

**ANALISIS KINERJA DAN KELAYAKAN EKONOMI PLTS
ON-GRID UNTUK SPKLU DENGAN VARIASI *SOILING LOSS***

SKRIPSI

Oleh:

MAGDALENA MANULLANG

2215031055



JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

2026

**ANALISIS KINERJA DAN KELAYAKAN EKONOMI PLTS
ON-GRID UNTUK SPKLU DENGAN VARIASI *SOILING LOSS***

SKRIPSI

Oleh:

MAGDALENA MANULLANG

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

Pada

**Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG**

2026

ABSTRAK

ANALISIS KINERJA DAN KELAYAKAN EKONOMI PLTS *ON-GRID* UNTUK SPKLU DENGAN VARIASI *SOILING LOSS*

Oleh:

Magdalena Manullang

Pengaruh *soiling loss* terhadap kinerja dan kelayakan ekonomi sistem PLTS *On-Grid* untuk SPKLU dianalisis melalui skenario *No Cleaning* dan *With Cleaning*. Sistem dirancang menggunakan perangkat lunak PV Syst dengan kapasitas 5 kWp yang terdiri dari modul fotovoltaik 500 Wp dan inverter 5 kWac. Evaluasi kinerja sistem dilakukan menggunakan parameter *Performance Ratio* (PR), sedangkan analisis ekonomi meliputi *Net Present Value* (NPV), *Discounted Payback Period* (DPP), *Profitability Index* (PI), dan *Levelized Cost of Energy* (LCOE). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi *With Cleaning* memberikan performa sistem yang lebih baik dengan nilai PR sebesar 81% dibandingkan 80,1% pada kondisi *No Cleaning*. Dari aspek ekonomi, kondisi *No Cleaning* menghasilkan NPV sebesar Rp20.156.211, PI sebesar 1,24, DPP selama 14,27 tahun, dan LCOE sebesar Rp707,09/kWh, sedangkan kondisi *With Cleaning* menghasilkan NPV sebesar Rp21.519.808, PI sebesar 1,26, DPP selama 13,90 tahun, dan LCOE sebesar Rp698,87/kWh. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pembersihan modul surya secara berkala mampu mengurangi dampak *soiling loss* sehingga meningkatkan performa dan kelayakan ekonomi sistem PLTS *On-Grid* pada SPKLU.

Kata kunci: PLTS *On-Grid*, SPKLU, *Soiling Loss*, Kelayakan Ekonomi.

ABSTRACT

PERFORMANCE AND ECONOMIC FEASIBILITY ANALYSIS OF AN ON-GRID PHOTOVOLTAIC SYSTEM FOR ELECTRIC VEHICLE CHARGING STATIONS CONSIDERING SOILING LOSS VARIATIONS

By:

Magdalena Manullang

The effect of fouling losses on the performance and economic feasibility of an On-Grid Solar Power Plant (PLTS) system for EVCS is analyzed through scenarios Without Cleaning and *With Cleaning*. This system is designed using PVSyst software with a capacity of 5 kWp consisting of 500 Wp photovoltaic modules and a 5 kWac inverter. System performance evaluation is carried out using the Performance Ratio (PR) parameter, while the economic analysis includes Net Present Value (NPV), Discounted Payback Period (DPP), Profitability Index (PI), and Average Cost of Energy (LCOE). The results show that the *With Cleaning* condition provides better system performance with a PR value of 81% compared to 80.1% in the *No Cleaning* condition. From the economic aspect, the condition Without Cleaning produces an NPV of Rp20,156,211, PI of 1.24, DPP of 14.27 years, and LCOE of Rp707.09/kWh, while the condition *With Cleaning* produces an NPV of Rp21,519,808, PI of 1.26, DPP of 13.90 years, and LCOE of Rp698.87/kWh. These results indicate that regular cleaning of solar modules can reduce the impact of losses due to dirt, thereby improving the performance and economic feasibility of the On-Grid PLTS system at EVCS.

Key Words: PLTS On-Grid, EVCS, Soiling Loss, Economic Feasibility

Judul Skripsi

**: ANALISIS KINERJA DAN KELAYAKAN
EKONOMI PLTS *ON-GRID* UNTUK SPKLU
DENGAN VARIASI *SOILING LOSS***

Nama Mahasiswa

: Magdalena Manullang

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2215031055

Jurusan

: Teknik Elektro

Fakultas

: Teknik



MENYETUJUI
1. Komisi Pembimbing

Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T., I.P.M.
NIP. 19710813 199903 1 003

Ir. Ubaidah, M.T.
NIP. 19951122 202321 2 036

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

1. Tim Penguji

Ketua

: Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T., I.P.M.



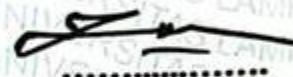
Sekretaris

: Ir. Ubaidah, M.T.



Penguji

Bukan Pembimbing : Zulmiftah Huda, S.T., M.Eng.



2. Dekan Fakultas Teknik



Dra. Hj. Ahmad Herison, S.T., M.T.

NIP. 19691030 200003 1 001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 22 Mei 2026

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, 10 Juni 2026



Handwritten signature of Magdalena Manullang.

Magdalena Manullang

NPM 2215031055

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Magdalena Manullang, lahir di Lumbanjulu pada tanggal 31 Juli 2003, merupakan anak keempat dari enam bersaudara dari pasangan Bapak Lambok Manullang dan Ibu Lamtiar Siahaan. Penulis menempuh pendidikan dasar di SD N 177657 Siabal-abal dan lulus pada tahun 2015, kemudian melanjutkan pendidikan di SMP N 1 Sipahutar dan lulus pada tahun 2018, serta menyelesaikan pendidikan menengah atas di SMA N 1 Sipahutar pada tahun 2021. Saat ini penulis sedang menempuh pendidikan di Universitas Lampung sejak tahun 2022 melalui jalur UTBK/SBMPTN. Selama masa perkuliahan, penulis aktif dalam kegiatan akademik dan organisasi, di antaranya sebagai Asisten Laboratorium Sistem Tenaga Listrik pada tahun 2024 yang berperan sebagai asisten dosen pada mata kuliah Menggambar Teknik serta asisten praktikum Analisa Sistem Tenaga pada tahun 2025. Penulis juga aktif dalam Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro sebagai anggota Departemen Komunikasi dan Informasi pada Divisi Media Informasi tahun 2023 serta sebagai anggota Hubungan Masyarakat pada tahun 2024. Selain itu, penulis telah melaksanakan kegiatan magang di PT Semen Baturaja Tbk, Baturaja selama 30 hari dengan judul tugas akhir **“PERENCANAAN PENGGANTIAN DAN SETTING RELAI PROTEKSI DARI SEPAM 1000 KE SIPROTEC 4 PADA FEEDER IDF B DI PT SEMEN BATURAJA TBK.”**

SKRIPSI INI PENULIS PERSEMBAHKAN

Dengan Penuh Kasih Dan Rasa Syukur

Kepada Orang Tua Tersayang

LAMBOK MANULLANG & LAMTIAR SIAHAAN

Kepada Kakak Perempuan Terbaik

**PANOGU MANULLANG & WINDA TETTY
AGUSTINA MANULLANG**

Kepada Abang Tercinta

ROY M. MANULLANG

Dan Kepada Adik-Adik Yang Penulis Kasih

**JULIWATI MANULLANG & GIO MARSEL
MANULLANG**

**“Semoga Segala Pencapaian Ini Menjadi Berkat Dan
Kebanggaan Bagi Keluarga Tercinta”**

MOTTO

*"Nobody Knows How Much You've Cried, But God Does.
You Will Overcome This Because God Is With You In Your
Battle"*

-Psalm 34:17-18

QUOTES

*"Never Feel That Things Are Happening Too Fast or Too
Slow, Because There Is Always the Right Time for Everyone."*

-Jennie Kim

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan anugerah-Nya, penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Tugas Akhir dengan Judul “Analisis Kinerja Dan Kelayakan Ekonomi PLTS *On-Grid* Untuk SPKLU Dengan Variasi *Soiling Loss*” merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Dalam penyusunan Tugas Akhir ini, penulis banyak mendapatkan bantuan, pengarahan dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya 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.T., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Ibu Herlinawati, S.T., MT., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.
4. Bapak Sumadi, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Universitas Lampung.
5. Bapak Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T., IPM selaku Dosen Pembimbing Utama yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberikan bimbingan, arahan, serta masukan yang sangat berharga kepada penulis selama proses penyusunan skripsi ini.

6. Ibu Ubaidah, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Pendamping yang telah memberikan bimbingan, dukungan, serta saran yang membangun sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik.
7. Bapak Zulmiftah Huda, S.T., M.Eng., selaku Dosen Penguji yang telah memberikan kritik, saran, dan masukan yang sangat berarti dalam penyempurnaan skripsi ini.
8. Bapak Dr. Eng., Ir. Khairudin, S.T., M.Sc. selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah memberikan bimbingan, arahan, serta motivasi kepada penulis selama masa perkuliahan.
9. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Elektro yang telah memberikan ilmu, bimbingan, dan pengalaman yang sangat berharga selama masa perkuliahan, sehingga penulis dapat menyelesaikan pendidikan dan penyusunan skripsi ini dengan baik.
10. Bapak dan Ibu Dosen Laboratorium Sistem Tenaga Listrik serta Bapak Rahman yang telah memberikan dukungan, bimbingan, dan fasilitas kepada penulis.
11. Staff Administrasi Jurusan Teknik Elektro dan Fakultas Teknik, Universitas Lampung yang telah membantu, memberikan pelayanan, serta mendukung kelancaran administrasi penulis selama masa perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini.
12. Orang tua tercinta Lambok Manullang & Lamtiar Siahaan, kakak laki-laki tersayang Roy M. Manullang dan Adik-adik terkasih Juliwati Manullang dan Gio Marsel Manullang terima kasih atas doa yang tak pernah terputus, kasih yang tak pernah berkurang, nasihat yang menuntun dan menguatkan di setiap proses kehidupan penulis.
13. Terkhusus kakak perempuan tercinta, Panogu Manullang dan Winda Tetty Agustina Manullang, yang sangat berjasa dalam setiap langkah penulis, yang senantiasa memberikan doa, dukungan, dan pengorbanan yang tidak ternilai.

14. Tokoh inspiratif, yaitu Jennie Kim dan Harry Styles yang melalui karya lagu dan perjalanan mereka telah memberikan motivasi, semangat, serta inspirasi bagi penulis.
15. Sahabat penulis, yaitu Intan, Yesika, Vero, dan Meliana yang telah setia menemani, memberikan semangat, serta menghadirkan canda dan tawa, sehingga dapat kebersamai penulis dalam setiap proses penyusunan skripsi ini.
16. Sahabat SMA penulis, yaitu Imel dan Jelliana yang telah setia memberikan semangat, motivasi dan menjadi pendengar yang baik sehingga dapat kebersamai penulis dalam setiap proses penyusunan skripsi ini.
17. Teman-teman Kelas TE-D yang telah kebersamai penulis, memberikan dukungan, serta semangat selama masa perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini.
18. Keluarga Besar Laboratorium Sistem Tenaga Listrik yang telah kebersamai penulis dalam proses pembelajaran, memberikan pengalaman, kebersamaan, dan dukungan kepada penulis.
19. Keluarga Besar Angkatan 2022 & HIMATRO UNILA yang telah kebersamai penulis dalam setiap proses perkuliahan, memberikan kebersamaan, dan dukungan kepada penulis.
20. Terima kasih kepada diri sendiri, Magdalena Manullang, yang telah berjuang melalui setiap proses, bertahan dalam berbagai tantangan, serta tetap melangkah meskipun dalam keadaan lelah dan tidak mudah. Terima kasih karena tidak menyerah, tetap percaya, dan terus berusaha hingga akhirnya dapat menyelesaikan skripsi ini. Dalam setiap proses yang dilalui, penulis percaya bahwa Tuhan selalu menyertai, menguatkan, dan memberikan jalan di setiap kesulitan. Semua pengalaman yang telah dilewati menjadi pembelajaran yang berharga dalam kehidupan, dan semoga pencapaian ini menjadi langkah awal untuk perjalanan yang lebih baik ke depannya.

Adapun skripsi ini disadari oleh penulis masih mempunyai banyak kekurangan dari segi penulisan ataupun penyusunan kata. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari para pembaca guna perbaikan di masa mendatang. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis dan bagi para pembaca,

Bandar Lampung, 10 Juni 2026

Magdalena Manullang

DAFTAR ISI

ABSTRAK	iv
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xviii
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
1.6 Hipotesis.....	3
1.7 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Terdahulu	5
2.2 Kendaraan Listrik (<i>Electric Vehicle</i>)	8
2.2.1 <i>Battery</i> EV (BEV).....	9
2.2.2 Spesifikasi Kendaraan Listrik.....	10
2.3 Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik (<i>Electric Vehicle Charging Station</i>) ..	11
2.3.1 <i>AC Charging</i> (Pengisian Arus Bolak-Balik).....	11
2.3.2 <i>DC Charging</i> (Pengisian Arus Searah / <i>Fast Charging</i>).....	12
2.4 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)	12
2.4.1 PLTS <i>On-Grid</i>	13
2.4.2 PLTS <i>Off-Grid</i>	14
2.4.3 PLTS <i>Hybrid</i>	14
2.5 Komponen Sistem PLTS	15
2.5.1 Modul Surya	15

2.5.2 Inverter.....	17
2.5.3 Kwh <i>Exim</i>	18
2.6 Faktor-Faktor Kinerja PLTS.....	19
2.6.1 Iradiasi	19
2.6.2 Temperatur	20
2.6.3 Sudut Orientasi	20
2.6.4 Bayangan (<i>Shading</i>).....	21
2.7 <i>Soiling</i> pada Sistem Fotovoltaik.....	22
2.7.1 Faktor yang Mempengaruhi Terjadinya <i>Soiling</i>	23
2.7.2 Dampak <i>Soiling</i> terhadap Kinerja Modul Surya.....	25
BAB III METODE PENELITIAN	30
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	30
3.2 Alat dan Bahan	31
3.3 Tahapan Penelitian.....	31
3.4 Diagram Alir Penelitian.....	33
3.5 Analisis Kelayakan Teknis.....	34
3.5.1 Menghitung Rata-Rata Waktu Penyinaran Matahari	34
3.5.2 Pemilihan Panel Surya (<i>PV Module</i>).....	35
3.5.3 Menghitung Kapasitas <i>Array</i> Panel Surya.....	35
3.5.4 Menghitung Jumlah Modul Panel Surya	35
3.5.5 Menghitung Luas Area Efektif	36
3.5.6 Konfigurasi Modul Panel Surya	36
3.5.7 Menentukan Kapasitas Daya Inverter.....	37
3.5.8 Skema PLTS <i>On-Grid</i>	38
3.5.9 Menghitung Evaluasi Kinerja PLTS	38
3.6 Analisis Kelayakan Ekonomi	39
3.6.1 Biaya Investasi Awal (<i>Capital Expenditure</i>).....	39
3.6.2 Biaya Operasional dan Pemeliharaan (<i>O&M Cost</i>).....	39
3.6.3 Biaya Siklus Hidup (<i>Life Cycle Cost</i>).....	40
3.6.4 Biaya <i>Levelized Cost of Energy</i> (LCOE).....	40
3.6.6 <i>Discounted Payback Period</i> (DPP).....	42
3.6.7 <i>Profitability Index</i> (PI).....	43
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	44
4.1 Lokasi Pemasangan PLTS	44

