

**ANALISIS KAPASITAS BESS (*BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM*)  
DALAM IMPLEMENTASI *PHOTOVOLTAIC ROOFTOP*  
PADA PERUMAHAN**

**(Skripsi)**

**Oleh**

**JERRY MARLIAN**

**2115031039**



**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG**

**2024**

## **ABSTRAK**

### **ANALISIS KAPASITAS BESS (*BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM*) DALAM IMPLEMENTASI *PHOTOVOLTAIC ROOFTOOP* PADA PERUMAHAN**

**Oleh**

**JERRY MARLIAN**

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *rooftop* yang dilengkapi dengan *Battery Energy Storage System* (BESS) merupakan solusi strategis untuk mengoptimalkan pemanfaatan energi terbarukan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan menentukan kapasitas optimal BESS menggunakan metode keseimbangan energi (*energy balanced*). Metode ini dilakukan dengan menggunakan data profil beban, produksi energi, proses *charging*, dan proses *discharging* untuk mendapatkan kapasitas optimal BESS. *Software* PVsyst dan Python digunakan sebagai alat bantu dalam proses simulasi dan analisis data. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kapasitas baterai yang dibutuhkan sebesar 19,561 Wh sedangkan kapasitas eksisting sebesar 28,800 Wh, sehingga terdapat kelebihan kapasitas sebesar 9.239 Wh atau 32% dari total kapasitas baterai. Dengan kapasitas per unit baterai sebesar 4.800 Wh, hanya diperlukan 5 unit baterai. Evaluasi kelayakan ekonomis sistem menunjukkan bahwa pengurangan kapasitas ini dapat mempercepat waktu *payback period* atau pengembalian modal dari 11,5 tahun menjadi 10,3 tahun. Selain itu, sistem ini berhasil mengurangi emisi karbon secara signifikan sebesar 80,853 ton Co<sub>2</sub> selama *project lifetime*.

Kata kunci: PLTS *Rooftop*, *Battery*, *Energy Balanced*, Optimasi Kapasitas Baterai, Energi Terbarukan.

## **ABSTRACT**

### **ANALYSIS OF BESS (BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM) CAPACITY IN THE IMPLEMENTATION OF RESIDENTIAL PHOTOVOLTAIC ROOFTOPS**

**By**

**JERRY MARLIAN**

*Rooftop Solar Power Plants (PLTS) equipped with Battery Energy Storage Systems (BESS) represent a strategic solution for optimizing the utilization of renewable energy. This study aims to analyze and determine the optimal BESS capacity using the energy balance method. This method involves using load profile data, energy production, charging, and discharging processes to obtain the optimal BESS capacity. PVSyst software and Python were employed as tools for simulation and data analysis. The results indicate that the required battery capacity is 19,561 Wh, while the existing capacity is 28,800 Wh, resulting in an excess capacity of 9,239 Wh or 32% of the total battery capacity. With a per-unit battery capacity of 4,800 Wh, only 5 battery units are needed. The economic feasibility evaluation of the system shows that reducing the capacity can shorten the payback period from 11.5 years to 10.3 years. Furthermore, the system successfully reduces carbon emissions significantly, by 80.853 tons of CO<sub>2</sub> over the project lifetime.*

*Keywords: Rooftop PV, Battery, Energy Balanced, Battery Capacity Optimization, Renewable Energy.*

**ANALISIS KAPASITAS BESS (*BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM*)  
DALAM IMPLEMENTASI *PHOTOVOLTAIC ROOFTOP*  
PADA PERUMAHAN**

**Oleh**

**JERRY MARLIAN**

**Skripsi**

**Sebagai Salah Satu Syarat Mencapai Gelar  
SARJANA TEKNIK**

**Pada**

**Jurusan Teknik Elektro  
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG**

**2024**

Judul Skripsi

ANALISIS KAPASITAS BESS (BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM) DALAM IMPLEMENTASI PHOTOVOLTAIC ROOFTOP PADA PERUMAHAN

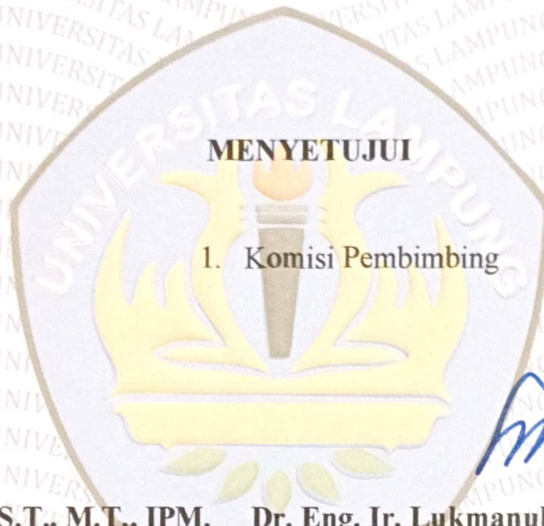
Nama Mahasiswa

Jerry Marlian

Nomor Pokok Mahasiswa : 2115031039

Program Studi : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik



**MENYETUJUI**

1. Komisi Pembimbing

**Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T., IPM.**

NIP 19710813 199903 1 003

**Dr. Eng. Ir. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc**

NIP 19720923 200012 1 002

2. Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro

Ketua Program Studi Teknik Elektro

**Herlinawati, S.T., M.T.**

NIP 19710314 199903 2 001

**Sumadi, S.T., M.T.**

NIP 19731104 200003 1 001

**MENGESAHKAN**

I. Tim Penguji

Ketua

**Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T. IPM.**



Sekretaris

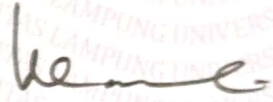
**Dr. Eng. Ir. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc.**



Penguji,

Bukan Pembimbing

**Dr. Eng., Ir. Khairudin, S.T., M.Sc.**

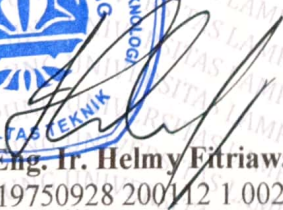


2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung



**Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.**

NIP 19750928 200112 1 002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **16 Desember 2024**

## SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepanjang sepengetahuan saya tidak terdapat atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana yang disebutkan dalam daftar Pustaka. Selain itu, saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 16 Desember 2024



**Jerry Marlian**  
NPM. 2115031039

## RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Prabumulih, Sumatera Selatan pada tanggal 17 April 2003, sebagai anak kedua dari tiga bersaudara, dari bapak Supadi dan Ibu Andri Pesiana.

Riwayat pendidikan penulis dimulai dari Sekolah Dasar Negeri (SDN) 9 Rambang, pada tahun 2009 hingga tahun 2015, Sekolah Menengah Pertama Negeri (SMPN) 2 Rambang, pada tahun 2015 hingga tahun 2018, dan Sekolah Menengah Atas Negeri (SMAN) 2 Prabumulih pada tahun 2018 hingga tahun 2021.

Penulis menjadi mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung, pada tahun 2021 melalui jalur SBMPTN. Selama menjadi mahasiswa penulis berkesempatan menjadi asisten dosen mata kuliah Menggambar Teknik dan Praktikum Analisa Sistem Tenaga tahun 2023-2024 dan tergabung dalam keanggotaan asisten Laboratorium Sistem Tenaga Listrik dari tahun 2023. Selain itu, penulis juga tergabung dalam organisasi intra kampus Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (Himatro) yang pada tahun 2022 diamanahkan sebagai Sekretaris Departemen Kaderisasi dan Pengembangan Organisasi dan pada tahun 2023 diamanahkan sebagai Ketua Himpunan. Penulis melaksanakan magang MSIB dan kerja praktik di PT. PLN Nusantara Power, UP Tarahan, Lampung dalam Satuan Kerja Perawatan Listrik dan membuat laporan yang berjudul “Penyusunan Standar Inspeksi dan Pengujian Peralatan *Electric* Pada Unit Pelaksana Pembangunan Tarahan (QC *Checklist* dan Form Uji).”



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

**Tiada lembar yang paling indah dalam laporan skripsi ini kecuali lembar persembahan. Dengan mengucapkan syukur atas Rahmat Allah SWT, skripsi ini saya persembahkan sebagai tanda bukti perjuangan kepada diri sendiri, orang tua tercinta, Cak Leo, Cak Dimas, dan sahabat yang selalu memberi support untuk menyelesaikan study sarjana dan skripsi ini.**

## **MOTTO**

La Yukallifullahu Nafsan Illa Wus'aha

(QS. Al-Baqarah 2:286)

“Maka sesungguhnya Bersama kesulitan ada kemudahan. Maka apabila engkau telah selesai (dari suatu urusan), tetaplah bekerja keras (untuk urusan yang lain). Dan hanya kepada Tuhanmulah engkau berharap.”

(QS. Al-Insyirah : 6-7)

“Orang tua di rumah menanti kepulanganmu dengan hasil yang membanggakan, jangan kecewakan mereka. Simpan keluhmu, sebab letihmu tak sebanding dengan perjuangan mereka menghidupimu”

## SANWACANA

Segala puji bagi Allah SWT, atas limpahan nikmat-Nya yang diberikan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Shalawat dan salam senantiasa dicurahkan kepada Nabi Muhammad SAW, suri teladan yang mampu membuka sesuatu yang terkunci, penutup dari semua yang terdahulu, penolong kebenaran dengan jalan yang benar, dan petunjuk kepada jalan-Mu yang lurus.

Tugas Akhir dengan judul “Analisis Kapasitas BESS (*Battery Energy Storage System*) Dalam Implementasi *Photovoltaic Rooftop* Pada Perumahan” ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., I.P.M., selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Ibu Herlinawati, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung.
4. Bapak Sumadi, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung.
5. Bapak Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing utama yang selalu memberikan motivasi dan pandangan kehidupan, mengarahkan dan membimbing dengan sangat tulus dan penuh kesabaran.
6. Bapak Dr. Eng. Ir. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing pendamping yang telah memberikan saran, bimbingan dan arahan dengan baik dan ramah.
7. Bapak Dr. Eng., Ir. Khairudin, S.T., M.Sc. selaku dosen penguji yang telah memberikan saran, masukan, kritik dan arahan.

