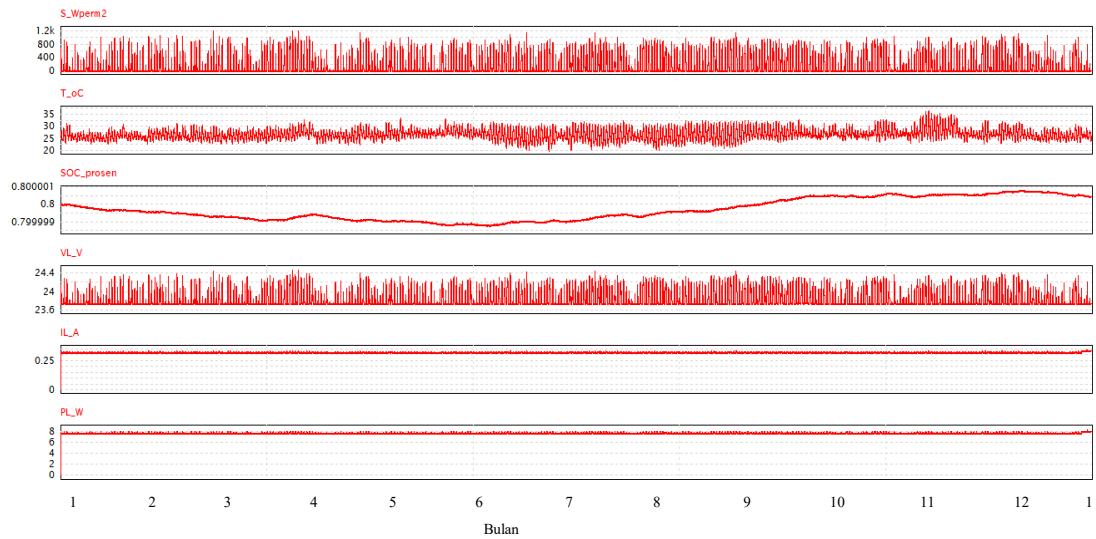
Gambar 4.19 Pengujian keseimbangan energi modul PV bulanan

4.7.4 Analisis Model Modul PV Satu Tahun

Analisis model modul PV tahunan dilakukan dengan cara yang sama dengan sebelumnya. Perbedaannya adalah data irradian dan suhu yang digunakan adalah data selama satu tahun sebagaimana terlihat pada Gambar 4.20 bagian atas. Jumlah data yang digunakan adalah 24 (jam) X 365 (hari) atau masing-masing sebanyak 8.760 data untuk irradian dan suhu.

Dari hasil *trial error* nilai resistor beban sehingga dicapai SOC yang kembali ke nilai awal atau terjadi keseimbangan energi, maka didapatkan bahwa beban adalah sebesar 57 Ohm, atau untuk daya rata-rata selama 24 jam (P) sebesar 7.66 W. Jika dikaitkan dengan pelanggan listrik 1.300 VA yang menghabiskan energi per hari 11.174 W.jam, dapat ditentukan kebutuhan modul PV (N) adalah sebanyak:

$$N = [W / (P \times 24)] = 11.174 \text{ W.jam} / (7.66 \text{ W} \times 24 \text{ jam}) = 60 \text{ buah.}$$



Gambar 4.20 Pengujian model modul PV untuk satu tahun

4.8 Pengujian Sistem PV Array 1.300 VA

4.8.1 Analisis Jumlah Modul Sistem PV Array Optimal

Berdasarkan pada pembahasan sebelumnya, maka dapat dibuat ringkasan kebutuhan modul PV untuk pelanggan dengan daya 1.300 VA seperti tampak pada Tabel 4.3. Dari tabel tampak bahwa secara umum jumlah modul PV yang bisa memenuhi beban 1.300 VA adalah sekitar **60 Modul**. Perolehan jumlah ini, terjadi pada dua dasar penentuan, yaitu persamaan (2.9) dan keseimbangan energi pada model satu modul untuk data satu tahun. Keduanya didasarkan pada pola data satu tahun.