4.2	Kebutuhan Energi dan Profil Beban SPKLU	45
4.3	Data Iradiasi Matahari dan Suhu	48
4.4	Analisis Kelayakan Teknis.....	49
4.4.1	Rata-Rata Waktu Penyinaran Matahari.....	49
4.4.2	Pemilihan Komponen Panel Surya (<i>PV Module</i>)	49
4.4.3	Pemilihan Komponen Inverter.....	50
4.4.4	Menghitung Kapasitas <i>Array</i> Panel Surya (<i>Watt-Peak</i>).....	52
4.4.5	Menghitung Jumlah Modul Surya	53
4.4.6	Menghitung Luas Area.....	53
4.4.7	Menentukan Konfigurasi Panel Surya	54
4.4.8	Menentukan Kapasitas Inverter	56
4.4.9	Desain Sistem PLTS <i>On-Grid</i> Menggunakan <i>Software</i> PVSyst.....	57
4.4.10	Pengaruh Skenario <i>No Cleaning</i> dan <i>With Cleaning</i> terhadap Kinerja	58
4.4.11	Analisis Potensi Energi	62
4.5	Analisis Kelayakan Ekonomis.....	92
4.5.1	Menghitung Biaya Investasi Awal (<i>CAPEX</i>)	92
4.5.2	Menghitung Biaya Operasional dan Pemeliharaan (<i>O&M Cost</i>)	94
4.5.3	Menghitung Biaya Siklus Hidup (<i>Life Cycle Cost</i>)	95
4.5.4	Menghitung Biaya <i>Levelized Cost of Energy</i> (<i>LCOE</i>)	126
4.5.5	Menghitung <i>Net Present Value</i> (<i>NPV</i>).....	126
4.5.6	Menghitung <i>Discounted Payback Period</i> (<i>DPP</i>).....	127
4.5.7	Menghitung <i>Profitability Index</i> (<i>PI</i>)	128
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	134
5.1	Kesimpulan.....	134
5.2	Saran	135
DAFTAR PUSTAKA.....		136
LAMPIRAN.....		140

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Battery Electric Vehicle (BEV).....	9
Gambar 2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS).....	13
Gambar 2.3 Sistem PLTS <i>On Grid</i>	13
Gambar 2.4 Sistem PLTS <i>Off Grid</i>	14
Gambar 2.5 Sistem PLTS <i>Hybrid</i>	15
Gambar 2.6 Prinsip Kerja Modul Surya.....	15
Gambar 2.7 Monocrystalline Silicon	16
Gambar 2.8 Inverter	17
Gambar 2.9 Kwh Exim	18
Gambar 2.10 Iradiasi Matahari	19
Gambar 2.11 Sudut Orientasi.....	21
Gambar 2.12 Bayangan (Shading).....	22
Gambar 2.13 Faktor yang mempengaruhi terjadinya Soiling	23
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	33
Gambar 3.2 Skema PLTS <i>On-Grid</i>	38
Gambar 4.1 Atap Gedung Student Corner Universitas Lampung.....	44
Gambar 4.2 Kebutuhan Energi.....	47
Gambar 4.3 Parameter PLTS On-Grid Menggunakan PVSyst	57
Gambar 4. 4 Loss Diagram No Cleaning 1 Beban.....	59
Gambar 4.5 Loss Diagram With Cleaning.....	61
Gambar 4.6 Grafik Pengaruh Faktor Soiling terhadap Energi PV Pada No Cleaning	70
Gambar 4.7 Grafik Pengaruh Faktor Soiling terhadap Energi PV Pada With Cleaning	71
Gambar 4.8 Grafik <i>Output</i> Total Energi PLTS <i>No Cleaning</i> 1 Beban.....	75
Gambar 4.9 Grafik Output Total Energi PLTS With Cleaning 1 Beban	77

Gambar 4.10 Grafik Output Total Energi PLTS No Cleaning 3 Beban	78
Gambar 4.11 Grafik Output Total Energi PLTS With Cleaning 3 Beban	79
Gambar 4.12 Grafik Output Total Energi Yang Dikonsumsi Pada No Cleaning Untuk 1 Beban.....	81
Gambar 4.13 Grafik Output Total Energi Yang Dikonsumsi Pada With Cleaning Untuk 1 Beban.....	82
Gambar 4.14 Grafik Output Total Energi Yang Dikonsumsi Pada No Cleaning Untuk 3 Beban.....	84
Gambar 4.15 Grafik Output Total Energi Yang Dikonsumsi Pada With Cleaning Untuk 3 Beban.....	85
Gambar 4.16 Performance Ratio No Cleaning 1 Beban	87
Gambar 4.17 Performance Ratio With Cleaning 1 Beban	88
Gambar 4.18 Performance Ratio No Cleaning 3 Beban	90
Gambar 4.19 Performance Ratio With Cleaning 3 Beban	91
Gambar 4.20 Grafik Analisis Kelayakan Ekonomi PLTS.....	131
Gambar 4.21 Skema Net billing Pada Sistem PLTS On-Grid Untuk SPKLU (Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum).....	132

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Spesifikasi Mobil Listrik.....	11
Tabel 3.1 Jadwal Penelitian.....	32
Tabel 4.1 Parameter Wuling Air EV varian Long Range Sebagai Beban	45
Tabel 4.2 Kebutuhan Energi.....	46
Tabel 4.3 Data Iradiasi Matahari dan Suhu.....	48
Tabel 4.4 Spesifikasi Modul Panel Surya	50
Tabel 4.5 Spesifikasi Inverter.....	51
Tabel 4.6 Data <i>Soiling Loss No Cleaning & With Cleaning</i>	58
Tabel 4.7 Analisis Potensi Energi PLTS pada Sistem <i>No Cleaning</i> untuk 1 Beban	63
Tabel 4.8 Analisis Potensi Energi PLTS pada Sistem <i>With Cleaning</i> untuk 1 Beban	65
Tabel 4.9 Analisis Potensi Energi PLTS pada Sistem <i>No Cleaning</i> untuk 3 Beban	67
Tabel 4.10 Analisis Potensi Energi PLTS pada Sistem <i>With Cleaning</i> untuk 3 Beban	69
Tabel 4.11 Keterangan Point Pada Output PVSyst	73
Tabel 4.12 Data Iradiasi Matahari (W/m^2).....	74
Tabel 4.13 Biaya Investasi Awal	92
Tabel 4.14 Analisis Kelayakan Ekonomi <i>No Cleaning</i> 1 Beban FIT 100%	96
Tabel 4.15 Analisis Kelayakan Ekonomi <i>No Cleaning</i> 1 Beban FIT 65%	98
Tabel 4.16 Analisis Kelayakan Ekonomi <i>With Cleaning</i> 1 Beban FIT 100%.....	101
Tabel 4.17 Analisis Kelayakan Ekonomi <i>With Cleaning</i> 1 Beban FIT 65%.....	103
Tabel 4.18 Analisis Kelayakan Ekonomi <i>No Cleaning</i> 3 Beban FIT 100%	106
Tabel 4.19 Analisis Kelayakan Ekonomi <i>No Cleaning</i> 3 Beban FIT 65%	108
Tabel 4.20 Analisis Kelayakan Ekonomi <i>With Cleaning</i> 3 Beban FIT 100%.....	121

Tabel 4.21 Analisis Kelayakan Ekonomi <i>With Cleaning</i> 3 Beban FIT 65%.....	123
Tabel 4.22 Parameter Analisis Ekonomi PLTS	129
Tabel 4.23 Analisis Kelayakan Ekonomi PLTS	130

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Transisi menuju energi terbarukan menjadi salah satu upaya penting dalam mengurangi dampak perubahan iklim dan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Salah satu sektor yang mengalami perkembangan pesat dalam mendukung transisi tersebut adalah sektor transportasi, ditandai dengan meningkatnya penggunaan kendaraan listrik (*Electric Vehicle / EV*). Kendaraan listrik dinilai lebih ramah lingkungan karena mampu mengurangi emisi gas rumah kaca dan konsumsi energi berbasis fosil. Seiring dengan peningkatan jumlah kendaraan listrik, kebutuhan infrastruktur pengisian daya juga semakin meningkat, khususnya Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU)[1].

Salah satu sumber energi terbarukan yang berpotensi mendukung kebutuhan energi SPKLU adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *On-Grid*. Sistem ini terhubung langsung dengan jaringan listrik PLN sehingga energi listrik yang dihasilkan dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban maupun diekspor ke jaringan ketika terjadi kelebihan daya[2]. Selain ramah lingkungan, PLTS *On-Grid* juga mampu meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi surya dan mengurangi konsumsi energi listrik konvensional.

Meskipun demikian, performa sistem PLTS dipengaruhi oleh beberapa faktor eksternal, salah satunya adalah *soiling loss*. Besarnya pengaruh *soiling loss* sangat dipengaruhi oleh kondisi geografis dan iklim suatu wilayah. Di Indonesia yang beriklim tropis dengan curah hujan tinggi, pengaruh *soiling* dapat berbeda antara musim hujan dan musim kemarau sehingga memengaruhi tingkat akumulasi debu

pada modul fotovoltaik. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa *soiling loss* tahunan dapat mencapai sekitar 4–7% pada wilayah perkotaan dengan tingkat polusi rendah hingga sedang, bahkan dapat lebih tinggi pada wilayah dengan tingkat polusi tinggi atau musim kemarau panjang[3]. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa analisis mengenai pengaruh *soiling* terhadap kinerja PLTS sangat penting dilakukan untuk mengoptimalkan pemanfaatan energi surya khususnya pada sistem PLTS yang terintegrasi dengan SPKLU.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kinerja dan kelayakan ekonomi sistem PLTS *On-Grid* sebagai sumber energi SPKLU dengan mempertimbangkan variasi *soiling loss* pada kondisi *No Cleaning* dan *With Cleaning*. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai pengaruh *soiling loss* terhadap produksi energi, performa sistem, dan kelayakan ekonomi PLTS *On-Grid* dalam mendukung kebutuhan energi SPKLU.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana perancangan sistem PLTS *On-Grid* sebagai sumber energi untuk SPKLU yang dipengaruhi oleh *soiling loss*?
2. Bagaimana pengaruh skenario *soiling loss* terhadap kinerja PLTS *On-Grid* pada skenario *No Cleaning* dan *With Cleaning*?
3. Bagaimana aspek ekonomi dari penerapan sistem PLTS *On-Grid* dalam memenuhi kebutuhan energi SPKLU pada masing-masing skenario *soiling*?

1.3 Tujuan Penelitian

Sesuai dengan rumusan masalah di atas, tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Merancang sistem PLTS *On-Grid* sebagai sumber energi SPKLU yang dipengaruhi *soiling loss*
2. Menganalisis kinerja PLTS pada skenario *Soiling* yaitu *No Cleaning* dan *With Cleaning* untuk mengetahui dampak akumulasi debu.
3. Menganalisis aspek ekonomis terhadap PLTS *On-Grid* hasil desain dalam memenuhi kebutuhan energi SPKLU pada tiap skenario *soiling*.

1.4 Batasan Masalah

Untuk menjaga agar penelitian tetap fokus, penelitian ini memiliki batasan masalah sebagai berikut:

1. Sistem yang dikaji adalah PLTS *On-Grid* tanpa sistem penyimpanan energi (baterai) dan terhubung langsung dengan jaringan listrik PLN.
2. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak PVSystem dengan data meteorologi meteorologi untuk wilayah Bandar Lampung.
3. Skenario *soiling loss* disusun berdasarkan data sekunder dari jurnal dan literatur yang relevan, kemudian diadaptasi ke dalam skenario utama, yaitu *No Cleaning* dan *With Cleaning*.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Menambah referensi ilmiah mengenai analisis kinerja PLTS *On-Grid* yang terintegrasi dengan SPKLU, dengan mempertimbangkan pengaruh *soiling* terhadap produksi energi, serta analisis dampak ekonomi dan lingkungan.
2. Menambah referensi ilmiah terkait pengaruh *Soiling* terhadap kinerja PLTS *On-Grid* untuk aplikasi SPKLU.
3. Memberikan gambaran teknis dan ekonomi terkait potensi pemanfaatan PLTS *On-Grid* untuk mendukung SPKLU, serta menjadi pertimbangan dalam perencanaan infrastruktur pengisian kendaraan listrik yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

1.6 Hipotesis

Variasi *soiling loss* memengaruhi kinerja dan kelayakan ekonomi sistem PLTS *On-Grid*. Kondisi *No Cleaning* menyebabkan penurunan produksi energi dan performa sistem yang lebih besar dibandingkan kondisi *With Cleaning*. Sebaliknya, pembersihan modul surya secara berkala mampu menjaga performa sistem tetap optimal serta meningkatkan kelayakan ekonomi PLTS.

