

# **Analisis Optimasi Pembangkit Listrik Hybrid Berbasis Mikrohidro dan Surya Menggunakan Metode FireflyAlgorithm (FA) Berbantu MATLAB**

**SKRIPSI**

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

**Disusun Oleh:**

**IWAN PRAYOGO**

**2107220053**



**UMSU**

Unggul | Cerdas | Terpercaya

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

## HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan oleh:

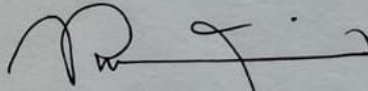
Nama : Iwan Prayogo  
NPM : 2107220053  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul Skripsi : Analisis Optimasi Pembangkit Listrik Hybrid Berbasis Mikrohidro dan Surya Menggunakan Metode FireflyAlgorithm (FA) Berbantu MATLAB  
Bidang ilmu : Energi Baru Terbarukan

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

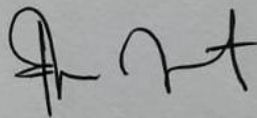
Mengetahui dan menyetujui:

Dosen Pembimbing I



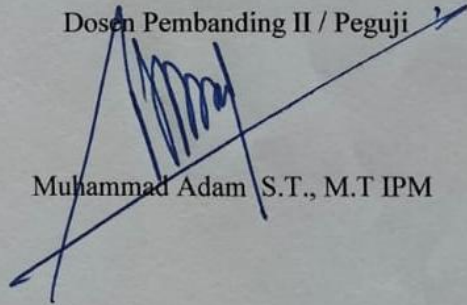
Dr. Rimbawati S.T., M.T

Dosen Pembanding I / Penguji



Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd.

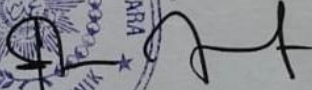
Dosen Pembanding II / Peguji



Muhammad Adam S.T., M.T IPM



Program Studi Teknik Elektro  
Ketua,



Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd

## SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Lengkap : Iwan Prayogo  
Tempat /Tanggal Lahir : Aek Korsik / 21 Agustus 2001  
NPM : 2107220053  
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 Firefly Algorithm (FA) 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 orisinil 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/ kesarjanaan 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,



Iwan Prayogo

## ABSTRAK

Energi listrik merupakan kebutuhan vital, namun ketergantungan pada sumber fosil menghadirkan masalah keterbatasan pasokan dan dampak lingkungan. Sistem pembangkit hybrid berbasis mikrohidro dan surya menjadi alternatif, tetapi menghadapi tantangan dalam optimalisasi distribusi daya agar efisiensi dan keandalan tetap terjaga. Metode optimasi konvensional seperti GA dan PSO masih memiliki keterbatasan dalam adaptasi terhadap kondisi operasional yang dinamis. Penelitian ini menawarkan solusi melalui penerapan Firefly Algorithm (FA) yang mampu mengeksplorasi ruang solusi lebih luas dan konvergen lebih cepat. Dengan bantuan simulasi MATLAB, FA diharapkan dapat meningkatkan efisiensi dan stabilitas pembangkit listrik hybrid, khususnya dalam menyeimbangkan pasokan energi terbarukan dengan kebutuhan beban. Hasil penelitian ini diharapkan menjadi kontribusi nyata dalam pengembangan sistem energi bersih yang lebih adaptif dan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat optimalisasi sistem pembangkit listrik hybrid berbasis mikrohidro dan surya melalui penerapan metode optimasi Firefly Algorithm (FA) dalam mengatur distribusi daya antar sumber energi. Untuk menganalisis efisiensi hasil optimasi sistem pembangkit listrik hybrid berbasis mikrohidro dan surya sebelum dan sesudah diterapkan metode Firefly Algorithm (FA) dengan bantuan simulasi MATLAB. 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. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Optimasi pembangkit listrik hybrid berbasis Mikrohidro dan PV dengan implementasi Firefly Algorithm (FA) terbukti meningkatkan distribusi daya dan efisiensi sistem. Pada tahun 2023 dan 2024, daya optimal mendekati kebutuhan beban dengan efisiensi hingga 100%, menunjukkan FA efektif menyeimbangkan pasokan energi terbarukan dengan kebutuhan beban listrik. Pada tahun 2025, optimasi dengan FA menunjukkan keterbatasan karena pasokan energi PV dan Mikrohidro menurun drastis, sehingga daya optimal pada banyak bulan tidak tercapai ( $Total\_opt = 0$ ) dan efisiensi sistem rendah. Hal ini menegaskan bahwa meskipun hasil sesudah optimasi berbantu MATLAB lebih baik dibanding sebelum optimasi pada periode awal, keberhasilan tetap sangat dipengaruhi oleh ketersediaan energi primer dan kapasitas baterai. Dengan demikian, FA tidak dapat berdiri sendiri untuk menjamin kinerja sistem hybrid secara berkelanjutan.

*Kata Kunci* : Hybrid Pembangkit Listrik, Firefly Algorithm, Efisiensi Energi

## ABSTRAC

*Electrical energy is a vital need, but dependence on fossil fuels presents problems of limited supply and environmental impacts. A hybrid power generation system based on microhydro and solar energy is an alternative, but faces challenges in optimizing power distribution to maintain efficiency and reliability. Conventional optimization methods such as GA and PSO still have limitations in adapting to dynamic operational conditions. This study offers a solution through the application of the Firefly Algorithm (FA), which is able to explore a wider solution space and converge more quickly. With the help of MATLAB simulations, FA is expected to improve the efficiency and stability of hybrid power plants, especially in balancing renewable energy supply with load demand. The results of this study are expected to be a real contribution to the development of a more adaptive and sustainable clean energy system. This study aims to determine the level of optimization of a hybrid power generation system based on microhydro and solar energy through the application of the Firefly Algorithm (FA) optimization method in managing power distribution between energy sources. To analyze the efficiency of the optimization results of the hybrid power generation system based on microhydro and solar energy before and after the application of the Firefly Algorithm (FA) method with the help of MATLAB simulations. This research was conducted at a microhydro power plant (PLTMH) located in Bintang Asih Hamlet, Rumah Sumbul Tiga Juhar Village, STM Hulu District, Deli Serdang Regency. The results showed that optimizing a microhydro and photovoltaic (PV) hybrid power plant using the Firefly Algorithm (FA) improved power distribution and system efficiency. In 2023 and 2024, optimal power approached load demand with efficiency reaching 100%, demonstrating that FA effectively balanced renewable energy supply with electricity load demand. In 2025, optimization using FA showed limitations due to a drastic decrease in PV and microhydro energy supply, resulting in failure to achieve optimal power in many months ( $Total\_opt = 0$ ) and low system efficiency. This confirms that although the results after MATLAB-assisted optimization are better than those before optimization in the initial period, success is still heavily influenced by the availability of primary energy and battery capacity. Therefore, FA cannot alone guarantee the sustainable performance of the hybrid system.*

*Keywords: Hybrid Power Plant, Firefly Algorithm, Energy Efficiency*

## 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 Metode Firefly Algorithm (FA) Berbantu Matlab”

Penulisan 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 Anwar dan Ibu Anik 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 elektro kepada penulis.
8. Bapak/Ibu Staf Administrasi di Biro Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
9. Teman – teman seperjuangan Elektro B1 Pagi Stambuk 2021 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

Iwan Prayogo

## DAFTAR ISI

ABSTRAK .....	i
<i>ABSTRAC</i> .....	iv
KATA PENGANTAR .....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL .....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR LAMPIRAN .....	xi
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Ruang Lingkup .....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
1.6 Sistematika Penulisan .....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Tinjauan Pustaka Relevan .....	6
2.2 Landasan Teori .....	12
2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya.....	12
2.2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Air.....	17
2.2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid.....	24
2.2.4 Firefly Algorithm (FA) .....	27
2.5 Diagram Alir Firefly Algorithm .....	31
2.2.5 Matlab .....	32
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	34
3.1 Tempat Penelitian .....	34
3.2 Alat dan Bahan .....	34
3.3 Jalannya Penelitian .....	36
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....	40
4.1. Analisis dan Optimalisasi Sistem Pembangkit Listrik Hybrid Menggunakan Firefly Algorithm (FA).....	40

4.1.1. Implementasi Firefly Algorithm (FA) untuk Distribusi Daya .....	40
4.1.2. Perbandingan Efisiensi Sistem Sebelum dan Sesudah Optimasi .. <b>Error!</b>	
<b>Bookmark not defined.</b>	
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	42
5.1 Kesimpulan.....	42
5.2 Saran .....	42
DAFTAR PUSTAKA .....	43

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Bahan-bahan Penelitian.....	31
Tabel 3.2. Alat-alat Penelitian.....	32
Tabel 4.1. Hasil Distribusi Daya Optimal Sistem Hybrid (kW) 2023-2025.....	37
Tabel 4.2. Perbandingan Efisiensi Sistem Sebelum dan Sesudah Optimasi .....	39

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Surya .....	13
Gambar 2.2. Model sel Surya.....	14
Gambar 2.3. Solar Charge Controller .....	15
Gambar 2.4. Baterai 12 V,150 Ah.....	16
Gambar 2.5. Power Inverter .....	17
Gambar 2.6. Pembangkit Listrik Tenaga Air .....	18
Gambar 2.7. Bendungan.....	18
Gambar 2.8. Turbin .....	19
Gambar 2.9. Generator .....	19
Gambar 2.10. Jalur Trasmisi .....	20
Gambar 2.11. Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid .....	20
Gambar 2.12. Diagram Alur PLTH.....	21
Gambar 2.13. Sistem Cackup dan Pembangkit Satu Lokasi .....	22
Gambar 2.14. Backup dan Pembangkit Dipasang Terpisah.....	22
Gambar 2.15. Pembangkit dengan Konversi AC/DC .....	23
Gambar 2.16. Firefly Algorithm .....	24
Gambar 2.17. Diagram Alir Firefly Algorithm.....	28
Gambar 2.18. Matlab.....	29
Gambar 3.1. Lokasi PLTMH Bintang Asih .....	31
Gambar 3.2. Bagan Alir Penelitian .....	35
Gambar 4.1. Grafik Perbandingan Beban dan Daya Tahun 2023.....	40
Gambar 4.2. Grafik Perbandingan Beban dan Daya Tahun 2024.....	42
Gambar 4.3. Grafik Perbandingan Beban dan Daya Tahun 2025.....	44