8. Bapak Ir. Noer Soedjarwanto, S.T., M.T. selaku dosen Pembimbing Akademik (PA) yang telah memberikan nasihat, arahan, bimbingan dengan baik dan tulus bagi penulis selama perkuliahan.
9. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu, pengajaran, dan pandangan hidup selama perkuliahan.
10. Staff administrasi Jurusan Teknik Elektro dan Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah membantu penulis dalam hal administrasi.
11. Cinta pertama dan panutanku, Ayahanda Supadi dan pintu surgaku Ibunda Andri Pesiana. Terimakasih atas segala pengorbanan dan tulus kasih yang di berikan. Beliau memang tidak sempat merasakan Pendidikan bangku perkuliahan, namun mereka mampu senantiasa memberikan yang terbaik, tidak kenal lelah mendoakan serta memberikan perhatian dan dukungan hingga penulis mampu menyelesaikan studinya sampai meraih gelar sarjana. Semoga bapak ibu sehat, panjang umur, dan dapat melihat ketiga anaknya meraih kesuksesan.
12. Kedua saudaraku, Cak Leo dan Cak Dimas yang selalu memberikan dukungan dan motivasi agar penulis dapat menyelesaikan studi ini dengan sangat baik.
13. Muhammad Husein yang selalu membantu penulis untuk bertukar laptop agar penulis dapat lebih mudah mengerjakan skripsi ini.
14. Keluarga PENGHUNI PERTAMA; Yai, Afdhal, Fardan, Bagus, Jojo, dan Daffa. Semoga kalian semua dilancarkan.
15. Segenap Keluarga Besar Laboratorium Sistem Tenaga Listrik; Pak Rachman atas kerjasamanya selama menjadi asisten laboratorium; Desta, Nadia, Imam, Rasel, Frissa, Tegar, Rasyid dan Eikel serta tidak lupa adik-adik asisten 2022.
16. Pengurus Harian Periode 2023; Bimo, Luki, Desta, Nugroho, Citra, dan Akbar yang menjadi partner terbaik selama mengurus himpunan.
17. Mas Dermawan Budianto selaku pembimbing lapangan Kerja Magang PT. PLN Nusantara Power.
18. Keluarga besar Angkatan 2021 (Excalto), yang telah memberikan banyak motivasi, nilai-nilai sosial, dan bantuan dalam berbagai hal.

19. Keluarga besar HIMATRO UNILA, Kabinet Bersuara, yang telah menjadi wadah dalam mengembangkan nilai-nilai kepemimpinan dan organisasi bagi penulis.
20. Semua pihak yang terlibat dalam proses perkuliahan dan penulisan skripsi ini, penulis ucapkan terima kasih atas bantuan dan kerjasamanya.
21. Kepada penulis sendiri. Jerry Marlian. Terima kasih sudah bertahan sejauh ini. Terima kasih tetap memilih berusaha dan merayakan dirimu sendiri sampai di titik ini, walau sering kali merasa atas apa yang diusahakan dan belum cukup berhasil, namun terima kasih tetap menjadi manusia yang selalu mau berusaha dan tidak lelah mencoba. Menjadi lulusan pertama merupakan pencapaian yang sangat patut dirayakan untuk diri sendiri. Berbahagialah selalu dimanapun berada, tetap lakukan yang terbaik “semua hal pasti berlalu”.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi kesempurnaan skripsi ini yang akan datang. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis khususnya dan masyarakat pada umumnya.

Bandar Lampung, 16 Desember 2024

**Jerry Marlian**

## DAFTAR ISI

<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>i</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>iv</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>vii</b>
<b>I. PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Tujuan Penelitian .....	2
1.3. Rumusan Masalah.....	3
1.4. Batasan Masalah .....	3
1.5. Manfaat Penelitian .....	4
1.6. Hipotesis .....	4
1.7. Sistematika Penulisan .....	4
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>6</b>
2.1 Penelitian Terdahulu .....	6
2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) .....	8
2.3 Jenis-jenis Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS).....	9
2.3.1 Sistem PLTS <i>on-grid</i> .....	9
2.3.2 Sistem PLTS <i>Off-grid</i> .....	10
2.3.3 Sistem PLTS <i>Hybrid</i> .....	11
2.4 Komponen-komponen PLTS Atap .....	11
2.4.1 Solar Panel.....	11
2.4.2 Inverter .....	14
2.4.3 Baterai .....	14
2.4.4 PV Array combiner .....	15
2.5 Konfigurasi Modul Panel Surya .....	16
2.6 Perkembangan Instrumen Kebijakan PLTS Atap di Indonesia .....	16
2.7 PVsyst .....	18
2.8 <i>Energy Balance Method</i> .....	19

<b>III. METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>20</b>
3.1. Waktu dan Tempat.....	20
3.2. Alat dan Bahan.....	20
3.3. Metodologi Penelitian.....	21
3.4. Diagram Pelaksanaan Penelitian.....	23
3.5. Pemodelan Analisa Kapasitas Baterai .....	23
3.6. Matriks .....	24
3.7. Diagram Alir Program .....	26
3.8. Kapasitas Baterai Optimal .....	27
<b>IV. ANALISIS DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>29</b>
4.1. Analisis kapasitas BESS ( <i>Battery Energy Storage System</i> ) .....	29
4.2. Lokasi Penelitian.....	30
4.3. Komponen PLTS Pada Sistem Eksisting.....	30
4.4. Kapasitas Baterai .....	33
4.5. Analisis <i>Output</i> .....	34
4.5.1. Data 01 Juli 2024.....	36
4.5.2. Data 02 Juli 2024.....	39
4.5.4. Data 04 Juli 2024.....	45
4.5.5. Data 05 Juli 2024.....	48
4.5.6. Data 06 Juli 2024.....	51
4.5.7. Data 07 Juli 2024.....	54
4.5.8. Data 08 Juli 2024.....	57
4.5.9. Data 09 Juli 2024.....	60
4.5.10. Data 10 Juli 2024.....	63
4.5.11. Data 11 Juli 2024 ‘ .....	66
4.5.12. Data 12 Juli 2024.....	69
4.5.13. Data 13 Juli 2024.....	72
4.5.14. Data 14 Juli 2024.....	75
4.5.15. Data 15 Juli 2024.....	78
4.5.16. Data 16 Juli 2024.....	81
4.5.17. Data 17 Juli 2024.....	84
4.5.18. Data 18 Juli 2024.....	87
4.5.19. Data 19 Juli 2024.....	90
4.5.20. Data 20 Juli 2024.....	93
4.5.21. Data 21 Juli 2024.....	96
4.5.22. Data 22 Juli 2024.....	99

4.4.23 Data 23 Juli 2024.....	102
4.5.24 Data 24 Juli 2024.....	105
4.5.25 Data 25 Juli 2024.....	108
4.5.26 Data 26 Juli 2024.....	111
4.5.27 Data 27 Juli 2024.....	114
4.5.28 Data 28 Juli 2024.....	117
4.5.29 Data 29 Juli 2024.....	120
4.5.30 Data 30 Juli 2024.....	123
4.5.31 Data 31 Juli 2024.....	126
4.6 Hasil dan Analisis.....	130
4.7 <i>Economic evaluation</i> .....	133
<b>V. SIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>139</b>
5.1. Simpulan.....	139
5.2. Saran .....	139



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS).....	9
Gambar 2. Sistem PLTS On-grid .....	10
Gambar 3. Sistem PLTS Off-grid .....	10
Gambar 4. Sistem PLTS Hybrid .....	11
Gambar 5. Modul Solar Panel Monocrystalline.....	12
Gambar 6. Modul Solar Panel Polycrystalline.....	13
Gambar 7. Inverter .....	14
Gambar 8. Baterai LiFePo4.....	15
Gambar 9. PV Array <i>Combiner</i> .....	16
Gambar 10. Perkembangan Kebijakan PLTS di Indonesia.....	17
Gambar 11. Diagram Alir Penelitian .....	23
Gambar 12. Diagram Alir Program.....	26
Gambar 13. Skema Kapasitas Penyimpanan Baterai dengan Rugi-Rugi Efisiensi	33
Gambar 14. Grafik Neraca Energi 01 Juli 2024.....	37
Gambar 15. Energi yang tersimpan di dalam baterai selama 24 jam 01 Juli 2024	38
Gambar 16. Grafik Neraca Energi 02 Juli 2024.....	40
Gambar 17. Energi yang tersimpan di dalam baterai selama 24 jam 02 Juli 2024	41
Gambar 18. Grafik Neraca Energi 03 Juli 2024.....	43
Gambar 19. Energi yang tersimpan di dalam baterai selama 24 jam 03 Juli 2024	44
Gambar 20. Grafik Neraca Energi 04 Juli 2024.....	46
Gambar 21. Energi yang tersimpan di dalam baterai selama 24 jam 04 Juli 2024	47
Gambar 22. Grafik Neraca Energi 05 Juli 2024.....	49
Gambar 23. Energi yang tersimpan di dalam baterai selama 24 jam 05 Juli 2024	50
Gambar 24. Grafik Neraca Energi 06 Juli 2024.....	52

Gambar 25. Energi yang tersimpan di dalam baterai selama 24 jam 06 Juli 2024	53
Gambar 26. Grafik Neraca Energi 07 Juli 2024.....	55
Gambar 27. Energi yang tersimpan di dalam baterai selama 24 jam 07 Juli 2024	56
Gambar 28. Grafik Neraca Energi 08 Juli 2024.....	58
Gambar 29. Energi yang tersimpan di dalam baterai selama 24 jam 08 Juli 2024	59
Gambar 30. Grafik Neraca Energi 09 Juli 2024.....	61
Gambar 31. Energi yang tersimpan di dalam baterai selama 24 jam 09 Juli 2024	62
Gambar 32. Grafik Neraca Energi 10 Juli 2024.....	64
Gambar 33. Energi yang tersimpan di dalam baterai selama 24 jam 10 Juli 2024	65
Gambar 34. Grafik Neraca Energi 11 Juli 2024.....	67
Gambar 35. Energi yang tersimpan di dalam baterai selama 24 jam 11 Juli 2024	68
Gambar 36. Grafik Neraca Energi 12 Juli 2024.....	70
Gambar 37. Energi yang tersimpan di dalam baterai selama 24 jam 12 Juli 2024	71
Gambar 38. Grafik Neraca Energi 13 Juli 2024.....	73
Gambar 39. Energi yang tersimpan di dalam baterai selama 24 jam 13 Juli 2024	74
Gambar 40. Grafik Neraca Energi 14 Juli 2024.....	76
Gambar 41. Energi yang tersimpan di dalam baterai selama 24 jam 14 Juli 2024	77
Gambar 42. Grafik Neraca Energi 15 Juli 2024.....	79
Gambar 43. Energi yang tersimpan di dalam baterai selama 24 jam 15 Juli 2024	80
Gambar 44. Grafik Neraca Energi 16 Juli 2024.....	82
Gambar 45. Energi yang tersimpan di dalam baterai selama 24 jam 16 Juli 2024	83
Gambar 46. Grafik Neraca Energi 17 Juli 2024.....	85
Gambar 47. Energi yang tersimpan di dalam baterai selama 24 jam 17 Juli 2024	86
Gambar 48. Grafik Neraca Energi 18 Juli 2024.....	88
Gambar 49. Energi yang tersimpan di dalam baterai selama 24 jam 18 Juli 2024	89
Gambar 50. Grafik Neraca Energi 19 Juli 2024.....	91
Gambar 51. Energi yang tersimpan di dalam baterai selama 24 jam 19 Juli 2024	92
Gambar 52. Grafik Neraca Energi 20 Juli 2024.....	94
Gambar 53. Energi yang tersimpan di dalam baterai selama 24 jam 20 Juli 2024	95
Gambar 54. Grafik Neraca Energi 21 Juli 2024.....	97
Gambar 55. Energi yang tersimpan di dalam baterai selama 24 jam 21 Juli 2024	98
Gambar 56. Grafik Neraca Energi 22 Juli 2024.....	100

