

**ANALISIS MODEL STOKASTIK DAN TEKNO-EKONOMIS UNTUK
STASIUN PENGISIAN KENDARAAN LISTRIK UMUM (SPKLU)
DENGAN SUMBER ENERGI PLTS *HYBRID***

(Skripsi)

Oleh

EIKEL SURANTA BANGUN

2115031101



**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2025

ABSTRAK

ANALISIS MODEL STOKASTIK DAN TEKNO-EKONOMIS UNTUK STASIUN PENGISIAN KENDARAAN LISTRIK UMUM (SPKLU) DENGAN SUMBER ENERGI PLTS *HYBRID*

Oleh

EIKEL SURANTA BANGUN

Percepatan adopsi kendaraan listrik (EV) di negara berkembang seperti Indonesia menghadapi dua tantangan utama: keterbatasan infrastruktur pengisian daya dan ketergantungan pada jaringan listrik berbasis bahan bakar fosil. Penelitian ini mengusulkan dan mengevaluasi solusi Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU) berbasis sistem hibrida *Photovoltaic* (PV) - Grid - Baterai. Metodologi penelitian mengintegrasikan dua pendekatan utama: (1) model antrian stokastik berbasis data yang menggunakan proses Poisson dan rantai Markov untuk mensimulasikan secara realistis dinamika kedatangan dan antrian EV; dan (2) analisis tekno-ekonomis komprehensif menggunakan perangkat lunak HOMER dan PVSyst untuk mengoptimalkan konfigurasi sistem di bawah berbagai skenario kebijakan. Hasil simulasi stokastik menunjukkan probabilitas jangka panjang sebesar 37,9% sistem mengalami kelebihan beban, yang mengakibatkan pembentukan antrian yang signifikan dan menekankan pentingnya desain sistem yang andal. Sementara itu, hasil analisis tekno-ekonomis menunjukkan bahwa konfigurasi sistem dengan PV 60 kWp dan dukungan skema *Feed-in Tarif* (FIT) 100% merupakan pilihan paling optimal secara finansial, dengan *Net Present Cost* (NPC) terendah sebesar Rp 1,62 miliar dan *Levelized Cost of Energy* (LCOE) sebesar Rp 760,79/kWh, serta *renewable fraction* mencapai 65%. Studi ini menyimpulkan bahwa dukungan kebijakan pemerintahan yang kuat, seperti skema FIT yang kompetitif, merupakan faktor kunci dalam mendorong pengembangan infrastruktur EV yang berkelanjutan dan layak secara ekonomi oleh sektor swasta.

Kata kunci : Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU), Pemodelan Stokastik, Teori Antrian, *Photovoltaic* (PV), Sistem Energi Hibrida, Analisis Tekno-Ekonomis, *Feed-in Tariff* (FIT) Indonesia.

ABSTRACT

STOCHASTIC AND TECHNO-ECONOMIC MODEL ANALYSIS FOR PUBLIC ELECTRIC VEHICLE CHARGING STATION (SPKLU) WITH HYBRID PLTS ENERGY SOURCE

By

EIKEL SURANTA BANGUN

The acceleration of electric vehicle (EV) adoption in developing countries such as Indonesia faces two major challenges: limited charging infrastructure and reliance on fossil fuel-based electricity grids. This study proposes and evaluates a Public Electric Vehicle Charging Station (SPKLU) powered by a hybrid Photovoltaic (PV)-Grid-Battery system. The research methodology integrates two main approaches: (1) a data-driven stochastic queuing model using Poisson processes and Markov chains to realistically simulate EV arrival and queuing dynamics; and (2) a comprehensive techno-economic analysis using HOMER and PVSyst software to optimize system configuration under various government policy scenarios. Stochastic simulation results show a long-term probability of 37,9% experiences overload, leading to significant queuing and underscoring the importance of a robust system design. Meanwhile, the techno-economic analysis indicates that a system configuration with 60 kWp PV supported by a 100% Feed-in Tariff (FIT) scheme is the most financially optimal, resulting in the lowest Net Present Cost (NPC) of IDR 1.62 billion and the lowest Levelized Cost of Energy (LCOE) of IDR 760.79/kWh, with a renewable fraction of 65%. The study concludes that strong government policy support, such as competitive FIT schemes, is a crucial factor in enabling the development of sustainable and economically viable EV infrastructure by the private sector.

Keywords: Electrical Vehicle Charging Station(EVCS), Stochastic Modeling, EV traffic Pattern, Photovoltaic (PV), Hybrid Energy Systems, Techno-Economic Analysis, Feed-in Tariff (FIT) in Indonesia.

**ANALISIS MODEL STOKASTIK DAN TEKNO-EKONOMIS UNTUK
STASIUN PENGISIAN KENDARAAN LISTRIK UMUM (SPKLU)
DENGAN SUMBER ENERGI PLTS *HYBRID***

Oleh

EIKEL SURANTA BANGUN

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2025

Judul Skripsi

: **ANALISIS MODEL STOKASTIK DAN TEKNO-EKONOMIS UNTUK STASIUN PENGISIAN KENDARAAN LISTRIK UMUM (SPKLU) DENGAN SUMBER ENERGI PLTS HYBRID**

Nama Mahasiswa

: **Eikel Suranta Bangun**

Nomor Pokok Mahasiswa

: **2115031101**

Jurusan

: **Teknik Elektro**

Fakultas

: **Teknik**

MENYETUJUI

1. **Komisi Pembimbing**

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

**Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc.
I.P.M.**
NIP. 19720923 200012 1 002



2. **Mengetahui**

Ketua Jurusan Teknik Elektro

Ketua Program Studi Teknik Elektro

Herlinawati, S.T., M.T.
NIP. 19710314 199903 2 001

Sumadi, S.T., M.T.
NIP. 19731104 200003 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

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



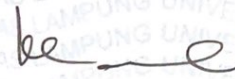
Sekretaris

: Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc., I.P.M.



Penguji

Bukan Pembimbing : Khairudin, S.T., M.Sc., Ph.D. Eng



2. Dekan Fakultas Teknik



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

NIP. 19750928 200112 1 002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 22 Juli 2025

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepanjang pengetahuan 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 Agustus 2025



Eikel Suranta Bangun

NPM. 2115031101

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Medan, Sumatera Utara pada tanggal 11 Juli 2004, sebagai anak bungsu dari 5 bersaudara, dari bapak Mathin Luther Bangun dan Ibu Triyanti Robasa Br Sitinjak.

Riwayat pendidikan penulis dimulai dari Theresia *Kids School* pada tahun 2008, Sekolah Dasar Free-Methodist 1 Medan pada tahun 2009 hingga tahun 2015, Sekolah Menengah Pertama Negeri (SMPN) 18 Medan pada tahun 2015 hingga tahun 2018, dan Sekolah Menengah Atas Negeri (SMAN) 12 Medan pada tahun 2018 hingga tahun 2021.

Penulis menjadi mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung, pada tahun 2021 melalui jalur SBMPTN. Selama menjadi mahasiswa penulis berkesempatan tergabung dalam keanggotaan asisten Laboratorium Sistem Tenaga Listrik dari tahun 2023. Selama menjadi asisten, penulis berkesempatan menjadi asisten dosen mata kuliah Menggambar Teknik tahun 2023 hingga 2024 dan asisten mata kuliah Praktikum Analisa Sistem Tenaga tahun 2024. Selain itu, penulis juga tergabung dalam organisasi intra kampus Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (HIMATRO) sebagai anggota Departemen Pengembangan Keteknikan Divisi Penelitian dan Pengembangan tahun 2022 hingga 2023. Penulis melaksanakan kerja praktik di UP3 Tanjung Karang yang tergabung dalam divisi Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) dan melanjutkan membuat laporan yang berjudul **“ANALISIS JATUH TEGANGAN /DROP VOLTAGE JARINGAN TEGANGAN MENENGAH 20 KV PADA PENYULANG HUJAN PT PLN (PERSERO) ULP TELUK BETUNG MENGGUNAKAN ETAP 16.0.0”**. Selain itu, penulis juga berkesempatan melaksanakan magang mandiri di PT. GMF AeroAsia pada bidang *component services* yang tergabung dalam divisi *electrical and battery shop* (TCC -4) dan melanjutkan membuat laporan magang yang berjudul **“PENGUJIAN DIELECTRIC TEST TERHADAP KINERJA INTEGRATED DRIVE GENERATOR (IDG) PADA PESAWAT BOEING P/N 761574B & AIRBUS P/N 1706903 DI PT. GMF AEROASIA Tbk”**.

Karya ini kupersembahkan untuk

Bapak dan Mamak Tersayang

Marthin Luther Bangun dan

Tri Yanti Robasa Br Sitinjak

Serta Kakak-kakak saya :

Ester Br Bangun

Dwi Br Bangun

Kriahenta Br Bangun

Mutiara Br Bangun

Keluarga Besar, Dosen, Teman

dan Almamater

MOTTO

"Janganlah hendaknya kamu kuatir tentang apapun juga, tetapi nyatakanlah dalam segala hal keinginanmu kepada Allah dalam doa dan permohonan dengan ucapan syukur. Damai sejahtera Allah, yang melampaui segala akal, akan memelihara hati dan pikiranmu dalam Kristus Yesus."

(FILIPPI 4 : 6-7)

Measure yourself not by the speed of others, but by the strength it takes to keep going

**Belajar apapun itu yang Tuhan kasih,
lewatin saja, meskipun rasa nya tidak siap**

SANWACANA

Segala puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa yang memberikan berkat berkelimpahan dan kebijakan sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “ANALISIS MODEL STOKASTIK DAN TEKNO-EKONOMIS UNTUK STASIUN PENGISIAN KENDARAAN LISTRIK UMUM (SPKLU) DENGAN SUMBER ENERGI PLTS *HYBRID*” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

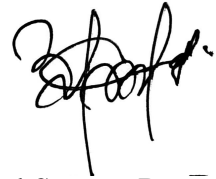
1. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A. IPM., ASEAN.Eng., selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Ibu Herlinawati, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.
4. Bapak Sumadi, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Universitas Lampung.
5. Bapak Ir. Herri Gusmedi, S.T., I.P.M. selaku dosen pembimbing utama yang telah membimbing dengan tulus dan penuh kesabaran, serta memberikan arahan, motivasi, dan pandangan hidup kepada penulis di setiap kesempatan dengan baik dan ramah layaknya seorang ayah.
6. Bapak Dr. Eng. Ir. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc., I.P.M. selaku dosen pembimbing pendamping yang telah memberikan bimbingan, arahan, nasihat dan saran kepada penulis dengan baik dan ramah.
7. Bapak Khairudin, S.T., M.Sc., Ph.D. Eng. selaku dosen penguji yang memberikan kritik, masukan, dan saran yang membangun kepada penulis.
8. Bapak Misfa Susanto, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku dosen Pembimbing Akademik (PA) yang telah memberikan nasihat, arahan dengan baik dan tulus kepada penulis selama perkuliahan.

9. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah memberikan pengajaran dan pandangan hidup selama perkuliahan.
10. Staff administrasi Jurusan Teknik Elektro dan Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah membantu penulis dalam hal administrasi.
11. Bapak dan Ibu Dosen Laboratorium STL dan Pak Rachman yang selalu memberikan pengajaran, dukungan dan fasilitas dalam melakukan penelitian kepada penulis.
12. Kepada bapak dan mamak ku yang selalu senantiasa menemani penulis dan dukungan yang tak pernah habisnya meskipun terhalang oleh jarak. Serta yang selalu mempercayai setiap proses yang penulis jalani selama berkuliah dan untuk jerih payah yang dikeluarkan untuk dapat memfasilitasi perkuliahan penulis meskipun sedang mengalami kondisi yang berat. Dan kepada kak ua, ngah, dan uda yang selalu memberikan kebahagiaan, dukungan moral dan tempat bertukar pikiran kepada penulis semasa berkuliah.
13. Grup kuliah buat lulus yaitu Mahendra, Fawwaz, Ananda, Dona, dan Serly yang menjadi sahabat yang menemani dalam setiap perkuliahan penulis dari awal berkuliah hingga akhir, yang selalu siap sedia membantu dalam setiap kesulitan yang dihadapi penulis dan mengajak penulis untuk bisa *explore* lampung.
14. Keluarga asisten laboratorium STL 21 Tegar, Imam, Frissa, Nadia, Rasel, Desta, Rasyid dan Jerry yang selalu membantu dalam menyelesaikan skripsi dan memberikan momen terbaik sebagai keluarga selama di laboratorium STL. Serta Bagus yang menjadi teman seperbimbingan dan menjadi teman berbagi pengetahuan saat menyelesaikan skripsi.
15. Ruth, Ratu, dan Natal selaku sahabat penulis sedari SD yang selalu memberikan kebahagiaan dan motivasi saat awal kuliah hingga akhir perkuliahan ini.
16. Ana dan Fini yang menemani sedari KKN hingga akhir perkuliahan yang menjadi tempat untuk melepas tawa dan bahagia serta selalu hadir di setiap momen penting perkuliahan.

