

**ANALISIS *SELF-CONSUMPTION* PADA SISTEM PLTS *HYBRID* SKALA
INDUSTRI**

(SKRIPSI)

Oleh:

ALIF GHIA KHAIRAN

1915031069



**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2023**

ABSTRAK

ANALISIS *SELF-CONSUMPTION* PADA SISTEM PLTS *HYBRID* SKALA INDUSTRI

Oleh

ALIF GHIA KHAIRAN

Energi listrik kini telah menjadi bagian penting dari kehidupan sehari-hari kita. Kemajuan terbaru dalam teknologi tenaga surya, terutama ketika dikombinasikan dengan baterai penyimpanan energi, telah menciptakan harapan tinggi akan potensi revolusi energi surya. Namun, di Indonesia, pemasangan PLTS di sektor industri terbatas oleh kebijakan yang membatasi pembangkitan daya yang diizinkan. Sistem PLTS yang diizinkan dalam sektor industri, menurut kebijakan Perusahaan Listrik Negara (PLN), dibatasi hingga 10% -15% dari kapasitas daya yang terhubung. Studi ini berfokus pada mengevaluasi tingkat konsumsi sendiri (*self-consumption*) dalam sistem PLTS *hybrid* berskala industri dengan menjelajahi tiga skenario: memaksimalkan *self-consumption*, *peak-shaving*, dan menggunakan baterai hanya pada malam hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketika kapasitas panel surya hanya mencakup 15% dari permintaan beban puncak, rasio *self-consumption* terhadap kebutuhan energi total, yang dikenal sebagai *Self-Sufficiency Rate* (SSR), hanya sekitar 5.113%. Namun, jika data beban diasumsikan mencakup hanya 15% dari total beban sebenarnya, SSR meningkat secara signifikan menjadi 30.157%. Variasi ini disebabkan oleh produksi energi yang sejalan dengan permintaan energi. Oleh karena itu, disarankan untuk mendorong kebijakan yang memfasilitasi pemanfaatan optimal panel surya dan baterai guna mencapai tingkat konsumsi sendiri yang lebih tinggi dan mengurangi ketergantungan pada sumber energi konvensional.

Kata kunci: PLTS, Baterai, PLN, *Self-Consumption*, *Peak-Shaving*, *Self-Sufficiency Rate*

ABSTRACT

ANALYSIS OF SELF-CONSUMPTION IN INDUSTRIAL-SCALE HYBRID SOLAR PV SYSTEM

By

ALIF GHIA KHAIRAN

Electricity has now become an essential part of our daily lives. Recent advancements in solar power technology, especially when combined with energy storage batteries, have generated high expectations for the potential solar energy revolution. However, in Indonesia, the installation of photovoltaic solar systems in the industrial sector is constrained by policies that limit the allowable power generation. PLTS systems permitted within the industrial sector, according to the policy of the National Electricity Company (PLN), are restricted to 10% - 15% of the connected power capacity. This study focuses on evaluating the level of self-consumption in industrial-scale hybrid PV systems by exploring three scenarios: maximizing self-consumption, peak-shaving, and using batteries exclusively during the nighttime. The research findings indicate that when the solar panel capacity covers only 15% of the peak load demand, the ratio of self-consumption to the total energy requirement, known as the Self-Sufficiency Rate (SSR), is only approximately 5.113%. However, assuming that the load data covers only 15% of the actual total load, the SSR significantly increases to 30.157%. This variation results from energy production aligning with energy demand. Therefore, it is recommended to promote policies that facilitate the optimal utilization of solar panels and batteries to achieve higher self-consumption rates and reduce dependence on conventional energy sources.

Keywords: PV, Battery, PLN, *Self-Consumption*, *Peak-Shaving*, *Self-Sufficiency Rate*

**ANALISIS *SELF-CONSUMPTION* PADA SISTEM PLTS *HYBRID* SKALA
INDUSTRI**

Oleh

Alif Ghia Khairan

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDARLAMPUNG
2023**

Judul Skripsi : **ANALISIS *SELF-CONSUMPTION* PADA SISTEM PLTS *HYBRID* SKALA INDUSTRI**

Nama Mahasiswa : **Alif Ghia Khairan**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1915031069**

Program Studi : **Teknik Elektro**

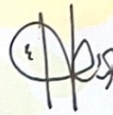
Fakultas : **Teknik**

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing



Osea Zebua, S.T., M.T.
NIP 197006091999031002



Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T.
NIP 197108131999031003

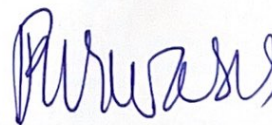
2. Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro



Herlinawati, S.T., M.T.
NIP 197006091999031002

Ketua Program Studi Teknik Elektro



Dr. Eng. Nining Purwasih, S.T., M.T.
NIP 197108131999031003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Osea Zebua, S.T., M.T.



Sekretaris : Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T.



Penguji
Bukan Pembimbing : Dr. Eng. Ir. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc.



2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung



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

NIP 197509282001121002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 06 September 2023

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 akademik sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 13 Oktober 2023



Alif Ghia Khairan

NPM 1915031069

RIWAYAN HIDUP



Penulis dilahirkan di Jakarta, pada tanggal 01 September 2001, sebagai anak kesatu dari dua bersaudara, dari bapak Amri Arfianto dan ibu Yoti Wahyuni.

Riwayat Pendidikan penulis dimulai dari SDIT Al-Istiqomah Kab. Tangerang pada tahun 2007 hingga 2013, SMP Negeri 16 Kota Tangerang pada tahun 2013 hingga 2016, dan SMA Negeri 3 Kab. Tangerang pada tahun 2016 hingga tahun 2019.

Penulis menjadi mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung, pada tahun 2019 melalui jalur SBMPTN. Selama menjadi mahasiswa penulis berkesempatan menjadi asisten Laboratorium Sistem Tenaga Listrik dari tahun 2021. Selain itu, penulis juga bergabung dalam organisasi intra kampus Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (Himatro) yang pada tahun 2020 diamanahkan sebagai anggota Divisi Minat dan Bakat dan pada tahun 2021 diamanahkan sebagai Ketua Himpunan. Penulis juga tergabung dalam organisasi *Society of Renewable Energy* (SRE) yang diamanahkan sebagai president pada tahun 2023. Penulis melaksanakan kerja praktik di PT. Syntek Otomasi Indonesia, Jakarta dalam divisi *Operational & Maintenance*, dan *Engineering Center* serta melakukan *commisioning* PLTS *on-grid* 6 MWp di PT. Astra Honda Motor *Plant 4* dan *Plant 5*, Cikampek.

SANWACANA

Segala puji bagi Allah SWT, atas limpahan nikmat dan karunia-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 *Self-Consumption* Pada Sistem PLTS *Hybrid* Skala Industri” 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 Osea Zebua, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing utama yang selalu memberikan motivasi dan pandangan kehidupan, mengarahkan dan membimbing dengan tulus dan penuh kesabaran.
5. Bapak Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing pendamping yang telah memberikan saran, bimbingan dan arahan dengan baik dan ramah.
6. Bapak Dr. Eng. Ir. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc., selaku dosen penguji yang telah memberikan saran, masukan, kritik dan arahan.

7. Bapak Syaiful Alam, S.T., M.T., selaku dosen Pembimbing Akademik (PA) yang telah memberikan nasihat, arahan, bimbingan dengan baik dan tulus bagi penulis selama perkuliahan
8. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah memberikan pengajaran dan pandangan hidup selama perkuliahan.
9. Staff administrasi Jurusan Teknik Elektro dan Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah membantu penulis dalam hal administrasi.
10. Mas Renaldi, Mas Riza, Mas Sayyid, Mas Akhid, Mas Ardi, Mas Fandi, Mas Eko, Mas Wilman, Mas Agil, Mas Fajri, Mas Kresna, Mas Hendra, Mas Irfan, Mas Irvan, dan “Bapak” mengucapkan terimakasih banyak atas ilmu dan pengalaman yang sudah diberikan.
11. Cesar *the most valuable person* mengajari penulis pemrograman dalam skripsi.
12. Teruntuk “dia” terimakasih selalu menjadi support system dan telah banyak memberikan dorongan, bantuan, dan doa selama penulisan skripsi sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi ini.
13. Segenap Keluarga Besar Laboratorium Sistem Tenaga Listrik; Pak Rahman atas kerjasamanya selama menjadi asisten laboratorium; Al Hadi, Aqila, Muchlas, Adam, Fatur, Adhi, Natasya, dan Adrian sebagai asisten laboratorium semoga segera menyusul dan dipermudah segala urusan tugas akhir, dan tidak lupa adik-adik 2020, Rizki, Aymanul, Arnes, Ipna, dan Syawal.

14. Keluarga besar Angkatan ETERNITY 2019, yang telah memberikan banyak motivasi, nilai-nilai sosial, dan bantuan dalam berbagai hal.
15. Keluarga besar Himatro Unila, yang telah menjadi wadah dalam mengembangkan nilai-nilai organisasi bagi penulis.
16. Semua pihak yang terlibat dalam proses perkuliahan dan penulisan skripsi ini penulis ucapkan terima kasih atas bantuan dan kerjasamanya.

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

Bandar lampung, 13 Oktober 2023

Alif Ghia Khairan

**“Ku Persembahkan dan ku
dedikasikan Skripsi ini untuk
Kedua Orangtua saya, Ayahanda
Amri Arfianto dan Ibunda Yoti
Wahyuni yang memberikan
semua hal terbaik demi anaknya
untuk mencapai kesuksesan”**

MOTTO

فَإِنَّ مَعَ الْعُسْرِ يُسْرًا (QS.94:5)

“Karena sesungguhnya, sesudah kesulitan itu ada kemudahan,”

إِنَّ مَعَ الْعُسْرِ يُسْرًا (QS.94:6)

“Sesungguhnya, sesudah kesulitan itu ada kemudahan.”