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Lapangan Tahun 2023-2025 Curah Hujan.....	51
Lampiran 2. Data Lapangan Tahun 2023-2025 Intensitas Penyinaran Matahari...	51
Lampiran 3. Data Lapangan Tahun 2023-2025 Kecepatan Angin .....	51
Lampiran 4. Hasil Simulasi Optimasi Sistem Hybrid Mikrohidro + PV (2023-2025) .....	51
Lampiran 5. Hasil Simulasi Analisis Kondisi Sistem Sebelum Optimasi .....	52
Lampiran 6. Hasil Simulasi Optimasi Menggunakan Metode Firefly Algorithm .	52
Lampiran 7. Hasil Simulasi Perbandingan Sebelum dan Sesudah Optimasi .....	53
Lampiran 8. Hasil Simulasi Efisiensi dengan Bantuan Matlab .....	53
Lampiran 9. Hasil Otput dengan Metode Firefly Algorithm Tahun 2023 .....	54
Lampiran 10. Hasil Otput dengan Metode Firefly Algorithm Tahun 2024 .....	54
Lampiran 11. Hasil Otput dengan Metode Firefly Algorithm Tahun 2025 .....	54
Lampiran 12. Program MATLAB.....	55

# **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 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.

Firefly Algorithm (FA) 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 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.

Algoritma Firefly (FA) 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 FA 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 FA 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 FA.

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 Firefly Algorithm (FA)?
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 Firefly Algorithm (FA) 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 Firefly Algorithm (FA) 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 :

1. 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.

2. Metode Optimasi Penelitian menggunakan Firefly Algorithm (FA) 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.
3. 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. Sebagai referensi tambahan dalam pengembangan ilmu pengetahuan di bidang energi terbarukan dan teknologi optimasi, khususnya metode Firefly Algorithm (FA) 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.

### **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) Algoritma Firefly (FA) 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 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 (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., 2024) Firefly Algorithm (FA) dalam optimasi sistem hibrida pembangkit energi terbarukan di Sumatera Utara mampu meningkatkan kapasitas daya dan stabilitas sistem secara signifikan. Melalui analisis komparatif terhadap nilai minimum, maksimum, rata-rata, dan deviasi standar kapasitas daya, Pembangkit listrik berbasis mikrohidro, tenaga air, panas bumi, biomassa, biogas, dan tenaga surya berhasil dioptimalkan dengan baik, di mana mikrohidro menunjukkan performa tertinggi pada pengujian pertama sebesar 2724,1269 MW, sementara tenaga surya mencapai hasil optimal pada pengujian ketiga sebesar 2652,2975 MW.

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 Model 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 penting dalam meningkatkan permukaan air sungai guna menciptakan perbedaan ketinggian (head) yang diperlukan untuk menghasilkan energi listrik pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA). Dengan adanya perbedaan ketinggian tersebut, air dapat mengalir dengan tekanan yang cukup kuat untuk menggerakkan turbin dan menghasilkan energi mekanik yang kemudian diubah menjadi energi listrik oleh generator.

Selain berfungsi untuk mendukung proses pembangkitan listrik, bendungan juga memiliki peran strategis sebagai tempat penyimpanan air dalam jumlah besar. Air yang tertampung di dalam bendungan dapat digunakan sebagai cadangan energi pada saat debit air sungai menurun, terutama di musim kemarau, sehingga kontinuitas pembangkitan listrik tetap terjaga.



Gambar 2.7 Bendungan

## b. Turbin

Tenaga air yang jatuh memberikan dorongan kuat pada sudu-sudu turbin, sehingga menyebabkan turbin berputar dengan kecepatan tertentu. Putaran ini merupakan hasil dari energi potensial air yang diubah menjadi energi kinetik saat air mengalir dari tempat yang lebih tinggi menuju tempat yang lebih rendah. Secara umum, prinsip kerja turbin air mirip dengan kincir angin, hanya saja sumber energi penggerakannya berasal dari aliran air, bukan dari hembusan angin.

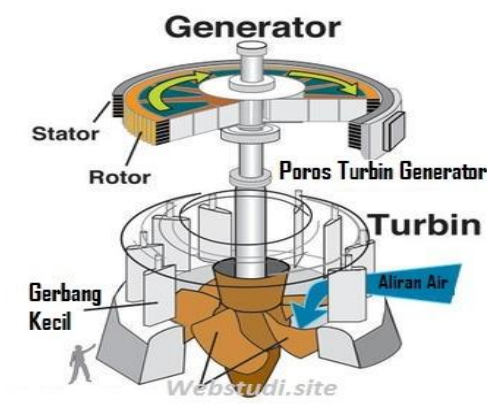
Ketika air mengenai sudu-sudu turbin, gaya dorong yang dihasilkan memutar poros turbin, yang kemudian dihubungkan dengan generator. Proses ini mengubah energi kinetik dari air menjadi energi mekanik melalui gerakan rotasi turbin. Energi mekanik tersebut selanjutnya diteruskan ke generator untuk diubah menjadi energi listrik yang siap digunakan.

Selain itu, efisiensi kerja turbin sangat dipengaruhi oleh debit air, tinggi jatuhnya (head), serta jenis turbin yang digunakan, seperti turbin Pelton, Francis, atau Kaplan, yang masing-masing dirancang untuk kondisi aliran air tertentu. Dengan perancangan dan pemilihan turbin yang tepat, energi air dapat dimanfaatkan secara optimal untuk menghasilkan listrik yang stabil dan berkelanjutan, menjadikan turbin air sebagai salah satu komponen utama dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA).

Spesifikasi Turbin :

1. Jenis turbin yang digunakan adalah turbin Crossflow (Banki), karena cocok untuk daerah dengan debit air sedang dan ketinggian jatuhnya (head) menengah.
2. Kapasitas daya turbin sebesar 6,25 kW, disesuaikan untuk menggerakkan generator berdaya 5 kW dengan memperhitungkan rugi efisiensi sistem.
3. Tinggi jatuhnya air (Head efektif) sebesar 15 meter.
4. Debit air ( $Q$ ) yang digunakan sebesar  $0,05 \text{ m}^3/\text{detik}$ .
5. Efisiensi turbin ( $\eta$ ) mencapai 85%, tergantung kondisi operasi dan kebersihan saluran air.

6. Kecepatan poros turbin sekitar 1500 rpm, disesuaikan dengan kecepatan sinkron generator agar daya maksimal dapat ditransfer.
7. Bahan runner (sudu turbin) terbuat dari baja tahan karat (stainless steel) untuk ketahanan terhadap korosi dan erosi air.
8. Poros turbin (shaft) menggunakan bahan baja karbon (carbon steel) yang kuat dan tahan terhadap torsi tinggi.
9. Diameter runner turbin berkisar antara 200–250 mm, tergantung pada rancangan debit dan head aktual di lapangan.
10. Jumlah nozzle yang digunakan sebanyak 2 buah, untuk memaksimalkan aliran air ke sudu turbin dan menyeimbangkan gaya putar.
11. Sistem transmisi antara turbin dan generator menggunakan kopling langsung (direct coupling) agar rugi daya mekanik minimal.
12. Turbin dilengkapi katup pengatur debit (guide vane) untuk mengontrol aliran air masuk dan menyesuaikan putaran turbin.
13. Sistem pelumasan menggunakan grease (pelumas padat) pada bantalan poros untuk mengurangi gesekan dan meningkatkan umur operasi.
14. Sistem pendinginan alami, tanpa pendingin tambahan, karena turbin bekerja pada suhu lingkungan dan air berfungsi sebagai pendingin alami.
15. Struktur rumah turbin (casing) dibuat dari baja ringan yang dilapisi anti karat agar tahan terhadap kelembaban tinggi di sekitar aliran air.



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.

Spesifikasi Generator :

1. Jenis generator yang digunakan adalah generator sinkron tiga fasa dengan kapasitas 5 kW.
2. Tegangan keluaran generator sebesar 380 Volt AC dengan frekuensi 50 Hz.
3. Faktor daya (power factor) ditetapkan sebesar 0,8 lagging.
4. Arus nominal generator adalah sekitar 7,6 Ampere.
5. Kecepatan putar rotor generator mencapai 1500 rpm, disesuaikan untuk sistem empat kutub.
6. Efisiensi generator ( $\eta_g$ ) mencapai 90%, sedangkan efisiensi turbin mikrohidro ( $\eta_t$ ) sebesar 85%.
7. Efisiensi total sistem ( $\eta_{total}$ ) adalah sekitar 89,6%, hasil perkalian antara efisiensi turbin dan generator.
8. Daya input mekanik ( $P_{in}$ ) dari turbin air ke generator sebesar 6,25 kW.
9. Daya output listrik ( $P_{out}$ ) yang dihasilkan generator sebesar 5,6 kW.
10. Generator menggunakan sistem pendingin udara (air-cooled) dengan bahan stator dan rotor tembaga serta baja silikon.
11. Sumber penggerak utama (prime mover) berasal dari turbin air tipe crossflow.
12. Generator diintegrasikan dengan panel surya 2 kWp, sehingga total daya sistem hybrid mencapai 7,6 kW, dengan daya bersih ke beban sekitar 6,47 kW setelah memperhitungkan efisiensi inverter.
13. Sistem dilengkapi Automatic Voltage Regulator (AVR) dan Miniature Circuit Breaker (MCB) untuk menjaga kestabilan dan proteksi generator.



Gambar 2.9 Generator

#### d. Jalur Trasmisi

Sistem transmisi listrik berfungsi untuk mengalirkan energi listrik yang dihasilkan dari Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) menuju rumah-rumah penduduk dan pusat-pusat industri. Energi listrik yang dihasilkan oleh turbin dan generator di PLTA disalurkan melalui jaringan transmisi bertegangan tinggi agar dapat menjangkau wilayah yang luas dengan efisiensi tinggi. Setelah melalui proses transmisi, listrik kemudian dialirkan ke jaringan distribusi untuk menurunkan tegangannya sehingga aman digunakan oleh masyarakat dan sektor industri.

