

**ANALISIS REAKTIVASI PLTS DOGIYAI 300 KWP DENGAN
KONFIGURASI SISTEM HYBRID TERHADAP PENURUNAN
KONSUMSI BBM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA DIESEL
DEIYAI, PAPUA TENGAH**

TUGAS AKHIR

PROPOSAL INI DISUSUN UNTUK MEMENUHI SALAH SATU SYARAT
MEMPEROLEH GELAR S1 PADA PRODI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG



DISUSUN OLEH

TEGAR ALIFAWAN

NIM 30602200265

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG
2025**

***ANALYSIS OF THE REACTIVATION OF THE 300 KWP DOGIYAI SOLAR PV
SYSTEM WITH A HYBRID CONFIGURATION FOR REDUCING FUEL
CONSUMPTION OF THE DIESEL POWER PLANT IN DOGIYAI, CENTRAL
PAPUA***

FINAL PROJECT

*Proposed to complete the requirement to obtain a bachelor's degree (S1) at
Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Technology,
Universitas Islam Sultan Agung*



ARRANGED BY :

TEGAR ALIFAWAN

NIM 30602200265

**MAJORING INDUSTRIAL ENGINEERING
INDUSTRIAL TECHNOLOGY FACULTY
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG**

2025

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul “ANALISIS REAKTIVASI PLTS DOGIYAI 300 KWP DENGAN KONFIGURASI SISTEM HYBRID TERHADAP PENURUNAN KONSUMSI BBM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA DIESEL DEIYAI, PAPUA TENGAH” ini telah dipertahankan di depan

Penguji sidang Tugas Akhir pada:

Hari : Kamis

Tanggal : 28 Agustus 2025

Tim Penguji

Tanda Tangan

Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Haddin, M.T

NIDN : 0618066301

Ketua

Dr. Ir. H. Sukarno Budi Utomo, M.T.

NIDN : 0619076401

Penguji I

Ir. Budi Pramono Jati, M.T., M.M.

NIDN : 0623126501

Penguji II

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul “ANALISIS REAKTIVASI PLTS DOGIYAI 300 KWP DENGAN KONFIGURASI SISTEM HYBRID TERHADAP PENURUNAN KONSUMSI BBM PEMBANGKIT LISTRIK

TENAGA DIESEL DEIYAI, PAPUA TENGAH” ini disusun

oleh: Nama : TEGAR ALIFAWAN

NIM : 30602200265

Program Studi : Teknik Elektro

Telah disahkan dan disetujui oleh dosen pembimbing pada:

Hari : Jumat

Tanggal : 29 Agustus 2025

Pembimbing

Tanda Tangan

Ir. Budi Pramono Jati, M.M. ...

NIDN. 0623126501

Mengetahui,

Jenny Putri Hapsari, S.T., M.T. ...

NIDN. 0607018501



SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Tegar Alifawan
NIM : 30602200265
Judul Tugas Akhir : ANALISIS REAKTIVASI PLTS DOGIYAI 300
KWP DENGAN KONFIGURASI SISTEM
HYBRID TERHADAP PENURUNAN KONSUMSI
BBM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA DIESEL
DEIYAI, PAPUA TENGAH

Dengan ini saya menyatakan bahwa judul dan isi Tugas Akhir yang saya buat dalam rangka menyelesaikan Pendidikan Strata Satu (S1) Teknik Elektro tersebut adalah asli dan belum pernah diangkat, ditulis ataupun dipublikasikan oleh siapapun baik keseluruhan maupun sebagian, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka, dan apabila dikemudian hari ternyata terbukti bahwa judul Tugas Akhir tersebut pernah diangkat, ditulis ataupun dipublikasikan, maka saya bersedia dikenakan sanksi akademis. Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sadar dan penuh tanggung jawab.

Semarang, 5 Agustus 2025

Yang Menyatakan



Tegar Alifawan

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Tegar Alifawan
NIM : 30602200265
Program Studi : Teknik Elektro
Fakultas : Teknologi industri

Dengan ini menyatakan Karya Ilmiah berupa Tugas akhir dengan Judul :
**ANALISIS REAKTIVASI PLTS DOGIYAI 300 KWP DENGAN
KONFIGURASI SISTEM HYBRID TERHADAP PENURUNAN
KONSUMSI BBM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA DIESEL DEIYAI,
PAPUA TENGAH**

Menyetujui menjadi hak milik Universitas Islam Sultan Agung serta memberikan Hak bebas Royalti Non-Eksklusif untuk disimpan, dialihmediakan, dikelola dan pangkalan data dan dipublikasikan diinternet dan media lain untuk kepentingan akademis selama tetap menyantumkan nama penulis sebagai pemilik hak cipta. Pernyataan ini saya buat dengan sungguh-sungguh. Apabila dikemudian hari terbukti ada pelanggaran Hak Cipta/Plagiatisme dalam karya ilmiah ini, maka segala bentuk tuntutan hukum yang timbul akan saya tanggung secara pribadi tanpa melibatkan Universitas Islam Sultan agung.

Semarang, 5 Agustus 2025

Yang Menyatakan



Tegar Alifawan

HALAMAN PERSEMBAHAN

Alhamdulillah, dengan menngucap syukur kepada Allah SWT. dan penuh dengan rasa bahagia, skripsi ini saya persembahkan untuk sosok yang sangat berjasa dan berpengaruh dalam hidup saya, khususnya dalam penyusunan Tugas Akhir ini.

Pertama,

Tugas akhir ini saya persembahkan dengan penuh cinta dan rasa hormat kepada orang tua saya, Bapak Edi Prasojo dan Ibu Ni'mah Hayati, yang melalui doa, dukungan, dan perhatian tak henti-hentinya telah menjadi semangat bagi saya untuk selalu memberikan yang terbaik, terutama dalam penyusunan tugas akhir ini

Kedua,

Dengan penuh rasa hormat dan terima kasih yang mendalam, saya sampaikan penghargaan kepada Bapak Ir. Budi Pramono Jati, M.T., M.M. selaku dosen pembimbing, atas segala arahan, masukan, dan bimbingan yang telah diberikan sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.

Ketiga,

Saya ingin menyampaikan apresiasi yang setinggi-tingginya kepada rekan-rekan kerja saya yang telah dengan tulus memberikan saran, pandangan, serta data-data penting dalam proses penyusunan tugas akhir ini. Kepada Widia Larasati untuk dukungan dan perhatiannya, dan terutama kepada saudaraku Muhammad Novriadi, yang meskipun dihadapkan pada tantangan bekerja di pedalaman Papua, tetap dengan semangat membantu saya dalam mempersiapkan data secara maksimal.

Saya memiliki harapan besar supaya tugas akhir ini memiliki manfaat yang besar khususnya untuk saya sebagai penulis dan untuk pembaca pada umumnya.

HALAMAN MOTTO

“Berusahalah bermanfaat bagi orang, seberapa burukpun perlakuannya
kepadamu”



KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT. Berkat rahmat dan hidayah-Nya, penulis berhasil menyelesaikan penyusunan skripsi berjudul **“ANALISIS REAKTIVASI PLTS DOGIYAI 300 KWP DENGAN KONFIGURASI SISTEM HYBRID TERHADAP PENURUNAN KONSUMSI BBM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA DIESEL DEIYAI, PAPUA TENGAH”** sebagai salah satu persyaratan menyelesaikan pendidikan di Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung.

Perjalanan panjang penuh hambatan telah dilalui dalam proses penulisan ini. Berbagai hambatan telah ditemui, namun hanya dengan izin dan taufik-Nya penulis dapat menuntaskan seluruh tahapan penulisan hingga selesai.

Dengan penuh rasa rendah hati, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Jenny Putri Hapsary, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung.
2. Bapak Ir. Budi Pramono Jati, M.M., M.T. selaku dosen Pembimbing yang telah mengarahkan, memberi masukan dan membimbing pada penyusunan tugas akhir hingga selesai.
3. Semua pihak yang terlibat dan berperan besar dalam penyusunan tugas akhir ini yang tidak dapat saya sebut satu persatu.

Penulis berharap penulisan akhir ini dapat menambah wawasan dan pengetahuan bagi penulis dan pembaca.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	3
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI	Error! Bookmark not defined.
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	v
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
HALAMAN MOTTO	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xiv
ABSTRAK.....	xv
<i>ABSTRACT</i>	xvi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Pembatasan Masalah	4
1.5 Manfaat.....	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Tinjauan Pustaka.....	6
2.2 Landasan Teori	8
2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD).....	8
2.2.2 Cara Kerja PLTD	8
2.2.3 SFC	10
2.2.4 Total Produksi Energi Listrik (kWh)	11
2.2.5 PLTD Deiyai	12
2.2.6 PLTS	13
2.2.7 Cara Kerja PLTS.....	14
2.2.8 Komponen pada PLTS	15
2.2.9 Konfigurasi PLTS Hybrid.....	18
2.2.10 PLTS Dogiyai	18
2.2.11 Metode Simulasi Monte Carlo.....	19
2.2.12 Parameter Ekonomi	21

2.2.13 Parameter Lingkungan Ditinjau dari Emisi CO ₂	22
2.2.14 Sistem Kelistrikan Enarotali	23
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	25
3.1 Model Penelitian.....	25
3.1.1 Kerangka Pemikiran	25
3.1.2 Hipotesis Penelitian	25
3.2 Metode Penelitian/ Perancangan	26
3.2.1 Tahapan Penelitian.....	27
3.3 Data Parameter	28
3.3.1 Parameter kWh Produksi, Konsumsi BBM dan SFC PLTD Deiyai... 29	
3.3.2 Data Parameter PLTS Dogiyai.....	30
3.3.3 Jenis Aplikasi untuk Simulasi PLTS Dogiyai	30
3.3.4 Data Geografis PLTS Dogiyai	32
3.3.5 Data Parameter Ekonomi.....	32
BAB 4 DATA DAN ANALISA	34
4.1 Data Meteorologis Lokasi PLTS Dogiyai	34
4.2 Perancangan PLTS.....	35
4.2.1 Orientasi.....	35
4.2.2 Panel Surya	36
4.2.3 Inverter.....	37
4.2.4 Baterai.....	38
4.2.5 Instalasi Kabel Daya	40
4.3 Simulasi PLTS Dogiyai pada PVSyst 8.0.13.....	42
4.3.1 Produksi Energi	42
4.3.2 Susut Energi.....	43
4.3.3 Evaluasi Ekonomi Biaya Produksi Energi PLTS Dogiyai.....	44
4.3.4 Potensi Reduksi Emisi CO ₂	46
4.4 Simulasi Probabilitas Produksi Energi PLTS Dogiyai pada Aplikasi MATLAB R2025a	49
4.4.1 Parameter dalam Simulasi Monte Carlo	49
4.4.2 Simulasi Monte Carlo pada Aplikasi MATLAB R2025a	50
4.5 Efektivitas PLTS Dogiyai terhadap Efisiensi PLTD Deiyai.....	51
BAB 5 PENUTUP	55
5.1 Kesimpulan.....	55



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tinjauan Pustaka	6
Tabel 2.2 Daftar Genset Diesel yang Dimiliki PLN PLTD Deiyai	12
Tabel 2.3 Satuan Pengukuran Emisi CO ₂	23
Tabel 2.4 Data Penyulang pada Sistem Kelistrikan Enarotali.....	23
Tabel 3.1 Data kWh Produksi, Konsumsi BBM dan SFC PLTD Deiyai	29
Tabel 3.2 Data Inflasi Tahunan 2015-2024	33
Tabel 3.3 Data Perkiraan BPP Nabire dari Dokumen RUPTL 2025-2034	33
Tabel 3.4 Data Surat Utang PLN.....	33
Tabel 4.1 Data Meteorologis PLTS Dogiyai	34
Tabel 4.2 Orientasi PLTS Dogiyai	35
Tabel 4.3 Perhitungan Modul Surya per String.....	36
Tabel 4.4 Perencanaan Modul Panel Surya.....	37
Tabel 4.5 Data Perhitungan Daya pada Inverter	38
Tabel 4.6 Perhitungan Kinerja Rangkaian Baterai.....	40
Tabel 4.7 Kabel Daya pada PLTS Dogiyai	40
Tabel 4.8 Produksi Energi Bulanan PLTS Dogiyai.....	42
Tabel 4.9 Tabel Rancangan Anggaran Biaya Reaktivasi PLTS.....	44
Tabel 4.10 Parameter Ekonomi Indonesia, PLN dan BPP Listrik.....	46
Tabel 4.11 Data System Lifecycle Emission.....	47
Tabel 4.12 Data Reduksi Emisi Tahunan	47
Tabel 4.13 Tabel Parameter Simulasi Monte Carlo.....	49
Tabel 4.14 Parameter Bulanan Simulasi Monte Carlo	49
Tabel 4.15 Tabel Potensi Penghematan BBM.....	52
Tabel 4.16 Perbandingan Konsumsi BBM dan SFC Bulanan serta Tahunan Pra dan Pasca Operasi PLTS Dogiyai.....	52

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Komponen pada Mesin Diesel Empat Tak Modern	9
Gambar 2.2 PLTD Deiyai tampak Atas.....	13
Gambar 2.3 Skema Cara Kerja Panel Surya	14
Gambar 2.4 Sirkuit Kontrol MPPT	16
Gambar 2.5 Komponen Baterai pada PLTS	17
Gambar 2.6 Inverter PLTS	17
Gambar 2.7 Skema PLTS dan PLTD konfigurasi Hybrid.....	18
Gambar 2.8 PLTS Dogiyai saat Masih Beroperasi	19
Gambar 2.9 SLD Sistem Kelistrikan Enarotali	24
Gambar 3.1 Flowchart Penelitian.....	27
Gambar 3.2 Penampakan Aplikasi PVSyst 8.0.13	31
Gambar 3.3 Halaman awal MATLAB R2025a	32
Gambar 4.1 Lokasi PLTS Dogiyai yang Ditunjukkan Aplikasi PVSyst.....	35
Gambar 4.2 SLD PLTS Dogiyai	41
Gambar 4.3 Diagram Annually Energy Losses PLTS Dogiyai.....	43
Gambar 4.4 Grafik Akumulasi Reduksi Emisi CO ₂ secara Tahunan	48
Gambar 4.5 Grafik Distribusi Data Probabilitas Produksi Energi PLTS Dogiyai	51
Gambar 4.6 Grafik Persentasi Potensi Pengurangan Konsumsi BBM	54



ABSTRAK

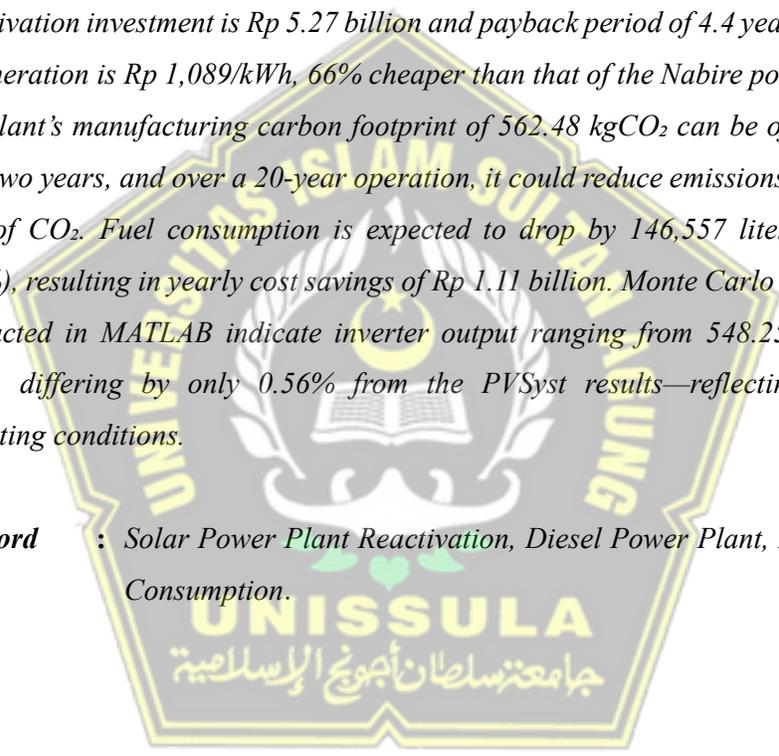
Sistem Kelistrikan Enarotali saat ini hanya disuplai oleh PLTD Deiyai yang memiliki biaya operasional tinggi. PLTS Dogiyai berkapasitas 300 kWp sempat beroperasi pada 2013–2018, dan reaktivasi PLTS yang rusak berpotensi menurunkan konsumsi BBM PLTD. Penelitian dilakukan melalui pengumpulan data konsumsi BBM dan produksi listrik PLTD Deiyai, serta simulasi teknis PLTS menggunakan PVSyst 8.0.13. Hasil simulasi menunjukkan bahwa PLTS Dogiyai mampu menghasilkan 530,16 MWh/tahun, dengan 524,03 MWh disuplai ke grid (3,10% dari total konsumsi wilayah sebesar 16.884,52 MWh). Investasi reaktivasi sebesar Rp 5,27 miliar menghasilkan periode balik modal 4,4 tahun. Biaya pokok pembangkitan PLTS sebesar Rp 1.089/kWh, 66% lebih murah dibandingkan sistem listrik Nabire. Jejak karbon pabrikasi sebesar 562,48 kgCO₂ dapat dieliminasi dalam kurang dari dua tahun dan operasi selama 20 tahun mengurangi 7.507,5 tCO₂. Penggunaan BBM PLTD Deiyai berkurang sebesar 146.557 liter/tahun (3,1%), dengan penghematan biaya tahunan Rp 1,11 miliar. Simulasi Monte Carlo menggunakan MATLAB menunjukkan rentang produksi inverter sebesar 548,25 – 548,94 MWh, berbeda 0,56% dari hasil simulasi PVSyst, yang menandakan kondisi operasional realistis.

Kata Kunci : Reaktivasi PLTS, PLTD, Konsumsi BBM.

