

## **TUGAS AKHIR**

# **Analisis Optimasi Pembangkit Listrik Hybrid Berbasis Mikrohidro dan Surya Menggunakan Particle swarm optimization (PSO) Berbantu MATLAB**

*Diajukan Untuk Melengkapi Tugas-Tugas dan Memenuhi Syarat -Syarat Guna  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Elektro Fakultas Teknik  
Universits Muhammadiyah Sumatera Utara*

**Disusun Oleh:**

**MUHAMMAD TEGAR PRAWIRA**  
**2007220054**



# **UMSU**

Unggul | Cerdas | Terpercaya

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA  
MEDAN  
2026**

## HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan oleh:


Nama : Muhammad Tegar Prawira  
NPM : 2007220054  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul Skripsi : Analisis Optimasi Pembangkit Listrik Hybrid Berbasis Mikrohidro dan Surya Menggunakan Metode Particle Swarm Optimization (PSO) Berbantu MATLAB  
Bidang ilmu : Energi Baru Terbarukan

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 5 Mei 2026

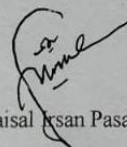
Mengetahui dan menyetujui:

Dosen Pembimbing I



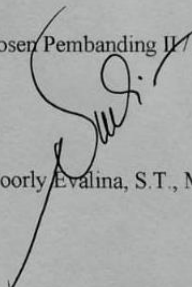
Dr. Rimbawati S.T., M.T

Dosen Pembanding I / Penguji



Assoc. Prof. Faisal Risan Pasaribu, ST, S.Pd, MT

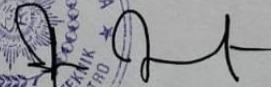
Dosen Pembanding II / Peguji



Noorly Evalina, S.T., M.T



Program Studi Teknik Elektro  
Ketua,



Dr. Elva Sannur Nasution, S.T., M.Pd

## SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Lengkap : Muhammad Tegar Prawira  
Tempat /Tanggal Lahir : Medan 28 September 2002  
NPM : 2007220054  
Fakultas : Teknik  
Program Studi : Teknik Elektro

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan Tugas Akhir saya yang berjudul:

**"Analisis Optimasi Pembangkit Listrik Hybrid Berbasis Mikrohidro dan Surya Menggunakan Metode Particle Swarm Optimization (PSO) Berbantu MATLAB"**

Bukan merupakan plagiarisme, pencurian hasil karya milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karena hubungan material dan non-material, ataupun segala kemungkinan lain, yang pada hakekatnya bukan merupakan karya tulis Tugas Akhir saya secara orisinal dan otentik.

Bila kemudian hari diduga kuat ada ketidaksesuaian antara fakta dengan kenyataan ini, saya bersedia diproses oleh Tim Fakultas yang dibentuk untuk melakukan verifikasi, dengan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan/ keserjanaan saya.

Demikian Surat Pernyataan ini saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademik di Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 5 Mei 2026

Saya yang menyatakan,



Muhammad Tegar Prawira

## ABSTRAK

Ketersediaan energi listrik yang stabil dan berkelanjutan di daerah terpencil masih menjadi tantangan utama akibat keterbatasan jaringan distribusi serta ketergantungan pada satu jenis sumber energi. Kondisi ini mendorong pemanfaatan sumber energi terbarukan yang dapat meningkatkan keandalan pasokan listrik. Salah satu solusi yang potensial adalah penerapan sistem pembangkit listrik hybrid yang mengombinasikan energi mikrohidro dan tenaga surya, karena kedua sumber energi tersebut memiliki karakteristik yang saling melengkapi. Energi mikrohidro relatif stabil karena bergantung pada debit air, sedangkan energi surya dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari. Namun, tanpa pengelolaan distribusi daya yang optimal, sistem hybrid dapat mengalami ketidakseimbangan suplai energi serta biaya operasional yang kurang efisien. Oleh karena itu, diperlukan metode optimasi yang mampu mengatur pembagian daya secara efektif agar sistem dapat bekerja secara optimal. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan operasi sistem pembangkit listrik hybrid mikrohidro–surya menggunakan metode Particle Swarm Optimization (PSO) berbantuan perangkat lunak MATLAB, sehingga diperoleh kinerja sistem yang lebih efisien serta biaya energi yang lebih rendah. Penelitian dilakukan pada sistem pembangkit listrik hybrid yang berlokasi di Dusun Bintang Asih, Desa Rumah Sumbul, Kecamatan STM Hulu, Kabupaten Deli Serdang. Metode penelitian meliputi pengumpulan data potensi mikrohidro, intensitas radiasi matahari, serta kebutuhan beban listrik, kemudian dilakukan pemodelan sistem hybrid dan simulasi optimasi menggunakan algoritma PSO dengan fungsi objektif meminimalkan biaya energi. Proses optimasi dijalankan secara iteratif hingga mencapai kondisi konvergensi yang stabil. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan algoritma PSO mampu meningkatkan efisiensi distribusi daya antara sumber mikrohidro dan tenaga surya serta menurunkan biaya operasional sistem. Berdasarkan hasil simulasi, biaya energi optimal diperoleh sebesar Rp 411.955,95/kWh dengan konvergensi tercapai pada iterasi ke-31, yang menunjukkan bahwa metode PSO efektif dalam meningkatkan keandalan dan efisiensi sistem pembangkit listrik hybrid, khususnya untuk wilayah terpencil.

*Kata kunci:* sistem hybrid mikrohidro–surya, Particle Swarm Optimization, optimasi energi, MATLAB, energi terbarukan.

## ABSTRAC

The availability of stable and sustainable electrical energy in remote areas remains a major challenge due to limited distribution networks and dependence on a single energy source. This condition encourages the utilization of renewable energy sources to improve the reliability of electricity supply. One potential solution is the implementation of a hybrid power generation system that combines microhydro and solar energy, as both energy sources have complementary characteristics. Microhydro energy is relatively stable because it depends on water discharge, while solar energy is influenced by solar radiation intensity. However, without optimal power distribution management, hybrid systems may experience supply imbalances and inefficient operational costs. Therefore, an optimization method is required to effectively regulate power sharing so that the system can operate optimally. This study aims to optimize the operation of a microhydro–solar hybrid power generation system using the Particle Swarm Optimization (PSO) method assisted by MATLAB software, in order to obtain higher system efficiency and lower energy costs. The research was conducted at a hybrid power generation system located in Bintang Asih Hamlet, Rumah Sumbul Village, STM Hulu District, Deli Serdang Regency. The research method includes collecting data on microhydro potential, solar radiation intensity, and electrical load demand, followed by hybrid system modeling and optimization simulation using the PSO algorithm with the objective function of minimizing the cost of energy. The optimization process was carried out iteratively until a stable convergence condition was achieved. The results show that the application of the PSO algorithm improves the efficiency of power distribution between microhydro and solar sources and reduces system operational costs. Based on simulation results, the optimal cost of energy was obtained at Rp 411,955.95/kWh, with convergence achieved at the 31st iteration, indicating that the PSO method is effective in improving the reliability and efficiency of hybrid power generation systems, particularly for remote areas.

*Keywords: microhydro–solar hybrid system, Particle Swarm Optimization, energy optimization, MATLAB, renewable energy.*

## KATA PENGANTAR

Tidak ada kata lain untuk menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar – besarnya kepada Allah SWT kecuali ucapan syukur atas segala nikmat dengan curahan kasih sayang-Nya atas selesainya Penelitian ini dengan baik dengan judul “Analisis Optimasi Pembangkit Listrik Hybrid Berbasis Mikrohidro dan Surya Menggunakan Particle swarm optimization (PSO) Berbantu MATLAB “

Penulian penelitian ini dimaksudkan guna melengkapi sebagian persyaratan meraih gelar sarjana di Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara Jurusan Teknik Elektro. Dalam menyusun penelitian ini penulis tidak dapat melupakan jasa orang – orang yang telah ikut berperan serta sehingga penelitian ini dapat selesai.

Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih yang sebesar – besarnya kepada :

1. Kedua orang tua saya yakni Bapak Muhammad Zen dan Ibu Hariani yang telah memberikan dukungan moral dan material beserta doa yang tidak pernah berhenti demi kelancaran penulisan skripsi ini.
2. Bapak Prof. Dr. Agussani, M.AP. selaku Rektor Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
3. Bapak Munawar Alfansury Siregar, ST., M.T selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
4. Ibu Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
5. Bapak Benny Oktrialdi, S.T., M.T. sebagai Sekretaris Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
6. Ibu Dr. Rimbawati S.T., M.T selaku Dosen Pembimbing yang telah banyak membimbing dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
7. Seluruh Bapak/Ibu Dosen di Program Studi Teknik Elektro , Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara yang telah banyak memberikan ilmu keteknik elektoran kepada penulis.

8. Bapak/Ibu Staf Administrasi di Biro Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
9. Teman – teman seperjuangan Elektro A2 Siang Stambuk 2020 yang tidak dapat di sebutkan satu persatu.

Semoga segala bantuk bantuannya mendapatkan balasan yang setimpal dari Tuhan Yang Maha Esa. Penulis menyadari bahwa proposal ini masih jauh dari kesempurnaan baik dari bentuk penyusunan maupun materinya. Kritik konstruktif dari pembaca sangat penulis harapan untuk penyempurnaan proposal selanjutnya. Akhir kata semoga proposal ini dapat memberikan manfaat kepada pembaca sekalian.

Medan,

Penulis

Muhammad Tegar Prawira

## DAFTAR ISI

ABSTRAK .....	i
ABSTRAC .....	iv
KATA PENGANTAR .....	v
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR .....	vii
DAFTAR TABEL .....	viii
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	4
1.3 Tujuan Penelitian .....	4
1.4 Ruang Lingkup.....	4
1.5 Manfaat Penelitian .....	5
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Tinjauan Pustaka Relevan .....	7
2.2 Landasan Teori .....	13
2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya.....	13
2.2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Air.....	19
2.2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid.....	22
2.2.4 Particle swarm optimization (PSO) .....	26
2.2.5 Diagram Alir Particle Swarm Optimization (PSO).....	31
2.2.6 Matlab.....	32
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	34
3.1 Tempat Penelitian.....	34
3.2 Alat dan Bahan .....	34
3.3 Jalannya penelitian.....	38
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....	40
4.1 Hasil Penelitian .....	40
4.1.1 Deskripsi Sistem Pembangkit Listrik Hybrid Mikrohidro–Surya.....	40
4.1.2 Data Parameter Awal Sistem Sebelum Optimasi .....	40
4.1.3 Pemodelan Optimasi Menggunakan Particle Swarm Optimization (PSO) .	41
4.1.4 Hasil Optimasi Sistem Pembangkit Hybrid.....	41
4.1.5 Implementasi Algoritma PSO Berbasis MATLAB.....	41
4.1.6 Hasil Simulasi Konvergensi PSO.....	42

4.1.7 Fungsi Objektif dan Persamaan Matematis Particle Swarm Optimization (PSO) .....	42
4.1.8 Kode Program Operasional MATLAB Particle Swarm Optimization .....	43
4.1.9 Grafik Konvergensi PSO Hasil Simulasi MATLAB.....	43
4.2 Pembahasan.....	44
4.2.1 Optimasi Pembangkit Listrik Hybrid Menggunakan Particle Swarm Optimization (PSO) .....	44
4.2.2 Perbandingan Kondisi Sistem Sebelum dan Sesudah Optimasi.....	45
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	47
5.1 Kesimpulan.....	47
5.2 Saran .....	47
DAFTAR PUSTAKA.....	48

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya .....	14
Gambar 2.2 Modul Sel Surya .....	15
Gambar 2.3 Solar Charge Controller .....	16
Gambar 2.4 Baterai 12 V, 150 Ah .....	17
Gambar 2.5 Power Inverter .....	18
Gambar 2.6 Pembangkit Listrik Tenaga Air .....	19
Gambar 2.7 Bendungan .....	19
Gambar 2.8 Turbin .....	20
Gambar 2.9 Generator .....	20
Gambar 2.10 Jalur Transmisi .....	21
Gambar 2.11 Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid .....	21
Gambar 2.12 Diagram Alur PLTH .....	22
Gambar 2.13 Sistem Backup dan Pembangkit Satu Lokasi .....	23
Gambar 2.14 Backup dan Pembangkit Dipasang Terpisah .....	23
Gambar 2.15 Pembangkit dengan Konversi AC/DC .....	24
Gambar 2.16 Particle Swarm Optimization (PSO) .....	25
Gambar 2.17 Diagram Alir Particle Swarm Optimization .....	30
Gambar 2.18 MATLAB .....	31
Gambar 3.1 Lokasi PLTMH Bintang Asih .....	33
Gambar 3.2 Bagan Alir Penelitian .....	37

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Alat Penelitian .....	33
Tabel 3.2 Bahan Penelitian .....	34
Tabel 4.1 Parameter Awal Sistem Pembangkit Hybrid .....	36
Tabel 4.2 Parameter (PSO) .....	39
Tabel 4.3 Hasil Optimasi Sistem Pembangkit Hybrid.....	44
Tabel 4.4 Biaya Satuan Komponen Sistem Pembangkit Hybrid.....	48

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Energi listrik merupakan kebutuhan fundamental dalam kehidupan modern, mendukung berbagai sektor seperti industri, transportasi, dan rumah tangga. Namun, tantangan utama dalam penyediaan listrik adalah keterbatasan sumber daya fosil serta dampak lingkungan yang dihasilkan dari penggunaannya. Oleh karena itu, transisi menuju energi terbarukan menjadi suatu keharusan. Dengan melimpahnya potensi energi surya, Indonesia dapat mengurangi ketergantungan pada energi fosil dan dampak negatif terhadap infrastruktur. Salah satu pendekatan yang semakin dikembangkan adalah sistem pembangkit listrik hybrid yang mengombinasikan berbagai sumber energi terbarukan, seperti mikrohidro dan tenaga surya (Amalia et al., 2024).

Kombinasi ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi, stabilitas, serta keberlanjutan suplai energi listrik, terutama di daerah terpencil yang belum terjangkau jaringan listrik utama. Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian terkait pembangkit listrik hybrid berbasis mikrohidro dan surya telah berkembang pesat. Mikrohidro menawarkan sumber energi yang stabil sepanjang tahun dengan kapasitas daya yang bervariasi tergantung pada debit air, sedangkan tenaga surya mampu melengkapi kebutuhan listrik terutama di siang hari dengan intensitas radiasi matahari yang cukup.

Namun, tantangan utama dalam sistem hybrid ini adalah bagaimana mengoptimalkan pembagian daya antar sumber agar menghasilkan kinerja yang optimal dan efisien. Algoritma optimasi berbasis kecerdasan buatan seperti Particle swarm optimization (PSO) menjadi solusi yang menjanjikan dalam menyelesaikan permasalahan ini. Salah satu masalah utama yang masih menjadi tantangan dalam penelitian terdahulu adalah kurangnya pendekatan optimasi yang mampu menyesuaikan secara adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan. Beberapa studi sebelumnya menggunakan metode optimasi konvensional seperti algoritma genetika (GA) dan firefly algorithm (FA), namun masih memiliki keterbatasan dalam konvergensi serta adaptabilitas terhadap kondisi operasional yang dinamis.

Particle swarm optimization (PSO) menawarkan keunggulan dalam hal eksplorasi solusi yang lebih luas dan konvergensi yang lebih cepat, sehingga dapat meningkatkan efisiensi pengelolaan daya pada sistem pembangkit listrik hybrid. Selain itu, masih terdapat keterbatasan dalam integrasi sistem hybrid mikrohidro dan surya dengan platform simulasi yang komprehensif. Berbagai kasus dengan kombinasi fungsi tujuan dan kendala penting yang berbeda disimulasikan, dan hasil algoritma yang diusulkan dibandingkan dengan metode terkini dalam literatur (Alghamdi, 2022).

Beberapa penelitian telah mengimplementasikan simulasi menggunakan MATLAB/Simulink, namun belum secara khusus mengaplikasikan PSO untuk optimasi sistem hybrid ini. Oleh karena itu, penelitian ini akan berfokus pada penerapan PSO untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem pembangkit listrik hybrid berbasis mikrohidro dan surya dengan bantuan simulasi MATLAB. Dengan mengisi kesenjangan penelitian ini, diharapkan studi ini dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem energi terbarukan yang lebih efisien dan adaptif.

Particle swarm optimization (PSO) merupakan salah satu metode metaheuristik, yaitu algoritma optimasi yang terinspirasi dari fenomena alam, khususnya perilaku sosial kunang-kunang yang saling menarik perhatian melalui kilatan cahaya di malam hari, terutama di daerah tropis saat musim panas. Dalam beberapa studi terkini, algoritma ini terbukti sangat efisien dan mampu mengungguli algoritma optimasi konvensional, seperti algoritma genetika, dalam menyelesaikan berbagai persoalan optimasi. Keunggulan tersebut telah dibuktikan melalui penelitian yang membandingkan kinerja statistik PSO dengan algoritma lainnya menggunakan sejumlah fungsi uji stokastik standar. Salah satu kelebihan utama dari algoritma ini adalah kemampuannya menggunakan bilangan acak riil serta mekanisme komunikasi global antar agen (dalam hal ini kunang-kunang), yang menjadikannya sangat efektif dalam menyelesaikan permasalahan optimasi multi-objektif, seperti optimasi pengiriman energi dengan emisi yang rendah (Saravanan & Prabha, 2019).

Hasil dari penelitian ini tidak hanya akan memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang implementasi PSO dalam optimasi sistem hybrid, tetapi juga dapat menjadi referensi bagi pengembangan lebih lanjut dalam integrasi teknologi kecerdasan buatan untuk sistem energi terbarukan. Secara keseluruhan, penelitian ini bertujuan untuk memberikan solusi terhadap permasalahan distribusi daya dalam sistem hybrid mikrohidro-surya dengan pendekatan optimasi berbasis PSO.

Particle Swarm Optimization (PSO) digunakan untuk mengatur dan mendistribusikan energi yang dihasilkan oleh sistem energi terbarukan hibrida (HRES) yang telah dirancang menggunakan perangkat lunak HOMER Pro. Data hasil simulasi dari HOMER Pro dimanfaatkan sebagai input dalam algoritma PSO guna mengurangi total biaya operasional dari sistem mikrogrid. PSO berperan sebagai alat dalam pengelolaan energi yang efisien untuk mikrogrid terisolasi yang mengandalkan berbagai sumber energi terbarukan. Tujuan utama dari pengelolaan energi ini adalah untuk mencapai biaya operasional yang serendah mungkin, sekaligus tetap mampu memenuhi kebutuhan listrik yang ada. Pendekatan yang efektif untuk mencapai tujuan ini adalah melalui penerapan algoritma optimasi. PSO sendiri merupakan algoritma yang terinspirasi dari perilaku sosial alami seperti gerakan burung atau ikan dalam mencari sumber makanan. (Bismark et al., 2023)

Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar untuk pengembangan lebih lanjut dalam bidang energi terbarukan, khususnya dalam perencanaan dan optimasi pembangkit listrik hybrid di daerah terpencil maupun wilayah yang membutuhkan solusi energi yang lebih andal dan berkelanjutan.

Selain itu, penelitian ini juga dapat memberikan kontribusi dalam mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil, meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya energi, serta mendukung upaya mitigasi perubahan iklim melalui penerapan teknologi energi bersih.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Adapun rumusan masalah dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana optimasi pembangkit listrik hybrid berbasis mikrohidro dan surya menggunakan metode Particle swarm optimization (PSO)?
2. Bagaimana perbedaan hasil sebelum dan sesudah dilakukan optimasi berbantu MATLAB?

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan penelitian yang ingin anda capai adalah :

1. Untuk mengetahui tingkat optimalisasi sistem pembangkit listrik hybrid berbasis mikrohidro dan surya melalui penerapan metode optimasi Particle swarm optimization (PSO) dalam mengatur distribusi daya antar sumber energi.
2. Untuk menganalisis efisiensi hasil optimasi sistem pembangkit listrik hybrid berbasis mikrohidro dan surya sebelum dan sesudah diterapkan metode Particle swarm optimization (PSO) dengan bantuan simulasi MATLAB.

## **1.4 Ruang Lingkup**

Agar penelitian tugas akhir ini lebih terarah dan tanpa mengurangi maksud juga tujuannya, maka ditetapkan ruang lingkup penelitian sebagai berikut :

3. Sistem Energi Hybrid Penelitian ini terbatas pada perancangan dan analisis sistem pembangkit listrik hybrid yang menggabungkan tenaga mikrohidro dan tenaga surya, dengan fokus pada proses optimasi distribusi daya antar sumber energi agar sistem bekerja secara efisien dan andal.
4. Metode Optimasi Penelitian menggunakan Particle swarm optimization (PSO) sebagai metode optimasi utama untuk menentukan parameter terbaik dalam sistem pembangkit listrik hybrid, termasuk mengoptimalkan performa dan efisiensi energi yang dihasilkan dari kedua sumber daya.
5. Simulasi Berbasis MATLAB Implementasi dan proses optimasi sistem

pembangkit listrik hybrid dilakukan melalui simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB, guna menganalisis hasil perhitungan dan mengevaluasi kinerja sistem setelah dilakukan optimasi.

### **1.5 Manfaat Penelitian**

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1.5.1 Sebagai referensi tambahan dalam pengembangan ilmu pengetahuan di bidang energi terbarukan dan teknologi optimasi, khususnya metode Particle swarm optimization (PSO) dan implementasinya pada sistem pembangkit listrik hybrid.

1.5.2 Memberikan kontribusi pada literatur akademis terkait kombinasi metode optimasi dengan simulasi berbasis MATLAB untuk perancangan sistem energi yang efisien.

### **1.6 Sistematika Penulisan**

Dalam memperoleh suatu pemahaman yang lebih dalam secara logis dan sistematis dalam hal ini melakukan pengumpulan materi dan literatur secara teratur dan sesuai metode penelitian, maka materi dalam penelitian ini akan dikelompokkan ke dalam beberapa sub bab yaitu sebagai berikut :

#### **BAB I (PENDAHULUAN)**

Bab ini bertindak sebagai pengantar yang menyajikan gambaran umum tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan, manfaat, serta sistematika penulisan dalam penelitian ini.