Tabel 4.3 Jumlah modul PV beban 1.300 VA dari berbagai kondisi

No.	Dasar Penentuan	Jumlah Modul PV
1	Persamaan (2.9)	58
2	Balanced Energi Harian Irradian Maksimum satu modul	21
3	Balanced Energi Harian Irradian Minimum satu modul	466
4	Balanced Energi Bulanan satu modul	48
5	Balanced Energi Tahunan satu modul	60

4.8.2 Pengujian Model PV Array

Pengujian dilakukan dengan menggunakan rangkaian model pada Gambar 4.14 tetapi dengan data irradian, suhu dan beban yang berubah tiap jam selama satu tahun sebagaimana telah dimodelkan pada bagian 4.2 dan 4.3. Dalam pengujian ada beberapa hal yang perlu diperhatikan, yaitu:

1) Rangkaian pengujian dibuat dengan menggunakan model modul PV yang didalamnya ada 36 sel seri, yang diseri sebanyak 12 buah, dan kemudian ada 5 paralel dari 12 seri tersebut, sehingga jumlahnya 60 buah modul PV atau sebanyak 2.160 buah sel surya. Hal ini merujuk pada pembahasan pada bagian 4.8.1. Model ini tampak pada Gambar 4.21 (b).

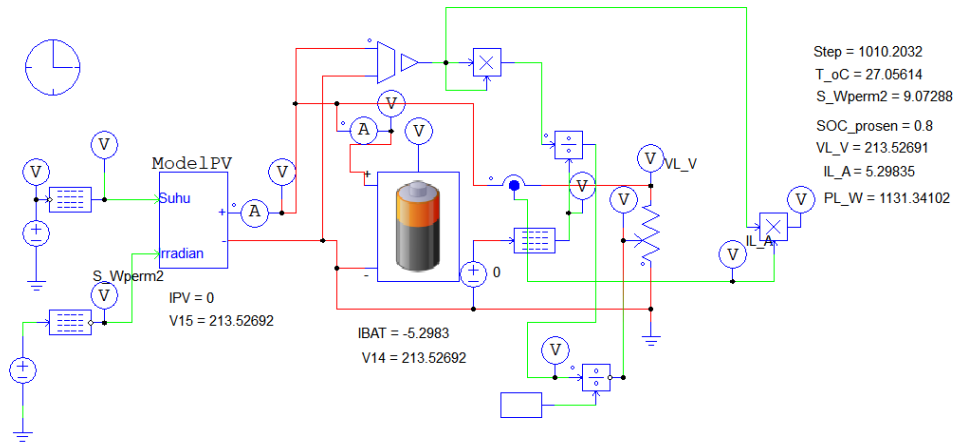
2) Dalam model, beban dibuat dengan mengatur besar R sesuai beban. Beban nominalnya dihitung berdasarkan rumus:

$$P (\text{daya}) = V^2 (\text{tegangan}) / R (\text{Resistansi}), \text{ maka } R = V^2 / P.$$