ABSTRACT

The Enarotali Power System currently relies on the Deiyai diesel power plant, known for its high operational costs. The 300 kWp Dogiyai solar PV plant, which operated between 2013 and 2018, was replaced by Deiyai diesel power plant. Reactivating damaged Dogiyai solar power plant has the potential to reduce diesel's fuel consumption. The study involved collecting data on Deiyai diesel power plant's electricity production and fuel consumption, combined with simulations of the Dogiyai solar power plant using PVSyst 8.0.13. Results showed solar power plant could generate 530.16 MWh annually, with 524.03 MWh fed into grid. Reactivation investment is Rp 5.27 billion and payback period of 4.4 years. The cost of generation is Rp 1,089/kWh, 66% cheaper than that of the Nabire power system. The plant's manufacturing carbon footprint of 562.48 kgCO₂ can be offset in less than two years, and over a 20-year operation, it could reduce emissions by 7,507.5 tons of CO₂. Fuel consumption is expected to drop by 146,557 liters annually (3.1%), resulting in yearly cost savings of Rp 1.11 billion. Monte Carlo simulations conducted in MATLAB indicate inverter output ranging from 548.25 to 548.94 MWh, differing by only 0.56% from the PVSyst results—reflecting realistic operating conditions.

Keyword : Solar Power Plant Reactivation, Diesel Power Plant, Diesel Fuel Consumption.



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PLTS Dogiyai adalah PLTS yang beroperasi untuk wilayah kecamatan Kamu, Kabupaten Dogiyai yang beroperasi sejak tahun 2013-2018. PLTS Dogiyai memiliki daya sebesar 300 kWp. Pada awal pembangunannya, PLTS Dogiyai merupakan satu-satunya pembangkit listrik yang disediakan oleh PLN untuk mengalirkan sumber energi listrik di wilayah Kecamatan Kamuu, Kabupaten Dogiyai dengan pola operasi enam jam nyala, dari pukul 18.00-24.00 WIT.

Seiring dengan kerusakan dan kurangnya pemeliharaan serta pencurian panel surya pada PLTS Dogiyai, peran PLTS Dogiyai juga ditopang oleh PLTD Dogiyai pada tahun 2016 seiring pula dengan peningkatan jam nyala listrik dari enam jam nyala per hari ke 12 jam nyala per hari. Setelah sistem kelistrikan di kabupaten Dogiyai, Deiyai, dan Paniai tersambung pada tahun 2021, peran PLTS dan PLTD Dogiyai sepenuhnya digantikan oleh PLTD Deiyai, yang menyuplai energi listrik pada sistem kelistrikan Enarotali yang meliputi wilayah Kabupaten Paniai, Kabupaten Deiyai dan Kabupaten Dogiyai, Provinsi Papua Tengah.

Pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) Deiyai telah beroperasi sejak tahun 2016. PLTD Deiyai memiliki peran yang penting dalam melakukan produksi energi Listrik yang disalurkan untuk sistem kelistrikan Enarotali yang terdiri dari Kabupaten Paniai, Kabupaten Deiyai dan Kabupaten Dogiyai. PLTD Deiyai memiliki peran penting sebagai pemasok energi yang penting sehingga memungkinkan masyarakat sekitar untuk memanfaatkan dan menikmati manfaat dari listrik yang handal dan tersedia 24 jam. Sistem kelistrikan Enarotali saat ini didukung oleh Jaringan Tegangan Menengah (JTM) dengan panjang total mencapai 274 kms yang dibagi ke tiga penyulang berbeda, yang menghubungkan pusat pembangkitan di PLTD Deiyai dengan titik-titik distribusi di Kabupaten Paniai, Deiyai, dan Dogiyai. Panjang jaringan ini menunjukkan skala distribusi energi yang luas, namun juga menimbulkan tantangan dalam efisiensi penyaluran dan potensi kehilangan daya (losses) yang dapat diminimalkan melalui integrasi pembangkit energi terbarukan yang lebih dekat dengan beban.

Seiring meningkatnya beban listrik dan konsumsi BBM di PLTD Deiyai, tantangan efisiensi dan keberlanjutan sistem kelistrikan Enarotali semakin nyata. Ketergantungan terhadap solar industri B40 tidak hanya menimbulkan tekanan biaya operasional dan logistik, tetapi juga berpotensi menghambat pencapaian target Net Zero Emission (NZE) Indonesia tahun 2060. Dalam konteks ini, reaktivasi PLTS Dogiyai menjadi langkah strategis yang tidak sekadar bersifat teknis, melainkan juga mendukung transisi energi nasional. Dengan kapasitas 300 kWp dan lokasi yang dekat dengan beban, PLTS Dogiyai berpotensi mengurangi losses jaringan serta menekan konsumsi BBM PLTD secara signifikan melalui integrasi sistem hybrid.

Pertumbuhan konsumsi solar di PLTD Deiyai yang semakin tinggi berpotensi menghambat penerapan *Net Zero Emission* (NZE) di Indonesia. *NZE* bertujuan untuk mengurangi gas rumah kaca dan jejak karbon pada sektor energi melalui pemanfaatan energi hijau dan mulai tahun 2060, energi terbarukan dan benar benar menghasilkan nol karbon dan nol gas rumah kaca pada setiap produksi dan pemanfaatan energi. Pertumbuhan penggunaan BBM solar di PLTD Deiyai berpotensi mempersulit penerapan *Net Zero Emission* pada tahun 2060.

Survei yang dilakukan oleh PT PLN Enjiniring pada tahun 2024 membuka peluang untuk menghidupkan kembali PLTS Dogiyai dengan sistem keamanan dan pemeliharaan yang lebih baik. Reaktivasi ini diharapkan mampu menyuplai energi bersih ke sistem kelistrikan Enarotali, mengurangi emisi gas rumah kaca, serta menurunkan biaya operasional pembangkitan. Dengan demikian, integrasi ulang PLTS Dogiyai tidak hanya menjadi solusi lokal, tetapi juga kontribusi nyata terhadap bauran energi terbarukan dan komitmen nasional menuju sistem kelistrikan yang lebih hijau, efisien, dan berkelanjutan. Reaktivasi PLTS Dogiyai tidak hanya menjadi solusi teknis untuk mengurangi beban konsumsi BBM solar di PLTD Deiyai, tetapi juga merupakan langkah strategis dalam mendukung pencapaian target Net Zero Emission (NZE) Indonesia tahun 2060. Dengan mengintegrasikan kembali sumber energi terbarukan ke dalam sistem kelistrikan Enarotali, PLN turut berkontribusi dalam transisi energi nasional menuju sistem yang lebih bersih, berkelanjutan, dan rendah karbon.

Pengoperasian kembali PLTS Dogiyai diharapkan dapat menyuplai energi listrik yang bersih ke sistem kelistrikan Enarotali, dan dapat mengurangi konsumsi BBM jenis solar di PLTD Deiyai sehingga dapat memberikan solusi penyediaan energi yang lebih hijau dan berkelanjutan. Manfaat lain yang diharapkan antara lain biaya operasional untuk pembelian dan biaya transportasi BBM solar dapat ditekan serta berpotensi untuk mengurangi jumlah gas rumah kaca yang dihasilkan PLTD Deiyai yang dikarenakan oleh pengurangan konsumsi BBM. Melalui reaktivasi PLTS Dogiyai di sistem kelistrikan Enarotali, PLN dapat membantu pemerintah untuk mencapai Net Zero Emission (NZE) Indonesia tahun 2060.

1.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah sesudah dengan latar belakang yang telah dipaparkan dapat dijelaskan melalui pertanyaan berikut.

1. Bagaimana reaktivasi PLTS Dogiyai 300 kWp dapat berkontribusi dalam menurunkan konsumsi BBM PLTD Deiyai pada sistem kelistrikan Enarotali?
2. Sejauh mana konfigurasi sistem hybrid PLTS–PLTD memengaruhi efisiensi operasional dan pengurangan emisi gas rumah kaca sistem kelistrikan Enarotali?
3. Bagaimana dampak reaktivasi PLTS Dogiyai ditinjau dari aspek ekonomi sistem kelistrikan Enarotali, khususnya dalam hal biaya operasional dan potensi penghematan BBM?

1.3 Tujuan

Tujuan penyusunan tugas akhir ini adalah untuk menganalisis pemanfaatan sel surya terhadap penurunan konsumsi BBM di PLTD Deiyai.

1. Mengetahui pengaruh reaktivasi PLTS Dogiyai 300 kWp dapat berkontribusi dalam menurunkan konsumsi BBM PLTD Deiyai pada sistem kelistrikan Enarotali.
2. Mengetahui pengaruh konfigurasi sistem hybrid PLTS–PLTD memengaruhi efisiensi operasional dan pengurangan emisi gas rumah kaca dalam sistem kelistrikan Enarotali.
3. Mengetahui dampak reaktivasi PLTS Dogiyai terhadap aspek keekonomian sistem kelistrikan Enarotali, khususnya dalam hal biaya operasional dan potensi penghematan BBM.

1.4 Pembatasan Masalah

Penelitian ini dibatasi pada evaluasi kontribusi reaktivasi PLTS Dogiyai 300 kWp dalam konfigurasi hybrid PLTS–PLTD pada sistem kelistrikan Enarotali, dengan fokus wilayah operasional PLTD Deiyai. Parameter yang dianalisis mencakup Specific Fuel Consumption (SFC) BBM B40 pada PLTD sebelum dan setelah integrasi PLTS, produksi energi listrik PLTS Dogiyai berdasarkan simulasi PVSyst 8.0.13 dan Monte Carlo di MATLAB R2025a, serta pengurangan emisi CO₂ berdasarkan perhitungan jejak karbon siklus hidup (lifecycle emissions). Data yang digunakan dibatasi pada periode Mei 2024 hingga April 2025 sesuai catatan produksi dan konsumsi PLTD Deiyai.

Analisis keekonomian hanya mencakup perhitungan biaya investasi reaktivasi (CAPEX), periode pengembalian modal (payback period), dan biaya pokok pembangkitan (BPP) PLTS. Aspek lain—seperti pajak, subsidi energi, fluktuasi harga BBM di luar periode studi, dan biaya pemeliharaan jangka panjang—tidak diperhitungkan dalam penelitian ini.

1.5 Manfaat

Penelitian aplikasi sel surya pada sistem kelistrikan diharapkan dapat memberikan manfaat berupa pengurangan konsumsi BBM solar di PLTD Deiyai. Hal ini dapat mendukung pengelolaan energi yang lebih efisien, hijau dan berkelanjutan. Dengan solusi ini, biaya operasional dapat ditekan, sekaligus membantu mengurangi emisi CO₂ sejalan dengan visi Indonesia menuju Net Zero Emission.

Penelitian pada tugas akhir ini juga dapat menjadi bahan evaluasi sekaligus pertimbangan untuk pembangunan dan pengembangan energi terbarukan di wilayah sistem kelistrikan Enarotali dan sekitarnya, demi meningkatkan akses listrik yang lebih luas dan ramah lingkungan. Apabila berhasil diterapkan di Enarotali, maka selanjutnya diharapkan bisa diterapkan di daerah-daerah paling terpencil di seluruh Indonesia.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan memiliki maksud dan tujuan untuk melakukan pembagian pokok-pokok penting yang akan dibahas pada penelitian ini. Berikut ini merupakan sistematika penulisan tugas akhir.

Bab I Pendahuluan, terdiri atas latar belakang, perumusan masalah, tujuan, pembatasan masalah, manfaat dan sistematika penulisan.

Bab II Tinjauan Pustaka, terdiri atas tinjauan pustaka dan landasan teori.

Bab III Metode Penelitian, terdiri atas metode penelitian/ perancangan, data parameter dan jadwal penelitian.

Bab IV Data dan Analisa, terdiri atas

Bab V Penutup, terdiri atas kesimpulan dan saran.



BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Berikut merupakan jurnal-jurnal yang melakukan penelitian serupa dengan penelitian ini.

Tabel 2.1 Tinjauan Pustaka

Judul	Tahun	Penulis	Isi Penelitian	Hasil Penelitian
A Hybrid Photovoltaic/Diesel System for Off-Grid Applications in Lubumbashi, DR Congo: A HOMER Pro Modeling and Optimization Study (2023)	2023	Ilunga Kajila Rice, Hanhua Zhu, Cunquan Zhang, Arnauld Robert Tapa	Penelitian ini mengevaluasi kelayakan penggunaan sistem hibrida yang menggabungkan generator diesel dan panel surya di Lubumbashi, Kongo. Tujuan utamanya adalah untuk mengurangi ketergantungan generator diesel yang mahal dan tidak efisien[1].	Hasilnya adalah sistem hibrida lebih efisien secara ekonomi dan lingkungan dibandingkan dengan penggunaan generator diesel saja. Sistem ini mampu mengurangi biaya operasional, emisi karbon, dan menyediakan listrik yang stabil bagi Masyarakat.
Feasibility Study for a Hybrid Power Plant (PV-Wind-Diesel-Storage) Connected to the Electricity Grid	2022	Fahad Maoulida, Kassim Mohamed Aboudou	Penelitian ini mengevaluasi kelayakan penggunaan sistem hibrida yang menggabungkan	Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem hibrida yang terhubung ke grid bergantung pada sumber energi

Judul	Tahun	Penulis	Isi Penelitian	Hasil Penelitian
		, Djedjig Rabah, Mohamed El-Ganaoui	panel surya fotovoltaik (PV), turbin angin, generator diesel, dan penyimpanan energi yang terhubung langsung ke jaringan listrik[2].	yang tersedia dan kendala yang ada karena tidak stabil. Sistem ini membuat biaya turun dan berkontribusi untuk mereduksi emisi CO ₂ .
Optimized configuration of photovoltaic and battery energy storage system (BESS) in an isolated grid: A case study of Eastern Indonesia	2020	A Azahra, K D Syahindra, D R Aryani, F H Jufri1, I M Ardita	Penelitian ini mengevaluasi konfigurasi optimal dari sistem hibrida yang menggabungkan pembangkit listrik diesel, sistem fotovoltaik (PV), dan sistem penyimpanan energi baterai (BESS) di jaringan terisolasi di Indonesia bagian timur. Penelitian bertujuan untuk memaksimalkan keuntungan ekonomi[3].	Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi hibrida yang diusulkan memiliki biaya energi (COE) yang lebih rendah dibandingkan dengan pembangkit listrik diesel, yaitu di bawah 20,81 sen USD. Sistem hibrida ini juga mampu mengatasi masalah stabilitas pembangkit EBT.

2.2 Landasan Teori

Dalam perencanaan penelitian, diperlukan adanya pemahaman terhadap teori-teori dasar, yang membantu merumuskan kerangka berfikir yang logis. Berikut merupakan landasan teori yang relevan dengan topik yang diangkat.

2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD)

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) adalah pembangkit listrik yang memanfaatkan mesin diesel sebagai penggerak utama untuk menghasilkan listrik. Mesin diesel mengubah energi kimia dari bahan bakar (biasanya solar) menjadi energi mekanik, yang kemudian diubah menjadi energi listrik melalui generator[4]. PLTD sering digunakan di daerah terpencil atau sebagai cadangan di daerah yang memiliki jaringan listrik utama. Efisiensi PLTD sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk desain mesin, kondisi operasi, dan kualitas bahan bakar.

Terdapat dua jenis mesin diesel yang umum digunakan saat ini yaitu mesin diesel dua tak/langkah dan empat tak/langkah. Berikut kelebihan dan kekurangan dari masing masing jenis mesin.

1. Mesin Diesel Empat Tak

Mesin ini memiliki efisiensi yang lebih tinggi yang tinggi dengan rentang putaran yang lebih tinggi. Kelemahan dari mesin ini ialah memiliki komponen yang lebih rumit dan kompleks serta ukuran dan berat yang lebih besar. Pada umumnya mesin diesel empat tak juga banyak ditemui di pembangkit listrik tenaga diesel.

2. Mesin Diesel Dua Tak

Mesin ini memiliki dimensi yang kecil, bobot lebih ringan pada daya output yang sama dari mesin diesel empat tak dan mampu beroperasi dengan daya maksimum.

2.2.2 Cara Kerja PLTD

PLTD bekerja dengan cara mengkonversi energi gerak rotasi yang dihasilkan mesin diesel menjadi energi listrik yang dihasilkan dari putaran generator yang terhubung dengan mesin diesel. Spesifikasi generator disesuaikan dengan spesifikasi mesin diesel sebagai prime mover. Penentuan spesifikasi generator utamanya dilakukan dengan menyesuaikan kecepatan putar dan daya maksimum dari mesin diesel yang digunakan.

Sesuai dengan namanya, mesin diesel empat Langkah yang banyak ditemui di PLTD terdiri atas empat langkah utama untuk setiap proses pengapian. Proses tersebut antara lain sebagai berikut :

1. Langkah Hisap (Intake)

Posisi awal piston berada pada titik mati atas (TMA). Piston bergerak turun menuju titik mati bawah (TMB), sementara klep hisap terbuka dan yang kemudian menghisap udara ke dalam silinder.

2. Langkah Kompresi (Compression)

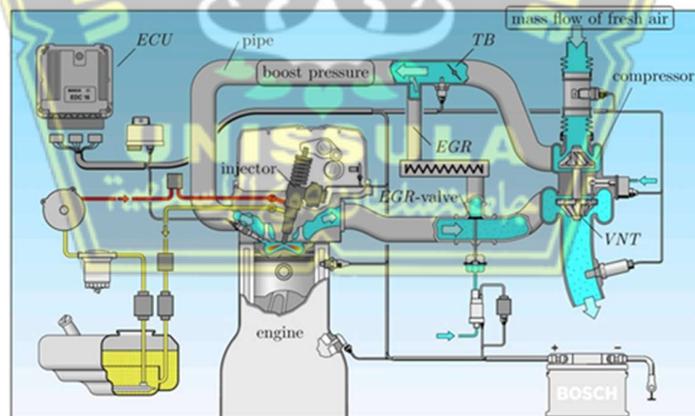
Piston bergerak naik ke TMA, dan klep keluar maupun masuk tertutup yang mengakibatkan tekanan dan suhu udara yang ada di dalam silinder meningkat.

3. Langkah Pembakaran (Combustion)

Injektor menyemprotkan bahan bakar pada udara yang telah dikompresi. Ledakan yang terukur tercipta kemudian mendorong piston kembali ke TMB.