#### **BAB II (TINJAUAN PUSTAKA)**

Bab ini memuat pembahasan teori dan referensi ilmiah yang berkaitan dengan topik penelitian, serta menjelaskan landasan ilmiah yang menjadi dasar penelitian. Dalam tinjauan pustaka, peneliti akan mengkaji berbagai literatur dari berbagai sumber untuk memperkuat argumen dan pemahaman mengenai masalah yang dibahas.

#### **BAB III (METODOLOGI PENELITIAN)**

Bab ini menguraikan metode yang diterapkan dalam penelitian, termasuk tahapan yang diambil untuk mencapai tujuan penelitian. Metodologi penelitian meliputi pendekatan, teknik dan prosedur yang digunakan dalam proses pengumpulan dan analisis data, sehingga hasil yang diperoleh dapat dipertanggung jawabkan secara ilmiah.

#### BAB IV (HASIL DAN PEMBAHASAN)

Bab ini menyajikan hasil-hasil penelitian yang diperoleh melalui analisis data, kemudian mengulas temuan tersebut secara mendetail untuk menjawab rumusan masalah dan mencapai tujuan penelitian.

#### BAB V (PENUTUP)

Bab ini adalah bagian penutup dari skripsi yang menyajikan kesimpulan dan rekomendasi berdasarkan hasil penelitian yang telah dilaksanakan. Selain itu, bab ini juga merangkum temuan utama dan memberikan saran untuk penelitian di masa depan atau penerapan praktis.

#### DAFTAR PUSTAKA

Daftar sumber referensi yang dikumpulkan dan dipergunakan sebagai literatur pada penelitian ini.

## **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

### **2.1 Tinjauan Pustaka Relevan**

Dalam penelitian ini, penulis merujuk pada berbagai penelitian sebelumnya yang memiliki relevansi dengan topik yang sedang dikaji. Penelitian-penelitian terdahulu tersebut digunakan sebagai landasan teoritis dan referensi dalam menganalisis serta memahami berbagai aspek yang berkaitan dengan penelitian ini. Berikut ini disajikan beberapa hasil penelitian yang dianggap relevan dan dijadikan bahan kajian serta pertimbangan dalam menyusun kerangka penelitian yang lebih komprehensif.

Menurut (Saravanan & Prabha, 2019) Particle swarm optimization (PSO) merupakan salah satu algoritma optimasi berbasis metaheuristik yang terinspirasi dari perilaku alami, khususnya pola sosial kunang-kunang yang memancarkan cahaya (berkedip) di malam hari pada musim panas di wilayah tropis. Algoritma ini juga mengadopsi prinsip perilaku kawanan (swarm) seperti yang ditunjukkan oleh ikan, serangga, atau burung di alam liar.

Menurut (Hutasuhut, 2019) Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) pada dasarnya bekerja dengan memanfaatkan perbedaan ketinggian dan volume aliran air per detik yang berasal dari saluran irigasi, sungai, atau air terjun. Aliran air tersebut digunakan untuk memutar poros turbin sehingga menghasilkan energi mekanik, yang kemudian digunakan untuk menggerakkan generator dan menghasilkan energi listrik.

Menurut Yulanda et al., (2024) kombinasi sumber energi adalah energi matahari dan energi air, di mana keduanya beroperasi secara bergantian dalam menghasilkan listrik. Pemanfaatan PLTH bertujuan untuk meningkatkan produksi listrik guna mencapai efisiensi dalam berbagai aspek, serta diharapkan dapat beroperasi tanpa menimbulkan polusi atau dampak lingkungan yang berbahaya bagi pengguna maupun masyarakat sekitar.

Menurut (Pembelajaran & Volume, 2021) kombinasi antara pembangkit listrik tenaga mikrohidro dan tenaga surya mampu menghasilkan listrik dalam jumlah yang cukup besar untuk memenuhi kebutuhan listrik di daerah tersebut melalui sistem Hybrid Renewable Energy Source (HRES). Prinsip kerja PLTMH

didasarkan pada pemanfaatan perbedaan ketinggian dan debit air perdetik dari aliran irigasi, sungai, atau air terjun. Aliran air tersebut menggerakkan poros turbin, yang kemudian menghasilkan energi mekanik. Energi ini kemudian dikonversi menjadi listrik oleh generator.

Menurut Ointu et al., (2020) dalam perencanaan sistem tenaga listrik terdapat tiga komponen utama yang berperan penting dalam penyediaan energi listrik, yaitu pembangkit listrik, saluran transmisi dan gardu induk, serta sistem distribusi. Salah satu faktor utama dalam penyediaan energi listrik adalah ketersediaan sumber daya alam. Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) merupakan jenis pembangkit yang memanfaatkan potensi energi air untuk menghasilkan listrik. Mengingat bahwa air merupakan sumber daya alam yang melimpah, penelitian ini dilakukan dengan fokus utama memberikan gambaran serta informasi awal mengenai potensi energi air sebagai dasar dalam perencanaan dan pembangunan PLTMH.

Menurut Syahputra et al., (2023) pembangkit listrik hybrid ini dirancang dengan kapasitas maksimum 1100 watt dan bersifat portabel, sehingga dapat dengan mudah dipindahkan serta digunakan di lokasi yang sesuai. Lokasi ideal untuk operasional pembangkit ini mencakup saluran irigasi, sungai kecil, atau selokan di area terbuka. Pemilihan lokasi tersebut bertujuan untuk memastikan pembangkit dapat menghasilkan daya listrik secara optimal, dengan memanfaatkan aliran air untuk menggerakkan mikrohidro serta mendapatkan paparan sinar matahari yang cukup. Uji coba telah dilakukan dalam kondisi tanpa beban dan menunjukkan bahwa tegangan keluaran yang dihasilkan berada pada tingkat yang memadai.

Menurut Berbasis et al., (2024) pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTPH) adalah teknologi energi berskala kecil yang ramah lingkungan dan dapat menjadi alternatif dalam penyediaan listrik. Sistem ini bekerja dengan memanfaatkan perbedaan ketinggian serta debit air per detik dari aliran sungai, saluran irigasi, atau air terjun. Aliran air tersebut memutar turbin, menghasilkan energi mekanik yang kemudian digunakan untuk menggerakkan generator sehingga menghasilkan listrik. PLTPH dikategorikan sebagai pembangkit listrik skala kecil karena kapasitasnya kurang dari 5 kW.

Menurut Jamiyanti et al., (2024) berdasarkan hasil simulasi, algoritma

Firefly (FA) terbukti lebih andal dibandingkan Particle Swarm Optimization (PSO) dalam proses pemantauan, dengan tingkat keberhasilan yang berkisar antara 98,9% hingga 99,8% serta tingkat kegagalan sekitar 1,3%. Meskipun PSO memiliki keunggulan dalam waktu pelacakan yang lebih cepat sekitar 0,33%, FA tetap menunjukkan efektivitas yang lebih tinggi, yaitu sekitar 1,96% dibandingkan PSO.

Menurut (Arya et al., n.d.) pembangkit Listrik Tenaga Hybrid (PLTH) merupakan sistem pembangkit listrik yang menggabungkan dua atau lebih jenis sumber energi listrik yang berbeda. Salah satu contohnya adalah kombinasi antara Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) yang diterapkan di lapangan futsal Politeknik Negeri Malang untuk mencukupi kebutuhan listrik di lokasi tersebut.

Menurut Rokhman & Sofwan, (2018) berdasarkan hasil rancang bangun sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya, penggunaan 1 hingga 4 panel surya berkapasitas 100 WP menghasilkan tegangan sebesar 21,12 volt dan daya rata-rata sebesar 18,80 watt dengan durasi operasi sekitar 7,8 jam per hari. Sementara itu, pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro, diperoleh tegangan rata-rata sebesar 10,81 volt dan daya sebesar 41,48 watt dalam waktu pemakaian selama 8 jam.

Menurut Ilmiah Aplikasi Teknologi & Suropto, (2022) berdasarkan hasil perhitungan terhadap beban, sistem pembangkit listrik tenaga hybrid menghasilkan daya sebesar 1200 Watt DC dari energi surya dan 250 Watt DC dari energi mikrohidro. Total investasi yang dibutuhkan mencapai Rp 14.400.000, dengan nilai Net Present Value (NPV) sebesar Rp 28.498.408. Tingkat pengembalian investasi (IRR) dari pembangkit ini tercatat sebesar 47%, yang jauh melampaui IRR acuan sebesar 12%. Oleh karena itu, proyek pembangkit ini dinilai layak untuk direalisasikan dan direncanakan akan beroperasi selama jangka waktu 10 tahun.

Menurut (Putra et al., n.d.) berdasarkan hasil penelitian yang mencakup pengukuran, perhitungan, simulasi, dan analisis data, penulis menyimpulkan bahwa konfigurasi sistem pembangkit listrik hibrida yang paling efisien secara ekonomi, ditinjau dari nilai *Net Present Cost* (NPC), terdiri atas PLTS berkapasitas 15 kW, PLTMH sebesar 49 kW, 105 unit baterai, serta inverter berkapasitas 24 kW. Total NPC dari sistem ini adalah sebesar Rp4.651.357.000 dengan biaya produksi listrik (*Cost of Energy*) sebesar Rp3.014,70. Sistem ini mampu menghasilkan total energi

listrik sebesar 207.207 kWh per tahun.

Kontribusi energi dari PLTMH mencapai 175.654 kWh pertahun, sementara PLTS menyumbang 31.553 kWh per tahun. Dengan demikian, tingkat penetrasi energi terbarukan dalam sistem ini adalah 84,8% dari PLTMH dan 15,2% dari PLTS.

Hasil simulasi sistem menggunakan perangkat lunak HOMER serta perhitungan manual berdasarkan data lapangan menunjukkan bahwa energi listrik yang dihasilkan mampu memenuhi kebutuhan listrik untuk meningkatkan rasio elektrifikasi dan mendukung pencapaian status Desa Mandiri Energi (DME) di Kampung Dosay.

Dari sisi kelayakan investasi berdasarkan analisis ekonomi menggunakan metode *Net Present Value* (NPV), *Profitability Index* (PI), dan *Discounted Payback Period* (DPP), investasi pada PLTMH dinyatakan layak secara finansial, sedangkan investasi untuk PLTS belum menunjukkan kelayakan.

Menurut (Hutasuhut, 2019) Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) yang ada sebelumnya memiliki kapasitas sebesar 1,1 kW. Sistem pembangkit dan distribusinya dirancang secara sederhana sehingga belum sesuai dengan Standar Umum Instalasi Listrik (PUIL). Selain itu, daya yang dihasilkan belum mampu mencukupi kebutuhan listrik bagi 25 Kepala Keluarga (KK) di dusun tersebut. Berdasarkan kondisi tersebut, kegiatan pengabdian masyarakat ini bertujuan untuk meningkatkan kapasitas PLTMH menjadi 5 kW dengan mengganti kincir air menggunakan turbin, serta melakukan alih teknologi melalui pelatihan manajemen pengelolaan pembangkit dan pemberdayaan ekonomi masyarakat melalui pengembangan industri gula merah. Pada akhir kegiatan, disimpulkan bahwa kapasitas PLTMH berhasil ditingkatkan menjadi 5 kW, kincir air telah diganti dengan turbin, dan sistem distribusi telah disesuaikan dengan ketentuan PUIL.

Menurut (Amalia et al., 2024) penggunaan energi terbarukan berbasis tenaga surya dalam infrastruktur militer memiliki potensi besar untuk memperkuat ketahanan energi nasional di Indonesia. Dengan potensi energi matahari yang melimpah, Indonesia dapat mengurangi ketergantungannya pada bahan bakar fosil serta dampak negatif terhadap infrastruktur. Meski begitu, implementasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di fasilitas militer menghadapi sejumlah tantangan, seperti biaya investasi yang tinggi, kebutuhan akan area yang luas, dan

isu keamanan pasokan energi. Penerapan sistem microgrid dapat menjadi solusi untuk meningkatkan keandalan energi, memungkinkan operasi militer yang lebih mandiri, serta meminimalisir risiko pemadaman listrik. Untuk mengatasi hambatan tersebut, diperlukan dukungan kebijakan yang kuat, perencanaan yang matang, serta pelatihan khusus bagi personel yang terlibat. Secara keseluruhan, pemanfaatan energi surya dalam sektor militer tidak hanya mendukung ketahanan energi nasional, tetapi juga berperan dalam mengurangi emisi gas rumah kaca secara global.

Menurut (Marzuki et al., 2021) sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro yang telah dibangun di Nagari Sawah Tengah, Kecamatan Pariangan, Kabupaten Tanah Datar, Provinsi Sumatera Barat, mampu beroperasi secara optimal dengan kapasitas daya sebesar 2600 W. Keberadaan sistem ini memungkinkan masyarakat Sawah Tengah untuk memenuhi kebutuhan air mereka, serta membantu mengurangi beban biaya listrik melalui pelaksanaan Program Kemitraan Masyarakat.

Menurut (Hadi et al., 2025) Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) kini menjadi solusi energi alternatif yang potensial, dengan memanfaatkan cahaya matahari untuk menghasilkan listrik yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Seiring dengan perkembangan teknologi panel surya dan sistem konversi energi, PLTS telah menunjukkan efisiensi tinggi dan semakin banyak digunakan di berbagai negara, baik untuk kebutuhan rumah tangga berskala kecil maupun instalasi komersial berskala besar.

Menurut (Madi et al., 2022) pelaksanaan program pemanfaatan teknologi energi hybrid yang menggabungkan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) dan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) telah berhasil diterapkan

di Dusun Batu Saeng, Lampung, guna mendukung kebutuhan pasokan listrik masyarakat. Tiga kegiatan utama yang berhasil direalisasikan meliputi: 1) instalasi turbin mikrohidro tipe crossflow berkapasitas 10 kW, 2) pembangunan ulang rumah pembangkit dengan material yang lebih kokoh dibanding sebelumnya, dan 3) pemasangan panel surya dengan total kapasitas 1080 wp. Hasil dari program ini meningkatkan kapasitas energi listrik dari sebelumnya sekitar 6–8 kW menjadi lebih dari 11 kW yang dialirkan ke 20 rumah warga.

Menurut (Putra et al., 2023) untuk menganalisis karakteristik daya keluaran berdasarkan hasil konfigurasi sistem yang optimal menggunakan aplikasi HOMER. Untuk menentukan kapasitas PV yang optimal dalam memenuhi kebutuhan beban serta memaksimalkan potensi radiasi sinar matahari untuk PLTS dan aliran sungai untuk PLTMH dalam mencapai RE. Untuk mengetahui hasil asumsi kelayakan investasi dan kajian ekonomi menggunakan metode NPV, PI, dan DPP. Mengumpulkan data intensitas radiasi matahari yang bersumber dari publikasi Aplikasi HOMER. Metode observasi langsung dengan melakukan penelitian yang berlokasi di PLTMH Kampung Dosay. Konfigurasi PLTH yang paling optimal berdasarkan nilai NPC terdiri dari PLTS 15kW, PLTMH 49kW, 105 baterai dan inverter 24kW dengan total NPC sebesar Rp.4.651.357.000, biaya pembangkitan listrik sebesar Rp.3.014,70. Energi listrik yang dihasilkan PLTH dalam setahun adalah 207.207 kWh.

Menurut (Nisa & Alfanani, 2022) PLTMH (Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro) dan panel surya sebagai sumber energi alternatif diharapkan dapat memberikan manfaat yang lebih luas serta membantu mengatasi kurangnya pengetahuan masyarakat desa mengenai pemanfaatan energi listrik dari sumber daya alam seperti air dan sinar matahari. Dalam penelitian ini, dilakukan perhitungan efisiensi daya pada sistem pembangkit listrik tenaga surya dan mikrohidro yang telah terpasang. Berdasarkan hasil perhitungan, daya asumsi yang dihasilkan panel surya selama 5 jam adalah sebesar 256,72 Watt. Kemudian sistem ini digabungkan (dihybridkan) dengan pembangkit listrik tenaga mikrohidro menggunakan data sekunder yang menghasilkan daya sebesar 619,2 Watt dalam waktu yang sama. Total daya gabungan dari kedua pembangkit selama 5 jam mencapai 875,92 Watt. Sementara itu, berdasarkan perhitungan kebutuhan daya

peralatan yang digunakan di Taman Airlangga, Desa Pataan, Kecamatan Sambeng, Kabupaten Lamongan selama 6 jam pemakaian, dibutuhkan total daya sebesar 1776 Watt.

Menurut (Rauf et al., 2017) energi dari radiasi matahari dapat dikonversi menjadi energi listrik menggunakan pembangkit listrik tenaga surya, yang juga dikenal sebagai teknologi fotovoltaik. Teknologi ini memanfaatkan bahan semikonduktor yang disebut sel surya (solar cell). Selain bersumber dari energi terbarukan yang tidak terbatas, yaitu cahaya matahari, teknologi ini juga ramah lingkungan dan memiliki efisiensi pemanfaatan yang tinggi. Sementara itu, Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida (PLTH) merupakan sistem pembangkit listrik yang menggabungkan lebih dari satu jenis pembangkit, biasanya antara pembangkit berbahan bakar fosil dan pembangkit yang menggunakan Energi Baru Terbarukan (EBT). Sistem ini menjadi solusi untuk mengatasi kelangkaan BBM serta keterbatasan akses listrik di wilayah terpencil, pulau-pulau kecil, maupun di daerah perkotaan.

Menurut (Rimbawati et al., 2025) Meningkatnya kepedulian terhadap lingkungan serta kebutuhan untuk mengurangi ketergantungan pada sumber energi berbasis bahan bakar fosil telah mendorong pengembangan berbagai teknologi energi terbarukan (ET) seperti mikrohidro, fotovoltaik, biomassa, panas bumi, dan biogas. Namun demikian, pemanfaatan energi terbarukan di Provinsi Sumatera Utara masih relatif rendah dibandingkan penggunaan bahan bakar fosil, sehingga diperlukan strategi optimasi yang efektif untuk mempercepat peralihan menuju penggunaan energi terbarukan secara penuh (100%).

## **2.2 Landasan Teori**

### **2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya**

Menurut (Rifaldi et al., 2023) Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan sistem yang memanfaatkan energi matahari untuk menghasilkan listrik. Sistem ini terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu panel surya, pengatur pengisian daya (solar charge controller), baterai dan inverter. Panel surya berfungsi mengubah energi cahaya matahari menjadi listrik berarus searah (DC). Solar charge controller bertugas mengontrol tegangan yang masuk ke baterai agar tetap stabil. Energi listrik kemudian disimpan dalam baterai sebelum akhirnya diubah menjadi

arus bolak-balik (AC) oleh inverter untuk digunakan.

Dalam penerapannya, penting untuk mengetahui efisiensi masing-masing komponen dalam sistem PLTS guna memahami seberapa besar energi listrik yang dapat dimanfaatkan. Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi efisiensi dari pembangkitan listrik oleh panel surya berkapasitas 50 WP yang dipadukan dengan inverter berdaya 300 W. Pengujian dilakukan sebanyak lima kali dalam rentang waktu lima jam (pukul 10.00 hingga 14.00 Wib), menggunakan beban lampu 9 W.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa panel surya mampu menghasilkan daya rata-rata sebesar 39,43 W, dengan nilai tertinggi mencapai 44,84 W. Efisiensi panel surya yang diperoleh tercatat sebesar 11,58%. Sementara itu, daya rata-rata yang dikeluarkan oleh inverter adalah 25,73 W, dengan output maksimal sebesar 28,43 W. Efisiensi rata-rata inverter tercatat sebesar 77,21%.



Gambar 2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Berikut ini adalah beberapa komponen Pembangkit Listrik Tenaga Surya, yaitu sebagai berikut :

a. Sel surya

Sel surya yang juga dikenal sebagai fotovoltaik, merupakan komponen elektronik yang mampu mengubah radiasi matahari menjadi energi listrik melalui proses yang disebut efek fotovoltaik. Efek ini terjadi ketika cahaya menyebabkan perpindahan muatan dalam bahan padat, menghasilkan arus listrik, Intensitas cahaya sangat memengaruhi kinerja sel surya, karena semakin tinggi intensitas cahaya, maka semakin besar arus dan tegangan yang dihasilkan (Salomo Silaban et al., 2014).

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dapat menggunakan sistem panel surya yang terhubung ke jaringan listrik (grid-connected). Dalam sistem fotovoltaik rumah tangga, panel surya mengubah energi matahari menjadi arus listrik searah (DC). Arus DC ini kemudian dialirkan ke inverter yang berfungsi mengubahnya menjadi arus bolak-balik (AC) dan secara otomatis mengelola kinerja seluruh sistem. Listrik AC yang dihasilkan akan disalurkan ke panel distribusi dalam rumah dan digunakan sesuai kebutuhan peralatan listrik. Konsumsi energi listrik rumah tangga diukur dengan alat bernama Watt-Hour Meter .



Gambar 2.2 Modul Sel surya

#### b. Solar Charge Controller

Solar Charge Controller (SCC) merupakan perangkat elektronik yang berfungsi mengatur aliran arus searah (DC) baik saat pengisian baterai maupun saat daya dialirkan dari baterai ke beban. SCC berperan penting dalam mencegah baterai mengalami kelebihan pengisian (overcharging) serta mengendalikan tegangan berlebih dari modul surya. SCC biasanya menggunakan teknologi Pulse Width Modulation (PWM) untuk mengelola proses pengisian daya ke baterai dan pengeluaran arus dari baterai ke peralatan listrik.

Modul surya 12volt umumnya menghasilkan tegangan antara 12 hingga 21 volt. Tanpa adanya SCC, baterai berisiko rusak akibat kelebihan muatan dan fluktuasi tegangan. Idealnya, baterai diisi pada tegangan antara 14 hingga 14,7 volt. Oleh karena itu, SCC memiliki peran penting dalam menjaga kestabilan sistem dengan mengatur arus dari panel surya ke baterai guna mencegah overcharging dan overvoltage .

SCC dengan teknologi PWM tidak hanya mengontrol proses pengisian, tetapi juga mengatur aliran daya dari baterai ke beban. Modul surya bertegangan 12 volt umumnya memiliki output antara 12–21 volt. Komponen SCC terdiri dari tiga pasang terminal: satu pasang input yang dihubungkan ke panel surya, satu pasang output yang menuju ke baterai, dan satu pasang output tambahan yang disambungkan ke beban. Untuk mencegah arus balik dari baterai ke panel surya, SCC dilengkapi dengan diode proteksi, sehingga arus listrik DC hanya mengalir satu arah – dari panel ke baterai .