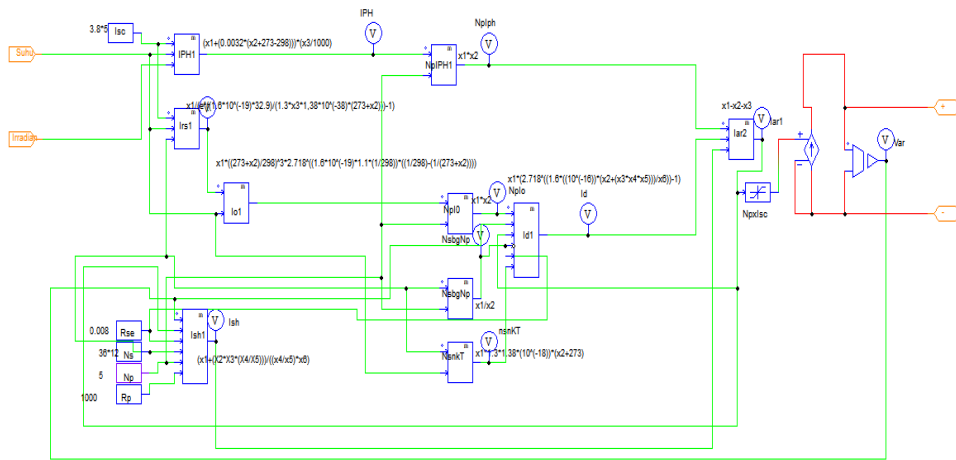
Jika $P = 1.300 \text{ VA}$ (beban maksimum) dan $V = 220 \text{ V}$, maka $R = 37,2 \text{ Ohm}$, jika $P = 89 \text{ VA}$ (beban minimum), maka $R = 543,8 \text{ Ohm}$. Dengan demikian nilai R adalah $37,2 - 543,8 \text{ Ohm}$. Dalam simulasi, beban yang demikian dibuat dengan blok **Rheostat** dan dengan masukan pengatur pada kaki **Tap Position** menggunakan persamaan $R = V^2 / P$. Bagian ini tampak pada Gambar 4.21(a).

3) Sejumlah data yang diperlukan ditampilkan dan diukur dengan menggunakan fitur-fitur yang ada dalam simulator PSIM. Tampak pada gambar 4.21 (a), ada sejumlah tampilan tulisan sebagai cara untuk memantau besaran listrik yang penting, serta ada sejumlah **Probe** yang berfungsi untuk mengukur besaran listrik.

4) Hasil simulasi yang berupa tampilan dan data pengukuran, selanjutnya dianalisis.