Selain itu, sistem ini juga berperan penting dalam menjaga kestabilan pasokan listrik, memastikan energi yang dihasilkan tetap konstan, dan mengurangi kehilangan daya selama proses penyaluran. Dengan adanya sistem transmisi dan distribusi yang baik, energi listrik dari PLTA dapat dimanfaatkan secara optimal untuk menunjang kebutuhan hidup masyarakat serta mendukung aktivitas ekonomi dan industri di berbagai daerah.

Spesifikasi jalur transmisi :

1. Tegangan distribusi: 380 V AC, 3-fasa + netral (untuk jarak pendek/area lokal).
2. Kapasitas sistem yang dilayani:  $\sim 7,6$  kW (arus nominal  $\approx 14,4$  A pada PF = 0,8).
3. Konfigurasi kabel: 4-core (3P + N) untuk instalasi kabel bawah tanah/kanal; 3 konduktor + netral untuk overhead.
4. Jenis konduktor (underground): Kabel XLPE insulated, copper(Cu).

- a. Rekomendasi ukuran: 16 mm<sup>2</sup> Cu untuk margin arus ~50 A (cukup aman untuk 14–30 A + cadangan).
  - b. Alternatif ekonomis: 10 mm<sup>2</sup> Cu jika jarak sangat pendek dan tidak ada ekspansi beban.
5. Jenis konduktor (overhead): ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced).
    - a. Rekomendasi ukuran overhead untuk jarak menengah: 70–95 mm<sup>2</sup> ACSR jika perlu menyalurkan ke desa/antarlokasi; untuk pemasangan sederhana jarak pendek bisa pakai 25–50 mm<sup>2</sup> ACSR.
  6. Isolasi & proteksi kabel: XLPE untuk kabel bawah tanah; lapisan anti-mekanik (armored) bila melewati area terbuka.
  7. Sistem penyangga (overhead): tiang beton/tiang kayu untuk jarak pendek; tower baja untuk lintasan panjang/tegangan lebih tinggi.
  8. Insulator: keramik/komposit sesuai tipe tower/tiang untuk kondisi kelembaban tinggi.
  9. Perlengkapan proteksi: MCB/fuse pada sisi beban, MCCB/ACB pada sisi sumber; earth leakage / RCD untuk proteksi kebocoran; surge arrester untuk proteksi petir.
  10. Earthing (pentanahan): sistem pentanahan di tiap gardu/generator dan tiang utama, resistansi tanah target < 5 Ω untuk proteksi efektif.
  11. Sambungan mekanis: gunakan klem yang sesuai (compression lugs) dan sambungan tervulkanisasi untuk kabel bawah tanah.
  12. Sistem pengontrol tegangan: AVR pada generator + transformator step-down (jika ada perubahan tegangan).



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.



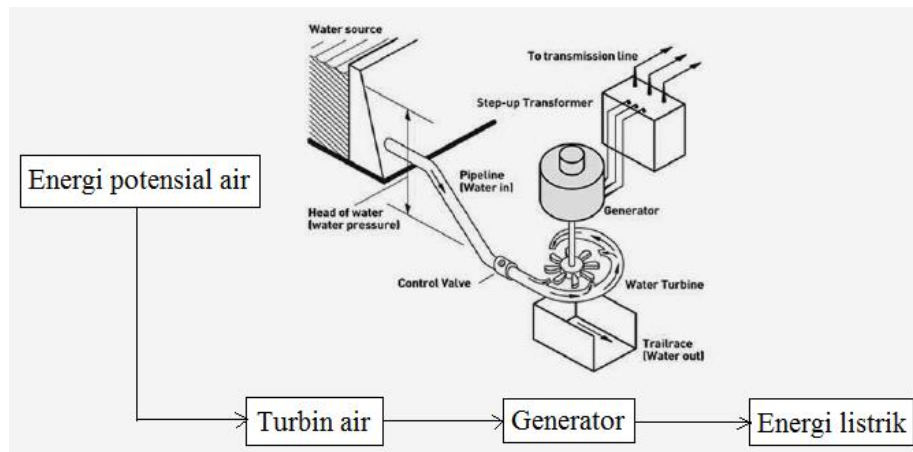
Gambar 2.11 Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid

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 dintegrasikan 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.

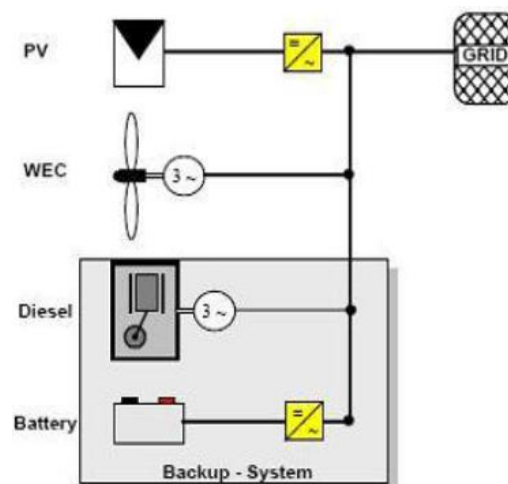


Gambar 2.12 Diagram Alur PLTH

#### Arsitektur Sistem Hibrid

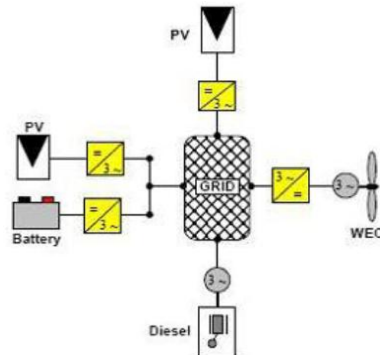
Karena karakteristik dari masing-masing pembangkit yang berbeda-beda, menyebabkan beberapa variasi dalam arsitektur sistem hibrid.

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



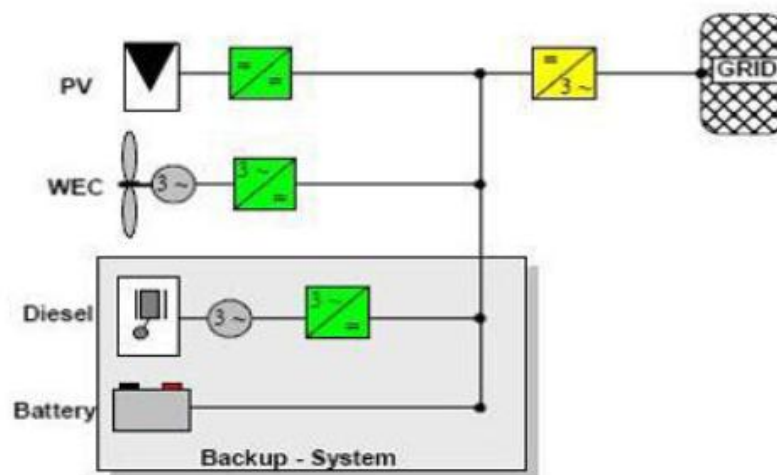
Gambar 2.13 Sistem backup dan pembangkit satu lokasi

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 mengumpukan ke grid (AC),seper



Gambar 2.15 Pembangkit dengan konversi AC/DC

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.

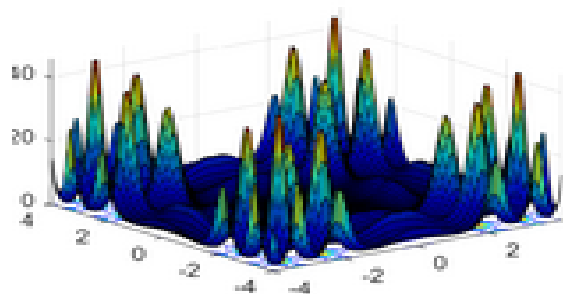
Sebagai solusi untuk daerah yang tidak terhubung langsung dengan jaringan listrik utama seperti PLN, sistem pembangkit hybrid yang menggabungkan berbagai sumber energi terbarukan menjadi pilihan yang ideal.

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 Firefly Algorithm (FA)

Menurut (Chandra et al., 2020) Berbagai teknik optimasi telah diusulkan untuk mendapatkan nilai parameter kontrol yang paling tepat, termasuk di antaranya penggunaan Particle Swarm Optimization (PSO) dan pendekatan multi-tujuan berbasis GA . Sebagai kelanjutan, peneliti kemudian mengusulkan Modified Firefly Algorithm (FA). Algoritma ini merupakan algoritma metaheuristik yang meniru perilaku berkedip pada kunang-kunang, di mana fungsi utama kunang-kunang adalah untuk menarik perhatian rekan-rekannya. Algoritma tersebut pertama kali diperkenalkan oleh Dr. Xin-She Yang (Slowik, 2020) dan digunakan untuk mengoptimalkan parameter PID SMES dengan meminimalkan nilai Integral Time Absolute Error (ITAE).



Gambar 2.16 Firefly Algorithm

Algoritma Firefly (FA) merupakan metode pencarian yang terinspirasi dari fenomena alam dan dikenal karena kesederhanaannya serta kemampuannya dalam melakukan optimasi global secara efektif. Sejak pertama kali dikembangkan, algoritma ini telah mendapatkan perhatian luas dan semakin sering digunakan untuk menyelesaikan berbagai permasalahan nyata. FA termasuk dalam kategori algoritma kecerdasan kolektif yang meniru perilaku cahaya yang dipancarkan oleh kunang-kunang. Cahaya tersebut digunakan sebagai sinyal untuk menarik perhatian kunang-kunang lain, baik untuk tujuan mencari makan maupun proses reproduksi.

Perilaku alami ini kemudian dimodelkan ke dalam sebuah algoritma meta-heuristik berdasarkan tiga prinsip dasar :

- a. Semua kunang-kunang saling tertarik satu sama lain tanpa memandang jenis kelaminnya.
- b. Tingkat ketertarikan antara kunang-kunang sebanding dengan tingkat kecerahannya, sehingga kunang-kunang yang kurang terang akan bergerak menuju yang lebih terang.
- c. Jika tidak ada kunang-kunang lain yang lebih terang dari suatu individu, maka ia akan bergerak secara acak dalam ruang pencarian.