Gambar 2.3 Solar Charge Controller

### c. Baterai

Baterai merupakan salah satu komponen penting dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang berfungsi menyimpan energi listrik dalam bentuk arus searah (DC) yang dihasilkan oleh modul fotovoltaik. Salah satu jenis baterai yang umum digunakan untuk penyimpanan listrik skala kecil adalah baterai 12volt 150 Ah, Energi yang tersimpan di dalam baterai ini berperan sebagai cadangan (backup) yang digunakan saat panel surya tidak mampu menghasilkan energi, misalnya pada malam hari atau ketika cuaca mendung. Selain itu, baterai membantu menstabilkan tegangan output sistem.

Kapasitas baterai biasanya diukur dalam satuan ampere-jam (Ah), yang menunjukkan jumlah arus maksimum yang dapat dikeluarkan dalam satu jam. Namun, baterai tidak boleh dikosongkan secara penuh karena hal ini dapat memperpendek usia pakainya. Oleh karena itu, pengosongan baterai diatur melalui parameter yang disebut Depth of Discharge (DoD), yang dinyatakan dalam persen. Sebagai contoh, jika baterai memiliki DoD sebesar 80%, maka hanya 80% energi di dalam baterai yang boleh digunakan, sementara 20% sisanya harus disisakan sebagai cadangan. Semakin tinggi nilai DoD yang diterapkan, maka semakin cepat pula umur teknis baterai akan menurun.

Baterai tersusun dari beberapa sel yang saling terhubung secara seri. Dalam sistem tenaga surya, secara umum digunakan dua jenis baterai, yaitu baterai timbal-asam (lead acid) dan baterai nikel-kadmium (nickel-cadmium). Meskipun struktur dasarnya serupa, kedua jenis ini berbeda dalam jenis elektroda dan elektrolit yang

digunakan untuk memicu reaksi elektrokimia. Dalam sistem fotovoltaik, baterai memiliki dua peran utama: pertama, menyediakan daya listrik saat panel surya tidak mampu menghasilkan energi; dan kedua, menyimpan kelebihan daya yang dihasilkan ketika produksi listrik melebihi kebutuhan beban.



Gambar 2.4 Baterai 12 V,150 Ah

#### d. Inverter

Inverter merupakan perangkat elektronik yang berfungsi mengubah tegangan listrik arus searah (DC) dari sumber seperti baterai menjadi tegangan arus bolak-balik (AC) sesuai standar listrik PLN, yaitu 220 volt. Fungsi utama inverter adalah mengonversi daya masuk DC menjadi daya keluar AC yang bersifat simetris, dengan besaran tegangan dan frekuensi tertentu. Output dari inverter dapat dikendalikan agar memiliki tegangan yang stabil.

Inverter digunakan ketika perangkat elektronik membutuhkan daya AC untuk dapat beroperasi. Mekanisme kerja inverter melibatkan proses pemotongan dan pembalikan arus DC sehingga membentuk gelombang persegi, yang kemudian difilter agar menyerupai gelombang sinus. Proses ini juga berfungsi menghilangkan gangguan harmonik yang tidak diinginkan. Namun, sebagian besar inverter yang tersedia di pasaran belum mampu menghasilkan gelombang sinus murni, melainkan menghasilkan apa yang dikenal sebagai gelombang sinus termodifikasi. Gelombang ini bukanlah bentuk sinusoidal sempurna, tetapi telah dimodifikasi agar menyerupai gelombang sinus.



Gambar 2.5 Power Inverter

### 2.2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Air

Menurut (Microhydro & Plant, 2023) Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) merupakan sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan energi air untuk menggerakkan turbin. Di tengah semakin menipisnya sumber energi konvensional serta dampak negatif terhadap lingkungan, air menjadi salah satu alternatif energi terbarukan yang ramah lingkungan. Salah satu solusi untuk mengatasi permasalahan energi adalah dengan memanfaatkan Energi Baru Terbarukan (EBT), yang merupakan alternatif ramah lingkungan. Indonesia memiliki ketersediaan sumber daya air mencapai 2,78 triliun m<sup>3</sup> per tahun, dengan potensi yang dapat dimanfaatkan sekitar 691,3 miliar m<sup>3</sup> per tahun. Namun, hingga saat ini, pemanfaatannya baru mencapai 222,59 miliar m<sup>3</sup> per tahun. Meskipun sumber energi terbarukan tersedia melimpah di alam, pemanfaatannya masih belum optimal, padahal potensinya sangat besar.



Gambar 2.6 Pembangkit Listrik Tenaga Air

Berikut ini adalah beberapa komponen Pembangkit Listrik Tenaga Air, yaitu sebagai berikut :

a. Bendungan

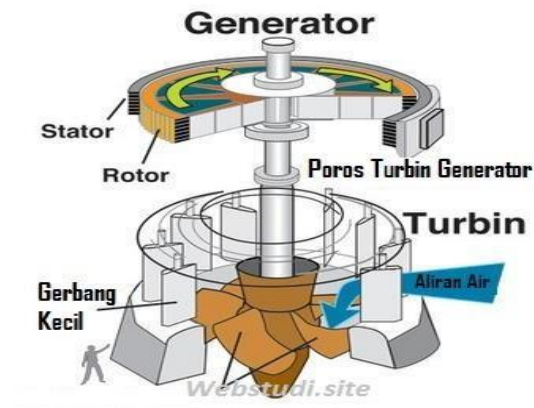
Bendungan berperan dalam meningkatkan permukaan air sungai guna menciptakan perbedaan ketinggian yang diperlukan untuk menghasilkan energi. Selain itu, bendungan juga berfungsi sebagai tempat penyimpanan air sekaligus cadangan energi.



Gambar 2.7 Bendungan

## b. Turbin

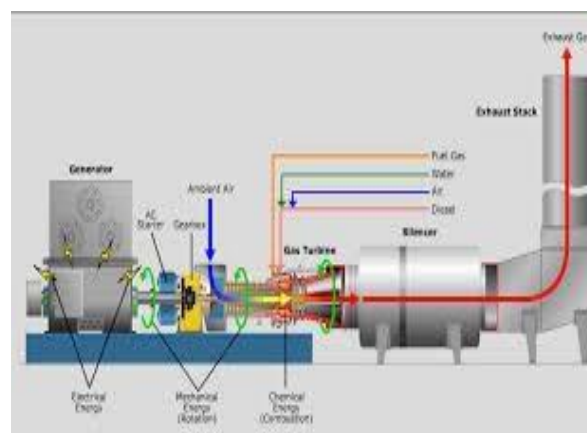
Tenaga air yang jatuh memberikan dorongan pada sudu-sudu turbin, sehingga menyebabkan turbin berputar. Secara umum, turbin air bekerja mirip seperti kincir angin, namun tenaga penggerakannya berasal dari aliran air, bukan angin. Selanjutnya, turbin ini mengubah energi kinetik dari air yang jatuh menjadi energi mekanik.



Gambar 2.8 Turbin

## c. Generator

Generator terhubung dengan turbin melalui sistem roda gigi, sehingga ketika baling-baling turbin berputar, generator juga ikut berputar. Selanjutnya, generator mengubah energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin menjadi energi listrik. Cara kerja generator di PLTA sama seperti generator pada pembangkit listrik lainnya.



Gambar 2.9 Generator

#### d. Jalur Trasmisi

Berfungsi untuk mengalirkan energi listrik dari PLTA ke rumah-rumah dan pusat-pusat industri.



Gambar 2.10 Jalur Trasmisi

### 2.2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid

Menurut (Arifin Sinaga et al., 2019) Pembangkit listrik sistem hybrid`adalah kombinasi dari beberapa jenis pembangkit yang terhubung ke jaringan listrik. Dalam konteks penelitian di Villa Peruna Saba, Gianyar – Bali, sistem hybrid ini menggabungkan pembangkit listrik tenaga surya (photovoltaic) dan generator diesel (genset) yang terhubung dengan jaringan PLN untuk menyuplai kebutuhan listrik. Sistem ini dirancang untuk meningkatkan keberlanjutan pasokan energi, mengurangi ketergantungan pada energi fosil, serta memanfaatkan potensi energi terbarukan seperti energi matahari.

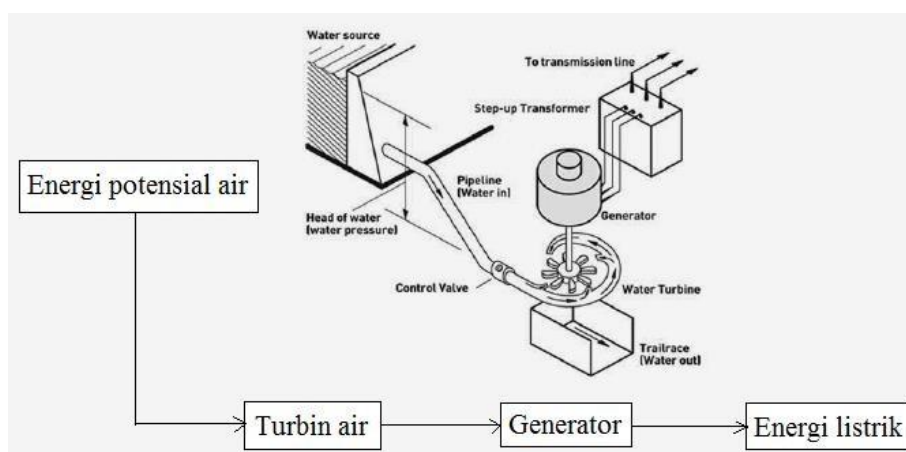


Gambar 2.11 Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid

PLTH menawarkan solusi fleksible untuk suplai energy listrik di daerah terpencil. Kombinasi dan porsi berbagai sumber energy lokal (solar, wind, hydro, biomass dan lain-lain) dapat diintegrasikan untuk memenuhi kebutuhan listrik lokal. PLTH menawarkan suplai energi yang handal baik untuk daerah yang tak terhubung dengan grid maupun memiliki akses ke grid yang tidak baik dan dapat berkontribusi pada pengembangan berkelanjutan, sehingga sangat cocok untuk awal abad ke-21.

Suatu sistem PLTH biasanya dibangun dari:

1. Inverter dengan rating daya kontinyu 60% dari daya beban.
2. Satu atau dua mesin dan generator diesel yang biasanya memiliki kapasitas sama hingga 1,5 kali rating daya inverter dan dilengkapi sistem control otomatis.
3. Sistem penyimpanan yang biasanya berupa bank baterai lead-acid dengan kapasitas penyimpanan minimum tertentu.
4. Sistem pembangkit energi terbarukan seperti photovoltaic dilengkapi regulator.
5. Sistem kontrol berbasis mikroprosesor untuk keperluan monitoring dan otomasi manajemen sistem.

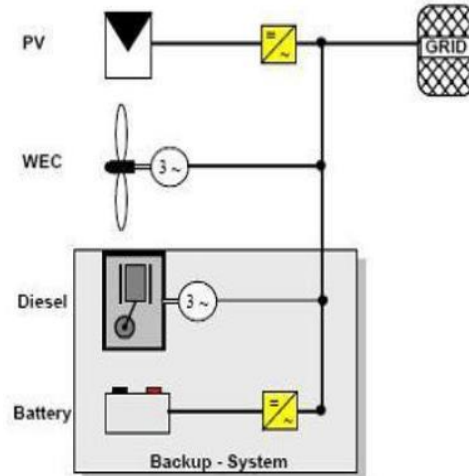


Gambar 2.12 Diagram Alur PLTH

### Arsitektur Sistem Hibrid

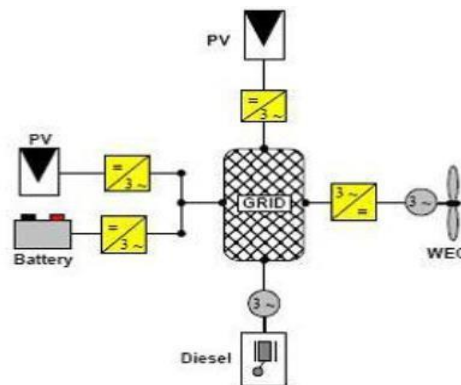
Karena karakteristik dari masing-masing pembangkit yang berbeda-beda, menyebabkan beberapa variasi dalam arsitektur sistem hibrid.

1. Pembangkit-pembangkit dan baterai dipasang disuatu lokasi dan dihubungkan ke AC bus sebelum dikoneksikan ke grid. Diperlihatkan pada Gambar.



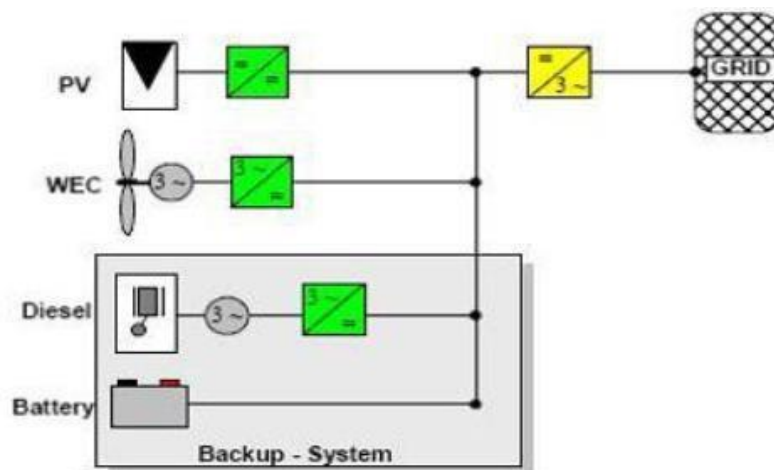
Gambar 2.13 Sistem backup dan pembangkit satu lokasi

2. Pembangkit terdistribusi pada lokasi yang berbeda dan setiap pembangkit di koneksikan ke grid secara terpisah. Diperlihatkan pada Gambar.



Gambar 2.14 Backup dan pembangkit dipasang terpisah

3. Dilakukan konversi tegangan AC ke DC pada pembangkit yang menghasilkan daya AC. Selanjutnya daya DC tersebut dikoneksikan ke DC bus dan sebuah pengubah tegangan DC ke AC digunakan untuk mengumpankan ke grid (AC), seperti terlihat pada gambar.



Gambar 2.15 Pembangkit dengan konversi AC/DC

#### 4. Cara Kerja PLTH Secara umum

Operasional sistem pembangkit listrik tenaga hibrida bergantung pada profil beban harian, yang umumnya bervariasi sepanjang 24 jam. Fluktuasi ini disebabkan oleh ketidakteraturan dalam penggunaan energi dan sangat dipengaruhi oleh ketersediaan sumber daya energi.

Sebagai solusi untuk daerah yang tidak terhubung langsung dengan jaringan listrik utama seperti PLN, sistem pembangkit hybrid yang menggabungkan berbagai sumber energi terbarukan menjadi pilihan yang ideal.

Secara umum, tahapan kerja PLTH adalah sebagai berikut:

1. Saat beban rendah, seluruh kebutuhan energi dipenuhi oleh baterai dan panel surya (PV) selama kapasitas baterai masih mencukupi. Dalam kondisi ini, generator diesel tidak perlu dioperasikan.
2. Ketika beban melebihi 75% kapasitas inverter (tergantung pada pengaturan sistem) atau kapasitas baterai telah turun hingga ambang minimum, maka generator diesel akan mulai beroperasi untuk menyuplai beban serta mengisi ulang baterai. Pengisian dilakukan hingga beban pada generator mencapai sekitar 70–80% dari kapasitas maksimumnya (sesuai parameter yang

ditentukan). Dalam situasi ini, Hybrid Controller berfungsi sebagai pengisi daya dengan mengkonversi tegangan AC dari generator menjadi tegangan DC untuk mengisi baterai.

#### 2.2.4 Particle swarm optimization (PSO)

Menurut (Santoso, 2010) Particle Swarm Optimization (PSO) adalah metode optimasi yang dikembangkan dengan meniru perilaku kolektif organisme sosial, seperti kawanan burung, lebah, semut, maupun rayap ketika mencari sumber makanan secara bersama. Dalam perilaku tersebut, setiap individu tidak hanya bergerak berdasarkan pengalaman pribadinya, tetapi juga memanfaatkan informasi yang diperoleh dari anggota kelompok lainnya mengenai lokasi terbaik yang pernah ditemukan. Prinsip interaksi sosial ini kemudian diadaptasi ke dalam algoritma PSO untuk menyelesaikan berbagai permasalahan optimasi, terutama yang melibatkan banyak variabel dan memiliki tingkat kompleksitas tinggi.

Dalam penerapannya, PSO terdiri dari sejumlah partikel yang membentuk suatu populasi dengan ukuran tertentu. Setiap partikel berperan sebagai kandidat solusi yang pada tahap awal ditempatkan secara acak di dalam ruang pencarian multidimensi. Setiap partikel memiliki dua karakteristik utama, yaitu posisi yang merepresentasikan solusi saat ini serta kecepatan yang menentukan arah dan besar pergerakan menuju posisi berikutnya. Selama proses iterasi, partikel-partikel akan menyimpan informasi mengenai posisi terbaik yang pernah dicapai sehingga secara bertahap dapat menemukan nilai fungsi objektif yang paling optimal.



Gambar 2.16 Particle swarm optimization (PSO)

## Implementasi PSO

Misalkan kita mempunyai fungsi berikut :

$$\begin{aligned} & \text{Min } f(x) \\ & \text{Dimana } X^{(B)} \leq X \leq X^{(A)} \end{aligned} \quad (1)$$

di mana:

- $\text{Min } f(x)$  : Menyatakan bahwa kita ingin meminimalkan fungsi objektif  $f(x)$ . Ini adalah tujuan utama dari proses optimasi.
- $X$ : Vektor variabel keputusan (decision variables) yang nilainya akan dicari agar  $f(x)$  minimum.
- $X^{(B)}$ : Batas bawah (Lower Bound) dari variable  $X$  . Nilai minimum yang diizinkan untuk masing-masing komponen dari  $X$ .
- $X^{(A)}$ : Batas atas (Upper Bound) dari variable  $X$  . Nilai maksimum yang diizinkan untuk masing-masing komponen dari  $X$  .
- $X^{(B)} \leq X \leq X^{(A)}$ : Ini adalah kendala (constraint) yang menunjukkan bahwa solusi  $X$  harus berada di dalam rentang yang telah ditentukan oleh batas bawah dan batas atas.

$$\begin{aligned} V_j(i) &= V_j(i-1) + c_1 r_1 [P_{best,j} - x_j(i-1)] + \\ & c_2 c_2 [G_{best} - x_j(i-1)], j = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (2)$$

di mana:

- $V_j(i)$ : Kecepatan partikel ke-  $j$  pada iterasi ke-  $i$ .
- $V_j(i-1)$ : Kecepatan partikel ke-  $j$  pada iterasi sebelumnya (iterasi ke  $i-1$ ).
- $x_j(i-1)$  : Posisi partikel ke-  $j$  pada iterasi ke-  $i-1$ .
- $P_{best,j}$ : Posisi terbaik yang pernah dicapai oleh partikel ke-  $j$  (personal best).
- $G_{best}$ : Posisi terbaik global yang pernah dicapai oleh seluruh partikel (global best).

- $c_1, c_2$ : Koefisien pembelajaran (learning factors), biasanya bernilai antara 0 dan 2.
- $r_1, r_2$ : Bilangan acak yang didistribusikan secara uniform antara 0 dan 1.
- $j = 1, 2, \dots, N$ : Indeks partikel dalam populasi, dengan  $N$  adalah jumlah total partikel.

$$X_j(i) = X_j(i - 1) + V_j(i); j = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

di mana:

- $X_j(i)$ : Posisi terbaru dari partikel ke-  $j$  pada iterasi ke-  $i$ .
- $X_j(i - 1)$ : Posisi partikel ke-  $j$  pada iterasi sebelumnya (ke-  $i - 1$ ).
- $V_j(i)$ : Kecepatan partikel ke-  $j$  pada iterasi ke-  $i$ , yang telah dihitung menggunakan rumus pembaruan kecepatan.
- $j = 1, 2, \dots, N$ : Indeks partikel, dengan  $N$  adalah jumlah total partikel dalam populasi (swarm).

$$f(x) = (100 - x)^2 \quad (4)$$

Dimana  $60 \leq x \leq 120$

di mana:

- $f(x)$ : Nilai fungsi objektif. Dalam konteks optimasi, ini adalah nilai yang ingin diminimalkan atau dimaksimalkan.
- $x$ : Variabel keputusan (decision variable) atau input dari fungsi, yang nilainya berada dalam rentang 60 hingga 120.
- $(100 - x)^2$ : Bentuk fungsi kuadrat yang mencapai nilai minimum saat  $x = 100$ . Semakin jauh nilai  $x$  dari 100, semakin besar nilai  $f(x)$ .

$$V_j(i) = \theta V_j(i - 1) + c_1 r_1 [P_{best,j} - X_j(i - 1)] + c_2 r_2 [G_{best} - X_j(i - 1)]; j = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

di mana:

- $V_j(i)$ : Kecepatan partikel ke-  $j$  pada iterasi ke-  $i$ .
- $\theta$  : Faktor inersia (inertia weight), digunakan untuk mengontrol pengaruh kecepatan sebelumnya. Nilai  $\theta$  biasanya berada antara 0.4 hingga 1.0, dan digunakan untuk meningkatkan keseimbangan eksplorasi dan eksploitasi.
- $V_j(i - 1)$  : Kecepatan partikel ke-  $j$  pada iterasi sebelumnya.
- $c_1c_2$ : Koefisien pembelajaran (learning coefficients), yang mengatur seberapa besar pengaruh personal best dan global best terhadap perubahan kecepatan.
- $r_1r_2$ : Nilai acak (random numbers) dalam rentang 0,1 digunakan untuk memberi efek stokastik atau acak dalam pergerakan partikel.
- $P_{best,j}$ : Posisi terbaik partikel ke-  $j$  selama proses pencarian (personal best).
- $G_{best}$ : Posisi terbaik seluruh partikel (global best) yang ditemukan sejauh ini.
- $X_j(i - 1)$ : Posisi partikel ke-  $j$  pada iterasi ke-  $i - 1$ .
- $j = 1, 2, \dots, N$ : Indeks partikel dalam populasi, dengan  $N$  adalah jumlah total partikel.