4. Langkah Buang (Exhaust)

Ledakan yang terjadi pada fase pembakaran menghasilkan produk sampingan berupa hasil pembakaran yaitu gas sisa pembakaran. Piston bergerak dari TMB ke TMA, sementara klep buang terbuka, mengeluarkan gas sisa pembakaran melalui knalpot.



Gambar 2.1 Komponen pada Mesin Diesel Empat Tak Modern

Dikarenakan terdiri atas empat langkah pengapian, maka dibutuhkan kecepatan rotasi yang lebih tinggi dari mesin diesel dua langkah dalam setiap operasi, untuk menyesuaikan setiap siklus pengapian bekerja dengan baik.

2.2.3 SFC

Menurut Permen ESDM Republik Indonesia nomor 9 tahun 2020, tentang Efisiensi Penyediaan Tenaga Listrik PT PLN (Persero), *Specific Fuel Consumption (SFC)* adalah konsumsi bahan bakar spesifik yang dibutuhkan oleh unit pembangkit tenaga listrik untuk menghasilkan satu kilowatt-hour (kWh) energi listrik bruto. SFC merupakan indikator utama untuk mengukur efisiensi penggunaan BBM terhadap suatu PLTD. SFC sangat penting karena berfungsi untuk mengukur efisiensi BBM, biaya operasional dan dampak terhadap lingkungan. Nilai indikator SFC yang rendah menunjukkan bahwa kinerja suatu pembangkit Listrik dapat dikatakan cukup efisien dalam mengubah bahan bakar menjadi energi Listrik.

Nilai indikator SFC pada setiap pembangkit listrik tenaga diesel sangat bervariasi tergantung dari kondisi lingkungan; jenis bahan bakar; serta jenis, tipe, usia dan kondisi mesin diesel sebagai penggerak utama. Jenis bahan bakar dengan nilai kalori yang lebih tinggi secara teori mampu membuat nilai SFC lebih rendah tanpa mengubah jenis mesin.

Melalui peran *Specific Fuel Consumption (SFC)* yang penting untuk menilai efisiensi PLTD. Dengan memahami dan mengoptimalkan SFC diharapkan dapat mengurangi biaya operasional, mengurangi dampak lingkungan, dan memastikan bahwa pembangkit listrik beroperasi pada efisiensi yang optimal, dan oleh karena itu, indikator SFC harus selalu dipantau dan dianalisis sebagai bagian dari pengelolaan PLTD yang efektif. Adapun persamaannya adalah sebagai berikut :

$$SFC = \frac{V}{W} \dots\dots\dots (1)$$

dimana:

- SFC = Specific fuel consumption (liter/kWh)
- V = Volume BBM (liter)
- W = Energi listrik (kWh)

Data volume BBM didapatkan dari alat *flowmeter* yang bertugas menghitung aliran dan mencatat volume BBM pada setiap unit genset, sementara data energi listrik didapatkan dari kWh meter yang terdapat pada sisi panel tegangan rendah, panel tegangan menengah (kubikel 20 kV) dan panel tegangan menengah (kubikel 20 kV) untuk penyulang.

Dengan persamaan diatas dapat disimpulkan bahwa semakin rendah angka SFC pada suatu PLTD dengan jenis BBM dan kondisi lingkungan yang sama, maka semakin efisien pemakaian BBM nya. Pada umumnya, nilai SFC pada PLTD berkisar antara 0,250 – 0,290 liter/kWh dengan target tidak melebihi 0,282 liter/kWh pada penggunaan BBM Biosolar B35 dengan kandungan FAME minyak kelapa sawit .

2.2.4 Total Produksi Energi Listrik (kWh)

Unit energi merupakan satuan untuk mengukur berapa banyak energi yang dihasilkan atau digunakan. Satuan internasional untuk unit energi dinyatakan dalam bentuk Joule atau *Watt-second*. Unit yang biasa dipakai adalah kalori dan *Watt-hour*, namun untuk penggunaan energi listrik, biasanya dipakai unit ribuan dari *Watt-hour*, yaitu *kilo watt-hour (kWh)*, dengan maksud yaitu penggunaan satu kWh berarti mengkonsumsi daya satu kW selama satu jam [5].

Melalui pengertian satuan energi kWh diatas, maka persamaan dari total produksi maupun konsumsi energi listrik yang dihasilkan maupun digunakan adalah sebagai berikut :

$$W = \frac{V \times I \times \cos \phi \times t}{1000} \dots \dots \dots (2)$$

dimana:

W = Energi (kWh)

P = Daya (watt)

t = Waktu (jam)

V = Tegangan (volt)

I = Arus (ampere)

cos ϕ = Faktor daya

Pengukuran dan pencatatan produksi dan konsumsi energi listrik dilakukan oleh suatu alat bernama kWh meter. Pada konsumen PLN dengan daya tertentu, dipasang juga alat kVARh meter yang berfungsi untuk mengukur konsumsi daya reaktif (kVAR) pada sistem kelistrikan dalam jangka waktu tertentu. Pengukuran yang dilakukan oleh kWh dan kVARh meter dilakukan melalui metering pada tegangan dan arus kabel daya.

2.2.5 PLTD Deiyai

PLTD Deiyai terletak di Kabupaten Deiyai, Papua Tengah, Indonesia. Lokasi ini strategis karena terletak di tengah kawasan yang dapat menyuplai listrik ke kabupaten seperti Paniai dan Dogiyai, yang juga sangat bergantung pada pasokan listrik dari pembangkit ini. Dengan demikian, PLTD Deiyai memainkan peran krusial dalam mendukung infrastruktur energi di Papua Tengah.

PLTD Deiyai adalah pembangkit listrik tenaga diesel yang berperan penting dalam menyuplai energi listrik untuk wilayah kelistrikan Enarotali. PLTD ini memiliki tujuh unit genset diesel dengan total daya terpasang sebesar 5144 kW/ 6420 kVA, dan total daya mampu mencapai 3800 kW pada beban puncak sekitar 2600 kW. Setiap genset bekerja pada sistem kelistrikan 50 Hz dengan tegangan 220/380 V pada kecepatan putar 1500 rpm.

PLTD Deiyai mulai beroperasi sejak tahun 2017 dan telah menjadi tulang punggung penyediaan listrik di wilayah tersebut. Hal ini menunjukkan betapa pentingnya peran pembangkit ini dalam memenuhi kebutuhan energi masyarakat setempat. Dengan kapasitas dan konsumsi bahan bakar yang signifikan, PLTD Deiyai dituntut untuk memastikan ketersediaan listrik yang stabil dan andal. Berikut adalah daftar genset diesel yang terdapat di PLTD Deiyai.

Tabel 2.2 Daftar Genset Diesel yang Dimiliki PLN PLTD Deiyai

No	Merk	Type	Daya Terpasang	Daya Mampu
1	Caterpillar	C-3512B	1000 kW/ 1250 kVA	850 kW
2	Caterpillar	C-3512B	1000 kW/ 1250 kVA	850 kW
3	Caterpillar	C-18	508 kW/ 630 kVA	380 kW
4	Caterpillar	C-18	508 kW/ 630 kVA	380 kW
5	Komatsu	EGS1200	800 kW/ 1000 kVA	500 kW
6	Komatsu	EGS1200	800 kW/ 1000 kVA	500 kW
7	MTU	12V2000 G85	528 kW/ 660 kVA	340 kW
Total			5144 kW/ 6420 kVA	3800 kW

Semua mesin milik PLTD Deiyai memiliki generator dengan tegangan kerja 230/400 V. Terdapat enam buah trafo step up 400/20000 V untuk menaikkan tegangan dari output generator.



Gambar 2.2 PLTD Deiyai tampak Atas

2.2.6 PLTS

PLTS merupakan salah satu pembangkit listrik yang sederhana dalam konstruksi, kompatibel dan mudah dalam pemasangannya. PLTS menghasilkan listrik dari pancaran sinar matahari, tanpa proses rotasi yang dilakukan oleh generator pada umumnya untuk menghasilkan energi listrik. PLTS tidak mengandalkan energi fosil dalam proses produksi energi listriknya, sehingga tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca apapun dan menjadi salah satu sumber energi hijau. Oleh karena itu, beberapa negara di belahan dunia kini mencoba mengembangkan sumber daya energi baru terbarukan[6].

Energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang menjanjikan dan memiliki potensi besar untuk dikembangkan, karena ketersediaannya sangat melimpah dan bisa dimanfaatkan sebagai sumber pembangkitan listrik dalam jangka panjang. Meskipun memiliki beberapa keunggulan, namun kelemahan penyediaan energi listrik dari PLTS adalah dari durasi penyinaran harian yang mana PLTS hanya beroperasi pada siang hari, serta ketidakstabilan produksi energi listrik disesuaikan dengan cuaca dan intensitas penyinaran matahari. Untuk menghitung daya maksimum PLTS dapat dihitung melalui persamaan yang ada dibawah ini.

$$kW_p = \frac{n \times W_p}{1000} \dots\dots\dots (3)$$

dimana :

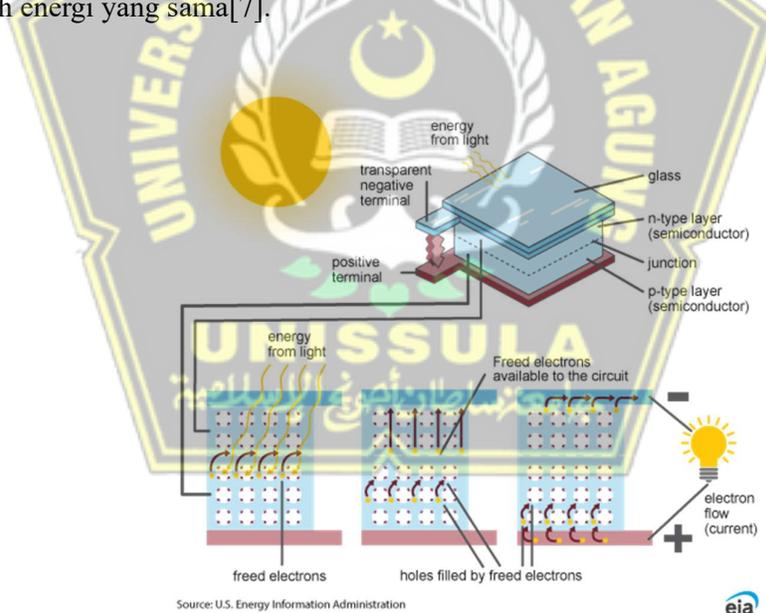
kW_p = Daya nominal puncak (kW_p)

n = Jumlah modul surya

W_p = Daya nominal puncak modul surya (W_p)

2.2.7 Cara Kerja PLTS

Cahaya matahari terdiri dari gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang bervariasi dan partikel energi yang disebut foton. Foton ini membawa energi yang dimanfaatkan oleh sel surya untuk menghasilkan listrik. Ketika foton mengenai permukaan sel surya yang tersusun dari material semikonduktor seperti silikon, sebagian akan dipantulkan atau menembus permukaan, namun sebagian lainnya diserap oleh material aktif dalam sel. Partikel foton pada cahaya matahari diserap oleh material pada sel surya yang menyebabkan elektron keluar dengan jumlah energi yang sama[7].



Gambar 2.3 Skema Cara Kerja Panel Surya

Proses penyerapan ini melepaskan elektron dari atom-atom semikonduktor, dan akibat perlakuan khusus terhadap permukaan sel, elektron-elektron tersebut cenderung bergerak menuju permukaan depan, menciptakan ketidakseimbangan muatan listrik antara sisi depan dan belakang. Ketidakseimbangan ini menghasilkan beda potensial seperti kutub positif dan negatif pada baterai, memungkinkan

terjadinya aliran elektron melalui konduktor ketika dihubungkan ke beban eksternal. Elektron yang bergerak tersebut menciptakan arus listrik dalam bentuk arus searah (DC), yang dapat dikumpulkan dari beberapa panel surya dan kemudian disimpan ke dalam komponen baterai.

Listrik dalam bentuk DC yang tersimpan di baterai belum dapat langsung digunakan pada peralatan elektronik rumah tangga atau sistem jaringan listrik konvensional karena perbedaan jenis arus. Oleh karena itu, sistem PLTS membutuhkan inverter untuk mengubah arus DC—yang memiliki frekuensi 0 Hz dan tegangan tetap—menjadi arus bolak-balik (AC) dengan frekuensi 50/60 Hz serta tegangan yang sesuai dengan kebutuhan beban. Konversi ini memungkinkan integrasi energi surya ke dalam sistem kelistrikan umum.

2.2.8 Komponen pada PLTS

Komponen pada PLTS berbeda dengan komponen pada pembangkit listrik yang memanfaatkan gerakan rotasi dari penggerak utamanya (*prime mover*). Secara umum sebuah PLTS memiliki empat komponen utama yang mendukung pengoperasiannya, Komponen tersebut antara lain sebagai berikut :

1. Panel Surya

Komponen ini adalah komponen utama pada PLTS. Panel surya berfungsi menghasilkan energi listrik dari konversi energi pada sinar matahari. Panel surya memiliki beragam jenis tipe dengan kelebihan dan kekurangannya. Beberapa tipe tersebut antara lain monocrystalline, polycrystalline, dan amorf.. Perhitungan energi yang dihasilkan panel surya dapat dihitung dari persamaan berikut :

$$E = G \times A \times \eta \dots\dots\dots (4)$$

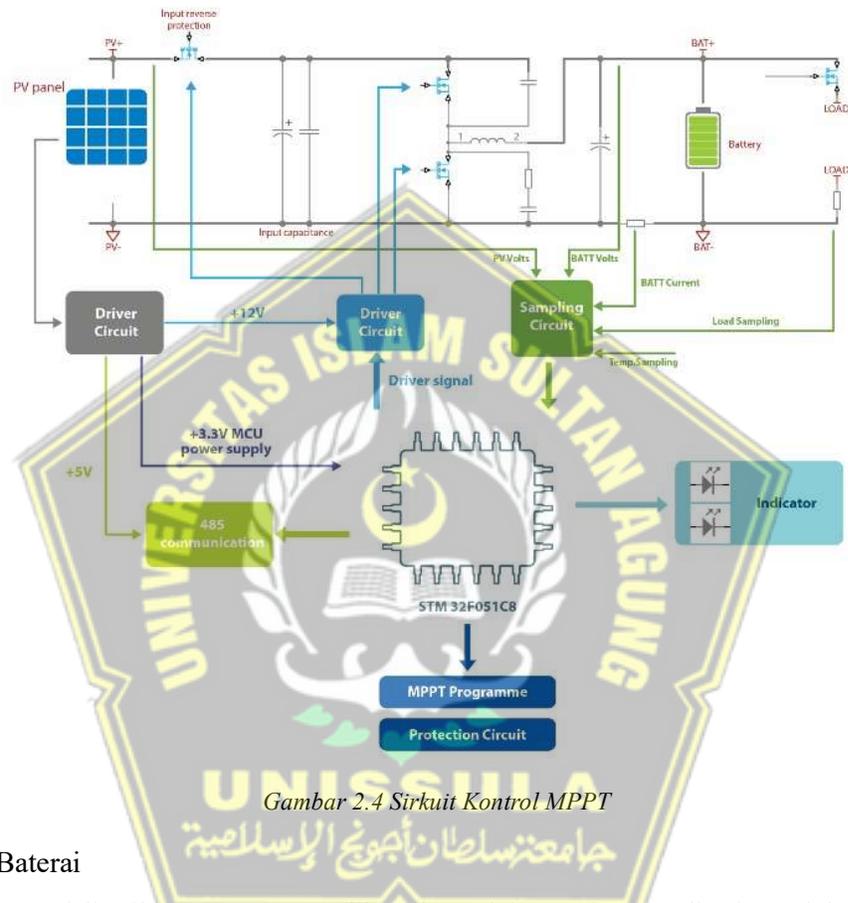
dimana :

- kW_p = Daya nominal puncak (kW_p)
- n = Jumlah modul surya
- W_p = Daya nominal

2. MPPT (*Maximum Power Point Tracker*)

Apabila diartikan dalam Bahasa Indonesia, *Maximum Power Point Tracker* adalah pelacakan titik daya maksimum. MPPT merupakan sistem kendali

elektronik yang bertujuan untuk memaksimalkan daya dan efisiensi pada modul surya. Tanpa MPPT, modul surya keluaran daya serta efisiensi tidak mampu mencapai nilai maksimum. MPPT melakukan kontrol terhadap arus dan tegangan pada panel surya melalui algoritma tertentu agar selalui mencapai daya dan efisiensi maksimum.



Gambar 2.4 Sirkuit Kontrol MPPT

3. Baterai

Energi listrik arus DC yang dihasilkan oleh panel surya diterima oleh baterai untuk disimpan sebelum digunakan. Penggunaan baterai dapat membuat suplai listrik tetap terjaga saat PLTS berhenti menyuplai energi, terutama pada malam hari. Selain itu baterai juga dapat menjaga suplai listrik tetap stabil saat cuaca dan radiasi energi matahari tiba-tiba menurun. Pada umumnya saat ini terdapat beberapa jenis baterai ditinjau dari bahan bakunya. Terdapat beberapa jenis baterai yang umum digunakan pada PLTS diantaranya *lead acid*, *lithium-ion* dan baterai terbaru yaitu *lithium-ion phosphate* (LiFePO_4).



Gambar 2.5 Komponen Baterai pada PLTS

4. Inverter

Energi listrik yang disuplai oleh penyedia tenaga listrik adalah listrik dengan arus *alternating current* (AC) yang memiliki gelombang dengan frekuensi 50 Hz. Inverter adalah alat yang berfungsi mengubah arus DC dari baterai menjadi arus AC agar dapat dimanfaatkan oleh peralatan elektronik konvensional. Tegangan dan arus terima maupun keluaran disesuaikan dengan kebutuhan dan spesifikasi baterai maupun panel surya.