(a) Model keseluruhan

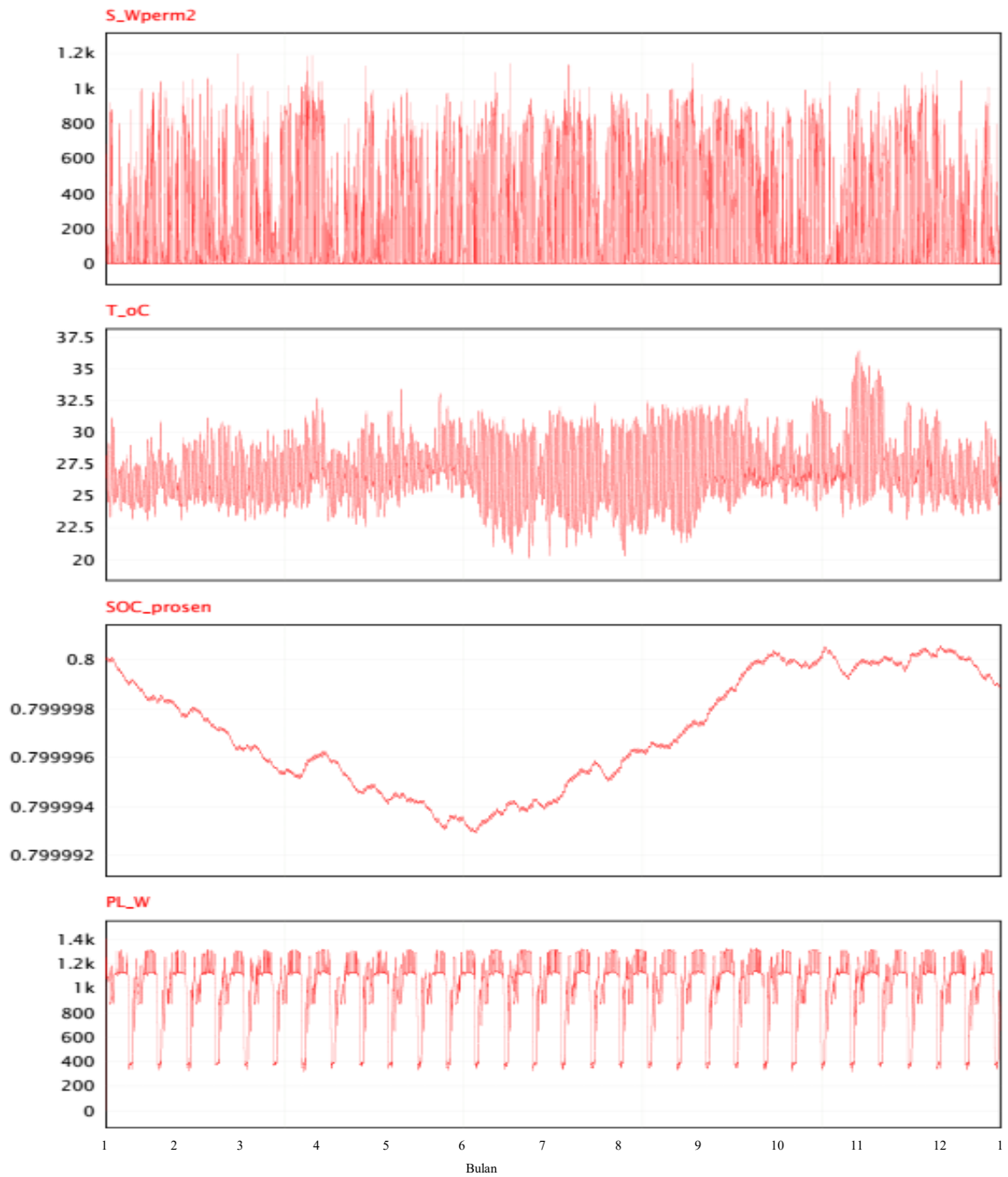


(b) Model PV array 60 modul (5 paralel dari 12 seri)

Gambar 4.21 Rangkaian simulasi PV array untuk rumah 1.300 VA

4.8.3 Analisis *Balanced Energy Model* PV Array

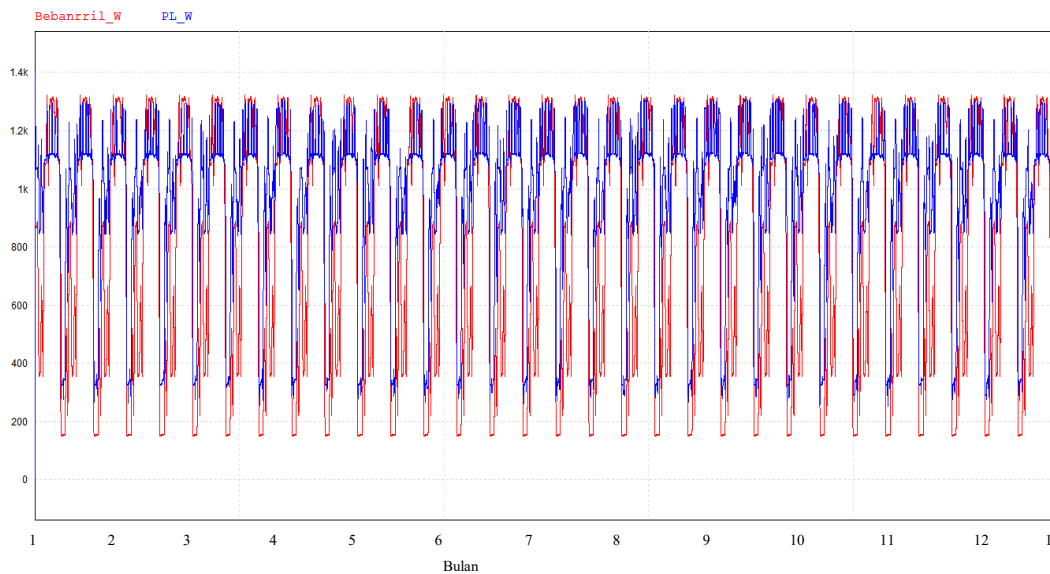
Analisis *balanced energy* untuk satu tahun dan pada sistem kelistrikan rumah tangga 1.300 VA dilakukan dengan menggunakan data hasil simulasi sebagaimana tampak pada Gambar 4.22. Pada gambar tersebut tampak grafik irradiant (S), suhu (T), SOC baterai (SOC) dan daya listrik (PL).