#### Algoritma kunang-kunang

Algoritma kunang-kunang (FA) adalah metode optimasi yang terinspirasi dari alam yang memelihara populasi kunang-kunang untuk menemukan optimum global dari suatu masalah optimasi.

Dalam FA, jarak antara dua kunang-kunang  $i$  dan  $j$ , masing-masing, dapat didefinisikan sebagai jarak Euclidean  $r_{ij}$ , yang diformulasikan sebagai berikut,

$$r_{ij} = \|X_i - X_j\| = \sqrt{\sum_{d=1}^D (x_{i,d} - x_{j,d})^2} \quad (1)$$

di mana:

- $r_{ij}$ : Jarak Euclidean antara dua titik atau individu ke- $i$  dan ke- $j$ .
- $\|x_i - x_j\|$  : Notasi normal (panjang) dari selisih vektor  $x_i$  dan  $x_j$ .
- $D$ : Dimensi ruang atau jumlah fitur/variabel dalam setiap vektor  $x$ .

- $x_{i,d}$  : Komponen ke-  $d$  dari vektor  $x_i$ , yaitu nilai fitur ke- $d$  dari individu ke-  $j$ .
- $x_{j,d}$  : Komponen ke-  $d$  dari vektor  $x_j$ , yaitu nilai fitur ke- $d$  dari individu ke-  $j$ .

di mana  $D$  adalah dimensi dari masalah optimasi.

Sesungguhnya, semakin besar jarak rij, semakin sedikit cahaya yang dapat dilihat kunang-kunang dari satu sama lain.

Hubungan antara  $A_c$ ,  $s$ , dan  $r$ . Ketika  $s$  dan  $r$  meningkat,  $A_c$  akan menurun sementara nilai  $A_c$  akan meningkat tajam ketika  $s$  dan  $r$  sangat kecil (atau besar). Fungsi intensitas cahaya dan daya tarik yang menurun secara monoton, masing-masing disajikan dalam persamaan (2) dan (3).

$$I(r) = I_0 e^{-\gamma r^2} \quad (2)$$

di mana:

- $I(r)$  : Intensitas cahaya atau tingkat daya tarik pada jarak  $r$ .
- $I_0$  : Intensitas cahaya awal atau maksimum saat jarak  $r = 0$ .
- $\gamma$  (gamma): Koefisien penyerapan cahaya, yang menentukan seberapa cepat intensitas berkurang terhadap jarak. Nilai  $\gamma$  besar berarti cahaya cepat redup seiring bertambahnya jarak.
- $r$  : Jarak antara dua firefly (kunang-kunang), biasanya dihitung menggunakan jarak Euclidean seperti pada rumus sebelumnya.

Di mana  $I_0$  adalah intensitas cahaya awal, dan  $c$  adalah koefisien penyerapan cahaya, yang mengendalikan penurunan intensitas cahaya. Dengan demikian, daya tarik  $b$  kunang-kunang didefinisikan seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (3).

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (3)$$

di mana:

- $\beta(r)$  : Fungsi daya tarik antara dua firefly yang berjarak  $r$ . Semakin dekat jaraknya, semakin besar daya tariknya.
- $\beta_0$  : Nilai daya tarik maksimum ketika jarak  $r = 0$ . Ini biasanya merupakan konstanta yang ditentukan dalam inisialisasi algoritma.
- $\gamma$ : Parameter koefisien penyerapan cahaya (light absorption coefficient). Menentukan seberapa cepat daya tarik menurun terhadap jarak. Semakin besar  $\gamma$ , semakin cepat daya tarik menurun.

- $r$  : Jarak antara dua firefly.

Di mana  $b_0$  adalah konstanta, yang merupakan daya tarik pada  $r \sim 0$ .

Langkah kunang-kunang  $i$  tertarik untuk pindah ke kunang-kunang lain yang lebih menarik (lebih terang)  $j$  ditentukan oleh.

$$\Delta X(t) = \beta \cdot (X_i(t) - X_j(t)) + \alpha(e_t - c) \quad (4)$$

di mana:

- $\Delta x_i(t)$  : Perubahan posisi firefly ke- $i$  pada iterasi ke- $t$ .
- $\beta$  : Fungsi daya tarik antara firefly ke- $i$  dan firefly ke- $j$ .
- $x_j(t)$  dan  $x_i(t)$ : Posisi dari firefly ke- $j$  dan ke- $i$  pada iterasi ke- $t$ . Firefly  $i$  akan bergerak menuju firefly  $j$  yang lebih terang.
- $\alpha$ : Koefisien acak (randomization parameter) yang mengontrol besarnya gangguan acak (eksplorasi global).
- $e_t$ : Vektor acak yang diambil dari distribusi uniform atau Gaussian (bergantung implementasi), digunakan untuk memberi elemen acak dalam pergerakan.
- $c$ : Titik pusat atau vektor koreksi (kadang bernilai nol), bergantung pada skema eksplorasi yang dipakai.

Di mana  $c$  adalah vektor konstan  $[0.5, 0.5, \dots, 0.5]^D$  dan  $t$  adalah langkah waktu,  $e_t$  diambil dari distribusi normal  $N(0,1)$ .  $\Delta x$  adalah ukuran langkah kunang-kunang ke  $i$  yang bergerak. Suku pertama adalah tarikan dari kunang-kunang ke  $j$ , sedangkan suku kedua adalah pengacakan yang dikendalikan oleh  $\alpha$ , yang merupakan konstanta dalam rentang  $(0,1)$ . Oleh karena itu, pembaruan kunang-kunang ke  $i$  diformulasikan sebagai berikut.

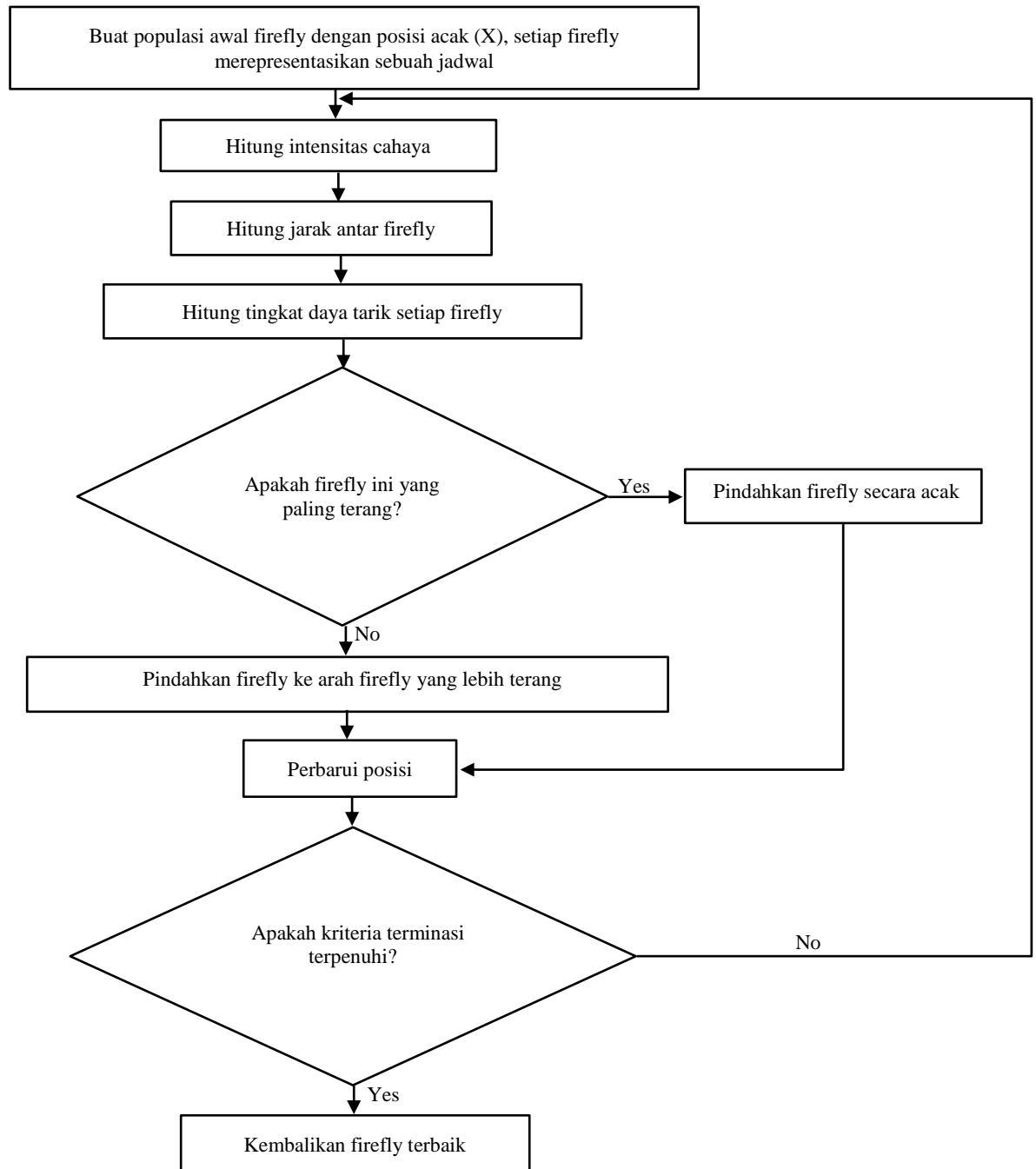
$$x_j(t+1) = x_j(t) + \Delta x_j(t) \quad (5)$$

di mana:

- $x_i(t+1)$  : Posisi baru dari firefly ke- $i$  pada iterasi ke- $t+1$ .
- $x_i(t)$  : Posisi saat ini dari firefly ke- $i$  pada iterasi ke- $t$ .
- $\Delta x_i(t)$  : Perubahan posisi firefly ke- $i$  pada iterasi ke- $t$ , yang dihitung berdasarkan fungsi daya tarik dan komponen acak.

Persamaan (4) dan (5) menunjukkan bahwa kunang-kunang ke  $i$  akan bergerak ke arah kunang-kunang ke  $j$  yang lebih menarik.