Gambar 57. Energi yang tersimpan di dalam baterai selama 24 jam 22 Juli 2024 .....	101
Gambar 58. Grafik Neraca Energi 23 Juli 2024.....	103
Gambar 59. Energi yang tersimpan di dalam baterai selama 24 jam 23 Juli 202	104
Gambar 60. Grafik Neraca Energi 24 Juli 2024.....	106
Gambar 61. Energi yang tersimpan di dalam baterai selama 24 jam 24 Juli 202	107
Gambar 62. Grafik Neraca Energi 25 Juli 2024.....	109
Gambar 63. Energi yang tersimpan di dalam baterai selama 24 jam 25 Juli 202	110
Gambar 64. Grafik Neraca Energi 26 Juli 2024.....	112
Gambar 65. Energi yang tersimpan di dalam baterai selama 24 jam 26 Juli 202	113
Gambar 66. Grafik Neraca Energi 27 Juli 2024.....	115
Gambar 67. Energi yang tersimpan di dalam baterai selama 24 jam 27 Juli 202	116
Gambar 68. Grafik Neraca Energi 28 Juli 2024.....	118
Gambar 69. Energi yang tersimpan di dalam baterai selama 24 jam 28 Juli 202	119
Gambar 70. Grafik Neraca Energi 29 Juli 2024.....	121
Gambar 71. Energi yang tersimpan di dalam baterai selama 24 jam 29 Juli 202	122
Gambar 72. Grafik Neraca Energi 30 Juli 2024.....	124
Gambar 73. Energi yang tersimpan di dalam baterai selama 24 jam 30 Juli 202	125
Gambar 74. Grafik Neraca Energi 31 Juli 2024.....	127
Gambar 75. Energi yang tersimpan di dalam baterai selama 24 jam 31 Juli 202	128
Gambar 76. Grafik SoC Maksimum Baterai.....	131
Gambar 77. Economic evaluation perancangan awal .....	134
Gambar 78. <i>Cumulative cashflow</i> perancangan awal .....	135
Gambar 79. <i>Economic evaluation redesign system</i> .....	135
Gambar 80. <i>Cumulative cashflow redesign system</i> .....	136
Gambar 81. <i>Carbon Balance</i> .....	137

## DAFTAR TABEL

Tabel 1. Perbandingan Jenis Modul Solar Panel.....	13
Tabel 2. Jadwal Penelitian Tugas Akhir .....	20
Tabel 3. Data Matriks Pemetaan Fungsi Objektif.....	25
Tabel 4. Datasheet Inverter Hybrid ICA Solar SNV-GH5042 .....	30
Tabel 5. Datasheet Baterai LiFePo4 .....	31
Tabel 6. Datasheet Panel JAM72S30 540/MR .....	32
Tabel 7. Data 01 Juli 2024 .....	36
Tabel 8. Data 02 Juli 2024 .....	39
Tabel 9. Data 03 Juli 2024 .....	42
Tabel 10. Data 04 Juli 2024 .....	45
Tabel 11. Data 05 Juli 2024 .....	48
Tabel 12. Data 06 Juli 2024 .....	51
Tabel 13. Data 07 Juli 2024 .....	54
Tabel 14. Data 08 Juli 2024 .....	57
Tabel 15. Data 09 Juli 2024 .....	60
Tabel 16. Data 10 Juli 2024 .....	63
Tabel 17. Data 11 Juli 2024 .....	66
Tabel 18. Data 12 Juli 2024 .....	69
Tabel 19. Data 13 Juli 2024 .....	72
Tabel 20. Data 14 Juli 2024 .....	75
Tabel 21. Data 15 Juli 2024 .....	78
Tabel 22. Data 16 Juli 2024 .....	81
Tabel 23. Data 17 Juli 2024 .....	84
Tabel 24. Data 18 Juli 2024 .....	87
Tabel 25. Data 19 Juli 2024 .....	90
Tabel 26. Data 20 Juli 2024 .....	93
Tabel 27. Data 21 Juli 2024 .....	96

Tabel 28. Data 22 Juli 2024 .....	99
Tabel 29. Data 23 Juli 2024 .....	102
Tabel 30. Data 24 Juli 2024 .....	105
Tabel 31. Data 25 Juli 2024 .....	108
Tabel 32. Data 26 Juli 2024 .....	111
Tabel 33. Data 27 Juli 2024 .....	114
Tabel 34. Data 28 Juli 2024 .....	117
Tabel 35. Data 29 Juli 2024 .....	120
Tabel 36. Data 30 Juli 2024 .....	123
Tabel 37. Data 31 Juli 2024 .....	127
Tabel 38. <i>State of Charge</i> (SoC) maksimum perhari selama bulan Juli 2024 ....	130

## I. PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Saat ini, ketergantungan terhadap pembangkit listrik konvensional berbahan bakar fosil seperti batubara, minyak bumi, dan gas alam masih menjadi bagian terbesar dari konsumsi energi global. Namun, semakin disadari bahwa bahan bakar fosil memiliki dampak besar terhadap pemanasan global serta ketersediaannya yang semakin menipis seiring dengan pertumbuhan populasi dunia yang terus berlanjut. Hal ini menimbulkan kekhawatiran yang mendesak, sehingga energi terbarukan menjadi topik penelitian yang populer di banyak negara sebagai langkah solusi untuk mengurangi penggunaan energi fosil yang memiliki banyak kerugian. Sebagai negara yang terletak di garis khatulistiwa, Indonesia memiliki potensi sumber energi terbarukan yang melimpah. Hal inilah yang menjadi dasar Peraturan Presiden No. 79 Tahun 2014 menargetkan pemanfaatan energi terbarukan di Indonesia sebesar 23% pada tahun 2025 dan pada tahun 2050 mencapai 31% [1][2].

Di antara berbagai jenis energi terbarukan, energi surya fotovoltaik (PV) menjadi salah satu yang paling potensial. Sistem ini menghasilkan energi listrik dari sinar matahari, memungkinkan produksi listrik diakses bahkan di daerah terpencil. Namun, regulasi pemerintah tidak mendukung implementasi secara penuh, khususnya dengan penghapusan skema *ekspor* listrik. Peraturan terbaru Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 2 Tahun 2024 menyatakan bahwa kelebihan energi listrik yang dihasilkan oleh PLTS atap tidak akan diperhitungkan dalam penentuan jumlah tagihan listrik pelanggan, sehingga pelanggan tidak dapat menjual kembali listrik berlebih ke jaringan PLN. Maka dari itu dibutuhkan skema khusus untuk mengatasi hambatan tersebut salah satunya dengan mengoptimalkan energi listrik yang dihasilkan oleh PLTS [3].

Terdapat beberapa tantangan lain dalam pengelolaan produksi PV yaitu sifatnya yang intermiten dan stokastik. Produksi listrik dari PV sangat bergantung pada intensitas sinar matahari yang bervariasi sepanjang hari dan dipengaruhi oleh kondisi cuaca. Hal ini menyebabkan fluktuasi dalam pasokan energi yang dapat mengganggu stabilitas jaringan listrik. Sebagai solusi yang menjanjikan, baterai telah banyak digunakan dalam banyak aplikasi PV karena dapat menyerap atau melepaskan energi saat dibutuhkan. Namun, fluktuasi daya menyebabkan *charging* dan *discharging* yang sering dan terputus-putus sehingga mempercepat degradasi baterai. Oleh karena itu, diperlukan manajemen baterai yang optimal untuk mendukung integrasi skala besar PV ke dalam jaringan listrik secara efisien dan ekonomis [4]

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini akan berfokus untuk menganalisis dan mengevaluasi PLTS *Rooftop* perumahan pelanggan PLN agar dapat mengetahui kapasitas baterai yang optimal dengan mempertimbangkan berbagai faktor termasuk produksi energi dari panel surya, efisiensi sistem penyimpanan dan distribusi, serta pola konsumsi energi yang spesifik di rumah tangga. Sehingga aspek teknis dan ekonomis layak untuk diterapkan dan sistem beroperasi secara optimal.

## **1.2. Tujuan Penelitian**

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa dan mengevaluasi kapasitas BESS (*Battery Energy Storage System*) pada PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya) *Rooftop* perumahan pelanggan PLN yang terhubung ke jaringan PLN, serta dari hasil analisa dan evaluasi tersebut akan mendapatkan peluang *Redesign* sistem yang lebih optimal dari kondisi eksisting.

### 1.3. Rumusan Masalah

Menurut Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 2 Tahun 2024, kelebihan energi listrik yang dihasilkan oleh PLTS *Rooftop* yang diekspor tidak diperhitungkan dalam penentuan tarif tagihan listrik pelanggan, sehingga diperlukan evaluasi seberapa besar BESS (*Battery Energy Storage System*) yang paling minimal tetapi mampu melayani beban dengan optimal, agar kelebihan energi tidak terbuang sia-sia.

Pada penelitian ini membahas konfigurasi dari sistem eksisting, yaitu sistem PLTS dengan kapasitas baterai 28,8 kWh dengan analisa yang didapat dari hasil berbagai faktor termasuk produksi energi dari panel surya, efisiensi sistem penyimpanan dan distribusi, serta pola konsumsi energi yang spesifik di rumah tangga sehingga dapat diketahui seberapa besar kapasitas paling optimal dan memenuhi aspek ekonomis.

Pada sistem eksisting, inverter PV2 yang digunakan yaitu inverter *off-grid*, inverter ini di *setting* agar pada saat baterai penuh maka MPPT melakukan *supply curtailment* yaitu pembatasan *input* dari PV, sehingga sebesar apapun *irradiation* yang didapatkan PV, ketika baterai penuh maka PV tidak akan melakukan *supply* ke baterai.

### 1.4. Batasan Masalah

Penelitian ini menggunakan data profil beban perumahan mulai dari 01 Juli 2024 hingga 31 Juli 2024 dengan *timestep* 1 jam. Analisa data yang digunakan langsung menggunakan data *real* yang didapat dari web ICASOLAR yang berisi data konsumsi beban, daya yang dihasilkan oleh PLTS, Daya *Charging* yang masuk ke baterai, dan Daya *Discharging* yang dikeluarkan oleh baterai untuk memenuhi beban.



### **1.5. Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan mampu memberikan pemahaman mengenai bagaimana metode dalam menentukan kapasitas baterai, sistem pada inverter, dan manajemen energi pada PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya) pada perumahan pelanggan PLN yang terhubung ke *grid* PLN yang paling optimal. Selain itu, penelitian ini diharapkan menjadi bahan pembelajaran dan referensi bagi mahasiswa lain untuk mengembangkan penelitian-penelitian selanjutnya.