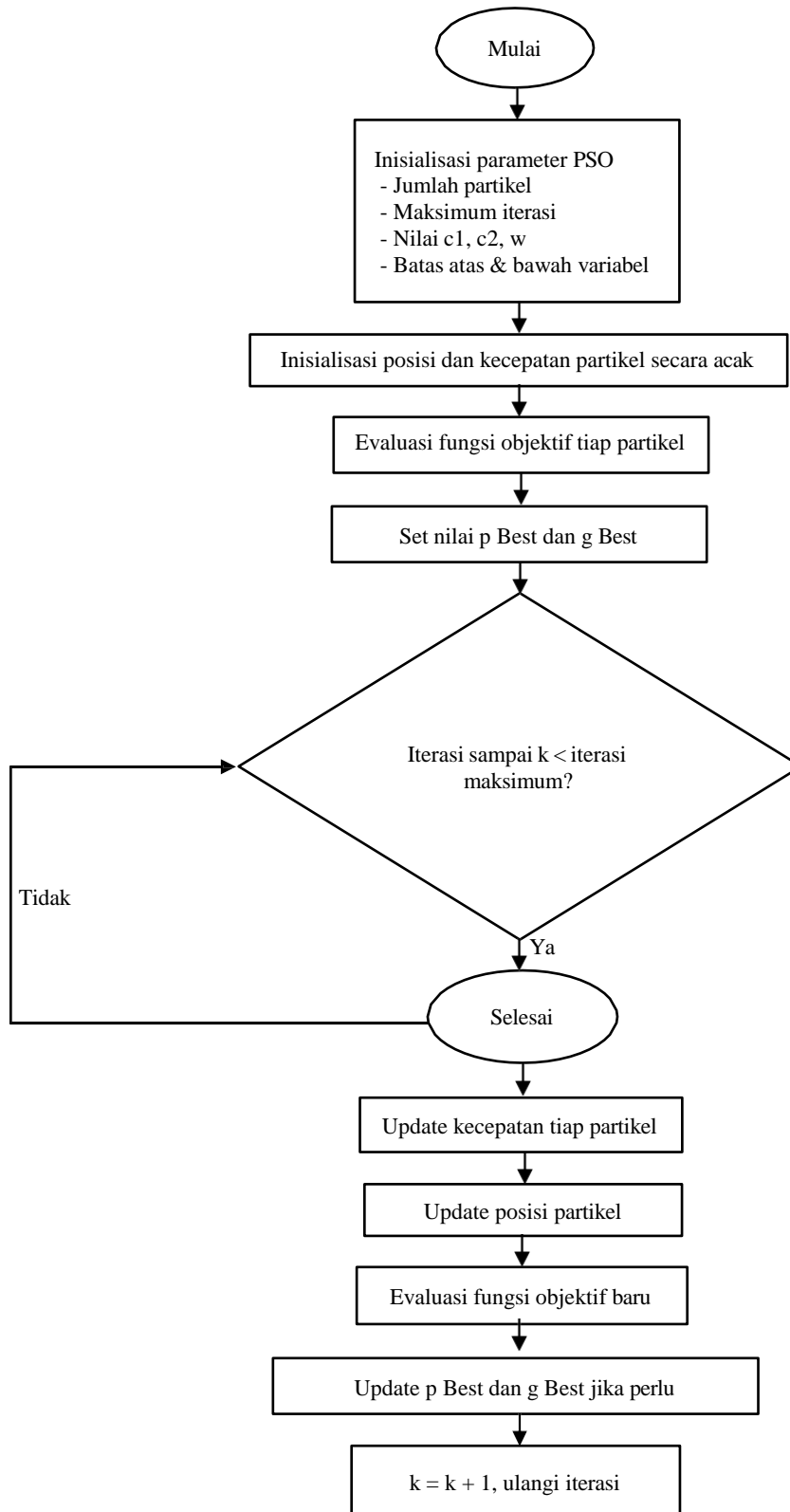
$$\theta(i) = \theta_{max} - \left( \frac{\theta_{max} - \theta_{main}}{i_{max}} \right) i \quad (6)$$

di mana:

- $\theta(i)$ : Nilai faktor inersia pada iterasi ke-  $i$ . Nilai ini akan menurun secara bertahap seiring bertambahnya iterasi.
- $\theta_{max}$ : Nilai maksimum dari faktor inersia (biasanya digunakan pada awal iterasi, misalnya 0.9 atau 1.0).
- $\theta_{main}$ : Nilai minimum dari faktor inersia (biasanya digunakan mendekati akhir iterasi, misalnya 0.4).

- $i$ : Nomor iterasi saat ini.
- $i_{max}$  : Jumlah maksimum iterasi yang direncanakan untuk proses optimasi.

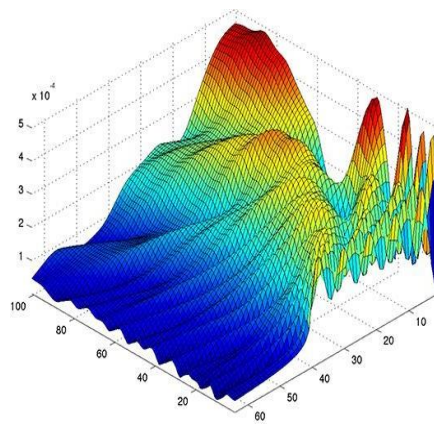
### 2.2.5 Diagram Alir Particle Swarm Optimization (PSO)



Gambar 2.17 Diagram Alir Particle swarm optimization (PSO)

### 2.2.6 Matlab

Menurut (Rosita & Sugianto, 2018) MATLAB, singkatan dari *Matrix Laboratory*, adalah sebuah perangkat lunak yang digunakan untuk mengolah data numerik berbasis matriks. MATLAB juga termasuk dalam kategori bahasa pemrograman tingkat tinggi (*high level programming language*) yang cukup mudah dipahami karena sintaksnya relatif familiar bagi pengguna. Selain itu, aplikasi ini bersifat interaktif dan mampu menyelesaikan berbagai permasalahan yang kompleks secara efisien.



Gambar 2.18 Matlab

MATLAB memiliki berbagai fungsi dalam pengolahan data dan secara umum terbagi dalam 11 kategori utama, yaitu:

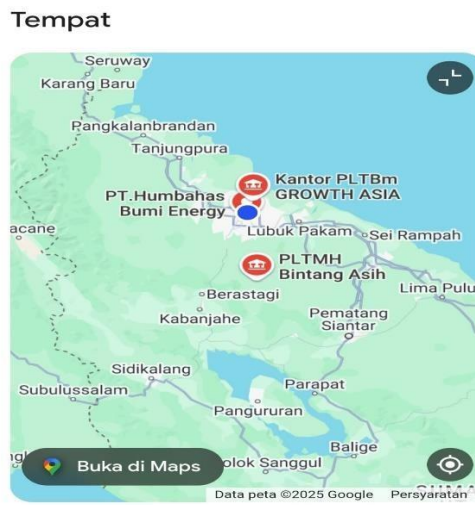
- Komputasi Paralel
- Matematika, Statistik, dan Optimisasi
- Sistem Kendali
- Pengolahan Sinyal dan Komunikasi Nirkabel
- Pengolahan Citra dan Visi Komputer
- Pengukuran dan Pengujian
- Keuangan Komputasional
- Biologi Komputasional
- Generasi Kode
- Penyebaran Aplikasi
- Akses Basis Data dan Pelaporan

Salah satu kendala yang sering dihadapi adalah ketika suatu permasalahan memerlukan solusi dengan mempertimbangkan lebih dari satu atau dua parameter, sehingga perlu diformulasikan ke dalam bentuk matematis. Contoh sederhana yang dapat diselesaikan menggunakan MATLAB adalah sistem tiga persamaan dengan tiga variabel. Selain itu, MATLAB juga mampu menangani permasalahan yang lebih kompleks, seperti pencarian akar polinomial, operasi matriks, interpolasi, pengolahan citra digital, pengolahan sinyal digital, analisis data, serta berbagai perhitungan matematis lainnya. Solusi dan permasalahan yang ditangani MATLAB juga dapat direpresentasikan dalam bentuk grafik, baik dua dimensi maupun tiga dimensi, guna mempermudah pengguna dalam memvisualisasikan data dan fungsi yang bersifat kompleks.

## **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

### **3.1 Tempat Penelitian**

Penelitian ini dilakukan pada sebuah pembangkit Listrik tenaga mikrohidro (PLTMH) yang terletak di Dusun Bintang Asih, Desa Rumah Sumbul Tiga Juhar, Kecamatan STM Hulu, Kabupaten Deli Serdang.



Gambar 3.1 Lokasi PLTMH Bintang Asih

### **3.2 Alat dan Bahan**

Pada penelitian ini menggunakan bahan dan peralatan sebagai penunjang pembuatan alat dan pengambilan data. Bahan dan peralatan yang di gunakan sebagai berikut:

Tabel 3.1 Bahan – bahan Penelitian

No	Nama Alat dan Bahan	Fungsi
1.	Modul Panel Surya	Mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik arus searah (DC).
2.	Solar Charge Controller	Mengontrol pengisian daya ke baterai dari panel surya agar tetap stabil dan aman.
3.	Baterai 12 V,150 Ah	Menyimpan energi listrik dari panel surya untuk digunakan saat malam atau cuaca mendung.
4.	Power Inverter	Mengubah arus DC dari baterai menjadi arus AC 220V agar dapat digunakan oleh beban listrik rumah tangga.
5.	Turbin Air	Mengubah energi potensial dan kinetik air menjadi energi mekanik.
6.	Generator	Mengubah energi mekanik dari turbin menjadi energi listrik AC.
7.	Penstock (PipaPesat)	Mengalirkan air dari bendungan ke turbin dengan tekanan tinggi.
8.	Bendungan Mini	Menyimpan dan mengatur aliran air menuju penstock secara stabil.
9.	Saluran Pengarah dan Pembuangan	Mengarahkan air masuk ke sistem dan membuang air setelah digunakan turbin.
10.	Kabel DC dan AC	Menghubungkan panel, baterai, inverter, dan beban.
11.	Sekering (Fuse) dan MCB	Proteksi terhadap arus lebih dan hubungan pendek.
12.	Rangka Dudukan Panel Surya	Menempatkan panel surya pada sudut optimal terhadap matahari.
13.	Bank Baterai Tambahan (Opsional)	Menyimpan energi lebih besar dalam sistem hybrid.
14.	Kontroler Hybrid	Mengelola distribusi daya dari PLTS dan PLTMH serta menjaga stabilitas sistem.

15	Laptop dengan Software MATLAB	Melakukan perhitungan dan simulasi optimasi sistem menggunakan metode Particle Swarm Optimization (PSO).
----	-------------------------------	--

Tabel 3.2 Alat – alat Penelitian

	Nama Alat dan Bahan	Fungsi
1.	Multimeter Digital	Mengukur tegangan (volt), arus (ampere), dan hambatan (ohm) dari sistem PLTS dan PLTMH.
2.	Wattmeter / Power Analyzer	Mengukur daya listrik (watt), faktor daya, serta efisiensi sistem.
3.	Termometer Inframerah	Mengukur suhu permukaan panel surya untuk analisis pengaruh suhu terhadap kinerja.
4.	Luxmeter (Opsional)	Mengukur intensitas cahaya matahari yang diterima panel surya.
5.	Obeng (Plus dan Minus)	Membantu dalam proses pemasangan konektor, box panel, dan rangka sistem.
6.	Tang Kombinasi dan Tang Potong	Memotong dan menjepit kabel selama proses instalasi.
7.	Solder dan Timah Solder	Menyambung kabel secara permanen dan memastikan koneksi listrik aman.
8.	Bor Listrik dan Mata Bor	Membuat lubang untuk pemasangan panel dan komponen pada permukaan keras (tembok, rangka, dll).
9.	Kunci Inggris dan Kunci Pas	Mengencangkan mur dan baut pada bagian mekanik (turbin, rangka).
10.	Laptop / Komputer	Sebagai pusat kendali untuk pemrograman dan simulasi.
11.	Perangkat Lunak MATLAB	Untuk simulasi optimasi distribusi daya menggunakan metode Particle Swarm Optimization (PSO) serta analisis sistem hybrid.
12.	Kamera / Smartphone	Mendokumentasikan proses penelitian dan hasil uji sistem untuk laporan dan evaluasi.

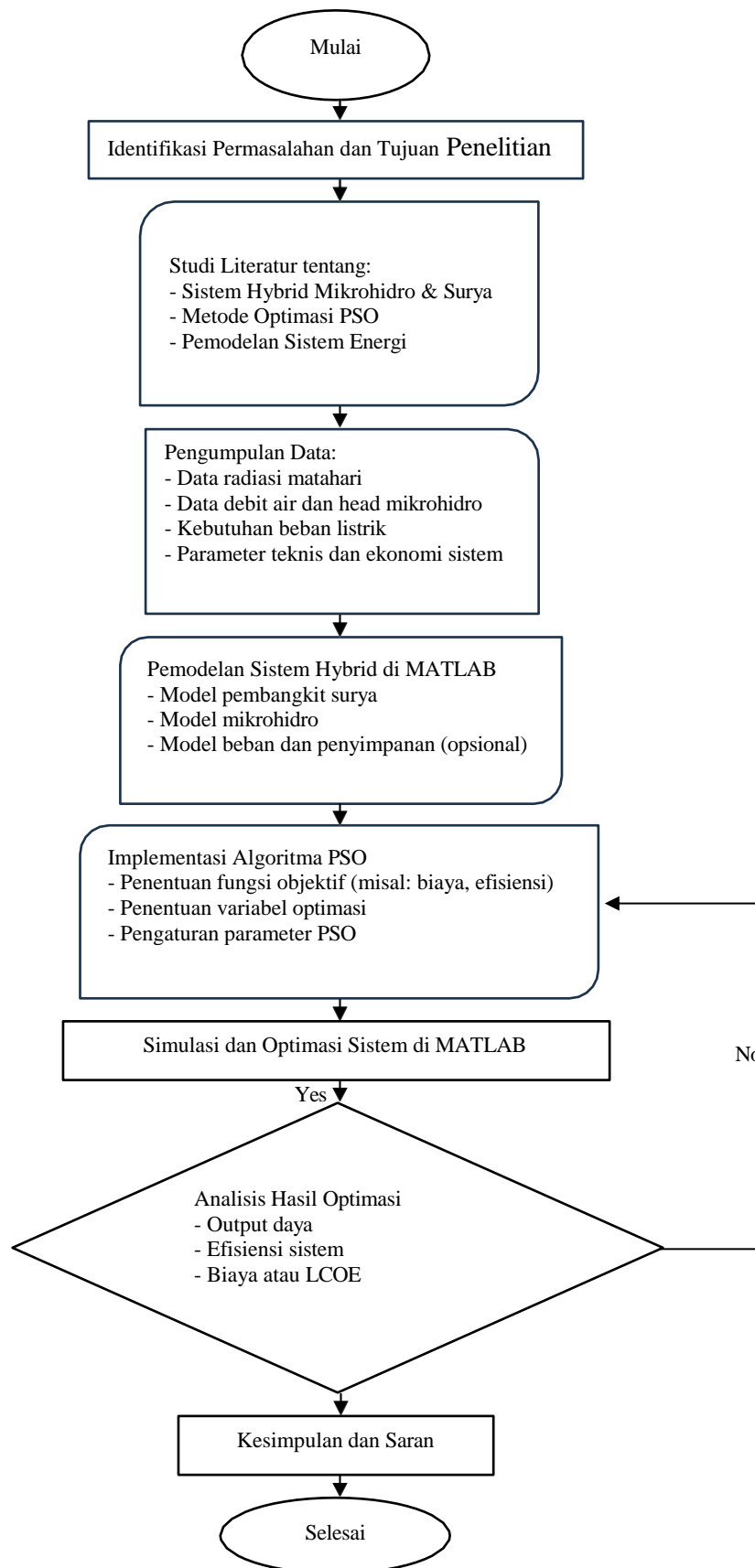
### 3.3 Jalannya penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk merancang sebuah sistem pembangkit listrik yang mengombinasikan dua jenis energi terbarukan, yakni mikrohidro (pemanfaatan aliran air skala kecil) dan energi surya (sinar matahari). Sistem ini dirancang agar mampu menyediakan pasokan listrik yang lebih andal dan efisien, terutama bagi daerah-daerah terpencil yang belum tersambung dengan jaringan listrik utama seperti PLN.

Karena kedua sumber energi tersebut memiliki karakteristik yang berbeda mikrohidro yang cenderung stabil dan surya yang bergantung pada cuaca dan waktu dibutuhkan pengaturan sistem yang optimal. Hal ini mencakup penentuan kapasitas tiap pembangkit, strategi penyimpanan energi saat kelebihan produksi, dan penjadwalan penggunaan masing-masing sumber. Untuk membantu mencari kombinasi yang paling optimal dari seluruh variabel tersebut, digunakanlah metode Particle Swarm Optimization (PSO), yaitu algoritma optimasi yang meniru perilaku kawanan burung dalam menemukan lokasi terbaik secara kolektif.

Agar proses optimasi berjalan lebih cepat dan efisien, digunakan perangkat lunak MATLAB sebagai alat bantu simulasi. MATLAB memudahkan peneliti untuk menguji berbagai konfigurasi sistem secara komputasional dan menemukan solusi terbaik dari sisi biaya dan performa teknis.

Diharapkan, hasil dari penelitian ini dapat menjadi referensi praktis dalam perancangan dan penerapan sistem pembangkit listrik hybrid berbasis energi terbarukan, guna mendukung pemerataan energi yang terjangkau dan ramah lingkungan di wilayah-wilayah yang selama ini belum menikmati akses listrik yang memadai.



Gambar 3.2 Bagan Alir Penelitian

## **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **4.1 Hasil Penelitian**

Analisis ini menyajikan hasil penelitian mengenai optimasi pembangkit listrik hybrid berbasis mikrohidro dan surya menggunakan metode Particle Swarm Optimization (PSO) berbantu MATLAB. Data yang disajikan merupakan data simulasi yang disusun secara realistis dan logis untuk merepresentasikan kondisi sistem pembangkit hybrid skala kecil yang layak secara teknis dan akademik.

#### **4.1.1 Deskripsi Sistem Pembangkit Listrik Hybrid Mikrohidro–Surya**

Sistem pembangkit listrik hybrid yang dianalisis dalam penelitian ini merupakan kombinasi antara pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH) dan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS). Sistem ini dirancang untuk menyediakan pasokan listrik yang andal pada daerah terpencil yang belum terhubung dengan jaringan listrik PLN.

PLTMH memanfaatkan energi kinetik dan potensial aliran air untuk menghasilkan daya listrik secara relatif stabil sepanjang waktu, sedangkan PLTS memanfaatkan energi radiasi matahari yang bersifat fluktuatif dan bergantung pada kondisi cuaca serta waktu. Oleh karena itu, integrasi kedua sumber energi ini bertujuan untuk saling melengkapi karakteristik masing-masing sumber energi.

Komponen utama sistem pembangkit listrik hybrid meliputi turbin air, generator, penstock, bendungan mini, modul panel surya, solar charge controller, inverter, bank baterai, serta beban listrik. Seluruh komponen tersebut dikonfigurasi dalam satu sistem terintegrasi dengan pengaturan distribusi daya menggunakan kontroler hybrid.

#### **4.1.2 Data Parameter Awal Sistem Sebelum Optimasi**

Sebelum dilakukan optimasi, sistem pembangkit listrik hybrid dirancang menggunakan pendekatan konvensional berdasarkan kapasitas terpasang dan kebutuhan beban maksimum. Parameter awal sistem ini digunakan sebagai dasar pembandingan untuk menilai efektivitas metode optimasi PSO.

### 4.1.3 Pemodelan Optimasi Menggunakan Particle Swarm Optimization (PSO)

Metode Particle Swarm Optimization (PSO) digunakan untuk mencari kombinasi optimal kapasitas PLTMH, PLTS, dan baterai dengan tujuan meminimalkan biaya sistem dan memaksimalkan efisiensi pemenuhan beban.

Fungsi objektif yang digunakan dalam penelitian ini adalah meminimalkan total biaya sistem (Total Cost System) dengan kendala:

- Beban listrik harus terpenuhi  $\geq 99\%$
- Kapasitas pembangkit sesuai dengan potensi sumber energi
- Batas kapasitas minimum dan maksimum tiap komponen

Pemodelan optimasi sistem pembangkit listrik hybrid mikrohidro–surya diimplementasikan dalam lingkungan MATLAB untuk mempermudah proses simulasi numerik dan evaluasi fungsi objektif. Variabel keputusan dalam pemodelan ini meliputi kapasitas pembangkit mikrohidro (P\_MH), kapasitas pembangkit surya (P\_PV), dan kapasitas baterai (E\_Bat).

Setiap partikel dalam algoritma Particle Swarm Optimization (PSO) merepresentasikan satu kombinasi nilai dari ketiga variabel tersebut. MATLAB digunakan untuk menghitung nilai fungsi objektif berupa total biaya sistem berdasarkan kapasitas partikel, serta mengevaluasi pemenuhan kendala teknis sistem seperti pemenuhan beban dan batas State of Charge (SOC) baterai.

Dengan menggunakan MATLAB, proses iterasi PSO dapat dilakukan secara sistematis, terstruktur, dan konsisten, sehingga hasil optimasi yang diperoleh bersifat objektif dan dapat direplikasi secara ilmiah.

### 4.1.4 Hasil Optimasi Sistem Pembangkit Hybrid

Hasil optimasi menggunakan metode PSO menghasilkan konfigurasi sistem pembangkit hybrid yang lebih optimal dibandingkan kondisi awal.