Gambar 4.22. Grafik irradiant (S), suhu (T), SOC baterai (SOC) dan daya listrik (PL) untuk Kelistrikan Rumah Tangga 1.300 VA dengan Panel Surya

Yang paling menonjol dari grafik ini adalah grafik yang ke tiga, yaitu SOC. Pada grafik tampak bahwa nilai SOC yang diset pada 80%, pada bulan Januari sampai Juni menurun. Ini sejalan dengan nilai irradiant yang juga secara rata-rata juga menurun, akibat pada bulan-bulan tersebut merupakan musim penghujan, banyak hujan dan awan. SOC lalu memiliki nilai yang naik mulai Juli, dengan mengingat mulai bulan tersebut, musim sudah berganti ke kemarau dan irradiant juga makin tinggi, karena tidak ada hujan dan awanpun sudah tidak banyak menghalangi sinar matahari. SOC kembali ke nilai awal (80%), kurang lebih di pertengahan bulan Desember.

Secara keseluruhan energi yang digunakan oleh beban selama satu tahun yang dihitung dari rata-rata daya 523.451 V.A. Atau dalam 24 jam atau sehari jumlah energi yang digunakan adalah 12.562.824 V.A. jam atau 12.563 W.jam. Nilai ini jika dibandingkan pada pemodelan pada bagian 4.1 yang sebesar 11.174 W.jam, maka terdapat selisih lebih tinggi sebesar $12.563 - 11.174 = 1.389$ W.jam. Terdapat perbedaan sebesar 12,4%. Perbedaan ini dikarenakan beban riil dengan daya yang diserap memang berbeda sebagaimana tampak pada gambar 4.22.