1.7 Sistematika Penulisan

Untuk mempermudah pemahaman terhadap isi penelitian, laporan skripsi ini disusun dengan sistematika sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, hipotesis, serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas teori-teori yang mendukung penelitian, meliputi konsep kendaraan listrik dan *Battery Electric Vehicle* (BEV), Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU), sistem PLTS *On-Grid* beserta komponen utamanya, faktor-faktor yang memengaruhi kinerja PLTS, konsep *soiling loss* pada modul fotovoltaik, serta penelitian terdahulu yang relevan.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan lokasi dan waktu penelitian, alat dan bahan yang digunakan, tahapan penelitian, perancangan sistem PLTS *On-Grid*, penyusunan skenario *soiling loss* dan profil beban SPKLU, konfigurasi simulasi menggunakan PVSyst, serta metode analisis kinerja dan kelayakan ekonomi sistem.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil perancangan dan simulasi sistem PLTS menggunakan PVSyst, analisis pengaruh *soiling loss* terhadap kinerja sistem dalam memenuhi kebutuhan energi SPKLU, serta analisis kelayakan ekonomi berdasarkan parameter yang telah ditentukan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini memuat kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian serta saran yang dapat digunakan sebagai bahan pengembangan penelitian selanjutnya maupun implementasi sistem PLTS *On-Grid* untuk SPKLU.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

a. Monitoring photovoltaic Soiling: assessment, challenges, and perspectives of current and potential strategies

(Joao Gabriel Bessa, Leonardo Micheli, Florencia Almonacid, and Eduardo F. Fernandez)

Studi komprehensif oleh Bessa et al. (2021) mengulas strategi pemantauan kinerja sistem fotovoltaik didukung oleh data empiris yang menunjukkan bahwa kerugian energi global akibat *Soiling* mencapai 3% hingga 4% pada tahun 2018, dengan estimasi kerugian finansial antara 3 hingga 5 miliar Euro. Secara spesifik pada aspek efisiensi, studi lapangan di wilayah dengan periode kering panjang mencatat penurunan daya instan yang dapat melebihi 20% akibat akumulasi debu. Lebih lanjut, analisis terhadap dampak ketidakmerataan (*non-uniformity*) *Soiling* mengungkapkan bahwa penutupan area modul sebesar 0,5% saja pada bagian tepi bawah dapat menyebabkan penurunan daya hingga 9%, yang membuktikan bahwa efisiensi sistem sangat sensitif terhadap pola distribusi kotoran. Dari sisi validitas instrumen pengukuran kinerja, perbandingan lapangan menunjukkan bahwa penggunaan *Soiling station* konvensional memiliki tingkat kesalahan estimasi sekitar 1%, sedangkan sensor optik (OSM) memiliki margin kesalahan sedikit lebih tinggi yaitu sekitar 2%, data ini menjadi acuan krusial dalam menentukan batas toleransi akurasi pada analisis efisiensi PLTS[4].

b. Quantification of PV Power and Economic Losses Due to Soiling in Qatar

(Amr Zeedan, Abdulaziz Barakeh, Khaled Al-Fakhroo, Farid Touati and Antonio S. P. Gonzales, Jr.)

Penelitian eksperimental yang dilakukan oleh Zeedan et al. (2021) di Qatar mengkaji degradasi kinerja modul fotovoltaik *poly-crystalline* akibat *Soiling* melalui pemantauan lapangan selama enam bulan tanpa mekanisme pembersihan. Dengan menerapkan algoritma pra-pemrosesan data khusus untuk mengisolasi variabel densitas debu dari fluktuasi iradiasi dan suhu, studi ini menemukan hubungan linier terbalik yang signifikan di mana paparan terhadap densitas debu rata-rata $0,7 \text{ mg/m}^3$ menyebabkan penurunan daya output (kinerja) sebesar 43%. Model regresi yang dihasilkan mengindikasikan bahwa setiap peningkatan densitas debu lingkungan sebesar 1 mg/m^3 berpotensi mereduksi daya sebesar 43,79 W (sekitar 62% dari kapasitas awal), yang jika diproyeksikan pada pembangkit skala besar (800 MW) dapat mengakibatkan kerugian efisiensi sebesar 10% dengan implikasi finansial mencapai 11.385 QAR/jam[5].

c. Impact of dust on the performance of solar photovoltaic (PV) systems under United Arab Emirates weather conditions

(Ahmed Amine Hachicha, Israa Al-Sawafta, Zafar Said)

Penelitian eksperimental yang dilakukan oleh Hachicha et al. (2019) di Uni Emirat Arab menginvestigasi dampak karakteristik debu terhadap degradasi parameter listrik modul fotovoltaik *polycrystalline* melalui pengujian terkontrol (*indoor*) dan lapangan (*outdoor*). Analisis kinerja *indoor* mengungkapkan hubungan linier yang signifikan di mana daya *output* ternormalisasi mengalami penurunan sebesar 1,7% untuk setiap 1 g/m^2 akumulasi debu, dengan parameter arus hubung singkat (I_{sc}) mengalami dampak paling parah yaitu penurunan 8,78% pada densitas debu 8 g/m^2 . Temuan ini divalidasi melalui studi lapangan jangka panjang selama lima bulan yang mencatat kerugian daya (*Soiling loss*) sebesar 12,7% akibat akumulasi debu mencapai $5,44 \text{ g/m}^2$, serta menyoroti pengaruh krusial sudut kemiringan terhadap efisiensi, di mana modul yang

dipasang mendatar (0°) mengalami penurunan efisiensi drastis hingga 37,63% dibandingkan modul dengan kemiringan 45° yang hanya mengalami penurunan 10,95% dalam periode paparan yang sama[2].

d. Performance analysis and planning of Self-Sufficient solar PV-Powered electric vehicle charging station in dusty conditions for sustainable transport

(Fahad Faraz Ahmad, Oussama Rejeb, Abdul Kadir Hamid, Maamar Bettayeb, Chaouki Ghenai)

Penelitian yang dilakukan oleh Ahmad et al. (2024) bertujuan untuk membangun dan menganalisis kinerja stasiun pengisian kendaraan listrik (EVCS) berbasis PLTS *off-grid* (mandiri) di Universitas Sharjah, Uni Emirat Arab, guna memenuhi kebutuhan beban kendaraan listrik operasional kampus. Studi ini mengevaluasi sistem dengan kapasitas PV 7,4 kWp dan penyimpanan baterai 34,56 kWh selama satu tahun, yang menghasilkan total energi sebesar 2.971,59 kWh, di mana mayoritas energi (87,09%) disimpan ke dalam baterai untuk menunjang konsumsi beban. Temuan krusial dari penelitian ini berfokus pada dampak lingkungan ekstrem, di mana eksperimen akumulasi debu alami selama 218 hari tanpa pembersihan menyebabkan degradasi *Performance Ratio* (PR) secara linear yang signifikan dari 77,92% menjadi 27,30%, yang menegaskan bahwa pembersihan berkala adalah faktor vital untuk mempertahankan efisiensi sistem PLTS pada kondisi berdebu[6].

e. Analysis of Soiling Loss in Photovoltaic Modules: A Review of the Impact of Atmospheric Parameters, Soil Properties, and Mitigation Approaches

(Pankaj Borah, Leonardo Micheli and Nabin Sarmah)

Studi literatur komprehensif yang dilakukan oleh Borah et al. (2023) mengevaluasi dampak parameter atmosfer dan properti debu terhadap kerugian daya (*Soiling loss*), yang diestimasi menyebabkan kehilangan hasil energi global sebesar 4% hingga 7%. Tinjauan ini menyoroti variabilitas kinerja berdasarkan

lokasi dan durasi paparan, di mana degradasi efisiensi dapat mencapai 7% per bulan di wilayah gurun, serta penurunan daya rata-rata sebesar 14,3% setelah dua bulan paparan tanpa pembersihan. Lebih lanjut, analisis terhadap konfigurasi sistem menunjukkan dampak signifikan sudut kemiringan terhadap efisiensi, di mana instalasi mendatar (0°) mengalami kerugian energi hingga 33,5%, jauh lebih tinggi dibandingkan kemiringan 25° yang hanya mengalami kerugian 14,5%, data yang menegaskan pentingnya optimasi sudut dan analisis faktor lingkungan lokal seperti curah hujan dalam studi kinerja PLTS[7].

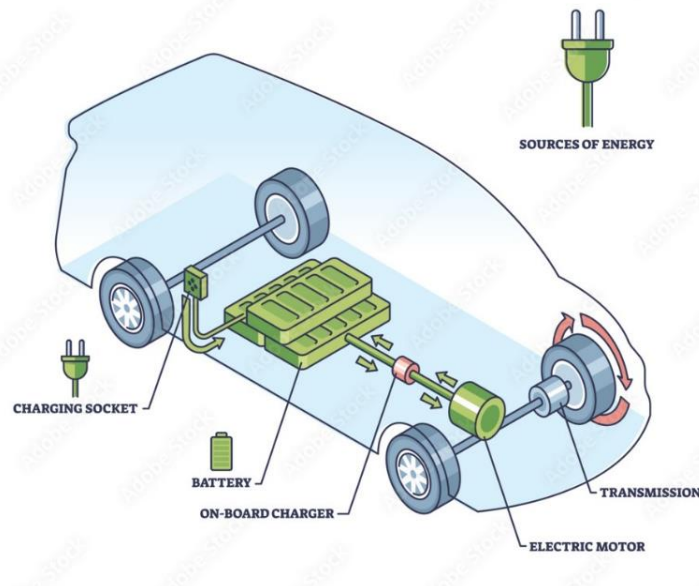
2.2 Kendaraan Listrik (*Electric Vehicle*)

Kendaraan listrik (*Electric Vehicle/EV*) merupakan kendaraan yang menggunakan motor listrik sebagai penggerak utama dengan sumber energi berasal dari baterai. Penggunaan kendaraan listrik terus meningkat karena dinilai lebih ramah lingkungan dan mampu mengurangi emisi gas rumah kaca dibandingkan kendaraan berbahan bakar fosil. Dalam penelitian ini, kendaraan listrik digunakan sebagai profil beban pada sistem SPKLU yang terintegrasi dengan PLTS On-Grid[8]. Berbeda dengan kendaraan konvensional yang bergantung sepenuhnya pada mesin pembakaran internal (*Internal Combustion Engine - ICE*) yang membakar bahan bakar fosil, EV memanfaatkan energi listrik yang disimpan dalam media penyimpanan energi (baterai) atau dihasilkan secara langsung (sel bahan bakar) untuk menghasilkan energi mekanik. Kendaraan listrik menawarkan efisiensi konversi energi yang jauh lebih tinggi dibandingkan kendaraan ICE dan memiliki potensi untuk mengurangi emisi gas rumah kaca secara signifikan, terutama jika sumber listrik yang digunakan berasal dari energi terbarukan seperti PLTS[9].

Secara umum, teknologi kendaraan listrik diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori berdasarkan sumber energinya, yaitu *Hybrid Electric Vehicle* (HEV), *Plug-in Hybrid Electric Vehicle* (PHEV), *Fuel Cell Electric Vehicle* (FCEV), dan *Battery Electric Vehicle* (BEV)[10]. Di antara berbagai jenis teknologi tersebut, *Battery Electric Vehicle* (BEV) merupakan kategori yang paling mengalami pertumbuhan signifikan dalam pasar kendaraan listrik nasional saat ini.

2.2.1 Battery EV (BEV)

Kendaraan listrik baterai (BEV), juga dikenal sebagai mobil listrik murni, adalah jenis kendaraan yang sepenuhnya menggunakan baterai untuk menyimpan energi listrik yang diperlukan untuk menggerakkan motor listrik[11]. BEV tidak memiliki mesin pembakaran internal (ICE), tangki bensin, maupun pipa knalpot. Seluruh tenaga penggerak diperoleh dari energi listrik yang disimpan dalam paket baterai berkapasitas besar (*traction battery pack*). BEV tipikal akan mencapai 160 hingga 250 km, meskipun beberapa di antaranya dapat menempuh jarak sejauh 500 km hanya dengan sekali pengisian daya. Keterbatasan jarak tempuh inilah yang menjadikan ketersediaan infrastruktur pengisian daya (SPKLU) sebagai faktor krusial untuk mendukung operasional BEV sehari-hari.



Gambar 2.1 *Battery Electric Vehicle* (BEV)

(Sumber: <https://www.montgomerycountymd.gov/DEP/energy/zev/why-drive-electric.html>)

Berdasarkan Gambar 2.1, struktur dasar dari *Battery Electric Vehicle* (BEV) memiliki arsitektur yang jauh lebih sederhana dibandingkan kendaraan konvensional karena tidak memiliki mesin pembakaran internal. Sistem ini berpusat pada aliran energi listrik dari sumber eksternal menuju penyimpanan (baterai) dan kemudian dikonversi menjadi gerak.

Berikut adalah fungsi dari setiap komponen utama:

1. *Sources of Energy & Charging Socket* adalah titik antarmuka fisik antara kendaraan dan infrastruktur luar. Energi listrik disuplai dari jaringan PLN atau sistem terbarukan seperti PLTS melalui kabel yang terhubung ke soket pengisian (*charging socket*) kendaraan. Komponen ini berfungsi sebagai gerbang masuknya energi listrik ke dalam sistem kendaraan.
2. *On-Board Charger* (OBC) sangat krusial dalam proses pengisian daya menggunakan arus bolak-balik (AC), seperti yang digunakan pada instalasi rumah atau SPKLU Level 2. Karena baterai hanya dapat menyimpan listrik arus searah (DC), *On-Board Charger* berfungsi sebagai penyearah yang mengonversi arus AC dari soket pengisian menjadi arus DC sebelum masuk ke dalam baterai.
3. *Battery* terletak di bagian bawah sasis untuk stabilitas, komponen ini adalah tangki bahan bakar bagi kendaraan listrik. Baterai (umumnya *Lithium-Ion* atau LFP) berfungsi menyimpan energi listrik dalam bentuk kimia (DC) dan menyuplainya ke motor listrik saat kendaraan beroperasi. Kapasitas baterai (dalam kWh) menentukan jarak tempuh maksimal kendaraan.
4. *Electric Motor* berfungsi menggantikan mesin pembakaran internal. Komponen ini menerima energi listrik dari baterai dan mengubahnya menjadi energi mekanik (putaran). Keunggulan utama motor listrik adalah efisiensinya yang tinggi dan kemampuannya menghasilkan torsi instan tanpa perlu menunggu putaran mesin tinggi.
5. *Transmission* berbeda dengan mobil konvensional yang membutuhkan banyak gigi percepatan, motor listrik memiliki rentang putaran yang sangat luas dan efisien. Oleh karena itu, transmisi pada BEV biasanya hanya menggunakan *single-speed reduction gear* (gigi reduksi tunggal) untuk menyalurkan tenaga putar dari motor listrik ke roda kendaraan secara halus dan efisien.

2.2.2 Spesifikasi Kendaraan Listrik

Dalam penelitian ini, kendaraan listrik yang dijadikan acuan beban (*load profile*) untuk simulasi SPKLU adalah Wuling Air EV, khususnya varian *Long Range*. Pemilihan model ini didasarkan pada popularitasnya yang tinggi di pasar kendaraan

listrik Indonesia serta karakteristik teknisnya yang representatif untuk penggunaan dalam kota (*city car*). Sebagai kendaraan jenis *Battery Electric Vehicle* (BEV) murni, Wuling Air EV bergantung sepenuhnya pada energi listrik yang tersimpan dalam baterai untuk operasionalnya.