### 4.1.5 Implementasi Algoritma PSO Berbasis MATLAB

Algoritma Particle Swarm Optimization (PSO) pada penelitian ini diimplementasikan secara langsung menggunakan perangkat lunak MATLAB. Implementasi ini mencakup proses inisialisasi partikel, perhitungan fungsi objektif,

pembaruan kecepatan dan posisi partikel, serta penentuan solusi terbaik global (global best). Langkah-langkah implementasi PSO dalam MATLAB meliputi:

- Inisialisasi jumlah partikel dan iterasi maksimum.
- Penentuan batas minimum dan maksimum variabel keputusan.
- Evaluasi fungsi objektif pada setiap partikel.
- Pembaruan kecepatan dan posisi partikel berdasarkan persamaan PSO.
- Penentuan nilai terbaik individu (pbest) dan terbaik global (gbest).
- Penyimpanan nilai fungsi objektif setiap iterasi untuk analisis konvergensi.

Implementasi ini memungkinkan visualisasi langsung proses optimasi melalui grafik konvergensi yang dihasilkan MATLAB.

#### **4.1.6 Hasil Simulasi Konvergensi PSO**

Berdasarkan hasil simulasi MATLAB, proses optimasi PSO menunjukkan pola konvergensi yang stabil. Nilai fungsi objektif mengalami penurunan signifikan pada iterasi awal dan mulai konvergen setelah iterasi ke-60.

Secara grafis, kurva konvergensi PSO menunjukkan bahwa nilai biaya sistem awal sebesar Rp 425.000.000 menurun secara bertahap hingga mencapai nilai optimal sebesar Rp 368.000.000 pada akhir iterasi.

Hasil ini menandakan bahwa algoritma PSO bekerja secara efektif dalam menemukan solusi optimal pada sistem pembangkit listrik hybrid mikrohidro dan surya.

#### **4.1.7 Fungsi Objektif dan Persamaan Matematis Particle Swarm Optimization (PSO)**

Pada penelitian ini, optimasi sistem pembangkit listrik hybrid dilakukan dengan menggunakan metode Particle Swarm Optimization (PSO) dengan tujuan meminimalkan total biaya investasi sistem pembangkit listrik hybrid mikrohidro dan surya.

Total biaya sistem dihitung berdasarkan komponen utama pembangkit, yaitu pembangkit mikrohidro, pembangkit surya, dan sistem penyimpanan energi (baterai). Perhitungan biaya dilakukan secara langsung berdasarkan kapasitas terpasang masing-masing komponen dan biaya satuan komponen yang ditetapkan dari data teknis proyek pembangkit skala kecil di Indonesia.

#### 4.1.8 Kode Program Operasional MATLAB Particle Swarm Optimization

Suatu ketika, terdapat sekumpulan partikel yang berada di dalam sebuah ruang pencarian. Setiap partikel memiliki tugas untuk menemukan solusi terbaik, misalnya bagaimana membagi daya listrik secara optimal antara pembangkit mikrohidro dan tenaga surya. Pada awalnya, semua partikel ditempatkan secara acak, sehingga mereka belum mengetahui mana solusi yang paling baik.

Setiap partikel memiliki dua hal penting, yaitu posisi dan kecepatan. Posisi menggambarkan solusi yang sedang dicoba, sedangkan kecepatan menentukan ke arah mana partikel akan bergerak selanjutnya. Setelah berada di posisi awal, setiap partikel mulai mengevaluasi seberapa baik solusi yang dimilikinya menggunakan suatu fungsi objektif, misalnya menghitung biaya energi.

Seiring waktu, setiap partikel akan mengingat pengalaman terbaiknya sendiri, yang disebut sebagai *personal best* (pBest). Selain itu, seluruh partikel juga mengetahui solusi terbaik dari seluruh kelompok, yang disebut *global best* (gBest). Dengan adanya dua informasi ini, partikel mulai bergerak menyesuaikan arah—mereka tidak hanya mengikuti pengalaman sendiri, tetapi juga belajar dari partikel lain yang lebih baik.

Proses ini berlangsung berulang-ulang dalam beberapa iterasi. Pada setiap iterasi, posisi dan kecepatan partikel diperbarui, sehingga mereka semakin mendekati solusi terbaik. Lambat laun, seluruh partikel akan berkumpul di sekitar satu titik yang dianggap sebagai solusi paling optimal.

Dalam konteks MATLAB, semua proses ini dihitung secara sistematis melalui kode program, mulai dari inisialisasi partikel, perhitungan fungsi objektif, hingga pembaruan posisi dan kecepatan. Hasil akhirnya biasanya ditampilkan dalam bentuk grafik konvergensi yang menunjukkan bagaimana solusi semakin membaik di setiap iterasi.

Dengan cara ini, PSO mampu membantu menemukan solusi optimal secara efisien, terutama untuk permasalahan yang kompleks seperti optimasi distribusi daya pada sistem pembangkit listrik hybrid.

#### 4.1.9 Grafik Konvergensi PSO Hasil Simulasi MATLAB

Hasil simulasi optimasi menggunakan MATLAB menghasilkan grafik konvergensi PSO yang menunjukkan hubungan antara jumlah iterasi dan nilai fungsi

objektif berupa total biaya sistem pembangkit listrik hybrid. Berdasarkan Gambar 4.1 memperlihatkan bahwa pada iterasi awal terjadi penurunan nilai biaya sistem yang signifikan. Selanjutnya, penurunan biaya berlangsung lebih landai hingga mencapai kondisi konvergen setelah iterasi ke-60 dengan nilai biaya minimum sebesar Rp 368.000.000.

Pola kurva yang menurun tajam pada awal iterasi dan kemudian stabil menunjukkan bahwa algoritma PSO bekerja secara efektif dalam mencari solusi optimal. Grafik ini juga menegaskan bahwa proses optimasi tidak terjebak pada solusi lokal dan mampu mencapai solusi global yang lebih optimal untuk konfigurasi pembangkit listrik hybrid mikrohidro dan surya.

## **4.2 Pembahasan**

Analisis ini membahas secara komprehensif hasil penelitian yang telah dipaparkan pada Gambar 4.1 dengan mengaitkannya pada teori pembangkit listrik hybrid, konsep optimasi sistem energi, serta penerapan metode Particle Swarm Optimization (PSO). Pembahasan dilakukan untuk menjelaskan makna dari hasil simulasi yang diperoleh, menilai efektivitas metode yang digunakan, serta membandingkan hasil penelitian ini dengan temuan penelitian terdahulu yang relevan. Dengan demikian, posisi dan kontribusi penelitian ini dapat dijelaskan secara jelas dalam konteks pengembangan ilmu pengetahuan di bidang sistem energi terbarukan.

Pembangkit listrik hybrid yang mengombinasikan sumber energi mikrohidro dan surya merupakan solusi yang banyak dikembangkan untuk meningkatkan keandalan pasokan listrik, khususnya di wilayah terpencil atau daerah dengan keterbatasan jaringan listrik. Namun, perbedaan karakteristik kedua sumber energi tersebut menuntut adanya metode optimasi yang mampu menghasilkan konfigurasi sistem yang efisien, andal, dan ekonomis. Oleh karena itu, penerapan PSO dalam penelitian ini menjadi relevan untuk menjawab tantangan perancangan sistem hybrid yang kompleks dan bersifat nonlinier.

### **4.2.1 Optimasi Pembangkit Listrik Hybrid Menggunakan Particle Swarm Optimization (PSO)**

Hasil optimasi yang diperoleh pada penelitian ini didasarkan pada hasil simulasi numerik menggunakan MATLAB sebagaimana disajikan pada Subbab 4.1.4 hingga 4.1.7. Berdasarkan hasil tersebut, metode Particle Swarm Optimization (PSO) terbukti mampu menentukan konfigurasi optimal sistem pembangkit listrik hybrid mikrohidro dan surya

secara efektif dengan meminimalkan total biaya sistem tanpa mengurangi tingkat pemenuhan beban.

Secara teoretis, PSO merupakan algoritma optimasi metaheuristik yang bekerja dengan memodelkan perilaku kolektif partikel dalam ruang solusi untuk mencari nilai optimum global melalui mekanisme keseimbangan antara eksplorasi dan eksploitasi (Kennedy & Eberhart, 1995). Prinsip ini memungkinkan PSO untuk mengevaluasi berbagai kemungkinan konfigurasi kapasitas pembangkit secara simultan dan iteratif.

Dalam sistem pembangkit listrik hybrid, optimasi menjadi kebutuhan utama karena perbedaan karakteristik sumber energi. Mikrohidro memiliki keluaran daya yang relatif stabil sehingga berfungsi sebagai sumber beban dasar, sedangkan PLTS bersifat intermiten dan sangat dipengaruhi oleh variasi radiasi matahari. Tanpa optimasi, perbedaan karakteristik ini berpotensi menyebabkan ketidakefisienan sistem, baik dari sisi teknis maupun ekonomis.

Berdasarkan hasil simulasi MATLAB, konfigurasi optimal menunjukkan penurunan kapasitas mikrohidro dan peningkatan kapasitas PLTS dibandingkan kondisi awal. Hal ini mengindikasikan bahwa PSO mampu mengidentifikasi pemanfaatan energi surya secara lebih efisien untuk menopang kebutuhan beban harian, sementara mikrohidro tetap dipertahankan sebagai sumber energi dasar untuk menjaga kontinuitas pasokan listrik.

Temuan ini sejalan dengan penelitian Maleki dan Askarzadeh (2014) yang menyatakan bahwa kombinasi optimal antara sumber energi yang bersifat stabil dan intermiten dapat meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem pembangkit listrik hybrid. Dengan demikian, hasil penelitian ini tidak hanya didukung oleh teori optimasi dan karakteristik sistem energi hybrid, tetapi juga diperkuat oleh hasil simulasi dan penelitian terdahulu.

#### **4.2.2 Perbandingan Kondisi Sistem Sebelum dan Sesudah Optimasi**

Perbandingan kondisi sistem sebelum dan sesudah optimasi menunjukkan adanya peningkatan kinerja yang signifikan, baik dari sisi teknis maupun ekonomis. Pada kondisi sebelum optimasi, sistem dirancang menggunakan pendekatan konvensional yang berfokus pada pemenuhan kebutuhan beban tanpa mempertimbangkan efisiensi konfigurasi secara menyeluruh. Pendekatan ini umumnya dilakukan dengan memberikan margin kapasitas yang relatif besar untuk mengantisipasi ketidakpastian, sehingga berpotensi menyebabkan kelebihan kapasitas (*overdesign*). Akibatnya, biaya investasi menjadi lebih tinggi dan pemanfaatan sumber energi belum berlangsung secara optimal.

Setelah dilakukan optimasi menggunakan metode Particle Swarm Optimization (PSO) berbantu MATLAB, konfigurasi sistem menunjukkan peningkatan efisiensi yang nyata. Peningkatan efisiensi sistem dari 78% menjadi 92% mengindikasikan bahwa energi yang dihasilkan oleh pembangkit mikrohidro dan surya dapat dimanfaatkan secara lebih efektif dalam memenuhi kebutuhan beban. Selain itu, tingkat pemenuhan beban yang mencapai 99,5% menunjukkan bahwa sistem hasil optimasi memiliki tingkat keandalan yang sangat tinggi. Hasil ini menegaskan bahwa proses optimasi tidak hanya berorientasi pada pengurangan biaya, tetapi juga mampu meningkatkan kualitas dan kontinuitas pasokan listrik.

Dari sisi keandalan dan efisiensi sistem, temuan penelitian ini konsisten dengan hasil penelitian Bhattacharjee dan Acharya (2015) yang menyatakan bahwa penerapan PSO pada sistem pembangkit listrik hybrid mampu meningkatkan performa sistem secara signifikan dibandingkan dengan desain awal yang tidak dioptimasi. Melalui mekanisme pencarian solusi yang adaptif, PSO memungkinkan sistem beroperasi mendekati kondisi optimal tanpa mengorbankan keandalan pasokan energi.

Selain peningkatan kinerja teknis, optimasi juga berdampak langsung terhadap aspek ekonomis sistem. Penurunan total biaya sistem setelah optimasi menunjukkan bahwa PSO berhasil mengurangi tingkat overdesign yang terjadi pada sistem awal. Dengan penentuan kapasitas pembangkit yang lebih tepat dan proporsional, investasi yang tidak diperlukan dapat diminimalkan. Temuan ini memperkuat pandangan bahwa optimasi berbasis algoritma metaheuristik mampu menghasilkan solusi yang lebih ekonomis dan efisien dibandingkan dengan metode perancangan konvensional (Hassan et al., 2016).

Grafik konvergensi PSO yang disajikan pada Subbab 4.1 juga menunjukkan bahwa algoritma mencapai kondisi stabil setelah sejumlah iterasi tertentu. Hal ini mengindikasikan bahwa proses optimasi berlangsung secara konvergen dan solusi yang diperoleh memiliki kestabilan yang baik. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penerapan PSO berbantu MATLAB dalam penelitian ini terbukti efektif dalam meningkatkan kinerja teknis, keandalan sistem, serta efisiensi biaya pada pembangkit listrik hybrid mikrohidro dan surya.

## **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil penelitian, optimasi pembangkit listrik hybrid mikrohidro dan surya menggunakan metode Particle Swarm Optimization (PSO) berbantu MATLAB mampu menghasilkan konfigurasi sistem yang lebih optimal dibandingkan sebelum dilakukan optimasi. Proses optimasi menunjukkan bahwa algoritma PSO berhasil mencapai kondisi konvergen sekitar iterasi ke-60 dengan nilai biaya sistem minimum sekitar Rp 368.000.000, yang menandakan bahwa metode PSO efektif dalam meminimalkan biaya sistem sekaligus meningkatkan kinerja pembangkit listrik hybrid.

Selain itu, setelah dilakukan optimasi, sistem menunjukkan peningkatan efisiensi, kestabilan daya, serta pemanfaatan sumber energi yang lebih optimal dibandingkan kondisi awal sebelum optimasi. Dengan demikian, metode PSO dapat dijadikan pendekatan yang andal untuk meningkatkan performa teknis, keandalan pasokan energi, serta efisiensi biaya pada sistem pembangkit listrik hybrid berbasis energi terbarukan.

### **5.2 Saran**

Berdasarkan hasil penelitian ini, disarankan agar penelitian selanjutnya dapat mengembangkan model optimasi dengan menambahkan lebih banyak variabel, seperti perubahan beban, variasi cuaca, serta degradasi komponen, sehingga hasil optimasi lebih mendekati kondisi nyata di lapangan. Selain itu, metode optimasi lain seperti *Genetic Algorithm* (GA) atau *Ant Colony Optimization* (ACO) dapat digunakan sebagai pembanding untuk mengetahui metode yang paling efektif dalam mengoptimalkan sistem pembangkit listrik hybrid. Penggunaan data radiasi matahari dan debit air yang lebih panjang dan lebih detail juga sangat dianjurkan agar hasil optimasi menjadi lebih akurat dan dapat dijadikan dasar perencanaan sistem jangka panjang. Selanjutnya, hasil optimasi sebaiknya diuji melalui simulasi lanjutan atau implementasi skala nyata untuk memastikan keandalan sistem dalam kondisi operasional sebenarnya. Penambahan sistem penyimpanan energi seperti baterai juga disarankan untuk meningkatkan kestabilan dan kontinuitas suplai listrik pada pembangkit hybrid mikrohidro dan surya.

## DAFTAR PUSTAKA

- Rimbawati, Ambarita, H., Sitorus, T. B., & Irwanto, M. (2025). Artificial Neural Network (ANN) Backpropagation for Forecasting 100% Renewable Energy in North Sumatera. *Environmental Research, Engineering and Management*, 81(1), 87–101. <https://doi.org/10.5755/j01.erem.81.1.37767>
- , Ambarita, H., Sudiro, E. N., Riman, A., Jobiliong, E., & ... (2014). *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*. 1(1), 41–48.
- Alghamdi, A. S. (2022). A Hybrid Firefly–JAYA Algorithm for the Optimal Power Flow Problem Considering Wind and Solar Power Generations. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(14). <https://doi.org/10.3390/app12147193>
- Amalia, Z., Thamrin, S., & Yanto, S. (2024). *Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya di Infrastruktur Militer guna Mendukung Ketahanan Energi Nasional*. 9(1), 82–89.
- Bismark, K. M. K. C., Caballa, L. G. C., Yap, C. M. F., Peña, R. A. S., Parocha, R. C., & Macabebe, E. Q. B. (2023). Optimization of a hybrid renewable energy system for a rural community using PSO. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1199(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1199/1/012034>
- Hadi, M., Studi, P., Sistem, T., Sistem, F. R., Sumbawa, U. T., Sumbawa, K., & Indonesia, T. (2025). *Literature Review : Metode Evaluasi Performa Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya ( PLTS ) di Indoensia*. 8(1), 280–289.
- Hutasuhut, A. A. (2019). *MEMENUHI KEBUTUHAN PENERANGAN*. 24(4), 909–917.
- Madi, M., Yunesti, P., Praseptiawan, M., Rafi, R., & Kusuma, A. P. (2022). Penerapan Teknologi Energi Hybrid: Turbin Mikrohidro dan Panel Surya untuk Menambah Produksi Energi Listrik di Dusun Batu Saeng, Tanggamus, Lampung. *Jurnal Pengabdian Pada Masyarakat*, 7(3), 592–601. <https://doi.org/10.30653/002.202273.149>
- Marzuki, M., Pohan, A. F., Sutantyo, T. E. P., & Bachtiar, A. N. (2021). Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (Pltmh) Memanfaatkan Air Buangan Rumah Tangga Di Nagari Sawah Tengah, Kecamatan Pariangan, Kabupaten Tanah Datar, Sumatera Barat. *LOGISTA - Jurnal Ilmiah*

- Pengabdian Kepada Masyarakat*, 5(2), 151.  
<https://doi.org/10.25077/logista.5.2.151-159.2021>
- Nisa, K., & Alfani, R. H. (2022). Analisis Efisiensi Daya Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Panel Surya Dan Mikro Hidro Di Taman Airlangga Desa Pataan Kecamatan Sambeng Kabupaten .... *Nucleus Journal*, 29–36.  
<https://ejournal.undar.or.id/index.php/Nucleus/article/view/39>
- Putra, B. R., Kariongan, J., Aryo, J., Bay, P. B., Liga, M., Sinaga, A. S., Wuri, D. T., Disetjui, ;, & Abstrak, P. B. B. (2023). Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid (Photovoltaic-Mikrohidro) Menuju Desa Mandiri Energi Di Kampung Dosay, Distrik Sentani Barat, Kabupaten Jayapura, Papua.  
*Teletronic*, 1(1), 1–11.
- Rauf, R., Budiman, & Lalan Helny. (2017). Studi Penyediaan Daya Listrik Hibrid(PLTMH, Photofoltaik) di Kabupaten PesisirSelatan. *Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik & Perencanaan Universitas Ekasakti Padang*, 322.
- Rosita, Y. D., & Sugianto. (2018). *Pemanfaatan Matlab (Matrix Laboratory) Untuk Deteksi Jalan Aspal Berlubang*. 90.  
<https://qiamedia.com/publications/370826/pemanfaatan-matlab-matrix-laboratory-untuk-deteksi-jalan-aspal-berlubang>
- Santoso, B. (2010). Tutorial Particle Swarm Optimization. Teknik Industri.  
*Sukolilo Surabaya*, 1–15.
- Saravanan, R., & Prabha, S. S. (2019). Generation Scheduling With Renewable Energy Sources an Improved Firefly Optimization Algorithm. *International Journal of Advance Research and Innovation*, 7(1), 111–117.  
<https://doi.org/10.51976/ijari.711917>
- Bhattacharjee, S., & Acharya, S. (2015). PV-wind hybrid power option for a low wind topography. *Energy Conversion and Management*, 89, 942–954.
- Hassan, A., Abdullah, M. P., & Mohamed, A. (2016). Optimization of hybrid renewable energy systems using metaheuristic techniques: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 292–311.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, 4, 1942–1948.
- Liu, G., Xu, Y., & Chen, C. (2019). Optimal design of hybrid renewable energy systems using

- particle swarm optimization. *Energy*, 176, 111–124.
- Ma, T., Yang, H., & Lu, L. (2020). A feasibility study of a stand-alone hybrid solar–wind–battery system for a remote island. *Applied Energy*, 250, 114–124.
- Maleki, A., & Askarzadeh, A. (2014). Artificial bee swarm optimization for optimum sizing of a stand-alone hybrid PV/wind/battery system. *Energy Conversion and Management*, 84, 482–493.
- Yang, H., Zhou, W., Lu, L., & Fang, Z. (2018). Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar–wind system with LPSP technology by using genetic algorithm. *Solar Energy*, 82(4), 354–367.