Qs. Al-Insyirah ayat 5 dan 6

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xviii
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	3
1.3. Rumusan Masalah	4
1.4. Batasan Masalah	4
1.5. Manfaat Penelitian	4
1.6. Hipotesis	5
1.7. Sistematika Penulisan	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1. Penelitian Terdahulu	7
2.2. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)	10
2.2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Surya <i>On-Grid</i>	11
2.2.2. Pembangkit Listrik Tenaga Surya <i>Off-Grid</i>	12
2.2.3. Pembangkit Listrik Tenaga Surya <i>Hybrid</i>	13
2.3. Perkembangan Kebijakan PLTS Atap di Indonesia	14
2.4. <i>Self-Consumption</i>	15
2.5. JupyterLab	16
2.6. Interpolasi Linier	17
III. METODE PENELITIAN	18
3.1. Waktu dan Penelitian	18
3.2. Alat dan Bahan	19
3.3. Tahapan Penelitian	19
3.4. Diagram Alir Penelitian	21

3.5. Pemodelan <i>Self-Consumption</i>	21
3.5.1. <i>dispatch_max_sc</i>	26
3.5.2. <i>dispatch_max_sc_ps</i>	27
3.5.3. <i>dispatch_max_sc_time</i>	28
3.6. Diagram Alir Program	29
IV. ANALISA DAN PEMBAHASAN	30
4.1. Lokasi Penelitian.....	30
4.2. Profil Beban di Gedung <i>Assembly Plant 5 PT. Astra Honda Motor</i>	31
4.2.1. Total Kebutuhan Energi	35
4.3. Produksi Daya PLTS Gedung <i>Assembly Plant 5 PT. Astra Honda Motor</i> ..	
.....	35
4.4. Komponen PLTS Gedung <i>Assembly Plant 5 PT. Astra Honda Motor</i>	37
4.5. Konfigurasi Kapasitas Baterai	40
4.6. Hasil Analisis Pemodelan <i>Self-Consumption</i>	47
4.6.1. Skenario <i>Self-Consumption</i>	49
4.6.2. Skenario <i>Peak-Shaving</i>	53
4.6.3. Skenario Berbasis Waktu	56
4.6.4. Beban 15%	59
4.6.5. Perbandingan Hasil Analisis <i>Self-Consumption</i> Beban Aktual dan	
Beban 15%	70
V. SIMPULAN DAN SARAN	75
5.1. Simpulan	75
5.2. Saran	76
DAFTAR PUSTAKA	77

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)	11
Gambar 2. Sistem PLTS <i>On-Grid</i>	12
Gambar 3. Sistem PLTS <i>Off-Grid</i>	13
Gambar 4. Sistem PLTS <i>Hybrid</i>	13
Gambar 5. Roadmap Kebijakan PLTS di Indonesia	14
Gambar 6. Skema Beban Harian, Generasi Bersih, dan <i>Self-Consumption</i> Dalam Bangunan Dengan Panel Surya Serta Opsi Peningkatan <i>Self-Consumption</i>	15
Gambar 7. JupyterLab.....	16
Gambar 8. Diagram Skematik Interpolasi Linier	17
Gambar 9. Diagram Alir Penelitian.....	21
Gambar 10 Sistem Simulasi <i>Self-Consumption</i>	22
Gambar 11. Diagram Alir <i>dispatch_max_sc</i>	26
Gambar 12. Diagram Alir <i>dispatch_max_sc_ps</i>	27
Gambar 13. Diagram Alir <i>dispatch_max_sc_time</i>	28
Gambar 14. Diagram Alir Program <i>Self-Consumption</i>	29
Gambar 15. Tampak Atas Gedung <i>Assembly Plant 5</i> PT. Astra Honda Motor.....	30
Gambar 16. Grafik Profil Beban Harian Gedung <i>Assembly Plant 5</i> PT. Astra Honda Motor	31
Gambar 17. Profil Beban Harian Dengan Interpolasi Gedung <i>Assembly Plant 5</i> PT. Astra Honda Motor.....	35
Gambar 18. Produksi Daya PLTS Gedung <i>Assembly Plant 5</i> PT. Astra Honda Motor.....	36
Gambar 19. <i>Single Line Diagram</i> Gedung <i>Assembly Plant 5</i> PT. Astra Honda.....	38
Gambar 20. Skema Kapasitas Penyimpanan Baterai dengan Rugi-Rugi Efisiensi	40

Gambar 21. Hubungan Antara Profil Beban dan Sisa Produksi Panel Surya Harian	41
Gambar 22. Masa Pakai Yang Diharapkan Pada <i>Depths of Discharge</i> (DoD) Yang Berbeda	43
Gambar 23. Diagram Jumlah Baterai Untuk Setiap Inverter <i>Hybrid</i>	47
Gambar 24. Produksi dan Konsumsi Energi Setiap Minggu Dengan Skenario <i>Self-Consumption</i>	50
Gambar 25. Grafik Konsumsi Panel Surya dan Baterai Skenario <i>Self-Consumption</i>	51
Gambar 26. Kebutuhan Energi Setiap Minggu Setelah Memperhitungkan <i>Self-Consumption</i>	52
Gambar 27. Produksi dan Konsumsi Energi Setiap Minggu Dengan Skenario <i>Peak-Shaving</i>	53
Gambar 28. Grafik Konsumsi Panel Surya dan Baterai Skenario <i>Peak-Shaving</i> ..	54
Gambar 29. Kebutuhan Energi Setiap Minggu Setelah Memperhitungkan <i>Self-Consumption</i> Dengan Skenario <i>Peak-Shaving</i>	55
Gambar 30. Produksi dan Konsumsi Energi Setiap Minggu Dengan Skenario Berbasis Waktu	57
Gambar 31. Grafik Konsumsi Panel Surya dan Baterai Skenario Berbasis Waktu	57
Gambar 32. Kebutuhan Energi Setiap Minggu Setelah Memperhitungkan <i>Self-Consumption</i> Dengan Skenario Berbasis Waktu	58
Gambar 33. Produksi dan Konsumsi Energi Setiap Minggu Skenario <i>Self-Consumption</i> Pada Beban 15%	60
Gambar 34. Grafik Konsumsi Panel Surya dan Baterai Skenario <i>Self-Consumption</i> Pada Beban 15%	61
Gambar 35. Kebutuhan Energi Setiap Minggu Setelah Memperhitungkan <i>Self-Consumption</i> Pada Beban 15%	62
Gambar 36. Produksi dan Konsumsi Energi Setiap Minggu Skenario <i>Peak-Shaving</i> Pada Beban 15%.....	64
Gambar 37. Grafik Konsumsi Panel Surya dan Baterai Skenario <i>Peak-Shaving</i> Pada Beban 15%	64

Gambar 38. Kebutuhan Energi Setiap Minggu Setelah Memperhitungkan <i>Self-Consumption</i> Skenario <i>Peak-Shaving</i> Dengan Beban 15%	65
Gambar 39. Produksi dan Konsumsi Energi Setiap Minggu Skenario Berbasis Waktu Pada Beban 15%	67
Gambar 40. Grafik Konsumsi Panel Surya dan Baterai Skenario Berbasis Waktu Pada Beban 15%	68
Gambar 41. Kebutuhan Energi Setiap Minggu Setelah Memperhitungkan <i>Self-Consumption</i> Skenario Berbasis Waktu Pada Beban 15%	69
Gambar 42. Total Kapasitas Pengisian Baterai Vs SSR	70
Gambar 43. SSR Vs <i>Self-Consumption</i>	71
Gambar 44. Total Kapasitas Pengisian Baterai Vs SSR Beban 15%	73
Gambar 45. SSR Vs <i>Self-Consumption</i> Beban 15%	73

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Jadwal Penelitian.....	18
Tabel 2. Profil Beban Harian Tanggal 03 Januari Pukul 00.00 – 23.30 WIB.....	32
Tabel 3. Profil Beban Harian Tanggal 03 Januari Pukul 00.00 – 23.30 WIB Yang Sudah Dikoreksi Dengan Interpolasi.....	33
Tabel 4. Total Kebutuhan Energi Gedung <i>Assembly Plant</i> 5 PT. Astra Honda Motor.....	35
Tabel 5. Produksi Daya PLTS Tanggal 03 Januari Pukul 06.00 – 17.30 WIB.....	36
Tabel 6. <i>Datasheet</i> Modul JAM72S30-540/MR/1500V.....	38
Tabel 7. <i>Datasheet</i> Inverter SG110CX.....	38
Tabel 8. <i>Datasheet</i> Inverter SG50CX.....	39
Tabel 9. Total Profil Beban dan Produksi Panel Surya Tanggal 03 Januari 2023.....	40
Tabel 10. Sisa Energi Panel Surya Dari Kebutuhan Energi Yang Sudah Terpenuhi.....	42
Tabel 11. <i>Datasheet</i> PowerBrick 48 V Lithium Iron-Phosphate (LiFePO ₄) 105Ah.....	42
Tabel 12. <i>Datasheet</i> ATESS HPS120.....	44
Tabel 13. <i>Datasheet</i> ATESS HPS50.....	45
Tabel 14. Nilai Parameter Pemodelan <i>Self-Consumption</i>	48
Tabel 15. Produksi Energi dan Penggunaan Energi Skenario <i>Self-Consumption</i>	50
Tabel 16. Kebutuhan Energi Setiap Minggu Setelah Memperhitungkan <i>Self-Consumption</i>	51
Tabel 17. Hasil Analisis Skenario <i>Self-Consumption</i>	52
Tabel 18. Produksi Energi dan Penggunaan Energi Skenario <i>Peak-Shaving</i>	53
Tabel 19. Kebutuhan Energi Setiap Minggu Setelah Memperhitungkan <i>Self-Consumption</i> Skenario <i>Peak-Shaving</i>	55
Tabel 20. Hasil Analisis Skenario Memaksimalkan <i>Peak-Shaving</i>	56
Tabel 21. Produksi Energi dan Penggunaan Energi Skenario Berbasis Waktu.....	56
Tabel 22. Kebutuhan Energi Setiap Minggu Setelah Memperhitungkan <i>Self-Consumption</i> Skenario Berbasis Waktu.....	58

Tabel 23. Hasil Analisis Skenario Berbasis Waktu.....	59
Tabel 24. Produksi Energi dan Penggunaan Energi Skenario <i>Self-Consumption</i> Pada Beban 15%	60
Tabel 25. Kebutuhan Energi Setiap Minggu Setelah Memperhitungkan <i>Self-Consumption</i> Pada Beban 15%	62
Tabel 26. Hasil Analisis Skenario <i>Self-Consumption</i> Pada Beban 15%	63
Tabel 27. Produksi Energi dan Penggunaan Energi Skenario <i>Peak-Shaving</i> Pada Beban 15%	63
Tabel 28. Kebutuhan Energi Setiap Minggu Setelah Memperhitungkan <i>Self-Consumption</i> Skenario <i>Peak-Shaving</i> Pada Beban 15%	65
Tabel 29. Hasil Analisis Skenario <i>Peak-Shaving</i> Dengan Beban 15%.....	66
Tabel 30. Produksi Energi dan Penggunaan Energi Skenario Berbasis Waktu Pada Beban 15%	67
Tabel 31. Kebutuhan Energi Setiap Minggu Setelah Memperhitungkan <i>Self-Consumption</i> Skenario Berbasis Waktu Pada Beban 15%.....	68
Tabel 32. Hasil Analisis Skenario Berbasis Waktu Dengan Beban 15%.....	69
Tabel 33. Tabel Perbandingan Total Energi dari Panel Surya dan Baterai dengan Nilai SCR dan SSR Pada Data Beban Aktual	70
Tabel 34. Tabel Perbandingan Total Energi dari Panel Surya dan Baterai dengan Nilai SCR dan SSR Pada Data Beban 15%	72