Tabel 2.1 Spesifikasi Mobil Listrik

Wuling Air EV	<i>Max Speed</i>	100 km/h	
	<i>Range</i>	200-300 km	
<i>Battery Unit</i>	<i>Battery spec.</i>	<i>Lithium Ferro-Phosphate, IP67 Rated</i>	
	<i>Quantity</i>	1	
	<i>System voltage</i>	115 V	
	<i>Battery bank capacity</i>	<i>Standard Range</i>	17.3 kWh (~150 Ah)
		<i>Long Range</i>	26.7 kWh (~232 Ah)
<i>Battery charger</i>	<i>Standard Range</i>	2.0 kW AC (pengisian ~8.5 jam)	
	<i>Long Range</i>	6.6 kW AC (pengisian ~4 jam)	
<i>Electric motor</i>	<i>Motor capacity</i>	30 kW (40 HP)	

2.3 Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik (*Electric Vehicle Charging Station*)

Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik (SPKL) atau *Electric Vehicle Charging Station* (EVCS) adalah fasilitas yang digunakan untuk mengisi ulang daya baterai kendaraan listrik seperti mobil listrik, sepeda motor listrik, dan kendaraan listrik lainnya. EVCS berfungsi sebagai sumber energi listrik bagi kendaraan listrik agar kendaraan tersebut dapat beroperasi dan menempuh jarak yang dibutuhkan[12].

Berdasarkan jenis arus listrik dan kecepatan transfer energinya, teknologi pengisian daya pada SPKLU diklasifikasikan menjadi dua kategori utama yaitu *AC Charging* dan *DC Charging*[13].

2.3.1 *AC Charging* (Pengisian Arus Bolak-Balik)

Mekanisme pengisian daya *AC Charging* melibatkan proses konversi arus bolak-balik (AC) dari jaringan listrik menjadi arus searah (DC) untuk disimpan dalam baterai, yang terjadi secara internal di dalam kendaraan menggunakan perangkat *On-Board Charger* (OBC), sehingga kecepatan pengisian dayanya sangat dibatasi

oleh kapasitas OBC tersebut. Metode ini diklasifikasikan ke dalam dua tingkatan, yaitu *Level 1 (Home Charging)* yang memanfaatkan stop kontak rumahan standar (220V) dengan daya < 2 kW dan durasi pengisian yang sangat lambat (8-16 jam), serta *Level 2 (Public/Wallbox Charging)* yang menggunakan peralatan khusus dengan daya lebih tinggi berkisar antara 7 kW hingga 22 kW, sehingga mampu mempersingkat waktu pengisian rata-rata menjadi 4 hingga 8 jam[14].

2.3.2 DC Charging (Pengisian Arus Searah / Fast Charging)

DC Charging merupakan teknologi pengisian yang menggunakan arus searah (*Direct Current*) dan melakukan konversi daya langsung di dalam unit SPKLU, bukan di dalam kendaraan [15]. Dengan demikian, energi listrik yang dikirim ke kendaraan sudah berformat DC dan dapat langsung masuk ke baterai tanpa melalui OBC. Karena sistem konversi dan pengendalian daya berada di luar kendaraan, DC Charging mampu memberikan daya jauh lebih besar, mulai dari 25 kW, 50 kW, 100 kW, hingga *ultra-fast charging* di atas 150–350 kW. Hal ini memungkinkan waktu pengisian yang jauh lebih singkat, biasanya mencapai 20–40 menit untuk 20–80%.

2.4 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya atau PLTS adalah sebuah sistem yang digunakan untuk mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik dengan menggunakan prinsip efek *photovoltaic*. *Photovoltaic* sendiri merupakan fenomena fisika yang terjadi pada permukaan sel surya (*solar cell*) ketika menerima cahaya matahari. Selanjutnya, cahaya yang diterima diubah menjadi energi listrik. Hal ini disebabkan karena adanya energi foton cahaya yang membebaskan elektron – elektron sehingga mengalir dalam sambungan semikonduktor tipe n dan p yang pada akhirnya menimbulkan arus listrik[16].

Variabilitas dan intermitensi dalam pembangkit tenaga surya menimbulkan tantangan yang signifikan bagi pemanfaatan luas sistem PV di jaringan listrik. Ketidakstabilan kondisi cuaca, terutama tutupan lapisan awan, memberikan pengaruh langsung terhadap penangkapan *Global Horizontal Irradiance* (GHI), sehingga memengaruhi kapasitas pembangkitan daya dari sistem PV surya[17].

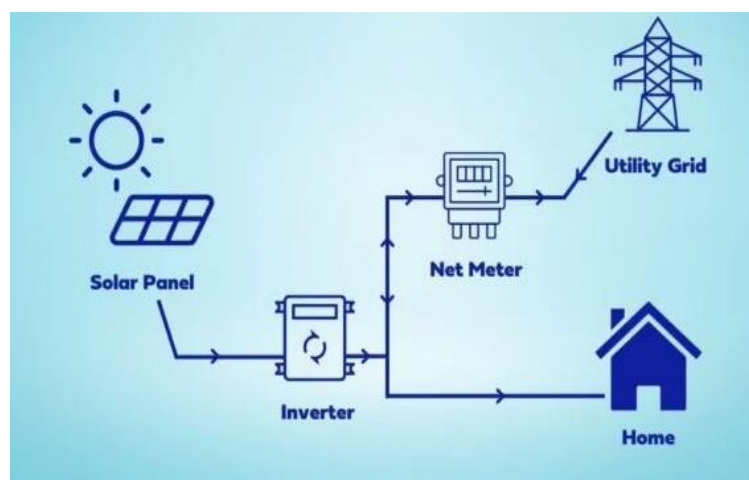


Gambar 2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)
(Sumber: <https://m.dekoruma.com/artikel/180745/properti-solar-panel-adalah>)

Energi Surya merupakan energi hijau yang andal dan ekonomis ditinjau dari sumber energi yang tersedia[18]. Ada 3 jenis Sistem PLTS yang biasa digunakan yaitu:

2.4.1 PLTS *On-Grid*

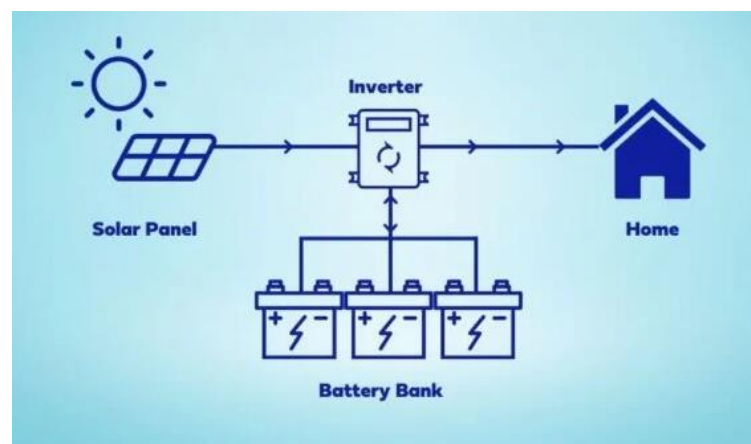
Sistem PLTS *On-Grid* menggunakan jaringan PLN serta mengoptimalkan pemanfaatan tenaga surya dalam menghasilkan arus listrik secara maksimal. Sistem ini dirancang untuk interkoneksi dengan jaringan listrik yang tersedia dalam kapasitas yang lebih kompleks terhadap beban sistem secara keseluruhannya. PLTS *On-Grid* dapat menyuplai daya yang berlebih pada jaringan sehingga beban tidak hanya menggunakan daya dari PLN[19].



Gambar 2.3 Sistem PLTS *On-Grid*
(Sumber: <https://nexusenergy.pk.com/>)

2.4.2 PLTS *Off-Grid*

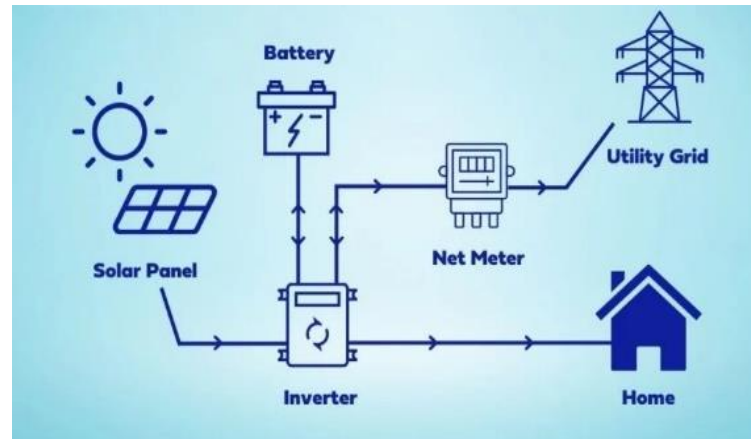
PLTS *off-grid* adalah sistem PLTS yang menggunakan baterai sebagai tempat penyimpanan listrik yang berasal dari PLTS sehingga digunakan saat listrik suplai daya PLN padam dan tidak tersambung dengan listrik PLN. Sistem PLTS ini biasa disebut dengan *Stand Alone PV System* merupakan suatu sistem pembangkit yang menggunakan energi surya sebagai sumber energi utama dengan menggunakan panel surya untuk mendapatkan energi listrik yang dapat disimpan pada baterai. Kebutuhan baterai memiliki fungsi sebagai penyimpan daya listrik yang didapatkan oleh PV *module* ketika memperoleh sinar matahari untuk menghasilkan daya[20].



Gambar 2.4 Sistem PLTS *Off Grid*
(Sumber: <https://nexusenergygpk.com/>)

2.4.3 PLTS *Hybrid*

PLTS *hybrid* menggabungkan energi surya dengan sumber daya lain seperti baterai atau *grid* listrik konvensional, menjadi pilihan yang relevan untuk memastikan ketersediaan energi yang stabil, dapat diandalkan, dan berkelanjutan[21]. PLTS *hybrid* merupakan penggabungan antara PLTS *On-Grid* dengan PLTS *off-grid*. Ketika kondisi normal, hasil daya pada PV module digunakan untuk baterai dan juga kebutuhan daya pada siang hari. Ketika malam hari suplai diperoleh dari baterai dan ketika baterai habis, PLN akan memasok energi ke jaringan listrik rumah.



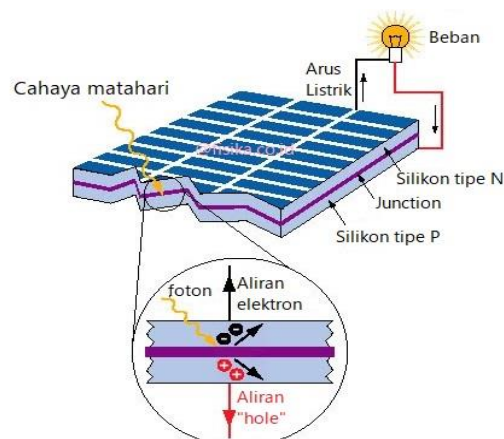
Gambar 2.5 Sistem PLTS *Hybrid*
(Sumber: <https://nexusenergy.pk/>)

2.5 Komponen Sistem PLTS

Sistem PLTS terdiri dari beberapa komponen inti yang bekerja bersama untuk mengubah energi matahari menjadi listrik. Komponen-komponen ini bisa sedikit berbeda tergantung pada jenis sistemnya (*On-Grid*, *Off-Grid*, atau *Hybrid*).

2.5.1 Modul Surya

Modul surya (*solar module* atau *photovoltaic module*) adalah perangkat yang berfungsi mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik dalam bentuk arus searah (DC) melalui fenomena efek *photovoltaic*. Modul surya terdiri dari rangkaian beberapa sel surya (*solar cells*) yang dihubungkan seri maupun paralel untuk menghasilkan tegangan dan arus sesuai kebutuhan aplikasi.

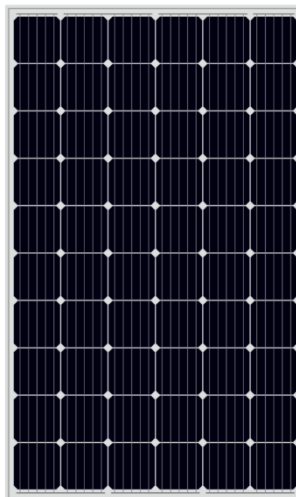


Gambar 2.6 Prinsip Kerja Modul Surya
(Sumber: <https://www.fisika.co.id/2020/11/pembangkit-listrik-tenaga-surya.html?m=1>)

Berdasarkan Gambar 2.6 Prinsip Kerja Modul Surya dengan mengubah cahaya matahari menjadi listrik melalui efek photovoltaic pada sambungan semikonduktor silikon tipe N dan tipe P (junction P-N). Saat foton dari cahaya matahari mengenai sel surya, elektron terlepas dan menghasilkan aliran elektron serta *hole*. Junction P-N kemudian memisahkan keduanya sehingga terbentuk beda tegangan. Ketika dihubungkan ke beban, elektron mengalir sebagai arus listrik dan menghasilkan energi listrik secara kontinu. Untuk memaksimalkan daya keluaran, digunakan modul jenis *Monocrystalline silicon*.

2.5.1.1 *Monocrystalline Silicon*

Jenis ini adalah yang paling efisien dan paling dikenal, sering dianggap sebagai teknologi generasi pertama. Panel monokristalin dibuat dari satu kristal silikon murni (*single-crystal silicon*) yang dipotong menjadi irisan tipis. Proses pembuatannya yang rumit menghasilkan sel dengan kemurnian tinggi, yang memberikan efisiensi konversi tertinggi (biasanya berkisar antara 15% hingga 20%)[22]. Secara visual, panel ini mudah dikenali dari warnanya yang hitam pekat seragam dan bentuk selnya yang memiliki potongan di sudut-sudutnya (karena dipotong dari silinder ingot silikon). Hal ini sangat relevan untuk optimalisasi lahan yang terbatas, seperti pada atap gedung atau *carport*.



Gambar 2.7 *Monocrystalline Silicon*

(Sumber: <https://c-tsolar.com/mono-crystal-photovoltaic-module/>)

2.5.2 Inverter

Inverter memiliki fungsi merubah arus listrik searah (*direct current*) yang dihasilkan oleh solar modul menjadi listrik arus bolak balik (*alternating current*) dan dikontrol kualitas dari daya listrik yang dikeluarkan untuk dikirim ke beban atau ke jaringan listrik[23]. Prinsip kerja inverter adalah mengonversi daya listrik arus searah (DC) yang dihasilkan modul fotovoltaik menjadi daya listrik arus bolak-balik (AC) pada tegangan dan frekuensi yang sesuai dengan jaringan atau beban. Panel surya akan menangkap cahaya matahari lalu dikirimkan ke baterai untuk tempat penyimpanan daya listrik dengan bantuan SSC dan di dalam baterai masih dilakukan tahap konversi yaitu dari energi kimia menjadi daya listrik DC yang kemudian disalurkan pada inverter lalu inverter mengkonversi daya listrik DC tersebut menjadi daya listrik AC untuk disalurkan pada beban yang ada.



Gambar 2.8 Inverter

(Sumber: <https://www.ebay.co.uk/p/3034039165>)

Di dalam inverter terdapat fitur penting yaitu *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) dan rasio DC/AC atau *sizing ratio*.