### **1.6. Hipotesis**

Pada sistem eksisting, sistem PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya) yang digunakan yaitu 2 string PV dengan 2 MPPT dan kapasitas baterai yang digunakan yaitu 48 Volt 100 AH 6 unit sehingga diasumsikan bahwa sistem yang digunakan belum aspek optimal baik dalam sisi ekonomis maupun teknis untuk melayani perumahan pelanggan PLTS *rooftop*. Maka dari hasil analisis dan evaluasi pada sistem ini akan mendapatkan peluang *redesign* sistem yang lebih optimal dari kondisi eksisting yang telah diterapkan.

### **1.7. Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan laporan akhir bertujuan guna memberikan suatu gambaran secara sederhana terkait pembahasan yang ada di dalam tugas akhir skripsi dan untuk memudahkan dalam memahami isi yang disajikan dalam skripsi ini. Adapun sistematika yang digunakan oleh penulis adalah sebagai berikut:

**BAB I PENDAHULUAN**

Pada bab ini menjelaskan latar belakang, tujuan penelitian, manfaat penelitian, rumusan masalah, hipotesis dan sistematika penulisan.

**BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini berisikan teori pendukung materi tugas akhir yang merupakan pengantar dalam pemahaman terkait materi tugas akhir yang dikutip dari berbagai sumber ilmiah, seperti jurnal, proseding, dan buku yang digunakan sebagai panduan dalam penulisan laporan tugas akhir ini.

**BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Pada bab ini menjelaskan waktu dan tempat, alat dan bahan, pelaksanaan serta pengamatan dalam pengerjaan penelitian tugas akhir.

**BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pada bab ini menjelaskan hasil data komputasi dan pembahasan dari penelitian tugas akhir ini.

**BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

Pada bab ini menjelaskan kesimpulan dari hasil pembahasan masalah yang dikaji dalam penelitian tugas akhir dan berisi saran penulis untuk meningkatkan wawasan bagi pembaca.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian yang berjudul “*Self-consumption potential and surplus compensation policy impact on rooftop photovoltaic systems in Spain*”, R. Saez, D. Boer, A.B. Shobo, M. Valles. Menyatakan bahwa perkiraan surplus listrik PV dapat menyumbang sekitar dua pertiga dari energi yang dihasilkan di daerah pedesaan, sementara daerah perkotaan hanya dapat mencapai sekitar sepertiga. Hal ini menunjukkan bahwa pengelolaan kelebihan listrik yang efektif dapat secara signifikan meningkatkan tingkat konsumsi mandiri pada *rooftop* perumahan di desa. Tetapi yang paling berpengaruh dalam optimalnya sistem penerapan energi ini yaitu sistem penyimpanan energi. Integrasi sistem penyimpanan energi memungkinkan rumah tangga menyimpan kelebihan listrik yang dihasilkan selama jam puncak sinar matahari. Energi yang tersimpan ini kemudian dapat digunakan selama periode pembangkit rendah atau permintaan tinggi, secara efektif meningkatkan konsumsi listrik yang dihasilkan oleh sistem PV. Studi ini menyoroti pentingnya meminimalkan sistem penyimpanan energi dalam mengoptimalkan penggunaan surplus [5]

Penelitian yang berjudul “*Simulation test of 50 MW grid-connected “Photovoltaic+Energy storage” system based on pvsyst software*” Fangfang Wang, Renjie Li, Guangjin Zhao, Dawei Xia, Weishu Wang. Penelitian ini membahas berbagai studi yang mengusulkan model pengoptimalan dan strategi control untuk sistem penyimpanan energi. Simulasi menggunakan *software* Pvsyst yang dilakukan di kota Zhengzhou, Provinsi Henan, China mencatat bahwa kondisi cuaca lokal dan radiasi matahari bervariasi sepanjang hari berdampak pada PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya) dan titik balik matahari musim panas mengalami intensitas radiasi matahari tertinggi, sedangkan titik balik matahari musim dingin memiliki yang terendah. Total

radiasi pada modul fotovoltaik tertinggi di kisaran 380-900 W/m<sup>2</sup>, yang secara signifikan mempengaruhi kinerja sistem. Studi ini menekankan pentingnya memilih lokasi dengan jam sinar matahari yang panjang dan radiasi yang kuat untuk pembangkitan energi yang optimal. Penelitian menunjukkan bahwa PV dan sistem penyimpanan energi yang dikonfigurasi dengan baik dapat secara signifikan mengurangi biaya sambil memenuhi permintaan beban. Selain itu, diperkirakan bahwa sistem dapat menghemat sekitar 1.121.310.388 ton emisi CO<sub>2</sub> selama siklus hidupnya, menunjukkan manfaat lingkungannya [6]

Penelitian yang berjudul “*Optimal hybrid power dispatch through smart solar power forecasting and battery storage integration*” Keaobaka D. Poti , Raj M. Naidoo , Nsilulu T. Mbungu, Ramesh C. Bansal. Penelitian ini berfokus pada pengembangan model peramalan hari ke depan untuk output daya PV surya, mengevaluasi tiga metode berbeda. Menyatakan bahwa satu persamaan spesifik, yang menggabungkan koefisien pertukaran panas dan kecepatan angin, memberikan akurasi perkiraan tertinggi di antara metode yang diuji. Model menunjukkan kinerja terbaik selama musim dingin, dikaitkan dengan kondisi yang stabil. Kesalahan Mutlak Rata-rata (MAE) selama periode ini dicatat pada 21 kW, dengan *Root Mean Squared Error* (RMSE) 35,4 kW dan Rata-rata *Absolute Persentase Error* (MAPE) 3,1%, menunjukkan kesalahan prediksi yang lebih rendah dibandingkan dengan musim lain. Selain itu penelitian menyatakan bahwa ukuran penyimpanan baterai (8,69 kW) tidak memperhitungkan batasan biaya modal dan evaluasi tekno-ekonomi, seperti periode pengembalian. Pengawasan ini dapat memiliki implikasi keuangan untuk bangunan komersial, menunjukkan bahwa pekerjaan di masa depan harus mencakup penilaian tekno-ekonomi yang komprehensif [7]

Penelitian yang berjudul “*A Grid-Connected Optimal Hybrid PV-BES System Sizing for Malaysian Commercial Buildings*” Jahangir Hossain , Aida. F. A. Kadir , Hussain Shareef, Rampelli Manojkumar, Nagham Saeed, dan Ainain. Studi ini mengidentifikasi konfigurasi optimal yang terdiri dari sistem fotovoltaik (PV) 32 kW yang dipasangkan dengan sistem penyimpanan energi baterai (BES) 14 kWh. Konfigurasi ini dirancang untuk memaksimalkan

efisiensi energi dan penghematan biaya untuk bangunan komersial Malaysia. Penerapan sistem PV-BES yang optimal menghasilkan pengurangan biaya listrik (COE) 12,33%. Pengurangan ini dicapai melalui penjualan 5944,029 kWh listrik kembali ke jaringan, menunjukkan manfaat finansial dari mengintegrasikan sumber energi terbarukan. Sistem yang diusulkan mengarah pada pengurangan yang signifikan dalam konsumsi energi dan permintaan puncak. Secara khusus, konsumsi energi berkurang 13,71%, sedangkan permintaan puncak menurun sebesar 5,85%. Hal ini menunjukkan peningkatan manajemen energi dan efisiensi dalam bangunan komersial sehingga dalam penerapan energi terbarukan khususnya PLTS sangat membutuhkan validasi penentuan penyimpanan energi yang optimal agar pada sisi ekonomis dapat terjangkau. [8]

## **2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)**

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah sebuah sistem pembangkit listrik yang menggunakan sinar matahari sebagai sumber energinya. Dengan bantuan sel surya (photovoltaic), PLTS mengubah radiasi foton dari sinar matahari menjadi energi listrik. PLTS termasuk dalam kategori energi terbarukan yang ramah lingkungan, karena tidak menghasilkan kebisingan akibat benda berputar dan tidak menimbulkan limbah yang merugikan lingkungan. Efisiensi daya keluaran dari sel surya dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu radiasi matahari, *temperature* sel surya, orientasi panel surya, dan *shadow* [9]



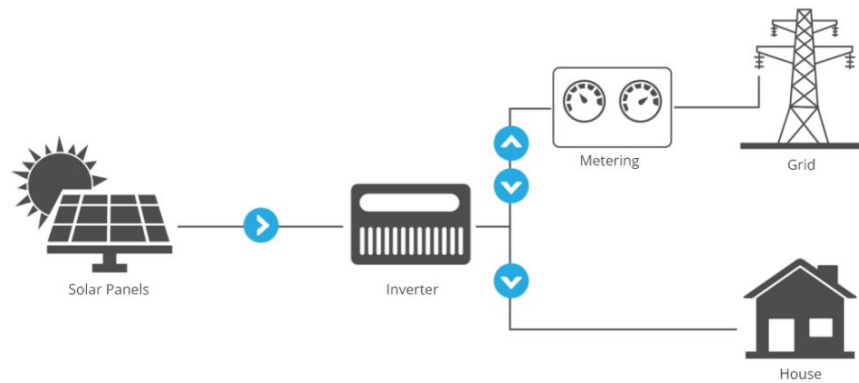
Gambar 1. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Sumber : <https://atonergi.com/5-kelebihan-pemasangan-plts-atap/>

## 2.3 Jenis-jenis Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

### 2.3.1 Sistem PLTS *on-grid*

Sistem PLTS ini terhubung ke jaringan distribusi tegangan rendah. PLTS jenis ini memanfaatkan atap bangunan sebagai lahan untuk pemasangan panel surya [10]. PLTS *on-grid* dapat beroperasi tanpa menggunakan komponen baterai sebagai tempat penyimpanan energi yang dihasilkan oleh modul surya, karena output listriknya dapat langsung disalurkan ke jaringan distribusi yang telah disuplai pembangkit lainnya, seperti jaringan listrik PLN [11]. Ketika siang hari dan terkoneksi dengan jaringan PLN, modul surya akan bekerja untuk menyuplai daya utama ke beban dan pembangkitan berlebih akan disalurkan ke jaringan distribusi. Namun saat malam hari atau saat siang hari dan tidak terkoneksi dengan jaringan PLN maka modul surya tidak bekerja sehingga beban akan disuplai oleh jaringan listrik[12]. PLTS *on-grid* memiliki kelebihan, yaitu biaya instalasi yang lebih murah, karena tidak memerlukan baterai [10]

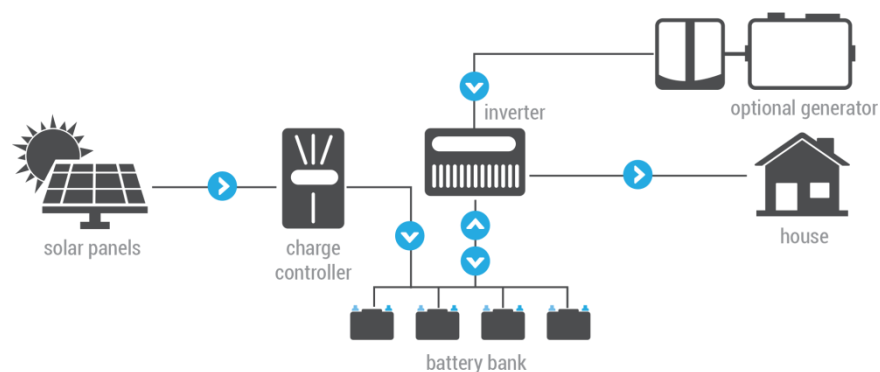


Gambar 2. Sistem PLTS On-grid

Sumber : <https://renergynusantara.com/plts-on-grid/>

### 2.3.2 Sistem PLTS *Off-grid*

Sistem PLTS *off-grid* atau *stand alone system* adalah sistem PLTS yang tidak terhubung dengan jaringan listrik PLN, sehingga *output* daya listrik menyuplai langsung ke jaringan distribusi pelanggan (beban). Sistem ini memerlukan baterai untuk menyimpan energi yang dihasilkan oleh solar panel untuk disalurkan ke beban[10]. Biaya instalasi PLTS *off-grid* lebih mahal karena membutuhkan baterai dan biasanya diperlukan *back-up* dari generator diesel untuk menjaga kestabilan frekuensi jaringan saat malam hari [10]. PLTS model ini cocok diterapkan untuk daerah 3T (Tertinggal, Terdepan, dan Terluar) yang dimana jaringan listrik PLN tidak sampai ke daerah.