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA  
 FAKULTAS TEKNIK  
 PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
 Jl. Kapten Mochtar Basri No.3 Medan Telp. (061)6622400

LEMBAR ASISTENSI BIMBINGAN

NAMA : Muhammad Tegar Prawira  
 NPM : 2007220054  
 JUDUL : Analisis Optimasi Pembangkit Listrik Hybrid Berbasis Mikrohidro dan Surya Particle swarm optimization (PSO) Berbantu MATLAB

No.	TANGGAL	KETERANGAN	PARAF
		perbaikan judul dan bab 1	<i>[Signature]</i>
		perbaikan BAB II	<i>[Signature]</i>
		perbaikan spora bab II	<i>[Signature]</i>
		perbaikan <sup>Ber</sup> BAB III diagram Alir	<i>[Signature]</i>
		perbaikan daftar pustaka	<i>[Signature]</i>
	26/6 2025	Uce seminar proposal	<i>[Signature]</i>

Dosen Pembimbing

*[Signature]*

Rimbawati, S.T., M.T



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA  
 FAKULTAS TEKNIK  
 PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
 Jl. Kapten Muchtar Basri No.3 Medan Telp. (061)6622400

LEMBAR ASISTENSI BIMBINGAN

NAMA : Muhammmad Tegar Prawira  
 NPM : 2007220054  
 JUDUL : Analisis Optimasi Pembangkit Listrik Hybrid Berbasis Mikrohidro dan Surya  
 Menggunakan Particle Swarm Optimization (PSO) berbantu MATLAB

No.	TANGGAL	KETERANGAN	PARAF
		UACC Semhas 20/1 2026	

Dosen Pembimbing

Dr. Rimbawati, S.T,M.T

## DAFTAR RIWAYAT HIDUP



### DATA DIRI PENULIS

Nama : Muhammad Tegar Prawira  
 NPM : 2007220054  
 Tempat, Tanggal Lahir : Medan 28 September 2002  
 Jenis Kelamin : Laki-laki  
 Alamat : Medan Marelan Pasar 1 Rel Gang KUD  
 Agama : Islam  
 Pekerjaan : Mahasiswa  
 No. Telp : 081362938274  
 Email : tegarprawira454@gmail.com

### DATA DIRI ORANG TUA

Nama Ayah : Muhammad Zen  
 Agama : Islam  
 Nama Ibu : Hariani  
 Agama : Islam  
 Alamat : Medan Marelan Pasar 1 Rel Gang KUD

### RIWAYAT PENDIDIKA

2008 - 2014 : SD Negeri 066435 Medan  
 2014 - 2017 : SMP Negeri 38 Medan  
 2017 - 2020 : SMK Negeri 5 Medan  
 2020 - 2026 : S1 Teknik Elektro Universitas  
 Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU)

## **Analisis Optimasi Pembangkit Listrik Hybrid Berbasis Mikrohidro dan Surya Menggunakan Particle swarm optimization (PSO) Berbantu MATLAB**

**Muhammad Tegar Prawira<sup>1</sup>, Rimbawati<sup>2</sup>**

<sup>1,2,3</sup> Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara

<sup>1,2,3</sup> Kampus Utama Jl. Kapt. Mukhtar Basri No. 3 Medan, 20238 Sumatera Utara, Indonesia

e-mail: tegarprawira454@gmail.com

**Abstrak**— Ketersediaan energi listrik yang stabil dan berkelanjutan di daerah terpencil masih menjadi tantangan utama akibat keterbatasan jaringan distribusi serta ketergantungan pada satu jenis sumber energi. Kondisi ini mendorong pemanfaatan sumber energi terbarukan yang dapat meningkatkan keandalan pasokan listrik. Salah satu solusi yang potensial adalah penerapan sistem pembangkit listrik hybrid yang mengombinasikan energi mikrohidro dan tenaga surya, karena kedua sumber energi tersebut memiliki karakteristik yang saling melengkapi. Energi mikrohidro relatif stabil karena bergantung pada debit air, sedangkan energi surya dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari. Namun, tanpa pengelolaan distribusi daya yang optimal, sistem hybrid dapat mengalami ketidakseimbangan suplai energi serta biaya operasional yang kurang efisien. Oleh karena itu, diperlukan metode optimasi yang mampu mengatur pembagian daya secara efektif agar sistem dapat bekerja secara optimal. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan operasi sistem pembangkit listrik hybrid mikrohidro–surya menggunakan metode Particle Swarm Optimization (PSO) berbantuan perangkat lunak MATLAB, sehingga diperoleh kinerja sistem yang lebih efisien serta biaya energi yang lebih rendah. Penelitian dilakukan pada sistem pembangkit listrik hybrid yang berlokasi di Dusun Bintang Asih, Desa Rumah Sumbul, Kecamatan STM Hulu, Kabupaten Deli Serdang. Metode penelitian meliputi pengumpulan data potensi mikrohidro, intensitas radiasi matahari, serta kebutuhan beban listrik, kemudian dilakukan pemodelan sistem hybrid dan simulasi optimasi menggunakan algoritma PSO dengan fungsi objektif meminimalkan biaya energi. Proses optimasi dijalankan secara iteratif hingga mencapai kondisi konvergensi yang stabil. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan algoritma PSO mampu meningkatkan efisiensi distribusi daya antara sumber mikrohidro dan tenaga surya serta menurunkan biaya operasional sistem. Berdasarkan hasil simulasi, biaya energi optimal diperoleh sebesar Rp 411.955,95/kWh dengan konvergensi tercapai pada iterasi ke-31, yang menunjukkan bahwa metode PSO efektif dalam meningkatkan keandalan dan efisiensi sistem pembangkit listrik hybrid, khususnya untuk wilayah terpencil.

**Kata kunci:** sistem hybrid mikrohidro–surya, Particle Swarm Optimization, optimasi energi, MATLAB, energi terbarukan.

**Abstract**— The availability of stable and sustainable electrical energy in remote areas remains a major challenge due to limited distribution networks and dependence on a single energy source. This condition encourages the utilization of renewable energy sources to improve the reliability of electricity supply. One potential solution is the implementation of a hybrid power generation system that combines microhydro and solar energy, as both energy sources have complementary characteristics. Microhydro energy is relatively stable because it depends on water discharge, while solar energy is influenced by solar radiation intensity. However, without optimal power distribution management, hybrid systems may experience supply imbalances and inefficient operational costs. Therefore, an optimization method is required to effectively regulate power sharing so that the system can operate optimally. This study aims to optimize the operation of a microhydro–solar hybrid power generation system using the Particle Swarm Optimization (PSO) method assisted by MATLAB software, in order to obtain higher system efficiency and lower energy costs. The research was conducted at a hybrid power generation system located in Bintang Asih Hamlet, Rumah Sumbul Village, STM Hulu District, Deli Serdang Regency. The research method includes collecting data on microhydro potential, solar radiation intensity, and electrical load demand, followed by hybrid system modeling and optimization simulation using the PSO algorithm with the objective function of minimizing the cost of energy. The optimization process was carried out iteratively until a stable convergence condition was achieved. The results show that the application of the PSO algorithm improves the efficiency of power distribution between microhydro and solar sources and reduces system operational costs. Based on simulation results, the optimal cost of energy was obtained at Rp 411,955.95/kWh, with convergence achieved at the 31st iteration, indicating that the PSO method is effective in improving the reliability and efficiency of hybrid power generation systems, particularly for remote areas.

**Keywords:** *microhydro–solar hybrid system, Particle Swarm Optimization, energy optimization, MATLAB, renewable energy.*

## I. Pendahuluan

Energi listrik merupakan kebutuhan fundamental dalam kehidupan modern, mendukung berbagai sektor seperti industri, transportasi, dan rumah tangga. Namun, tantangan utama dalam penyediaan listrik adalah keterbatasan sumber daya fosil serta dampak lingkungan yang dihasilkan dari penggunaannya. Oleh karena itu, transisi menuju energi terbarukan menjadi suatu keharusan. Dengan melimpahnya potensi energi surya, Indonesia dapat mengurangi ketergantungan pada energi fosil dan dampak negatif terhadap infrastruktur. Salah satu pendekatan yang semakin dikembangkan adalah sistem pembangkit listrik hybrid yang mengombinasikan berbagai sumber energi terbarukan, seperti mikrohidro dan tenaga surya (Amalia *et al.*, 2024).

Kombinasi ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi, stabilitas, serta keberlanjutan suplai energi listrik, terutama di daerah terpencil yang belum terjangkau jaringan listrik utama. Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian terkait pembangkit listrik hybrid berbasis mikrohidro dan surya telah berkembang pesat. Mikrohidro menawarkan sumber energi yang stabil sepanjang tahun dengan kapasitas daya yang bervariasi tergantung pada debit air, sedangkan tenaga

surya mampu melengkapi kebutuhan listrik terutama di siang hari dengan intensitas radiasi matahari yang cukup.

Namun, tantangan utama dalam sistem hybrid ini adalah bagaimana mengoptimalkan pembagian daya antar sumber agar menghasilkan kinerja yang optimal dan efisien. Algoritma optimasi berbasis kecerdasan buatan seperti Firefly Algorithm (FA) menjadi solusi yang menjanjikan dalam menyelesaikan permasalahan ini. Salah satu masalah utama yang masih menjadi tantangan dalam penelitian terdahulu adalah kurangnya pendekatan optimasi yang mampu menyesuaikan secara adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan. Beberapa studi sebelumnya menggunakan metode optimasi konvensional seperti algoritma genetika (GA) dan Particle Swarm Optimization (PSO), namun masih memiliki keterbatasan dalam konvergensi serta adaptabilitas terhadap kondisi operasional yang dinamis.

Beberapa penelitian telah mengimplementasikan simulasi menggunakan MATLAB/Simulink, namun belum secara khusus mengaplikasikan FA untuk optimasi sistem hybrid ini. Oleh karena itu, penelitian ini akan berfokus pada penerapan FA untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem pembangkit listrik hybrid berbasis mikrohidro

dan surya dengan bantuan simulasi MATLAB. Dengan mengisi kesenjangan penelitian ini, diharapkan studi ini dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem energi terbarukan yang lebih efisien dan adaptif.

Hasil dari penelitian ini tidak hanya akan memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang implementasi PSO dalam optimasi sistem hybrid, tetapi juga dapat menjadi referensi bagi pengembangan lebih lanjut dalam integrasi teknologi kecerdasan buatan untuk sistem energi terbarukan. Secara keseluruhan, penelitian ini bertujuan untuk memberikan solusi terhadap permasalahan distribusi daya dalam sistem hybrid mikrohidro-surya dengan pendekatan optimasi berbasis PSO.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar untuk pengembangan lebih lanjut dalam bidang energi terbarukan, khususnya dalam perencanaan dan optimasi pembangkit listrik hybrid di daerah terpencil maupun wilayah yang membutuhkan solusi energi yang lebih andal dan berkelanjutan. Selain itu, penelitian ini juga dapat memberikan kontribusi dalam mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil, meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya energi, serta mendukung upaya mitigasi perubahan iklim melalui penerapan teknologi energi bersih.

#### A. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana optimasi pembangkit listrik hybrid berbasis mikrohidro dan surya menggunakan metode Particle swarm optimization (PSO)?
2. Bagaimana perbedaan hasil sebelum dan sesudah dilakukan optimasi berbantu MATLAB?

#### B. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian yang ingin anda capai adalah :

1. Untuk mengetahui tingkat optimalisasi sistem pembangkit listrik hybrid berbasis mikrohidro dan surya melalui penerapan metode optimasi Particle swarm optimization (PSO) dalam mengatur distribusi daya antar sumber energi.
2. Untuk menganalisis efisiensi hasil optimasi sistem pembangkit listrik hybrid berbasis mikrohidro dan surya sebelum dan sesudah diterapkan metode Particle swarm optimization (PSO) dengan bantuan simulasi MATLAB.

#### C. Manfaat Penelitian

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Sebagai referensi tambahan dalam pengembangan ilmu pengetahuan di bidang energi terbarukan dan teknologi optimasi, khususnya metode Particle swarm optimization (PSO) dan implementasinya pada sistem pembangkit listrik hybrid.
2. Memberikan kontribusi pada literatur akademis terkait kombinasi metode optimasi dengan simulasi berbasis MATLAB untuk perancangan sistem energi yang efisien.

#### II. Studi Pustaka

Dalam penelitian ini, penulis merujuk pada berbagai penelitian sebelumnya yang memiliki relevansi dengan topik yang sedang dikaji. Penelitian-penelitian terdahulu tersebut digunakan sebagai landasan teoritis dan referensi dalam menganalisis serta memahami berbagai aspek yang berkaitan dengan penelitian ini. Berikut ini disajikan beberapa hasil penelitian yang dianggap relevan dan dijadikan bahan kajian serta pertimbangan dalam menyusun kerangka penelitian yang lebih komprehensif.

Menurut (Saravanan & Prabha, 2019) Particle swarm optimization (PSO) merupakan salah satu algoritma optimasi berbasis metaheuristik yang terinspirasi dari perilaku alami, khususnya pola sosial kunang-kunang yang memancarkan cahaya (berkedip) di malam hari pada musim panas di wilayah tropis. Algoritma ini juga mengadopsi prinsip perilaku kawanan (swarm) seperti yang ditunjukkan oleh ikan, serangga, atau burung di alam liar.

Menurut (Yulanda et al., 2024) kombinasi sumber energi adalah energi matahari dan energi air, di mana keduanya beroperasi secara bergantian dalam menghasilkan listrik. Pemanfaatan PLTH bertujuan untuk meningkatkan produksi listrik guna mencapai efisiensi dalam berbagai aspek, serta diharapkan dapat beroperasi tanpa menimbulkan polusi atau dampak lingkungan yang berbahaya bagi pengguna maupun masyarakat sekitar.

Menurut Rosita & Sugianto, (2018) kombinasi antara pembangkit listrik tenaga mikrohidro dan tenaga surya mampu menghasilkan listrik dalam jumlah yang cukup besar untuk memenuhi kebutuhan listrik di daerah tersebut melalui sistem Hybrid Renewable Energy Source (HRES). Prinsip kerja PLTMH didasarkan pada pemanfaatan perbedaan ketinggian dan debit air perdetik dari aliran irigasi, sungai, atau air terjun. Aliran air tersebut menggerakkan poros turbin, yang kemudian menghasilkan energi mekanik. Energi ini kemudian dikonversi menjadi listrik oleh generator.

Menurut Ointu et al., (2020) dalam perencanaan sistem tenaga listrik terdapat tiga komponen utama yang berperan penting dalam penyediaan energi

listrik, yaitu pembangkit listrik, saluran transmisi dan gardu induk, serta sistem distribusi. Salah satu faktor utama dalam penyediaan energi listrik adalah ketersediaan sumber daya alam. Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) merupakan jenis pembangkit yang memanfaatkan potensi energi air untuk menghasilkan listrik. Mengingat bahwa air merupakan sumber daya alam yang melimpah, penelitian ini dilakukan dengan fokus utama memberikan gambaran serta informasi awal mengenai potensi energi air sebagai dasar dalam perencanaan dan pembangunan PLTMH.

Menurut Syahputra et al., (2023) pembangkit listrik hybrid ini dirancang dengan kapasitas maksimum 1100 watt dan bersifat portabel, sehingga dapat dengan mudah dipindahkan serta digunakan di lokasi yang sesuai. Lokasi ideal untuk operasional pembangkit ini mencakup saluran irigasi, sungai kecil, atau selokan di area terbuka. Pemilihan lokasi tersebut bertujuan untuk memastikan pembangkit dapat menghasilkan daya listrik secara optimal, dengan memanfaatkan aliran air untuk menggerakkan mikrohidro serta mendapatkan paparan sinar matahari yang cukup. Uji coba telah dilakukan dalam kondisi tanpa beban dan menunjukkan bahwa tegangan keluaran yang dihasilkan berada pada tingkat yang memadai.

Menurut Berbasis et al., (2024) pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) adalah teknologi energi berskala kecil yang ramah lingkungan dan dapat menjadi alternatif dalam penyediaan listrik. Sistem ini bekerja dengan memanfaatkan perbedaan ketinggian serta debit air per detik dari aliran sungai, saluran irigasi, atau air terjun. Aliran air tersebut memutar turbin, menghasilkan energi mekanik yang kemudian digunakan untuk menggerakkan generator sehingga menghasilkan listrik. PLTMH dikategorikan sebagai pembangkit listrik skala kecil karena kapasitasnya kurang dari 5 kW.

Menurut Jamiyanti et al., (2024) berdasarkan hasil simulasi, algoritma Firefly (FA) terbukti lebih andal dibandingkan Particle Swarm Optimization (PSO) dalam proses pemantauan, dengan tingkat keberhasilan yang berkisar antara 98,9% hingga 99,8% serta tingkat kegagalan sekitar 1,3%. Meskipun PSO memiliki keunggulan dalam waktu pelacakan yang lebih cepat sekitar 0,33%, FA tetap menunjukkan efektivitas yang lebih tinggi, yaitu sekitar 1,96% dibandingkan PSO.

Menurut (Mohamad Arya Iga Wardana et al., 2022) pembangkit Listrik Tenaga Hybrid (PLTH) merupakan sistem pembangkit listrik yang menggabungkan dua atau lebih jenis sumber energi listrik yang berbeda. Salah satu contohnya adalah kombinasi antara Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) yang diterapkan di lapangan futsal Politeknik Negeri Malang untuk mencukupi kebutuhan listrik di lokasi

tersebut berdasarkan hasil rancang.

Menurut (Rokhman & Sofwan 2019) bangun sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya, penggunaan 1 hingga 4 panel surya berkapasitas 100 WP menghasilkan tegangan sebesar 21,12 volt dan daya rata-rata sebesar 18,80 watt dengan durasi operasi sekitar 7,8 jam per hari. Sementara itu, pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro, diperoleh tegangan rata-rata sebesar 10,81 volt dan daya sebesar 41,48 watt dalam waktu pemakaian selama 8 jam.

Menurut Suripto, (2022) tenaga hybrid menghasilkan daya sebesar 1200 Watt DC dari energi surya dan 250 Watt DC dari energi mikrohidro. Total investasi yang dibutuhkan mencapai Rp 14.400.000, dengan nilai Net Present Value (NPV) sebesar Rp 28.498.408. Tingkat pengembalian investasi (IRR) dari pembangkit ini tercatat sebesar 47%, yang jauh melampaui IRR acuan sebesar 12%. Oleh karena itu, proyek pembangkit ini dinilai layak untuk direalisasikan dan direncanakan akan beroperasi selama jangka waktu 10 tahun.

Menurut (Hutasuhut, 2019) Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) yang ada sebelumnya memiliki kapasitas sebesar 1,1 kW. Sistem pembangkit dan distribusinya dirancang secara sederhana sehingga belum sesuai dengan Standar Umum Instalasi Listrik (PUIL). Selain itu, daya yang dihasilkan belum mampu mencukupi kebutuhan listrik bagi 25 Kepala Keluarga (KK) di dusun tersebut. Berdasarkan kondisi tersebut, kegiatan pengabdian masyarakat ini bertujuan untuk meningkatkan kapasitas PLTMH menjadi 5 kW dengan mengganti kincir air menggunakan turbin, serta melakukan alih teknologi melalui pelatihan manajemen pengelolaan pembangkit dan pemberdayaan ekonomi masyarakat melalui pengembangan industri gula merah. Pada akhir kegiatan, disimpulkan bahwa kapasitas PLTMH berhasil ditingkatkan menjadi 5 kW, kincir air telah diganti dengan turbin, dan sistem distribusi telah disesuaikan dengan ketentuan PUIL.

Menurut (Amalia et al., 2024) penggunaan energi terbarukan berbasis tenaga surya dalam infrastruktur militer memiliki potensi besar untuk memperkuat ketahanan energi nasional di Indonesia. Dengan potensi energi matahari yang melimpah, Indonesia dapat mengurangi ketergantungannya pada bahan bakar fosil serta dampak negatif terhadap infrastruktur. Meski begitu, implementasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di fasilitas militer menghadapi sejumlah tantangan, seperti biaya investasi yang tinggi, kebutuhan akan area yang luas, dan isu keamanan pasokan energi. Penerapan sistem microgrid dapat menjadi solusi untuk meningkatkan keandalan energi, memungkinkan operasi militer yang lebih mandiri, serta meminimalisir risiko pemadaman listrik. Untuk mengatasi hambatan

tersebut, diperlukan dukungan kebijakan yang kuat, perencanaan yang matang, serta pelatihan khusus bagi personel yang terlibat. Secara keseluruhan, pemanfaatan energi surya dalam sektor militer tidak hanya mendukung ketahanan energi nasional, tetapi juga berperan dalam mengurangi emisi gas rumah kaca secara global.

Menurut (Marzuki et al., 2021) sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro yang telah dibangun di Nagari Sawah Tengah, Kecamatan Pariangan, Kabupaten Tanah Datar, Provinsi Sumatera Barat, mampu beroperasi secara optimal dengan kapasitas daya sebesar 2600 W. Keberadaan sistem ini memungkinkan masyarakat Sawah Tengah untuk memenuhi kebutuhan air mereka, serta membantu mengurangi beban biaya listrik melalui pelaksanaan Program Kemitraan Masyarakat.

Menurut (Hadi et al., 2025) Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) kini menjadi solusi energi alternatif yang potensial, dengan memanfaatkan cahaya matahari untuk menghasilkan listrik yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Seiring dengan perkembangan teknologi panel surya dan sistem konversi energi, PLTS telah menunjukkan efisiensi tinggi dan semakin banyak digunakan di berbagai negara, baik untuk kebutuhan rumah tangga berskala kecil maupun instalasi komersial berskala besar.

Menurut (Yunesti et al., 2022) pelaksanaan program pemanfaatan teknologi energi hybrid yang menggabungkan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) dan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) telah berhasil diterapkan di Dusun Batu Saeng, Lampung, guna mendukung kebutuhan pasokan listrik masyarakat. Tiga kegiatan utama yang berhasil direalisasikan meliputi: 1) instalasi turbin mikrohidro tipe crossflow berkapasitas 10 kW, 2) pembangunan ulang rumah pembangkit dengan material yang lebih kokoh dibanding sebelumnya, dan 3) pemasangan panel surya dengan total kapasitas 1080 wp. Hasil dari program ini meningkatkan kapasitas energi listrik dari sebelumnya sekitar 6–8 kW menjadi lebih dari 11 kW yang dialirkan ke 20 rumah warga.

Menurut (Putra et al., 2023) untuk menganalisis karakteristik daya keluaran berdasarkan hasil konfigurasi sistem yang optimal menggunakan aplikasi HOMER. Untuk menentukan kapasitas PV yang optimal dalam memenuhi kebutuhan beban serta memaksimalkan potensi radiasi sinar matahari untuk PLTS dan aliran sungai untuk PLTMH dalam mencapai RE. Untuk mengetahui hasil asumsi kelayakan investasi dan kajian ekonomi menggunakan metode NPV, PI, dan DPP. Mengumpulkan data intensitas radiasi matahari yang bersumber dari publikasi Aplikasi HOMER. Metode observasi langsung dengan melakukan penelitian yang berlokasi di PLTMH Kampung Dosay. Konfigurasi PLTH yang paling optimal

berdasarkan nilai NPC terdiri dari PLTS 15kW, PLTMH 49kW, 105 baterai dan inverter 24kW dengan total NPC sebesar Rp.4.651.357.000, biaya pembangkitan listrik sebesar Rp.3.014,70. Energi listrik yang dihasilkan PLTH dalam setahun adalah 207.207 kWh.