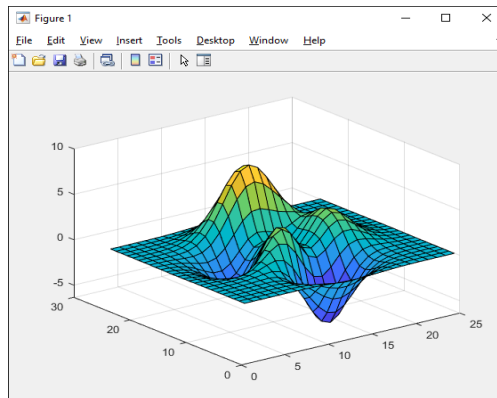
## 2.5 Diagram Alir Firefly Algorithm



Gambar 2.17 Diagram Alir Firefly Algorithm

### 2.2.5 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:

1. Komputasi Paralel
2. Matematika, Statistik, dan Optimisasi
3. Sistem Kendali
4. Pengolahan Sinyal dan Komunikasi Nirkabel
5. Pengolahan Citra dan Visi Komputer
6. Pengukuran dan Pengujian
7. Keuangan Komputasional
8. Biologi Komputasional
9. Generasi Kode
10. Penyebaran Aplikasi
11. 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 (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 MATLAB	Melakukan perhitungan dan simulasi optimasi sistem menggunakan metode Firefly Algorithm (FA).

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

### 3.3 Jalannya Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan sistem pembangkit listrik hybrid yang memadukan dua sumber energi terbarukan, yaitu mikrohidro dan tenaga surya (fotovoltaik). Kombinasi kedua sumber energi ini dipilih karena keduanya memiliki karakteristik yang saling melengkapi. Energi surya sangat

bergantung pada intensitas cahaya matahari dan kondisi cuaca, sementara energi mikrohidro lebih stabil karena memanfaatkan debit air yang relatif konstan sepanjang tahun. Dengan demikian, penggabungan kedua sistem ini diharapkan dapat menghasilkan pasokan energi listrik yang lebih stabil, efisien, dan berkelanjutan, terutama di wilayah-wilayah yang belum terjangkau jaringan listrik PLN.

Sistem hybrid ini dirancang agar mampu menyeimbangkan suplai energi antara dua sumber utama panel surya dan turbin mikrohidro serta mengoptimalkan penggunaan energi yang tersimpan dalam baterai untuk menjaga kontinuitas pasokan listrik. Dalam konteks penerapannya di daerah terpencil, sistem seperti ini dapat meningkatkan kemandirian energi masyarakat, mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil, dan mendukung program pemerintah dalam pengembangan energi baru terbarukan (EBT) yang ramah lingkungan.

Untuk memperoleh performa sistem yang maksimal, penelitian ini menggunakan metode Firefly Algorithm (FA) sebagai teknik optimasi utama. Firefly Algorithm merupakan salah satu algoritma optimasi berbasis kecerdasan buatan (Artificial Intelligence) yang diilhami oleh perilaku alami kunang-kunang (firefly) dalam menarik pasangan melalui intensitas cahaya yang dihasilkan. Secara konseptual, setiap individu kunang-kunang di dalam algoritma merepresentasikan sebuah solusi kandidat, dan tingkat kecerahan cahayanya menggambarkan nilai fungsi objektif dari solusi tersebut. Kunang-kunang dengan intensitas cahaya lebih tinggi akan menarik kunang-kunang lain untuk bergerak mendekatinya, sehingga secara iteratif seluruh populasi akan bergerak menuju solusi optimal.

Dalam konteks teknik dan sistem energi, algoritma ini digunakan untuk mencari kombinasi parameter terbaik dari komponen-komponen pembangkit hybrid, seperti kapasitas panel surya, kapasitas turbin mikrohidro, ukuran baterai penyimpanan energi, serta strategi pengaturan beban listrik. Dengan menerapkan Firefly Algorithm, proses pencarian solusi optimal dapat dilakukan secara efisien dan adaptif, bahkan untuk fungsi objektif yang bersifat non-linear, kompleks, atau memiliki banyak variabel keputusan. Hal ini menjadikan FA sangat cocok

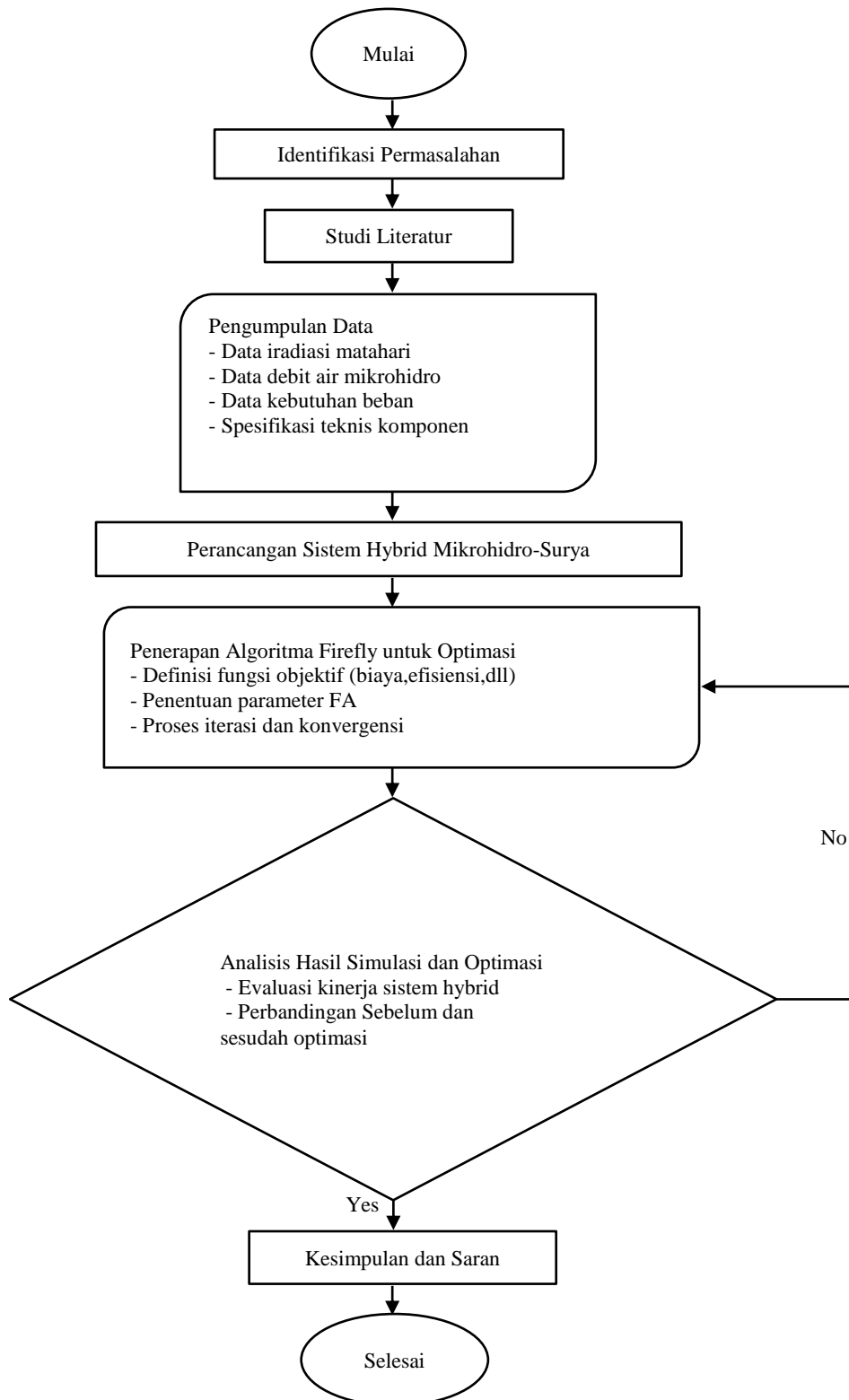
digunakan dalam optimasi sistem pembangkit listrik hybrid yang memiliki banyak komponen dan keterkaitan antar variabel.

Proses pengolahan data, perhitungan matematis, dan simulasi dilakukan dengan bantuan perangkat lunak MATLAB, yang memiliki kemampuan komputasi numerik tinggi dan mendukung berbagai fungsi pemodelan serta visualisasi. MATLAB digunakan untuk membangun model matematis sistem hybrid, mengimplementasikan algoritma Firefly, serta melakukan analisis sensitivitas terhadap parameter-parameter utama sistem. Dengan menggunakan MATLAB, penelitian ini dapat mensimulasikan berbagai skenario operasional, mengevaluasi performa sistem dalam kondisi tertentu, dan menentukan konfigurasi sistem yang paling efisien dari segi energi dan biaya.

Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengevaluasi keandalan sistem hybrid dalam jangka panjang, termasuk bagaimana sistem merespons perubahan kondisi lingkungan seperti variasi intensitas cahaya matahari, fluktuasi debit air, serta kebutuhan beban listrik yang berubah-ubah. Melalui pendekatan berbasis optimasi, sistem dapat dikonfigurasi agar mampu beradaptasi terhadap perubahan kondisi tersebut tanpa mengorbankan efisiensi atau kestabilan daya keluaran.

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dan praktis dalam pengembangan sistem pembangkit listrik hybrid di Indonesia. Dari sisi ilmiah, penelitian ini dapat menjadi referensi untuk penerapan algoritma optimasi cerdas dalam bidang energi terbarukan, khususnya dalam perancangan dan pengelolaan sistem hybrid multi-sumber. Sementara dari sisi praktis, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran konfigurasi sistem yang optimal, baik dalam hal efisiensi energi, biaya investasi, maupun keberlanjutan operasional.

Lebih jauh, hasil penelitian ini juga diharapkan dapat diterapkan di daerah-daerah terpencil, pedesaan, maupun kawasan perbatasan yang masih mengalami keterbatasan pasokan listrik. Dengan memanfaatkan potensi energi lokal berupa air dan sinar matahari, sistem hybrid mikrohidro surya dapat menjadi solusi yang mandiri, ramah lingkungan, dan berkelanjutan untuk mendukung peningkatan kualitas hidup masyarakat serta mendorong pertumbuhan ekonomi daerah melalui akses energi yang lebih merata.