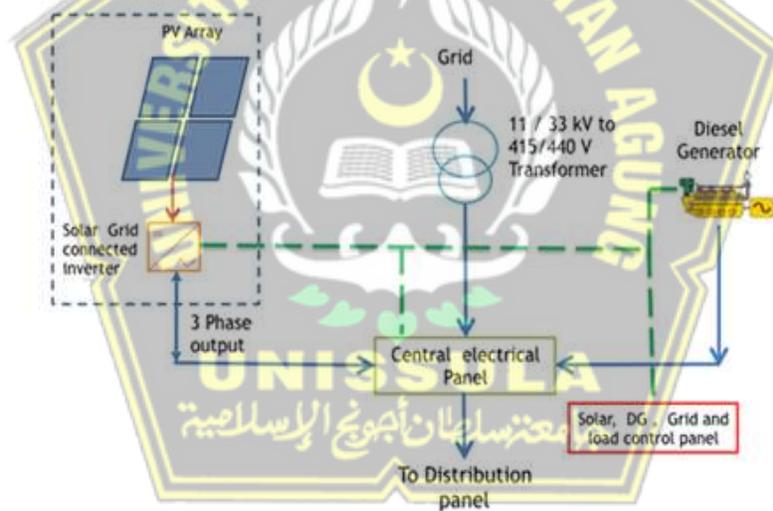
Gambar 2.6 Inverter PLTS

2.2.9 Konfigurasi PLTS Hybrid

Konfigurasi dalam sistem PLTS merujuk pada jenis-jenis susunan yang disesuaikan dengan kebutuhan energi dan kondisi teknis di lapangan. Tiga konfigurasi utama PLTS adalah on-grid, off-grid, dan hybrid. Dalam studi ini, PLTS hybrid menjadi fokus karena menggabungkan lebih dari satu sumber energi pembangkit, seperti tenaga surya dan PLTD.

Sistem hybrid bertujuan untuk meningkatkan keandalan pembangkitan listrik dengan mengompensasi kelemahan teknis dan ekonomis masing-masing sumber. Kolaborasi antara PLTS dan PLTD memungkinkan efisiensi operasional yang lebih tinggi dan ketahanan sistem yang lebih baik. Umumnya, energi surya menjadi sumber utama dalam konfigurasi hybrid ini

Schematics of Solar PV Diesel Hybrid Power Plant



Gambar 2.7 Skema PLTS dan PLTD konfigurasi Hybrid

Dengan demikian, penggunaan sistem Hybrid PV-Genset ini dapat menghemat biaya operasi dan manajemen, mengurangi jam operasi genset, serta dapat menghindari kebutuhan biaya modal awal yang besar.

2.2.10 PLTS Dogiyai

PLTS Dogiyai di Papua Tengah adalah pembangkit listrik tenaga surya yang mulai beroperasi sejak tahun 2014. Pembangkit ini memiliki kapasitas maksimum sebesar 300 kWp dan dirancang untuk menyediakan sumber energi terbarukan yang

andal bagi masyarakat di Kabupaten Dogiyai. PLTS ini terletak di Kabupaten Dogiyai pada ketinggian 1300 mdpl. PLTS Dogiyai berpotensi berpartisipasi dalam penyediaan energi listrik hijau.

Saat ini PLTS Dogiyai tidak beroperasi karena mengalami kerusakan. Kondisi ini mengakibatkan ketergantungan masyarakat kembali pada sumber energi konvensional yaitu PLTD dengan bahan bakar BBM, yang tidak ramah lingkungan dan lebih mahal secara operasional. Upaya perbaikan dan pemeliharaan sangat diperlukan untuk mengembalikan fungsi PLTS ini agar dapat terus mendukung kebutuhan energi di wilayah tersebut.



Gambar 2.8 PLTS Dogiyai saat Masih Beroperasi

2.2.11 Metode Simulasi Monte Carlo

Metode Simulasi Monte Carlo adalah teknik yang biasanya melibatkan penggunaan bilangan acak dan teori probabilitas yang dihasilkan komputer untuk memecahkan masalah peramalan, estimasi dan analisis resiko[8]. Simulasi Monte Carlo merupakan pendekatan yang digunakan untuk memodelkan ketidakpastian pada produksi energi, khususnya pada sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) yang hasil produksinya ditentukan oleh ketidakpastian dari kondisi cuaca. Metode ini melibatkan pengambilan sampel acak berulang dari data input untuk menghasilkan beberapa distribusi keluaran yang merepresentasikan berbagai kemungkinan performa sistem.

Dalam konteks PLTS Dogiyai, simulasi Monte Carlo digunakan untuk memperkirakan total produksi energi tahunan berdasarkan variasi harian dari data iradiasi matahari. Pendekatan ini mampu menangkap fluktuasi dan ketidakpastian lingkungan.

Mengingat cuaca merupakan hal yang tidak dapat dikontrol dan nilainya sangat bervariasi, metode ini akan melakukan simulasi data cuaca sesuai dengan ribuan iterasi acak. Selanjutnya dilakukan proses perhitungan produksi energi sesuai dengan kondisi cuaca, luasan modul, efisiensi panel aktual, performance ratio, dan efisiensi inverter.

Pada setiap iterasi, nilai total iradiasi bulanan diperoleh dari penjumlahan sampel acak iradiasi harian yang tersedia. Selanjutnya, produksi energi bulanan dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$E_m = G_m \times A \times \eta \times PR \times \eta_{inv} \dots\dots\dots (5)$$

dimana :

- E_m = Produksi energi bulan ke-m (kWh)
- G_m = Total iradiasi matahari bulan ke-m (kWh/m²/bulan)
- A = Luas total modul surya (m²)
- η = Efisiensi aktual panel surya
- PR = Rasio Performa bulan ke-m
- η_{inv} = Efisiensi inverter

Efisiensi panel (η) tidak diambil sebagai nilai tetap, melainkan dikoreksi terhadap suhu sel modul yang dihitung dari suhu ambien dan nilai iradiasi sesuai iterasi. Koreksi ini dilakukan untuk menggambarkan pengaruh kondisi lingkungan terhadap kinerja panel surya secara aktual.

Output dari setiap iterasi berupa estimasi produksi energi tahunan sistem, yang kemudian dikumpulkan dalam bentuk distribusi probabilistik. Dari distribusi tersebut dihitung nilai rata-rata, deviasi standar, dan rentang interval kepercayaan yang merepresentasikan ketidakpastian dan potensi kinerja sistem PLTS secara realistis.

2.2.12 Parameter Ekonomi

Parameter ekonomi digunakan untuk melakukan perhitungan terhadap studi dan kelayakan Pembangunan PLTS Dogiyai secara ekonomi. Data seperti biaya Rupiah/kWh dan periode waktu pengembalian modal (*Payback Period*) didapat dari data seperti belanja modal (*capital expenditure*), data inflasi nasional, bunga dan tenor pinjaman untuk belanja modal, biaya pembelian energi per kWh melalui BPP serta dapat menentukan berapa penghematan biaya operasional PLTD Deiyai yang berpotensi dapat dikurangi.

1. Periode Pengembalian (*Payback Period*)

Periode pengembalian atau *Payback Period* adalah salah satu metode penilaian kelayakan investasi yang digunakan untuk menghitung waktu yang dibutuhkan agar nilai investasi awal dapat kembali melalui arus kas masuk yang dihasilkan dari proyek tersebut. Metode ini sering digunakan dalam studi kelayakan proyek karena kesederhanaannya dan kemampuannya dalam menilai tingkat risiko likuiditas dari suatu investasi. Periode Pengembalian didapat dari rumus sebagai berikut :

$$\text{Periode Pengembalian} = \frac{\text{Investasi Awal}}{\text{Arus Kas Tahunan}} \dots\dots\dots (6)$$

2. Belanja Modal (*Capital Expenditure*)

Belanja modal atau *capital expenditure* (CAPEX) adalah pengeluaran yang dilakukan untuk memperoleh atau meningkatkan aset tetap, seperti peralatan, bangunan, dan infrastruktur. Dalam proyek energi seperti PLTS, CAPEX mencakup biaya pembelian panel surya, inverter, sistem penyimpanan energi (jika ada), biaya konstruksi, instalasi, dan biaya perizinan

3. Inflasi

Inflasi adalah kenaikan umum dan terus-menerus dalam harga barang dan jasa dalam suatu perekonomian selama periode waktu tertentu[9]. Dalam konteks proyek investasi jangka panjang seperti pembangunan PLTS, inflasi dapat menurunkan nilai riil pengembalian modal bila tidak diperhitungkan secara cermat.

4. Bunga dan Tenor Pinjaman Obligasi

Bunga adalah imbal hasil atau biaya atas penggunaan dana pinjaman. Dalam konteks pembiayaan proyek, bunga menentukan seberapa besar pembayaran tambahan yang harus dibayar atas pinjaman modal awal. Tenor adalah jangka waktu atau durasi pinjaman sebelum seluruh pinjaman harus dilunasi. Nilai bunga dan tenor akan memengaruhi periode pengembalian.

5. Biaya Pokok Penyediaan Tenaga Listrik

Biaya pokok penyediaan tenaga listrik merupakan biaya yang dibutuhkan dalam Rupiah untuk memproduksi setiap kWh energi listrik. Yang termasuk dalam komponen BPP Tenaga Listrik adalah, modal pembangunan atau penyewaan pembangkit, biaya bahan bakar dan pelumas, biaya pemeliharaan, biaya kepegawaian, biaya administrasi, penyusutan asset, beban bunga dan beban operasional lain. BPP seluruh sistem di Indonesia tersedia dalam rincian RUPTL 2025 – 2034.

2.2.13 Parameter Lingkungan Ditinjau dari Emisi CO₂

Emisi karbon dioksida (CO₂) merupakan salah satu parameter utama dalam menilai dampak lingkungan dari suatu aktivitas manusia. Dalam konteks perubahan iklim gas CO₂ yang merupakan hasil sampingan dari proses pembakaran bahan bakar fosil yang dibutuhkan untuk menunjang kegiatan manusia, dianggap sebagai gas rumah kaca utama yang berkontribusi terhadap pemanasan global.

Pengukuran emisi gas rumah kaca (terutama CO₂e/CO₂ setara) merupakan angka penting dan kritis dalam memitigasi perubahan iklim akibat emisi CO₂. Dalam konteks energi, parameter lingkungan tak hanya melihat dampak operasional, tetapi juga jejak karbon (*carbon footprint*) menyeluruh dari suatu teknologi, termasuk fase manufaktur, konstruksi, ,dekomisioning dan alur distribusi.

1. Pengertian Jejak Karbon

Semua teknologi bersih memiliki jejak karbon tersembunyi (*hidden emissions*) selama produksi. Tantangannya adalah membuatnya lebih rendah daripada alternatif fosil. Teknologi rendah karbon pun tetap memiliki emisi awal (*embodied emissions*) yang berasal dari proses produksi barang menggunakan energi fosil[10]. Emisi awal produksi ini perlu diperhitungkan dan

dioptimalkan sebagai acuan untuk menilai dampak lingkungan dari PLTS, perlu disertakan jejak karbon dari pembangunan hingga pengoperasian, bukan hanya saat beroperasi.

2. Satuan Pengukuran emisi Karbon

Emisi CO₂ dapat dinyatakan dalam beberapa satuan tergantung pada skala dan kebutuhan analisis. Umumnya digunakan sebagai berikut :

Tabel 2.3 Satuan Pengukuran Emisi CO₂

gCO ₂ (gram karbon dioksida)	Digunakan untuk per unit kecil, seperti per kWh listrik yang dihasilkan
kgCO ₂ (kilogram karbon dioksida)	Digunakan untuk skala rumah tangga atau sistem kecil
tCO ₂ (ton karbon dioksida)	Digunakan untuk skala industri atau nasional

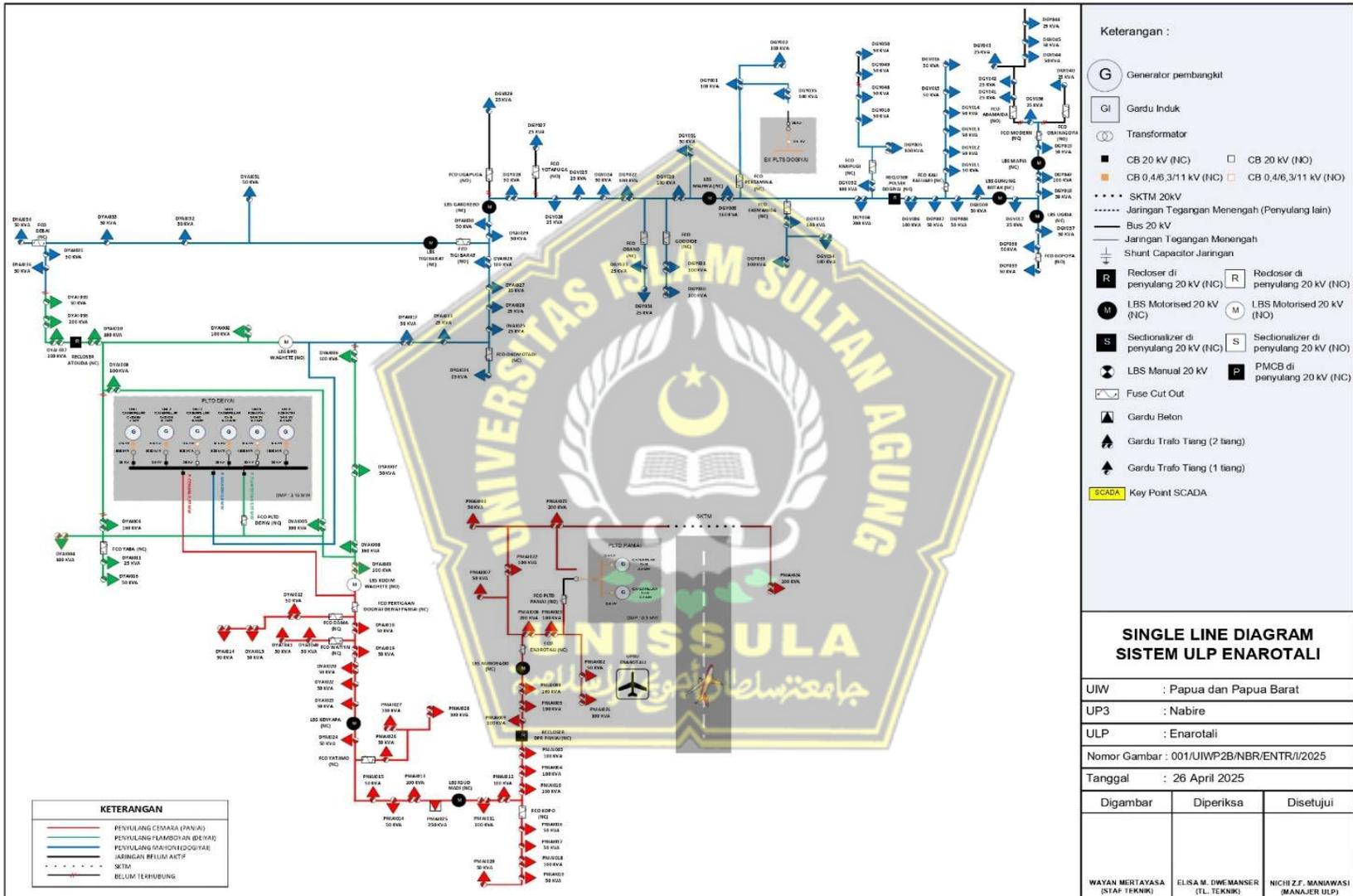
2.2.14 Sistem Kelistrikan Enarotali

Sistem Kelistrikan Enarotali merupakan sistem jaringan tenaga listrik tegangan menengah (20 kV) yang ada di wilayah kerja PT PLN (Persero) ULP Enarotali UIW Papua dan Papua Barat. Sistem Kelistrikan Enarotali terdiri atas tiga penyulang yang menyuplai tiga kabupaten diantaranya : Penyulang Mahoni yang menyuplai Kabupaten Dogiyai, Penyulang Cemara yang menyuplai Kabupaten Paniai dan Penyulang Flamboyan yang menyuplai Kabupaten Deiyai.

Sistem Kelistrikan Enarotali disuplai oleh PLTD Deiyai dalam satu grid yang berpotensi dapat ditambahkan sumber pembangkit lain yaitu PLTS Dogiyai. PLTS Dogiyai dapat disambungkan melalui Penyulang Mahoni, yang diharapkan dapat memikul daya listrik siang hari Kabupaten Dogiyai. Berikut merupakan data penyulang Sistem Kelistrikan Enarotali.

Tabel 2.4 Data Penyulang pada Sistem Kelistrikan Enarotali

Penyulang	Tegangan Maksimum (kV)	Tegangan Minimum (kV)
Mahoni (Dogiyai)	19,4	19,3
Cemara (Paniai)	19,4	19,3
Flamboyan (Deiyai)	19,4	19,3



Gambar 2.9 SLD Sistem Kelistrikan Enarotali

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Model Penelitian

Penelitian ini mengembangkan kerangka yang menautkan reaktivasi PLTS Dogiyai 300 kWp dalam sistem hybrid dengan PLTD Deiyai untuk menilai dampaknya pada penurunan konsumsi BBM solar B40. Kerangka ini membantu memetakan variabel-variabel utama, alur kausal, dan dugaan hubungan antarvariabel sehingga dapat diuji secara sistematis.

3.1.1 Kerangka Pemikiran

Model penelitian ini didasarkan pada logika bahwa peningkatan produksi energi terbarukan menggantikan sebagian beban PLTD, sehingga mengurangi kebutuhan BBM:

1. Reaktivasi PLTS Dogiyai 300 kWp
2. Peningkatan produksi energi terbarukan
3. Penurunan beban operasional PLTD Deiyai
4. Reduksi konsumsi BBM solar B40
5. Pengurangan emisi GRK dan biaya operasional

3.1.2 Hipotesis Penelitian

Hipotesis utama dan turunan yang akan diuji meliputi:

- A. Hipotesis Utama
 1. Semakin besar energi yang dihasilkan PLTS Dogiyai, semakin rendah konsumsi BBM pada PLTD Deiyai.
- B. Hipotesis Turunan
 1. Optimalisasi kontribusi PLTS dalam sistem hybrid meningkatkan efisiensi keseluruhan.
 2. Penurunan konsumsi BBM sebanding dengan pengurangan emisi gas rumah kaca.
 3. Integrasi hybrid dapat menurunkan biaya pokok pembangkitan listrik (BPP).