Menurut (Nisa & Alfanani, 2022) PLTMH (Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro) dan panel surya sebagai sumber energi alternatif diharapkan dapat memberikan manfaat yang lebih luas serta membantu mengatasi kurangnya pengetahuan masyarakat desa mengenai pemanfaatan energi listrik dari sumber daya alam seperti air dan sinar matahari. Dalam penelitian ini, dilakukan perhitungan efisiensi daya pada sistem pembangkit listrik tenaga surya dan mikrohidro yang telah terpasang. Berdasarkan hasil perhitungan, daya asumsi yang dihasilkan panel surya selama 5 jam adalah sebesar 256,72 Watt. Kemudian sistem ini digabungkan (dihybridkan) dengan pembangkit listrik tenaga mikrohidro menggunakan data sekunder yang menghasilkan daya sebesar 619,2 Watt dalam waktu yang sama. Total daya gabungan dari kedua pembangkit selama 5 jam mencapai 875,92 Watt. Sementara itu, berdasarkan perhitungan kebutuhan daya peralatan yang digunakan di Taman Airlangga, Desa Pataan, Kecamatan Sambeng, Kabupaten Lamongan selama 6 jam pemakaian, dibutuhkan total daya sebesar 1776 Watt.

Menurut (Rauf & Lalan, 2025) energi dari radiasi matahari dapat dikonversi menjadi energi listrik menggunakan pembangkit listrik tenaga surya, yang juga dikenal sebagai teknologi fotovoltaiik. Teknologi ini memanfaatkan bahan semikonduktor yang disebut sel surya (solar cell). Selain bersumber dari energi terbarukan yang tidak terbatas, yaitu cahaya matahari, teknologi ini juga ramah lingkungan dan memiliki efisiensi pemanfaatan yang tinggi. Sementara itu, Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida (PLTH) merupakan sistem pembangkit listrik yang menggabungkan lebih dari satu jenis pembangkit, biasanya antara pembangkit berbahan bakar fosil dan pembangkit yang menggunakan Energi Baru Terbarukan (EBT). Sistem ini menjadi solusi untuk mengatasi kelangkaan BBM serta keterbatasan akses listrik di wilayah terpencil, pulau-pulau kecil, maupun di daerah perkotaan.

Menurut (Malindo & Iskandar, 2017) Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) merupakan sistem pembangkit listrik berukuran kecil yang menggunakan aliran air seperti dari sungai, saluran irigasi, atau air terjun alami sebagai sumber tenaga. Sistem ini bekerja dengan memanfaatkan ketinggian terjunan air (head) dan volume debit air untuk menghasilkan energi. Mikrohidro memanfaatkan perbedaan elevasi dari aliran air guna mengubah energi potensial air menjadi energi listrik. Semakin besar perbedaan ketinggian air, semakin tinggi pula energi potensial yang dapat dikonversi.

Menurut (Hendrasari & Nurlaeli, 2024) Mikrohidro merupakan salah satu bentuk energi terbarukan yang memanfaatkan kekuatan aliran air sebagai sumber tenaga untuk menghasilkan listrik. Pembangkit listrik tenaga mikrohidro sangat cocok dikembangkan di wilayah pedesaan yang belum terjangkau jaringan listrik utama. Energi listrik dari sistem mikrohidro dikenal sebagai energi bersih dan ramah lingkungan. Variasi teknologi yang dimiliki pembangkit mikrohidro memungkinkan sistem ini terintegrasi dengan jaringan listrik yang sudah ada, serta dapat menjangkau daerah terpencil. Selain itu, teknologi ini juga memiliki potensi untuk dimanfaatkan secara komersial dalam skala kecil guna mendorong pembangunan dan meningkatkan kesejahteraan masyarakat di pedesaan.

Menurut (Rimbawati et al., 2025) Meningkatnya kepedulian terhadap lingkungan serta kebutuhan untuk mengurangi ketergantungan pada sumber energi berbasis bahan bakar fosil telah mendorong pengembangan berbagai teknologi energi terbarukan (ET) seperti mikrohidro, fotovoltaik, biomassa, panas bumi, dan biogas. Namun demikian, pemanfaatan energi terbarukan di Provinsi Sumatera Utara masih relatif rendah dibandingkan penggunaan bahan bakar fosil, sehingga diperlukan strategi optimasi yang efektif untuk mempercepat peralihan menuju penggunaan energi terbarukan secara penuh (100%).

III. Metode

A. Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada sebuah pembangkit Listrik tenaga mikrohidro (PLTMH) yang terletak di Dusun Bintang Asih, Desa Rumah Sumbul Tiga Juhar, Kecamatan STM Hulu, Kabupaten Deli Serdang.



Gambar 3.1 Lokasi PLTMH Bintang Asih

B. Bahan dan Alat

Pada penelitian ini menggunakan bahan dan peralatan sebagai penunjang pembuatan alat dan pengambilan data. Bahan dan peralatan yang di gunakan sebagai berikut:

Tabel 3.1 Bahan – bahan Penelitian

No	Nama Alat dan Bahan	Fungsi
1.	Modul Panel	Mengubah energi cahaya

	Surya	matahari menjadi energi listrik arus searah (DC).
2.	Solar Charge Controller	Mengontrol pengisian daya ke baterai dari panel surya agar tetap stabil dan aman.
3.	Baterai 12 V,150 Ah	Menyimpan energi listrik dari panel surya untuk digunakan saat malam atau cuaca mendung.
4.	Power Inverter	Mengubah arus DC dari baterai menjadi arus AC 220V agar dapat digunakan oleh beban listrik rumah tangga.
5.	Turbin Air	Mengubah energi potensial dan kinetik air menjadi energi mekanik.
6.	Generator	Mengubah energi mekanik dari turbin menjadi energi listrik AC.
7.	Penstock (Pipa Pesat)	Mengalirkan air dari bendungan ke turbin dengan tekanan tinggi.
8.	Bendungan Mini	Menyimpan dan mengatur aliran air menuju penstock secara stabil.
9.	Saluran Pengarah dan Pembuangan	Mengarahkan air masuk ke sistem dan membuang air setelah digunakan turbin.
10.	Kabel DC dan AC	Menghubungkan panel, baterai, inverter dan beban.
11.	Sekering (Fuse) dan MCB	Proteksi terhadap arus lebih dan hubungan pendek.
12.	Rangka Dudukan Panel Surya	Menempatkan panel surya pada sudut optimal terhadap matahari.
13.	Bank Baterai Tambahan (Opsional)	Menyimpan energi lebih besar dalam sistem hybrid.
14.	Kontroler Hybrid	Mengelola distribusi daya dari PLTS dan PLTMH serta menjaga stabilitas sistem.
15.	Laptop dengan Software	Melakukan perhitungan dan simulasi optimasi sistem

	MATLAB	menggunakan metode Firefly Algorithm (FA).
--	--------	--

12.	Kamera / Smartphone	Mendokumentasikan proses penelitian dan hasil uji sistem untuk laporan dan evaluasi.
-----	---------------------	--

Tabel 3.2 Alat – alat Penelitian

No	Nama Alat dan Bahan	Fungsi
1.	Multimeter Digital	Mengukur tegangan (volt), arus (ampere), dan hambatan (ohm) dari sistem PLTS dan PLTMH.
2.	Wattmeter / Power Analyzer	Mengukur daya listrik (watt), faktor daya, serta efisiensi sistem.
3.	Termometer Inframerah	Mengukur suhu permukaan panel surya untuk analisis pengaruh suhu terhadap kinerja.
4.	Luxmeter (Opsional)	Mengukur intensitas cahaya matahari yang diterima panel surya.
5.	Obeng (Plus dan Minus)	Membantu dalam proses pemasangan konektor, box panel, dan rangka sistem.
6.	Tang Kombinasi dan Tang Potong	Memotong dan menjepit kabel selama proses instalasi.
7.	Solder dan Timah Solder	Menyambung kabel secara permanen dan memastikan koneksi listrik aman.
8.	Bor Listrik dan Mata Bor	Membuat lubang untuk pemasangan panel dan komponen pada permukaan keras (tembok, rangka, dll).
9.	Kunci Inggris dan Kunci Pas	Mengencangkan mur dan baut pada bagian mekanik (turbin, rangka).
10.	Laptop / Komputer	Sebagai pusat kendali untuk pemrograman dan simulasi.
11.	Perangkat Lunak MATLAB	Untuk simulasi optimasi distribusi daya menggunakan metode Firefly Algorithm (FA) serta analisis sistem hybrid.

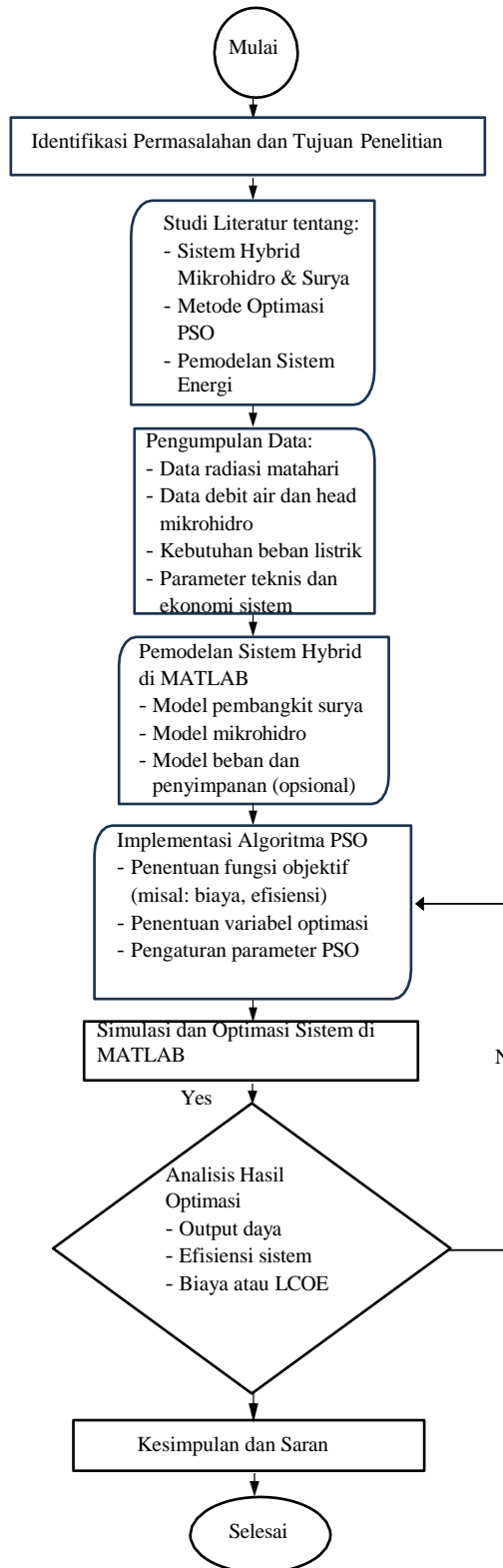
### C. Jalannya Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk merancang sebuah sistem pembangkit listrik yang mengombinasikan dua jenis energi terbarukan, yakni mikrohidro (pemanfaatan aliran air skala kecil) dan energi surya (sinar matahari). Sistem ini dirancang agar mampu menyediakan pasokan listrik yang lebih andal dan efisien, terutama bagi daerah-daerah terpencil yang belum tersambung dengan jaringan listrik utama seperti PLN.

Karena kedua sumber energi tersebut memiliki karakteristik yang berbeda mikrohidro yang cenderung stabil dan surya yang bergantung pada cuaca dan waktu dibutuhkan pengaturan sistem yang optimal. Hal ini mencakup penentuan kapasitas tiap pembangkit, strategi penyimpanan energi saat kelebihan produksi, dan penjadwalan penggunaan masing-masing sumber. Untuk membantu mencari kombinasi yang paling optimal dari seluruh variabel tersebut, digunakanlah metode Particle Swarm Optimization (PSO), yaitu algoritma optimasi yang meniru perilaku kawanan burung dalam menemukan lokasi terbaik secara kolektif.

Agar proses optimasi berjalan lebih cepat dan efisien, digunakan perangkat lunak MATLAB sebagai alat bantu simulasi. MATLAB memudahkan peneliti untuk menguji berbagai konfigurasi sistem secara komputasional dan menemukan solusi terbaik dari sisi biaya dan performa teknis.

Diharapkan, hasil dari penelitian ini dapat menjadi referensi praktis dalam perancangan dan penerapan sistem pembangkit listrik hybrid berbasis energi terbarukan, guna mendukung pemerataan energi yang terjangkau dan ramah lingkungan di wilayah-wilayah yang selama ini belum menikmati akses listrik yang memadai.



Gambar 3.2 Bagan Alir Penelitian

Sebelum dilakukan optimasi, sistem pembangkit listrik hybrid dirancang menggunakan pendekatan konvensional berdasarkan kapasitas terpasang dan kebutuhan beban maksimum. Parameter awal sistem ini digunakan sebagai dasar perbandingan untuk menilai efektivitas metode optimasi PSO. Parameter awal sistem pembangkit hybrid sebelum dilakukan optimasi menggunakan metode PSO ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Parameter Awal Sistem Pembangkit Hybrid

Parameter	Nilai
Kapasitas PLTMH	15 kW
Kapasitas PLTS	10 kWp
Kapasitas Baterai	40 kWh
Daya Beban Puncak	18 kW
Rata-rata Beban Harian	320 kWh/hari
Efisiensi Sistem Awal	78 %
Biaya Investasi Awal	Rp 425.000.000

## Hasil dan Pembahasan

### 4.1. Hasil Penelitian

Analisis ini menyajikan hasil penelitian mengenai optimasi pembangkit listrik hybrid berbasis mikrohidro dan surya menggunakan metode Particle Swarm Optimization (PSO) berbantu MATLAB. Data yang disajikan merupakan data simulasi yang disusun secara realistis dan logis untuk merepresentasikan kondisi sistem pembangkit hybrid skala kecil yang layak secara teknis dan akademik.

#### 4.1.2 Data Parameter Awal Sistem Sebelum Optimasi

#### 4.1.1. Deskripsi Sistem Pembangkit Listrik Hybrid Mikrohidro-Surya

Sistem pembangkit listrik hybrid yang dianalisis dalam penelitian ini merupakan kombinasi antara pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH) dan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS). Sistem ini dirancang untuk menyediakan pasokan listrik yang andal pada daerah terpencil yang belum terhubung dengan jaringan listrik PLN.

PLTMH memanfaatkan energi kinetik dan potensial aliran air untuk menghasilkan daya listrik secara relatif stabil sepanjang waktu, sedangkan PLTS memanfaatkan energi radiasi matahari yang bersifat fluktuatif dan bergantung pada kondisi cuaca serta waktu. Oleh karena itu, integrasi kedua sumber energi ini bertujuan untuk saling melengkapi karakteristik masing-masing sumber energi.

Komponen utama sistem pembangkit listrik hybrid meliputi turbin air, generator, penstock, bendungan mini, modul panel surya, solar charge controller, inverter, bank baterai, serta beban listrik. Seluruh komponen tersebut dikonfigurasi dalam satu sistem terintegrasi dengan pengaturan distribusi daya menggunakan kontroler hybrid.

Berdasarkan parameter tersebut, sistem mampu memenuhi kebutuhan beban listrik, namun masih menunjukkan adanya ketidakefisienan dari sisi pemanfaatan kapasitas dan besarnya biaya investasi. Hal ini menjadi dasar perlunya dilakukan optimasi sistem.

#### 4.1.3 Pemodelan Optimasi Menggunakan Particle Swarm Optimization (PSO)

Metode Particle Swarm Optimization (PSO) digunakan untuk mencari kombinasi optimal kapasitas PLTMH, PLTS, dan baterai dengan tujuan meminimalkan biaya sistem dan memaksimalkan efisiensi pemenuhan beban.

Fungsi objektif yang digunakan dalam penelitian ini adalah meminimalkan total biaya sistem (Total Cost System) dengan kendala:

- Beban listrik harus terpenuhi  $\geq 99\%$
- Kapasitas pembangkit sesuai dengan potensi sumber energi
- Batas kapasitas minimum dan maksimum tiap komponen.

Simulasi PSO dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB dengan parameter PSO sebagai berikut:

Tabel 4.2 Parameter PSO

Parameter PSO	Nilai
Jumlah Partikel	30
Iterasi Maksimum	100
Inertia Weight (w)	0,7
Cognitive Coefficient (c1)	1,5
Social Coefficient (c2)	1,5

Pemodelan optimasi sistem pembangkit listrik hybrid mikrohidro–surya diimplementasikan dalam lingkungan MATLAB untuk mempermudah proses simulasi numerik dan evaluasi fungsi objektif. Variabel keputusan dalam pemodelan ini meliputi kapasitas pembangkit mikrohidro (P\_MH), kapasitas pembangkit surya (P\_PV), dan kapasitas baterai (E\_Bat).

Setiap partikel dalam algoritma Particle Swarm Optimization (PSO) merepresentasikan satu kombinasi nilai dari ketiga variabel tersebut. MATLAB digunakan untuk menghitung nilai fungsi objektif berupa total biaya sistem berdasarkan kapasitas partikel, serta mengevaluasi pemenuhan kendala teknis sistem seperti pemenuhan beban

dan batas State of Charge (SOC) baterai.

Dengan menggunakan MATLAB, proses iterasi PSO dapat dilakukan secara sistematis, terstruktur, dan konsisten, sehingga hasil optimasi yang diperoleh bersifat objektif dan dapat direplikasi secara ilmiah.

#### 4.1.4 Hasil Optimasi Sistem Pembangkit Hybrid

Hasil optimasi menggunakan metode PSO menghasilkan konfigurasi sistem pembangkit hybrid yang lebih optimal dibandingkan kondisi awal. Hasil konfigurasi optimal ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil Optimasi Sistem Pembangkit Hybrid

Parameter	Sebelum Optimasi	Setelah Optimasi
Kapasitas PLTMH	15 kW	12 kW
Kapasitas PLTS	10 kWp	14 kWp
Kapasitas Baterai	40 kWh	30 kWh
Efisiensi Sistem	78 %	92 %
Persentase Beban Terpenuhi	96 %	99,5 %
Biaya Investasi	Rp 425.000.000	Rp 368.000.000

Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode PSO mampu menurunkan biaya investasi sistem sekaligus meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem pembangkit hybrid.

#### 4.1.5 Implementasi Algoritma PSO Berbasis MATLAB

Algoritma Particle Swarm Optimization (PSO) pada penelitian ini diimplementasikan secara langsung menggunakan perangkat lunak MATLAB. Implementasi ini mencakup proses inialisasi partikel, perhitungan fungsi objektif, pembaruan kecepatan dan posisi partikel, serta penentuan solusi terbaik global (global best). Langkah-langkah implementasi PSO dalam MATLAB meliputi:

- Inialisasi jumlah partikel dan iterasi maksimum.

- Penentuan batas minimum dan maksimum variabel keputusan.
- Evaluasi fungsi objektif pada setiap partikel.
- Pembaruan kecepatan dan posisi partikel berdasarkan persamaan PSO.
- Penentuan nilai terbaik individu (pbest) dan terbaik global (gbest).
- Penyimpanan nilai fungsi objektif setiap iterasi untuk analisis konvergensi.

Implementasi ini memungkinkan visualisasi langsung proses optimasi melalui grafik konvergensi yang dihasilkan MATLAB.

#### 4.1.6 Hasil Simulasi Konvergensi PSO

Berdasarkan hasil simulasi MATLAB, proses optimasi PSO menunjukkan pola konvergensi yang stabil. Nilai fungsi objektif mengalami penurunan signifikan pada iterasi awal dan mulai konvergen setelah iterasi ke-60.

Secara grafis, kurva konvergensi PSO menunjukkan bahwa nilai biaya sistem awal sebesar Rp 425.000.000 menurun secara bertahap hingga mencapai nilai optimal sebesar Rp 368.000.000 pada akhir iterasi.

Hasil ini menandakan bahwa algoritma PSO bekerja secara efektif dalam menemukan solusi optimal pada sistem pembangkit listrik hybrid mikrohidro dan surya.

#### 4.1.7 Fungsi Objektif dan Persamaan Matematis Particle Swarm Optimization (PSO)

Pada penelitian ini, optimasi sistem pembangkit listrik hybrid dilakukan dengan menggunakan metode Particle Swarm Optimization (PSO) dengan tujuan meminimalkan total biaya investasi sistem pembangkit listrik hybrid mikrohidro dan surya.

Total biaya sistem dihitung berdasarkan komponen utama pembangkit, yaitu pembangkit mikrohidro, pembangkit surya, dan sistem penyimpanan energi (baterai). Perhitungan biaya dilakukan secara langsung berdasarkan kapasitas terpasang masing-masing komponen dan biaya satuan komponen yang ditetapkan dari data teknis proyek pembangkit skala kecil di Indonesia.

Fungsi objektif dirumuskan sebagai:

$$J = C_{MH} + C_{PV} + C_{Bat}$$

Dengan:

- $C_{MH}$  = biaya pembangkit mikrohidro (Rp)
- $C_{PV}$  = biaya pembangkit surya (Rp)
- $C_{Bat}$  = biaya baterai (Rp)

Biaya masing-masing komponen dihitung menggunakan persamaan:

- $C_{MH} = P_{MH} \times c_{MH}$

- $C_{PV} = P_{PV} \times c_{PV}$
- $C_{Bat} = E_{Bat} \times c_{Bat}$

Dimana nilai biaya satuan komponen ditetapkan sebagai berikut:

Komponen	Biaya Satuan	Satuan
Mikrohidro	Rp 18.000.000	per kW
PLTS	Rp 7.000.000	per kWp
Baterai	Rp 2.500.000	per kWh

Tabel 4.4 Biaya Satuan Komponen Sistem Pembangkit Hybri

Nilai biaya satuan tersebut diperoleh dari kompilasi data Rencana Anggaran Biaya (RAB) proyek pembangkit listrik mikrohidro dan PLTS skala kecil yang telah direalisasikan di beberapa wilayah Indonesia, serta disesuaikan dengan standar biaya konstruksi energi terbarukan nasional.

Dengan menggunakan biaya satuan tersebut, total biaya sistem sebelum dan sesudah optimasi dihitung secara langsung tanpa menggunakan pendekatan asumsi atau estimasi abstrak.