2.5.2.1 *Maximum Power Point Tracking* (MPPT)

Maximum Power Point Tracking (MPPT) adalah sebuah metode yang digunakan untuk mendapatkan nilai tegangan dan arus yang optimal sehingga didapat daya keluaran yang maksimal dari suatu panel surya. Daya keluaran yang maksimal ini akan menghasilkan rasio daya yang tinggi dan mengurangi rugi-rugi pada panel surya. MPPT memerlukan dua komponen pendukung dalam pengoperasiannya yaitu arus input (I) dan tegangan input (V)[24].

2.5.2.2 Rasio DC/AC atau *sizing ratio*

Rasio DC/AC menunjukkan perbandingan antara kapasitas total panel surya (DC) terhadap kapasitas inverter (AC)[25]. Umumnya rasio DC/AC sistem PLTS berkisar antara 1.1 sampai 1.3, tergantung lokasi dan karakteristik iradiasi. Pemilihan rasio DC/AC yang tepat sangat penting karena rasio terlalu rendah menyebabkan inverter tidak bekerja optimal dan rasio terlalu tinggi dapat menyebabkan *clipping*, tetapi sering digunakan untuk meningkatkan produksi energi harian di pagi dan sore hari.

2.5.3 Kwh *Exim*

kWh Meter Ekspor-Impor (Exim) adalah alat ukur dua arah yang digunakan pada sistem PLTS On-Grid untuk mencatat energi listrik yang diekspor ke dan diimpor dari jaringan PLN. Saat produksi listrik PLTS melebihi kebutuhan, energi akan diekspor ke PLN, sedangkan saat produksi kurang, listrik diimpor dari PLN. Penggunaan kWh Exim mendukung sistem net metering, mempermudah pengelolaan energi, serta meningkatkan efisiensi dan transparansi penggunaan listrik pada PLTS.



Gambar 2.9 Kwh *Exim*

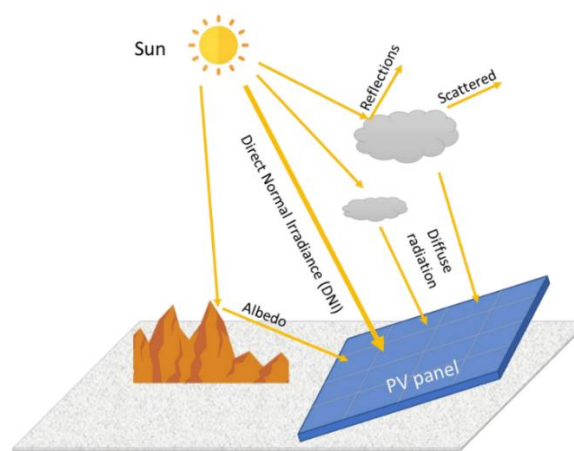
(Sumber: <https://integra-automa.indonetwork.co.id/product/kwh-meter-exim-export-import-3-fasa-4104275>)

2.6 Faktor-Faktor Kinerja PLTS

Faktor-faktor utama yang mempengaruhi kinerja PLTS adalah sebagai berikut, yaitu:

2.6.1 Iradiasi

Iradiasi matahari adalah faktor paling dominan yang mempengaruhi arus listrik yang dihasilkan panel surya. Hubungannya bersifat linear yaitu semakin tinggi intensitas cahaya matahari yang mengenai permukaan panel, semakin besar arus yang dihasilkan, dan akibatnya semakin besar daya (Watt) keluaran.



Gambar 2.10 Iradiasi Matahari

(Sumber: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/16/4174>)

Ada dua sumber utama data untuk radiasi matahari di permukaan bumi yaitu pengukuran secara langsung dan perhitungan berdasarkan data satelit. Pada kondisi standarnya system *photovoltaic* yang mempunyai efisiensi sebesar 10% dapat menghasilkan daya sebesar 100 Watt pada saat intensitas matahari yang diterima sebesar 1.000 W/m^2 [26].

Menghitung iradiasi dapat menggunakan persamaan (2.1) berikut:

$$P_{pv} = P_{STC} \times \left(\frac{G}{G_{STC}} \right) \quad (2.1)$$

Dimana:

P_{pv} = Daya keluaran panel saat ini (Watt)

P_{STC} = Daya nominal panel pada STC (Watt-peak)

G = Iradiasi matahari aktual yang diterima permukaan panel W/m^2

G_{STC} = Iradiasi standar ($1000 W/m^2$)

2.6.2 Temperatur

Temperatur memiliki hubungan berbanding terbalik (negatif) terhadap daya. Panel surya bekerja paling efisien pada suhu dingin. Ketika suhu sel panel naik di atas suhu standar (25°C), tegangan akan turun secara signifikan, yang menyebabkan penurunan total daya keluaran. Inilah yang disebut sebagai *Thermal Loss* atau kerugian suhu[27].

Menghitung temperatur dapat menggunakan persamaan (2.2) berikut:

$$P_{pv} = P_{STC} \times [1 + \gamma(T_{cell} - T_{STC})] \quad (2.2)$$

Dimana:

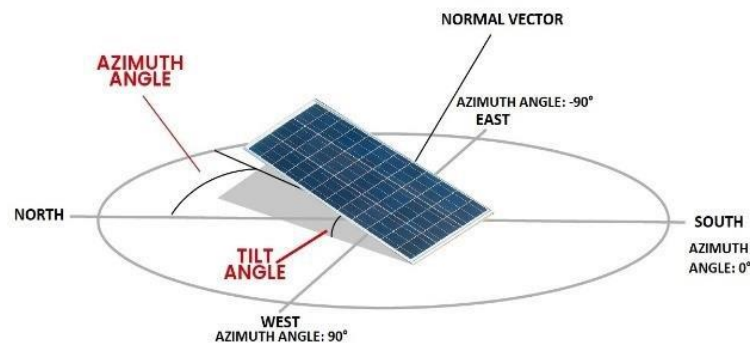
γ = Koefisien temperatur daya

T_{cell} = Suhu operasional sel panel ($^\circ\text{C}$)

T_{STC} = Suhu standar (25°C)

2.6.3 Sudut Orientasi

Orientasi (*Tilt & Azimuth*) menentukan seberapa efektif panel menangkap sinar matahari. Sudut yang tidak optimal menyebabkan sinar matahari datang secara miring (tidak tegak lurus), yang mengurangi intensitas efektif yang diserap sel surya karena adanya pantulan (refleksi) [28]. Rotasi orientasi dan kemiringan yang tidak tepat dapat menurunkan output energi panel surya hingga 20-30%.



Gambar 2.11 Sudut Orientasi

(Sumber: https://www.researchgate.net/figure/Azimuth-and-tilt-angles-19_fig3_352750112)

Menghitung sudut orientasi (*Tilt & Azimuth*) dapat menggunakan persamaan (2.3) berikut:

$$G_{eff} = G_{hor} \times R_b \times IAM \quad (2.3)$$

Dimana:

G_{eff} = Iradiasi efektif pada bidang miring panel

G_{hor} = Iradiasi global horizontal (data satelit/meteo)

R_b = Faktor geometris berdasarkan sudut *Tilt* dan *Azimuth*.

IAM = Faktor kerugian optik akibat sudut datang sinar.

2.6.4 Bayangan (*Shading*)

Bayangan merupakan sesuatu yang menghalangi sinar matahari untuk masuk ke PLTS yang disebabkan oleh terhalangnya PLTS seperti gedung, pepohonan dan lain lain. Hal ini juga dapat menyebabkan daya keluaran yang dihasilkan PLTS tidak maksimal[29]. Untuk mencegah panel surya terkena *shading* maka pemilihan lokasi instalasi panel surya sangat penting dilakukan.



Gambar 2.12 Bayangan (*Shading*)

(Sumber: <https://kumparan.com/christian-oswald/shading-dan-soiling-musuh-terbesar-plts-1xZkgOpZ9aB>)

Menghitung bayangan (*Shading*) dapat menggunakan persamaan (2.4) berikut:

$$P_{shading} = P_{pv} \times (1 - L_{shading}) \quad (2.4)$$

Dimana:

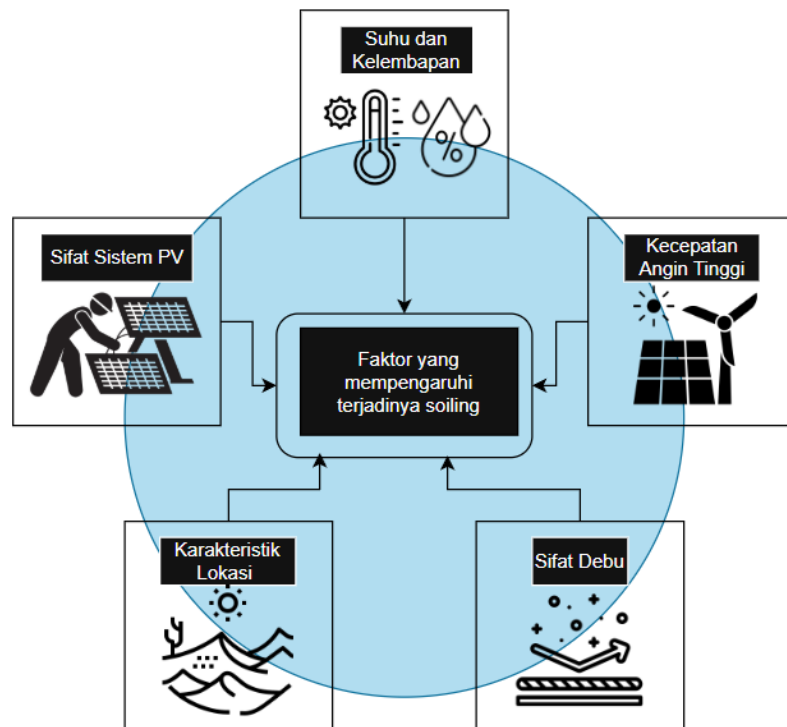
$L_{shading}$ = Persentase kerugian akibat bayangan

2.7 *Soiling* pada Sistem Fotovoltaik

Soiling adalah proses akumulasi material asing seperti debu, pasir, polutan industri, jelaga, serbuk sari, tanah, dan kotoran biologis yang menempel pada permukaan modul fotovoltaik (PV). Endapan tersebut menurunkan kemampuan panel dalam menyerap radiasi matahari, sehingga mengurangi output daya dan efisiensi sistem secara keseluruhan.

Soiling merupakan salah satu penyebab utama penurunan kinerja modul surya terutama pada daerah dengan tingkat polusi dan debu yang tinggi. Dampak *Soiling* dapat bervariasi, mulai dari penurunan kecil (<5%) hingga signifikan (>30%) tergantung lokasi, kondisi cuaca, dan frekuensi pembersihan.

2.7.1 Faktor yang Mempengaruhi Terjadinya *Soiling*



Gambar 2.13 Faktor yang mempengaruhi terjadinya *Soiling*

Berbagai faktor lingkungan dan karakteristik sistem yang mempengaruhi terjadinya *Soiling*, yaitu penumpukan debu atau partikel pada permukaan modul fotovoltaik (PV). *Soiling* menyebabkan berkurangnya radiasi matahari yang mencapai sel surya sehingga menurunkan efisiensi dan output daya sistem PV[30]. Berikut faktor-faktor yang penyebab *Soiling* pada PV, diantaranya:

1. Suhu dan Kelembapan

Suhu dan kelembapan merupakan faktor lingkungan yang berpengaruh terhadap penumpukan debu pada modul fotovoltaik. Kelembapan yang tinggi menyebabkan partikel debu lebih mudah menempel karena menyerap uap air di udara, sedangkan suhu yang tinggi meningkatkan temperatur permukaan panel sehingga mempercepat pengendapan partikel debu. Kombinasi kedua faktor tersebut dapat meningkatkan akumulasi debu pada permukaan modul dan menyebabkan kenaikan nilai soiling loss pada sistem PV.

2. Kecepatan Angin Tinggi

Kecepatan angin berperan ganda dalam mempengaruhi *Soiling*. Di satu sisi, angin dapat membawa partikel debu dari area sekitar dan mengendapkannya pada permukaan modul fotovoltaik, terutama pada lokasi yang dekat dengan jalan raya, area industri, atau lahan terbuka. Pada kondisi ekstrem, angin kencang mampu mengangkat dan mengangkut partikel pasir dalam jumlah besar, sehingga meningkatkan intensitas deposisi debu. Namun demikian, angin juga dapat memiliki efek pembersihan (*self-cleaning*), meskipun kemampuannya terbatas dan tidak cukup signifikan dibandingkan dengan akumulasi debu yang disebabkan. Oleh karena itu, kecepatan dan arah angin menjadi parameter penting dalam menentukan tingkat *Soiling* pada modul PV.

3. Sifat Debu

Karakteristik fisik dan kimia debu sangat mempengaruhi besarnya reduksi energi akibat *Soiling*. Ukuran partikel yang lebih kecil, seperti PM2.5 dan PM10, cenderung menghasilkan penurunan performa yang lebih besar karena sifatnya yang mudah menyebar dan lebih kuat menempel pada permukaan kaca modul. Selain itu, komposisi kimia debu seperti garam, abu vulkanik, atau residu industri dapat menimbulkan efek penyerapan cahaya atau meningkatkan tingkat kekotoran permukaan. Sifat optik debu juga mempengaruhi tingkat transmisi radiasi, di mana debu berwarna gelap akan menyerap lebih banyak sinar matahari dan mengurangi jumlah cahaya yang mencapai sel surya. Dengan demikian, sifat debu merupakan parameter penting dalam menentukan besarnya *Soiling loss*.

4. Karakteristik Lokasi

Karakteristik lokasi merupakan salah satu faktor utama yang menentukan tingkat akumulasi debu pada sistem PLTS. Lokasi urban dan industri cenderung memiliki tingkat polusi udara yang lebih tinggi, sehingga partikel debu, jelaga kendaraan, dan asap industri lebih mudah mengotori permukaan panel. Di daerah pesisir, partikel garam yang bersifat higroskopis dapat memperburuk kondisi *Soiling* sekaligus berpotensi menyebabkan korosi. Sementara itu, daerah kering atau semi-gurun memiliki intensitas *Soiling* yang jauh lebih tinggi akibat kandungan debu dan

pasir di udara. Kondisi lokasi ini sangat menentukan frekuensi pembersihan modul dan harus dipertimbangkan dalam perencanaan sistem PV yang optimal.

5. Sifat Sistem PV

Desain dan konfigurasi sistem PV berpengaruh besar terhadap tingkat akumulasi debu. Panel surya dengan sudut kemiringan rendah lebih rentan mengalami penumpukan debu karena tidak memiliki kemampuan *self-cleaning* alami melalui aliran air hujan. Sebaliknya, modul dengan sudut kemiringan lebih besar biasanya memiliki tingkat *Soiling* yang lebih rendah. Selain itu, ketinggian pemasangan modul, keberadaan halangan angin, serta jenis permukaan kaca (misalnya, *anti-reflective coating* atau *self-cleaning coating*) turut menentukan kecepatan akumulasi debu. Faktor ini penting dalam desain sistem karena dapat memengaruhi performa jangka panjang dan strategi perawatan yang diperlukan untuk menjaga efisiensi PLTS.