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kemajuan teknologi yang pesat telah menyebabkan peningkatan permintaan energi. Konsumsi listrik per kapita di Indonesia telah mengalami peningkatan signifikan, meningkat sebesar 178,6 GWh dari 909,91 GWh pada tahun 2015 dengan rasio elektrifikasi sebesar 88,30% menjadi 1.088,51 GWh pada tahun 2020 dengan rasio elektrifikasi sebesar 99,20%. Kapasitas daya terhubung untuk kelompok pelanggan industri di Indonesia juga mengalami pertumbuhan sebesar 6.112,39 MVA pada tahun 2020 dibandingkan dengan tahun 2015 [1]. Peningkatan konsumsi listrik ini sejalan dengan perkembangan dan kebutuhan ekonomi negara. Sesuai dengan Peraturan Presiden No. 79 tahun 2014 mengenai Kebijakan Energi Nasional, target energi baru dan terbarukan pada tahun 2025 setidaknya adalah 23%, dan pada tahun 2050, targetnya mencapai 31%. Namun, hingga akhir tahun 2021, pemanfaatan energi baru dan terbarukan di Indonesia baru mencapai 11,5% dari total energi nasional [2]. Mengingat bahwa Indonesia, sebagai negara ekuator, memiliki potensi energi terbarukan sebesar 207,8 GWp, hanya memanfaatkan sekitar 0,08% dari potensinya menunjukkan tingkat pemanfaatan yang relatif rendah [3].

Kurangnya pemanfaatan dalam pengembangan energi surya di Indonesia disebabkan oleh pemerintah dan para pemangku kepentingan. Hambatan dalam pengembangan energi surya dapat dikategorikan menjadi empat kategori yang saling terkait: hambatan sosial, manajerial, ekonomi, dan hambatan terkait kebijakan [4]. Sistem PLTS atap yang diizinkan dalam sektor industri dalam kerangka PLN dibatasi hingga 10%-15% dari kapasitas daya yang terhubung. Evaluasi lebih rinci dilakukan untuk pelanggan dengan kebutuhan daya tinggi

(Tegangan Tinggi dan Tegangan Menengah) [5]. Berdasarkan Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) No. 26 tahun 2021 mengenai sistem PLTS atap, kapasitas energi surya yang terpasang diizinkan mencapai maksimal 100% dari kapasitas daya yang terhubung [6]. Kebijakan yang ditetapkan oleh PLN bertentangan dengan peraturan yang ditetapkan oleh Menteri ESDM, yang mengakibatkan kontroversi terkait pemasangan sistem PLTS atap di sektor industri.

Studi ini berfokus pada mengevaluasi tingkat konsumsi sendiri (*self-consumption*) dalam sistem PLTS *hybrid* berskala industri, dengan harapan bahwa kebijakan yang ditetapkan oleh PLN dapat menganalisis dampak dari kombinasi sistem baterai dan panel surya. Perkembangan terbaru dan pemasaran sistem baterai yang dikombinasikan dengan energi surya telah dilihat oleh banyak orang sebagai pendorong revolusi energi terbarukan [7]. Penyerapan energi yang signifikan dari kombinasi panel surya dan baterai sekarang dianggap sebagai kemungkinan di masa depan yang akan mengarah pada peningkatan generasi terdesentralisasi dan tingkat konsumsi sendiri yang lebih tinggi [7]. Manfaat dari sistem baterai sangat berkaitan dengan tingkat konsumsi sendiri yang lebih tinggi, sehingga memaksimalkan pengurangan pajak dan konsumsi biaya jaringan utilitas [7]. Untuk memberikan indikator dari konsumsi daya yang digunakan secara efisien, penting untuk menilai volume konsumsi sendiri yang mungkin dilakukan oleh sistem *standalone* PLTS atau kombinasi sistem panel surya dan baterai. Studi mengenai sistem PLTS *hybrid* fokus pada kemampuan sistem untuk memangkas permintaan beban puncak (*peak-shaving*) [7]. Konsumsi sendiri didefinisikan sebagai produksi PLTS yang dikonsumsi langsung oleh produsen, yang seringkali adalah pemilik sistem PLTS [8].

Pengembangan dan pemasaran sistem baterai baru-baru ini dikombinasikan dengan energi surya telah dilihat oleh banyak orang sebagai katalisator revolusi energi terbarukan. Serapan energi yang signifikan dari gabungan unit panel surya dan baterai sekarang dipandang sebagai kemungkinan di masa depan yang akan mengarah pada peningkatan pembangkit terdesentralisasi dan tingkat konsumsi

sendiri (*self-consumption*) yang lebih tinggi [7]. Manfaat dari sistem baterai terkait erat dengan tingkat *self-consumption* yang lebih tinggi dan dengan demikian pembebasan pajak dan biaya dari jaringan utilitas dapat dikonsumsi lebih maksimal. Untuk memberikan indikator konsumsi daya yang terpakai dengan baik, maka harus menilai volume dari konsumsi sendiri yang dimungkinkan oleh sistem *standalone* PLTS atau kombinasi dari sistem panel surya dengan baterai. Studi tentang sistem PLTS *hybrid* berfokus pada kemampuan sistem untuk memangkas permintaan beban puncak (*peak-shaving*) [7]. Jika daya maksimum produksi sistem yang dapat ditukar dengan jaringan utilitas sehingga pemakaian jaringan terbatas, maka pengurangan daya terhadap beban dapat dikurangi secara signifikan dengan menggunakan baterai dan skenario pengisian baterai yang tepat.

Karena profil konsumsi dan produksi secara langsung memengaruhi tingkat kemandirian, kualitas data profil beban sangat penting ketika mengevaluasi *self-consumption*. Oleh karena itu, dalam penelitian ini penulis mengambil topik “Analisis *Self-Consumption* pada Sistem PLTS *Hybrid* Skala Industri.” Tujuan utamanya adalah untuk mengembangkan alat komputasi sederhana dalam bentuk model untuk menghitung *self-consumption* dalam sistem PLTS *hybrid* berskala industri. Selain itu, efisiensi pemodelan ini juga dapat digunakan untuk menilai pengaruh pemasangan sistem PLTS *hybrid* terhadap tingkat *self-consumption* dan menentukan kapasitas baterai yang sesuai.

1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dapat mengembangkan sebuah alat komputasi sederhana berupa pemodelan untuk menghitung tingkat *self-consumption* PLTS *hybrid* di skala industri.
2. Untuk mengevaluasi pengaruh pemasangan sistem PLTS *hybrid* terhadap tingkat *self-consumption* dan menentukan ukuran yang sesuai untuk kapasitas baterai.

1.3. Rumusan Masalah

Berdasarkan dari latar belakang di atas, maka peneliti merumuskan permasalahannya sebagai berikut:

1. Bagaimana memodelkan skema komputasi sederhana (dalam bentuk pemodelan) untuk menghitung *self-consumption*?
2. Bagaimana cara menentukan hasil konfigurasi sistem PLTS *hybrid* yang sesuai berdasarkan kebijakan pembatasan panel surya?

1.4. Batasan Masalah

Adapun Batasan masalah yang diterapkan oleh penulis dalam melaksanakan penelitian ini meliputi beberapa hal, yaitu sebagai berikut:

1. Data profil beban dikumpulkan setiap hari mulai dari 1 Januari hingga 28 Februari 2021. Dengan asumsi bahwa data beban sesuai dengan tahun koleksi data produksi daya panel surya setiap 30 menit;
2. Data produksi daya panel surya dikumpulkan setiap 30 menit mulai dari pukul 06.00 hingga 17.30 WIB setiap hari mulai dari tanggal 2 Januari hingga 28 Februari 2023;
3. Pemasangan kapasitas daya PLTS dibatasi hingga 15% dari beban puncak.
4. Jumlah *self-consumption* dapat dinyatakan sebagai fungsi yang tergantung pada ukuran relatif permintaan konsumsi daya listrik, produksi daya panel surya, serta pengisian dan pengeluaran energi baterai.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem kelistrikan, terutama dalam pengembangan sistem PLTS *hybrid* dan evaluasi sistem panel surya skala industri di Indonesia.

1.6. Hipotesis

Penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan jumlah *self-consumption* sistem PLTS *hybrid* guna mencari konfigurasi yang sesuai, terutama dalam menentukan kapasitas baterai yang dapat menghasilkan *self-consumption* yang maksimal.

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

Bab ini berisikan latar belakang dan masalah, tujuan penelitian, rumusan masalah, batasan masalah, manfaat penelitian, hipotesis, dan sistematika penelitian.

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. METODE PENELITIAN

Bab ini berisikan tentang waktu dan tempat penelitian tugas akhir, alat dan bahan yang digunakan dalam menyelesaikan tugas akhir ini, metode yang digunakan, dan pelaksanaan serta pengamatan dalam pengerjaan tugas akhir.

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisikan tentang hasil dan pembahasan data simulasi dan memaparkan data yang didapat dari tugas akhir ini.

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisikan tentang kesimpulan yang diperoleh dari pembahasan pada laporan tugas akhir dan saran yang berhubungan dengan pokok-pokok pembahasan tugas akhir ini.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terdahulu

Samih Zamzam [9] menyatakan bahwa kombinasi PLTS atap dan infrastruktur industri tampaknya menjadi pilihan yang menjanjikan. Bangunan industri memiliki area atap yang paling besar, efek *shading* yang rendah, dan konsumsi daya yang besar sehingga pemasangan PLTS atap menjadikan paling cocok untuk sektor industri. Dalam penelitian ini dilakukan penerapan PLTS atap di pabrik menengah yang berlokasi di UEA. Lima skenario sistem dipertimbangkan dengan fokus tiga teknis yaitu, *tracking*, *non-tracking*, dan *storage* (penyimpanan) dan dua pada keuangan bisnis yaitu peminjaman 100% dibandingkan dengan pinjaman 50%. Penelitian yang berjudul “*Solar PV Implementation in Industrial Buildings: Economic Study*”, Oleh Samih Zamzam pengembalian melalui kompensasi tarif listrik dapat terlihat bahwa skenario terbaik dalam hal konfigurasi teknis adalah sistem dengan *solar-tracking* dan skenario pembiayaan dengan pinjaman 50%.