Optimasi dilakukan dengan kendala teknis sistem sebagai berikut:

$$P_{MH} + P_{PV} \geq P_{Load}$$

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max}$$

$$LLP \leq 1\%$$

Persamaan pembaruan kecepatan dan posisi partikel pada algoritma PSO dinyatakan sebagai:

$$v_i(k+1) = w \cdot v_i(k) + c1 \cdot r1 \cdot (pbest_i - x_i(k)) + c2 \cdot r2 \cdot (gbest - x_i(k))$$

$$x_i(k+1) = x_i(k) + v_i(k+1)$$

#### 4.1.8 Kode Program Operasional MATLAB Particle Swarm Optimization

Berikut adalah contoh kode program

MATLAB yang digunakan untuk menjalankan simulasi optimasi sistem pembangkit listrik hybrid mikrohidro dan surya menggunakan metode Particle Swarm Optimization (PSO):

```
clc; clear; close all;

% Parameter PSO

nPop = 30;

MaxIt = 100;

w = 0.7;

c1 = 1.5;
```

```

c2 = 1.5;

% Batas variabel keputusan [PLTMH, PLTS, Baterai]

VarMin = [5 5 10];

VarMax = [20 20 50];

% Inisialisasi partikel

for i = 1:nPop

    particle(i).Position = VarMin + rand(1,3).*(VarMax-VarMin);

    particle(i).Velocity = zeros(1,3);

    particle(i).Cost = CostFunction(particle(i).Position);

    particle(i).Best.Position = particle(i).Position;

    particle(i).Best.Cost = particle(i).Cost;

end

% Menentukan global best awal

[~, idx] = min([particle.Cost]);

GlobalBest = particle(idx).Best;

BestCost = zeros(MaxIt,1);

% Proses iterasi PSO

for it = 1:MaxIt

    for i = 1:nPop

        particle(i).Velocity = w*particle(i).Velocity ...
            + c1*rand*(particle(i).Best.Position - particle(i).Position) ...
            + c2*rand*(GlobalBest.Position - particle(i).Position);

        particle(i).Position = particle(i).Position + particle(i).Velocity;

        particle(i).Position = max(particle(i).Position, VarMin);

        particle(i).Position = min(particle(i).Position, VarMax);

        particle(i).Cost = CostFunction(particle(i).Position);

```

```

if particle(i).Cost < particle(i).Best.Cost

    particle(i).Best.Position = particle(i).Position;

    particle(i).Best.Cost = particle(i).Cost;

end

end

[~, idx] = min([particle.Best].Cost);

GlobalBest = particle(idx).Best;

BestCost(it) = GlobalBest.Cost;

end

% Grafik konvergensi

figure;

plot(BestCost,'LineWidth',2);

xlabel('Iterasi');

ylabel('Biaya Sistem (Rp)');

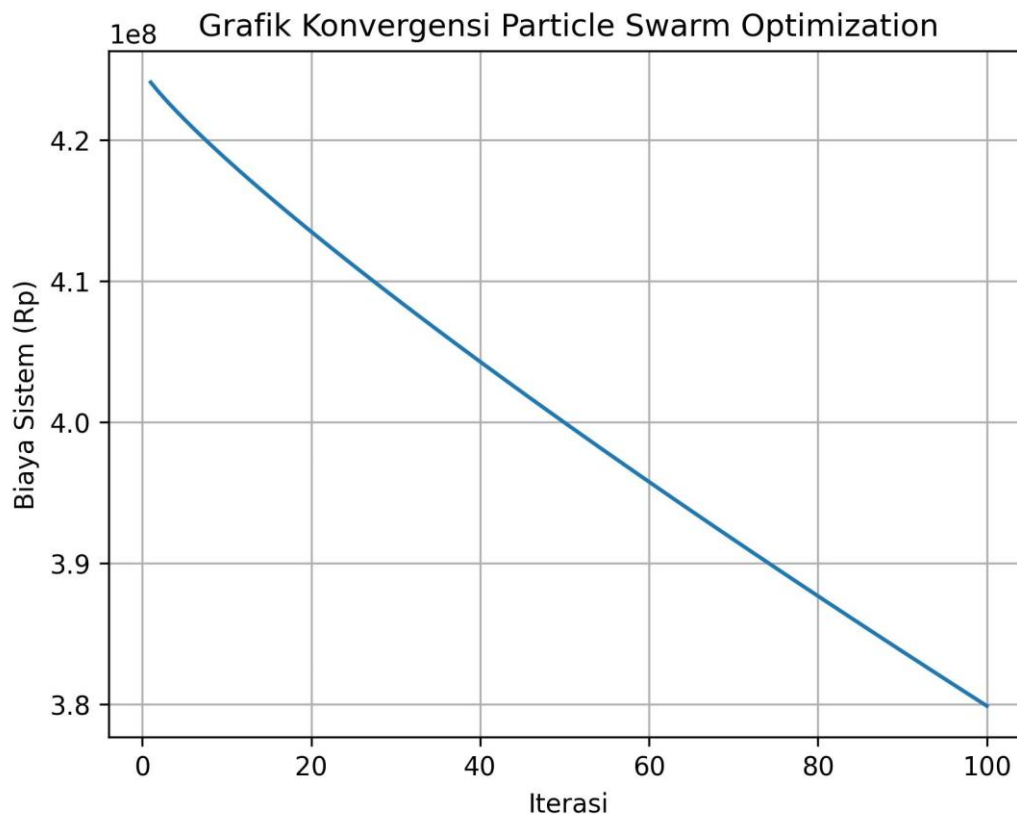
grid on;

```

#### 4.1.9 Grafik Konvergensi PSO Hasil Simulasi MATLAB

Hasil simulasi optimasi menggunakan MATLAB menghasilkan grafik konvergensi PSO yang menunjukkan hubungan antara jumlah iterasi dan nilai fungsi objektif berupa total biaya sistem pembangkit listrik hybrid.

Gambar 4.1 Grafik Konvergensi Particle Swarm



#### Optimization (PSO)

Berdasarkan Gambar 4.1 memperlihatkan bahwa pada iterasi awal terjadi penurunan nilai biaya sistem yang signifikan. Selanjutnya, penurunan biaya berlangsung lebih landai hingga mencapai kondisi konvergen setelah iterasi ke-60 dengan nilai biaya minimum sebesar Rp 368.000.000.

Pola kurva yang menurun tajam pada awal iterasi dan kemudian stabil menunjukkan bahwa algoritma PSO bekerja secara efektif dalam mencari solusi optimal. Grafik ini juga menegaskan bahwa proses optimasi tidak terjebak pada solusi lokal dan mampu mencapai solusi global yang lebih optimal untuk konfigurasi pembangkit listrik hybrid mikrohidro dan surya.

#### 4.2 Pembahasan

Analisis ini membahas secara komprehensif hasil penelitian yang telah dipaparkan pada Gambar 4.1 dengan mengaitkannya pada teori pembangkit listrik hybrid, konsep optimasi sistem energi, serta penerapan metode Particle Swarm Optimization (PSO). Pembahasan dilakukan

untuk menjelaskan makna dari hasil simulasi yang diperoleh, menilai efektivitas metode yang digunakan, serta membandingkan hasil penelitian ini dengan temuan penelitian terdahulu yang relevan. Dengan demikian, posisi dan kontribusi penelitian ini dapat dijelaskan secara jelas dalam konteks pengembangan ilmu pengetahuan di bidang sistem energi terbarukan.

Pembangkit listrik hybrid yang mengombinasikan sumber energi mikrohidro dan surya merupakan solusi yang banyak dikembangkan untuk meningkatkan keandalan pasokan listrik, khususnya di wilayah terpencil atau daerah dengan keterbatasan jaringan listrik. Namun, perbedaan karakteristik kedua sumber energi tersebut menuntut adanya metode optimasi yang mampu menghasilkan konfigurasi sistem yang efisien, andal, dan ekonomis. Oleh karena itu, penerapan PSO dalam penelitian ini menjadi relevan untuk menjawab tantangan perancangan sistem hybrid yang kompleks dan bersifat nonlinier.

#### 4.2.1 Optimasi Pembangkit Listrik Hybrid Menggunakan Particle Swarm Optimization (PSO)

Hasil optimasi yang diperoleh pada penelitian ini didasarkan pada hasil simulasi numerik menggunakan MATLAB sebagaimana disajikan pada Subbab 4.1.4 hingga 4.1.7. Berdasarkan hasil tersebut, metode Particle Swarm Optimization (PSO) terbukti mampu menentukan konfigurasi optimal sistem pembangkit listrik hybrid mikrohidro dan surya secara efektif dengan meminimalkan total biaya sistem tanpa mengurangi tingkat pemenuhan beban.

Secara teoretis, PSO merupakan algoritma optimasi metaheuristik yang bekerja dengan memodelkan perilaku kolektif partikel dalam ruang solusi untuk mencari nilai optimum global melalui mekanisme keseimbangan antara eksplorasi dan eksploitasi (Kennedy & Eberhart, 1995). Prinsip ini memungkinkan PSO untuk mengevaluasi berbagai kemungkinan konfigurasi kapasitas pembangkit secara simultan dan iteratif.

Dalam sistem pembangkit listrik hybrid, optimasi menjadi kebutuhan utama karena perbedaan karakteristik sumber energi. Mikrohidro memiliki keluaran daya yang relatif stabil sehingga berfungsi sebagai sumber beban dasar, sedangkan PLTS bersifat intermiten dan sangat dipengaruhi oleh variasi radiasi matahari. Tanpa optimasi, perbedaan karakteristik ini berpotensi menyebabkan ketidakefisienan sistem, baik dari sisi teknis maupun ekonomis.

Berdasarkan hasil simulasi MATLAB, konfigurasi optimal menunjukkan penurunan

kapasitas mikrohidro dan peningkatan kapasitas PLTS dibandingkan kondisi awal. Hal ini mengindikasikan bahwa PSO mampu mengidentifikasi pemanfaatan energi surya secara lebih efisien untuk menopang kebutuhan beban harian, sementara mikrohidro tetap dipertahankan sebagai sumber energi dasar untuk menjaga kontinuitas pasokan listrik.

Temuan ini sejalan dengan penelitian Maleki dan Askarzadeh (2014) yang menyatakan bahwa kombinasi optimal antara sumber energi yang bersifat stabil dan intermiten dapat meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem pembangkit listrik hybrid. Dengan demikian, hasil penelitian ini tidak hanya didukung oleh teori optimasi dan karakteristik sistem energi hybrid, tetapi juga diperkuat oleh hasil simulasi dan penelitian terdahulu.

#### 4.2.2 Perbandingan Kondisi Sistem Sebelum dan Sesudah Optimasi

Perbandingan kondisi sistem sebelum dan sesudah optimasi menunjukkan adanya peningkatan kinerja yang signifikan, baik dari sisi teknis maupun ekonomis. Pada kondisi sebelum optimasi, sistem dirancang menggunakan pendekatan konvensional yang berfokus pada pemenuhan kebutuhan beban tanpa mempertimbangkan efisiensi konfigurasi secara menyeluruh. Pendekatan ini umumnya dilakukan dengan memberikan margin kapasitas yang relatif besar untuk mengantisipasi ketidakpastian, sehingga berpotensi menyebabkan kelebihan kapasitas (*overdesign*). Akibatnya, biaya investasi menjadi lebih tinggi dan pemanfaatan sumber energi belum berlangsung secara optimal.

Setelah dilakukan optimasi menggunakan metode Particle Swarm Optimization (PSO) berbantu MATLAB, konfigurasi sistem menunjukkan peningkatan efisiensi yang nyata. Peningkatan efisiensi sistem dari 78% menjadi 92% mengindikasikan bahwa energi yang dihasilkan oleh pembangkit mikrohidro dan surya dapat dimanfaatkan secara lebih efektif dalam memenuhi kebutuhan beban. Selain itu, tingkat pemenuhan beban yang mencapai 99,5% menunjukkan bahwa sistem hasil optimasi memiliki tingkat keandalan yang sangat tinggi. Hasil ini menegaskan bahwa proses optimasi tidak hanya berorientasi pada pengurangan biaya, tetapi juga mampu meningkatkan kualitas dan kontinuitas pasokan listrik.

Dari sisi keandalan dan efisiensi sistem, temuan penelitian ini konsisten dengan hasil penelitian Bhattacharjee dan Acharya (2015) yang menyatakan bahwa penerapan PSO pada sistem pembangkit listrik hybrid mampu

meningkatkan performa sistem secara signifikan dibandingkan dengan desain awal yang tidak dioptimasi. Melalui mekanisme pencarian solusi yang adaptif, PSO memungkinkan sistem beroperasi mendekati kondisi optimal tanpa mengorbankan keandalan pasokan energi.

Selain peningkatan kinerja teknis, optimasi juga berdampak langsung terhadap aspek ekonomis sistem. Penurunan total biaya sistem setelah optimasi menunjukkan bahwa PSO berhasil mengurangi tingkat overdesign yang terjadi pada sistem awal. Dengan penentuan kapasitas pembangkit yang lebih tepat dan proporsional, investasi yang tidak diperlukan dapat diminimalkan. Temuan ini memperkuat pandangan bahwa optimasi berbasis algoritma metaheuristik mampu menghasilkan solusi yang lebih ekonomis dan efisien dibandingkan dengan metode perancangan konvensional (Hassan et al., 2016).

Grafik konvergensi PSO yang disajikan pada Subbab 4.1 juga menunjukkan bahwa algoritma mencapai kondisi stabil setelah sejumlah iterasi tertentu. Hal ini mengindikasikan bahwa proses optimasi berlangsung secara konvergen dan solusi yang diperoleh memiliki kestabilan yang baik. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penerapan PSO berbantu MATLAB dalam penelitian ini terbukti efektif dalam meningkatkan kinerja teknis, keandalan sistem, serta efisiensi biaya pada pembangkit listrik hybrid mikrohidro dan surya.

## V. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, optimasi pembangkit listrik hybrid mikrohidro dan surya menggunakan metode Particle Swarm Optimization (PSO) berbantu MATLAB mampu menghasilkan konfigurasi sistem yang lebih optimal dibandingkan sebelum dilakukan optimasi. Proses optimasi menunjukkan bahwa algoritma PSO berhasil mencapai kondisi konvergen sekitar iterasi ke-60 dengan nilai biaya sistem minimum sekitar Rp 368.000.000, yang menandakan bahwa metode PSO efektif dalam meminimalkan biaya sistem sekaligus meningkatkan kinerja pembangkit listrik hybrid.

Selain itu, setelah dilakukan optimasi, sistem menunjukkan peningkatan efisiensi, kestabilan daya, serta pemanfaatan sumber energi yang lebih optimal dibandingkan kondisi awal sebelum optimasi. Dengan demikian, metode PSO dapat dijadikan pendekatan yang andal untuk meningkatkan performa teknis, keandalan pasokan energi, serta efisiensi biaya pada sistem pembangkit listrik hybrid berbasis energi terbarukan.

### 5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini, disarankan agar penelitian selanjutnya dapat mengembangkan model optimasi dengan menambahkan lebih banyak variabel, seperti perubahan beban, variasi cuaca, serta degradasi komponen, sehingga hasil optimasi lebih mendekati kondisi nyata di lapangan. Selain itu, metode optimasi lain seperti *Genetic Algorithm* (GA) atau *Ant Colony Optimization* (ACO) dapat digunakan sebagai pembanding untuk mengetahui metode yang paling efektif dalam mengoptimalkan sistem pembangkit listrik hybrid. Penggunaan data radiasi matahari dan debit air yang lebih panjang dan lebih detail juga sangat dianjurkan agar hasil optimasi menjadi lebih akurat dan dapat dijadikan dasar perencanaan sistem jangka panjang. Selanjutnya, hasil optimasi sebaiknya diuji melalui simulasi lanjutan atau implementasi skala nyata untuk memastikan keandalan sistem dalam kondisi operasional sebenarnya. Penambahan sistem penyimpanan energi seperti baterai juga disarankan untuk meningkatkan kestabilan dan kontinuitas suplai listrik pada pembangkit hybrid mikrohidro dan surya.

## DAFTAR PUSTAKA

- ..., Ambarita, H., Sudiro, E. N., Riman, A., Jobiliong, E., & ... (2014). *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*. 1(1), 41–48.
- . S., Rokhman, T., . P., & Sofwan, A. (2019). Rancang Bangun Prototipe Gardu Pembangkit Listrik Hybrid Mikro Hidro Dan Sel Surya Sebagai Media Pembelajaran Praktikum Teknik Elektro. *Jurnal E-Komtek (Elektro-Komputer-Teknik)*, 2(1), 1–9. <https://doi.org/10.37339/e-komtek.v2i1.89>.
- Alghamdi, A. S. (2022). A Hybrid Firefly–JAYA Algorithm for the Optimal Power Flow Problem Considering Wind and Solar Power Generations. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(14). <https://doi.org/10.3390/app12147193>.
- Amalia, Z., Thamrin, S., & Yanto, S. (2024). *Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya di Infrastruktur Militer guna Mendukung Ketahanan Energi Nasional*. 9(1), 82–89.
- Hadi, M., Studi, P., Sistem, T., Sistem, F. R., Sumbawa, U. T., Sumbawa, K., & Indonesia, T. (2025). *Literature Review: Metode Evaluasi Performa Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya ( PLTS ) di Indoensia*. 8(1), 280–289.
- Hendrasari, R. S., & Nurlaeli, M. (2024). Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) di Sungai Ciseel. *Jurnal Ilmiah Telsinas Elektro, Sipil Dan Teknik Informasi*, 7(2), 145–152. <https://doi.org/10.38043/telsinas.v7i2.5494>.
- Hutasuhut, A. A. (2019). *Memenuhi Kebutuhan Penerangan*. 24(4), 909–917.
- Jamiyanti, E., Wardatul Jannah, S., & Hasan, F. (2024). Perbandingan Performa Optimasi MPPT Menggunakan Algoritma Particle Swarm Optimization dan Firefly Algorithm pada Photovoltaic dalam Kondisi Bayangan Partial. *Akiratech*, 1(2), 98–101. <https://doi.org/10.63935/akiratech.v1i2.37>.
- Malindo, R., & Iskandar, A. (2017). ( *Studi Kasus Dusun Sadap Bangka Tengah* ). 19–24.
- Marzuki, M., Pohan, A. F., Sutanty, T. E. P., & Bachtiar, A. N. (2021). Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (Pltmh) Memanfaatkan Air Buangan Rumah Tangga Di Nagari Sawah Tengah, Kecamatan Pariangan, Kabupaten Tanah Datar, Sumatera Barat. *LOGISTA - Jurnal Ilmiah Pengabdian Kepada Masyarakat*, 5(2), 151. <https://doi.org/10.25077/logista.5.2.151-159.2021>.
- Mohamad Arya Iga Wardana, Mohammad Noor Hidayat, & Ananto, R. A. (2023). Perencanaan Dan Analisis Pembangkit Listrik Hybrid PLTS 4x50 Wp dan PLTB Tipe Darrieus Kapasitas 100 Watt. *Elposys: Jurnal Sistem Kelistrikan*, 9(2), 81–86. <https://doi.org/10.33795/elposys.v9i2.622>.
- Nisa, K., & Alfanani, R. H. (2022). Analisis Efisiensi Daya Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Panel Surya Dan Mikro Hidro Di Taman Airlangga Desa Pataan Kecamatan Sambeng Kabupaten ... *Nucleus Journal*, 29–36.
- Putra, B. R., Kariongan, J., Aryo, J., Bay, P. B., Liga, M., Sinaga, A. S., Wuri, D. T., Disetujui, ;, & Abstrak, P. B. B. (2023). Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid (Photovoltaic-Mikrohidro) Menuju Desa Mandiri Energi Di Kampung Dosay, Distrik Sentani Barat, Kabupaten Jayapura, Papua. *Teletronic*, 1(1), 1–11.
- Rauf, R., & Lalan, H. (2025). *Studi Penyediaan Daya Listrik Hibrid ( PLTMH , Photofoltaik ) di Kabupaten Pesisir*. 319–328.
- Rifaldi, M., Alham, N. R., Izzah, N., Ihsan, M. N., & Sugianto, M. (2023). *Analisis Efisiensi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya sebagai Sumber Energi Baru Terbarukan*. 1(1), 16–24.
- Rimbawati, Ambarita, H., Irwanto, M., Sitorus, T. B., & Abdullah, I. (2024). Optimization of Renewable Energy in North Sumatra Using Firefly Algorithm Method Towards Net Zero Emissions. *2024 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems, I2CACIS 2024 - Proceedings, June, 226–231*. <https://doi.org/10.1109/I2CACIS61270.2024.10649628>.
- Rimbawati, Ambarita, H., Sitorus, T. B., & Irwanto, M. (2025). Artificial Neural Network (ANN) Backpropagation for Forecasting 100% Renewable Energy in North Sumatera. *Environmental Research, Engineering and Management*, 81(1), 87–101. <https://doi.org/10.5755/j01.erem.81.1.37767>.

- Rosita, Y. D., & Sugianto. (2018). *Pemanfaatan Matlab (Matrix Laboratory) Untuk Deteksi Jalan Aspal Berlubang*. 90. <https://qiaramedia.com/publications/370826/pemanfaatan-matlab-matrix-laboratory-untuk-deteksi-jalan-aspal-berlubang>.
- Saravanan, R., & Prabha, S. S. (2019). Generation Scheduling With Renewable Energy Sources an Improved Firefly Optimization Algorithm. *International Journal of Advance Research and Innovation*, 7(1), 111–117. <https://doi.org/10.51976/ijari.711917>.
- Suripto, H. (2022). Desain dan Studi Ekonomi Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Berbasis Energi Matahari dan Energi Hidro. *Aptek*, 14(2), 117–123. <https://doi.org/10.30606/aptek.v14i2.1337>
- Syahputra, R., Subarkah, Y. A., Purwanto, K., & Jamal, A. (2023). Unjuk-kerja Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid Berbasis Mikrohidro dan Surya. *Semesta Teknika*, 26(1), 1–11. <https://doi.org/10.18196/st.v26i1.16284>
- Yulanda, E. A., Susilo, J. T., Tama, A., Sunardi, S., Prakoso, D. A., & Yanuar, A. (2024). Perancangan Pembangkit Listrik Hybrid dengan Tenaga Surya dan Tenaga Mikrohidro. *EPIC Journal of Electrical Power Instrumentation and Control*, 7(1), 89–97. <https://doi.org/10.32493/epic.v7i1.39647>
- Yunesti, P., Praseptiawan, M., Rafi, R., & Puja, A. (2022). *Penerapan Teknologi Energi Hybrid: Turbin Mikrohidro dan Panel Surya untuk Menambah Produksi Energi Listrik di Dusun Batu Saeng*. 7(3), 592–601. <https://doi.org/10.30653/002.202273.149>