17. Teman – teman konsentrasi Teknik Tenaga Listrik yang selalu memberikan bantuan dan tawa selama berkuliah terutama di fase skripsi dan kepada Excalto 21 serta Himatro.
18. Diri sendiri, Eikel Suranta Bangun yang tetap bertahan dan berhasil melewati ditengah banyak kesulitan yang ia hadapi dan selalu meyakinkan diri untuk bisa terhadap proses yang sedang dialami.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi kesempurnaan skripsi ini yang akan datang. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Bandar Lampung, 13 Agustus 2025



Eikel Suranta Bangun
NPM. 2115031101

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	ii
<i>ABSTRACT</i>	iii
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI.....	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xviii
DAFTAR TABEL.....	xx
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	3
1.3 Rumusan Masalah	3
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
1.6 Hipotesis	4
1.7 Sistematika Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Penelitian Terdahulu.....	6
2.2 Kendaraan Listrik/ <i>Electric Vehicle</i>	8
2.2.1 <i>Battery Electric Vehicle</i> (BEV)	9
2.2.2 <i>HYBRID Electric Vehicle</i> (HEV).....	10

2.2.3 <i>Plug-in HYBRID Electric Vehicle (PHEV)</i>	11
2.2.4 <i>Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV)</i>	12
2.3 Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik (<i>Electric Vehicle Charging Station</i>)	13
2.3.1 <i>Charging Stasion Umum (SKPLU)</i>	14
2.3.2 <i>Charging Stasion Rumahan (Residential)</i>	14
2.3.3 <i>Charging Stasion Komersil</i>	15
2.4 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)	16
2.4.1 PLTS <i>ON GRID</i>	16
2.4.2 PLTS <i>OFF GRID</i>	17
2.4.3 PLTS <i>HYBRID</i>	17
2.5 Sistem Penyimpanan Energi Pada Baterai	18
BAB III METODE PENELITIAN	20
3.1 Waktu dan Tempat Pelaksanaan	20
3.2 Alat dan Bahan	21
3.3 Tahapan Penelitian	21
3.4 Diagram Alir Penelitian	23
3.5 Analisis Teknis	24
3.5.1 Menentukan Lokasi Pemasangan Panel Surya	24
3.5.2 Potensi Energi Surya	24
3.5.3 Menentukan Jumlah Modul Panel Surya	25
3.5.4 Menghitung Kapasitas <i>Array</i> Panel Surya	25
3.5.5 Menentukan Kapasitas Daya Inverter	25
3.5.6 Menghitung Konfigurasi Modul Panel Surya	26
3.5.7 Menghitung Kapasitas Baterai	26
3.5.8 Menghitung Evaluasi Kinerja Sistem PLTS	27
3.5.9 Skema SPKLU dengan Sumber Energi PLTS <i>HYBRID</i>	28

3.6 Analisis Ekonomis.....	30
3.6.1 Biaya Modal (<i>Capital Expenditure</i>)	30
3.6.2 Biaya Operasional dan Pemeliharaan (<i>O&M Cost</i>)	30
3.6.3 Biaya Operasional (<i>Operating Cost</i>)	30
3.6.4 Biaya <i>Levelized Cost of Energy (LCOE)</i>	32
3.6.5 <i>Net Present Cost (NPC)</i>	33
3.6.6 <i>Net Present Value (NPV)</i>	33
3.6.7 <i>Profitability Index (PI)</i>	34
3.6.8 <i>Feed In Tarif (FIT)</i>	35
3.7 Model Stokastik.....	36
3.7.1 Sistem Antrian	37
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	43
4.1 Lokasi Pemasangan Panel Surya	43
4.2 Pemodelan Data Teoritis	44
4.3 Pemodelan Stokastik	48
4.3.1 Model Stokastik Menggunakan Distribusi <i>Poisson</i>	48
4.3.2 Model Stokastik Menggunakan <i>Markov Chain</i>	56
4.4 Data Iradiasi Matahari dan Suhu	63
4.5 Pemilihan Komponen	65
4.5.1 Pemilihan Komponen Panel Surya	65
4.5.2 Pemilihan Komponen Inverter	66
4.5.3 Pemilihan Komponen Baterai	67
4.6 Design 3D Sistem PLTS.....	68
4.7 Analisis Teknis	69
4.7.1 Menentukan Jumlah Modul Panel Surya	69
4.7.2 Menghitung Kapasitas Array Panel Surya	70

4.7.3 Menentukan Kapasitas Daya Inverter.....	70
4.7.4 Menghitung Konfigurasi Modul Panel Surya.....	70
4.7.5 Konfigurasi sistem PLTS pada <i>Software</i> PVSyst.....	71
4.7.6 Menghitung Kapasitas Baterai.....	72
4.7.7 Analisis Potensi Energi.....	73
4.8 Analisis Ekonomis.....	80
4.8.1 Biaya Modal (<i>Capital Expenditure</i>)	80
4.8.2 Biaya Operasional dan Pemeliharaan (<i>O&M COST</i>)	81
4.8.3 Biaya Operasional (<i>Operating Cost</i>)	82
4.8.4 Biaya LCOE (<i>Levelized Cost Of Energy</i>)	86
4.8.5 <i>Net Present Cost (NPC)</i>	88
4.8.6 <i>Net Present Value (NPV)</i>	91
4.8.7 Analisis Ekonomis Dengan Skenario <i>Feed In Tarif (FIT)</i>	104
BAB V PENUTUP	108
5.1 Kesimpulan.....	108
5.2 Saran.....	109
DAFTAR PUSTAKA	110
LAMPIRAN.....	116

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2. 1 Struktur dari BEV	9
Gambar 2. 2 Struktur dari HEV	10
Gambar 2. 3 Struktur dari PHEV	11
Gambar 2. 4 Struktur dari FCEV	12
Gambar 2. 5 SKPLU	14
Gambar 2. 6 Charge Station Residential	15
Gambar 2. 7 Charge Station Komersial	15
Gambar 2. 8 PLTS ON GRID	16
Gambar 2. 9 PLTS OFF GRID	17
Gambar 2. 10 PLTS HYBRID	18
Gambar 2. 11 Skema SOC dan DOD Pada Baterai	19
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian	23
Gambar 3. 2 Skema SPKLU dengan Sumber Energi PLTS HYBRID	29
Gambar 3. 3 Sistem Antrian Single Server Single Phase	40
Gambar 3. 4 Sistem Antrian Multi Server Single Phase	40
Gambar 3. 5 Sistem Antrian Single Server Multi Phase	40
Gambar 3. 6 Sistem Antrian Multi Server Single Phase	41
Gambar 4. 1 Atap Bangunan EL'S Coffee Roastery	43
Gambar 4. 2 Rata-Rata Kedatangan EV	45
Gambar 4. 3 Grafik Keacakan Jumlah Kedatangan EV Dengan Distribusi Poisson	48
Gambar 4. 4 Grafik Antrian SPKLU Selama 24 Jam	50
Gambar 4. 5 Grafik Average Backlog VS EV Arrival Rate	53

Gambar 4. 6 Grafik Charging Station Utilization VS EV Arrival Rate.....	55
Gambar 4. 7 Grafik Konvergensi Distribusi Markov Chain dengan Data Teoritis	58
Gambar 4. 8 Grafik Konvergensi Distribusi Markov Chain dengan Data Real.....	61
Gambar 4. 9 Grafik Global Horizontal Irradiation dan Clearness Index El's Coffee Roastery.....	63
Gambar 4. 10 Grafik Daily Temperature di El's Coffee Roastery	64
Gambar 4. 11 Design 3D Sistem PLTS Menggunakan Software Helioscope	68
Gambar 4. 12 Konfigurasi Sistem PLTS pada Software PVSyst.....	72

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3. 1 Jadwal Penelitian.....	20
Tabel 4. 1 Profil Kedatangan Mobil Listrik/EV per Jam	44
Tabel 4. 2 Profil Beban SPKLU El's Coffee Roastery	46
Tabel 4. 3 Data Stokastik Jumlah Kedatangan EV Dengan Distribusi Poisson.....	49
Tabel 4. 4 State Markov Chain	57
Tabel 4. 5 Iterasi Markov Chain dengan Data Teoritis.....	58
Tabel 4. 6 Iterasi Markov Chain dengan Data Real	61
Tabel 4. 7 Data Iradiasi Matahari, Clearness Index, dan Suhu	64
Tabel 4. 8 Spesifikasi Panel Surya	66
Tabel 4. 9 Spesifikasi Inverter	66
Tabel 4. 10 Spesifikasi Baterai.....	67
Tabel 4. 11 Potensi Energi PLTS HYBRID dengan kapasitas PV 60 kW	74
Tabel 4. 12 Potensi Energi PLTS HYBRID dengan kapasitas PV 55 kW	75
Tabel 4. 13 Potensi Energi PLTS HYBRID dengan kapasitas PV 50 kW	76
Tabel 4. 14 Keterangan Hasil Output Energi PLTS HYBRID	77
Tabel 4. 15 Biaya Modal untuk PV dengan kapasitas 60 kW.....	80
Tabel 4. 16 Biaya Modal untuk PV dengan kapasitas 55 kW.....	81
Tabel 4. 17 Biaya Modal untuk PV dengan kapasitas 50 kW.....	81
Tabel 4. 18 Analisa Ekonomis/ Discounted Cash Flow Untuk Kapasitas PV 60 kW dengan Skenario FIT 100%	92
Tabel 4. 19 Analisa Ekonomis/ Discounted Cash Flow Untuk Kapasitas PV 55 kW dengan Skenario FIT 100%	93

Tabel 4. 20 Analisa Ekonomis/ Discounted Cash Flow Untuk Kapasitas PV 50 kW dengan Skenario FIT 100%	94
Tabel 4. 21 Analisa Ekonomis/ Discounted Cash Flow Untuk Kapasitas PV 60 kW dengan Skenario FIT 65%	96
Tabel 4. 22 Analisa Ekonomis/ Discounted Cash Flow Untuk Kapasitas PV 55 kW dengan Skenario FIT 65%	97
Tabel 4. 23 Analisa Ekonomis/ Discounted Cash Flow Untuk Kapasitas PV 50 kW dengan Skenario FIT 65%	98
Tabel 4. 24 Analisa Ekonomis/ Discounted Cash Flow Untuk Kapasitas PV 60 kW dengan Skenario Tidak ada FIT	100
Tabel 4. 25 Analisa Ekonomis/ Discounted Cash Flow Untuk Kapasitas PV 55 kW dengan Skenario Tidak ada FIT	101
Tabel 4. 26 Analisa Ekonomis/ Discounted Cash Flow Untuk Kapasitas PV 50 kW dengan Skenario Tidak Ada FIT	102
Tabel 4. 27 Saat skenario FIT 100 % sebesar Rp. 1.444/kWh.....	104
Tabel 4. 28 Saat skenario FIT 65% sebesar Rp. 938,6/kWh.....	105
Tabel 4. 29 Saat skenario Tidak ada FIT	105

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan berkembangnya teknologi saat ini penggunaan energi listrik juga semakin bertambah. Sumber daya alam saat ini semakin berkurang, apalagi penggunaan energi listrik dari bahan bakar fosil dalam jangka panjang hanya akan menguras sumber daya alam[1]. Selain itu, pembakaran bahan bakar fosil menghasilkan emisi gas rumah kaca yang berkontribusi terhadap perubahan iklim dan pencemaran lingkungan. Oleh karena itu, diperlukan upaya transisi menuju energi bersih dan berkelanjutan. Salah satu solusi yang dapat diterapkan adalah pemanfaatan energi terbarukan, seperti energi surya, angin, dan hidro. Matahari merupakan sumber energi yang melimpah dan dapat dimanfaatkan melalui teknologi *Photovoltaic* (PV) untuk menghasilkan listrik secara langsung. Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) menjadi pilihan yang menarik karena potensinya yang besar di wilayah tropis seperti Indonesia.

Seiring dengan perkembangan energi terbarukan, industri transportasi juga mengalami perubahan signifikan dengan adanya kendaraan listrik. Sebagai negara yang terus berkembang, sejak tahun 2019 Pemerintah Indonesia telah memulai dengan dikeluarkannya Perpres No 55. Tahun 2019 tentang percepatan program kendaraan bermotor listrik berbasis baterai (*Battery Electric Vehicle*) untuk transportasi jalan[2]. Adanya regulasi ini akan mendorong pemanfaatan kendaraan listrik di Indonesia. Salah satu kelebihan dari pada kendaraan listrik ini adalah ramah lingkungan, karena tidak menghasilkan polusi yang dapat mencemarkan kualitas udara, dan dapat mengurangi efek rumah kaca, karena menghasilkan minim emisi CO_2 .

Namun, tantangan utama dalam adopsi kendaraan listrik adalah infrastruktur pengisian daya yang masih terbatas dan ketergantungan terhadap jaringan listrik (grid), yang sebagian besar masih menggunakan sumber energi fosil. Data menunjukkan bahwa jumlah Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum atau SPKLU yang tersedia saat ini tidak sebanding dengan jumlah kendaraan listrik yang ada. Banyak pengguna EV mengalami kesulitan menemukan stasiun pengisian daya yang tersedia, terutama di luar kota besar. Keterbatasan ini menyebabkan ketidaknyamanan dan menjadi penghalang bagi pengguna yang ingin beralih ke kendaraan listrik [3].

Dalam upaya untuk mengatasi masalah ini, pengembangan stasiun pengisian daya EV yang menggunakan tenaga surya dan baterai dapat menjadi solusi inovatif dan berkelanjutan. Pemanfaatan energi terbarukan seperti tenaga surya tidak hanya dapat mengurangi ketergantungan pada jaringan listrik konvensional, tetapi juga memberikan alternatif yang lebih ramah lingkungan [2], [3]. Sistem SPKLU berbasis PLTS *HYBRID (PV-Grid-Battery)* memanfaatkan energi matahari sebagai sumber utama untuk pengisian daya kendaraan listrik. Pada saat energi matahari tidak mencukupi, sistem penyimpanan baterai dapat berfungsi sebagai cadangan sebelum akhirnya mendapatkan suplai dari jaringan listrik (grid). Dengan memanfaatkan panel surya dan sistem penyimpanan baterai, stasiun pengisian daya ini dapat menyediakan energi yang cukup untuk pengisian kendaraan listrik secara berkelanjutan [3].

Hal ini sejalan dengan program pemerintah yang sedang menggalakkan pemanfaatan energi terbarukan yang dipasang di atap rumah untuk menyuplai sebagian kebutuhan energi untuk charging kendaraan listrik yang sesuai dengan Peraturan Menteri ESDM Nomor 49 Tahun 2018 tentang Penggunaan Sistem PLTS Atap oleh Konsumen PT PLN (Persero)[2] . Berdasarkan peraturan tersebut, integrasi dengan jaringan listrik juga memungkinkan mekanisme feed-in tarif (FIT) atau net metering, di mana kelebihan energi dari PLTS dapat dijual kembali ke grid untuk meningkatkan efisiensi ekonomi sistem. Dalam pengoperasian PLTS sebagai charging station memiliki tantangan utama yaitu fluktuasi produksi energi matahari yang bergantung pada kondisi cuaca dan waktu.

Oleh karena itu, dalam penelitian ini digunakan pendekatan berbasis model stokastik sistem antrian untuk mengevaluasi dan merencanakan waktu pengisian daya kendaraan listrik secara optimal. Model ini merepresentasikan ketidakpastian kedatangan kendaraan dan kapasitas layanan SPKLU, serta digunakan untuk menganalisis performa sistem seperti rata-rata panjang antrian, utilisasi sistem, dan potensi terjadinya *backlog*. Selain itu, penelitian ini juga dilakukan analisis teknis dan analisis ekonomis terhadap beberapa skenario *feed in tariff* (FIT) yang sesuai dengan regulasi pemerintah di Indonesia. Untuk mengetahui skenario FIT yang paling ekonomis dan optimal dalam implementasi SPKLU dengan sumber energi PLTS hybrid, dengan mempertimbangkan biaya dan keuntungan, serta kelayakan teknis dari setiap konfigurasi sistem.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Membuat model stokastik untuk menganalisis pola kedatangan EV dan potensi antrian pada SPKLU.
2. Analisis teknis untuk perencanaan PLTS *HYBRID* sebagai sumber energi untuk stasiun pengisian kendaraan listrik umum (SPKLU).
3. Analisis ekonomis dengan membandingkan berbagai skenario FIT untuk perencanaan PLTS *HYBRID* sebagai sumber energi untuk stasiun pengisian kendaraan listrik umum (SPKLU).

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan topik penelitian ini maka penulis dapat merumuskan masalah diantaranya sebagai berikut :

1. Bagaimana menentukan probabilitas kedatangan dan antrian EV saat melakukan pengisian daya pada charging station dengan model stokastik ?
2. Dari aspek ekonomis, manakah dari ketiga skenario FIT yang memiliki biaya paling rendah dan optimal ?

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada laporan kerja praktik adalah sebagai berikut :

1. Desain PLTS Atap yang direncanakan menyesuaikan lahan yang memungkinkan pemasangan PLTS.
2. Data iridiasi matahari diambil berdasarkan data solar GHI pada *Nasa Prediction of Worlwide Energy Resource*.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Memberikan gambaran penggunaan energi terbarukan yaitu pembangkit listrik tenaga surya sebagai sumber energi utama stasiun pengisian kendaraan listrik umum.
2. Memberikan gambaran penerapan kebijakan FIT dalam perencanaan stasiun pembangkit listrik kendaraan umum yang terintegrasi dengan PLTS *HYBRID*.
3. Memberikan kontribusi dalam memanfaatkan energi bersih untuk infrastruktur umum yaitu SPKLU.