Rasmus Luthander *et al.* menyatakan minat terhadap *self-consumption* listrik PV dari sistem rumah tangga yang terhubung ke jaringan listrik semakin meningkat di kalangan pemilik sistem PV dan dalam komunitas ilmiah. *Self-consumption* dapat didefinisikan sebagai bagian dari total produksi PV yang langsung dikonsumsi oleh pemilik sistem PV. Dengan berkurangnya subsidi untuk listrik PV di beberapa negara, peningkatan *self-consumption* dapat meningkatkan keuntungan dari sistem PV dan mengurangi beban pada jaringan distribusi listrik. Penelitian berjudul “*Photovoltaic Self-Consumption in Buildings: A Review*,” [8] ini merangkum penelitian yang telah ada mengenai *self-consumption* PV dan opsi untuk meningkatkannya. Dua opsi untuk meningkatkan *self-consumption*

termasuk penyimpanan energi dan manajemen beban, yang juga disebut sebagai *Demand Side Management* (DSM). Sebagian besar penelitian mengeksplorasi sistem PV-baterai, terkadang dikombinasikan dengan DSM. Hasilnya menunjukkan bahwa mungkin untuk meningkatkan *self-consumption* relatif sebesar 13-24% dengan kapasitas penyimpanan baterai sekitar 0,5 hingga 1 kWh per kW daya PV yang terpasang, dan antara 2-15% dengan DSM, keduanya dibandingkan dengan tingkat *self-consumption* awal. Namun, jumlah keseluruhan penelitian masih cukup terbatas dan diperlukan penelitian lebih lanjut serta studi perbandingan untuk memberikan pandangan komprehensif tentang teknologi ini dan potensinya. Respons perilaku terhadap *self-consumption* PV dan dampaknya pada jaringan distribusi juga perlu diteliti lebih lanjut.

Penelitian yang dilakukan oleh Antonio José Gil Mena [10] mengenai *self-consumption* dalam penggunaan rumah tangga terus berkembang, dan masyarakat mencari solusi baru sebagai respons terhadap perubahan paradigma baru. Penelitian berjudul “*Analysis and Optimisation of Collective Self-Consumption in Residential Buildings in Spain,*” bertujuan untuk mengoptimalkan penentuan ukuran instalasi *self-consumption* untuk konsumsi bersama dalam sebuah gedung perumahan di bawah regulasi Spanyol. Studi ini mempertimbangkan volatilitas harga saat ini di pasar listrik ritel Spanyol dan berfokus pada analisis teknonomi dari *self-consumption* dalam sebuah bangunan yang terdiri dari 12 unit hunian dengan penggunaan energi fotovoltaik dan kemungkinan dukungan dari sistem penyimpanan. Tiga aspek yang dianalisis adalah penentuan ukuran fasilitas *self-consumption*, penggunaan peralatan pintar untuk menggeser konsumsi ke waktu yang lebih efisien biaya, dan pembagian energi terbarukan yang dihasilkan oleh fasilitas di antara konsumen yang berpartisipasi dalam konsumsi bersama. Penelitian ini menggunakan dua model, yaitu model hari rata-rata dan model selama setahun penuh. Hasil analisis teknonomi menunjukkan bahwa dari dua modalitas *self-consumption* untuk konsumsi rumah tangga, modalitas dengan kompensasi sederhana surplus lebih menguntungkan dibandingkan dengan yang tanpa surplus. Terakhir, penelitian berfokus pada pembagian total energi

terbarukan di antara peserta. Hasilnya menunjukkan bahwa baik pembagian dinamis *ex-ante* maupun *ex-post* memberikan sedikit manfaat.

Penelitian yang berjudul “*Quantifying Self-Consumption Linked to Solar Home Battery Systems: Statistical Analysis and Economic Assessment*”, Quolin S *et al.* [7] menyatakan perkembangan baru-baru ini dalam sistem baterai rumah tangga yang inovatif telah dilihat oleh banyak orang sebagai pendorong revolusi energi surya dan telah menciptakan harapan tinggi dalam sektor ini. Banyak pengamat telah memprediksi peningkatan unit PV/baterai yang dapat akhirnya memutus hubungan dari jaringan dan mengarah pada rumah-rumah otonom atau mikro-grid. Namun, sebagian besar komentar di media sosial, blog, atau artikel pers kurang memiliki evaluasi biaya yang tepat dan simulasi yang realistis. Penelitian ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan ini dengan mensimulasikan *self-consumption* di berbagai negara UE, untuk berbagai profil rumah tangga, dengan atau tanpa baterai. Hasil menunjukkan bahwa (1) *self-consumption* adalah fungsi non-linear, hampir asimtotik dari ukuran PV dan baterai. Mencapai 100% *self-consumption* (yaitu memungkinkan untuk operasi *off-grid* penuh) tidak realistis untuk negara-negara yang diteliti tanpa membesarkan ukuran sistem PV dan/atau baterai secara berlebihan; (2) meskipun turun dengan cepat, biaya penyimpanan Li-Ion rumah tangga kemungkinan masih terlalu tinggi untuk pengambilan pasar dalam skala besar di Eropa; (3) profitabilitas baterai rumah dan peningkatan masa depan terutama bergantung pada subsidi tidak langsung untuk *self-consumption* yang disediakan oleh struktur harga ritel; (4) tingkat *self-sufficiency* bervariasi luas antara rumah tangga. Untuk rumah tangga tertentu, volume *self-consumption* tidak dapat diprediksi secara deterministik. Bersama dengan hasil-hasil ini, penelitian ini juga menyediakan database profil rumah tangga sintetis, alat simulasi untuk prediksi *self-consumption*, dan metode untuk penentuan ukuran optimal dari sistem-sistem tersebut.

Qusay Hassan *et al.* [11] dengan penelitian berjudul “*Collective Self-Consumption of Solar Photovoltaic and Batteries for A Micro-Grid Energy System*” ini melakukan analisis tekno-ekonomi untuk mendapatkan kapasitas penyimpanan

baterai yang optimal bersamaan dengan PV yang dapat mencocokkan beban rumah tangga yang diinginkan dengan tingkat *self-consumption* tertinggi yang mungkin. Selain itu, penelitian ini menentukan kelayakan ekonomi dari mikro-sistem yang diusulkan. Konsumsi energi tahunan, radiasi matahari, dan suhu lingkungan diukur dengan resolusi 1 menit selama tahun 2021. Simulasi model ekonomi statis dilakukan untuk tahun 2021 hingga 2030. Hasil penelitian menunjukkan bahwa PV dengan kapasitas 2,7 kWp dapat menghasilkan energi tahunan sekitar 4295,4 kWh dan kapasitas baterai yang optimal yang dapat memenuhi 91,1% *self-consumption* dan biaya energi sebesar \$0,256/kWh adalah 14,4 kWh. Selain itu, dua hubungan polinomial orde ketiga antara *self-consumption* dan biaya bersih saat ini dengan biaya energi berhasil dipecahkan.

2.2. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan peralatan pembangkit listrik yang mengubah energi matahari menjadi energi listrik. PLTS memanfaatkan cahaya matahari untuk menghasilkan listrik arus searah. PLTS pada dasarnya merupakan teknologi persatuan daya, dan dapat dirancang untuk mencatu kebutuhan listrik sehari-hari, baik secara mandiri maupun *hybrid*. Prinsip dasar PLTS adalah mengubah cahaya matahari menjadi energi listrik, komponen utama dari sistem PLTS adalah fotovoltaik yang dirangkai secara seri atau paralel dari beberapa sel surya fotovoltaik. *Solar cell* yang disinari oleh cahaya matahari membuat *foton* yang dapat menghasilkan arus listrik.

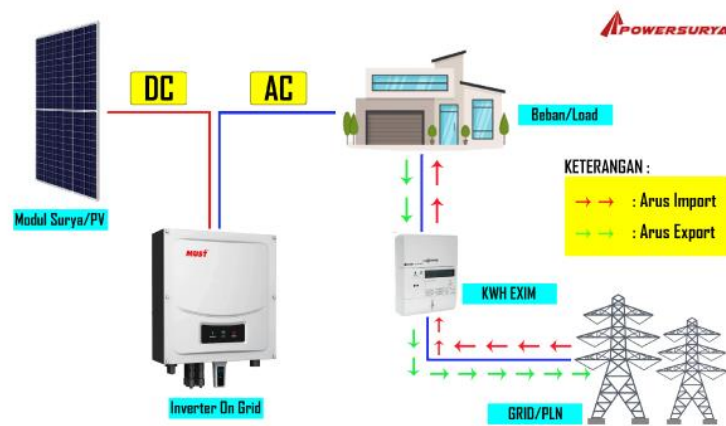


Gambar 1. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

2.2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Surya *On-Grid*

Sistem PLTS terinterkoneksi (*On-Grid*) atau disebut dengan *Grid Connected PV System* merupakan sistem pembangkit listrik tenaga surya yang dihubungkan dengan jaringan PLN. Pada sistem ini cocok digunakan untuk daerah perkotaan yang sudah terdapat jaringan PLN. Sistem ini tidak menggunakan baterai sebagai penyimpan daya, pada siang hari modul PV bekerja untuk menghasilkan daya sebagai sumber daya utama ke beban, dan jika terdapat pembangkitan berlebih maka akan disalurkan ke jaringan distribusi, dan pada malam hari, maka sumber beban akan sepenuhnya ditanggung oleh PLN.

Sistem ini bertujuan untuk mengurangi penggunaan listrik dari PLN sehingga memperkecil tagihan rekening listrik dari PLN dan dapat memberikan nilai tambah kepada pemiliknya. Kekurangan dari sistem ini adalah jika modul PV tidak dapat bekerja untuk menghasilkan daya dan jaringan PLN terjadi pemadaman, maka tidak terdapat sumber energi yang menyuplai beban.