Gambar 4.22 Perbedaan beban riil dan daya terserap

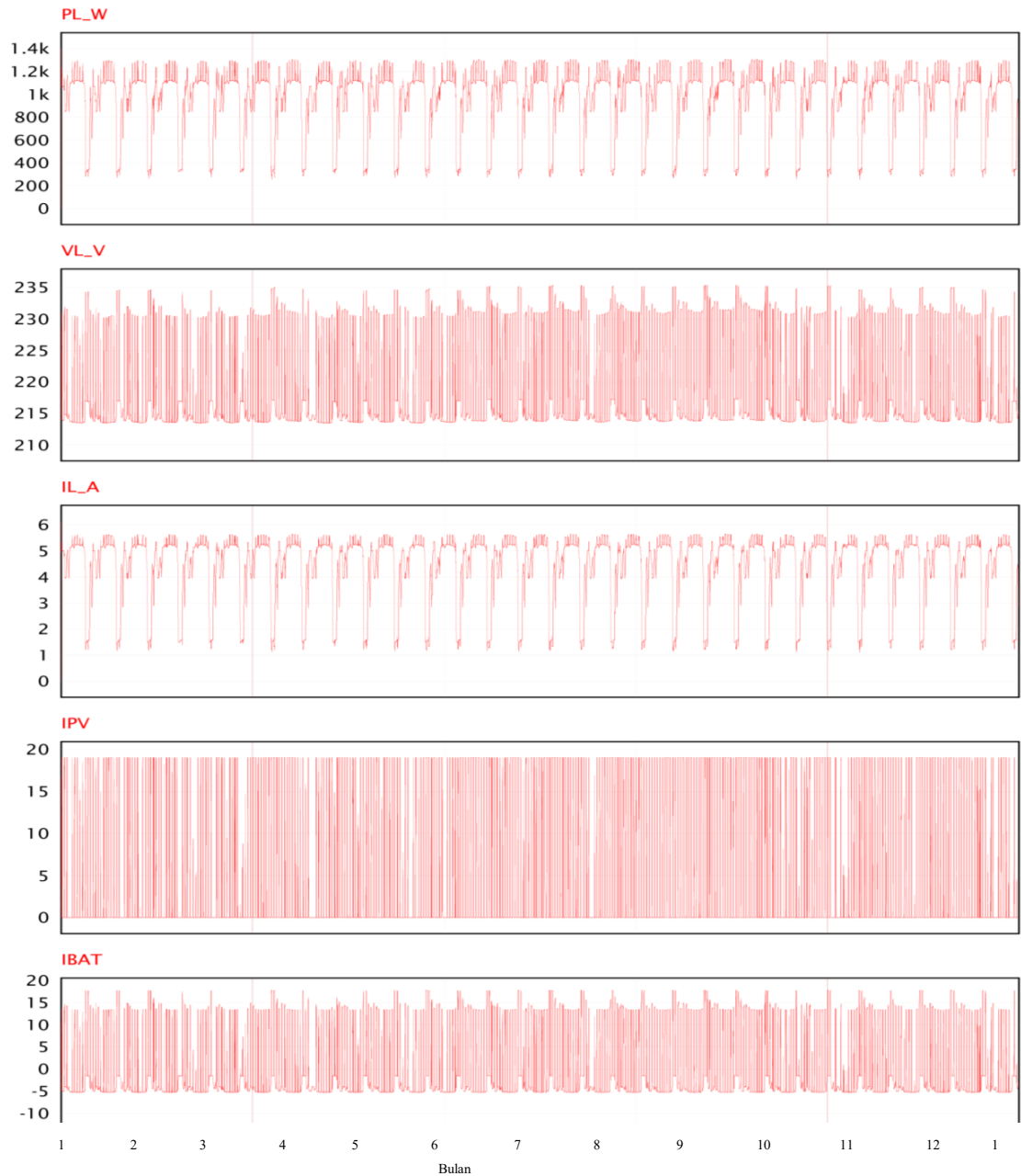
Hasil-hasil tersebut menunjukkan model yang dibuat telah mampu memberikan hasil yang cukup sesuai, karena telah menghasilkan keseimbangan energi untuk data selama satu tahun dan untuk keperluan energi listrik rumah tangga daya 1.300 VA.

4.8.4 Analisis Tegangan dan Arus Sistem

Analisis tegangan dan arus dilakukan dengan mengamati tegangan dan arus pada sistem. Sebagaimana diketahui bahwa sistem yang digunakan adalah sistem tegangan AC 220 V. Untuk tegangan sistem pada simulasi digunakan tegangan kerja DC 220 V. Namun pada kenyataannya tegangan tersebut bernilai 215-230 V.

Arus dari PV tampak bahwa besarnya 0 sampai 19 A dan memiliki nilai positif. Sedangkan arus dari dan ke baterai memiliki nilai -5 sampai 19 A. Nilai negatif berarti bahwa baterai mengalami pengisian dari PV, atau arus menuju baterai. Sedangkan yang positif menunjukkan bahwa baterai mengalirkan arus ke beban.

Berdasarkan pada hasil-hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa secara prinsip pemodelan sistem telah sesuai. Namun demikian untuk menghasilkan kondisi tersebut pemodelan memerlukan koreksi yang berupa **pemasangan pembatas nilai minimum arus PV array**, dengan cara batas minimal arus =0. Hal ini dengan mengingat dalam pemodelan ini PV diparalel dengan baterai, yang memungkinkan adanya arus balik menuju PV. Dalam realitanya kondisi ini tidak pernah terjadi, karena dipasang diode pengaman terhadap arus balik.