1.6 Hipotesis

Model stokastik dalam pemodelan antrian EV dapat mengetahui tingkat efisiensi dari penggunaan SPKLU, serta dapat menggambarkan data antrian. Skenario *Feed-in Tarif* (FIT) dan kapasitas PV yang optimal akan menghasilkan biaya sistem terendah. Integrasi keduanya menciptakan charging station yang efisien, ekonomis, dan berkelanjutan.

1.7 Sistematika Penelitian

Sistematika penulisan proposal tugas akhir ini untuk memberikan gambaran terkait pembahasan yang ada didalam tugas akhir dan memudahkan pembaca dalam memahami isi tugas akhir. Adapun sistematika penulisan sebagai berikut :

BAB 1 – PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang latar belakang, tujuan penelitian, manfaat penelitian, rumusan masalah, hipotesis dan sistematika penulisan.

BAB II – TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tentang beberapa teori pendukung penelitian yang dijadikan sebagai pengantar dalam pemahaman terkait penelitian yang diperoleh dari sumber ilmiah seperti buku , jurnal ilmiah dan artikel yang digunakan sebagai panduan dalam penulisan laporan tugas akhir ini.

BAB III – METODOLOGI PENELITIAN

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

BAB IV – HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi tentang hasil dan pembahasan data simulasi serta Analisis data dari penelitian tugas akhir ini

BAB V – KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi tentang kesimpulan dari hasil pembahasan masalah yang dikaji dalam penelitian tugas akhir dan berisi saran yang berhubungan dengan pokok-pokok pembahasan tugas akhir ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Himabindu N., Santoshkumar Hampannavara, Deepa B., Swapna M dalam penelitian berjudul “*Analysis of microgrid integrated Photovoltaic (PV) Powered Electric Vehicle Charging Stations (EVCS) under different solar irradiation conditions in India: A way towards sustainable development and growth.*” [4] Menipisnya bahan bakar fosil dan meningkatnya kepedulian lingkungan telah membuka peluang bagi pengembangan energi bersih dan hijau menggunakan sumber energi terbarukan. Pengisian EV bertenaga fotovoltaiik (PV) secara substansial dapat mengurangi jejak karbon jika dibandingkan dengan pengisian EV berbasis jaringan utilitas konvensional. Penggabungan tenaga surya dan pengisian EV adalah salah satu metode terbaik dalam pembangunan berkelanjutan EV. Statistik terbaru menunjukkan bahwa penggunaan EV di berbagai kota di India telah berkembang dan pengembangan infrastruktur pengisian daya merupakan tantangan besar bagi negara padat penduduk. Pertama, model permintaan teoritis dan model stokastik untuk lalu lintas EV dan pola pemanfaatan sumber daya dikembangkan. Kedua, konfigurasi optimal dan penilaian tekno-ekonomi Stasiun Pengisian EV bertenaga surya (EVCS) di jaringan mikro dianalisis untuk empat kota India yang berbeda (Shillong, Bengaluru, Jaipur dan Kashmir) dengan kondisi radiasi matahari yang bervariasi. Terakhir, manfaat lingkungan dari EVCS bertenaga PV surya dinilai dan dianalisis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi dan efisiensi investasi yang optimal di setiap wilayah perkotaan sangat dipengaruhi oleh nilai iradiasi matahari dan *feed-in-tarif* (FIT) PLTS atap. Kashmir

dengan kondisi iradiasi matahari yang tinggi dapat berinvestasi dalam EVCS surya dibandingkan dengan kota-kota lain.

Santoshkumar Hampannavar, Suresh Chavhan, Swapna Mansani, Udaykumar R. Yaragatti dalam penelitian berjudul “*Electric Vehicle Traffic Pattern Analysis and Prediction in Aggregation Regions/Parking Lot Zones to Support V2G Operation in Smart Grid: A Cyber-Physical System Entity*”[5]. Dalam makalah ini model matematika untuk Analisis pola lalu lintas, prediksi dan pemanfaatan sumber daya Listrik Kendaraan (EV) di wilayah agregator/zona parkir diusulkan. Matematika yang diusulkan dan disajikan model pola lalu lintas EV/pemanfaatan sumber daya di kota pintar dapat digunakan untuk memperkirakan besarnya daya/tegangan tersedia/dibutuhkan oleh EV di wilayah agregator yang berbeda. Perkembangan komunikasi multiagen kerangka kerja berbasis (MAC) untuk komunikasi agregator ke EV dibahas. Agregasi V2G dalam distribusi jaringan membentuk bagian fisik dan sisi utilitas dengan penginderaan/komunikasi membentuk bagian Siber yang secara gabungan membentuk sistem Siber-Fisik. Simulasi dilakukan pada sistem uji bus IEEE 33/69 menggunakan MATLAB dan MOBILE C digunakan untuk MAC. Hasil yang diperoleh cukup menjanjikan dalam hal peningkatan tegangan profil dan mengurangi kehilangan daya.

Phap Vu Minh, Sang Le Quang and Manh-Hai Pham dalam penelitian berjudul “*Technical Economic Analysis of Photovoltaic-Powered Electric Vehicle Charging Stations under Different Solar Irradiation Conditions in Vietnam*”[6]. Saat ini, pasar kendaraan listrik (EV) berkembang pesat dan luas di banyak negara-negara di seluruh dunia. Meningkatkan infrastruktur energi ramah lingkungan untuk kendaraan listrik adalah solusi yang mungkin dilakukan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan membantu meningkatkan kualitas udara di perkotaan. Kendaraan listrik yang diisi listrik dari sistem fotovoltaik (PV) dapat menghasilkan emisi lebih sedikit dibandingkan konvensional EV dibebankan oleh jaringan utilitas. Oleh karena itu, kombinasi pembangkit listrik tenaga surya dan stasiun pengisian daya listrik adalah salah satu metode yang mungkin untuk mencapai pembangunan berkelanjutan di pasar kendaraan listrik saat ini. EV masuk kota-kota di Vietnam telah berkembang sangat pesat belakangan ini, namun infrastruktur

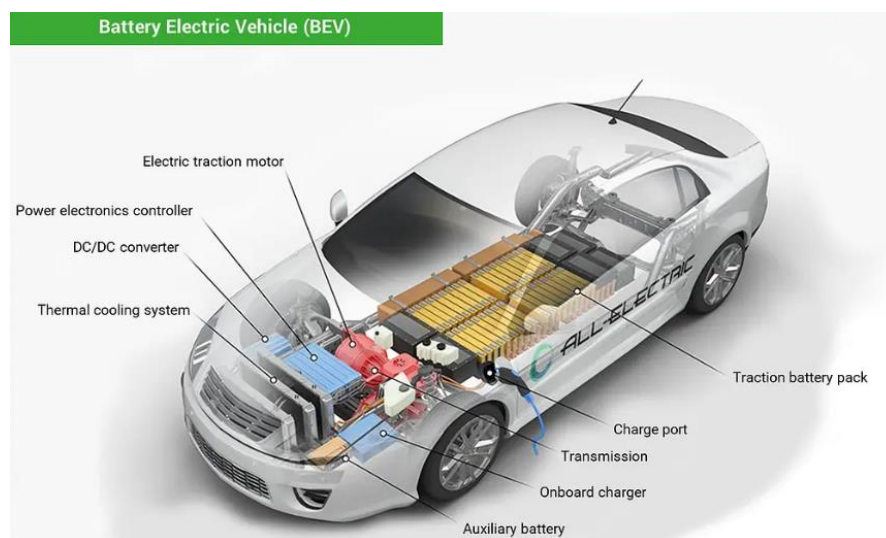
stasiun pengisian daya masih sangat terbatas, dan sebagian besar stasiun pengisian yang ada menggunakan listrik dari jaringan utilitas. Dalam hal ini makalah, konfigurasi optimal stasiun pengisian kendaraan listrik bertenaga PV di Analisis secara teknis dan secara ekonomis dalam kondisi iradiasi matahari yang berbeda di Vietnam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi optimal dan efisiensi investasi stasiun pengisian kendaraan listrik bertenaga PV di setiap perkotaan. Daerah ini sangat dipengaruhi oleh nilai iradiasi matahari dan harga feed-in tarif (FIT) dari tenaga surya atap kekuatan. Di Vietnam, wilayah dengan radiasi matahari tinggi, seperti Ho Chi Minh, mempunyai peluang lebih besar untuk berinvestasi di stasiun pengisian kendaraan listrik bertenaga PV dibandingkan wilayah lain dengan iradiasi matahari lebih rendah, seperti Hanoi.

2.2 Kendaraan Listrik/*Electric Vehicle*

Kendaraan listrik (*Electric Vehicle, EV*) adalah kendaraan yang digerakkan menggunakan energi listrik sebagai sumber tenaga utamanya, menggantikan bahan bakar fosil seperti bensin atau solar. Energi listrik ini disimpan dalam baterai atau sumber penyimpanan energi lainnya dan digunakan untuk menggerakkan motor listrik yang menjadi penggerak utama kendaraan[7]. Berbeda dengan kendaraan konvensional yang menggunakan mesin dan menghasilkan tenaga melalui proses pembakaran bahan bakar di dalam ruang bakar mesin. Proses ini menghasilkan energi panas yang kemudian dikonversi menjadi energi mekanik untuk menggerakkan kendaraan atau mesin lainnya, berbeda dengan kendaraan listrik yang lebih ramah lingkungan karena tidak menghasilkan emisi gas buang. Dalam sebuah kendaraan listrik, motor listrik adalah sumber energi mekanik atau tenaga penggerak. Energi mekanik ini dihasilkan dengan mengubah energi listrik yang tersimpan dalam baterai melalui konversi elektromagnetik. Karakteristik dari motor listrik adalah efisiensi konversi yang tinggi, tidak bising, dan berukuran relatif kecil. Motor listrik yang digunakan dalam kendaraan listrik antara lain motor dc, motor induksi, serta motor sinkron magnet permanen (PMSM)[8]. Terdapat beberapa jenis mobil listrik, di antara lain :

2.2.1 Battery Electric Vehicle (BEV)

Jenis mobil BEV disebut juga *All-Electric Vehicle* (AEV) adalah kendaraan listrik yang sepenuhnya ditenagai oleh energi listrik yang tersimpan dalam baterai. BEV tidak memiliki mesin pembakaran dalam (*Internal Combustion Engine*, ICE) dan bergantung sepenuhnya pada motor listrik sebagai penggerak utama. Energi yang disimpan dalam baterai digunakan untuk menggerakkan motor listrik yang kemudian menghasilkan tenaga mekanik untuk menggerakkan roda [9]. Mobil listrik ini menggunakan baterai *lithium-ion* untuk menyimpan dan menyalurkan energi listrik ke motor listrik yang menggerakkan mobil. Baterai tersebut dapat diisi ulang dengan menggunakan pengisi daya mobil listrik khusus (*EV charging station*).



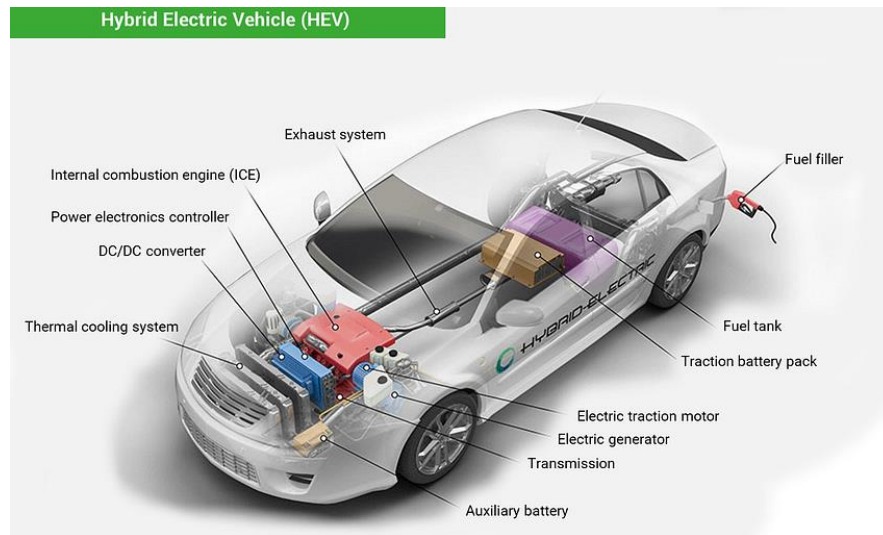
Gambar 2. 1 Struktur dari BEV

Battery Electric Vehicle (BEV) bekerja dengan menyimpan energi listrik dalam *traction battery pack*, yang kemudian didistribusikan melalui *power electronics controller* ke *electric traction motor* untuk menggerakkan kendaraan melalui *transmission*. Pengisian daya dilakukan melalui *charge port*, sementara *onboard charger* mengelola proses pengisian ulang baterai. *DC/DC converter* mengubah tegangan tinggi dari baterai utama menjadi tegangan lebih rendah untuk mendukung sistem elektronik kendaraan. Selama operasi, *thermal cooling system* berperan dalam menjaga suhu optimal baterai dan motor listrik agar tetap efisien dan aman.

Dengan sistem ini, BEV dapat beroperasi sepenuhnya menggunakan listrik tanpa menghasilkan emisi gas buang[8]

2.2.2 *HYBRID Electric Vehicle (HEV)*

HYBRID Electric Vehicle (HEV) adalah kendaraan yang menggunakan kombinasi mesin pembakaran dalam (*Internal Combustion Engine, ICE*) dan motor listrik sebagai sumber tenaga utama [10]. Berbeda dengan *Battery Electric Vehicle (BEV)* yang sepenuhnya mengandalkan listrik, HEV memanfaatkan tenaga listrik untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar dan mengurangi emisi gas buang.