3.2 Metode Penelitian/ Perancangan

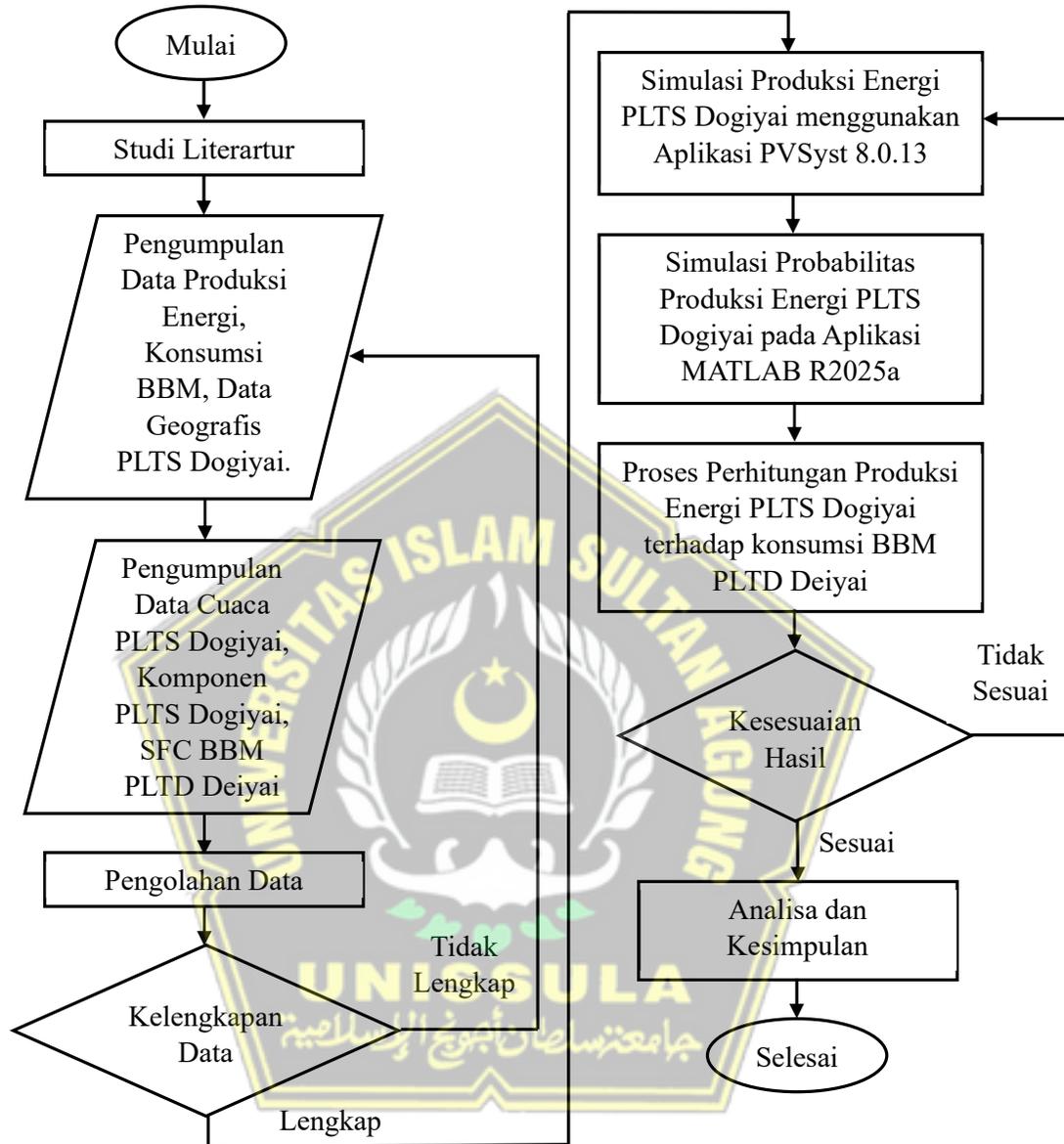
Langkah pertama dari penelitian ini adalah melakukan analisis mendalam terkait konsumsi Bahan Bakar Minyak (BBM) per kilowatt-hour (kWh) energi yang dihasilkan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) Deiyai. Data ini merupakan fondasi penting untuk memperkirakan sejauh mana pengurangan konsumsi BBM akan terjadi setelah penerapan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di tempat tersebut.

Selanjutnya, penelitian ini akan melibatkan perhitungan energi yang dapat dihasilkan oleh PLTS yang memiliki kapasitas 300 kilowatt-peak (kWp) selama satu bulan. Perhitungan tersebut akan mempertimbangkan faktor-faktor penting seperti intensitas sinar matahari, efisiensi dari PLTS, dan kapasitas yang terpasang. Data yang dihasilkan dari perhitungan ini akan memberikan gambaran potensi energi yang dapat dihasilkan oleh PLTS.

Setelah itu, dilakukan perbandingan antara estimasi energi yang dihasilkan oleh PLTS dengan proyeksi pengurangan konsumsi BBM yang diharapkan setelah penerapan PLTS. Analisis perbandingan ini akan memberikan pemahaman yang lebih jelas terkait sejauh mana PLTS mampu menggantikan atau mengurangi ketergantungan pada penggunaan BBM di PLTD Deiyai. Dari hasil perbandingan tersebut, diharapkan tergambar manfaat potensial dari penggunaan PLTS dalam mengurangi konsumsi BBM, termasuk potensi penghematan biaya operasional dan dampak positif terhadap lingkungan.

Perlu diperhatikan bahwa penelitian ini membutuhkan data yang akurat, analisis yang teliti, serta pemantauan secara berkelanjutan. Hal ini diperlukan untuk mengevaluasi efektivitas jangka panjang dari penggunaan PLTS dalam mengurangi penggunaan BBM di PLTD Deiyai. Harapan utama dari penelitian ini adalah memberikan wawasan yang lebih mendalam terkait manfaat dan potensi penggunaan energi terbarukan seperti PLTS dalam upaya mengurangi ketergantungan pada sumber energi konvensional yang bersifat terbatas dan tidak ramah lingkungan.

3.2.1 Tahapan Penelitian



Gambar 3.1 Flowchart Penelitian

Dalam penelitian ini terdapat beberapa tahapan diantaranya yaitu:

1. Penelitian dimulai
2. Tahap kedua yaitu mencari studi literatur berupa jurnal, buku dan pengetahuan terkait PLTS serta PLTD.

3. Tahap ketiga yaitu melakukan pengumpulan data primer PLTD Deiyai, diantaranya produksi energi bulanan dari PLTD, konsumsi bbm bulanan, total pemakaian bbm per kwh/ SFC (specific fuel consumption)
4. Tahap keempat yaitu melakukan pengumpulan data sekunder, diantaranya menentukan daya terpasang PLTS (kWp).
5. Selanjutnya melakukan pengolahan data terhadap data primer maupun data sekunder yang telah dikumpulkan.
6. Tahap keenam melakukan pemeriksaan kelengkapan data yang akan dianalisis. Apabila belum lengkap maka kembali ke tahap ketiga, dan apabila sudah lengkap, melanjutkan ke langkah berikutnya.
7. Melakukan simulasi produksi energi Listrik (kWh) tahunan menggunakan aplikasi *PVsyst 8.0.13*
8. Melakukan simulasi probabilitas produksi energi menggunakan metode statistic *Monte Carlo* pada aplikasi MATLAB R2025a dengan parameter yang berasal dari data primer yang berasal dari PVSyst 8.0.13.
9. Tahap kedelapan melakukan perhitungan dan simulasi produksi PLTS bulanan, penghematan BBM pada genset akibat penambahan energi listrik dari PLTS.
10. Melakukan pengecekan hasil penelitian. Apabila hasil tidak sesuai maka kembali ke tahap keenam. Apabila hasil sudah sesuai dengan tujuan maka lanjut ke tahap beikutnya.
11. Melakukan proses analisa dan pengambilan kesimpulan penelitian .
12. Penelitian selesai

3.3 Data Parameter

Data parameter yang dibutuhkan terdiri atas data primer yang terdapat di PLTD Deiyai, data area PLTS Dogiyai dan data perekonomian nasional. Data yang terdapat di PLTD Deiyai berfungsi untuk menghitung efisiensi konsumsi BBM PLTD Deiyai setelah reaktivasi PLTS Dogiyai, yang diantaranya terdiri atas data produksi energi, konsumsi BBM, dan SFC,

Data parameter yang dibuthkan untuk simulasi dan perhitungan produksi energi PLTS Dogiyai antara lain alamat dan data geografis yang terdapat pada PLTS Dogiyai. Data geografis dibutuhkan untuk memperoleh data cuaca dan intensitas

cahaya matahari yang menentukan produksi energi matahari yang bisa diproduksi oleh PLTS Dogiyai.

Data ekonomi juga diperlukan sebagai landasan dan parameter yang akan dipakai untuk menghitung kelayakan proyek reaktivasi PLTS Dogiyai ini ditinjau dari sudut pandang ekonomi dan biaya investasi. Data yang dibutuhkan antara lain inflasi rata-rata nasional selama sepuluh tahun terakhir dan data bunga dan tenor surat utang yang diterbitkan oleh PLN sebagai pengembang proyek reaktivasi PLTS Dogiyai.

3.3.1 Parameter kWh Produksi, Konsumsi BBM dan SFC PLTD Deiyai

Data yang dikumpulkan merupakan data kWh produksi, konsumsi BBM serta SFC pada PLN PLTD Deiyai ULP Enarotali UIW Papua dan Papua Barat dari Bulan Mei 2024 – April 2025.

Tabel 3.1 Data kWh Produksi, Konsumsi BBM dan SFC PLTD Deiyai

No	Waktu	Total Produksi Energi (kWh)	Konsumsi BBM (liter)	SFC (liter/kWh)
1	Mei 2024	1.357.613	375.525	0,277
2	Juni 2024	1.298.129	361.325	0,278
3	Juli 2024	1.376.178	379.350	0,276
4	Agustus 2024	1.395.489	390.675	0,280
5	September 2024	1.354.507	379.425	0,280
6	Oktober 2024	1.413.885	394.360	0,279
7	November 2024	1.401.169	387.790	0,277
8	Desember 2024	1.455.747	407.570	0,280
9	Januari 2025	1.477.771	411.230	0,278
10	Februari 2025	1.373.946	385.200	0,280

No	Waktu	Total Produksi Energi (kWh)	Konsumsi BBM (liter)	SFC (liter/kWh)
11	Maret 2025	1.567.693	441.270	0,281
12	April 2025	1.412.391	409.077	0,290
Total		16.884.518	4.722.797	0,280

3.3.2 Data Parameter PLTS Dogiyai

Lokasi	:	Kp Moanemani, Distrik Kamu, Kabupaten Dogiyai, Provinsi Papua Tengah
Modul PV	:	-
Inverter	:	-
Baterai	:	-
Luas Lahan	:	1750 m ²

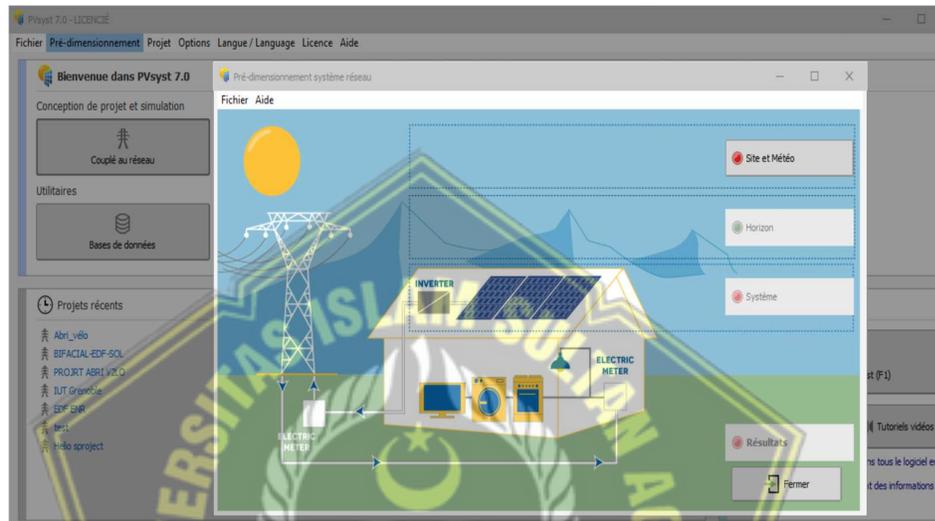
3.3.3 Jenis Aplikasi untuk Simulasi PLTS Dogiyai

Terdapat dua jenis aplikasi yang digunakan dalam proses simulasi produksi energi pada sistem PLTS Dogiyai. Aplikasi pertama adalah PVSyst versi 8.0.13, yang digunakan untuk melakukan simulasi teknis-operasional, analisis keekonomian, dan estimasi dampak lingkungan dari sistem PLTS secara deterministik. Aplikasi kedua adalah MATLAB R2025a, yang dimanfaatkan untuk melakukan perhitungan statistik berbasis probabilitas melalui metode Monte Carlo, guna menilai sejauh mana hasil simulasi PVSyst mencerminkan kondisi operasional yang realistis dan berada dalam rentang probabilistik yang wajar.

1. Aplikasi PVSyst 8.0.13

Simulasi operasi PLTS Dogiyai akan dilakukan melalui aplikasi PVSyst 8.0.13 buatan Perusahaan PVSyst SA, yang berbasis di Jenewa, Swiss. Aplikasi ini mampu mensimulasikan reaktivasi PLTS Dogiyai dengan didukung oleh input berupa jenis panel surya; inverter; baterai; resistansi pada sistem; serta kondisi

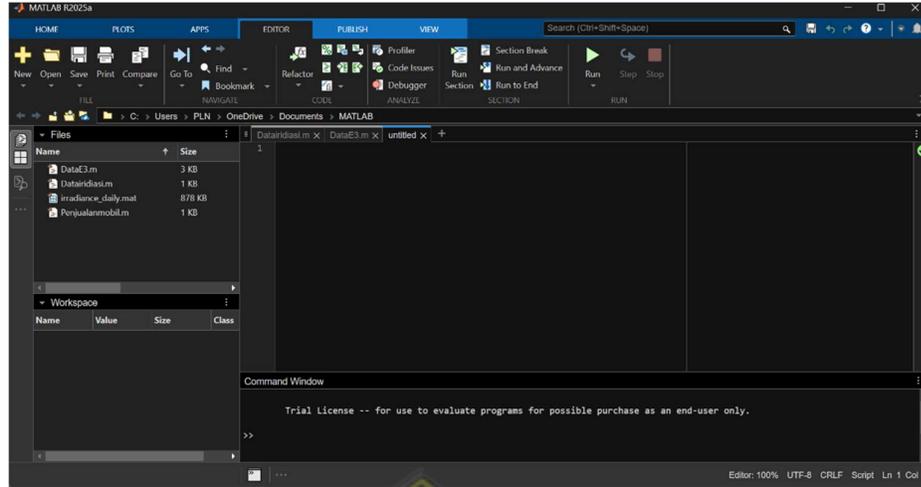
radiasi penyinaran matahari, cuaca, dan iklim yang didapat dari data Meteoronorm 8.2. Hasil akhir yang bisa didapat dari simulasi reaktivasi PLTS Dogiyai pada aplikasi PVSyst diantaranya berupa desain rancangan modul panel surya, inverter, baterai, rugi daya dari sistem, produksi energi dalam rentang waktu bulanan dan tahunan, diagram rugi daya, *single line diagram*, hasil evaluasi secara ekonomi dan emisi CO₂ yang ditekan.



Gambar 3.2 Penampakan Aplikasi PVSyst 8.0.13

2. Aplikasi MATLAB R2025a

Para profesional di bidang teknik komputer, teknik elektro dan mata pelajaran terkait lainnya sering menggunakan Matlab[11]. MATLAB memiliki dua komponen utama, komponen pertama adalah Bahasa pemrograman yang hanya terdiri dari beberapa konstruksi dasar, seperti perintah untuk membuat perulangan, percabangan, dan operasi matriks. Di bagian awal, kita akan belajar cara menulis skrip dan fungsi sederhana menggunakan konstruksi ini. Komponen kedua adalah kumpulan pustaka fungsi bawaan (built-in), yaitu program atau fungsi pra-instal yang siap pakai untuk menyelesaikan tugas-tugas umum di berbagai bidang ilmiah dan teknik.



Gambar 3.3 Halaman awal MATLAB R2025a

MATLAB mampu meningkatkan produktivitas mahasiswa teknik, baik di ruang kelas maupun saat mengerjakan proyek di laboratorium atau di industri. MATLAB mendukung berbagai jenis data yang dapat diolah dan disusun menjadi array, cell array, atau struktur data sesuai kebutuhan. Selain itu, MATLAB bersifat interaktif, artinya setiap baris kode yang dijalankan segera menampilkan hasilnya di jendela Command Window atau Figure. Fitur ini memudahkan mahasiswa untuk bereksperimen dengan skrip, memeriksa langkah perhitungan, dan memperbaiki kesalahan (debugging) secara real time.

3.3.4 Data Geografis PLTS Dogiyai

Lokasi : Kp. Moanemani, Distrik Kamuu, Kabupaten Dogiyai, Provinsi Papua Tengah, Indonesia

Garis Lintang (*latitude*) : $-4,00^{\circ}$ S

Garis Bujur (*longitude*) : $136,05^{\circ}$ E

Ketinggian (*altitude*) : 1.565 mdpl

Zona Waktu : UTC + 9 / WIT

3.3.5 Data Parameter Ekonomi

Data parameter ekonomi yang dibutuhkan untuk melakukan studi kelayakan ekonomi diantaranya adalah inflasi tahunan Indonesia periode 2015-2024 dan rata-rata inflasi sepuluh tahun yang diambil dari data BPS[12], BPP dan rata-rata BPP tenaga listrik dalam dokumen RUPTL 2025-2034[13], serta surat

utang dan obligasi sukuk PLN dengan keterangan bunga dan tenornya. Berikut data inflasi, BPP dan surat utang PLN.