2.7.2 Dampak *Soiling* terhadap Kinerja Modul Surya

Beberapa dampak *Soiling* memengaruhi kinerja modul surya, seperti:

2.7.2.1 Penurunan I_{sc} (*Short-Circuit Current*)

Akumulasi debu dan kotoran di permukaan modul surya menyebabkan reduksi intensitas cahaya yang masuk ke sel surya. Hal ini secara langsung menurunkan arus hubung singkat (I_{sc}), karena I_{sc} berbanding lurus dengan jumlah foton yang diterima[31].

Menghitung I_{sc} (*Short-Circuit Current*) dapat menggunakan persamaan (2.5) berikut:

$$I_{sc_{STC}} = I_{sc} \cdot \frac{G_{STC}}{G_{POA}} \frac{1}{[1 + \alpha \cdot (T_c - 25^\circ C)]} \quad (2.5)$$

Suhu sel (T_c) dihitung dari suhu modul yang diukur (T_m) dapat dihitung menggunakan persamaan (2.6) berikut:

$$T_c = T_m + \frac{G}{G_{STC}} \cdot \Delta T \quad (2.6)$$

ΔT yaitu parameter temperatur yang menyatakan selisih antara temperatur sel dan temperatur modul yang dipengaruhi oleh tingkat irradiansi. Nilai ΔT ini merepresentasikan kenaikan temperatur sel terhadap temperatur modul per rasio irradiansi terhadap kondisi STC, dan untuk nilai $\Delta T = 3 \text{ }^\circ\text{C}$

Dimana:

$I_{sc_{STC}}$ = Arus hubung singkat pada kondisi STC

G_{STC} = Irradiansi standar STC = 1000 W/m²

G_{POA} = Irradiansi PV pada saat pengukuran (W/m²).

α = Temperature koefisien dari I_{sc} [$^\circ\text{C}^{-1}$]

T_c = Temperatur modul ($^\circ\text{C}$)

2.7.2.2. Penurunan Pmax (Daya Maksimum)

Soiling memberikan efek utama terhadap penurunan daya maksimum (P_{max}) yang dihasilkan. *Soiling* menurunkan transmitansi (τ), sehingga hanya sebagian energi radiasi matahari yang dapat dikonversikan menjadi listrik. Studi lapangan menunjukkan perbandingan energi bersih vs kotor dapat berbeda 2–8% hanya dalam hitungan hari, bahkan bisa lebih tinggi di lingkungan berpolusi[32]. Output daya meningkat setelah panel dibersihkan dari soiling, sehingga menunjukkan bahwa penumpukan debu menjadi salah satu faktor utama penurunan daya pada sistem PLTS.

Menghitung Pmax (Daya Maksimum) dapat menggunakan persamaan (2.7) berikut:

$$P_{m_{STC}} = P_m \cdot \frac{G_{STC}}{G_{POA}} \frac{1}{[1 + \gamma \cdot (T_c - 25^\circ\text{C})]} \quad (2.7)$$

Dimana:

$P_{m_{STC}}$ = Daya maksimum pada kondisi STC

T_c = Suhu sel ($^{\circ}C$)

γ = Suhu daya maksimum ($^{\circ}C^{-1}$)

2.7.2.3. Performance Ratio (PR)

Performance Ratio mewakili efisiensi aktual sistem dibandingkan potensi idealnya. *Soiling Loss* menurunkan PR karena menyebabkan *gap* antara energi aktual dan energi teoritis yang bisa dicapai dengan panel bersih. PR akan turun seiring meningkatnya tingkat *Soiling*, dan akan membaik setelah pembersihan rutin dilakukan. Mengacu pada *Soiling Loss* bila *SL* menurun, maka PR juga berkurang karena pencapaian output bersih/tertakar semakin jauh dari idealnya.

Selain itu, rasio kinerja ditentukan menggunakan Persamaan (2.8) hingga (2.11) Persamaan yang disediakan oleh Gostein berdasarkan IEC61724-1 Edisi 2.

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \quad (2.8)$$

Y_f adalah hasil sistem akhir (kWh/kWp) dan Y_r adalah hasil referensi (kWh/kWp) dan persamaan ini dijelaskan lebih lanjut menggunakan Persamaan (2.9).

$$PR = \frac{\frac{E_{out}}{P_0}}{\frac{H_i}{G_{i,ref}}} \quad (2.9)$$

Dimana E_{out} adalah keluaran energi dari sistem PV (kWh), P_0 adalah peringkat daya array (DC) (kWp), H_i adalah radiasi yang benar-benar jatuh ($kWh \cdot m^{-2}$), $G_{i,ref}$ adalah nilai referensi intensitas radiasi matahari ($kWh \cdot m^{-2}$), Persamaan (2.10) diperluas lebih lanjut menjadi:

$$PR = \frac{\left(\sum_k \frac{P_{out,k} \times \tau_k}{P_0} \right)}{\left(\sum_k \frac{G_{i,k} \times \tau_k}{G_{i,ref}} \right)} \quad (2.10)$$

Dimana P_{out} adalah daya keluaran yang diukur (AC), τ_k adalah interval waktu pencatatan energi, dan $G_{i,k}$ adalah nilai yang diukur dari intensitas radiasi surya. Ketika P_0 dipindahkan, unitnya = Kw-h/Kw-h dalam persamaan (2.11)

$$PR = \frac{(\sum_k P_{out,k} \times \tau_k)}{(\sum_k \frac{P_0 \times G_{i,k} \times \tau_k}{G_{i,ref}})} \quad (2.11)$$

2.7.2.4. Penurunan Efisiensi PV

Soiling menyebabkan permukaan modul PV tertutup lapisan debu, polutan, atau kotoran lain sehingga radiasi matahari yang masuk ke sel berkurang. Selain mengurangi radiasi yang masuk, *Soiling* juga bisa memicu distribusi penyinaran yang tidak merata sehingga beberapa sel bekerja pada kondisi kurang optimal, arus dan tegangan menurun, dan rugi-rugi internal bertambah. Akibatnya, meskipun kondisi cuaca dan konfigurasi sistem sama, string atau modul yang kotor akan menghasilkan daya dan efisiensi yang lebih rendah dibanding modul yang bersih selama periode *Soiling* tersebut.

Untuk mendukung analisis teknis terhadap penurunan performa modul akibat *Soiling* juga menghitung efisiensi modul berdasarkan daya maksimum yang dihasilkan terhadap energi radiasi yang diterima, dapat dihitung menggunakan persamaan (2.12) atau persamaan (2.13) berikut:

$$\eta_{max} = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{mpp} V_{mpp}}{AG_t} \quad (2.12)$$

atau

$$\eta = \frac{P_{max}}{A \times G} \times 100\% \quad (2.13)$$

Kemudian Persamaan (2.14) digunakan untuk menentukan kerugian efisiensi di luar ruangan.

$$\Delta\eta = \frac{\eta_{clean PV} - \eta_{soiled PV}}{\eta_{clean PV}} \times 100\% \quad (2.14)$$

Dimana:

η = Efisiensi modul fotovoltaik

I_{mpp} = Arus pada titik daya maksimum

V_{mpp} = Tegangan pada titik daya maksimum

G = Intensitas radiasi matahari (W/m^2)

A = Luas modul fotovoltaik (m^2)

2.7.2.5 Kerugian akibat kotoran (SL)

Kerugian akibat kotoran (SL) diperkirakan dari rasio kotoran (SR) yang didefinisikan sebagai rasio antara keluaran listrik dari array PV yang kotor (Z_{soiled}) dan keluaran yang dihasilkan oleh sistem yang sama dalam keadaan bersih (Z_{clean}), Dalam hal ini, keluaran listrik yang digunakan untuk memperkirakan SR adalah I_{mpp} .

SR dapat dihitung menggunakan persamaan (2.15) berikut:

$$SR = \frac{Z_{soiled}}{Z_{clean}} \quad (2.15)$$

Dimana:

Z_{clean} = Parameter kinerja saat modul bersih

Z_{soiled} = Parameter yang sama saat modul kotor

Karena modul tidak dapat berada dalam kondisi bersih dan kotor secara bersamaan, maka digunakan dua sistem serupa yang dipasang berdampingan untuk membandingkan output energi. Pengukuran dilakukan pada waktu serta kondisi radiasi dan suhu yang sama sehingga nilai *Soiling Loss* (SL) dapat dihitung menggunakan persamaan (2.16).

$$SL = (1 - SR).100\% \quad (2.16)$$

3.2 Alat dan Bahan

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

1. Satu unit laptop HP Laptop 14-em0xxx dengan spesifikasi AMD Ryzen 5 7520U, dilengkapi dengan prosesor 2,80 GHz, serta sistem operasi Windows 11 Pro 64-bit sebagai media pemodelan dan simulasi
2. Perangkat lunak PVSyst 7.4 untuk melakukan konfigurasi pada PV dan inverter dan menghasilkan output energi *array* dari PV.
3. Perangkat lunak *Microsoft Excel* untuk merekapitulasi data profil beban, data output energi, dan pembuatan grafik.

3.3 Tahapan Penelitian

Adapun tahapan penelitian adalah sebagai berikut:

1. Identifikasi Masalah

Tahap ini dilakukan untuk mengidentifikasi permasalahan terkait perancangan dan kelayakan sistem Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU) yang terintegrasi dengan PLTS *On-Grid*. Identifikasi dilakukan dengan memahami kebutuhan energi SPKLU serta pengaruh *soiling loss* terhadap kinerja sistem PLTS.

2. Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan referensi dan kajian teori yang berkaitan dengan PLTS *On-Grid*, SPKLU, dan *soiling loss*. Referensi yang digunakan meliputi jurnal ilmiah, buku, skripsi, serta artikel penelitian yang relevan sebagai dasar dalam mendukung proses analisis dan perancangan sistem.

3. Perencanaan Teknis

Tahap perencanaan teknis meliputi perancangan sistem PLTS *On-Grid* yang digunakan sebagai sumber energi SPKLU. Perancangan mencakup pemilihan modul fotovoltaik, inverter, konfigurasi sistem, jumlah panel surya, serta penyusunan rangkaian seri dan paralel. Simulasi awal dilakukan menggunakan perangkat lunak PVSyst untuk menentukan spesifikasi dan performa sistem.

4. Perencanaan Ekonomis

Tahap ini dilakukan untuk menganalisis kelayakan ekonomi sistem PLTS dengan memasukkan parameter biaya ke dalam perangkat lunak PVSyst. Parameter yang digunakan meliputi biaya investasi awal (*Capital Expenditure/CAPEX*), biaya operasi dan pemeliharaan (*Operational Expenditure/OPEX*), tarif listrik, harga impor energi dari jaringan PLN, dan harga ekspor energi ke jaringan. Analisis ekonomi dilakukan menggunakan parameter *Levelized Cost of Energy* (LCOE), *Net Present Value* (NPV), *Discounted Payback Period* (DPP), dan *Profitability Index* (PI).

5. Simulasi dan Analisis

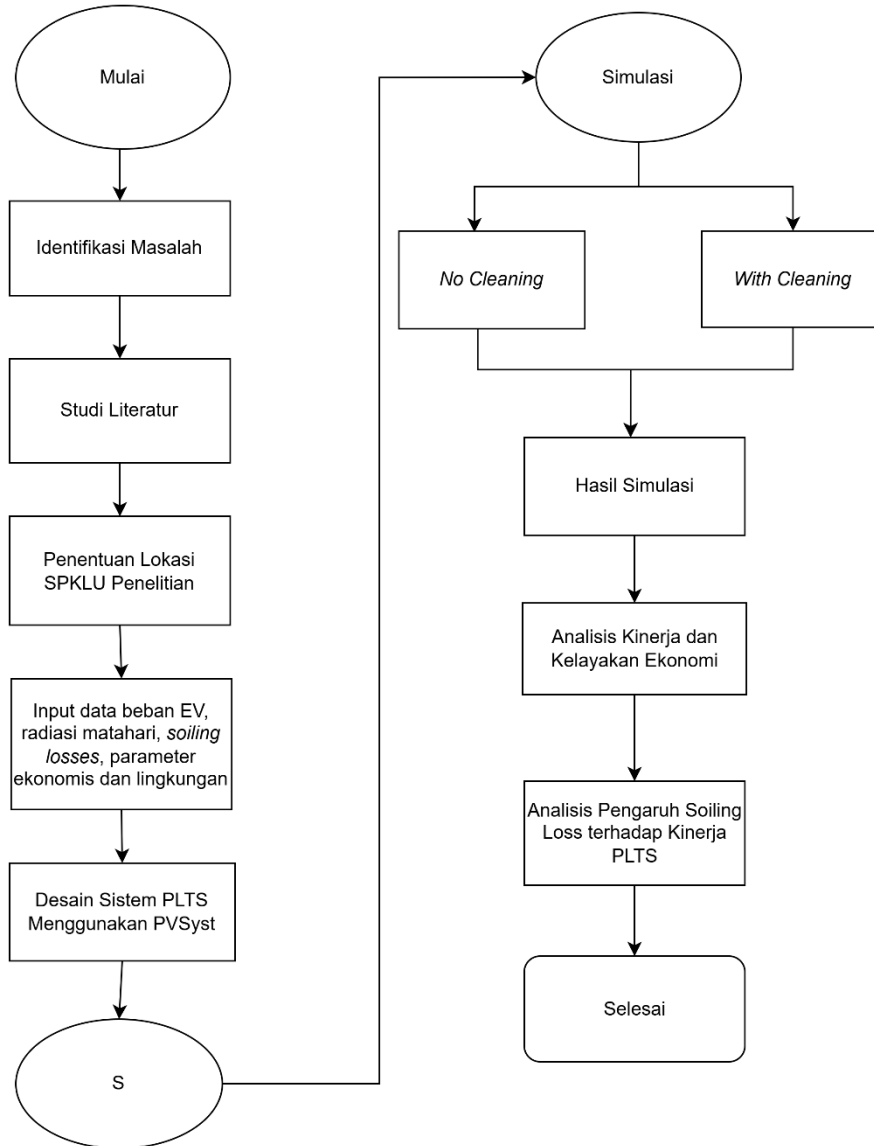
Pada tahap ini dilakukan simulasi kinerja sistem PLTS *On-Grid* menggunakan perangkat lunak PVSyst v7.4 berdasarkan parameter yang telah ditentukan. Simulasi dilakukan dengan memasukkan profil beban SPKLU sebagai *self-consumption* sistem. Selain itu, dilakukan analisis pengaruh *soiling loss* terhadap produksi energi, performa sistem, dan kelayakan ekonomi pada kondisi *No Cleaning* dan *With Cleaning*.