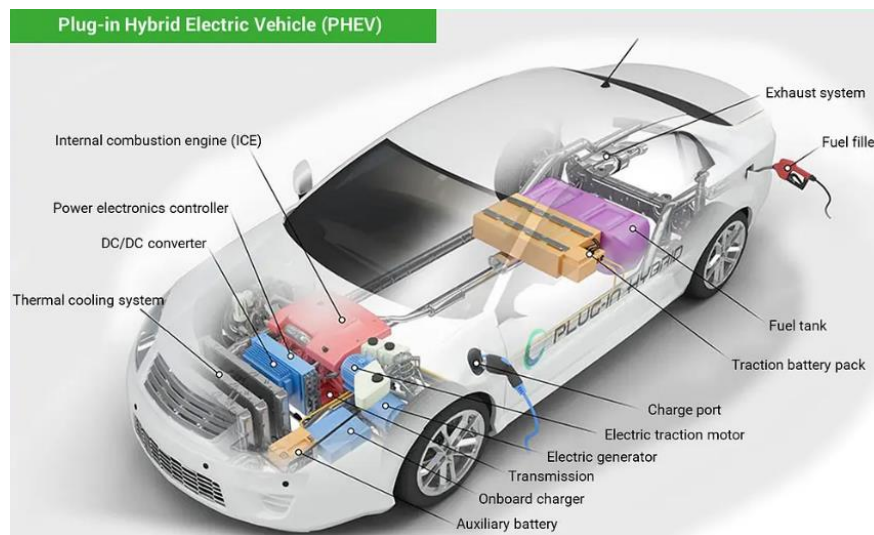


Gambar 2. 2 Struktur dari HEV

Cara kerja dari HEV ialah saat kecepatan rendah, kendaraan dapat berjalan menggunakan motor listrik, sementara pada kecepatan tinggi, mesin ICE mulai beroperasi untuk memberikan tenaga tambahan serta mengisi ulang baterai melalui generator. HEV juga dilengkapi dengan *regenerative braking*, yaitu sistem yang mengubah energi kinetik saat pengereman menjadi energi listrik untuk disimpan dalam baterai, sehingga meningkatkan efisiensi energi[8]. Dalam beberapa kondisi, ICE dan motor listrik dapat bekerja secara bersamaan untuk memberikan performa optimal. Berbeda dengan *Plug-in HYBRID Electric Vehicle (PHEV)*, HEV tidak memerlukan pengisian daya eksternal karena baterainya secara otomatis diisi ulang selama kendaraan beroperasi.

2.2.3 Plug-in HYBRID Electric Vehicle (PHEV)

Plug-in HYBRID Electric Vehicle (PHEV) adalah jenis kendaraan *HYBRID* yang memiliki baterai berkapasitas lebih besar dibandingkan *HYBRID Electric Vehicle* (HEV) dan dapat diisi ulang melalui sumber listrik eksternal (SKPLU). *Plug-in HYBRID Electric Vehicle* (PHEV) memiliki keunggulan utama dalam efisiensi energi dan fleksibilitas penggunaan. Dengan baterai berkapasitas lebih besar, PHEV dapat beroperasi sepenuhnya dalam mode listrik untuk perjalanan jarak pendek, mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi gas buang. Saat daya baterai habis, kendaraan secara otomatis beralih ke *mode HYBRID*. PHEV juga memberikan fleksibilitas pengisian daya, karena dapat diisi melalui stasiun pengisian listrik[11].



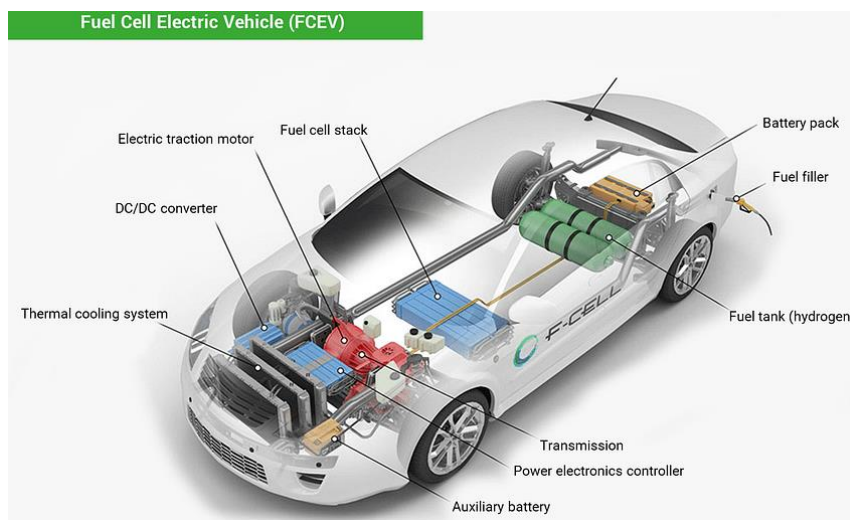
Gambar 2. 3 Struktur dari PHEV

Cara kerja mobil listrik PHEV biasanya memulai dengan “*all-electric mode*” dan berjalan menggunakan energi listrik hingga baterai habis. Beberapa model jenis mobil ini bisa beralih ke *HYBRID mode* ketika laju kendaraan pada posisi stabil di jalan raya, umumnya di atas 60 atau 70 mil per jam. Setelah baterai kosong, mesin mengambil alih. Mobil pun beroperasi sebagai *HYBRID non-plug-in konvensional*. Selain bisa dihubungkan dengan sumber daya listrik dari luar sistem, baterai mobil PHEV juga dapat diisi oleh perputaran ICE (*internal combustion engine*) atau melalui pengereman regeneratif[8]. Selama pengereman, motor bertindak sebagai generator. Energi yang dihasilkan digunakan untuk mengisi baterai.

2.2.4 Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV)

Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) adalah kendaraan listrik yang menggunakan sel bahan bakar (*fuel cell*) untuk menghasilkan listrik dari hidrogen sebagai sumber energi utamanya. Berbeda dengan *Battery Electric Vehicle* (BEV) yang menyimpan energi dalam baterai, FCEV menghasilkan listrik secara *real-time* melalui reaksi kimia antara hidrogen dan oksigen di dalam *fuel cell stack* untuk menggerakkan motor listrik.

Kendaraan listrik sel bahan bakar memiliki tangki gas yang digunakan untuk menyimpan hidrogen murni, tangki dapat diisi bahan bakar hanya dalam beberapa menit, mirip dengan cara pengisian kendaraan mesin konvensional (ICE). FCEV dapat menempuh jarak sekitar 300 mil dengan satu tangka hidrogen murni.



Gambar 2. 4 Struktur dari FCEV

Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) bekerja dengan mengubah hidrogen menjadi listrik melalui reaksi elektrokimia di *fuel cell stack*, menghasilkan listrik untuk menggerakkan *electric traction motor* serta hanya menghasilkan uap air sebagai emisi. Hidrogen disimpan dalam *fuel tank* bertekanan tinggi dan dialirkan ke fuel cell untuk menghasilkan listrik yang kemudian didistribusikan melalui *power electronics controller* ke motor penggerak atau disimpan dalam *battery pack* sebagai cadangan energi. *DC/DC converter* mengatur tegangan listrik agar sesuai dengan kebutuhan sistem kendaraan, sementara *thermal cooling system* menjaga

suhu optimal agar sistem tetap efisien. Listrik yang dihasilkan kemudian diteruskan ke *transmission* untuk menggerakkan roda kendaraan, memberikan performa tinggi dengan emisi nol dan waktu pengisian hidrogen yang cepat[8].

Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) memiliki beberapa keuntungan utama dibandingkan kendaraan konvensional dan kendaraan listrik berbasis baterai (BEV). FCEV menghasilkan nol emisi, karena hanya menghasilkan uap air sebagai produk sampingan, sehingga lebih ramah lingkungan. Waktu pengisian bahan bakarnya jauh lebih cepat dibandingkan BEV, hanya memerlukan sekitar 3-5 menit untuk mengisi ulang hidrogen, memungkinkan perjalanan jarak jauh tanpa waktu tunggu yang lama. Selain itu, FCEV memiliki jarak tempuh lebih panjang dibandingkan BEV dengan sekali pengisian, menjadikannya lebih cocok untuk transportasi jarak jauh dan kendaraan berat.

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

EVCS adalah infrastruktur yang digunakan untuk mengisi kendaraan listrik seperti mobil listrik, mobil *HYBRID* dan mobil listrik angkutan umum. Di negara-negara yang kendaraan listriknya sudah banyak EV *public charging* biasanya disediakan oleh perusahaan penyedia tenaga listrik. Produsen kendaraan listrik sudah menyiapkan konverter sendiri yang langsung dipasang pada *station charging* sehingga memudahkan pemilik kendaraan untuk melakukan pengisian. Selain itu, stasiun pengisian juga menyediakan fasilitas pengisian berdasarkan jenis tegangan yaitu AC atau DC, fitur monitoring saat pengisian, sehingga dapat digunakan secara aman oleh masyarakat. Pengisi daya EV saat ini tersedia dalam tiga model/tingkatan yang berbeda.

Station charging menyediakan berbagai macam konektor khusus untuk pengisian mobil listrik sesuai dengan standar yang sekarang ini digunakan di dunia. Untuk charging dengan tegangan AC digunakan konektor J1772, Mennekes dan BG/T, sedangkan untuk charging dengan tegangan DC menggunakan CCS, CHAdeMO dan BG/T [12]. Terdapat tiga kategori stasiun pengisian kendaraan listrik yaitu :

2.3.1 *Charging Stasion Umum (SKPLU)*

Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU) adalah fasilitas pengisian daya yang tersedia untuk publik di berbagai lokasi strategis seperti rest area, pusat perbelanjaan, stasiun transportasi, dan jalan tol. SPKLU biasanya menyediakan berbagai jenis konektor dan daya pengisian, mulai dari Level 2 (*AC Charging*) yang membutuhkan waktu sekitar 4–8 jam, hingga Level 3 (*DC Fast Charging*) yang memungkinkan pengisian hingga 80% dalam waktu 20–40 menit[13]. Dengan sistem pembayaran berbasis aplikasi atau kartu elektronik, SPKLU memudahkan pengguna kendaraan listrik untuk mengisi daya kapan pun diperlukan



Gambar 2. 5 SKPLU

2.3.2 *Charging Stasion Rumahan (Residential)*

Charging station rumahan adalah solusi pengisian kendaraan listrik yang paling praktis dan ekonomis bagi pengguna kendaraan listrik pribadi. Sistem ini memungkinkan pemilik kendaraan untuk mengisi daya di rumah menggunakan listrik rumah tangga standar (Level 1, 120V/220V) yang membutuhkan waktu 8–20 jam atau menggunakan Level 2 (240V) dengan waktu pengisian lebih cepat, sekitar 4–8 jam. Keuntungan utama dari charging station rumahan adalah biaya pengisian yang lebih murah dibandingkan dengan SPKLU, serta kenyamanan karena kendaraan dapat diisi daya saat malam hari [14]. Namun, untuk pemasangan charger Level 2, pengguna mungkin perlu meningkatkan kapasitas daya listrik rumah.



Gambar 2. 6 *Charge Station Residential*

2.3.3 *Charging Stasion Komersil*

Charging station komersial adalah fasilitas pengisian daya kendaraan listrik yang dikelola oleh bisnis atau organisasi untuk kepentingan komersial. Biasanya, stasiun ini tersedia di tempat-tempat seperti mall, hotel, gedung perkantoran, dan area parkir berbayar [15], serta menggunakan sistem pembayaran berbasis tarif per kWh atau per durasi pengisian. *Charging station komersial* umumnya menawarkan Level 2 (AC Charging) untuk pengisian daya yang lebih lama, cocok bagi kendaraan yang diparkir dalam waktu cukup lama, atau Level 3 (*DC Fast Charging*) untuk pengisian cepat dalam hitungan menit. Keberadaan *charging station* komersial tidak hanya meningkatkan layanan bagi pelanggan tetapi juga mendukung bisnis dalam menerapkan konsep keberlanjutan serta menarik lebih banyak pengguna kendaraan listrik.



Gambar 2. 7 *Charge Station Komersial*

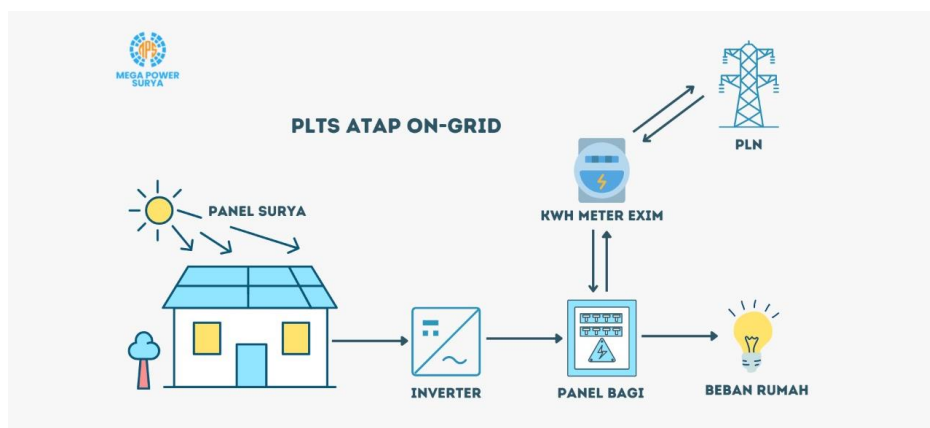
2.4 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

PLTS adalah sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan energi matahari untuk menghasilkan listrik. Energi matahari, yang merupakan sumber daya terbarukan, diubah menjadi energi listrik menggunakan teknologi panel surya atau sel fotovoltaik [16]. PLTS memiliki berbagai aplikasi, mulai dari penggunaan rumah tangga kecil hingga instalasi skala besar yang menyuplai listrik ke jaringan energi nasional.

PLTS termasuk dalam kategori energi terbarukan karena menggunakan sumber daya alam yang tidak akan habis dalam waktu dekat. Dengan menggunakan energi matahari, PLTS membantu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan menurunkan emisi gas rumah kaca. Terdapat 3 jenis PLTS :

2.4.1 PLTS *ON GRID*

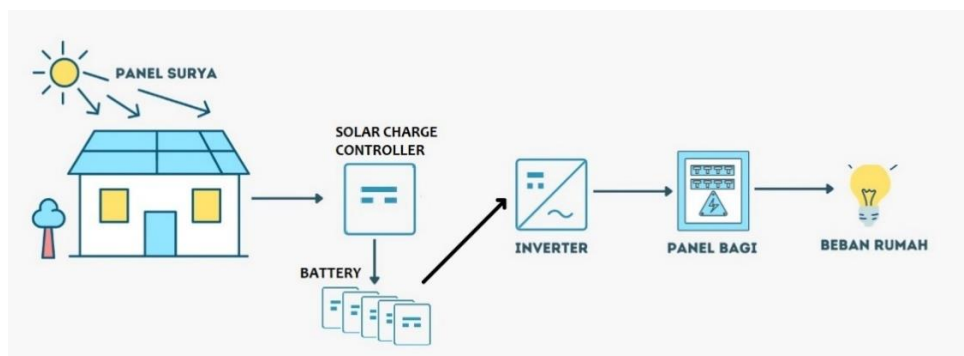
Sistem PLTS terinterkoneksi (*On Grid*) atau yang disebut dengan *Grid Connected PV Sistem* adalah sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan radiasi matahari untuk menghasilkan listrik. Dan sesuai dengan namanya, maka sistem ini akan dihubungkan dengan jaringan PLN dengan mengoptimalkan pemanfaatan energi matahari melalui modul surya atau *photovoltaic modul* yang menghasilkan listrik semaksimal mungkin[16].