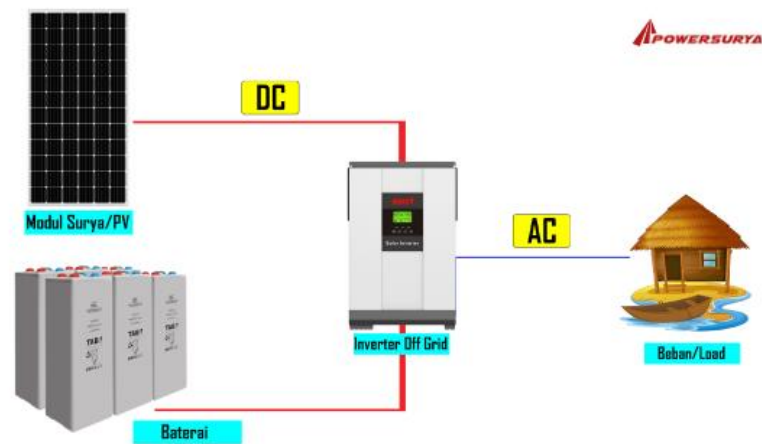


Gambar 2. Sistem PLTS *On-Grid*

2.2.2. Pembangkit Listrik Tenaga Surya *Off-Grid*

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Terpusat (*Off-Grid*) merupakan sistem pembangkit listrik yang hanya memanfaatkan energi matahari tanpa terhubung dengan jaringan PLN atau dengan kata lain sumber dari pembangkit ini hanya menggunakan energi matahari untuk menghasilkan energi listrik. Energi listrik yang dihasilkan oleh modul PV akan disimpan ke dalam baterai dan akan digunakan secara penuh pada siang dan malam hari. Pada siang hari modul PV berkerja sebagai sumber utama beban, sedangkan daya yang berlebih akan disalurkan ke baterai dan disimpan sebagai energi cadangan, dan pada malam hari baterai yang sudah penuh akan digunakan untuk menyuplai beban ketika modul PV tidak dapat menghasilkan daya.

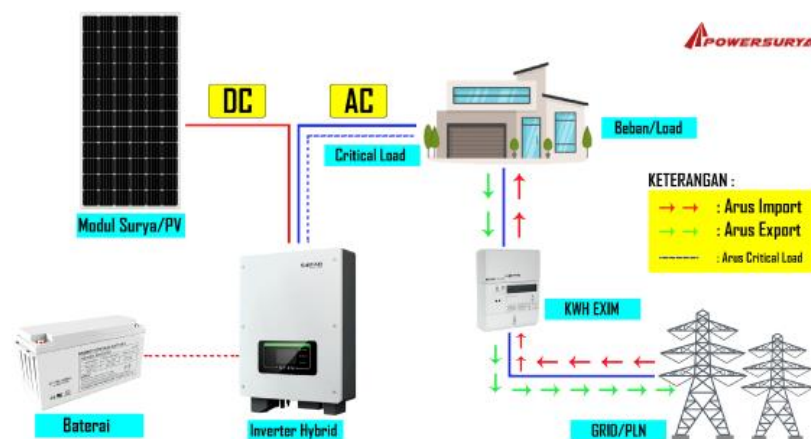
Sistem ini sangat cocok digunakan untuk daerah terpencil atau daerah yang belum terdapat pasokan jaringan listrik PLN. Namun biaya yang diperlukan untuk menginstalasi akan lebih mahal dibandingkan dengan sistem *On-Grid*.



Gambar 3. Sistem PLTS *Off-Grid*

2.2.3. Pembangkit Listrik Tenaga Surya *Hybrid*

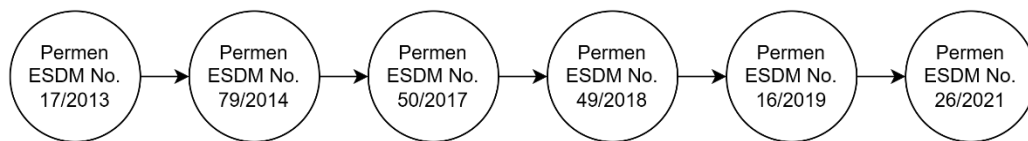
Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya *Hybrid* merupakan sistem yang terinterkoneksi dengan jaringan PLN (*On-Grid*), serta menggunakan baterai (*Off-Grid*) sebagai penyimpan daya (*Critical Load*) ketika PLN padam atau malam hari. Fungsi utama dari PLTS *hybrid* ini adalah ketahanan sistem, karena selain dapat mengurangi penggunaan listrik dari PLN, sistem ini juga dapat menyimpan daya pada baterai. Karena kombinasi dari kedua sistem (*On-Grid* dan *Off-Grid*) sehingga sistem ini disebut dengan *hybrid*.



Gambar 4. Sistem PLTS *Hybrid*

2.3. Perkembangan Kebijakan PLTS Atap di Indonesia

Pemerintah Indonesia telah merancang kebijakan untuk pengembangan sektor energi surya, sehingga dapat memungkinkan untuk mengembangkan energi surya lebih cepat dan stabil. Pemerintah menetapkan target untuk mengembangkan pangsa energi terbarukan dan melakukan evaluasi terhadap kebijakan atas meningkatnya kepentingan publik dan komersial dalam energi surya. Kebijakan tersebut dinyatakan 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.



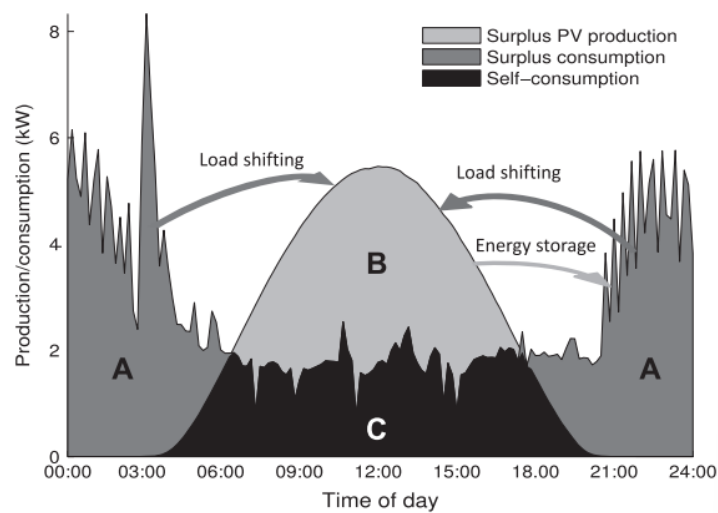
Gambar 5. *Roadmap* Kebijakan PLTS di Indonesia

PLTS Atap yang diperbolehkan terpasang di sektor industri dengan kebijakan PLN hanya dibatasi 10%-15% dari daya yang tersambung [5]. Berdasarkan dengan Peraturan Menteri ESDM No. 26 Tahun 2021 mengenai PLTS atap, kapasitas energi surya yang terpasang diizinkan dengan maksimal 100% dari daya yang tersambung [6]. Kebijakan yang ditetapkan oleh PLN bertolak belakang dengan aturan yang dibentuk oleh Menteri ESDM, sehingga menyebabkan polemik untuk pemasangan PLTS Atap pada sektor industri.

Sedangkan untuk ketentuan jumlah energi listrik yang dapat diekspor dari konsumen semula dihargai sebesar 65% berubah menjadi 100%. Artinya, setiap energi yang dikirim oleh pelanggan ke jaringan PLN akan dihargai sama dengan harga tarif listrik PLN sesuai dengan daya yang terpasang. PLTS atap komersial dan industri merupakan salah satu kontributor utama. Jika perkembangan PLTS atap terhambat maka target untuk mencapai energi terbarukan yang dirancang oleh pemerintah bisa gagal tercapai.

2.4. Self-Consumption

Konsep *self-consumption* dari instalasi panel surya menggambarkan penggunaan listrik yang dihasilkan oleh pemasangan panel surya tersebut, untuk mengurangi tagihan listrik. Konsep *self-consumption* berkaitan erat dengan istilah '*prosumer*' yang telah diadopsi untuk menggambarkan seorang konsumen listrik yang memproduksi listrik untuk mendukung konsumsinya sendiri. Istilah '*prosumer*' menggambarkan peran ganda sebagai 'produsen' dan 'konsumen'.



Gambar 6. Skema Beban Harian, Generasi Bersih, dan *Self-Consumption* Dalam Bangunan Dengan Panel Surya Serta Opsi Peningkatan *Self-Consumption*

Gambar 6 menggambarkan skema garis besar profil daya dari generasi panel surya dan konsumsi daya. Area A dan B masing-masing mewakili permintaan total listrik bersih dan generasi. Bagian yang bersilangan di area C adalah daya dari panel surya yang dimanfaatkan langsung, ini disebut sebagai konsumsi daya mutlak. Namun, yang paling umum dimaksudkan dengan *self-consumption* adalah bagian yang dikonsumsi sendiri dibandingkan dengan produksi total, yang disederhanakan menjadi [8]:

$$\text{Self - Consumption} = \frac{C}{B+C} \quad (1)$$

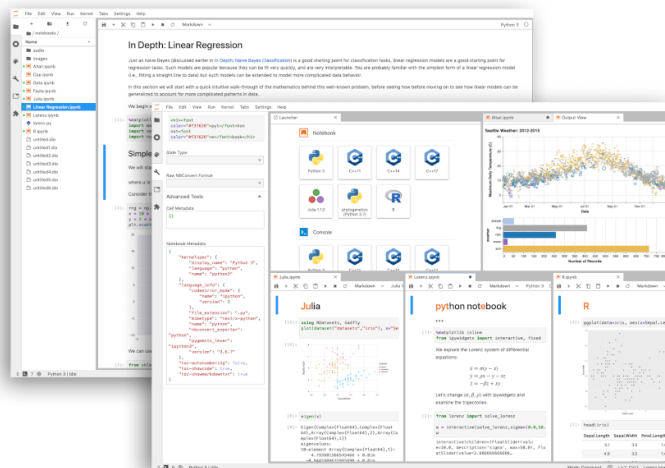
Bagian yang dikonsumsi sendiri relatif terhadap beban total yang dibutuhkan. Istilah ini disebut dengan *self-sufficiency*, yaitu seberapa baik generasi energi mampu mencakup kebutuhan energi [8].

$$\text{Self - Sufficiency} = \frac{C}{A+C} \quad (2)$$

Secara ringkas, *self-consumption* sangat ideal untuk menyediakan energi melalui generasi terdistribusi atau tersebar. Keuntungan utamanya termasuk penggunaan energi terbarukan dan pengurangan daya dalam jaringan distribusi [10].