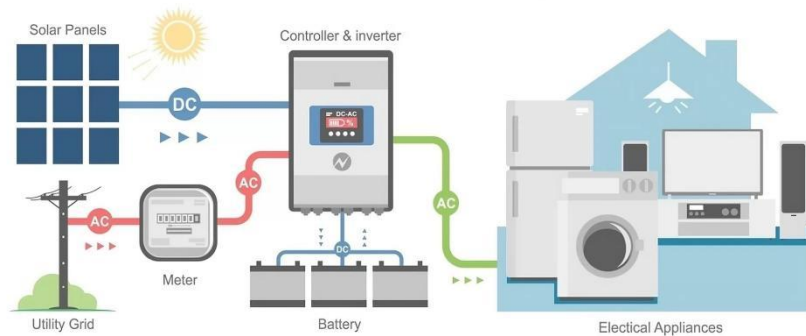


Gambar 3. Sistem PLTS Off-grid

Sumber : <https://renergynusantara.com/plts-off-grid/>

### 2.3.3 Sistem PLTS *Hybrid*

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *Hybrid* adalah sistem yang menggabungkan koneksi ke jaringan listrik PLN (*On-Grid*) dengan penggunaan baterai sebagai penyimpanan daya (*Off-Grid*) untuk kebutuhan beban kritis saat terjadi pemadaman PLN atau pada malam hari. Fungsi utama dari PLTS *Hybrid* adalah mengoptimalkan sistem. Selain mengurangi ketergantungan pada listrik dari PLN, sistem ini juga mampu menyimpan daya dalam baterai, yang dapat digunakan ketika suplai listrik dari jaringan tidak tersedia. Kombinasi antara sistem *On-Grid* dan *Off-Grid* inilah yang menjadikan sistem ini disebut *hybrid*. Dengan demikian, PLTS *Hybrid* menawarkan solusi yang lebih andal dan fleksibel dalam memenuhi kebutuhan listrik, terutama di daerah yang sering mengalami pemadaman listrik atau memiliki akses terbatas ke jaringan listrik konvensional [10].



Gambar 4. Sistem PLTS Hybrid

Sumber : <https://infienergy.com/2024/05/30/apa-itu-sistem-plts-on-grid-dan-keuntungannya/>

## 2.4 Komponen-komponen PLTS Atap

### 2.4.1 Solar Panel

Modul surya adalah kumpulan sel surya yang mampu mengonversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Modul ini akan terus menghasilkan listrik selama mendapatkan sinar matahari dan masih bisa



memproduksi listrik meskipun dalam kondisi mendung, meskipun dengan daya yang lebih rendah karena kurangnya iradiasi [13]. Ada beberapa jenis solar panel yang digunakan, diantaranya :

#### 1. *Monocrystalline*

Solar panel jenis monokristalin dibuat dari satu kristal silikon yang besar dan memiliki struktur kristal yang seragam. Ini menghasilkan efisiensi konversi energi yang tinggi karena elektron memiliki lebih banyak ruang untuk bergerak, sehingga menghasilkan lebih banyak listrik dari jumlah sinar matahari yang sama dibandingkan dengan jenis sel lainnya. Monocrytalline ini akan menghasilkan kepingan sel surya yang identik satu sama lain dan berkinerja tinggi sekitar 15 – 20 % efisiensinya. Selain itu, sel monokristalin dikenal karena daya tahannya yang lama dan performanya yang baik di bawah kondisi cahaya rendah. Meskipun demikian, proses pembuatan yang kompleks membuat sel ini relatif lebih mahal dibandingkan dengan jenis sel surya lainnya [13].



Gambar 5. Modul Solar Panel Monocrystalline

Sumber : <https://jarwinn.com/products-category/jual-panel-surya-mono/>

#### 2. *Polycrystalline*

Sel surya polikristalin terbuat dari banyak kristal silikon yang dilebur bersama. Proses pembuatannya lebih sederhana dan lebih murah

dibandingkan dengan sel monokristalin, sehingga menjadikannya pilihan yang lebih ekonomis. Namun, efisiensi konversi energi sel polikristalin sedikit lebih rendah sekitar 13 – 16%. karena struktur kristal yang tidak seragam menghalangi pergerakan elektron. Meskipun demikian, sel ini tetap menjadi pilihan populer untuk aplikasi rumah tangga dan komersial karena keseimbangan yang baik antara biaya dan efisiensi [13].



Gambar 6. Modul Solar Panel Polycrystalline

Sumber: <https://jarwinn.com/products-category/jual-panel-surya-poly/>

Tabel 1. Perbandingan Jenis Modul Solar Panel

Keterangan	Monocrystalline	Polycrystalline
Jenis Sel	Silikon tunggal	Campuran silikon dengan bahan lainnya
Warna	Hitam	Kebiruan
Efisiensi panel	Sekitar 15-20 %	Sekitar 13-16 %
Kebutuhan Area	6-9 m <sup>2</sup> per kWp	8- 9 m <sup>2</sup> per kWp
Ketahanan Suhu	Relatif lebih baik dalam kondisi suhu panas juga teduh	Kurang baik bekerja dalam kondisi suhu panas
Garansi	25 Tahun	25 Tahun

### 2.4.2 Inverter

Inverter adalah perangkat listrik yang digunakan untuk mengonversi arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC) untuk penggunaan langsung atau untuk menyimpan kelebihan energi ke *storage*. Frekuensi dan tegangan *output* dari inverter dapat disesuaikan dengan kebutuhan beban [12]. Inverter juga dilengkapi Maximum Power Point Tracker (MPPT) yang berfungsi untuk mengoptimalkan daya yang dihasilkan oleh modul surya [14].



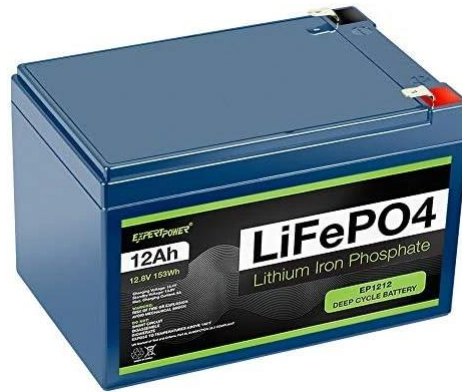
Gambar 7. Inverter

Sumber: <https://rekasurya.com/produk/product.php?code=14261-3>

### 2.4.3 Baterai

Baterai adalah perangkat kimia yang digunakan untuk menyimpan tenaga listrik yang dihasilkan dari tenaga surya. Tanpa adanya baterai, energi surya hanya dapat dimanfaatkan saat matahari bersinar, yang berarti penggunaannya terbatas pada siang hari atau saat cuaca cerah. Baterai memungkinkan penyimpanan energi yang dihasilkan pada siang hari untuk digunakan di malam hari atau selama periode mendung, sehingga menyediakan sumber listrik yang berkelanjutan dan stabil. Selain itu, baterai berperan penting dalam meningkatkan efisiensi sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) karena dapat mengurangi ketergantungan pada jaringan listrik utama dan memberikan cadangan

daya saat terjadi pemadaman listrik. Penggunaan baterai juga mendukung integrasi energi terbarukan dalam skala yang lebih luas, membantu mengurangi emisi karbon dan mendukung tujuan keberlanjutan lingkungan [15].



Gambar 8. Baterai LiFePo4

Sumber: <https://kominfo.jatimprov.go.id/berita/baterai-lithium-ferro-phosphate-lfp-menjadi-alternatif-ramah-lingkungan-dalam-kendaraan-listrik>

#### 2.4.4 PV Array combiner

Sebelum masuk ke inverter, kabel DC dari PV array akan terlebih dahulu melewati combiner box. Combiner box ini berfungsi sebagai penghubung dan titik konsolidasi untuk beberapa kabel DC yang berasal dari berbagai modul surya. Di dalam combiner box, kabel DC ini akan dikoneksikan dengan berbagai komponen proteksi seperti Fuse Holder dan *Surge Protection Device (SPD)*. *Fuse Holder* berfungsi untuk melindungi sistem dari arus berlebih yang dapat merusak komponen, sedangkan SPD melindungi sistem dari lonjakan tegangan yang dapat disebabkan oleh petir atau gangguan listrik lainnya [16].



Gambar 9. PV Array Combiner

Sumber: <https://www.danickpower.com/pv-array-combiner-box-2-in-2-out-for-pv-system-8393426.html>

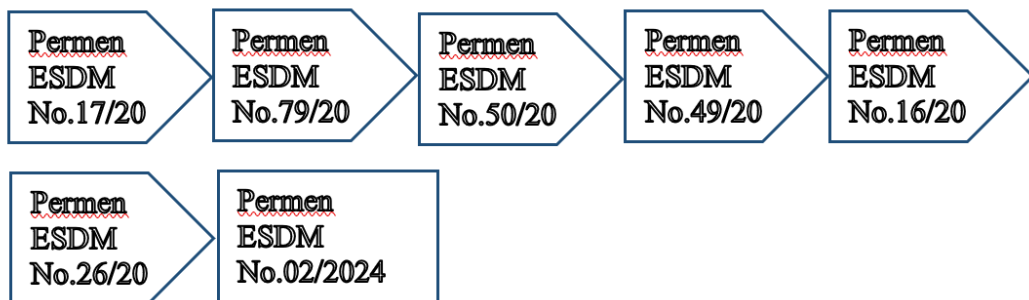
## 2.5 Konfigurasi Modul Panel Surya

PV array adalah kumpulan beberapa panel surya yang dihubungkan bersama untuk menghasilkan lebih banyak listrik. Setiap panel surya terdiri dari sel-sel surya yang mengubah cahaya matahari menjadi energi listrik. Pengaturan PV array bisa disesuaikan sesuai kebutuhan. Misalnya, panel-panel surya bisa dihubungkan secara seri untuk meningkatkan tegangan atau secara paralel untuk meningkatkan arus listrik. PV array biasanya digunakan dalam berbagai sistem tenaga surya, mulai dari skala kecil untuk rumah tangga hingga skala besar untuk industri. Dengan menggabungkan beberapa panel surya menjadi satu PV array, kita dapat menghasilkan lebih banyak listrik dan memenuhi kebutuhan energi yang berbeda-beda [16].