Gambar 3.2 Bagan Alir Penelitian

## **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **4.1. Analisis dan Optimalisasi Sistem Pembangkit Listrik Hybrid Menggunakan Firefly Algorithm (FA)**

Analisis terhadap sistem pembangkit listrik hybrid diperlukan untuk memahami sejauh mana kombinasi sumber energi terbarukan dapat dimanfaatkan secara optimal dalam memenuhi kebutuhan beban listrik. Sistem hybrid yang menggabungkan energi surya (PV) dan mikrohidro memiliki keunggulan dari sisi keberlanjutan, namun juga menghadapi tantangan akibat fluktuasi intensitas matahari dan debit air. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode optimasi yang mampu menyeimbangkan ketersediaan daya dengan permintaan beban secara dinamis. Firefly Algorithm (FA) hadir sebagai salah satu pendekatan metaheuristik yang banyak digunakan karena kemampuannya dalam menyelesaikan permasalahan optimasi non-linear dengan hasil yang cepat dan efisien.

Optimalisasi menggunakan FA bertujuan untuk menghasilkan distribusi daya yang paling sesuai sehingga total daya optimal mendekati atau setara dengan kebutuhan beban. Dengan mekanisme pencarian solusi berbasis perilaku kunang-kunang, FA dapat menyesuaikan kombinasi daya PV dan mikrohidro secara adaptif mengikuti kondisi sistem tiap periode. Hasil optimasi ini tidak hanya memberikan efisiensi penggunaan sumber energi, tetapi juga meningkatkan keandalan sistem dalam jangka panjang. Oleh karena itu, penerapan FA dalam analisis dan optimalisasi pembangkit listrik hybrid menjadi dasar penting sebelum membahas lebih lanjut implementasinya dalam distribusi daya.

#### **4.1.1. Implementasi Firefly Algorithm (FA) untuk Distribusi Daya**

Firefly Algorithm (FA) merupakan salah satu metode optimasi yang terinspirasi dari perilaku kunang-kunang yang saling menarik berdasarkan cahaya yang dipancarkan. Dalam algoritma ini, cahaya digunakan sebagai simbol kualitas solusi. Semakin baik suatu solusi misalnya dari segi biaya yang lebih rendah atau efisiensi yang lebih tinggi maka solusi tersebut dianggap semakin terang dan mampu menarik solusi lain untuk

mendekat.

Dalam penerapannya pada sistem distribusi daya, setiap kunang-kunang merepresentasikan alternatif solusi dalam pembagian energi dari berbagai sumber, seperti mikrohidro dan tenaga surya. Solusi yang memiliki kualitas lebih baik akan menjadi acuan, sehingga solusi lainnya secara bertahap bergerak mendekati solusi terbaik tersebut.

Proses ini berlangsung secara berulang melalui iterasi. Pada setiap iterasi, posisi kunang-kunang diperbarui berdasarkan tingkat ketertarikan terhadap solusi yang lebih baik. Seiring waktu, semua solusi akan berkumpul pada titik optimum, sehingga menghasilkan distribusi daya yang lebih efisien, seimbang, dan mampu mengurangi biaya operasional.

Keunggulan metode ini terletak pada kemampuannya dalam menyelesaikan permasalahan yang kompleks dan melibatkan banyak variabel, serta kemampuannya untuk menghindari solusi yang kurang optimal. Oleh karena itu, Firefly Algorithm banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang, khususnya dalam optimasi sistem energi seperti pembangkit listrik hybrid.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Optimasi pembangkit listrik hybrid berbasis Mikrohidro dan PV dengan implementasi Firefly Algorithm (FA) terbukti meningkatkan distribusi daya dan efisiensi sistem. Pada tahun 2023 dan 2024, daya optimal mendekati kebutuhan beban dengan efisiensi hingga 100%, menunjukkan FA efektif menyeimbangkan pasokan energi terbarukan dengan kebutuhan beban listrik.
2. Pada tahun 2025, optimasi dengan FA menunjukkan keterbatasan karena pasokan energi PV dan Mikrohidro menurun drastis, sehingga daya optimal pada banyak bulan tidak tercapai ( $Total\_opt = 0$ ) dan efisiensi sistem rendah. Hal ini menegaskan bahwa meskipun hasil sesudah optimasi berbantu MATLAB lebih baik dibanding sebelum optimasi pada periode awal, keberhasilan tetap sangat dipengaruhi oleh ketersediaan energi primer dan kapasitas baterai. Dengan demikian, FA tidak dapat berdiri sendiri untuk menjamin kinerja sistem hybrid secara berkelanjutan.

#### **5.2 Saran**

Berdasarkan kesimpulan yang telah diuraikan di atas, maka penulis akan memberikan beberapa saran sebagai berikut:

1. Diperlukan peningkatan kapasitas penyimpanan energi dan strategi manajemen yang adaptif agar energi surplus dapat dimanfaatkan saat defisit, sehingga ketergantungan pada kondisi alam berkurang dan kinerja optimasi lebih stabil.
2. Penelitian selanjutnya disarankan mengombinasikan Firefly Algorithm (FA) dengan metode optimasi lain serta mempertimbangkan aspek ekonomi, agar hasil optimasi lebih robust dan aplikatif untuk implementasi nyata.

## 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., Sutantyo, T. E. P., & Bachtiar, A. N. (2021). Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (Pltmh) Memanfaatkan Air Buangan Rumah Tangga Di Nagari Sawah Tangah, 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>



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

LEMBAR ASISTENSI BIMBINGAN

NAMA : IWAN PRAYOGO  
 NPM : 2107220053  
 JUDUL : ANALISIS OPTIMASI PEMBANGKIT LISTRIK HYBRID BERBASIS MIKROHIDRO DAN SURYA MENGGUNAKAN METODE FIREFLAY ALGORITHM (FA) BERBANTU MATLAB

No.	TANGGAL	KETERANGAN	PARAF
		Perbaikan Judul dan Bab I	<i>mf</i>
		Perbaikan Rata Tuisan pada Bab II	<i>mf</i>
		Penambahan Diagram Alir (FA) pada Bab II	<i>mf</i>
		Perbaikan Diagram Alir Bab II dan Bab III	<i>mf</i>
		Perbaikan Daftar Pustaka Bab III	<i>mf</i>
	26/6 2025	UAc seminar proposal	<i>Rimbawati</i>

Dosen Pembimbing

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 : Iwan Prayogo  
 NPM : 2107220053  
 JUDUL : Analisis Optimasi Pembangkit Listrik Hybrid Berbasis Mikrohidro dan Surya  
 Menggunakan Metode Firefly Algorithm (FA) Berbantu MATLAB

No.	TANGGAL	KETERANGAN	PARAF
	22/9 2025	Perbaiki bab IV tulisannya tidak boleh di singkat	
	23/9 2025	Perbaiki tabel pada bab IV	
	29/9 2025	Perbaiki Grafik sesuai dengan urutan bulan dan sesuai dengan tabel	
	30/9 2025	Penghapusan nama kutipan pada bab IV dan di jabarkan lagi melalui pemikiran sendiri	
	6/10 2025	Perbaiki nomor halaman	
	7/10 2025	Penambahan kutipan pada bab II	
		UCC semhas 13/10 2025	

Dosen Pembimbing

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 : Iwan Prayogo  
 NPM : 2107220053  
 JUDUL : Analisis Optimasi Pembangkit Listrik Hybrid Berbasis Mikrohidro dan Surya  
 Menggunakan Metode Firefly Algorithm (FA) Berbantu MATLAB

No.	TANGGAL	KETERANGAN	PARAF
	26/1/2026	Perbaiki rata kanan dan rata kiri pada Bab III pada Jalan Penelitian	<i>[Signature]</i>
	27/1/2026	Perbaiki nomor halaman pada LAMPIRAN	<i>[Signature]</i>
	Acc 31/1/2026		<i>[Signature]</i>

Dosen Pembimbing

Dr. Rimbawati, S.T., M.T

## DAFTAR RIWAYAT HIDUP



### DATA DIRI PENULIS

Nama : Iwan Prayogo  
 NPM : 2107220053  
 Tempat, Tanggal Lahir : Aek Korsik, 21 Agustus 2001  
 Jenis Kelamin : Laki-laki  
 Alamat : Dusun IV Patok Besi  
 Agama : Islam  
 Pekerjaan : Mahasiswa  
 No. Telp : 081265772119  
 Email : iwanprayogo2@gmail.com

### DATA DIRI ORANG TUA

Nama Ayah : Anwar  
 Agama : Islam  
 Nama Ibu : Anik  
 Agama : Islam  
 Alamat : Dusun IV Patok Besi

### RIWAYAT PENDIDIKA

2007 - 2015 : SD Negeri 117860 Patok Besi  
 2015 - 2018 : MTS Al-Barakah Aek Hitetoras  
 2018 - 2021 : SMKS Al- Washliyah 2 Marbau  
 2021 - 2026 : S1 Teknik Elektro Universitas  
 Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU)

# Analisis Optimasi Pembangkit Listrik Hybrid Berbasis Mikrohidro dan Surya Menggunakan Metode Firefly Algorithm (FA) Berbantu MATLAB

Iwan Prayogo<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: [iwanprayogo723@gmail.com](mailto:iwanprayogo723@gmail.com)

**Abstrak**— Energi listrik merupakan kebutuhan penting, namun ketergantungan pada energi fosil menimbulkan masalah keterbatasan pasokan dan pencemaran lingkungan. Sistem pembangkit listrik hybrid berbasis mikrohidro dan surya menjadi alternatif energi terbarukan, tetapi masih menghadapi kendala dalam distribusi daya agar efisien dan stabil. Penelitian ini menerapkan Firefly Algorithm (FA) sebagai metode optimasi untuk meningkatkan pengaturan distribusi daya pada sistem hybrid. Dibandingkan metode konvensional seperti Genetic Algorithm (GA) dan Particle Swarm Optimization (PSO), FA memiliki kemampuan eksplorasi solusi yang lebih luas dan konvergensi lebih cepat. Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB pada PLTMH di Dusun Bintang Asih, Desa Rumah Sumbul Tiga Juhar, Kecamatan STM Hulu, Kabupaten Deli Serdang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada tahun 2023–2024, penerapan FA mampu meningkatkan distribusi daya dan efisiensi sistem hingga mendekati 100% karena pasokan energi dapat disesuaikan dengan kebutuhan beban. Namun, pada tahun 2025 efisiensi menurun akibat berkurangnya pasokan energi mikrohidro dan PV sehingga banyak kondisi tidak mencapai daya optimal. Penelitian ini menunjukkan bahwa keberhasilan FA tetap dipengaruhi oleh ketersediaan energi primer dan kapasitas baterai sistem hybrid.