2.5. JupyterLab

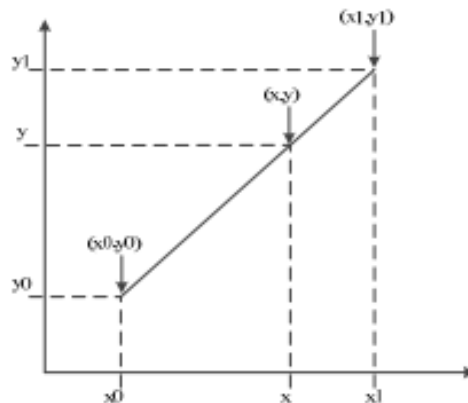
JupyterLab adalah *interactive development environment* berbasis web terbaru untuk *notebook*, kode, dan data. JupyterLab fleksibel dalam hal mendukung *workflow* untuk data sains, komputasi ilmiah, dan *machine learning*. Jupyter Notebook adalah aplikasi web sumber terbuka yang memungkinkan untuk membuat dan berbagi dokumen yang berisi kode langsung, persamaan, visualisasi, dan teks narasi.



Gambar 7. JupyterLab

2.6. Interpolasi Linier

Interpolasi linier adalah metode interpolasi untuk data satu dimensi. Ini memperkirakan nilai data berdasarkan dua titik data yang berdekatan dengan titik yang perlu diinterpolasi dalam urutan data satu dimensi [12]. Diantaranya, yang paling sederhana adalah interpolasi linier orde pertama. sebagai berikut.



Gambar 8. Diagram Skematik Interpolasi Linier

Persamaan fungsi interpolasi linier adalah:

$$f(x) = f(X_0) + \frac{f(X_1) - f(X_0)}{X_1 - X_0} \times (X - X_0) \quad (3)$$

Dimana X adalah variabel bebas, X_1 dan X_0 adalah nilai variabel bebas yang diketahui, dan $f(X)$ adalah nilai variabel terikat untuk nilai X dari variabel bebas [13].

III. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dalam waktu 8 bulan, yaitu pada bulan Januari – September 2023 di Laboratorium Terpadu Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung.

Tabel 1. Jadwal Penelitian

No	Nama Kegiatan	Bulan						
		Maret	April	Mei	Juni	Juli	Agustus	September
1	Studi literatur dan terbimbing	■						
2	Pembuatan proposal	■						
3	Seminar proposal		■					
4	Pengumpulan data		■					
5	Pengolahan data dan pembuatan program		■	■	■			
6	Evaluasi hasil simulasi			■	■	■		
7	Penyusunan laporan				■	■	■	
8	Seminar hasil Ujian					■		
9	Komprehensif							■

3.2. Alat dan Bahan

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

1. Satu unit laptop dengan spesifikasi AMD Ryzen 5500U Radeon Graphics, dilengkapi prosesor 2,10 GHz, serta sistem operasi Windows 11 Pro 64-bit sebagai media pemodelan dan simulasi.
2. Perangkat lunak Anaconda Navigator sebagai alat antarmuka pengguna grafis (GUI) untuk meluncurkan aplikasi tanpa menggunakan perintah antarmuka (CLI).
3. Perangkat lunak JupyterLab untuk membuat simulasi program
4. Perangkat lunak Microsoft Excel untuk validasi perhitungan dan pembuatan grafik.
5. Data-data konsumsi daya listrik (kW) Gedung *Assembly Plant 5* PT. Astra Honda Motor setiap 30 menit, produksi daya panel surya (kW) setiap 30 menit mulai dari pukul 06.00 hingga 17.30 WIB, dan kapasitas ukuran PLTS atap yang terpasang dan energi yang mampu dibangkitkan.

3.3. Tahapan Penelitian

Adapun tahapan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Identifikasi Masalah
Pada tahap ini penulis mengidentifikasi permasalahan yang terdapat pada perancangan pemodelan komputasi sederhana untuk menghitung tingkat *self-consumption*.
2. Studi Literatur
Pada tahap ini merupakan proses pencarian data dan referensi yang akan dijadikan acuan untuk menunjang proses pelaksanaan penelitian. Studi literatur akan diperoleh data sekunder, buku, skripsi, laporan terdahulu, artikel, dan jurnal-jurnal nasional maupun internasional yang berkaitan dengan topik skripsi.

3. Studi Terbimbing

Pada tahap ini penulis melakukan diskusi dan tanya jawab dengan dosen pembimbing guna menambah wawasan dan mengenai permasalahan permasalahan yang dihadapi selama proses pengerjaan peneliti.

4. Pengumpulan Data dan Pengolahan Data

Penulis mengumpulkan data-data yang dibutuhkan penelitian yang akan digunakan untuk analisis menggunakan perangkat lunak. Adapun data-data yang dibutuhkan untuk penelitian ini meliputi:

- a. Data konsumsi daya listrik (kW) Gedung *Assembly Plant 5* PT. Astra Honda Motor setiap 30 menit.
- b. Data produksi daya panel surya (kW) setiap 30 menit mulai dari pukul 06.00 hingga 17.30 WIB.

5. Simulasi dan Analisis

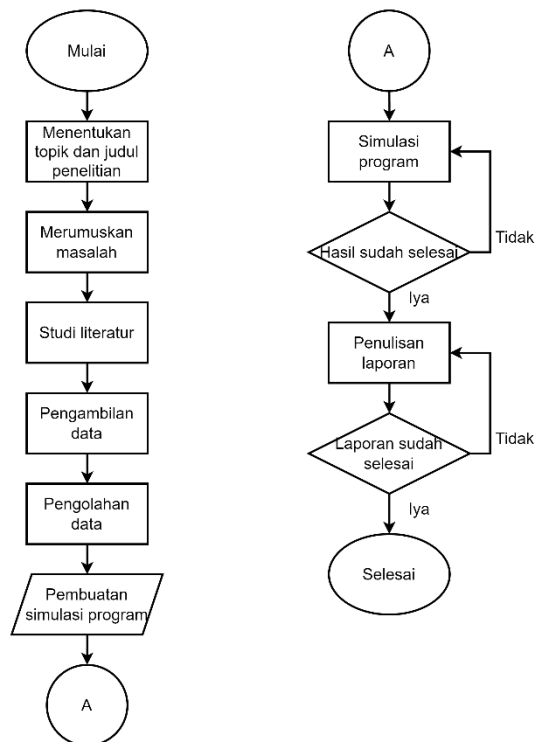
Dari data yang telah diolah sebelumnya, akan dilakukan simulasi program untuk mencari nilai maksimal dari *self-consumption* dan penghematan penggunaan jaringan PLN dengan tujuan memaksimalkan penggunaan produksi energi dari PLTS *hybrid*.

6. Pembuatan Laporan

Pada tahap ini, penulis membuat laporan terkait hasil yang telah didapatkan dan sebagai sarana pertanggungjawaban terhadap penelitian yang telah dikerjakan. Laporan penelitian ini dibagi menjadi dua tahap, yaitu laporan awal yang digunakan untuk seminar proposal dan laporan akhir yang digunakan untuk seminar hasil.

3.4. Diagram Alir Penelitian

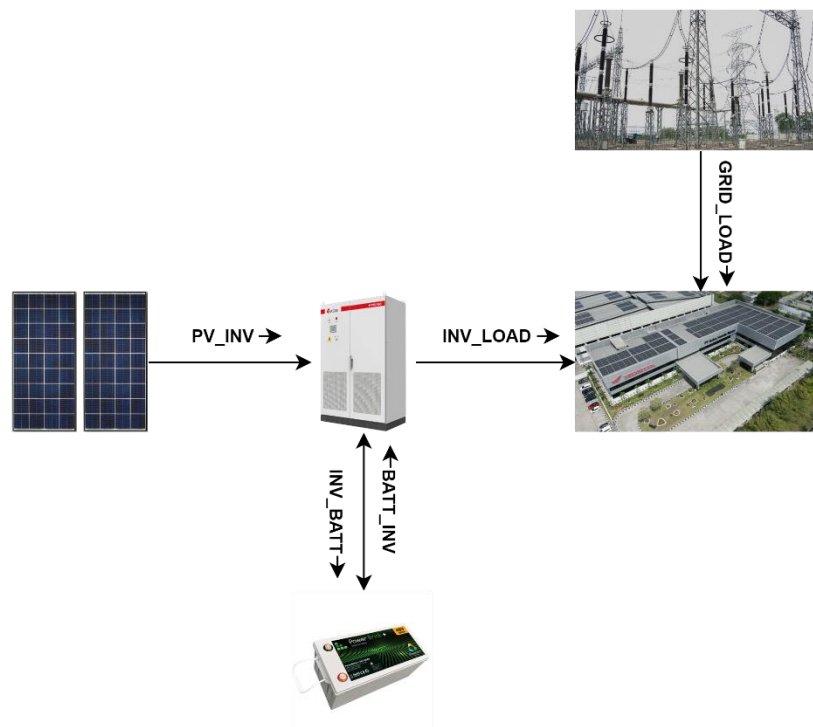
Adapun diagram alir dari penelitian ini ditunjukkan oleh gambar dibawah ini.



Gambar 9. Diagram Alir Penelitian

3.5. Pemodelan *Self-Consumption*

Pemodelan ini ditujukan untuk menghitung *self-consumption* PLTS *hybrid*. Sistem PLTS *hybrid* dianggap sebagai sarana untuk memenuhi kebutuhan beban. Model ini berisi logika untuk mengirimkan energi berdasarkan kondisi dan aturan yang diberikan untuk diagram alir berikut.



Gambar 10 Sistem Simulasi *Self-Consumption*

Pemodelan ini digunakan untuk menerapkan kebijakan penetapan:

1. *Feed in Tarif* atau pembelian tenaga listrik.
2. (a+b) pengukuran standar dua arah.

Dalam pemodelan ini terdapat tiga fungsi *dispatch* yang diterapkan:

1. *dispatch_max_sc*:

Fungsinya menghitung pengisian baterai, daya yang diproses oleh inverter, serta aliran daya ke dan dari baterai. Selain itu, fungsi ini memodelkan bagaimana baterai mengisi daya dari panel surya dan bagaimana baterai menyuplai beban. Fungsi ini memberikan gambaran tentang bagaimana panel surya dan baterai bekerja bersama untuk memenuhi permintaan beban, dengan memperhitungkan efisiensi dan aliran daya dalam langkah waktu tertentu.

2. *dispatch_max_sc_ps*:

Fungsi ini digunakan untuk menerapkan skenario *peak-shaving* guna mengoptimalkan penggunaan daya dari panel surya dan penyimpanan baterai.