## 2.6 Perkembangan Instrumen Kebijakan PLTS Atap di Indonesia

Pemerintah telah menetapkan target ambisius untuk meningkatkan penerapan energi terbarukan dalam bauran energi nasional. Sebagai bagian dari upaya ini, kebijakan terus dikembangkan untuk menanggapi minat publik dan komersial yang semakin besar terhadap energi surya. Langkah-langkah ini bertujuan

untuk mendorong investasi dalam proyek-proyek energi surya, memberikan insentif bagi pengguna perorangan dan bisnis, serta mempercepat adopsi teknologi surya di seluruh sektor. Dengan kebijakan yang tepat, pemerintah berharap dapat memperkuat ketahanan energi nasional, mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, dan mendukung pencapaian target keberlanjutan lingkungan [14]. Kebijakan tersebut diamanatkan melalui beberapa regulasi, seperti Peraturan Menteri ESDM No. 17/2013, Peraturan Menteri ESDM No. 79/2014, Peraturan Menteri ESDM No. 50/2017, Peraturan Menteri ESDM No. 49/2018, Peraturan Menteri ESDM No.16/2019, dan Peraturan Menteri ESDM No. 26/2021, bahkan diatur dalam Peraturan Presiden No. 79 Tahun 2014 menargetkan pemanfaatan energi terbarukan di Indonesia sebesar 23% pada tahun 2025 dan pada tahun 2050 mencapai 31% [3]. Berikut *roadmap* perkembangan kebijakan PLTS di Indonesia yang ditunjukkan pada gambar 5.



Gambar 10. Perkembangan Kebijakan PLTS di Indonesia

Kebijakan PLTS di Indonesia dapat dibagi menjadi dua kategori utama: PLTS skala utilitas (kebijakan insentif tarif) dan PLTS atap (kebijakan meteran). Setiap kebijakan ini diterapkan melalui mekanisme dan prosedur yang berbeda. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM) telah mulai mendorong pengembangan PLTS skala utilitas dengan memperkenalkan *Feed-in Tarif* (FiT) terbatas sebagai kebijakan insentif tarif pertama. Kebijakan ini juga memperkenalkan sistem lelang kapasitas kuota. FiT memberikan insentif kepada investor di sektor PLTS untuk merangsang pertumbuhan pasar. Namun,

FiT pertama ini hanya diterapkan dalam waktu singkat, yaitu pada tahun 2013-2014, karena adanya persyaratan konten lokal.

Kemudian berdasarkan Peraturan Menteri ESDM No. 26 Tahun 2021 tentang PLTS atap, kapasitas terpasang yang diizinkan maksimal adalah 100% dari daya tersambung. Ketentuan mengenai jumlah energi listrik yang *diekspor* oleh konsumen, yang semula dihargai 65%, kini berubah menjadi 100%. Artinya, setiap energi yang diekspor oleh pelanggan ke jaringan PLN akan dihargai sama dengan tarif listrik PLN sesuai dengan daya terpasang. Jika jumlah energi listrik yang diekspor lebih besar daripada jumlah energi listrik yang diimpor dari PLN pada bulan berjalan, maka kelebihan tersebut akan diakumulasikan dan diperhitungkan sebagai pengurang tagihan listrik pada bulan berikutnya. Revisi ketentuan dalam Permen ESDM No. 26 Tahun 2021, yang menggantikan Permen ESDM No. 49 Tahun 2018, diperkirakan akan meningkatkan adopsi PLTS atap di sektor industri dan perumahan. Hal ini juga akan meningkatkan daya saing Indonesia dalam sektor produk dan jasa hijau.

Lalu pada kebijakan terakhir yang dikeluarkan pemerintah yaitu Peraturan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) No. 2 Tahun 2024 mengenai peniadaan skema penghitungan *ekspor-impor* energi Listrik, jadi kelebihan energi listrik yang dihasilkan oleh sistem PLTS *rooftop* tidak akan diperhitungkan dalam penentuan jumlah tagihan listrik pelanggan. Ini berarti pelanggan tidak bisa menjual listrik kembali ke jaringan PLN. Hal ini tentunya akan merugikan konsumen dikarenakan setiap kelebihan energi listrik dari PLTS yang *ekspor* ke grid PLN tidak akan dihitung sebagai *Feed in Tarif* (FIT).

## 2.7 PVsyst

PVsyst adalah perangkat lunak yang digunakan untuk analisis, simulasi, dan perancangan sistem fotovoltaik (PV). *Software* ini digunakan untuk merancang dan mengoptimalkan sistem PLTS yang memiliki fitur perbandingan *database* pada sistem yang tersedia, seperti kemiringan, penyesuaian musim dengan

mengevaluasi kinerjanya agar dapat memenuhi aspek efisien, ekonomis, dan sesuai dengan kebutuhan proyek. PVsyst menyediakan simulasi teknis yang mencakup penilaian energi yang dihasilkan oleh sistem PV berdasarkan data meteorologi lokal, konfigurasi panel surya, jenis inverter, serta penyimpanan energi seperti baterai. Selain itu, perangkat lunak ini juga mendukung analisis ekonomis untuk mengevaluasi kelayakan proyek PLTS, dengan mempertimbangkan parameter seperti efisiensi sistem, kerugian akibat suhu, shading, dan variasi cuaca. Dalam konteks penelitian ini, PVsyst digunakan untuk menganalisis integrasi *Battery Energy Storage System* (BESS) dalam sistem PLTS atap. Software ini memungkinkan evaluasi kinerja sistem dengan berbagai skenario, seperti perubahan kapasitas baterai, variasi pola konsumsi listrik, dan tingkat *depth of discharge* (DoD). Dengan simulasi ini, penelitian dapat menentukan kapasitas baterai yang optimal, pola konsumsi energi yang efisien, serta potensi penghematan energi. Hasil dari simulasi PVsyst juga memberikan dasar yang kuat untuk mengevaluasi kelayakan teknis dan ekonomis dari sistem PLTS atap yang terintegrasi dengan baterai [14].

## 2.8 Energy Balance Method

Metode keseimbangan energi atau yang dikenal sebagai *energy balance method* adalah metode yang sering digunakan dalam perancangan system energi, termasuk sistem photovoltaic dan penyimpanan baterai (*storage*) untuk memastikan bahwa aliran energi dalam sistem seimbang antara produksi, konsumsi, dan penyimpanan energi. Pendekatan ini menitikberatkan pada penghitungan jumlah energi yang masuk dan keluar sistem untuk memastikan bahwa kebutuhan energi terpenuhi secara efisien [17].

$$E_{(t)} = E(t - 1) + (P_{BC}^T - P_{BD}^T) \times T$$

Dimana:

$P_L^T$	= Beban konsumsi listrik rumah tangga ( <i>Load</i> ) (Wh)
$E(t)$	= SOC sesaat t (Wh)
$P_{BC}^T$	= Daya <i>charge</i> baterai (W)
$P_{BD}^T$	= Daya <i>discharge</i> baterai (W)
$T$	= Waktu



### III. METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1. Waktu dan Tempat

Penelitian tugas akhir ini dimulai sejak Juli 2024 dan selesai pada Januari 2024, bertempat di Jalan Prof Sumantri Brojonegoro No 1, Bandar Lampung, Laboratorium Sistem Tenaga Listrik (STL), Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Adapun Jadwal Penelitian seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Jadwal Penelitian Tugas Akhir

Agenda	Bulan					
	Jul	Ags	Sep	Okt	Nov	Des
Studi Literatur dan Studi Bimbingan	■					
Pembuatan Proposal	■	■				
Seminar Proposal		■	■			
Pengumpulan Data		■	■	■		
Pengolahan Data			■	■		■
Simulasi Program				■	■	
Analisis Hasil					■	■
Seminar Hasil						■
Ujian Komprehensif						■

#### 3.2. Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Satu unit laptop dengan spesifikasi; *Processor AMD Ryzen 5 (R) Core 8 @3.30 GHz*, memori sebesar 16 GB RAM, dengan *Operating System Windows 11 Home 64-bit*.
2. *Software PVsyst* sebagai perangkat utama yang digunakan untuk menganalisis sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS).
3. *Software Microsoft Excel* untuk validasi perhitungan dan pembuatan grafik.
4. *Software Python* yang digunakan untuk menganalisis kapasitas dari sistem dalam bentuk pemodelan, pemrograman, dan visualisasi.
5. Data-data spesifikasi sistem PLTS yang terpasang, kapasitas ukuran PLTS, profil beban rumah pelanggan PLN, dan energi listrik yang terbangkitkan

### 3.3. Metodologi Penelitian

Penelitian tugas akhir ini dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut

#### 1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan dan mempelajari serta mengkaji literatur yang berkaitan dengan penelitian tugas akhir, yaitu mengenai metode analisis PLTS *rooftop*, cara memodelkan komponen-komponen pada PLTS dan cara mengoperasikan *software* terkait. Literatur tersebut diambil dari berbagai sumber, seperti buku manual, jurnal ilmiah dan laporan-laporan penelitian terdahulu.

#### 2. Studi Bimbingan

Studi bimbingan dilakukan dengan diskusi untuk menyelesaikan persoalan-persoalan selama penelitian bersama dosen pembimbing. Diskusi dilakukan secara berkala, mulai dari diskusi mengenai dasar sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), hingga metode yang digunakan penulis untuk melakukan analisis menggunakan *software*. Dengan adanya studi bimbingan, penulis banyak mendapatkan pengetahuan serta arahan dalam pengerjaan penelitian tugas akhir.