Gambar 4.23. Grafik Daya (P), Tegangan Beban (VLV), Arus Beban (IL), Arus Panel Surya (IPV), arus Baterei (IBAT) dan untuk Kelistrikan Rumah Tangga 1.300 VA dengan Panel Surya

V. KESIMPULAN

1. Pemodelan fotovoltaik dilakukan dengan menggunakan persamaan yang terjadi pada sambungan P-N yang memunculkan model arus jika terkena radiasi dan suhu serta memiliki hambatan seri dan paralel. Untuk irradiant dan suhu, pemodelan dilakukan dengan mengambil data dari laman *Photovoltaic Geographical Information System* (https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#), lalu memodelkannya dengan toolbox **Look up Table**. Beban dimodelkan dengan menggunakan toolbox yang sama, tetapi dengan data yang berasal dari observasi. Sedangkan model baterai, digunakan model baterai yang ada di PSIM.
2. Berdasarkan analisis *balanced energy* dengan model sistem kelistrikan rumah tangga 1.300 VA yang dibuat, sistem dapat mencapai *balanced energy* dengan menggunakan **60 modul PV**, dengan formasi paralel 5 dari seri 12 buah modul PV yang tersusun dari 36 sel PV, atau ada sebanyak dari atau ada sebanyak **2.160 sel PV**.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Wikipedia, Environmental impact of the petroleum industry, https://en.wikipedia.org/wiki/Environmental_impact_of_the_petroleum_industry
- [2] Nathan David, An Economical Solar PV System for Home Use: explained, International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 6, Issue 11, November-2015 453, ISSN 2229-5518, <http://www.ijser.org>
- [3] Sapto Prayogo, Pengembangan Sistem Manajemen Baterai Pada PLTS Menggunakan On-Off Grid Tie Inverter, Jurnal Teknik Energi, Volume 9, Nomor 1, November 2019 ISSN: 2089-2527.
- [4] O. Adeoti, B.A. Oyewole, T.D. Adegboyega, Solar photovoltaic-based home electrification system for rural development in Nigeria: domestic load assessment, Renewable Energy 24 (2001) 155–161.
- [5] Saad Motahhir , Abdelaziz El Ghzizal, Souad Sebti, and Aziz Derouich, Modeling of Photovoltaic System with Modified Incremental Conductance Algorithm for Fast Changes of Irradiance, International Journal of Photoenergy, Volume 2018, Article ID 3286479, pp 1-12, <https://doi.org/10.1155/2018/3286479>
- [6] Leitao, J.; Gil, P.; Ribeiro, B.; Cardoso, A. A survey on home energy management. IEEE Access 2020, 8, 5699–5722.
- [7] Abdalla, M.A.A.; Min, W.; Mohammed, O.A.A. Two-Stage Energy Management Strategy of EV and PV Integrated Smart Home to Minimize Electricity Cost and Flatten Power Load Profile. *Energies* **2020**, *13*, 6387. <https://doi.org/10.3390/en13236387>
- [8] Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia No. 26 Tahun 2016 tentang Tarif Tenaga Listrik Yang Disediakan oleh PT Perusahaan Listrik Nrgara (Persero).
- [9] Statistik PLN 2020

- [10] Atul Kumar, Murari Lal Azad, Rajesh Kumar Chandi, Modelling of PV Arrays- An effective approach, International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 14, Number 12 (2019) pp. 2850-2854.
- [11] Manoharan Premkumar, Chandrasekaran Kumar, Ravichandran Sowmya, Mathematical Modelling of Solar Photovoltaic Cell/Panel/Array Based on the Physical Parameters from the Manufacturer's Datasheet, Int. Journal of Renewable Energy Development, Volume 9, Number 1 (2020), pp: 7-22.
- [12] R. K. Koech¹, G.K Arusei¹, G.K Yegon¹, J.K. Tonui² and S.K Rotich¹, Photovoltaic/Thermal (PV/T) System as Innovative Solution to Increase Solar Energy Conversion Efficiency, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering Volume 3, Issue 4, April 2013.