**Kata kunci** : Hybrid Pembangkit Listrik, Firefly Algorithm, Efisiensi Energi

**Abstract**—Electricity is an essential need, but reliance on fossil fuels poses problems of limited supply and environmental pollution. Hybrid power generation systems based on micro-hydro and solar energy offer a renewable energy alternative, but they still face challenges in ensuring efficient and stable power distribution. This study applies the Firefly Algorithm (FA) as an optimization method to improve power distribution control in hybrid systems. Compared to conventional methods such as the Genetic Algorithm (GA) and Particle Swarm Optimization (PSO), the FA offers broader solution exploration capabilities and faster convergence. Simulations were conducted using MATLAB at the micro-hydro power plant in Bintang Asih Hamlet, Rumah Sumbul Tiga Juhar Village, STM Hulu Subdistrict, Deli Serdang Regency. The results indicate that from 2023 to 2024, the application of FA was able to improve power distribution and system efficiency to nearly 100% because energy supply could be adjusted to meet load demand. However, by 2025, efficiency declines due to reduced micro-hydro and PV energy supply, resulting in many conditions failing to achieve optimal power. This study demonstrates that the success of the FA remains influenced by the availability of primary energy and the battery capacity of the hybrid system.

**Keywords:** Hybrid Power Plant, Firefly Algorithm, Energy Efficiency

## 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.

Firefly Algorithm (FA) 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 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.

Algoritma Firefly (FA) 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 FA 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 FA 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 FA.

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 Firefly Algorithm (FA)?
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 Firefly Algorithm (FA) 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 Firefly Algorithm (FA) 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 Firefly Algorithm (FA) 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) Algoritma Firefly (FA) 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 (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 (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 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 (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., 2024) Firefly Algorithm (FA) dalam optimasi sistem hibrida pembangkit energi terbarukan di Sumatera Utara mampu meningkatkan kapasitas daya dan stabilitas sistem secara signifikan. Melalui analisis komparatif terhadap nilai minimum, maksimum, rata-rata, dan deviasi standar kapasitas daya, Pembangkit listrik berbasis mikrohidro, tenaga air, panas bumi, biomassa, biogas, dan tenaga surya berhasil dioptimalkan dengan baik, di mana mikrohidro menunjukkan performa tertinggi pada pengujian pertama sebesar 2724,1269 MW, sementara tenaga surya mencapai hasil optimal pada pengujian ketiga sebesar 2652,2975 MW.

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 3.2 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 3.3 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 (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 MATLAB	Melakukan perhitungan dan simulasi optimasi sistem menggunakan metode Firefly Algorithm (FA).

Tabel 3.4 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.
12.	Kamera / Smartphone	Mendokumentasikan proses penelitian dan hasil uji sistem untuk laporan dan evaluasi.

### C. Jalannya Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan sistem pembangkit listrik hybrid yang memadukan dua sumber energi terbarukan, yaitu mikrohidro dan tenaga surya (fotovoltaik). Kombinasi kedua sumber energi ini dipilih karena keduanya memiliki karakteristik yang saling melengkapi. Energi surya sangat bergantung pada intensitas cahaya matahari dan kondisi cuaca, sementara energi mikrohidro lebih stabil karena memanfaatkan debit air yang relatif konstan sepanjang tahun. Dengan demikian, penggabungan kedua sistem ini diharapkan dapat menghasilkan pasokan energi listrik yang lebih stabil, efisien, dan berkelanjutan, terutama di wilayah-wilayah yang belum terjangkau jaringan listrik PLN.

Sistem hybrid ini dirancang agar mampu menyeimbangkan suplai energi antara dua sumber utama panel surya dan turbin mikrohidro serta mengoptimalkan penggunaan energi yang tersimpan dalam baterai untuk menjaga kontinuitas pasokan listrik. Dalam konteks penerapannya di daerah terpencil, sistem seperti ini dapat meningkatkan kemandirian energi masyarakat, mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil, dan mendukung program pemerintah dalam pengembangan energi baru terbarukan (EBT) yang ramah lingkungan.

Untuk memperoleh performa sistem yang maksimal, penelitian ini menggunakan metode Firefly Algorithm (FA) sebagai teknik optimasi utama.

Firefly Algorithm merupakan salah satu algoritma optimasi berbasis kecerdasan buatan (Artificial Intelligence) yang diilhami oleh perilaku alami kunang-kunang (firefly) dalam menarik pasangan melalui intensitas cahaya yang dihasilkan. Secara konseptual, setiap individu kunang-kunang di dalam algoritma merepresentasikan sebuah solusi kandidat, dan tingkat kecerahan cahayanya menggambarkan nilai fungsi objektif dari solusi tersebut. Kunang-kunang dengan intensitas cahaya lebih tinggi akan menarik kunang-kunang lain untuk bergerak mendekatinya, sehingga secara iteratif seluruh populasi akan bergerak menuju solusi optimal.

Dalam konteks teknik dan sistem energi, algoritma ini digunakan untuk mencari kombinasi parameter terbaik dari komponen-komponen pembangkit hybrid, seperti kapasitas panel surya, kapasitas turbin mikrohidro, ukuran baterai penyimpanan energi, serta strategi pengaturan beban listrik. Dengan menerapkan Firefly Algorithm, proses pencarian solusi optimal dapat dilakukan secara efisien dan adaptif, bahkan untuk fungsi objektif yang bersifat non-linear, kompleks, atau memiliki banyak variabel keputusan. Hal ini menjadikan FA sangat cocok digunakan dalam optimasi sistem pembangkit listrik hybrid yang memiliki banyak komponen dan keterkaitan antar variabel.

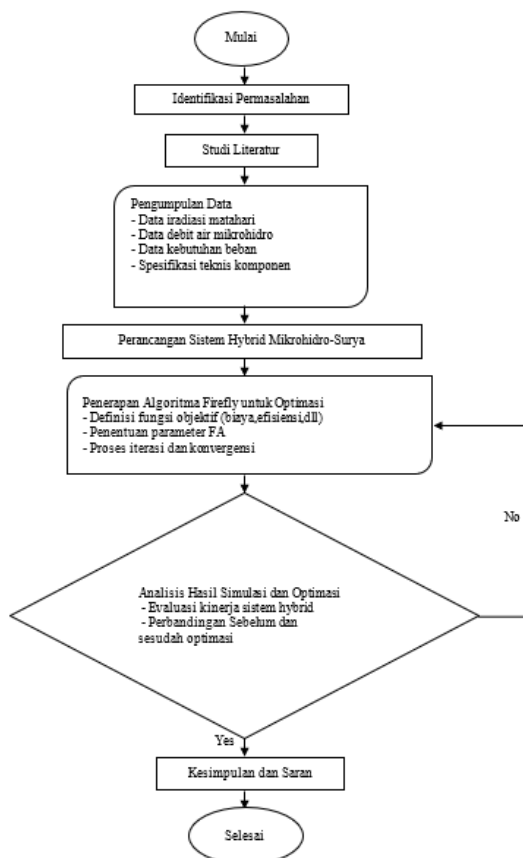
Proses pengolahan data, perhitungan matematis, dan simulasi dilakukan dengan bantuan perangkat lunak MATLAB, yang memiliki kemampuan komputasi numerik tinggi dan mendukung berbagai fungsi pemodelan serta visualisasi. MATLAB digunakan untuk membangun model matematis sistem hybrid, mengimplementasikan algoritma Firefly, serta melakukan analisis sensitivitas terhadap parameter-parameter utama sistem. Dengan menggunakan MATLAB, penelitian ini dapat mensimulasikan berbagai skenario operasional, mengevaluasi performa sistem dalam kondisi tertentu, dan menentukan konfigurasi sistem yang paling efisien dari segi energi dan biaya.

Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengevaluasi keandalan sistem hybrid dalam jangka panjang, termasuk bagaimana sistem merespons perubahan kondisi lingkungan seperti variasi intensitas cahaya matahari, fluktuasi debit air, serta kebutuhan beban listrik yang berubah-ubah. Melalui pendekatan berbasis optimasi, sistem dapat dikonfigurasi agar mampu beradaptasi terhadap perubahan kondisi tersebut tanpa mengorbankan efisiensi atau kestabilan daya keluaran.

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dan praktis dalam pengembangan sistem pembangkit listrik hybrid di Indonesia. Dari sisi ilmiah, penelitian ini dapat menjadi referensi untuk penerapan algoritma optimasi cerdas dalam bidang energi terbarukan, khususnya dalam perancangan dan pengelolaan sistem hybrid

multi-sumber. Sementara dari sisi praktis, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran konfigurasi sistem yang optimal, baik dalam hal efisiensi energi, biaya investasi, maupun keberlanjutan operasional.

Lebih jauh, hasil penelitian ini juga diharapkan dapat diterapkan di daerah-daerah terpencil, pedesaan, maupun kawasan perbatasan yang masih mengalami keterbatasan pasokan listrik. Dengan memanfaatkan potensi energi lokal berupa air dan sinar matahari, sistem hybrid mikrohidro surya dapat menjadi solusi yang mandiri, ramah lingkungan, dan berkelanjutan untuk mendukung peningkatan kualitas hidup masyarakat serta mendorong pertumbuhan ekonomi daerah melalui akses energi yang lebih merata.