Tabel 3.2 Data Inflasi Tahunan 2015-2024

Tahun	Inflasi (%)	Tahun	Inflasi (%)
2015	3,35	2020	1,68
2016	3,02	2021	1,87
2017	3,61	2022	5,51
2018	3,13	2023	2,61
2019	2,72	2024	1,57
Inflasi Rata-Rata Sepuluh Tahun (%)			2,91

Tabel 3.3 Data Perkiraan BPP Nabire dari Dokumen RUPTL 2025-2034

Tahun	BPP (Rupiah)	Tahun	BPP (Rupiah)
2025	3.663	2030	3.166
2026	3.442	2031	3.164
2027	3.217	2032	3.162
2028	3.088	2033	3.063
2029	3.090	2034	3.065
BPP Sistem Nabire Rata-Rata Sepuluh Tahun (Rupiah)			3.212

Tabel 3.4 Data Surat Utang PLN

Nama Obligasi	Bunga (%)	Tenor (Tahun)
Sukuk Ijarah Berkelanjutan IV PLN Tahap I Seri A	6.70%	5
Sukuk Ijarah Berkelanjutan IV PLN Tahap I Seri B	7.25%	7
Sukuk Ijarah Berkelanjutan IV PLN Tahap I Seri C	7.90%	10
Sukuk Ijarah Berkelanjutan IV PLN Tahap I Seri D	8.65%	15
Sukuk Ijarah Berkelanjutan IV PLN Tahap I Seri E	8.86%	20

BAB 4
DATA DAN ANALISA

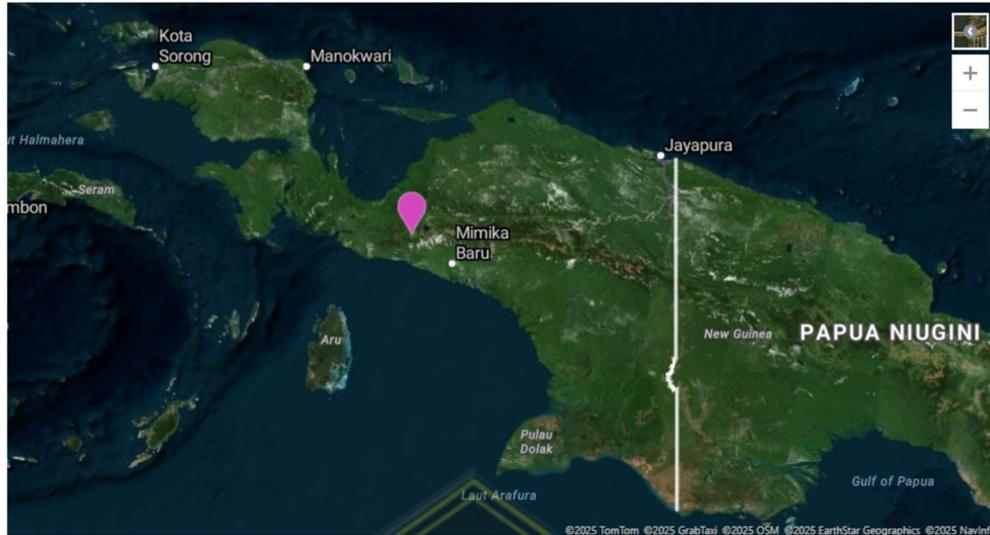
4.1 Data Meteorologis Lokasi PLTS Dogiyai

Data meteorologis merupakan data yang penting dan berperan sebagai indikator untuk mengetahui kinerja peralatan dalam kondisi lingkungan tersebut. Salah satu indikator penting dalam data meteorologis untuk mengukur kinerja suatu peralatan adalah suhu ambien.

Selain itu data meteorologis berupa intensitas cahaya matahari perlu diperoleh untuk menghitung total energi cahaya matahari dalam suatu waktu tertentu, yang kemudian akan menjadi referensi untuk menghitung energi matahari yang bisa dikonversi menjadi energi listrik oleh modul surya. Berikut kami tampilkan data iklim dan meteorologis yang bersumber dari Meteoronorm 8.2.

Tabel 4.1 Data Meteorologis PLTS Dogiyai

Bulan	Radiasi Glob Horizontal (kWh/m ²)	Radiasi Difus Horizontal (kWh/m ²)	Suhu Ambien (°C)	Index Kecerahan
Januari	186,1	61,6	19,5	0,574
Februari	168,6	47,5	19,4	0,576
Maret	189,7	68,9	19,5	0,581
April	173,3	71,0	19,3	0,578
Mei	164,5	66,6	19,3	0,571
Juni	152,0	63,7	18,4	0,572
Juli	159,3	53,0	18,6	0,571
Agustus	169,2	66,9	18,7	0,569
September	169,3	64,9	18,6	0,551
Oktober	182,5	78,2	19,4	0,559
November	180,8	62,4	19,6	0,575
Desember	178,7	74,5	19,9	0,557
Tahunan	2074,0	789,2	19,2	0,569



Gambar 4.1 Lokasi PLTS Dogiyai yang Ditunjukkan Aplikasi PVSyst

4.2 Perancangan PLTS

Perancangan PLTS dilakukan dengan menentukan rancangan orientasi panel surya, penyusunan konfigurasi panel surya, inverter, baterai, dan instalasi kabel daya agar energi yang dihasilkan PLTS Dogiyai dapat diterima oleh grid melalui jaringan tegangan menengah yang terdapat pada Sistem Kelistrikan Enarotali.

4.2.1 Orientasi

PLTS Dogiyai akan dibangun dengan menggunakan kemiringan tetap (*fixed tilted plane*) tanpa menggunakan sistem *tracking* posisi matahari yang dapat menyesuaikan sudut kemiringan sesuai dengan posisi matahari. Tipe penempatan modul jenis ini dipilih karena lebih hemat dalam investasi dan lebih mudah dalam perawatan. Berikut merupakan spesifikasi sudut kemiringan, sudut azimuth dan tipe penempatan modul (*field type*) :

Tabel 4.2 Orientasi PLTS Dogiyai

Tipe Penempatan Modul (<i>Field Type</i>)	Sudut Kemiringan	Sudut Azimuth
Kemiringan tetap (<i>Fixed tilted plane</i>)	10 °	0 °

4.2.2 Panel Surya

Panel surya akan dirancang menyesuaikan dengan luas lahan yang dimiliki oleh ex PLTS Dogiyai yaitu sebesar 1750 m². Dengan luas lahan 1750 m² dan rencana kapasitas PLTS Dogiyai sebesar 300 kWp, maka dibutuhkan modul surya dengan rasio daya terhadap luas atau disebut juga dengan *power density* minimum sebesar 171 W/m². Maka dari itu akan dipakai modul surya dengan data sebagai berikut :

Merk	: Jinkosolar
Tipe	: JKM-325M-60H
Daya Maks	: 325 Wp
Tegangan Maks	: 33,6 V
Arus Maks	: 9,68 A
Ukuran (P × L)	: 1,002 × 1,684 m
Luas Modul	: 1,69 m ²
<i>Power Density</i>	: 192 Wp/m ²
Efisiensi	: 19,3 %

Perancangan dilakukan dengan mempertimbangkan jumlah modul yang diseri dan jumlah string. Mengingat akan banyaknya modul surya yang akan digunakan, untuk mengurangi rugi daya yang besar, maka penyusunan modul surya dengan tegangan DC yang tinggi patut dipertimbangkan. Pada setiap string, modul surya akan disusun secara seri sebanyak 22 buah dengan tegangan maksimum sebesar 739 Vdc dan arus maksimum 9,69 Adc sehingga dihasilkan daya maksimum 7.163 Wp pada setiap string.

Tabel 4.3 Perhitungan Modul Surya per String

Tegangan Maksimum Modul	Jumlah Seri pada String	Tegangan Maksimum String	Arus Maksimum	Daya Maksimum Tiap String
33,6 V	22	739 V	9,69 A	7.163 Wp

Dengan daya maksimum per string sebesar 7.163 Wp, untuk mencapai 300 kWp, maka dibutuhkan 42 string modul panel surya, yang berarti membutuhkan

924 buah modul panel surya dengan luas lahan minimum untuk panel surya seluas 1561 m².

Tabel 4.4 Perencanaan Modul Panel Surya

Daya Maksimum Tiap String	Jumlah String	Total Daya Maksimum	Total Arus Maksimum	Jumlah Modul	Luas Modul
7.163 Wp	42	300.846 Wp	406,98 A	924	1.561 m ²

4.2.3 Inverter

Proses perancangan inverter disesuaikan dengan pertimbangan antara lain, kapasitas modul surya yang digunakan tegangan modul surya dan tegangan AC yang akan disalurkan ke grid. Data spesifikasi inverter untuk perancangan PLTS Dogiyai disajikan dalam data sebagai berikut:

Merk	: Solis
Tipe	: S6-EH3P50K-H-ND
Dilengkapi MPPT	: Ya
Tegangan DC	: 150-850 Vdc
Tegangan AC	: 400 Vac, tiga fasa
Arus AC nominal	: 72 A
Arus AC maks	: 76 A
Daya nominal	: 50 kWac
Daya maks	: 50 kWac
Frekuensi	: 50/60 Hz
Efisiensi maks	: 98,0%
Tegangan Eff maks	: 700 Vdc

Dengan daya nominal inverter sebesar 50 kW, maka dibutuhkan enam unit inverter untuk dapat mengkonversi arus DC sebesar 300 kWp menjadi arus AC tiga fasa dengan frekuensi 50 Hz yang dapat diterima oleh grid. Setiap inverter dapat menerima daya yang disuplai oleh tujuh string modul panel surya dengan daya maksimum mencapai 50.141 Wp.

Tabel 4.5 Data Perhitungan Daya pada Inverter

Daya Input Maksimum Tiap String	Jumlah String per Inverter	Daya Input Maksimum Tiap Inverter	Jumlah Inverter	Total Input Daya Maksimum
7.163 Wp	7	50.141 Wp	6	300.846 Wp

Melalui perhitungan serta pertimbangan daya input yang diterima setiap inverter sebesar 50.141 Wp dan dengan daya maksimum inverter sebesar 55 kW, dapat disimpulkan bahwa inverter yang dipilih cocok untuk proses perancangan PLTS Dogiyai. Untuk mencapai daya 300 kWp, maka dibutuhkan inverter sejumlah enam buah. Sehingga 42 string modul panel surya dibagi ke enam buah inverter yang pada akhirnya setiap inverter menerima tujuh string modul panel surya. Inverter ini dapat melakukan komunikasi parallel satu sama lain.

Inverter ini merupakan inverter hibrida yang memiliki koneksi langsung ke baterai sehingga baterai dapat terhubung langsung ke inverter. Melalui skema hybrid, maka sistem tidak memerlukan *battery charger/inverter* untuk melakukan pengosongan atau pengisian baterai secara terpisah. Berikut merupakan spesifikasi baterai yang diperlukan sesuai dengan spesifikasi setiap inverter.

Tegangan Baterai	:	150-800 Vdc
Arus Maksimal Pengisian dan Pengosongan	:	2×70 A
Arus Maksimal Pengisian dan Pengosongan	:	55 kW

4.2.4 Baterai

Pada PLTS sistem off grid, baterai berfungsi menyuplai energi listrik yang telah disimpan saat modul surya memproduksi energi listrik dari paparan energi matahari dan mengalirkannya saat modul surya tidak memproduksi listrik. Pada PLTS hybrid on grid, saat PLTS tidak memproduksi energi listrik, energi listrik disuplai oleh PLTD.

Baterai pada PLTS Dogiyai yang terhubung pada grid hybrid berfungsi untuk menyuplai daya listrik sementara saat daya yang dihasilkan modul listrik turun secara tiba-tiba karena pengaruh cuaca. Mode kerja baterai yang dipilih pada aplikasi PVSyst yang sesuai dengan fungsi diatas disebut mode *weak grid islanding*. Metode ini memberikan kestabilan energi listrik pada jaringan dan dapat

memberikan waktu PLTD Deiyai untuk mempersiapkan penurunan beban yang akan terjadi di PLTS Dogiyai.

Baterai yang akan digunakan disesuaikan juga dengan spesifikasi baterai yang dibutuhkan inverter hibrida sebagai alat pengisi dan pengosongan energi baterai. Berikut merupakan spesifikasi baterai yang dipilih untuk PLTS Dogiyai. Berikut merupakan spesifikasi dari baterai untuk PLTS Dogiyai :

Merk	:	BYD
Tipe	:	Battery Box Premium HVS 10.2
Tegangan nominal	:	409,6 V
Kapasitas	:	25 Ah
Kapasitas Energi	:	10,24 kWh
Arus Pengisian maks	:	25 A
Arus Pengosongan maks	:	25 A

Perencanaan rancangan baterai untuk mode *weak grid islanding* dilakukan dengan melakukan pertimbangan yang disesuaikan dengan daya yang bisa dipikul oleh PLTS apabila tiba-tiba PLTS Dogiyai padam dan waktu backup selama proses *start up* PLTD. Dengan daya modul surya mencapai 300 kWp, maka ditentukan proses pengecasan maksimal dengan daya 85 kW dan pengosongan maksimal sebesar 100 kW. Untuk waktu *start up* genset di PLTD Deiyai bisa dilakukan dengan perkiraan waktu 15 menit.

Dengan keperluan waktu backup minimum 15 menit, daya pengosongan baterai maksimum 100 kW dan daya pengisian baterai maksimum 80 kW, maka dipilih konfigurasi 12 baterai dengan rangkaian paralel. Melalui konfigurasi ini, baterai memiliki tegangan nominal 410 Vdc, arus maksimal 300 A dan kapasitas baterai nominal 300 Ah sehingga konfigurasi baterai ini memiliki kapasitas energi sebesar 123.000 Wh serta daya pengecasan dan daya pengosongan maksimum sebesar 96 kW.

Sebanyak enam inverter terhubung dengan 12 baterai, sehingga setiap inverter terhubung dengan dua baterai secara paralel. Ini sesuai dengan jumlah konektor baterai yang tersedia pada inverter, yaitu sebanyak dua konektor DC untuk dua baterai dengan arus pengecasan dan pengosongan maksimal inverter adalah 50 A dengan tegangan kerja 410 V.

Tabel 4.6 Perhitungan Kinerja Rangkaian Baterai

Tegangan Nominal Konfigurasi Rangkaian Baterai	410 V
Arus Maksimal Konfigurasi Rangkaian Baterai	300 A
Kapasitas Konfigurasi Rangkaian Baterai	300 Ah
Kapasitas Energi Konfigurasi Rangkaian Baterai	123 kWh
Daya Pengecasan dan Pengosongan Maksimal	123 kW
Waktu Pengisian Energi Baterai dengan Daya 80 kW	92 menit
Waktu Pengosongan Energi Baterai dengan Daya 100 kW	73 menit
Jumlah Baterai Terhubung Paralel pada Setiap Inverter	2 buah
Arus Pengecasan dan Pengosongan Maksimal pada Setiap Inverter	50 A

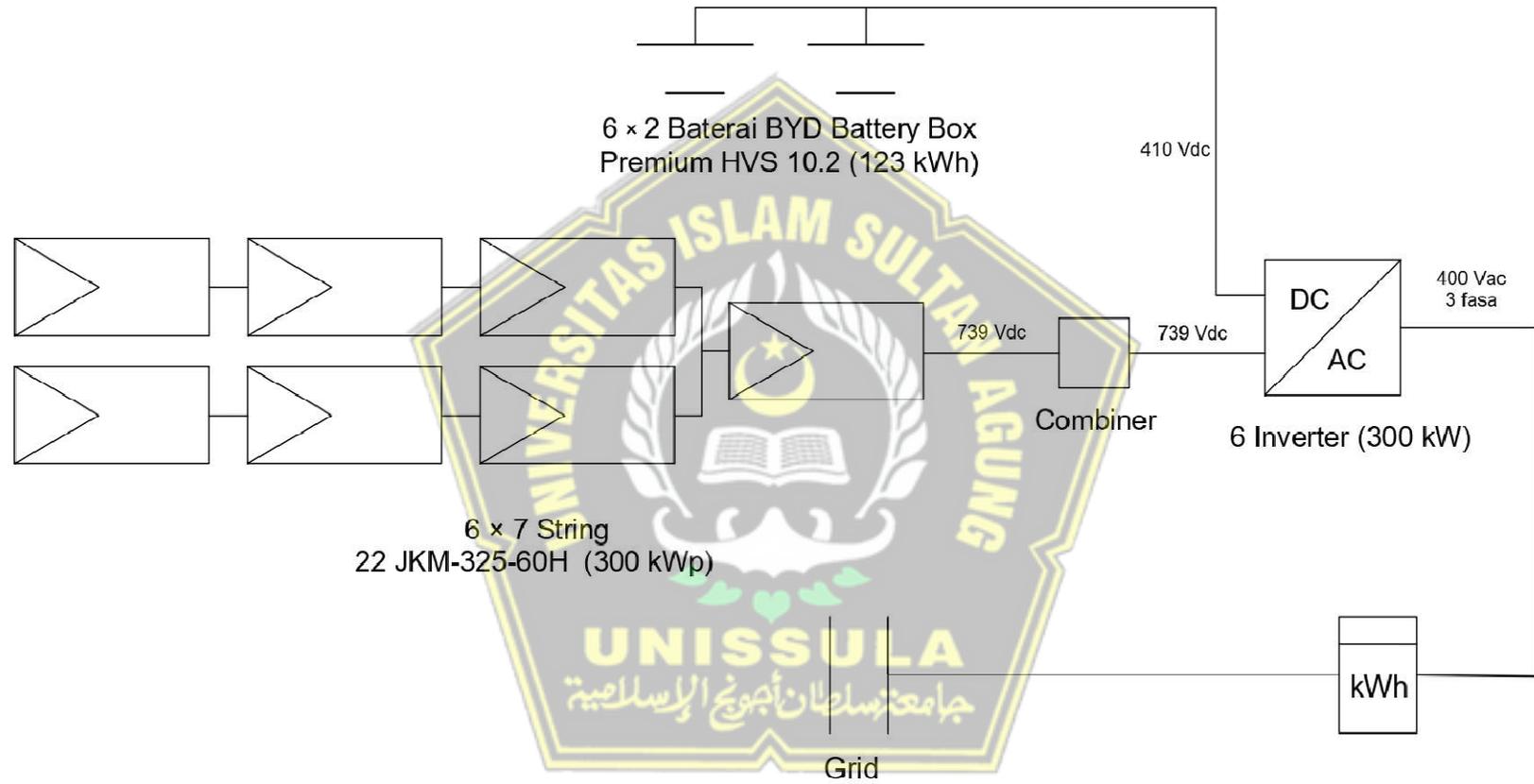
Baterai dapat menyuplai daya maksimal hingga 100 kW selama 73 menit apabila modul surya tidak bisa menyuplai energi listrik. Waktu ini sudah lebih dari cukup mengingat start up PLTD hingga berbeban maksimal adalah 15 menit.