6. Pembuatan Laporan

Tahap akhir dilakukan dengan menyusun laporan skripsi berdasarkan hasil analisis teknis dan ekonomi yang telah diperoleh. Laporan disusun sebagai bentuk pertanggungjawaban ilmiah serta memuat kesimpulan dan saran terkait implementasi PLTS *On-Grid* sebagai sumber energi SPKLU dan pengaruh *soiling loss* terhadap kinerja sistem.

3.4 Diagram Alir Penelitian

Adapun diagram alir penelitian ini ditunjukkan oleh gambar dibawah ini:



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.5 Analisis Kelayakan Teknis

Analisis kelayakan teknis dilakukan untuk mengevaluasi kinerja rancangan sistem PLTS *On-Grid* berdasarkan hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVSyst. Tahapan perencanaan teknis diawali dengan perhitungan potensi energi surya di lokasi penelitian melalui analisis rata-rata *Peak Sun Hour* (PSH). Selanjutnya dilakukan pemilihan komponen utama sistem, meliputi modul fotovoltaik (*PV module*) dan inverter sesuai kebutuhan daya sistem. Tahap berikutnya adalah perancangan susunan array yang mencakup penentuan kapasitas array, jumlah modul, luas area pemasangan, serta konfigurasi seri dan paralel modul surya. Seluruh parameter rancangan kemudian disimulasikan pada sistem PLTS *On-Grid* untuk SPKLU guna memperoleh evaluasi kinerja sistem, seperti nilai *Performance Ratio* (PR) dan total produksi energi listrik.

3.5.1 Menghitung Rata-Rata Waktu Penyinaran Matahari

Peak Sun Hour (PSH) adalah satuan yang merepresentasikan total energi iradiasi matahari yang diterima di suatu lokasi selama satu hari, yang disetarakan dengan jumlah jam dimana matahari bersinar pada intensitas puncaknya, yaitu 1000 W/m^2 (atau 1 kW/m^2).

Menghitung rata-rata waktu penyinaran matahari dapat menggunakan persamaan (3.1) berikut:

$$PSH = \frac{GHI}{G_{STC}} \quad (3.1)$$

Dimana:

PSH = *Peak Sun Hour* (Jam)

GHI = *Global Horizontal Irradiance* (kWh/m^2)

G_{STC} = *Global Horizontal Irradiance* dalam STC (1000 W/m^2)

3.5.2 Pemilihan Panel Surya (PV Module)

Pemilihan panel surya (modul PV) merupakan langkah krusial dalam perancangan teknis yang didasarkan pada tiga kriteria utama untuk memastikan kinerja optimal dan efisiensi lahan. Pertama, tipe teknologi sel *monocrystalline* (Si-mono) diutamakan karena efisiensi konversinya yang lebih tinggi. Kedua, modul dengan daya keluaran besar (*high-power module*) dipilih untuk optimalisasi area, sehingga kapasitas (kWp) yang ditargetkan dapat tercapai dengan jumlah unit panel yang lebih sedikit dan mengurangi total area yang diperlukan. Kriteria terakhir adalah ketersediaan data panel dalam database PVSyst untuk menjamin akurasi dan validasi seluruh parameter teknis yang digunakan dalam simulasi.

3.5.3 Menghitung Kapasitas Array Panel Surya

Kapasitas *array* panel surya yang dinyatakan dalam satuan Watt-peak (Wp) atau kilowatt-peak (kWp) merepresentasikan total daya keluaran maksimum yang dapat dihasilkan oleh seluruh susunan panel surya pada Kondisi Uji Standar (STC).

Menghitung kapasitas *array* panel surya dapat menggunakan persamaan (3.2) berikut:

$$\text{Kapasitas array panel surya} = \text{Kapasitas modul} \times \text{Jumlah modul} \quad (3.2)$$

3.5.4 Menghitung Jumlah Modul Panel Surya

Penentuan jumlah modul panel surya merupakan langkah fundamental dalam perencanaan teknis, pengadaan material, dan estimasi total area sistem.

Menghitung jumlah modul panel surya dapat menggunakan persamaan (3.3) berikut:

$$\text{Jumlah Modul panel surya} = \frac{P_{\text{watt-peak}}}{P_{\text{mpp}}} \quad (3.3)$$

Dimana:

$P_{\text{watt-peak}}$ = Daya yang dapat dibangkitkan *array* modul surya (*Watt-Peak*)

P_{mpp} = Daya keluaran maksimum panel surya

3.5.5 Menghitung Luas Area Efektif

Perhitungan luas area efektif sangat penting untuk perencanaan awal tata letak (*layout*) dan untuk memverifikasi apakah total panel yang direncanakan secara fisik dapat muat di lokasi instalasi.

Menghitung luas area efektif dapat menggunakan persamaan (3.4) berikut:

$$\text{Luas Area (m}^2\text{)} = \text{Luas modul} \times \text{Jumlah modul} \quad (3.4)$$

3.5.6 Konfigurasi Modul Panel Surya

Konfigurasi modul panel surya sangat penting untuk memastikan bahwa tegangan (Volt) dan arus (Ampere) yang dihasilkan oleh *array* PV sesuai dengan rentang operasi inverter. Konfigurasi *array* mencakup penentuan jumlah modul yang akan dihubungkan secara seri (membentuk *string*) dan jumlah *string* yang akan dihubungkan secara paralel.

Dalam menentukan konfigurasi modul surya yang akan dipasang dapat digunakan persamaan (3.5), (3.6), (3.7), dan (3.8) berikut:

$$\text{Minimal modul seri per string} = \frac{V_{min}Inverter}{V_{oc}Modul} \quad (3.5)$$

$$\text{Maksimal modul seri per string} = \frac{V_{max}Inverter}{V_{oc}Modul} \quad (3.6)$$

$$\text{Maksimal modul seri per string} = \frac{I_{max}Inverter}{I_{mp}Modul\ Surya} \quad (3.7)$$

$$\text{Jumlah String} = \frac{\text{Jumlah modul panel surya}}{\text{Jumlah modul surya seri per string}} \quad (3.8)$$

Keterangan:

$V_{min}Inverter$ = Tegangan minimum DC Inverter (V)

$V_{max}Inverter$ = Tegangan maksimum DC Inverter (V)

$I_{max}Inverter$	= Arus maksimum DC Inverter (A)
$V_{oc}Modul$	= Tegangan <i>open-circuit</i> panel (V)
$I_{mp}Modul$	= Arus maksimum panel (A)

3.5.7 Menentukan Kapasitas Daya Inverter

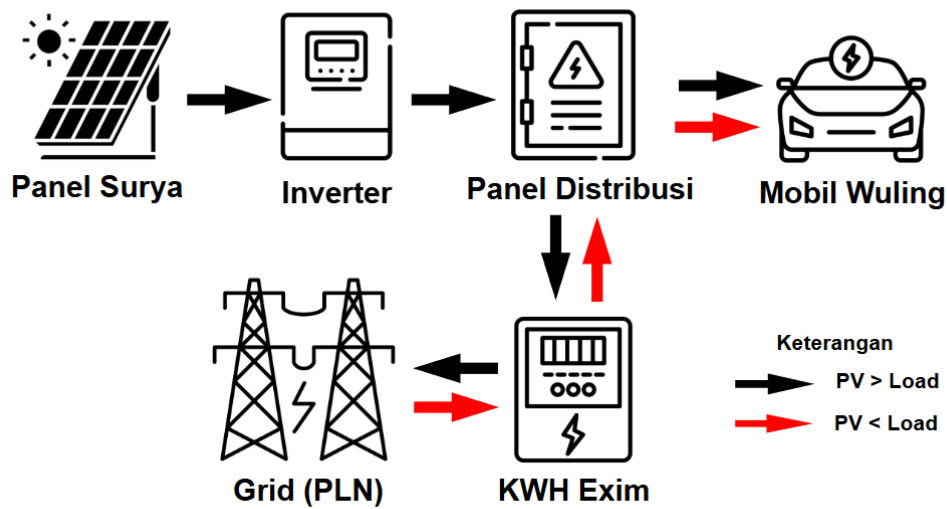
Penentuan kapasitas daya inverter (dinyatakan dalam kWac atau kVA) merupakan salah satu langkah terpenting dalam perancangan sistem PLTS *On-Grid*. Kapasitas inverter tidak dihitung berdasarkan perbandingan 1:1 dengan total kapasitas panel surya (kWp). Sebaliknya, pemilihan kapasitas inverter didasarkan pada konsep Pnom ratio (Rasio DC/AC) 1,0 hingga 1,3, yang juga dikenal sebagai *over-sizing*.

Over-sizing berarti kapasitas total panel (DC) sengaja dirancang lebih besar daripada kapasitas keluaran nominal inverter (AC). Dengan merancang kapasitas DC (panel) lebih besar, inverter dapat didorong untuk beroperasi pada kapasitas maksimumnya untuk durasi waktu yang lebih lama, terutama pada pagi dan sore hari. Hal ini bertujuan untuk memaksimalkan total produksi energi tahunan (kWh) dari sistem.

Dalam menentukan kapasitas daya inverter yang akan dipasang dapat digunakan persamaan (3.9) berikut:

$$\text{Kapasitas Daya Inverter} = \frac{\text{Total Daya Nominal PV (kWp)}}{P_{nom} \text{ Ratio}} \quad (3.9)$$

3.5.8 Skema PLTS On-Grid



Gambar 3.2 Skema PLTS On-Grid

3.5.9 Menghitung Evaluasi Kinerja PLTS

Untuk mengevaluasi kinerja dan efisiensi sistem PLTS dalam kondisi operasional nyata, digunakan dua parameter utama yaitu *Performance Ratio* (PR) dan *Solar Fraction* (SF). *Performance Ratio* (PR) digunakan sebagai indikator kualitas sistem secara keseluruhan, yang mengukur efektivitas konversi energi surya setelah memperhitungkan kerugian akibat suhu dan debu (*Soiling*), dan didefinisikan sebagai rasio energi aktual terhadap energi referensi.

Menghitung evaluasi kinerja PLTS dapat digunakan persamaan (3.10) berikut:

$$Performance\ Ratio = \frac{Energy_{produced}}{G_{lnc} \times P_{Watt-peak}} \quad (3.10)$$

Sementara itu, *Solar Fraction* (SF) digunakan secara spesifik pada sistem *self-consumption* seperti SPKLU untuk mengkuantifikasi persentase kebutuhan beban yang berhasil dipenuhi langsung oleh energi surya.

Untuk menghitung *Solar Fraction* dapat menggunakan persamaan (3.11) berikut:

$$\text{Solar Fraction} = \frac{E_{\text{Solar}}}{E_{\text{User}}} \quad (3.11)$$

Dimana:

$P_{\text{Watt-peak}}$ = Daya yang dapat dibangkitkan *array* modul surya (*Watt-Peak*)

E_{Solar} = Total energi yang digunakan

E_{User} = Total energi beban

3.6 Analisis Kelayakan Ekonomi

Pada penelitian ini, analisis ekonomis dilakukan pada perencanaan Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum dengan sumber energi dari PLTS *On-Grid*, untuk mengetahui biaya investasi awal (CAPEX), biaya *operational & maintenance* (O&M Cost), *Life Cycle Cost* (LCC), *Levelized Cost of Energy* (LCOE), *Net Present Value* (NPV), *Profitability Index* (PI), dan *Discounted Payback Period* (DPP).

3.6.1 Biaya Investasi Awal (*Capital Expenditure*)

Biaya Investasi Awal (CAPEX) adalah total biaya pengeluaran di muka yang diperlukan untuk pengadaan dan instalasi lengkap sistem PLTS *On-Grid* hingga siap beroperasi. Biaya ini merupakan parameter input fundamental dalam *Economic Evaluation* PVSyst dan menjadi dasar utama untuk menghitung seluruh parameter kelayakan finansial, termasuk LCOE, NPV, dan *Payback Period*. CAPEX tidak hanya mencakup biaya komponen utama seperti Modul PV (Panel Surya) dan Inverter, tetapi juga mencakup seluruh biaya pendukung (*Balance of System / BoS*) yang meliputi struktur pemasangan (*mounting*), sistem kabel (DC dan AC), panel distribusi, serta biaya jasa perancangan, instalasi, dan perizinan.

3.6.2 Biaya Operasional dan Pemeliharaan (*O&M Cost*)

Biaya operasional dan pemeliharaan (*Operational and Maintenance Cost/ O&M*) adalah biaya yang dikeluarkan secara rutin tiap tahun untuk menjalankan dan

merawat sistem PLTS *On-Grid* agar tetap berfungsi dengan baik sepanjang umur operasionalnya.

Biaya operasional dan pemeliharaan dapat dihitung berdasarkan persamaan (3.12) berikut:

$$\text{Biaya O\&M} = 1\% \times \text{Biaya Investasi Awal} \quad (3.12)$$

3.6.3 Biaya Siklus Hidup (*Life Cycle Cost*)

Biaya siklus hidup (*Life Cycle Cost*) digunakan untuk menghitung total biaya sebenarnya dari sebuah proyek selama keseluruhan masa pakainya, bukan hanya biaya pembelian awalnya.

Biaya siklus hidup dapat dihitung menggunakan persamaan (3.13) berikut:

$$LCC = C + Mpw \quad (3.13)$$

Dimana:

LCC = Biaya Siklus Hidup

C = Biaya Investasi Awal

Mpw = Total biaya pemeliharaan dan operasional selama n tahun atau selama umur proyek

3.6.4 Biaya *Levelized Cost of Energy* (LCOE)

Levelized Cost of Energy (LCOE) merupakan metrik yang digunakan untuk mengevaluasi biaya produksi energi dari suatu sistem pembangkit listrik selama masa pakainya. LCOE bisa didapatkan dengan cara membagi total biaya keseluruhan dalam setahun dengan keluaran produksi energi yang dikonsumsi dalam setahun dari sistem pembangkit listrik tenaga surya baik yang digunakan untuk SPKLU dan ekspor energi ke grid.

Biaya LCOE dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (3.14) berikut:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{LCC}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{Et}{(1+r)^t}} \quad (3.14)$$

Dimana:

LCOE = Biaya produksi energi listrik per kWh

r = Nilai suku bunga

Et = Total pembangkitan energi listrik yang dihasilkan pada tahun ke- t

n = Umur pakai pembangkit

d = Faktor degradasi

$\sum_{t=1}^n \frac{LCC}{(1+r)^t}$ = *Total Present Value Life Cycle Cost*

$\sum_{t=1}^n \frac{Et}{(1+r)^t}$ = *Total Present Value* pembangkit energi listrik

Dengan nilai LCOE maka diketahui biaya produksi per kWh untuk membangun dan mengoperasikan pembangkit listrik selama masa pakai, sehingga dapat dijadikan sebagai acuan untuk menentukan tarif penjualan listrik ke jaringan listrik.