Fungsi *find_threshold* digunakan untuk menentukan tingkat daya ambang di mana kelebihan daya dari panel surya akan disimpan dalam baterai. Tujuan dari ambang batas adalah untuk menemukan titik generasi energi berlebih di mana energi surya berlebih harus disimpan di baterai. Ambang batas dihitung menggunakan teknik optimisasi brentq untuk menemukan titik di mana energi berlebih dapat disimpan di baterai sambil mempertimbangkan kapasitas baterai yang tersisa. Nilai ambang batas kemudian digunakan dalam *loop* utama kode untuk menentukan apakah energi surya berlebih harus disimpan di baterai atau tidak. Nilai ini dibandingkan dengan energi berlebih yang sebenarnya dihasilkan oleh panel surya untuk setiap langkah waktu. Jika energi berlebih di atas ambang batas, sebagian dari energi tersebut disimpan di baterai. Jika tidak, seluruh energi berlebih disimpan di baterai.

3. *dispatch_max_sc_time*:

Fungsi ini dirancang untuk memaksimalkan aliran daya dan penyimpanan energi dengan mempertimbangkan faktor waktu. Spesifiknya, fungsi ini memperhitungkan periode waktu ketika penyimpanan baterai terjadi antara pukul 06.00 WIB hingga 17.30 WIB, dan periode waktu ketika pengeluaran baterai terjadi antara pukul 19.00 WIB hingga 00.00 WIB.

Kapasitas penyimpanan baterai dipakai untuk memaksimalkan *self-consumption*, jika daya produksi panel surya lebih tinggi dari beban, maka daya lebih tersebut dipakai untuk mengisi baterai hingga penuh. Jika daya produksi panel surya lebih rendah dari beban, maka pengalihan energi menggunakan baterai. Kerugian yang diperhitungkan adalah efisiensi bolak-balik baterai dan efisiensi inverter.

Daya yang dilayani oleh panel surya:

$$P_{PV,DC,i} = \min\left(P_{PV,DC}, \frac{P_{load,i}}{\eta_{inv}}\right) \quad (4)$$

Daya yang disalurkan oleh panel surya menuju beban:

$$P_{SC,DC,0,i} = P_{PV,DC,i} \times \eta_{inv} \quad (5)$$

Sisa beban yang sudah tersalurkan panel surya (residu):

$$res_{load} = \max\left(0, \frac{P_{load,i}}{\eta_{inv}} - P_{PV,DC,i}\right) \quad (6)$$

Daya lebih produksi panel surya:

$$res_{PV} = \max \left(0, P_{PV,DC,i} - \frac{P_{load,i}}{\eta_{inv}} \right) \quad (7)$$

Sisa daya panel surya untuk pengisian (*charging*) baterai:

$$inv_{Batt} = res_{PV} \times \eta_{inv} \quad (8)$$

Kemampuan pengisian (*charging*) baterai:

$$inv_{Batt} = inv_{Batt} \times \eta_{Batt} \quad (9)$$

Kapasitas baterai setelah pengisian (*charging capacity*):

$$CAP_{Batt,cha,i} = \sum_{i=i-1}^N inv_{Batt} \quad (10)$$

if $CAP_{Batt,cha,i} > Batt_{size}$:

$$CAP_{Batt,cha,i} = Batt_{size}$$

Kemampuan pengosongan (*discharging*) baterai:

if $CAP_{Batt,cha,i} > Batt_{soc}$:

$$Batt_{inv} = \min \left((CAP_{Batt,cha,i} - Batt_{soc}), P_{load,i} \right) \quad (11)$$

Daya yang disalurkan oleh baterai menuju beban:

$$P_{Battload} = Batt_{inv} \times \eta_{inv} \quad (12)$$

Kapasitas baterai setelah pengosongan (*battery capacity*):

$$CAP_{Batt,cha,i} = CAP_{Batt,cha,i} - Batt_{load} \quad (13)$$

Daya yang disalurkan oleh panel surya dan baterai:

$$inv_{load} = P_{SC,DC,0,i} + P_{Battload} \quad (14)$$

Kebutuhan jaringan:

$$Grid_{load} = P_{load,i} - inv_{load} \quad (15)$$

Keterangan:

$P_{PV,DC}$ = Daya produksi panel surya dalam (kW)

$P_{load,i}$ = Beban (kW)

η_{inv} = Efisiensi inverter

η_{Batt} = Efisiensi baterai

$Batt_{size}$ = Kapasitas baterai (kWh)

$Batt_{soc}$ = Batas *State of Charge* baterai

Untuk simulasi ini SCR didefinisikan sebagai rasio antara energi *self-consumption* dan total produksi energi dari panel surya. Sedangkan SSR didefinisikan sebagai rasio antara jumlah energi *self-consumption* dan total kebutuhan energi.

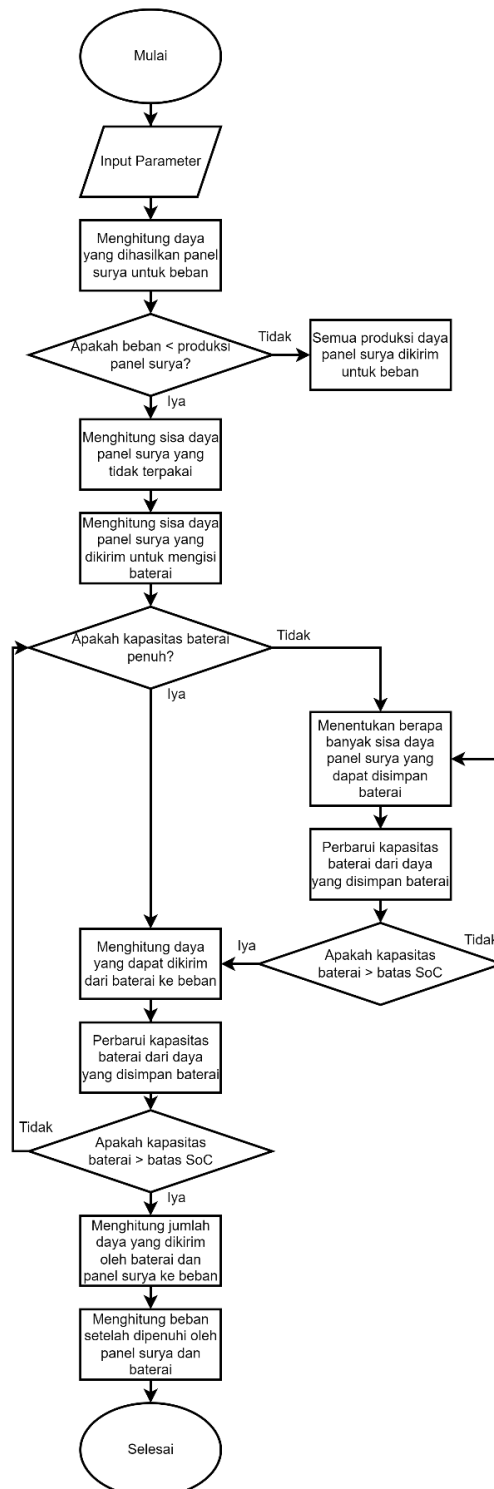
$$SSR = \frac{E_{SC}}{E_{load}} = \frac{\sum_{i=1}^N (P_{Battload} + P_{SC,DC,0,i}) \times \eta_{inv}}{\sum_{i=1}^N P_{load,i}} \quad (16)$$

$$SCR = \frac{E_{SC}}{E_{PV,DC}} = \frac{\sum_{i=1}^N (P_{Battload} + P_{SC,DC,0,i}) \times \eta_{inv}}{\sum_{i=1}^N P_{PV,DC,i}} \quad (17)$$

Dimana E mengacu pada aliran energi dan P merupakan daya hasil produksi, N adalah jumlah langkah waktu dan $P_{SC,DC,0,i}$ adalah hasil pembangkitan panel surya yang dikonsumsi langsung tanpa melewati penyimpanan baterai [6].

3.5.1. *dispatch_max_sc*

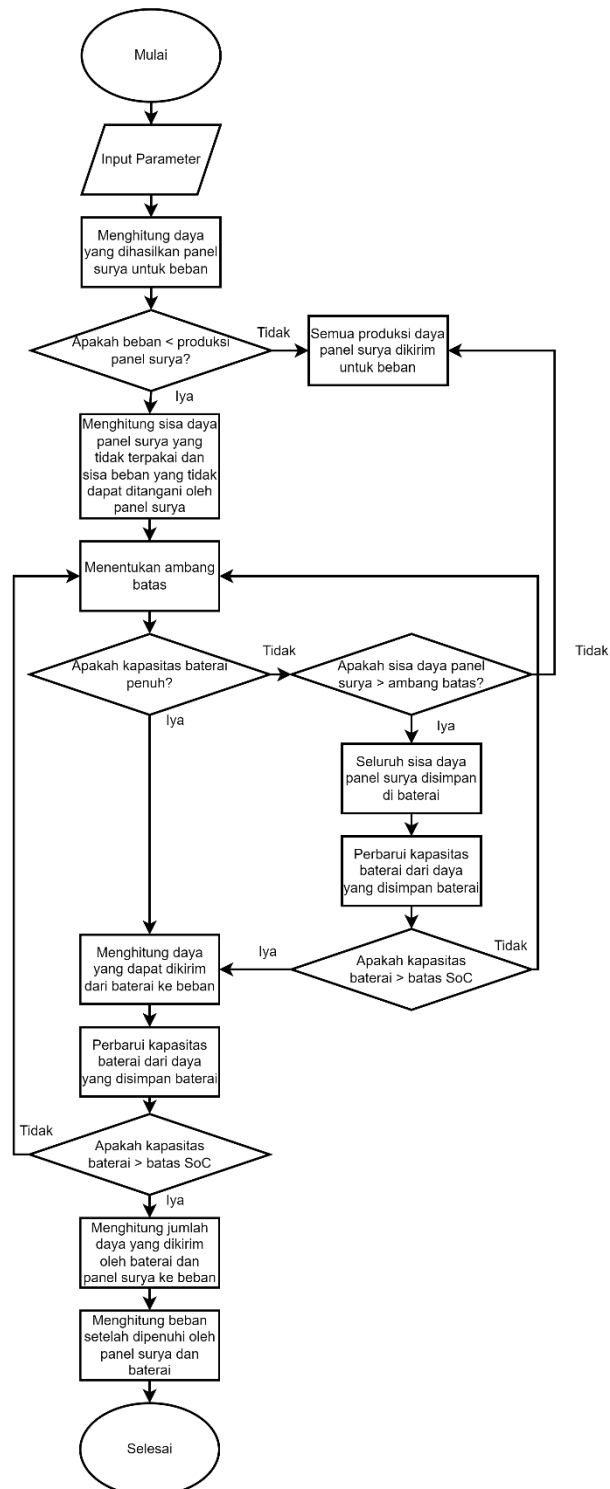
Adapun diagram alir program dari skenario *dispatch_max_sc* ditunjukkan oleh gambar berikut ini.