4.2.5 Instalasi Kabel Daya

Kabel daya yang dibutuhkan disesuaikan dengan kebutuhan pada setiap string modul surya ke panel hubung bagi (*combiner box*), kabel dari panel hubung bagi (*combiner box*) ke inverter, kabel inverter ke baterai dan kabel daya 400 Vac tiga fasa dari inverter ke grid.

Tabel 4.7 Kabel Daya pada PLTS Dogiyai

Letak	Jenis	Panjang Tiap Sirkuit	Jumlah
String Modul Surya - Panel Hubung Bagi	NYFGBY 2 × 6 mm ² 0,6/1 kV	20	42 string
Panel Hubung Bagi - Inverter	N2XY 35 mm ² 0,6/1 kV	10	2 × 6
Inverter - Baterai	N2XY 35 mm ² 0,6/1 kV	10	2 × 12
Inverter - Grid	N2XY 95 mm ² 0,6/1 kV	30	3 × 6



Gambar 4.2 SLD PLTS Dogiyai

4.3 Simulasi PLTS Dogiyai pada PVSyst 8.0.13

Simulasi PLTS Dogiyai dilakukan dengan memasukkan data- data perancangan PLTS yang telah dijelaskan pada subbab 4.2, diantaranya data terkait jumlah seri dan string modul panel surya, jumlah inverter, baterai dan merek serta spesifikasi dari modul surya, inverter, dan baterai. Data-data tersebut disimulasikan bekerja pada kondisi cuaca dan iklim sesuai dengan data yang dijelaskan pada subbab 4.1. Data-data yang bisa didapatkan dari simulasi ini antara lain data produksi energi, susut energi, evaluasi ekonomi dan jumlah emisi CO₂ yang dapat direduksi. Berikut merupakan hasil simulasi pada aplikasi PVSyst 8.0.13

4.3.1 Produksi Energi

Produksi energi merupakan indikator penting yang menjadi bahan pertimbangan akan kelayakan pembangunan suatu pembangkit listrik. Berikut merupakan produksi energi tahunan yang dihasilkan dari PLTS Dogiyai 300 kWp.

Produksi Energi <i>at MPP</i> :	565,15 MWh/tahun
Konsumsi Energi PLTS :	6,13 MWh/tahun
Produksi Energi Netto :	524,03 MWh/tahun
Produksi Spesifik :	1732 kWh/kWp/tahun
Rasio Performa :	85,13%

Berikut merupakan produksi energi tahunan yang dihasilkan dari PLTS Dogiyai 300 kWp.

Tabel 4.8 Produksi Energi Bulanan PLTS Dogiyai

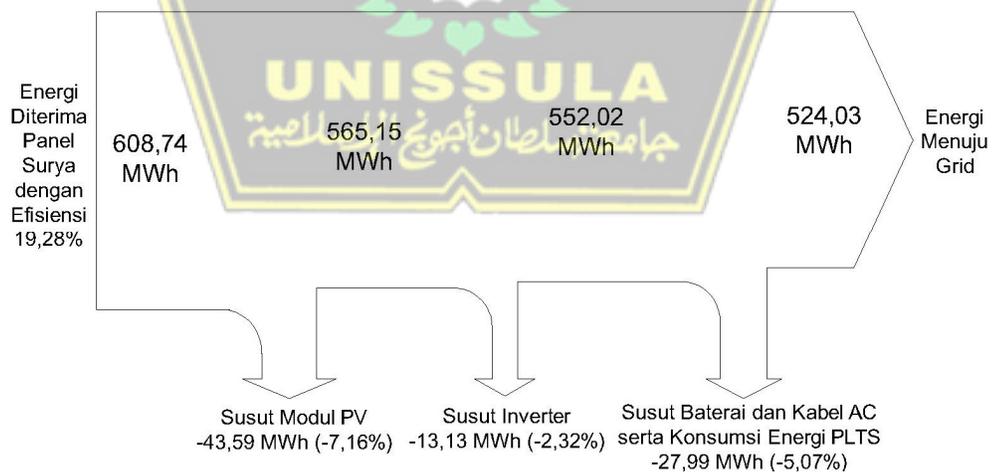
Bulan	Produksi Energi Titik Daya Maksimum / <i>MPP</i> (MWh)	Konsumsi Energi PLTS (MWh)	Energi Menuju Grid/ Produksi Netto (MWh)
Januari	46,76	0,521	44,10
Februari	43,96	0,470	39,90
Maret	51,33	0,521	47,10
April	48,84	0,504	46,12
Mei	47,94	0,521	44,92
Juni	45,23	0,504	42,91
Juli	46,87	0,521	43,39

Bulan	Produksi Energi Titik Daya Maksimum /MPP (MWh)	Konsumsi Energi PLTS (MWh)	Energi Menuju Grid/ Produksi Netto (MWh)
Agustus	48,50	0,521	46,07
September	46,48	0,504	41,05
Oktober	48,33	0,521	43,72
November	46,03	0,504	43,53
Desember	44,88	0,521	41,22
Tahunan	565,15	6,132	524,03

Dari tabel diatas didapatkan kesimpulan bahwa produksi energi netto terbesar terjadi pada bulan Maret sebesar 47,10 MWh dan produksi energi paling sedikit terjadi pada bulan Februari sebesar 39,90 MWh.

4.3.2 Susut Energi

Susut energi pada PLTS terjadi akibat beberapa hal, diantaranya efisiensi modul surya, inverter dan baterai pada suhu lingkungan tertentu; susut pada penghantar, serta konsumsi energi yang dibutuhkan untuk mengoperasikan PLTS. Berikut susut energi tahunan yang ditunjukkan oleh diagram *losses* pada sistem PLTS Dogiyai yang dihitung oleh aplikasi PVSyst 8.0.13.



Gambar 4.3 Diagram *Annually Energy Losses* PLTS Dogiyai

Dari diagram susut diatas didapat data bahwa penyusutan energi terbesar diakibatkan oleh inefisiensi modul surya sebesar 43,59 MWh atau sebesar 7,16 % dari energi maksimal yang mampu diterima oleh panel surya dalam setahun. Susut

energi akibat inefisiensi inverter adalah sebesar 13,13 MWh atau 2,32 % dari total energi yang diterima dari modul surya selama satu tahun. Susut kabel daya AC, baterai dan konsumsi energi oleh PLTS menyumbang penyusutan energi sebesar 27,99 MWh atau 5,07 % dari energi yang keluar dari inverter.

Efisiensi total pada sistem adalah sebesar 86,08% dihitung dari energi maksimal yang bisa diterima modul surya dengan efisiensi maksimum 19,28% hingga energi yang bisa dikirim ke grid. Perhitungan susut sistem PLTS Dogiyai dilakukan dengan memperhitungkan seluruh parameter di modul surya, inverter, baterai dan kabel serta konsumsi energi PLTS Dogiyai yang tersedia pada aplikasi PVSyst dengan memperhitungkan faktor-faktor seperti suhu ambien, kecepatan angin dan sebagainya.

4.3.3 Evaluasi Ekonomi Biaya Produksi Energi PLTS Dogiyai

Evaluasi ekonomi dilakukan sebagai bahan pertimbangan kelayakan reaktivasi PLTS Dogiyai dari segi keekonomian. BPP diperoleh dari perbandingan antara biaya operasional tahunan dengan produksi energi. Untuk menentukan BPP, biaya investasi yang meliputi peralatan dan perlengkapannya perlu disusun dalam sebuah rancangan anggaran biaya (RAB). Sumber data harga komponen berasal dari brosur harga komponen baterai, modul surya, inverter dan kabel baik dalam bentuk mata uang Euro dan Pound Sterling Inggris dengan kurs rupiah per 28 Juni 2025. Berikut merupakan tabel data rancangan anggaran biaya reaktivasi PLTS Dogiyai.

Tabel 4.9 Tabel Rancangan Anggaran Biaya Reaktivasi PLTS

Komponen	Jumlah	Harga per Unit (Rupiah)	Subtotal (Rupiah)
Modul Surya	924	2.833.533	2.618.184.492
Inverter	6	90.277.886	541.367.316
Baterai	12	94.248.252	1.130.979.024
Komponen lain			
Pengabelan	2000	48.000	96.000.000
Kotak <i>Combiner</i>	1	50.000.000	50.000.000

Komponen	Jumlah	Harga per Unit (Rupiah)	Subtotal (Rupiah)
Sistem Monitoring	1	50.000.000	50.000.000
Sistem Pengukuran	1	100.000.000	100.000.000
Struktur Pendukung Modul	1034	150.000.000	155.100.000
Bahan Pengunci	1000	20.000	20.000.000
Studi dan analisis			
Studi Keteknisan	1	30.000.000	30.000.000
Perizinan	1	50.000.000	50.000.000
Studi Dan Analisis Ekonomi	1	10.000.000	10.000.000
Studi Dan Analisis Lingkungan	1	10.000.000	10.000.000
Instalasi			
Instalasi Modul	924	160.000	147.840.000
Instalasi Inverter	6	2.500.000	15.000.000
Instalasi Baterai	12	2.500.000	30.000.000
Transportasi	1	100.000.000	100.000.000
Pengaturan/ <i>Setting</i>	1	20.000.000	20.000.000
Koneksi Grid	1	100.000.000	100.000.000
Total			5.274.470.832

Data RAB akan disimulasikan sesuai dengan parameter inflasi nasional tahunan rata-rata yang diambil dari data BPS mulai tahun 2015-2024, jumlah pembiayaan dari pinjaman, tenor dan kupon obligasi PLN, serta data BPP sistem Nabire yang dikeluarkan oleh Kementerian ESDM dan PLN dalam dokumen RUPTL 2025-2034. Pajak pembangunan, subsidi energi dan proses administrasi lain tidak akan dihitung dalam proyek ini. Data-data ini penting untuk mengukur kelayakan pembangunan PLTS Dogiyai ditinjau dari sudut pandang ekonomi. Berikut merupakan data parameter finansial yang diperlukan untuk melakukan perhitungan keekonomian.

Tabel 4.10 Parameter Ekonomi Indonesia, PLN dan BPP Listrik

Rata-rata Inflasi 2015-2024	2,91 %
Masa Pakai Proyek	20 tahun
Biaya Investasi	Rp. 5.274.470.832,-
Pembiayaan dari Pinjaman	Rp. 5.274.470.832,-
Tenor Pinjaman	7 tahun
Bunga Kupon	7,25 %
Nama Obligasi	Obligasi Berkelanjutan IV PLN Tahap I Seri B
Rata-rata Harga Energi per kWh dari Data BPP Tenaga Listrik Sistem Nabire 2025-2034	3.212 Rupiah/kWh
Ekspektasi Operasional PLTS Dogiyai	20 tahun

Parameter ekonomi diatas diolah untuk menghasilkan data data periode pengembalian investasi yaitu selama 4,4 tahun; biaya pokok produksi listrik PLTS Dogiyai sebesar 1.089 Rupiah/kWh. Periode pengembalian 4,4 tahun dianggap cukup baik mengingat PLTS ini dapat dioperasikan hingga 20 tahun dan harga listrik per kWh sebesar Rp. 1.089 berapa jauh dibawah BPP yang ditetapkan pemerintah untuk sistem Nabire.

Melalui data ini seiring dengan meningkatnya penggunaan PLTS sebagai pembangkit listrik, diharapkan BPP tenaga listrik bisa diturunkan, terutama di wilayah tertinggal, terdepan, terluar (3T). PLTS sistem hibrida mengurangi ketergantungan suatu sistem kelistrikan terhadap energi fosil yang memiliki biaya operasional yang tinggi, namun PLTD tetap menjaga keandalan sistem kelistrikan yang tidak bisa dipastikan oleh PLTS.

4.3.4 Potensi Reduksi Emisi CO₂

Reduksi emisi CO₂ terjadi karena dalam proses produksi energinya PLTS tidak membakar bahan bakar yang mengeluarkan emisi CO₂ sehingga menghasilkan energi yang hijau dan ramah lingkungan. Beroperasinya PLTS Dogiyai berpotensi untuk mengurangi emisi gas rumah kaca yang dihasilkan oleh pembangkit listrik dengan sumber tenaga dari bahan bakar fosil, yang dalam hal ini adalah PLTD Deiyai.

Total jejak karbon dari proses produksi dan fabrikasi dari keseluruhan komponen PLTS Dogiyai adalah sebesar 562,48 tCO₂. Perhitungan jejak karbon pada PLTS Dogiyai dilakukan tanpa memperhitungkan jejak karbon yang meliputi energi yang dibutuhkan untuk transportasi dan pembangunan PLTS. Adapun total jejak karbon memiliki rincian sebagai berikut :

Tabel 4.11 Data *System Lifecycle Emission*

Item	LCE	Kuantitas	Subtotal (kgCO ₂)
Modul Surya	1.713 kgCO ₂ /kWp	300 kWp	514.330
Inverter	485 kgCO ₂ /unit	6	2.910
Aksesoris Lain	4,9 kgCO ₂ /kg	9240 kg	45.237
Total			562,48

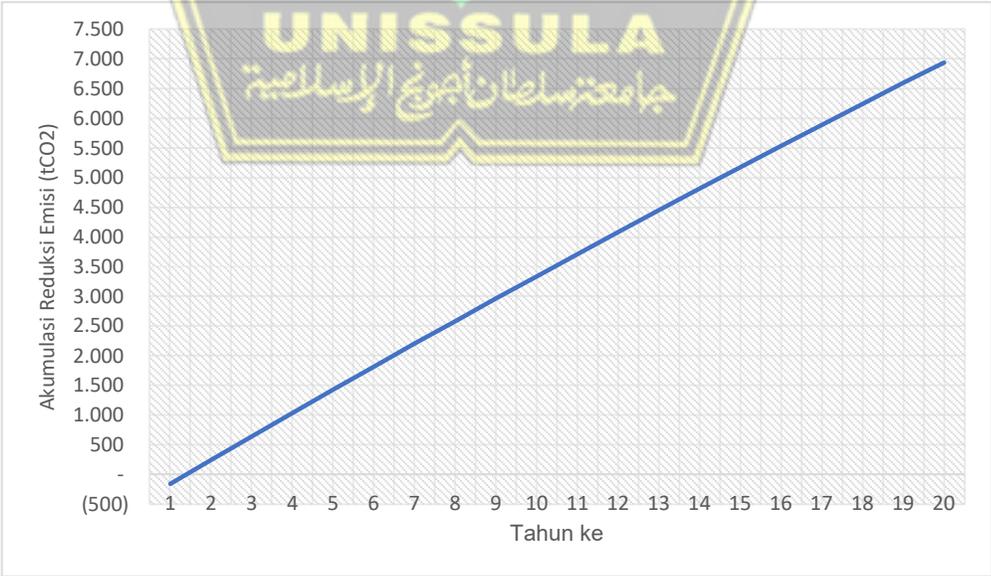
Dengan ekspektasi umur PLTS Dogiyai dapat mencapai 20 tahun dengan pengurangan emisi sebesar 734 gCO₂/kWh untuk negara Indonesia dan dengan penurunan produksi energi sebesar 0,8 % per tahun, maka didapatkan hasil reduksi CO₂ sesuai dengan tabel dibawah ini :

Tabel 4.12 Data Reduksi Emisi Tahunan

Tahun ke	Produksi kWh Pada Output Inverter (MWh)	Emisi CO ₂ Indonesia (gCO ₂ /kWh)	Reduksi Emisi Tahunan (tCO ₂)	Akumulasi Reduksi Emisi (tCO ₂)
1	551,38	734	405	404,7
2	546,97	734	401	806,2
3	542,59	734	398	1.204,5
4	538,25	734	395	1.599,5
5	533,95	734	392	1.991,4
6	529,67	734	389	2.380,2
7	525,44	734	386	2.765,9
8	521,23	734	383	3.148,5
9	517,06	734	380	3.528,0
10	512,93	734	376	3.904,5

Tahun ke	Produksi kWh Pada Output Inverter (MWh)	Emisi CO2 Indonesia (gCO ₂ /kWh)	Reduksi Emisi Tahunan (tCO ₂)	Akumulasi Reduksi Emisi (tCO ₂)
11	508,82	734	373	4.278,0
12	504,75	734	370	4.648,5
13	500,72	734	368	5.016,0
14	496,71	734	365	5.380,6
15	492,74	734	362	5.742,2
16	488,79	734	359	6.101,0
17	484,88	734	356	6.456,9
18	481,00	734	353	6.810,0
19	477,16	734	350	7.160,2
20	473,34	734	347	7.507,6

Akumulasi reduksi emisi CO₂ PLTS Dogiyai selama 20 tahun dikurangi dengan jejak karbon yang dihasilkan saat pembangunan PLTS Dogiyai, maka didapatkan nilai 7.507,50 tCO₂ yang berhasil direduksi oleh PLTS Dogiyai selama 20 tahun. Jumlah emisi gas CO₂ ini ekuivalen dengan emisi yang diserap 17.875 pohon selama dalam rentang waktu yang sama dengan asumsi kemampuan penyerapan CO₂ satu pohon berkisar 21 kgCO₂ per tahun.



Gambar 4.4 Grafik Akumulasi Reduksi Emisi CO₂ secara Tahunan

Dapat dilihat bahwa jejak karbon yang dihasilkan dari proses produksi komponen PLTS sebesar 562,48 tCO₂ sepenuhnya oleh produksi energi bersih dari PLTS Dogiyai sebelum tahun kedua beroperasinya PLTS Dogiyai, dan akan menjadi penyumbang energi bersih hingga 20 tahun berikutnya.

4.4 Simulasi Probabilitas Produksi Energi PLTS Dogiyai pada Aplikasi MATLAB R2025a

Simulasi probabilitas produksi energi PLTS dilakukan menggunakan metode statistik Monte Carlo yang disimulasikan dengan aplikasi MATLAB R2025a. Proses simulasi untuk menjalankan fungsi statistik Monte Carlo perlu melalui beberapa persiapan, antara lain parameter, penyusunan skrip dan hasil simulasi.