### 3. Pengumpulan dan Pengolahan Data

Pengumpulan data berasal dari PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya) pada perumahan pelanggan PLN 5.500 PA yang terhubung ke *grid* PLN, lalu data tersebut diolah dan disesuaikan menjadi data masukan yang digunakan di *software* PVsyst maupun *Python*. Adapun data-data yang dibutuhkan untuk penelitian ini meliputi:

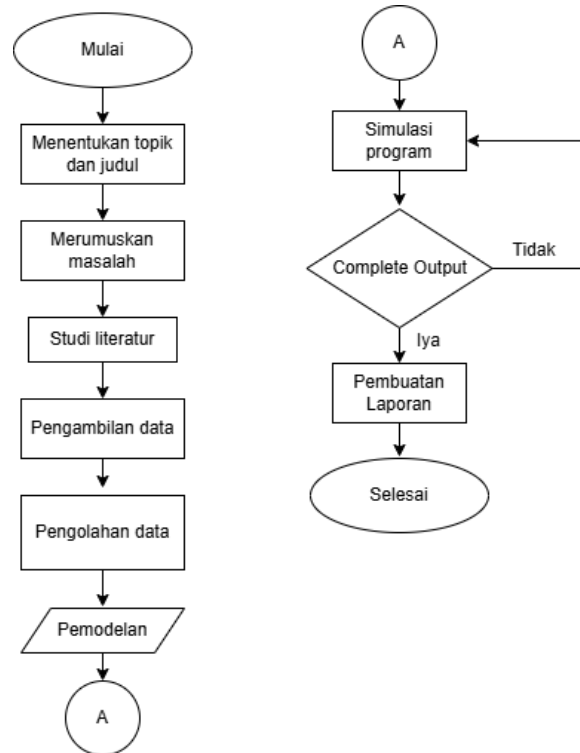
- a. Jumlah daya Listrik yang dihasilkan oleh solar panel (*Photovoltaic*) ( $PV_1$ ) dan solar panel yang kedua ( $PV_2$ ) (W)
- b. Kapasitas ukuran PLTS *rooftop* yang terpasang dan energi yang dibangkitkan (*total energy generation by prosumer*) ( $E_{gp}$ ) (kWh).
- c. Jumlah daya PV melakukan pengisian ke baterai (*Battery Charging*) (A)
- d. Total arus yang masuk ke baterai ( $I_{Bat}$ ) (A)
- e. Jumlah daya baterai melakukan penyuplaian ke beban/hari ( $E_{load}$ ) (kWh)
- f. Jumlah energi yang tersedia pada baterai ( $E_{stored}$ ) (kWh)
- g. Jumlah kapasitas daya yang tersedia pada baterai ( $B_c$ ) (W)

### 4. Penulisan Laporan

Perancangan penelitian ini dituangkan kedalam sebuah laporan proposal penelitian. Lalu, hasil penelitian ini dituangkan kedalam sebuah laporan akhir penelitian/ skripsi. Laporan ini merupakan dokumentasi pengerjaan penelitian tugas akhir dan dapat dipertanggungjawabkan sebagaimana mestinya.

### 3.4. Diagram Pelaksanaan Penelitian

Tahap-tahap pelaksanaan penelitian tugas akhir ini seperti pada Gambar 11.



Gambar 11. Diagram Alir Penelitian

### 3.5 Pemodelan Analisa Kapasitas Baterai

Berikut pemodelan optimasi kapasitas baterai dengan metode *energy balanced*:

1. Fungsi objektif pada penelitian ini

$$F = \min (B_c) \quad (1)$$

$$F = \min (P_{PV1}^T + P_{PV2}^T - P_L^T) \quad (2)$$

keterangan

$B_c$  = Kapasitas baterai yang akan dioptimasi

2. Sedangkan *equality constraint* pada penelitian ini adalah:

*equality constraint* daya:

$$P_{PV}^T - P_{BC}^T + P_{BD}^T - P_L^T = 0 \quad (3)$$

$$P_{BC}^T - P_{BD}^T = P_{PV}^T - P_{PL}^T \quad (4)$$

equality constraint baterai:

$$E_{(t)} = E(t-1) + (P_{BC}^T - P_{BD}^T) \times T \quad (5)$$

Sehingga,

$$B_c = P_{PV1}^T - P_L^T + P_{PV2}^T \quad (6)$$

$$= P_{PV1}^T + P_{PV2}^T - P_L^T \quad (7)$$

3. Inequality constraint pada penelitian ini adalah:

$$E_{min} \leq E(t) \leq E_{max} \quad (8)$$

$$B_{cmin} \leq B_c \leq B_{cmax} \quad (9)$$

$$P_{BCmin}^T \leq P_{BC}^T(t) \leq P_{BCmax}^T \quad (10)$$

$$P_{BDmin}^T \leq P_{BD}^T(t) \leq P_{BDmax}^T \quad (11)$$

$$E(t)_{max} = 1 B_c / 100\% B_c \quad (12)$$

$$E(t)_{min} = 0,3 B_c / 30\% B_c \quad (13)$$

Keterangan :

$P_L^T$  = Beban konsumsi listrik rumah tangga (*Load*) (Wh)

$E(t)$  = SOC sesaat t (Wh)

$E(t)_{min}$  = Batas pengisian minimal baterai (Wh)

$E(t)_{max}$  = Batas pengisian maksimal baterai (Wh)

$P_{BC}^T$  = Daya charge baterai (W)

$P_{BD}^T$  = Daya discharge baterai (W)

$B_c$  = Kapasitas Baterai (Wh)

### 3.6 Matriks

Sebelum membuat program maka dibuat matriksnya terlebih dahulu untuk pemetaan fungsi objektif dan batasan-batasannya.

Rumus dasar:

$$E_{(t)} = E(t-1) + (P_{BC}^T - P_{BD}^T) \times T \quad (14)$$

Dipindah ruas menjadi:

$$E_{(t)} - E(t-1) - P_{BC}^T + P_{BD}^T = 0 \quad (15)$$

Maka persamaan matriksnya adalah:

$$\text{Jam Pertama} = Z_1 - 0.3 C - X_1 + Y_1 = 0 \quad (16)$$

$$\text{Jam Kedua} = Z_2 - Z_1 - X_2 + Y_2 = 0 \quad (17)$$

$$\text{Jam Ketiga} = Z_3 - Z_2 - X_3 + Y_3 = 0 \quad (18)$$

Tabel 3. Data Matriks Pemetaan Fungsi Objektif

		$P_{BC}$			$P_{DC}$			E			CB
	Jam	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
P	1	-1			1						
	2		-1			1					
	3			-1			1				
SOC	1	-1			1			1			
	2		-1			1		-1	1		
	3			-1			1		-1	1	
		$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	C

Pada tabel matriks,  $X_1, X_2, X_3$  adalah  $P_{BC}$  (Daya *charging* ke baterai). Sedangkan  $Y_1, Y_2, Y_3$  adalah  $P_{BD}$  (Daya yang dikeluarkan baterai). Dan  $Z_1, Z_2, Z_3$  adalah E atau SOC baterai, dan C adalah CB (Kapasitas baterai). Pada persamaan 15,  $E(t-1)$  adalah SOC awal ( $0.3 \times 10$ ), 0.3 adalah 30% dari kapasitas baterai. Pada persamaan 16, (Jam pertama)  $Z_1$  bernilai positif dan pada persamaan 17 (Jam kedua) bernilai negatif, itulah yang tergambar pada tabel matriks, hal yang sama juga terjadi pada  $Z_2$  dan variabel selanjutnya, tergantung dari jam jumlah jam simulasi. Pada percobaan simulasi 3 jam dibutuhkan 10 variabel. Maka jika simulasi dilakukan 24 jam maka dibutuhkan sebanyak 73 variabel, yang terdiri dari 24 variabel  $P_{BC}$ , 24 variabel  $P_{DC}$ , 24 variabel SOC, dan satu variabel yang mewakili CB (kapasitas baterai).

Sehingga untuk persamaan perhitungan programnya adalah :

$$\text{Minimize } F = X_{73}$$

Subject to :

$$X_1 - Y_1 = P_{PV}^1 - P_{PL}^1$$

$$X_2 - Y_2 = P_{PV}^2 - P_{PL}^2$$

$$X_3 - Y_3 = P_{PV}^3 - P_{PL}^3$$

$$X_{24} - Y_{24} = P_{PV}^{24} - P_{PL}^{24}$$

mengacu pada persamaan (4)

$$Z_1 - 0.3B_c - X_1 + Y_1 = 0$$

$$Z_2 - Z - X_2 + Y_2 = 0$$

$$Z_3 - Z_2 - X_3 + Y_3 = 0$$

$$Z_{24} - Y_{23} - X_{24} + Y_{24} = 0$$

mengacu pada persamaan (15)

$$X_1, X_2, X_3, X_4, \dots, X_{24}, \leq 1 B_c$$

$$Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, \dots, Y_{24}, \leq 1 B_c$$

$$0.3 B_c, \leq Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, \dots, Z_{24} \leq 1 B_c,$$

Dimana :

$X_1, X_2, X_3, X_4, \dots, X_{24},$  =  $P_{BC}$  (Battery Charging) Selama waktu 24 Jam

$Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, \dots, Y_{24},$  =  $P_{BD}$  (Battery Discharging) selama waktu 24 Jam

$Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, \dots, Z_{24}$  =  $E_t$  (SoC Battery) selama waktu 24 Jam

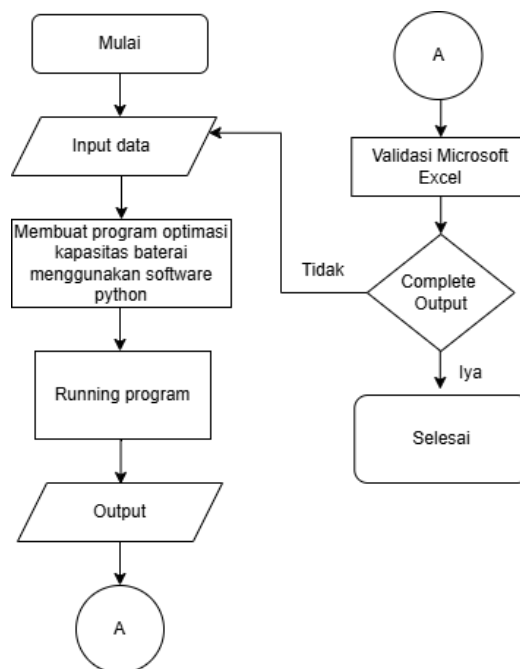
$B_c,$  = Kapasitas Baterai

$P_L$  = Konsumsi Beban

$P_{PV}$  = Daya yang dihasilkan *Photovoltaic*

### 3.7 Diagram Alir Program

Berikut adalah diagram alir program yang akan dibuat pada penelitian ini:



Gambar 12. Diagram Alir Program

### 3.8 Kapasitas Baterai Optimal

Dalam menentukan kapasitas *Battery Energy Storage System* (BESS), terdapat dua kondisi operasional utama yang harus dipertimbangkan untuk memastikan sistem berfungsi dengan optimal.

$$E_{surplus}(t) = P_{PV}(t) - P_{Load}(t)$$

Keterangan :

$E_{surplus}(t)$  = Beban konsumsi listrik rumah tangga (*Load*) (Wh)

$P_{PV}(t)$  = SOC sesaat t (Wh)

$P_{Load}(t)$  = Batas pengisian minimal baterai (Wh)

Energi total yang disimpan ke BESS selama masa operasi:

$$E_{charge} = \eta_{charge} \int_{t^1}^{t^2} E_{surplus}(t) dt$$

Keterangan :