Gambar 2. 8 PLTS *ON GRID*

2.4.2 PLTS *OFF GRID*

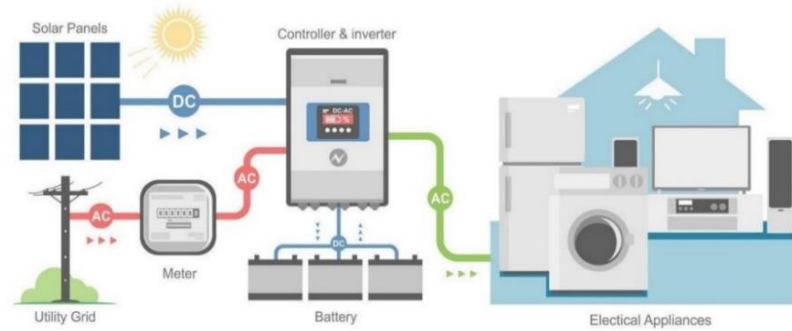
PLTS *Off-Grid* merupakan sistem PLTS yang tidak terhubung dengan jaringan. Sistem ini berdiri sendiri, sering disebut *stand-alone system* [17], [18]. Sistem ini biasanya merupakan sistem dengan pola pemasangan tersebar (*distributed*) dan dengan kapasitas pembangkitan skala kecil. Untuk sistem ini biasanya dilengkapi dengan sistem penyimpanan (*storage*) tenaga listrik dengan media penyimpanan baterai. Diharapkan baterai mampu menjamin ketersediaan pasokan listrik untuk beban listrik saat kondisi cuaca mendung dan kondisi malam hari.[16]



Gambar 2. 9 PLTS *OFF GRID*

2.4.3 PLTS *HYBRID*

PLTS *HYBRID* adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya yang didukung oleh teknologi *HYBRID*, maksudnya, sistem listrik yang dihasilkan oleh panel surya dapat digabungkan dengan listrik dari PLN dan baterai [17]. Dengan sistem tersebut memudahkan pengguna untuk mendapatkan dukungan energi listrik yang optimal sekaligusantisipasi saat terjadi kekurangan daya atau pemadaman. Listrik yang dihasilkan dari sistem PLTS tipe ini nantinya akan disimpan ke dalam baterai cadangan. Dalam upaya menyediakan pasokan tenaga listrik ke suatu sistem, guna mendapatkan kehandalan sitem yang lebih baik, yang berkelanjutan atau kontinyu dan menggunakan manajemen operasi tertentu. Selain itu bertujuan agar dalam pengusahaan energi listrik lebih ekonomis.



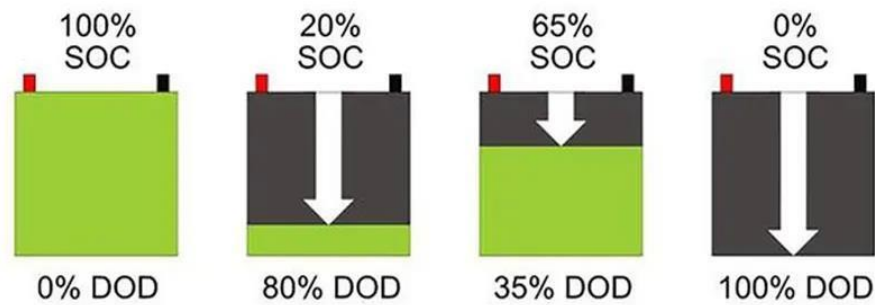
Gambar 2. 10 PLTS *HYBRID*

2.5 Sistem Penyimpanan Energi Pada Baterai

Baterai merupakan salah satu komponen yang digunakan pada sistem solar cell yang dilengkapi dengan penyimpanan cadangan energi listrik. Baterai memiliki fungsi untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya dalam bentuk energi arus searah. Energi yang disimpan pada baterai berfungsi sebagai cadangan (*back up*)[19], yang biasanya dipergunakan pada saat panel surya tidak menghasilkan energi listrik, contohnya pada saat malam hari atau pada saat cuaca mendung, selain itu tegangan keluaran ke sistem cenderung lebih stabil. Satuan kapasitas energi yang disimpan pada baterai adalah *ampere hour* (Ah)[20], yang diartikan arus maksimum yang dapat dikeluarkan oleh baterai selama satu jam.

Terdapat beberapa parameter penting pada baterai yaitu, SOC (*state of charge*) didefinisikan sebagai rasio dari total kapasitas energi yang dapat digunakan oleh sebuah baterai dengan kapasitas baterai seluruhnya[21]. Status pengisian daya baterai (SOC) adalah persentase kapasitas baterai yang masih tersimpan di dalam baterai. Jika, baterai 10 kWh dengan SOC 20% berarti baterai harus diisi ulang saat kapasitas tersimpannya tersisa 2 kWh.

Selain SOC, terdapat parameter lain berupa DOD (*Dept Of Discharge*) yang merupakan ukuran seberapa banyak energi yang telah diambil/digunakan dari baterai dibandingkan dengan total kapasitasnya [21]. Misalnya, jika baterai 10 kWh memiliki DoD 80%, berarti tidak boleh menggunakan lebih dari 8 kWh dari baterai tanpa mengisi ulang. DOD yang lebih tinggi berarti dapat menggunakan lebih banyak energi yang tersimpan dalam baterai.



Gambar 2. 11 Skema SOC dan DOD Pada Baterai

Selain SOC dan DOD terdapat parameter lain yaitu SOH adalah singkatan dari *State of Health*, yang merupakan ukuran kesehatan dan performa baterai secara keseluruhan dari waktu ke waktu. SOH mencerminkan kemampuan baterai untuk menyimpan daya dan memberikan kapasitas terukurnya. Baterai dengan SOH tinggi akan mampu menyimpan daya untuk jangka waktu yang lebih lama dan akan memiliki masa pakai yang lebih lama secara keseluruhan daripada baterai dengan SOH rendah. Satuan SOH adalah persentase. Biasanya, SOH baterai akan 100% pada saat pembuatan dan akan berkurang seiring waktu dan penggunaan [22]

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Pelaksanaan

Penelitian ini dilakukan dalam kurun waktu, yaitu pad bulan Januari 2024 – Mei 2024 di Laboratorium Sistem Tenaga Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung.

Tabel 3. 1 Jadwal Penelitian

No.	Kegiatan	Bulan						
		Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul
1.	Studi Literatur							
2.	Pembuatan Proposal							
3.	Seminar Proposal							
4.	Pengumpulan Data							
5.	Simulasi dan Pengolahan Data							
6.	Evaluasi hasil simulasi							
7.	Penyusunan Laporan							
8.	Seminar Hasil							
9.	Ujian Komprehensif							

3.2 Alat dan Bahan

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

1. Satu unit laptop AsusPro P1440FAC dengan spesifikasi Intel Core I3, dilengkapi dengan prosesor 2,10 GHz, serta sistem operasi Windows 10 Pro 64-bit sebagai media pemodelan dan simulasi
2. Perangkat lunak Simulink Matlab sebagai perangkat lunak untuk simulasi model stokastik PV-EVCS
3. Perangkat lunak HomerGrid/PVSyst untuk menentukan kapasitas ukuran PLTS, energi yang dihasilkan dari sistem PLTS, serta untuk menentukan perhitungan ekonomis
4. Perangkat Lunak Microsoft Excel untuk merekapitulasi data profil beban, data output energi, dan perhitungan arus kas proyek.
5. Perangkat lunak PVSyst 7.2 untuk melakukan konfigurasi pada PV dan inverter dan menghasilkan output energi *array* dari PV.
6. Perangkat lunak helioscope untuk melakukan *design* peletakkan PV pada atap lokasi pemasangan PV.

3.3 Tahapan Penelitian

Adapun tahapan penelitian adalah sebagai berikut :

1. Identifikasi Masalah
 Pada tahap ini penulis mengidentifikasi permasalahan terkait perancangan pemodelan stokastik untuk pola lalu lintas pada SPKLU seperti kedatangan EV, antrian pada saat melakukan pengisian daya serta analisa teknis dan ekonomis pada PLTS *HYBRID* sebagai suplai energi pada SPKLU atau *Electric Vehicle Charging Station (EVCS)*.
2. Studi Literatur
 Pada tahap ini penulis melakukan pencarian referensi sebagai pendukung dan acuan dalam melaksanakan penelitian. Dalam studi literatur penulis memperoleh jurnal internasional maupun nasional, buku, skripsi dan artikel ilmiah

3. Perencanaan Teknis

Pada tahap ini penulis melakukan perancangan pemodelan stokastik pada software Simulink Matlab untuk bisa menggambarkan kedatangan kedatangan kendaraan listrik (EV) untuk melakukan pengisian listrik pada EVCS yang terintegrasi dengan PLTS *HYBRID*. Serta menentukan, komponen yang dipakai beserta kapasitas nya masing-masing dengan menggunakan software HomerGrid.

4. Perencanaan Ekonomis

Pada tahap ini penulis membahas terkait biaya modal, biaya operasional, biaya produksi listrik per kWh selama umur proyek, dan total biaya proyek dalam nilai sekarang yang diperlukan untuk merealisasikan perancangan PLTS *HYBRID* sebagai suplai *Charging Station* pada SPKLU GSG Unila. Analisa ekonomis dilakukan dengan membandingkan 3 skenario FIT (*feed in tariff*) untuk mengetahui manakah skenario dengan biaya terendah dan paling optimal.

5. Simulasi dan Analisis

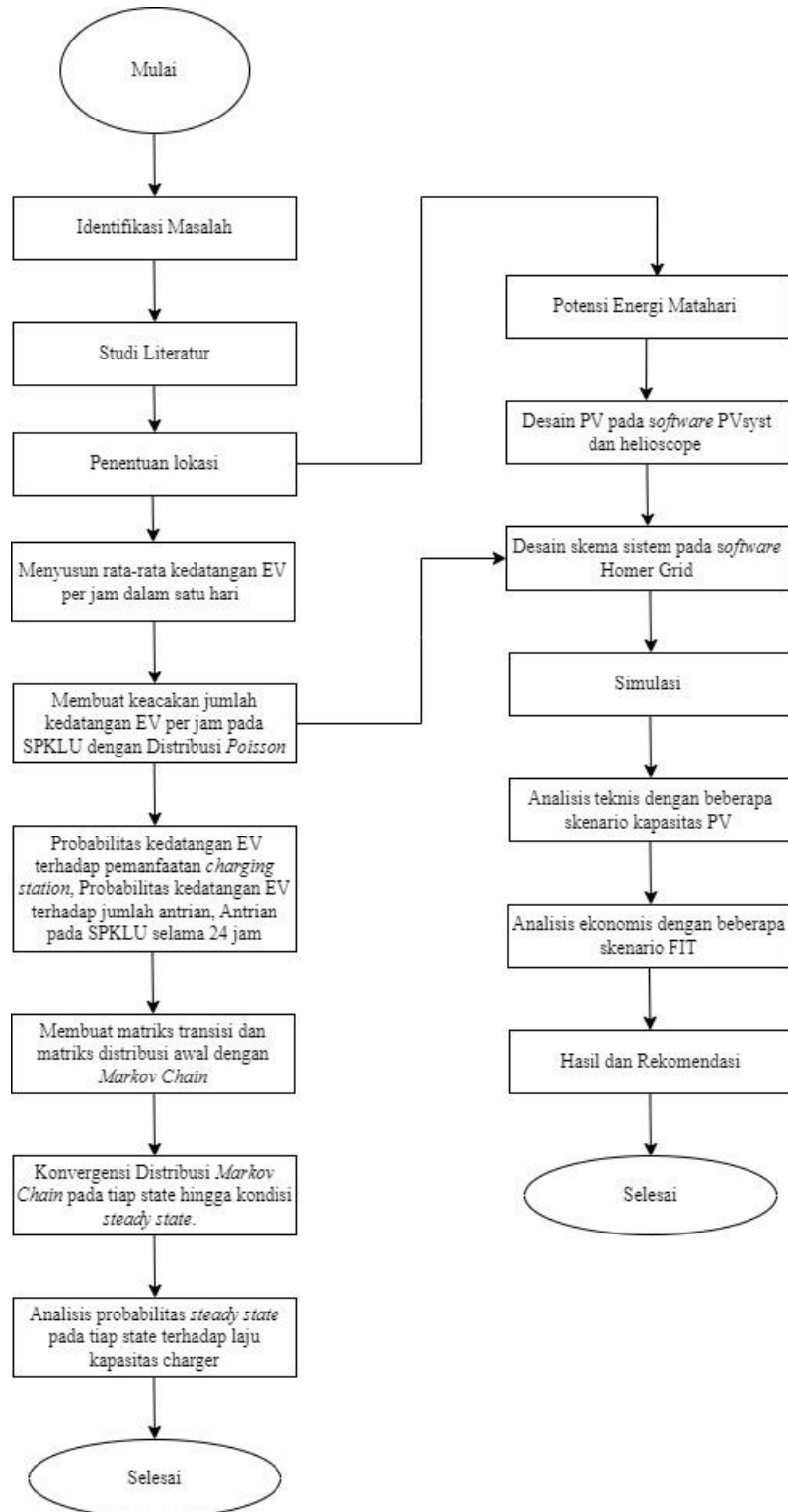
Pada tahap ini dilakukan pemodelan data beban dengan model stokastik untuk bisa mendapatkan probabilitas kedatangan dari pengisian mobil listrik pada SKPLU yang akan digunakan dalam simulasi perencanaan sistem SKPLU dengan sumber energi PLTS *HYBRID*. Pada simulasi dilakukan untuk mengetahui total produksi yang dihasilkan PLTS, mengetahui jumlah energi yang dikonsumsi oleh *charging station*, serta total biaya untuk perencanaan sistem ini.

6. Pembuatan Laporan

Pada tahap ini, penulis membuat laporan terkait hasil yang telah didapatkan untuk pertanggungjawaban terhadap penelitian yang dilakukan. Hasil laporan penelitian ini.

3.4 Diagram Alir Penelitian

Adapun diagram alir penelitian ini ditunjukkan oleh gambar dibawah ini :



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.5 Analisis Teknis

Analisis teknis yang dilakukan dalam perancangan suatu sistem PLTS (secara aspek teknis) harus mempertimbangkan faktor-faktor seperti rencana pola operasi PLTS (yang terkoneksi dengan grid dan baterai) pada lokasi yang direncanakan. Faktor tersebut menentukan kapasitas PLTS atap yang akan dirancang, menentukan spesifikasi komponen yang digunakan, orientasi panel surya, dan daya yang dapat dihasilkan PLTS tersebut.

3.5.1 Menentukan Lokasi Pemasangan Panel Surya

Pemilihan lokasi yang tepat untuk pemasangan panel surya sangat menentukan efisiensi konversi energi matahari menjadi listrik. Posisi dan kemiringan panel idealnya mengikuti lintang lokasi agar penyerapan sinar matahari maksimal. Panel surya harus dipasang di lokasi yang terpapar sinar matahari sepanjang hari tanpa hambatan bayangan dari bangunan, pepohonan, atau struktur lain. Bayangan dari objek sekitar akan menurunkan radiasi tahunan yang diterima panel, dan bahkan dapat mengganggu kinerja sistem PLTS secara signifikan [23].

3.5.2 Potensi Energi Surya

Potensi energi surya ditentukan oleh tingkat radiasi matahari di lokasi tertentu, yang biasanya dinyatakan dalam kWh/m² per hari. Data ini dapat diperoleh dari peta radiasi matahari dari data meteorology seperti *Nasa Prediction of Worldwide Energy Resource*. Data radiasi matahari sebagai persyaratan penting untuk melakukan studi kelayakan sistem energi surya. Semakin tinggi nilai radiasi matahari di suatu wilayah, maka semakin besar pula energi listrik yang dapat dihasilkan oleh panel surya, sehingga menjadi pertimbangan utama dalam perancangan kapasitas dan efisiensi sistem PLTS [24].