4.4.1 Parameter dalam Simulasi Monte Carlo

Parameter-parameter yang dibutuhkan untuk menghitung probabilitas statistik produksi adalah sebagai berikut :

Tabel 4.13 Tabel Parameter Simulasi Monte Carlo

Luas total modul m ²	1559 m ²
Efisiensi Panel	19,8% @25°C, G = 1000 W/m ²
Daya Puncak Modul per m ²	192,43 W/m ²
Koefisien Suhu	-0,36% /°C
NOCT (°C)	25°C
Spesifikasi Inverter	6 x 50 kW; efisiensi 97.3% @360 V, 98% @700 V, 97.8% @ 800 V
Derating factor	0,8
Jumlah Iterasi Produksi Energi	100.000
Jumlah Iterasi Iridiasi Matahari	10.0000

Tabel 4.14 Parameter Bulanan Simulasi Monte Carlo

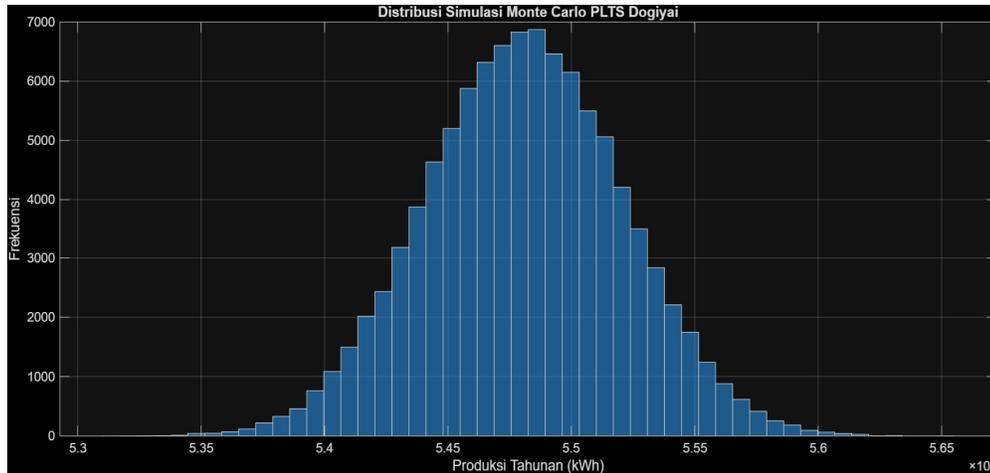
Bulan	Radiasi Glob Horizontal (kWh/m ²)	Performance Ratio	Suhu Ambien (°C)
Januari	186,1	0,858	19,5
Februari	168,6	0,830	19,4

Bulan	Radiasi Glob Horizontal (kWh/m ²)	Performance Ratio	Suhu Ambien (°C)
Maret	189,7	0,838	19,5
April	173,3	0,866	19,3
Mei	164,5	0,863	19,3
Juni	152,0	0,883	18,4
Juli	159,3	0,857	18,6
Agustus	169,2	0,879	18,7
September	169,3	0,810	18,6
Oktober	182,5	0,830	19,4
November	180,8	0,863	19,6
Desember	178,7	0,840	19,9
Tahunan	2074,0	0,851	19,2

Dari data diatas, data yang nilainya diacak atau masuk dalam iterasi antara lain data iradiasi harian yang memengaruhi input utama dalam produksi energi dan suhu ambien harian yang memengaruhi suhu sel dan efisiensi panel. Data acak iridiasi matahari yang ditentukan sebesar 10.000 data, sedangkan data acak perhitungan produksi energi yang dipakai adalah sebanyak 100.000 data. Nilai pada suhu sel modul dan efisiensi aktual juga berubah dipengaruhi oleh data-data yang termasuk dalam iterasi. Sementara parameter lain yang dimasukkan dalam simulasi ini merupakan parameter konstan di semua iterasi yang telah disesuaikan dengan kondisi suhu dan iridiasi matahari.

4.4.2 Simulasi Monte Carlo pada Aplikasi MATLAB R2025a

Parameter-parameter yang telah disebutkan pada subbab 4.4.1 disusun sedemikian rupa dalam bentuk skrip untuk menjalankan perintah simulasi perhitungan di aplikasi MATLAB. Hasil sebaran produksi energi adalah produksi energi yang berada pada output inverter, tanpa menghitung rugi daya penghantar AC tiga fasa, rugi baterai dan konsumsi energi PLTS Dogiyai itu sendiri. Perhitungan dilakukan dengan 100.000 percobaan produksi energi ditunjukkan oleh grafik yang terdapat dibawah ini :



Gambar 4.5 Grafik Distribusi Data Probabilitas Produksi Energi PLTS Dogiyai

Dari grafik diatas didapatkan hasil bahwa produksi energi dengan frekuensi paling banyak adalah produksi energi memiliki rentang 548.250 – 548.940 kWh dengan frekuensi sebesar 6.873 kali dari 100.000 percobaan. Grafik diatas menunjukkan bahwa frekuensi penurunan produksi energi yang lebih besar dibandingkan dengan frekuensi kenaikan produksi energi.

Dari simulasi yang dilakukan oleh PVSyst, hasil produksi energi pada output inverter adalah sebesar 552.020 kWh, lebih besar 0,56% dari yang ditunjukkan oleh rentang atas nilai produksi dengan frekuensi paling tinggi pada simulasi Monte Carlo. Hal ini mengindikasikan bahwa performa sistem berada di batas atas potensi realistis, sejalan dengan simulasi berbasis probabilistic.

4.5 Efektivitas PLTS Dogiyai terhadap Efisiensi PLTD Deiyai

Jumlah energi yang dihasilkan oleh PLTS Dogiyai mereduksi beban daya dan energi yang harus diproduksi oleh PLTD Deiyai. Penurunan beban dan energi diharapkan dan berpotensi dapat menekan konsumsi BBM, sebagai sumber energi utama untuk memutar *genset*.

Perhitungan konsumsi BBM yang berpotensi dapat ditekan dilakukan dengan mengalikan rata-rata *SFC* bulanan dan tahunan PLTD Deiyai dengan produksi energi PLTS Dogiyai. Berikut ini merupakan perhitungan tabel potensi penghematan BBM mulai Mei 2024 s/d April 2025.

Tabel 4.15 Tabel Potensi Penghematan BBM

Bulan	Produksi Energi PLTS Netto (kWh)	Rata-rata <i>SFC</i> PLTD Deiyai (liter/kWh)	Potensi Penurunan Konsumsi BBM (liter)
Mei 2024	44,92	0,277	12.425
Juni 2024	42,91	0,278	11.944
Juli 2024	43,39	0,276	11.961
Agustus 2024	46,07	0,280	12.898
September 2024	41,05	0,280	11.499
Oktober 2024	43,72	0,279	12.194
November 2024	43,53	0,277	12.047
Desember 2024	41,22	0,280	11.540
Januari 2025	46,76	0,278	12.272
Februari 2025	43,96	0,280	11.186
Maret 2025	51,33	0,281	13.258
April 2025	48,84	0,290	13.358
Tahunan	524,03	0,280	146.577

Dari tabel diatas dapat disimpulkan bahwa potensi penghematan BBM per tahun mencapai 146.577 liter. Produksi energi PLTS Dogiyai berpotensi mereduksi konsumsi BBM, juga dapat mengurangi nilai *SFC* suatu sistem kelistrikan dalam suatu periode tertentu. Berikut kami sajikan nilai *SFC* apabila PLTS Dogiyai sudah mampu memproduksi energi listrik.

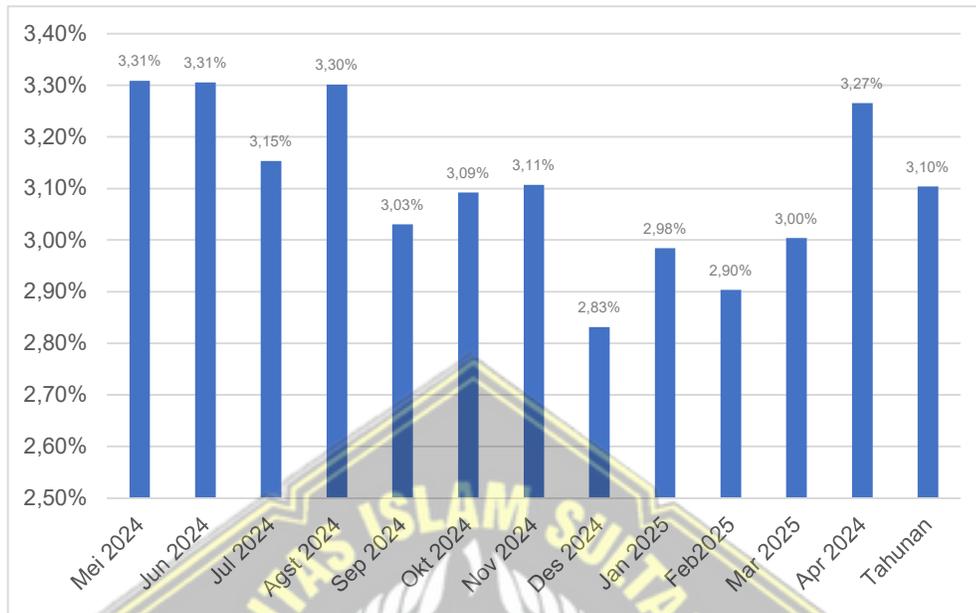
Tabel 4.16 Perbandingan Konsumsi BBM dan *SFC* Bulanan serta Tahunan Pra dan Pasca Operasi PLTS Dogiyai

Bulan	Produksi Energi Total (kWh)	Konsumsi BBM Pra Operasi PLTS (liter)	Konsumsi BBM Pasca Operasi PLTS (liter)	Rata-rata <i>SFC</i> Pra Operasi PLTS (liter/kWh)	Rata-rata <i>SFC</i> Pasca Operasi PLTS (liter/kWh)
Mei 2024	1.357.613	375.525	363.100	0,277	0,267

Bulan	Produksi Energi Total (kWh)	Konsumsi BBM Pra Operasi PLTS (liter)	Konsumsi BBM Pasca Operasi PLTS (liter)	Rata-rata <i>SFC</i> Pra Operasi PLTS (liter/kWh)	Rata-rata <i>SFC</i> Pasca Operasi PLTS (liter/kWh)
Juni 2024	1.298.129	361.325	349.381	0,278	0,269
Juli 2024	1.376.178	379.350	367.389	0,276	0,267
Agustus 2024	1.395.489	390.675	377.777	0,280	0,271
September 2024	1.354.507	379.425	367.926	0,280	0,272
Oktober 2024	1.413.885	394.360	382.166	0,279	0,270
November 2024	1.401.169	387.790	375.743	0,277	0,268
Desember 2024	1.455.747	407.570	396.030	0,280	0,272
Januari 2025	1.477.771	411.230	398.958	0,278	0,270
Februari 2025	1.373.946	385.200	374.014	0,280	0,272
Maret 2025	1.567.693	441.270	428.012	0,281	0,273
April 2025	1.412.391	409.077	395.719	0,290	0,280
Tahunan	16.884.518	375.525	4.576.220	0,280	0,271

Dari perbandingan konsumsi BBM Solar pra dan pasca operasi PLTS Dogiyai, didapatkan bahwa reaktivasi PLTS Dogiyai bersifat signifikan dalam mengurangi konsumsi BBM PLTD Deiyai. Besar persentasi pengurangan konsumsi

BBM dapat ditunjukkan grafik pengurangan BBM dalam bentuk persentase seperti yang terdapat dibawah ini.



Gambar 4.6 Grafik Persentasi Potensi Pengurangan Konsumsi BBM

Dari grafik yang disajikan diatas, dapat disimpulkan bahwa pengurangan konsumsi BBM memiliki nilai minimal 2,83% dan maksimum sebesar 3,31% dengan rata-rata tahunan sebesar 3,10%. Penghematan yang bisa dilakukan seiring dengan pengurangan produksi energi dari PLTD adalah sebesar Rp. 1.112.519.936 per tahun yang didapat dari selisih antara rata-rata BPP listrik wilayah Nabire dengan BPP listrik PLTS Dogiyai.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dengan hasil simulasi, perhitungan dan Analisa yang dapat dikumpulkan, maka dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut :

1. Reaktivasi PLTS Dogiyai 300 kWp berhasil menurunkan konsumsi BBM PLTD Deiyai sebesar 146.577 liter per tahun atau 3,10 % dari total konsumsi, dengan produksi energi bersih PLTS mencapai 524,03 MWh/tahun.
2. Konfigurasi hybrid PLTS–PLTD meningkatkan efisiensi operasional sistem. PLTS Dogiyai menunjukkan rasio performa 85,13 % dan efisiensi total 86,08 %, sekaligus menekan emisi CO₂ kumulatif sebesar 7.507,6 ton selama masa operasi 20 tahun.
3. Ditinjau dari aspek keekonomian, investasi reaktivasi sebesar Rp 5,27 miliar menghasilkan biaya pokok pembangkitan (BPP) PLTS reaktivasi sebesar Rp 1.089/kWh dan berpotensi menghemat biaya operasional tahunan sekitar Rp 1,11 miliar.

5.2 Saran

Melalui hasil dan pembahasan yang telah disampaikan pada bab-bab sebelumnya, bebrapa saran yang diberikan yang diharapkan dapat memberikan kontribusi secara praktis maupun akademis.

1. PLTS Dogiyai memiliki potensi yang lebih besar dalam memproduksi energi listrik dengan optimalisasi sistem kemiringan PLTS yang dapat diatur sesuai dengan intensitas cahaya matahari tertinggi dengan mekanisme *tracking* pada bagian *field type*.
2. Hasil simulasi PVSyst dan metode Monte Carlo pada MATLAB dapat dibandingkan kemudian dijadikan bahan pertimbangan kelayakan dan kewajaran dalam proses pembangunan, mengingat dua metode diatas memiliki pendekatan yang jauh berbeda.
3. Observasi langsung di lapangan serta studi langsung perlu dilakukan untuk dapat menambahkan data probabilitas dan manajemen risiko pada simulasi

Monte Carlo, sehingga hasilnya menjadi semakin realistis sesuai dengan kondisi lingkungan.

4. Reaktivasi segera PLTS Dogiyai juga bisa menjadi penentu berapa besar potensi produksi energi listrik dari PLTS di wilayah sistem kelistrikan Enarotali pada khususnya dan daerah pedalaman lain di Pulau Papua pada umumnya.
5. Penggunaan dan aplikasi algoritma lain dapat dipertimbangkan untuk menghasilkan data produksi energi terbarukan yang lebih rinci dan akurat.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. K. Rice, H. Zhu, C. Zhang, and A. R. Tapa, "A Hybrid Photovoltaic/Diesel System for Off-Grid Applications in Lubumbashi, DR Congo: A HOMER Pro Modeling and Optimization Study," *Sustain.*, vol. 15, no. 10, May 2023, doi: 10.3390/su15108162.
- [2] F. Maoulida, K. M. Aboudou, D. Rabah, and M. El-Ganaoui, "Feasibility Study for a Hybrid Power Plant (PV-Wind-Diesel-Storage) Connected to the Electricity Grid," *Fluid Dyn. Mater. Process.*, vol. 18, no. 6, pp. 1608–1617, 2022, doi: 10.32604/fdmp.2022.023199.
- [3] A. Azahra, K. D. Syahindra, D. R. Aryani, F. H. Jufri, and I. M. Ardita, "Optimized configuration of photovoltaic and battery energy storage system (BESS) in an isolated grid: A case study of Eastern Indonesia," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing Ltd, Nov. 2020. doi: 10.1088/1755-1315/599/1/012017.
- [4] M. F. Musyaffa, M. D. Idris, and P. Paryadi, "Analisis Efisiensi Generator Set G8 di Unit Pembangkit dan Distribusi Listrik PPSDM Migas," *Maj. Ilm. Swara Patra*, vol. 14, no. 2, pp. 115–130, 2024, doi: doi.org/10.37525/sp/2024-2/713.
- [5] T. Wati, S. Muharom, R. A. Firmansyah, and I. Masfufiah, "Pemanfaatan Energi Baru Terbarukan sebagai Sumber Daya Lampu Sollar Cell Untuk Penerangan Jalan Desa," vol. 7, no. 5, pp. 8–9, 2023, doi: doi.org/10.31764/jmm.v7i5.17304.
- [6] A. Suryanto, "Desain Pemanfaatan Sistem Pembangkit Hybrid Diesel Generator-Pv Interaktif Grid (Studi Kasus Pada Gedung Dekanat Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang)," *Jte Uniba*, vol. 6, no. 2, pp. 2–7, 2022.
- [7] H. B. Tambunan, *Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya*. Yogyakarta: Deepublish, 2020.
- [8] M. B. Br Manik, P. K. Nasution, S. Suyanto, and M. Yanti, "Kajian Metode Simulasi Monte Carlo," *J. Math. Comput. Stat.*, vol. 7, no. 2, pp. 232–242, 2024, doi: 10.35580/jmathcos.v7i2.2994.

- [9] S. Ammous, *The Bitcoin Standard: The Decentralized Alternative to Central Banking*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama, 2018.
- [10] B. Gates, *How to Avoid Climate Disaster*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama, 2021.
- [11] H. S. Fikri, D. Nugroho, and B. P. Jati, "Optimasi Kinerja Panel Surya Monocrystalline dan Polycrystalline dengan Pengendali MPPT pada Berbagai Tingkat Iradiasi dan Temperatur: Studi Simulasi dengan Matlab," *Avitec*, vol. 6, no. 1, p. 19, 2024, doi: 10.28989/avitec.v6i1.2024.
- [12] B. P. Statistik, "Tingkat Inflasi Harga Konsumen Nasional Tahunan." [Online]. Available: <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/1/OTE1HzE=/annually-national-consumer-price-inflation-rate--y-on-y--sup1-sup--2022-100-.html>
- [13] Kementerian ESDM, "RENCANA USAHA PENYEDIAAN TENAGA LISTRIK (RUPTL) 2025 - 2034," Jakarta, 2025.