3.6.5 Net Present Value (NPV)

Net Present Value adalah selisih antara present value aliran kas bersih atau sering disebut juga dengan *proceed* dengan present value investasi. *Net Present Value* (NPV) merupakan selisih antara nilai sekarang dari arus kas yang masuk (pendapatan) seperti pendapatan dari penjualan energi di SPKLU dan nilai jual dari sisa pemakaian komponen dengan nilai sekarang dari arus kas yang keluar (NPC) selama masa operasional sistem.

NPV dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (3.15) berikut:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{NCF_t}{(1+i)^t} - IA \quad (3.15)$$

Dimana:

NPV = Total pendapatan bersih selama masa operasional

NCF_t = *Net cash flow* periode tahun ke-1 sampai tahun ke-n

n = Periode dalam tahun (umur proyek)

$\frac{NCF_t}{(1+i)^t}$ = Tingkat diskonto

Metode *Net Present Value* (NPV) digunakan sebagai kriteria pengambilan keputusan investasi. Suatu proyek dinyatakan layak secara finansial untuk dilaksanakan apabila nilai NPV yang dihasilkan positif ($NPV > 0$). Sebaliknya, proyek tersebut dinilai tidak layak apabila nilai NPV yang diperoleh negatif ($NPV < 0$).

3.6.6 *Discounted Payback Period* (DPP)

Discounted Payback Period (DPP) adalah parameter untuk menghitung berapa lama waktu (tahun) yang Anda butuhkan untuk balik modal, dengan perhitungan yang lebih realistis.

Discounted payback period dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (3.16) berikut:

$$DPP = n + \frac{a - b}{c - b} \times 1 \text{ tahun} \quad (3.16)$$

Dimana:

n = Tahun terakhir jumlah arus kas bernilai negative

a = Jumlah investasi awal

b = Total kumulatif arus kas pada tahun ke-n

c = Total kumulatif arus kas pada tahun ke-(n+1)

Kriteria kelayakan investasi berdasarkan metode *Discounted Payback Period* (DPP) ditentukan oleh perbandingannya dengan umur ekonomis (*life time*) proyek. Suatu proyek dinilai layak secara finansial apabila hasil perhitungan DPP lebih singkat daripada umur ekonomis proyek. Sebaliknya, proyek dinilai tidak layak untuk dilaksanakan apabila nilai DPP yang diperoleh melebihi total umur ekonomis proyek tersebut.

3.6.7 Profitability Index (PI)

Profitability Index (PI), yang sering juga disebut sebagai Rasio Manfaat Biaya (*Benefit-Cost Ratio*), adalah sebuah parameter kelayakan investasi yang digunakan untuk mengukur rasio atau perbandingan antara nilai manfaat (pendapatan/penghematan) suatu proyek terhadap biayanya.

Profitability index dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (3.17) berikut:

$$PI = \frac{\sum_{t=1}^n NCF_t(1+i)^{-t}}{CAPEX} \quad (3.17)$$

Dimana:

PI = *Profitability index*

$\sum_{t=1}^n NCF_t(1+i)^{-t}$ = Total arus kas bersih

CAPEX = Biaya investasi awal

Kriteria kelayakan investasi berdasarkan metode *Profitability Index* (PI) ditentukan oleh perbandingannya dengan nilai 1. Suatu proyek dinilai layak dan menguntungkan untuk dilaksanakan apabila hasil perhitungan $PI > 1$, yang mengindikasikan bahwa total manfaat (benefit) yang dihasilkan selama umur ekonomis proyek melebihi biaya pengeluaran (*cost*). Sebaliknya, proyek dinilai tidak layak apabila hasil perhitungan $PI < 1$, karena manfaat yang diperoleh tidak mencukupi untuk menutupi biaya pengeluaran (*cost*) selama umur ekonomis proyek.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai analisis kinerja dan kelayakan ekonomi sistem PLTS *On-Grid* sebagai sumber energi untuk SPKLU dengan mempertimbangkan variasi *soiling loss* pada skenario *With Cleaning* dan *No Cleaning*, maka dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem PLTS *On-Grid* yang dipengaruhi oleh *soiling loss* dirancang dengan kapasitas sebesar 5,0 kWp menggunakan modul fotovoltaik berkapasitas 500 Wp dan inverter sebesar 5,0 kWac. Sistem dirancang berdasarkan kebutuhan energi SPKLU dan potensi radiasi matahari di lokasi penelitian dengan mempertimbangkan *detailed losses* untuk pengurangan radiasi matahari pada sistem PLTS. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai *soiling loss factor* pada kondisi *No Cleaning* sebesar 2,49%, sedangkan pada kondisi *With Cleaning* sebesar 1,25%, sehingga kondisi *With Cleaning* menghasilkan rugi-rugi sistem yang lebih rendah dibandingkan kondisi *No Cleaning*.
2. Analisis kinerja menunjukkan bahwa skenario *With Cleaning* memberikan performa sistem yang lebih baik dibandingkan *No Cleaning*. Akumulasi debu (*soiling loss*) mempengaruhi performa sistem PLTS sehingga pembersihan modul surya secara berkala diperlukan untuk menjaga efisiensi dan produksi energi sistem.
3. Sistem PLTS *On-Grid* yang dirancang dinyatakan layak untuk diimplementasikan pada seluruh skenario penelitian. Hal ini ditunjukkan oleh nilai *Net Present Value* (NPV) yang bernilai positif serta nilai *Profitability*

Index (PI) yang lebih besar pada kondisi *With Cleaning* maupun *No Cleaning*. Selain itu, kondisi *With Cleaning* menghasilkan nilai *Levelized Cost of Energy* (LCOE) yang lebih rendah dan nilai *Discounted Payback Period* (DPP) yang lebih cepat dibandingkan kondisi *No Cleaning*.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

1. Untuk melakukan pembersihan modul surya secara berkala guna meminimalkan pengaruh *soiling loss*, sehingga kinerja dan efisiensi sistem PLTS dapat tetap optimal.
2. Mempertimbangkan penggunaan *Battery Energy Storage System* (BESS) agar energi surplus yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara maksimal dan tidak seluruhnya diekspor ke jaringan PLN.
3. Mempertimbangkan penggunaan skema *net metering* sebagai alternatif dibandingkan *net billing* yang lebih optimal untuk meningkatkan pemanfaatan energi surplus pada sistem PLTS *On-Grid*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. E. Seilabi, M. Pourgholamali, M. Miralinaghi, G. Homem de Almeida Correia, Z. Li, and S. Labi, “Sustainable Planning of Electric Vehicle Charging Stations: A Bi-Level Optimization Framework for Reducing Vehicular Emissions in Urban Road Networks,” *Sustain.*, vol. 17, no. 1, pp. 1–23, 2025, doi: 10.3390/su17010001.
- [2] A. A. Hachicha, I. Al-sawafta, and Z. Said, “Impact of dust on the performance of solar photovoltaic (PV) systems under United Arab Emirates weather conditions,” *Renew. Energy*, vol. 141, pp. 287–297, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.04.004.
- [3] J. Montes-romero, L. Micheli, F. Almonacid, and E. F. Fern, “Estimation of soiling losses in photovoltaic modules of different technologies through analytical methods,” vol. 244, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.123173.
- [4] J. G. Bessa, L. Micheli, F. Almonacid, and E. F. Fernández, “Monitoring photovoltaic soiling: assessment, challenges, and perspectives of current and potential strategies,” *iScience*, vol. 24, no. 3, 2021, doi: 10.1016/j.isci.2021.102165.
- [5] A. Zeedan, A. Barakeh, K. Al-Fakhroo, F. Touati, and A. S. P. Gonzales, “Quantification of pv power and economic losses due to soiling in Qatar,” *Sustain.*, vol. 13, no. 6, 2021, doi: 10.3390/su13063364.
- [6] F. F. Ahmad, O. Rejeb, A. Kadir Hamid, M. Bettayeb, and C. Ghenai, “Performance analysis and planning of Self-Sufficient solar PV-Powered electric vehicle charging station in dusty conditions for sustainable transport,” *Transp. Res. Interdiscip. Perspect.*, vol. 27, no. September, 2024, doi: 10.1016/j.trip.2024.101214.

- [7] P. Borah, L. Micheli, and N. Sarmah, "Analysis of Soiling Loss in Photovoltaic Modules: A Review of the Impact of Atmospheric Parameters, Soil Properties, and Mitigation Approaches," *Sustain.*, vol. 15, no. 24, 2023, doi: 10.3390/su152416669.
- [8] D. K. Habibie *et al.*, "Peran Perusahaan Listrik Negara Sebagai Penyedia Fasilitas Dalam Rangka Penggunaan Kendaraan Bermotor Berbasis Listrik di Kota Pekanbaru," vol. 1, no. 2, pp. 192–200, 2023.
- [9] B. W. Dionova, M. Manfaluthy, A. Jaenul, and L. Prameswono, "Analisis Energi Dan Ekonomi Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik (SPKL) Berbasis Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)," vol. 14, no. 1, pp. 1–8, 2025.
- [10] I. Kusuma, R. A. S. Kusumoputro, and A. Iswadi, "Electric Vehicle Review : BEV , PHEV , HEV , or FCEV ?," vol. 10, no. 1, pp. 70–83, 2025.
- [11] K. Listrik, U. Spklu, and D. I. Wilayah, "ALI ZAINAL ABIDIN NIM : 23222335 (Program Studi Magister Teknik Elektro) INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG November 2024 ABSTRAK OPTIMASI LOKASI DAN KAPASITAS STASIUN PENGISIAN KENDARAAN LISTRIK UMUM (SPKLU) DI WILAYAH NIM : 23222335 (Program Studi Magister," vol. 23222335, no. November, 2024.
- [12] J. Olano, H. Camblong, J. A. López-Ibarra, and T. T. Lie, "Development of Energy Management Systems for Electric Vehicle Charging Stations Associated with Batteries: Application to a Real Case," *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 16, Aug. 2025, doi: 10.3390/app15168798.
- [13] I. P. Dharmawan, I. N. S. Kumara, and I. N. Budiastara, "PENGISIAN BATERAI KENDARAAN LISTRIK," vol. 8, no. 3, pp. 90–101, 2021.
- [14] J. Kajian, T. Mesin, V. No, A. J. Cornelis, and A. M. Romadoni, "ANALISIS EFEKTIVITAS INFRASTRUKTUR BANGUNAN SPKLU (Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum) DI INDONESIA MENUJU PROGRAM NZE (Net Zero Emission) TAHUN 2060 evaluasi aspek teknis SPKLU , pemetaan kualitatif deskriptif dengan dukungan Kendaraan Listrik ," vol. 9, no. 2, pp. 18–24, 2024.

- [15] F. S. Kamajaya and M. M. Ulya, "Analisis Teknologi Charger Untuk Kendaraan Listrik - Review," vol. 6, no. 3, pp. 163–166, 2015.
- [16] J. E. Elektro, H. B. Nurjaman, and T. Purnama, "Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Sebagai Solusi Energi Terbarukan Rumah Tangga."
- [17] M. Walters and G. K. Venayagamoorthy, "Situational awareness indices of solar PV power generation under temporal weather conditions for near real-time planning and operation," vol. 402, no. October, 2025.
- [18] S. R. Tangga, "Analisis Biaya Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Atap Skala Rumah Tangga Analysis of Household Scale Solar Power Plant Roof Costs," vol. 3, no. 2, 2020.
- [19] I. Kamil, M. C. Bagaskoro, and S. W. Susilo, "RANCANG BANGUN PLTS ON-GRID SEBAGAI PENUNJANG KELISTRIKAN," vol. 2, no. September, pp. 73–82, 2024.
- [20] F. Rafli *et al.*, "Analisis Plts Atap On Grid Di Pesantren Al Mukaromah," vol. 11, no. 1, pp. 48–56, 2024.
- [21] D. Teknik and U. G. Mada, "Analisis Kinerja Sistem Photovoltaic Management Platform pada Implementasi Sistem PLTS Hybrid Berbasis Internet of Things Area R & D Syngenta Cikampek," vol. 5, no. 2, pp. 75–83, 2024.
- [22] D. Annisa, J. T. Mesin, P. Negeri, and U. Pandang, "ANALISIS KINERJA SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA ON-GRID 10 kWp PADA MESIN PACKER PABRIK TONASA V," 2023.
- [23] "Buku PLTS.pdf."
- [24] G. Patrianaya, M. Wirsuyana, R. S. Hartati, and I. B. Gede, "Metode Maximum Power Point Tracking pada Panel Surya: Sebuah Tinjauan Literatur," pp. 211–224.
- [25] H. I. Hazim, K. A. Baharin, C. K. Gan, and A. H. Sabry, "applied sciences Review on Optimization Techniques of PV / Inverter Ratio for Grid-Tie PV

Systems,” 2023.

- [26] D. L. Pangestuningtyas, “ANALISIS PENGARUH SUDUT KEMIRINGAN PANEL SURYA TERHADAP RADIASI MATAHARI YANG DITERIMA OLEH PANEL SURYA TIPE LARIK TETAP Metode,” pp. 0–7.
- [27] I. Alsaïdan, M. Bilal, M. Alaraj, and M. Rizwan, “A Novel EA-Based Techno – Economic Analysis of Charging System for Electric Vehicles : A Case Study of Qassim Region , Saudi Arabia,” pp. 1–31, 2023.
- [28] P. Kemiringan, S. Dan, and A. Mata, “ANGIN PADA ON GRID PV SYSTEM DI KUTAJAYA,” vol. 10, no. 1, pp. 53–64, 2024.
- [29] A. Pengaruh, B. Terhadap, D. Keluaran, D. Oleh, P. Listrik, and T. Surya, “Schrodinger,” vol. 4, no. 1, pp. 77–90, 2023.
- [30] S. Zakaria, S. Zahurul, N. Hanis, C. Wabuge, M. Altimania, and J. Uddin, “Dust impact on solar PV performance : A critical review of optimal cleaning techniques for yield enhancement across varied environmental conditions,” *Energy Reports*, vol. 12, no. December 2023, pp. 1121–1141, 2024, doi: 10.1016/j.egy.2024.06.024.
- [31] P. Studi, T. Elektro, J. T. Elektro, D. A. N. Informasi, F. Teknik, and U. Tidar, “Analisis Dampak Soiling Debu Polutan Industri Terhadap Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya di Kawasan Industri Cikarang Analisis Dampak Soiling Debu Polutan Industri Terhadap Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya di Kawasan Industri Cikarang,” 2025.
- [32] V. No, T. Surya, P. Dengan, S. O. Di, and J. D. Kapasitas, “Jurnal Kreativitas Teknologi dan Komputer,” vol. 16, no. 7, pp. 78–83, 2025.