3.5.3 Menentukan Jumlah Modul Panel Surya

Dalam menentukan jumlah modul panel surya pada penelitian ini, ditentukan dengan memanfaatkan luas area atap dari gedung yang tersedia. Dengan menggunakan *software* helioscope dapat ditentukan jumlah panel yang paling optimal dengan menginput jenis komponen PV yang akan dipakai, kapasitas *output* PV yang direncanakan, tilt/azimuth, dan orientasi PV.

3.5.4 Menghitung Kapasitas Array Panel Surya

Dalam menghitung daya yang dibangkitkan array panel surya diperlukan kapasitas modul PV yang akan dipakai di tempat yang akan direncanakan untuk memasang PLTS, dan jumlah modul panel surya. Dengan mengetahui daya yang dibangkitkan array panel surya maka dapat memastikan besar kebutuhan beban sudah terpenuhi atau tidak. Dapat diketahui kapasitas *array* panel surya dengan menggunakan persamaan 3.1

$$\text{Kapasitas array panel surya} = \text{Kapasitas Modul} \times \text{Jumlah Modul} \quad (3.1)$$

3.5.5 Menentukan Kapasitas Daya Inverter

Pemilihan inverter disesuaikan kebutuhan dengan mempertimbangkan besarnya energi DC yang dihasilkan oleh *array* modul PV dan besar daya yang akan dihasilkan oleh *output* inverter. Total daya antara modul surya dengan *output* inverter yang ideal atau nilai rasio DC/AC antara 1,1 hingga 1.3, karena panel surya jarang mencapai daya puncaknya yang tertera dalam kondisi uji standar (STC). Dalam kondisi nyata, output panel lebih rendah karena pengaruh suhu, kotoran, dan variasi radiasi matahari.

3.5.6 Menghitung Konfigurasi Modul Panel Surya

Setelah menentukan kapasitas modul PV dan inverter yang akan dipakai, maka dapat menentukan konfigurasi modul surya yang akan dipasang pada atap dapat menggunakan persamaan 3.2 hingga 3.5.

$$\text{Minimal modul seri per string} = \frac{V_{min}Inverter}{V_{oc}Modul} \quad (3.2)$$

$$\text{Maksimal modul seri per string} = \frac{V_{max}Inverter}{V_{oc}Modul} \quad (3.3)$$

$$\text{Maksimal string paralel} = \frac{I_{max}Inverter}{I_{mp}Modul\ Surya} \quad (3.4)$$

$$\text{Jumlah String} = \frac{\text{Jumlah modul panel surya}}{\text{Jumlah modul surya seri per string}} \quad (3.5)$$

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 *open-circuit* panel (V)

$I_{mp}Modul$ = Arus maksimum panel (A)

3.5.7 Menghitung Kapasitas Baterai

Untuk menentukan kapasitas daya baterai dapat menggunakan persamaan 3.6.

$$P = \frac{V \cdot I}{1000} \quad (3.6)$$

Keterangan :

P = Daya per jam (kWh)

V = Tegangan Baterai (Volt)

I = Kuat arus per jam (Ah)

Dan untuk menentukan jumlah baterai yang diperlukan menggunakan persamaan 3.7

$$\text{Jumlah Baterai} = \frac{\text{Kapasitas Array Panel Surya}}{\text{Daya baterai}} \quad (3.7)$$

3.5.8 Menghitung Evaluasi Kinerja Sistem PLTS

Evaluasi kinerja sistem PLTS bertujuan untuk menilai efektivitas dan efisiensi sistem dalam memenuhi kebutuhan energi listrik dari sumber energi terbarukan. Dua parameter utama yang digunakan adalah *Renewable Fraction* (RF) dan *Performance Ratio* (PR). Penilaian terhadap RF dan PR memberikan gambaran mengenai kinerja sistem PLTS baik dari sisi kontribusi energi terbarukan terhadap total konsumsi energi maupun dari sisi efisiensi teknis sistem dalam menghasilkan energi listrik dari sumber daya matahari. *Renewable fraction* menunjukkan proporsi energi listrik yang disuplai oleh sistem PLTS terhadap total konsumsi energi. Semakin besar nilai RF, semakin besar kontribusi energi terbarukan dalam sistem. Untuk menghitung *renewable fraction* dapat menggunakan persamaan 3.8, 3.9 [25].

$$\text{Renewable Fraction} = \frac{\text{Total Konsumsi Energi} - \text{Energi impor dari Grid}}{\text{Total Konsumsi Energi}} \quad (3.8)$$

Atau

$$\text{Renewable Fraction} = 1 - \frac{\text{Grid Purchases}}{\text{Grid Sales} + \text{EV Charger served}} \quad (3.9)$$

Sedangkan, *performance ratio* adalah indikator yang menunjukkan perbandingan antara energi listrik aktual yang dihasilkan oleh sistem PLTS dengan energi maksimum yang dapat dihasilkan pada kondisi standar iradiasi. Untuk menghitung *renewable fraction* dapat menggunakan persamaan 3.10 [26].

$$\text{Performance Ratio} = \frac{\text{Energy}_{\text{produced}}(E_{PV})}{P_{\text{nom}} \times \frac{H_T}{G_{STC}}} \quad (3.10)$$

Indikator nilai *performance ratio* (PR) saat di atas 0,80 – 0,85, maka hal ini menunjukkan bahwa sistem PLTS bekerja dengan efisiensi tinggi dan kerugian (*losses*) dalam sistem sangat minimal [27]. Artinya, sebagian besar energi matahari yang tersedia berhasil dikonversi menjadi energi listrik secara efektif.

Berdasarkan rumus *performance ratio* dapat mengetahui energi *output* dari sistem PLTS berdasarkan nilai iradiasi matahari (*Global Horizontal Irradiation*) yang dapat dihitung menggunakan persamaan 3.11 [28].

$$E_{PV} = PR \times P_{nom} \times \frac{H_T}{G_{STC}} \quad (3.11)$$

keterangan :

E_{PV} = Energi yang dihasilkan oleh sistem PLTS (kWh)

PR = *Performance ratio*

P_{nom} = Kapasitas nominal daya PV (kW)

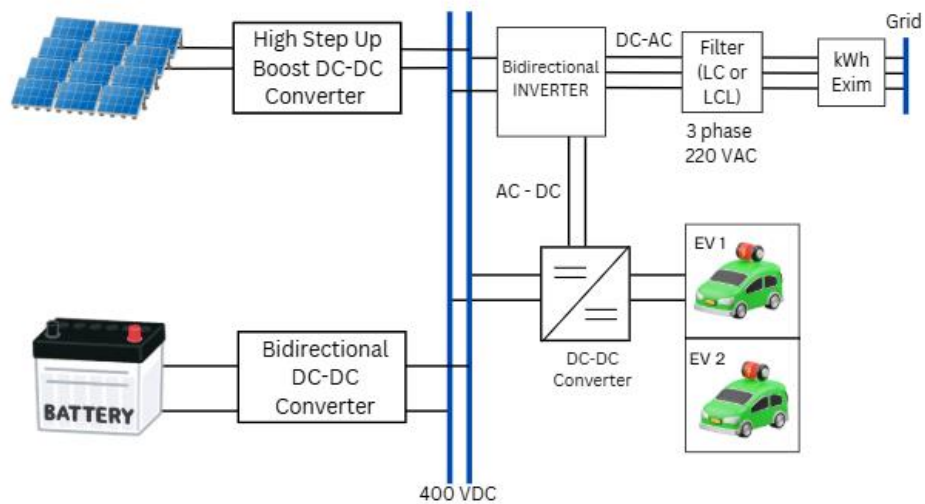
H_T = Total iradiasi matahari pada modul panel (kWh/m²)

G_{STC} = Iradiasi matahari dalam STC (1000 W/m²)

3.5.9 Skema SPKLU dengan Sumber Energi PLTS *HYBRID*

Dalam sistem ini, energi yang dihasilkan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) akan diprioritaskan terlebih dahulu untuk memenuhi kebutuhan beban pada Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU). Apabila daya yang dihasilkan PLTS melebihi kebutuhan beban, kelebihan daya tersebut akan dialirkan ke sistem penyimpanan energi (baterai) hingga mencapai batas maksimum kapasitas pengisian yang ditentukan oleh *State of Charge* (SOC) baterai. Setelah kapasitas baterai mencapai tingkat pengisian maksimum, kelebihan daya selanjutnya akan dialihkan untuk diekspor ke jaringan listrik (grid). Dalam hal ini, tidak terdapat batasan daya yang dapat diekspor ke jaringan, selama kapasitas inverter mendukung. Energi yang telah tersimpan di dalam baterai kemudian dapat

digunakan kembali untuk menyuplai beban saat produksi PLTS tidak mencukupi, dengan dukungan tambahan dari jaringan listrik apabila diperlukan. Ketika terdapat proses ekspor energi ke jaringan listrik (*grid*) maka diterapkan skema *feed in tariff* (FIT), sehingga biaya yang kita keluarkan saat mengambil energi dari *grid* dapat dikurangi dari biaya energi ekspor yang sudah dikalikan dengan tarif FIT yang berlaku. Skema penyaluran energi pada sistem ini digambarkan pada gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Skema SPKLU dengan Sumber Energi PLTS *HYBRID*

3.6 Analisis Ekonomis

Pada penelitian ini, Analisis ekonomis dilakukan pada perencanaan Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum dengan sumber energi dari PLTS *HYBRID*. untuk mengetahui biaya modal, biaya *operational & maintenance*, *operating cost*, *net revenue*, *LCOE*, *Net Present Cost*(NPC), dan *Net Present Value*(NPV). Analisis ekonomis dilakukan dengan membandingkan 3 skenario FIT untuk mengetahui manakah skenario dengan biaya terendah dan paling optimal.

3.6.1 Biaya Modal (*Capital Expenditure*)

Capital Expenditure (CAPEX) atau biaya modal merupakan biaya yang digunakan untuk membeli komponen-komponen saat akan melakukan pemasangan PLTS. Komponen yang akan digunakan pada PLTS dipertimbangkan sesuai dengan kapasitas sistem PLTS yang akan dipasang. Dari biaya investasi ini digunakan untuk mengetahui harga dari tiap komponen seperti PV, inverter, dan baterai.

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 *HYBRID* agar tetap berfungsi dengan baik sepanjang umur operasionalnya. Untuk menghitung biaya operasional dan pemeliharaan dapat dihitung berdasarkan persamaan 3.12.

$$\begin{aligned} \text{Biaya O\&M} = & (1\% \times \text{Biaya Modal PV}) + \\ & (1\% \times \text{Biaya Modal Inverter}) + (1\% \times \text{Biaya Modal Inverter}) \end{aligned} \quad (3.12)$$

3.6.3 Biaya Operasional (*Operating Cost*)

Biaya operasional adalah total biaya tahunan untuk mengoperasikan sistem energi tanpa menghitung biaya modal. Biaya yang termasuk kedalam *operating cost* yaitu

biaya O&M, biaya pergantian komponen, biaya pembelian energi dari grid saat PV tidak dapat memenuhi kebutuhan beban. Biaya Operating Cost dihitung dalam bentuk tahunan yang sudah didiskonto (*annualized*) dengan *Capital Recovery Factor* (CRF) untuk menyetarakan biaya yang terjadi tidak setiap tahun, seperti penggantian baterai atau inverter. Metode ini memastikan bahwa semua biaya selama umur proyek direpresentasikan secara setara atau rata-rata per tahun[29]. Untuk menghitung biaya tahunan dapat menggunakan persamaan 3.13.

$$A = P \times \frac{i \times (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \quad (3.13)$$

Keterangan :

A = *Annualized Cost*

P = *Present Value*

i = Tingkat suku bunga per periode

n = Banyak periode bunga

Untuk menghitung biaya operasional tahunan untuk proyek perencanaan SPKLU dengan sumber energi PLTS *HYBRID* dapat menggunakan persamaan 3.14.

$$\text{Operating Cost} = \text{Rep}_{\text{Cost}} + \text{O\&M}_{\text{Cost}} + \text{Energy}_{\text{Charge}} \quad (3.14)$$

Keterangan :

Operating Cost = Biaya operasional tahunan

Rep_{Cost} = Biaya pergantian komponen

$\text{O\&M}_{\text{Cost}}$ = Biaya operasional dan pemeliharaan seluruh komponen

$\text{Energy}_{\text{Charge}}$ = Biaya untuk energi yang terpakai dari jaringan listrik

Setelah mengetahui total biaya operasional tahunan atau biaya pengeluaran rata-rata tahunan dari sistem, maka dapat diketahui total pendapatan bersih tahunan (*Net Revenue*) dengan menjumlahkan biaya pendapatan energi dari penjualan energi dari SPKLU ke para pengguna mobil listrik dan nilai sisa dari komponen yang belum

habis masa pakainya saat proyek berakhir seperti baterai dan inverter (arus kas masuk) dikurangi dengan *operating cost*. Dapat dihitung menggunakan persamaan 3.15.

$$Net\ Revenue = (EVCS_{revenue} + Salvage_{value}) - Operating\ Cost \quad (3.15)$$

Keterangan :

Net Revenue = Total pendapatan rata-rata tahunan

EVCS_{revenue} = Pendapatan dari penjualan energi pada SPKLU

Salvage_{value} = Nilai sisa dari suatu komponen

3.6.4 Biaya Levelized Cost of Energy (LCOE)

LCOE merupakan metrik yang digunakan untuk mengevaluasi biaya produksi energi dari suatu sistem pembangkit listrik selama masa pakainya[30]. 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. Nilai LCOE dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 3.16.

$$LCOE = \frac{TAC}{Euseful} \quad (3.16)$$

Keterangan :

LCOE = Biaya produksi energi listrik per kWh

TAC = Total biaya pengeluaran tahunan pada sistem/ *Total Annualized Cost*

Euseful = Total energi yang terpakai dalam setahun

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 Cost (NPC)

Net Present Cost (NPC) adalah total seluruh biaya proyek selama umur operasionalnya, yang telah dikonversi ke nilai sekarang (*present value*) dengan menggunakan tingkat diskonto tertentu. Untuk menghitung NPC dapat menggunakan persamaan 3.17.

$$NPC = \sum_{t=0}^n \left(\frac{Rep_{cost}}{(1+i)^n} + \frac{O\&M_{cost}}{(1+i)^n} + \frac{E_{charge}}{(1+i)^n} \right) + CAPEX \quad (3.17)$$

Keterangan :

NPC = Total biaya pengeluaran selama masa operasional

Rep_{cost} = Biaya pergantian komponen

$O\&M_{cost}$ = Biaya operasional dan pemeliharaan seluruh komponen

$Energy_{charge}$ = Biaya untuk energi yang terpakai dari jaringan listrik

CAPEX = Biaya modal

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

Dengan mengetahui nilai NPC dapat memberikan gambaran mengenai beban biaya jangka panjang dari sistem yang dirancang. Dengan membandingkan NPC antar beberapa alternatif konfigurasi sistem, kita dapat mengevaluasi efisiensi dan efektivitas biaya, serta menentukan apakah suatu sistem layak dan optimal secara ekonomi. Semakin rendah nilai NPC, maka secara umum sistem dianggap lebih efisien dari sisi total biaya selama masa hidup proyek.