Gambar 11. Diagram Alir *dispatch_max_sc*

3.5.2. *dispatch_max_sc_ps*

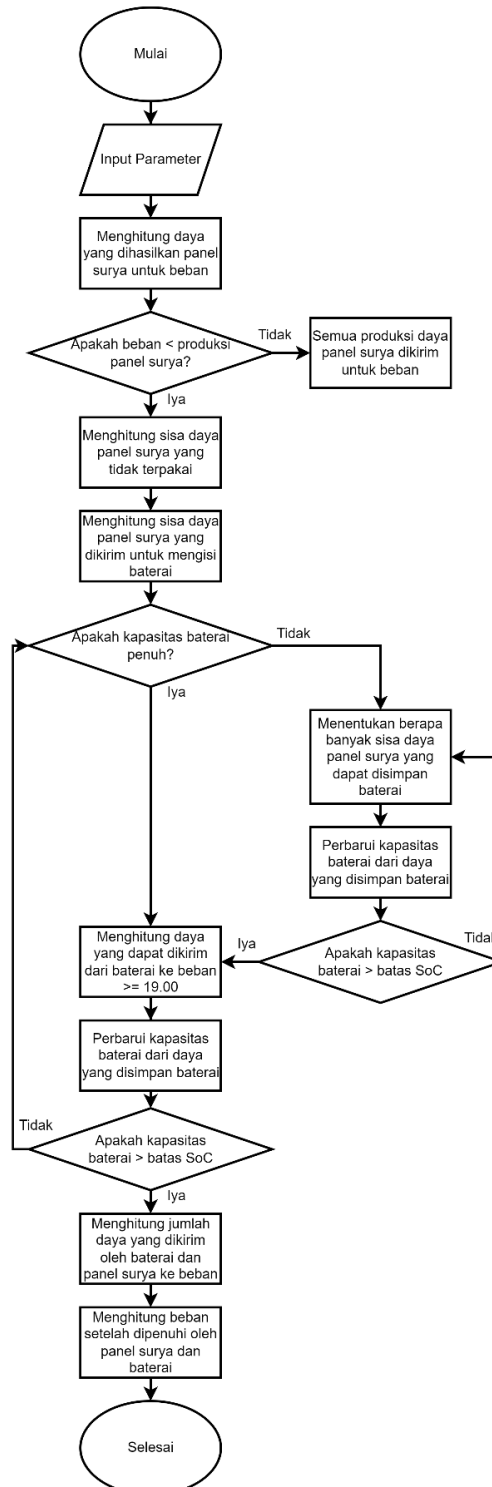
Adapun diagram alir program dari skenario *dispatch_max_sc_ps* ditunjukkan oleh gambar berikut ini.



Gambar 12. Diagram Alir *dispatch_max_sc_ps*

3.5.3. *dispatch_max_sc_time*

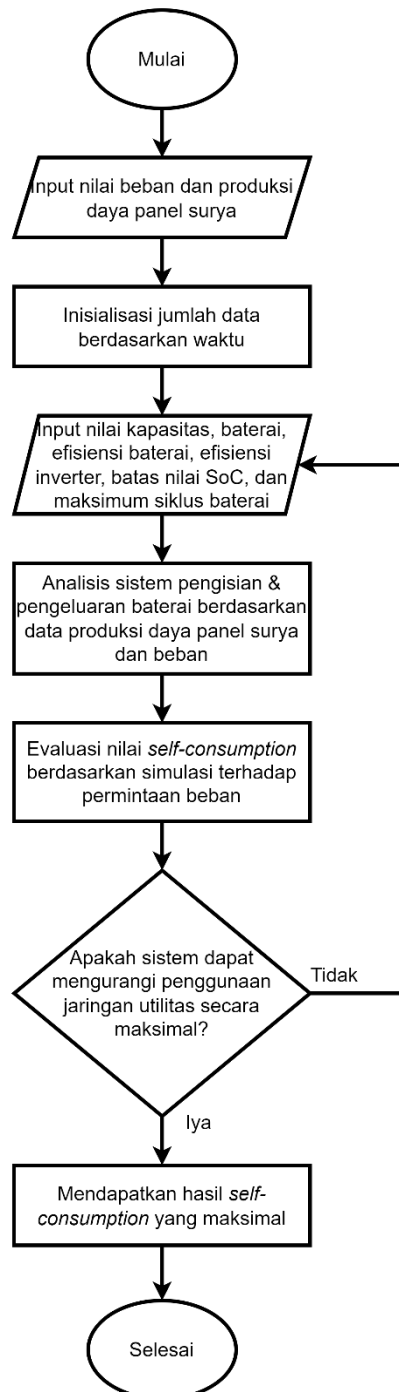
Adapun diagram alir program dari skenario *dispatch_max_sc_time* ditunjukkan oleh gambar berikut ini.



Gambar 13. Diagram Alir *dispatch_max_sc_time*

3.6. Diagram Alir Program

Adapun diagram alir program dari *self-consumption* ditunjukkan oleh gambar berikut ini.



Gambar 14. Diagram Alir Program *Self-Consumption*

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan

Adapun simpulan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Berhasil mengembangkan alat komputasi untuk menghitung *self-consumption* dan menganalisis nilai-nilai dihasilkan.
2. Dalam penelitian ini, energi maksimal yang dapat disimpan dalam baterai adalah sebesar 639,09 kWh. Energi ini berasal dari sisa produksi terbesar panel surya, setelah kebutuhan beban dipenuhi oleh pasokan dari panel surya. Oleh karena itu, kapasitas baterai yang optimal untuk Gedung *Assembly Plant* 5 PT. Astra Honda Motor adalah 834,74 kWh, dengan batas pengeluaran baterai sebesar 78,125%.
3. Saat menggunakan data beban aktual, rasio antara *self-consumption* dengan total kebutuhan energi (SSR) dari ketiga skenario tersebut hanya sebesar 5,113%. Hal ini terjadi karena kapasitas panel surya hanya mencakup 15% dari total kebutuhan beban puncak.
4. Sementara itu, ketika menggunakan beban sebesar 15%, rasio *self-consumption* dengan total kebutuhan energi dari ketiga skenario tersebut adalah 30,157%. Hal ini terjadi karena produksi energi yang sebanding dengan permintaan energi, maka tingkat *self-consumption* akan semakin besar, sehingga proporsi energi yang dihasilkan oleh panel surya dan disimpan dalam baterai menjadi lebih signifikan.
5. Untuk mencapai tingkat *self-consumption* yang tinggi, diperlukan penambahan kapasitas pemasangan panel surya, sehingga energi yang diproduksi dapat memenuhi kebutuhan beban dan disimpan di baterai secara maksimal.

5.2. Saran

Penting untuk membahas kebijakan pemasangan PLTS skala industri guna meningkatkan pembangkitan energi secara mandiri dan menghasilkan penghematan bagi prosumer. Ini dapat dicapai dengan memfasilitasi instalasi dan penggunaan PLTS di industri melalui kebijakan yang mendorong adopsi energi terbarukan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, “Statistik Ketenagalistrikan Tahun 2020, 34th ed. Jakarta,” Jakarta, 2021. Accessed: Mar. 08, 2023. [Online]. Available: https://gatrik.esdm.go.id/assets/uploads/download_index/files/8f7e7-20211110-statistik-2020-rev03.pdf
- [2] “ENERGI INDONESIA 2019 SEKRETARIAT JENDERAL DEWAN ENERGI NASIONAL,” 2019. doi: 2527-3000.
- [3] Humas EBTKE, “Pemerintah Kawal COD Pembangkit EBT Sesuai Target,” Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi and Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. Accessed: Feb. 07, 2022. [Online]. Available: 2527 3000%0A%0A
- [4] E. Karakaya and P. Sriwannawit, “Barriers to the adoption of photovoltaic systems: The state of the art,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49. Elsevier Ltd, pp. 60–66, May 10, 2015. doi: 10.1016/j.rser.2015.04.058.
- [5] Sugiharto Purnama, “Asosiasi Energi Surya Indonesia (AESI) Meminta PT PLN (Persero) Menjalankan Peraturan Menteri ESDM Nomor 26 Tahun 2021 dan Tak Membatasi Pemanfaatan PLTS Atap Hanya 10-15 Persen Dari Kapasitas Listrik Terpasang Di Sektor Industri,” www.antaranews.com. [Online]. Available: <https://www.antaranews.com/berita/2815625/aesi-minta-pln-tak-batasi-pemanfaatan-plts-atap-di-sektor-industri>
- [6] T. Lembaran, T. L. Negara, T. Lembaran, and N. Republik, “Berita Negara,” no. 848, pp. 1–11, 2022, [Online]. Available: <https://peraturan.bpk.go.id/Details/257416/permen-esdm-no-26-tahun-2021>

- [7] 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.
- [8] R. Luthander, J. Widén, D. Nilsson, and J. Palm, "Photovoltaic self-consumption in buildings: A review," *Applied Energy*, vol. 142. Elsevier Ltd, pp. 80–94, Mar. 05, 2015. doi: 10.1016/j.apenergy.2014.12.028.
- [9] M. N. Hussain, S. B. Qamar, I. Janajreh, and S. Zamzam, "Solar PV Implementation in Industrial Buildings: Economic Study," in *Proceedings of 2017 International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2017*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Sep. 2018. doi: 10.1109/IRSEC.2017.8477355.
- [10] A. J. Gil Mena, V. F. Nasimba Medina, A. Bouakkaz, and S. Haddad, "Analysis and optimisation of collective self-consumption in residential buildings in Spain," *Energy Build.*, vol. 283, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.112812.
- [11] Q. Hassan *et al.*, "Collective self-consumption of solar photovoltaic and batteries for a micro-grid energy system," *Results Eng.*, vol. 17, no. January, p. 100925, 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2023.100925.
- [12] G. Huang, "Missing data filling method based on linear interpolation and lightgbm," in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, Feb. 2021. doi: 10.1088/1742-6596/1754/1/012187.
- [13] N. M. Noor, M. M. Al Bakri Abdullah, A. S. Yahaya, and N. A. Ramli, "Comparison of linear interpolation method and mean method to replace the missing values in environmental data set," in *Materials Science Forum*, Trans Tech Publications Ltd, 2015, pp. 278–281. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.803.278.
- [14] T. Thien, T. Blank, B. Lunz, and D. U. Sauer, "Life Cycle Cost Calculation and Comparison for Different Reference Cases and Market Segments," in *Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing*, Elsevier Inc., 2015, pp. 437–452. doi: 10.1016/B978-0-444-62616-5.00021-8.