$\eta_{charge}$  = Efisiensi pengisian baterai

$[t^1, t^2]$  = Periode waktu dimana surplus energi terjadi

Kondisi pertama terjadi ketika daya yang dihasilkan oleh panel surya melebihi kebutuhan beban saat itu. Pada situasi ini, kelebihan daya yang dihasilkan oleh sistem PV dapat dialokasikan untuk disimpan di BESS. Penyimpanan ini memungkinkan energi yang berlebih untuk dimanfaatkan pada waktu-waktu tertentu, seperti pada malam hari, ketika produksi energi dari panel surya terhenti, atau saat cuaca mendung yang menyebabkan penurunan produksi energi. Dengan kapasitas BESS yang memadai, surplus energi dapat disimpan secara efektif, sehingga meminimalkan risiko pemborosan energi yang tidak terpakai.

$$E_{deficit}(t) = P_{Load}(t) - P_{PV}(t)$$

Energi total yang disuplai oleh BESS selama periode defisit adalah:



$$E_{discharge} = \frac{\int_{t^1}^{t^2} E_{deficit}(t) dt}{\eta_{discharge}}$$

Keterangan :

$\eta_{discharge}$  = Efisiensi pengisian baterai

$[t^1, t^2]$  = Periode waktu dimana defisit energi dari baterai terjadi

Kondisi kedua terjadi pada saat daya yang dihasilkan oleh panel surya tidak mencukupi untuk memenuhi kebutuhan beban, misalnya pada jam puncak konsumsi atau kondisi cuaca ekstrem. Dalam situasi ini, BESS berfungsi sebagai sumber daya cadangan yang dapat menyuplai kekurangan daya secara langsung kepada beban. Oleh karena itu, kapasitas BESS harus dirancang sedemikian rupa sehingga mampu memenuhi kebutuhan energi selama periode kekurangan produksi, termasuk mempertimbangkan faktor-faktor seperti durasi defisit energi, efisiensi pengisian dan pengosongan baterai, serta tingkat degradasi kapasitas baterai dari waktu ke waktu.

Kedua kondisi ini merupakan aspek krusial dalam proses perencanaan dan desain sistem penyimpanan energi. Penentuan kapasitas BESS yang optimal memerlukan pendekatan holistik yang mencakup analisis kebutuhan energi beban, profil produksi energi dari sistem photovoltaic, serta pola penggunaan energi oleh konsumen. Kapasitas penyimpanan yang terlalu kecil dapat menyebabkan kegagalan dalam menjaga kontinuitas pasokan energi, sementara kapasitas yang terlalu besar dapat mengakibatkan pemborosan investasi dan inefisiensi ekonomi. Dengan demikian, desain kapasitas BESS yang tepat tidak hanya menjamin ketersediaan energi sepanjang waktu tetapi juga mengoptimalkan efisiensi sistem dan mendukung tujuan keberlanjutan energi terbarukan dalam jangka panjang.

## V. SIMPULAN DAN SARAN

### 5.1.Simpulan

Adapun simpulan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. *State of Charge* (SoC) maksimum energi yang tersimpan dalam baterai sebesar 19.561 Wh atau 68% dari kapasitas penuh, yang terjadi pada tanggal 3 Juli 2024 pukul 14.00 WIB. Hal ini menunjukkan bahwa baterai tidak pernah mencapai kapasitas penuh atau 100% selama periode penelitian.
2. Berdasarkan perhitungan maka hanya dibutuhkan kapasitas baterai sebesar 19.561 Wh sedangkan kapasitas eksisting sebesar 28.800 Wh, sehingga terdapat kelebihan kapasitas sebesar 9.239 Wh atau 32% dari total kapasitas baterai. Baterai yang digunakan dengan kapasitas 4.800 Wh yang berarti hanya dibutuhkan 5 unit baterai.
3. Kelayakan ekonomis sistem menunjukkan bahwa waktu *payback period* atau pengembalian modal dapat dicapai lebih cepat dibandingkan sistem eksisting, yaitu dalam rentang waktu 10,3 tahun dari perancangan awal yaitu dalam rentang 11,5 tahun.

### 5.2.Saran

Penelitian selanjutnya dapat dilakukan untuk menganalisis kinerja skema 2 MPPT dan 2 input string PV setelah kapasitas baterai optimal terhadap sistem eksisting berhasil ditentukan, guna memastikan apakah skema tersebut sudah berada pada kinerja optimal dalam menghasilkan energi listrik

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Tian, C. Dong, Y. Mu, and H. Jia, "DPGS: Data-driven photovoltaic grid-connected system exploiting deep learning and two-stage single-phase inverter," *Energy Reports*, vol. 11, pp. 1910–1924, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.egy.2024.01.038.
- [2] R. M. Ariefianto, "Assessment of Renewable Energy Power Generation in Tegal Regency, Indonesia Using HOMER Simulation." [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/356584764>
- [3] Y. P. Mulyani *et al.*, "Analyzing public discourse on photovoltaic (PV) adoption in Indonesia: A topic-based sentiment analysis of news articles and social media," *J. Clean. Prod.*, vol. 434, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.140233.
- [4] X. Wu, Z. Tang, D.-I. Stroe, and T. Kerekes, "Dual-level design for cost-effective sizing and power management of hybrid energy storage in photovoltaic systems," *Green Energy Intell. Transp.*, p. 100194, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.geits.2024.100194.
- [5] R. Saez, D. Boer, A. B. Shobo, and M. Vallès, "Self-consumption potential and surplus compensation policy impact on rooftop photovoltaic systems in Spain," *Renew. Energy*, vol. 229, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.renene.2024.120713.
- [6] F. Wang, R. Li, G. Zhao, D. Xia, and W. Wang, "Simulation test of 50 MW grid-connected 'Photovoltaic+Energy storage' system based on pvsyst software," *Results Eng.*, vol. 22, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102331.
- [7] K. D. Poti, R. M. Naidoo, N. T. Mbungu, and R. C. Bansal, "Optimal hybrid power dispatch through smart solar power forecasting and battery storage integration," *J. Energy Storage*, vol. 86, May 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.111246.
- [8] J. Hossain, A. F. A. Kadir, H. Shareef, R. Manojkumar, N. Saeed, and A. N. Hanafi, "A Grid-Connected Optimal Hybrid PV-BES System Sizing for Malaysian Commercial Buildings," *Sustain.*, vol. 15, no. 13, Jul. 2023, doi: 10.3390/su151310564.
- [9] N. S. Gunawan *et al.*, "UNJUK KERJA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) 26,4 KWP PADA SISTEM SMART MICROGRID UNUD," 2019.
- [10] P. Surya and M. Junus, "Kajian PLTS on-grid pada gedung X Politeknik Negeri Malang untuk melayani beban perkantoran menggunakan perangkat HOMER PRO," *J. ELTEK*, vol. 19, no. 2, p. 96, Oct. 2021, doi: 10.33795/eltek.v19i2.320.
- [11] B. Seno Adi Nugroho and M. Facta, "ANALISIS SETTING DAN KOORDINASI RELE JARAK PADA GI 150 KV PANDEAN LAMPER

ARAH SRONDOL.”

- [12] M. Rozi Sanjaya, “Jurnal Teknik Elektro RANCANG BANGUN DAN ANALISIS INVERTER SATU FASA BERBASIS METODE SINUSOIDAL PULSE WIDTH MODULATION (SPWM) DENGAN MODUL EGS002”.
- [13] T. Alamsyah, A. Hiendro, and Z. Abidin, “Analisis Potensi Energi Matahari Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Surya Menggunakan Panel Mono-Crystalline dan Poly-Crystalline Di Kota Pontianak dan Sekitarnya,” *J. Tek. Elektron.*, p. 10, 2019, [Online]. Available: <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/jteuntan/article/viewFile/48425/75676590121>
- [14] B. Belmahdi and A. El Bouardi, “Solar potential assessment using PVsyst software in the northern zone of Morocco,” in *Procedia Manufacturing*, Elsevier B.V., 2020, pp. 738–745. doi: 10.1016/j.promfg.2020.03.104.
- [15] R. Aita Diantari, C. Widyastuti, and T. Elektro, “STUDI PENYIMPANAN ENERGI PADA BATERAI PLTS.”
- [16] T. Pipit Mulyah, Dyah Aminatun, Sukma Septian Nasution, Tommy Hastomo, Setiana Sri Wahyuni Sitepu, “濟無No Title No Title No Title,” *J. GEEJ*, vol. 7, no. 2, pp. 895–905, 2020.
- [17] V. R. Padullaparthi, V. Sarangan, and A. Sivasubramaniam, “SUNcover: Estimating the Hidden Behind-the-meter Solar Rooftop and Battery Capacities in Grids,” *2019 IEEE Power Energy Soc. Innov. Smart Grid Technol. Conf. ISGT 2019*, no. August, 2019, doi: 10.1109/ISGT.2019.8791573.
- [18] I. Pembangkit and L. Tenaga, “Dos & Don ’ ts”.
- [19] S. Quoilin, K. Kavvadias, A. Mercier, I. Pappone, and A. Zucker, “Quantifying self-consumption linked to solar home battery systems: Statistical analysis and economic assessment,” *Appl. Energy*, vol. 182, pp. 58–67, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.08.077.
- [20] Indonesia Clean Energy Development (ICED), Panduan Perencanaan dan Pemanfaatan PLTS Atap di Indonesia. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2020. Accessed: Dec. 02, 2022. [Online]. Available: <https://drive.esdm.go.id/wl/?id=XOegh8pXO9FMjeb14x0joDD6hIZe94Fm&mode=list&download=1>
- [21] E. Hamdi, “Indonesia’s Solar Policies-Designed to Fail?,” Institute for Energy Economics and Financial Analysis, Jakarta, Feb. 2019. Accessed: Dec. 04, 2022. [Online]. Available: <https://ieefa.org/articles/ieefa-report-indonesias-solar-policies-designed-fail>
- [22] Ramadhani, Ing. Bagus. “Pembangkit Listrik Tenaga Surya Off grid,” Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Dos & Don’ts, Jakarta : GIZ, 2018, 1-1 – 1-7.
- [23] Jeshu Putra, “Penentuan Kapasitas BESS (*Battery Energy Storage System*) Dengan Pendekatan *Multiperiod Optimal Power Flow* Pada Sistem Microgrid”, Program Studi Teknik Elektro, Universitas Lampung, 2019.
- [24] T. Tech, Panduan Studi Kelayakan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Terpusat. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral , 2018. Accessed: Dec. 03, 2022. [Online]. Available:

<https://drive.esdm.go.id/wl/?id=LywF3lwAFv4vjOBJMVvoRkd03FxBwTJ2&mode=list&download=1>

- [25] <https://www.bmkg.go.id/iklim/prakiraan-musim.bmkg?p=prediksi-musim-kemarau-tahun-2024-di-indonesia&tag=prakiraan-musim&lang=ID>