3.6.6 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

siswa pemakaian komponen dengan nilai sekarang dari arus kas yang keluar (NPC) selama masa operasional sistem. NPV dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 3.18 dan 3.19[31].

$$NPV = \sum_{t=0}^n \bar{B}_t - \bar{C}_t \quad (3.18)$$

atau

$$NPV = \sum_{t=0}^n \left(\frac{Revenue_{EVCS}}{(1+i)^n} + \frac{Salvage_{value}}{(1+i)^n} \right) - NPC \quad (3.19)$$

Keterangan :

NPV = Total pendapatan bersih selama masa operasional

$\bar{B}_t / \left(\frac{Revenue_{EVCS}}{(1+i)^n} + \frac{Salvage_{value}}{(1+i)^n} \right) = Benefit / \text{Total pendapatan nilai sekarang}$

$\bar{C}_t / NPC = Cost / \text{Total biaya pengeluaran selama masa operasional}$

Net Present Value ini mengestimasi nilai sekarang pada suatu proyek, aset ataupun investasi berdasarkan arus kas masuk yang diharapkan pada masa depan dan arus kas keluar yang disesuaikan dengan suku bunga dan biaya modal. *Net Present Value* menggunakan harga pembelian awal dan nilai waktu uang (*time value of money*) untuk menghitung nilai suatu aset. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa NPV adalah nilai sekarang dari aset yang dikurangi dengan biaya modal.

3.6.7 Profitability Index (PI)

Profitability index merupakan perbandingan antara total seluruh kas bersih nilai sekarang (NCF) dengan investasi awal. Teknik ini juga sering disebut dengan model rasio manfaat biaya (*benefit cost ratio*)[32]. Dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 3.20.

$$PI = \frac{\sum_{t=1}^n NCF_t(1+i)^{-t}}{CAPEX} \quad (3.20)$$

Keterangan :

PI = *Profitability index*

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

CAPEX = Biaya modal

Kriteria untuk nilai PI dari suatu proyek yaitu:

- Jika hasil perhitungan $PI > 1$, maka benefit yang dihasilkan selama umur ekonomis proyek melebihi biaya pengeluaran (*cost*) , sehingga proyek dinilai layak dan menguntungkan.
- Jika hasil perhitungan $PI < 1$, maka benefit yang diperoleh selama umur ekonomis proyek tidak mencukupi untuk menutupi biaya pengeluaran (*cost*). Sehingga proyek dinilai tidak layak.

3.6.8 Feed In Tarif (FIT)

Feed In Tarif (FIT) adalah harga listrik tetap yang dibayarkan kepada produsen energi terbarukan (ET) untuk setiap unit energi yang diproduksi dan disuplai ke jaringan listrik. Tujuan FIT adalah untuk membuat proyek energi terbarukan menarik secara finansial dengan menyediakan kontrak jangka panjang dan harga tetap, yang membantu mengurangi risiko yang terkait dengan investasi ini. *Feed In Tarif* digunakan untuk mempromosikan sumber energi terbarukan pada tahap awal pengembangannya, saat produksi seringkali tidak layak secara ekonomi . *Feed In Tarif* biasanya melibatkan perjanjian jangka panjang dan harga yang dikaitkan dengan biaya produksi energi yang dimaksud. Kontrak jangka panjang dan harga yang dijamin melindungi produsen dari beberapa risiko yang melekat dalam produksi energi terbarukan, mendorong investasi dan pengembangan yang mungkin tidak terjadi jika tidak demikian[33].

Feed In Tarif memberikan harga yang terjamin dan berjangka panjang untuk energi terbarukan yang setara atau di atas harga pasar saat ini. Harga yang terjamin ini

mengurangi risiko dan ketidakpastian pemasangan energi terbarukan baru, sehingga mendorong produsen baru untuk melakukan investasi awal. Kebijakan *Feed-in-Tarif* (FIT) yang memiliki tiga komponen utama : harga tetap yang cukup untuk pengembalian investasi, koneksi jaringan yang dijamin, dan kontrak jangka panjang untuk memastikan stabilitas investasi.

Di Indonesia sendiri pernah menerapkan FIT bagi para produsen energi terbarukan seperti PLTS. Pada penelitian ini, menerapkan 3 skenario FIT yang nantinya tiap skenario akan dibandingkan secara ekonomi untuk dapat mengetahui skenario dengan biaya terendah dan paling optimal. Tiga skenario yang akan dibandingkan yaitu:

1. Skenario dengan tidak ada FIT yang berarti setiap energi berlebih yang dihasilkan oleh PLTS dianggap tidak ada atau tidak terjadi proses ekspor
2. Skenario yang sesuai dengan Peraturan ESDM No. 26 Tahun 2021 yaitu, Energi listrik Pelanggan PLTS Atap yang diekspor, dihitung berdasarkan nilai kWh Ekspor yang tercatat pada Meter kWh Ekspor-Import dikali 100% (seratus persen)[34]. Yang berarti FIT sebesar Rp. 1.444/kWh
3. Skenario yang sesuai dengan Peraturan ESDM No. 49 Tahun 2018 yaitu, Energi listrik Pelanggan PLTS Atap yang diekspor dihitung berdasarkan nilai kWh Ekspor yang tercatat pada meter kWh ekspor-import dikali 65% (enam puluh lima persen)[35]. Yang berarti FIT sebesar Rp. 938,6/kWh.

3.7 Model Stokastik

Model stokastik adalah model hidrologi dengan basis matematik yang menghasilkan suatu urutan nilai yang merupakan hasil dari proses acak dengan cara memasukkan probabilitas [36]. Model stokastik dapat diartikan sebagai model matematika yang digunakan untuk menggambarkan suatu sistem atau proses yang dipengaruhi oleh unsur acak (probabilitas). Dalam menganalisis sistem yang melibatkan ketidakpastian dan perubahan dinamis dari waktu ke waktu, pendekatan model stokastik sangat relevan. Model ini memungkinkan representasi matematis terhadap sistem acak yang berevolusi, di mana variabel-variabel dalam sistem memiliki kemungkinan berubah secara tidak deterministik. Tujuan dari proses

stokastik adalah untuk memodelkan dan menganalisis sistem atau fenomena yang melibatkan unsur ketidakpastian dan berubah secara acak seiring waktu. Dengan menggunakan proses stokastik, kita dapat memahami dinamika probabilistik dari suatu sistem, seperti perubahan jumlah pelanggan dalam antrian, pergerakan harga saham. Melalui pendekatan ini, dapat menghitung kemungkinan suatu kejadian terjadi, dan mengetahui kecenderungan jangka panjang dari perilaku sistem tersebut. Dengan kata lain, dalam model stokastik, hasil dari suatu kejadian tidak pasti bisa diprediksi dengan pendekatan probabilitas. Salah satu penerapan utama dari proses stokastik adalah pada teori antrian, yang memodelkan fenomena kedatangan entitas dan proses pelayanan dalam suatu sistem.

3.7.1 Sistem Antrian

Sistem antrian dapat digambarkan sebagai kedatangan dari pendatang-pendatang untuk dilayani, menunggu untuk dilayani, jika pelayanan tidak segera dilaksanakan dan jika telah menunggu untuk dilayani kemudian meninggalkan sistem sesudah selesai pelayanan. Fenomena menunggu adalah hasil langsung dari keacakan dalam operasi sarana pelayanan[37]. Enam karakteristik dasar yang menetapkan sistem antrian antara lain; sumber masukan, pola kedatangan, pola pelayanan, disiplin antrian, kapasitas sistem, dan tingkat pelayanan. Ke enam karakteristik tersebut merupakan dasar untuk dapat menentukan model antrian dari suatu sistem pelayanan, seperti berikut:

1. Sumber masukan (*input*) adalah kumpulan orang atau barang dimana satuan-satuan datang atau dipanggil untuk dilayani. Kumpulan orang atau barang ini boleh berhingga atau tidak berhingga. Dalam praktek, sumber adalah berhingga. Akan tetapi, dalam suatu populasi yang besar, sumber dianggap tidak berhingga. Untuk keperluan Analisis sering lebih mudah menggunakan sumber tidak berhingga sebagai dasar perhitungan.
2. Pola kedatangan merupakan suatu distribusi dari suatu rata-rata laju kedatangan yaitu rata-rata jumlah kedatangan per sejumlah unit waktu atau rata-rata waktu

antar kedatangan. Salah satu faktor penting dari pola kedatangan yaitu kemungkinan bahwa pelanggan masuk ke dalam sistem lebih dari satu pada suatu waktu. Dalam hal ini input atau masukan ini dikatakan terjadi dalam distribusi *Poisson*, yaitu masukan ke dalam suatu sistem dengan kedatangan satu per satu secara acak pada suatu selang waktu atau ruang.

Distribusi *Poisson* menggambarkan probabilitas pada peristiwa acak (*random*) yang akan terjadi pada jeda (interval) waktu atau ruang dengan kondisi probabilitas sangat kecil [38]. Distribusi Poisson digunakan untuk memperkirakan berapa kali suatu kejadian kemungkinan terjadi dalam periode waktu tertentu. Dapat dituliskan dengan persamaan 3.21.

$$f(k; \lambda) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \quad (3.21)$$

Keterangan :

f = probabilitas/ peluang suatu kejadian terjadi dalam suatu periode waktu

k = jumlah kejadian yang dihitung probabilitasnya

λ = rata-rata jumlah kejadian dalam suatu periode waktu

e = konstanta euler

3. Pola pelayanan merupakan suatu distribusi dari suatu rata-rata pelayanan, yaitu rata-rata jumlah pelanggan yang dilayani per sejumlah unit waktu, atau sebagai waktu yang dibutuhkan untuk melayani seorang pelanggan. Pola pelayanan dalam sistem ini mengikuti distribusi eksponensial, artinya waktu pelayanan satu EV bersifat acak, tetapi memiliki rata-rata tertentu dan bersifat *memoryless* (waktu pelayanan berikutnya tidak bergantung pada sebelumnya). Karena distribusi eksponensial menghasilkan probabilitas yang bergantung hanya pada state saat ini, dan bukan histori sebelumnya, maka *Markov Chain* dapat digunakan untuk memodelkan sistem ini.

Proses Markov (*Markov Chain*) adalah proses stokastik di mana kejadian yang akan datang dari suatu sistem hanya bergantung pada waktu yang sedang terjadi (waktu kini) dan tidak bergantung pada waktu lampau. Tujuan utama dari proses Markov adalah untuk mengidentifikasi probabilitas transisi dari satu keadaan ke keadaan lain. Rantai Markov adalah proses acak yang terdiri dari sifat markov. Prosedur

acak arbitrer atau yang biasa disebut sifat stokastik adalah objek matematika yang dicirikan oleh akumulasi faktor acak [39]. Karakteristik Markov adalah bahwa keadaan masa depan dari variabel stokastik hanya bergantung pada keadaan saat ini. Dengan menggunakan *Markov Chain* dapat diketahui probabilitas dari suatu keadaan(*state*) yang sudah ditentukan. Untuk dapat membuat model *Markov Chain* dapat dilakukan dengan :

- Menentukan keadaan (*state*) agar dapat menggambarkan menggambarkan probabilitas berpindah dari satu state ke state lainnya yang disebut juga dengan matriks Transisi. Misalkan ada n state dalam suatu sistem (S_1, S_2, \dots, S_n), dan probabilitas berpindah dari state i ke state j adalah P_{ij} . Maka, matriks transisi dapat ditulis dengan persamaan 3.22.

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & \cdots & P_{2n} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & \cdots & P_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & P_{n3} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Dengan syarat jumlah probabilitas dalam setiap baris harus 1, karena sistem pasti berada di salah satu state pada langkah berikutnya. Dapat dilambangkan dengan persamaan 3.23.

$$\sum_{j=1}^n P_{ij} = 1 \quad (3.23)$$

- Setelah itu menentukan distribusi awal dalam *Markov Chain* adalah probabilitas awal dari sistem berada dalam setiap state sebelum proses transisi terjadi. Ini menggambarkan bagaimana keadaan sistem sebelum iterasi atau sebelum mengalami perubahan dari waktu ke waktu. Yang dapat dinotasikan sebagai persamaan 3.24.

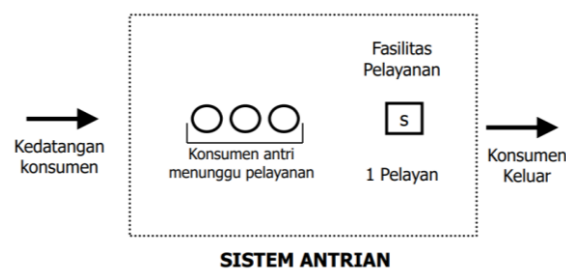
$$S_0 = [P_1 \ P_2 \ P_3 \ \dots \ P_n] \quad (3.24)$$

- Dan kemudian menentukan distribusi langkah berikutnya yaitu dengan persamaan 3.25.

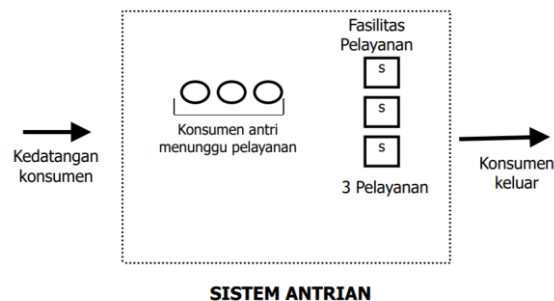
$$S_1 = S_0 \times P \quad (3.25)$$

- Setelah itu kita dapat melakukan iterasi selanjutnya hingga mendapatkan kondisi *steady state*, kondisi di mana probabilitas tiap state tidak berubah lagi seiring waktu. Artinya, setelah cukup banyak langkah transisi, sistem mencapai keseimbangan probabilitas.

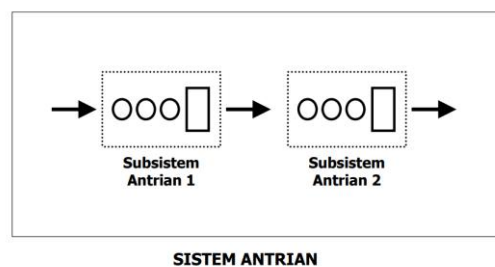
Terdapat tiga aspek yang mempengaruhi dalam mekanisme pola pelayanan yaitu: tersedianya pelayanan, kapasitas pelayanan, dan lama berlangsung pelayanan. Berdasarkan ketiga aspek ini membentuk bermacam-macam bentuk sistem antrian, diantaranya :



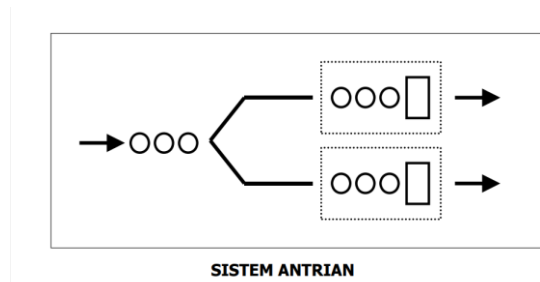
Gambar 3. 3 Sistem Antrian *Single Server Single Phase*



Gambar 3. 4 Sistem Antrian *Multi Server Single Phase*



Gambar 3. 5 Sistem Antrian *Single Server Multi Phase*



Gambar 3. 6 Sistem Antrian *Multi Server Single Phase*

4. Disiplin antrian, kebiasaan ataupun kebijakan dimana para langganan dipilih dari antrian untuk dilayani, disebut disiplin pelayanan. Ada empat bentuk disiplin pelayanan yang biasa digunakan dalam praktek, yaitu;
 - *First come first serve* (FCFS) atau *first-in first out* (FIFO) artinya, lebih dulu datang (sampai) lebih dulu dilayani. Misalnya antri mengisi daya pada SPKLU.
 - *Last come first served* (LCFS) atau last-in first-out (LIFO) artinya, yang tiba terakhir yang lebih dulu keluar. Misalnya, sistem antrian dalam elevator (lift) untuk lantai yang sama.
 - *Service in random order* (SIRO) artinya, panggilan didasarkan pada peluang secara random, tidak soal yang lebih dulu tiba.
 - *Priority service* (PS) artinya, prioritas pelayanan diberikan kepada mereka yang mempunyai prioritas lebih tinggi dibandingkan dengan mereka yang mempunyai prioritas lebih rendah, meskipun yang terakhir ini kemungkinan sudah lebih dahulu tiba dalam garis tunggu.
5. Kapasitas sistem adalah batasan fisik terhadap jumlah pelanggan di suatu sistem antrian ditambah dengan pelanggan yang sedang menerima pelayanan. Dengan adanya kapasitas sistem antrian maka di saat sistem antrian mencapai panjang tertentu untuk selanjutnya tidak ada lagi pelanggan diijinkan masuk sampai ruangan siap bagi suatu penyelesaian pelayanan.
6. Tingkat pelayanan merupakan tahap-tahap untuk melaksanakan suatu pelayanan di dalam suatu sistem antrian. Tingkat pelayanan dapat merupakan tingkat pelayanan tunggal (*single stage*) atau pelayanan ganda (*multi stage*)[40].

Untuk bisa menggambarkan suatu proses antrian digunakan suatu notasi. Proses antrian digambarkan oleh suatu barisan simbol dan garis miring seperti berikut :

Bentuk umum : $(A/B/C) ; (D/E/F)$

Dimana :

A = distribusi waktu antar kedatangan (*arrival distribution*)

B = distribusi waktu pelayanan

C = jumlah saluran pelayanan/fasilitas pelayanan dalam sistem ($s = 1, 2, 3, \dots, \infty$)

D = disiplin antrian

E = ukuran populasi atau sumber

F = jumlah konsumen maksimum yang diperkenankan dalam sistem (dalam pelayanan ditambah garis tunggu)

Keterangan :

1. Untuk A dan B, dapat digunakan kode-kode berikut :

M = Distribusi Poisson atau distribusi eksponensial (*Markovian*)

D = Distribusi Degenerasi (waktu konstan)

Ek = Distribusi Erlang

G = Distribusi umum

2. Untuk C, dipergunakan bilangan bulat positif yang menyatakan jumlah pelayanan.

3. Untuk D, gunakan kode-kode pengganti FIFO, LIFO, atau SIRO.

4. Untuk E dan F, digunakan kode :

N = Jumlah terbatas

∞ = Tak berhingga

Pada penelitian ini, berdasarkan karakteristik dan notasi sistem antrian, maka dapat digambarkan untuk model antrian pada sistem pelayanan Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU) yaitu model $(M/D/1) ; (FIFO/\infty/3)$ yang berarti model menyatakan waktu antar kedatangan didistribusikan secara poisson, waktu pelayanan didistribusikan secara eksponensial, jumlah pelayan adalah satu disiplin antrian adalah *First-In First-Out*, ukuran populasi masukkan tidak berhingga yang berarti jumlah langganan yang boleh masuk dalam sistem antrian tidak berhingga, dan jumlah konsumen maksimum yang dilayani dalam sistem sebanyak 3 EV per jam.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan pembahasan yang telah dilakukan, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Penelitian berhasil membuat model stokastik untuk profil lalu lintas mobil listrik untuk sistem Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU). Metode distribusi *poisson* dan *Markov Chain* menunjukkan probabilitas kedatangan mobil listrik melebihi kapasitas maksimal layanan charger, sebesar 37,9% yang menyebabkan sering terjadi antrian pada sistem SPKLU.
2. Kapasitas PV yang paling optimal untuk menyuplai energi untuk memenuhi kebutuhan beban yaitu pengisian mobil listrik adalah 60 kW. Hal ini dikarenakan perancangan PLTS *HYBRID* dengan kapasitas PV dengan nilai *renewable fraction* sebesar 65% serta PR sebesar 96%.
3. Dengan tarif dari skema FIT semakin besar memberikan dampak nilai LCOE semakin rendah dan memberikan keuntungan proyek semakin besar sehingga mempercepat adopsi energi terbarukan, menciptakan daya tarik investasi yang kuat, serta mendukung transisi menuju sistem kelistrikan rendah karbon yang berkelanjutan.

5.2 Saran

1. Dapat dilakukan perencanaan pembuatan model antrian dengan mempertimbangkan perilaku konsumen harus diperhitungkan apakah tetap mengikuti antri atau keluar dari antrian tanpa melakukan pengisian daya
2. Untuk penelitian berikutnya, pengukuran data iradian matahari dapat dilakukan secara *real time* dan tidak hanya berdasarkan database iradian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. A. Prasetyo, N. Yuniarti, and E. Prianto, “PENGEMBANGAN ALAT CONTROL CHARGING PANEL SURYA MENGGUNAKAN ADUINO NANO UNTUK SEPEDA LISTRIK NIAGA.” [Online]. Available: <http://journal.uny.ac.id/index.php/jee/>
- [2] DR Nuryana, “BAB I, Desain Sistem PLTS ON Grid Sebagai Sumber Energi Untuk EVCS,” *Journal of Insitut Teknologi Indonesia (ITI)*, pp. 1–4, 2021.
- [3] M. Hosseini, P. Studi, and T. Elektro, “LAPORAN TUGAS AKHIR 2 Hybrid Charging Station for EV,” 2052.
- [4] N. Himabindu, S. Hampannavar, B. Deepa, and M. Swapna, “Analysis of microgrid integrated Photovoltaic (PV) Powered Electric Vehicle Charging Stations (EVCS) under different solar irradiation conditions in India: A way towards sustainable development and growth,” *Energy Reports*, vol. 7, pp. 8534–8547, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.egyr.2021.10.103.
- [5] S. Hampannavar, S. Chavhan, S. Mansani, and U. R. Yaragatti, “Electric Vehicle Traffic Pattern Analysis and Prediction in Aggregation Regions/Parking Lot Zones to Support V2G Operation in Smart Grid: A Cyber-Physical System Entity,” *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, vol. 21, no. 1, Feb. 2020, doi: 10.1515/ijeeps-2019-0176.
- [6] P. V. Minh, S. Le Quang, and M. H. Pham, “Technical economic analysis of photovoltaic-powered electric vehicle charging stations

- under different solar irradiation conditions in Vietnam,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 6, Mar. 2021, doi: 10.3390/su13063528.
- [7] N. S. Kumara, “Tinjauan Perkembangan Kendaraan Listrik Dunia Hingga Sekarang.”
- [8] I. Kusuma, Ruliyanta, R. A. S. Kusumoputro, and A. Iswadi, “Electric Vehicle Review: BEV, PHEV, HEV, or FCEV?,” *Jurnal Konversi Energi dan Manufaktur*, pp. 70–83, Jan. 2025, doi: 10.21009/JKEM.10.1.8.
- [9] C. E. Thomas, “Fuel cell and battery electric vehicles compared,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 15, pp. 6005–6020, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.06.003.
- [10] D. M. Yulanto and H. Iskandar, “STUDI ANALISIS PERKEMBANGAN TEKNOLOGI KENDARAAN LISTRIK HIBRIDA,” 2021. [Online]. Available: <https://journal.upy.ac.id/index.php/jatve/index>
- [11] M. Aziz, Y. Marcellino, I. Agnita Rizki, S. Anwar Ikhwanuddin, and J. Welman Simatupang, “STUDI ANALISIS PERKEMBANGAN TEKNOLOGI DAN DUKUNGAN PEMERINTAH INDONESIA TERKAIT MOBIL LISTRIK.”
- [12] F. Sutra Kamajaya and M. Muzmi Ulya, “Analisis Teknologi Charger Untuk Kendaraan Listrik-Review,” *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 6, no. 3, pp. 163–166, 2015.
- [13] K. Wahyudi, K. Makai, and Y. Sukmono, “Implementasi Stasiun Pengisian Kendaraan Listrik Umum (SPKLU) Sebagai Infrastruktur Penunjang Electrical Vehicle dalam Mendukung Net Zero Emission,” vol. 2, no. 2, 2024.
- [14] I. P. Dharmawan, I. N. S Kumara, I. N. Budiastra, J. Raya Kampus UNUD, and K. Bukit Jimbaran, “PERKEMBANGAN

INFRASTRUKTUR PENGISIAN BATERAI KENDARAAN LISTRIK DI INDONESIA,” 2021.

- [15] R. Herdian, A. Lomi, and A. Uji Krismanto, “ANALISIS MANAJEMEN ENERGI CHARGING STATION DENGAN PEMANFAATAN PLTS 0.5 MWp ON GRID DI ITN MALANG.”
- [16] K. T. M. F. N. P. C. Samsurizal, “Pengenalan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS),” *Buku Ajar Pengenalan Pembangkit Listrik Tenaga Surya ITPLN*, pp. 1–64, 2021.
- [17] J. T. Ilmu *et al.*, “STUDI KELAYAKAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) DENGAN BATERAI DAN TERHUBUNG GRID DI NIAS, SUMATERA UTARA”.
- [18] T. M. Putri, R. Roro, H. Peni, and A. Tjahyaningtias, “Pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Off-Grid untuk Skala Rumah Tangga.”
- [19] R. Aita Diantari, C. Widyastuti, and T. Elektro, “STUDI PENYIMPANAN ENERGI PADA BATERAI PLTS.”
- [20] S. Prayogo, “Pengembangan Sistem Manajemen Baterai Pada PLTS Menggunakan On-Off Grid Tie Inverter,” 2019.
- [21] EKI EDITYAWAN, “UNIVERSITAS INDONESIA STUDI KARAKTERISTIK PENCATUAN SOLAR CELL TERHADAP KAPASITAS SISTEM PENYIMPANAN ENERGI BATERAI SKRIPSI.”
- [22] E. Nasrullah, S. Alam, and A. Arif, “PERANCANGAN ALAT UKUR STATE OF CHARGE, DEPTH OF DISCHARGE DAN STATE OF HEALTH BATERAI LITHIUM-ION (LI-ION) DAN BATERAI NICKEL-METAL HYDRIDE (NI-MH) MENGGUNAKAN ARDUINO NANO.”
- [23] K. E. N’Tsoukpoe, “Effect of orientation and tilt angles of solar collectors on their performance: Analysis of the relevance of general

- recommendations in the West and Central African context,” *Sci Afr*, vol. 15, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.sciaf.2021.e01069.
- [24] M. Jamilu Ya’u, “Global Solar Radiation Models: A Review,” *Journal of Photonic Materials and Technology*, vol. 4, no. 1, p. 26, 2018, doi: 10.11648/j.jmpt.20180401.15.
- [25] J. Jiwa Gandhi NRP, S. Ir Ontoseno Penangsang, and E. Rony Seto Wibowo, “FINAL PROJECT-TE 141599 OPTIMIZATION OF PV AND PV-DIESEL POWER SYSTEM ON LABORATORY-SCALE MICROGRID OPERATION IN THE POWER SYSTEM SIMULATION LABORATORY SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY USING HOMER SOFTWARE.”
- [26] C. Montes, R. Dorta-Guerra, B. González-Díaz, S. González-Pérez, L. Ocaña, and E. Llarena, “Study of the Evolution of the Performance Ratio of Photovoltaic Plants Operating in a Utility-Scale Installation Located at a Subtropical Climate Zone Using Mixed-Effects Linear Modeling,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 21, Nov. 2022, doi: 10.3390/app122111306.
- [27] A. Fezzani *et al.*, “Performances Analysis of Three Grid-Tied Large-Scale Solar PV Plants in Varied Climatic Conditions: A Case Study in Algeria,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 19, Oct. 2023, doi: 10.3390/su151914282.
- [28] R. Rotar, S. L. Jurj, R. Susany, F. Opritoiu, and M. Vladutiu, “Global energy production computation of a solar-powered smart home automation system using reliability-oriented metrics,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 9, May 2021, doi: 10.3390/en14092541.
- [29] Buku Ekonomi Teknik, “BAB 3 Bunga Majemuk dalam Ekuivalensi.”
- [30] V. O. Oladokun and O. C. Asemota, “Unit cost of electricity in Nigeria: A cost model for captive diesel powered generating system,” Aug. 11, 2015, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2015.07.028.

- [31] R. Kurniawan, “Analisis Studi Kelayakan Keuangan Sentra Peningkatan Performa Olahraga Indonesia (SP2OI) di Menara Mandiri”.
- [32] H. Helmi Nur Jannah *et al.*, “Analisis Teknik dan Ekonomi Perencanaan PLTS Rooftop Sistem ON-GRID Di SDN 1 TEMUWUH,” 2023.
- [33] “Transisi Energi, Ekonomi, Lingkungan,” *Journal Universitas Diponegoro*, pp. 9–29.
- [34] P. Menteri, E. Dan, and S. Daya Mineral, “PERATURAN MENTERI ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL REPUBLIK INDONESIA NO 26 TAHUN 2021,” 2021.
- [35] MENTERI ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL REPUBLIK INDONESIA, “PERATURAN MENTERI ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL REPUBLIK INDONESIA NO 49 TAHUN 2018,” 2018.
- [36] S. Gunawan and S. Eko Wahyuni, “KAJIAN PANJANG DATA HISTORIS YANG REPRESENTATIF PADA MODEL STOKASTIK,” EDISI XXXV JUNI, 2006.
- [37] M. Safril Bahar, M. L. Mananohas, C. E. J. C. Montolalu, and K. Kunci, “Model Sistem Antrian dengan Menggunakan Pola Kedatangan dan Pola Pelayanan Pemohon SIM di Satuan Penyelenggaraan Administrasi SIM Resort Kepolisian Manado.” [Online]. Available: <https://ejournal.unsrat.ac.id/index.php/decartesian>
- [38] R. Manurung, S. Ariswoyo, and P. Sembiring, “PERBANDINGAN DISTRIBUSI BINOMIAL DAN DISTRIBUSI POISSON DENGAN PARAMETER YANG BERBEDA,” 2013.
- [39] D. Elavarasan, D. R. Vincent, V. Sharma, A. Y. Zomaya, and K. Srinivasan, “Forecasting yield by integrating agrarian factors and

machine learning models: A survey,” Dec. 01, 2018, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.compag.2018.10.024.

- [40] H.PURWANINGSIH, “Konsep Teori Penunjang Untuk Teori Antrian,” *Journal Undip International Repository*.