Gambar 3.2 Bagan Alir Penelitian

## IV. Hasil dan Pembahasan

### 4.1. Analisis dan Optimalisasi Sistem

#### Pembangkit Listrik Hybrid

#### Menggunakan Firefly Algorithm (FA)

Analisis terhadap sistem pembangkit listrik hybrid diperlukan untuk memahami sejauh mana kombinasi sumber energi terbarukan dapat dimanfaatkan secara optimal dalam memenuhi kebutuhan beban listrik. Sistem hybrid yang menggabungkan energi surya (PV) dan mikrohidro memiliki keunggulan dari sisi keberlanjutan, namun juga menghadapi tantangan akibat fluktuasi intensitas matahari dan debit air. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode optimasi yang mampu menyeimbangkan ketersediaan daya dengan permintaan beban secara dinamis. Firefly Algorithm (FA) hadir sebagai salah satu pendekatan metaheuristik yang banyak digunakan karena kemampuannya dalam menyelesaikan permasalahan optimasi non-linear dengan hasil yang cepat dan efisien.

Optimalisasi menggunakan FA bertujuan untuk menghasilkan distribusi daya yang paling sesuai sehingga total daya optimal mendekati atau setara dengan kebutuhan beban. Dengan mekanisme pencarian solusi berbasis perilaku kunang-kunang, FA dapat menyesuaikan kombinasi daya PV dan mikrohidro secara adaptif mengikuti kondisi sistem tiap periode. Hasil optimasi ini tidak hanya memberikan efisiensi penggunaan sumber energi, tetapi juga meningkatkan keandalan sistem dalam jangka panjang. Oleh karena itu, penerapan FA dalam analisis dan optimalisasi pembangkit listrik hybrid menjadi dasar penting sebelum membahas lebih lanjut implementasinya dalam distribusi daya.

#### 4.1.1. Implementasi Firefly Algorithm (FA) untuk Distribusi Daya

Dalam sistem hybrid Mikrohidro-Photovoltaic (PV), Firefly Algorithm (FA) digunakan untuk mengoptimalkan pembagian daya tiap bulan agar lebih efisien. Tabel berikut menampilkan hasil daya optimal (Power

Photovoltaic Optimal dan Power Hydro Optimal) dibandingkan dengan beban aktual (P\_load) setelah proses optimasi.

Tabel 4.1. Hasil Distribusi Daya Optimal Sistem Hybrid (kW) Tahun 2023-2025

Tahun 2023					Tahun 2024				Tahun 2025			
Bulan	Load (kW)	PV_opt (kW)	Hydro_opt (kW)	Total_opt (kW)	Load (kW)	PV_opt (kW)	Hydro_opt (kW)	Total_opt (kW)	Load (kW)	PV_opt (kW)	Hydro_opt (kW)	Total_opt (kW)
1	2.05	0.00	0.00	0.00	2.20	0.14	1.25	1.39	2.30	0.13	2.93	2.30
2	2.05	0.00	0.00	0.00	2.25	0.13	0.22	0.35	2.32	0.18	0.92	1.10
3	2.05	0.15	0.07	0.22	2.30	0.15	1.15	1.30	2.33	0.12	0.77	0.89
4	2.05	0.18	0.19	0.37	2.35	0.15	1.47	1.62	2.34	0.00	0.00	0.00
5	2.05	0.11	1.40	1.51	2.40	0.14	1.14	1.28	2.35	0.00	0.00	0.00
6	3.02	0.14	0.68	0.82	3.00	0.15	1.80	1.95	3.10	0.00	0.00	0.00
7	3.10	0.16	1.32	1.49	3.05	0.14	1.50	1.65	3.15	0.00	0.00	0.00
8	2.11	0.16	1.50	1.66	2.15	0.12	2.52	2.15	2.20	0.00	0.00	0.00
9	2.13	0.16	3.93	2.13	2.18	0.11	3.44	2.18	2.25	0.00	0.00	0.00
10	2.21	0.12	2.07	2.18	2.20	0.18	2.45	2.20	2.27	0.00	0.00	0.00
11	2.23	0.09	0.88	0.97	2.25	0.14	1.86	2.00	2.30	0.00	0.00	0.00
12	2.26	0.10	0.72	0.82	2.28	0.15	2.95	2.28	2.32	0.00	0.00	0.00

Berdasarkan Tabel 4.1, terlihat bahwa distribusi daya optimal dari kombinasi PV dan Mikrohidro mengalami variasi antar tahun. Pada tahun 2023, kontribusi PV dan Mikrohidro cukup seimbang di beberapa bulan, sehingga total daya optimal (Total\_opt) relatif mendekati beban yang ada. Pada bulan ke-7 total daya mencapai 1,49 kW dibandingkan dengan beban 3,10 kW, menunjukkan bahwa kombinasi sumber daya masih berfungsi meski belum sepenuhnya menutupi kebutuhan. Hal ini menunjukkan bahwa FA mampu menyesuaikan kapasitas sumber daya sesuai variasi input energi terbarukan.

Sementara itu, pada tahun 2024 terlihat peningkatan daya optimal terutama dari kontribusi Mikrohidro. Beberapa bulan seperti bulan ke-8 dan 12 menghasilkan daya optimal di atas 2 kW yang cukup mendekati beban. Namun, pada tahun 2025 distribusi daya cenderung menurun drastis, bahkan pada sebagian besar bulan tidak terdapat kontribusi daya dari PV maupun Mikrohidro. Kondisi ini mengindikasikan adanya keterbatasan pasokan energi input seperti (intensitas matahari yang rendah atau debit air yang menurun) sehingga algoritma tidak dapat mengalokasikan daya optimal. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa FA dapat mengoptimalkan distribusi daya, tetapi ketersediaan sumber

energi tetap menjadi faktor penentu utama keberhasilan sistem hybrid.

Selain itu, hasil Optimasi Distribusi Daya pada Tabel 4.1, juga menunjukkan peran penting algoritma dalam menjaga keseimbangan antara ketersediaan energi dan kebutuhan beban. Ketika suplai energi dari PV berkurang, seperti terlihat pada tahun 2025, sistem tidak mampu menghasilkan daya optimal sehingga total output menjadi nol di beberapa bulan. Sebaliknya, pada tahun 2024 algoritma mampu mengombinasikan kontribusi PV dan Mikrohidro dengan baik sehingga total daya optimal mendekati beban, bahkan pada bulan Juli hingga Desember mampu mencapai kisaran 2,15–2,28 kW. Hal ini menegaskan bahwa optimasi distribusi daya tidak hanya berfungsi untuk meningkatkan efisiensi, tetapi juga menjadi mekanisme penting dalam mengantisipasi fluktuasi ketersediaan energi terbarukan agar sistem hybrid tetap andal sepanjang tahun.

#### 4.1.2 Perbandingan Efisiensi Sistem Sebelum dan Sesudah Optimasi

Analisis perbandingan efisiensi sistem sebelum dan sesudah optimasi penting dilakukan untuk mengetahui sejauh mana algoritma yang digunakan mampu meningkatkan kinerja pembangkit listrik

hybrid. Dalam penelitian ini, Firefly Algorithm (FA) diterapkan sebagai metode optimasi guna meningkatkan efisiensi distribusi daya pada sistem hybrid Mikrohidro dan Photovoltaic (PV). Tabel

berikut menyajikan nilai efisiensi sistem sebelum ( $Ef\_before$ ) dan sesudah optimasi ( $Ef\_after$ ) selama periode 2023–2025, yang mencerminkan perbedaan kinerja sistem dalam memenuhi kebutuhan beban listrik.

Tabel 4.2. Perbandingan Efisiensi Sistem Sebelum dan Sesudah Optimasi

Tahun 2023			Tahun 2024		Tahun 2025	
Bulan	$Ef\_before(\%)$	$Ef\_after(\%)$	$Ef\_before(\%)$	$Ef\_after(\%)$	$Ef\_before(\%)$	$Ef\_after(\%)$
1	0.00	0.00	40.43	63.29	100.00	100.00
2	0.00	0.00	9.31	15.53	34.47	47.62
3	5.57	10.65	36.07	56.64	27.80	37.99
4	9.75	18.14	44.15	68.90	0.00	0.00
5	41.83	73.72	33.98	53.24	0.00	0.00
6	15.20	27.14	41.82	65.03	0.00	0.00
7	27.13	48.05	34.63	54.00	0.00	0.00
8	44.57	78.78	79.39	100.00	0.00	0.00
9	100.00	100.00	100.00	100.00	0.00	0.00
10	56.19	98.78	77.14	100.00	0.00	0.00
11	24.66	43.57	57.14	88.73	0.00	0.00
12	20.34	36.07	87.84	100.00	0.00	0.00

Tabel 4.2 memperlihatkan perbandingan efisiensi sistem sebelum dan sesudah optimasi pada periode 2023–2025. Secara umum, terlihat adanya peningkatan signifikan setelah penerapan Firefly Algorithm (FA), terutama pada tahun 2023 dan 2024, di mana nilai efisiensi sesudah optimasi ( $Ef\_after$ ) menunjukkan capaian hingga 100% pada beberapa bulan. Hal ini membuktikan bahwa metode optimasi mampu mengurangi selisih antara beban dengan daya yang tersedia, meskipun pada tahun 2025 terlihat penurunan drastis akibat keterbatasan pasokan energi. Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai tren perubahan efisiensi tersebut, hasil pada tabel selanjutnya akan divisualisasikan dalam bentuk grafik, sehingga perbandingan kinerja sistem sebelum dan sesudah optimasi dapat dianalisis secara lebih komprehensif. Berikut grafik perbandingan efisiensi sistem sebelum dan sesudah optimasi pada tahun 2023-2025 dapat dilihat pada Gambar 1, 2 dan 3.



Gambar 1. Grafik Perbandingan Beban dan Daya Tahun 2023

Grafik pada Gambar 1 memperlihatkan perbandingan beban, daya sebelum optimasi, daya optimal, serta status energi baterai pada tahun 2023. Terlihat bahwa beban cenderung stabil di awal tahun pada kisaran 2 kW, kemudian melonjak tajam pada bulan 6–7 hingga mencapai puncak lebih dari 3 kW akibat tingginya kebutuhan energi, sebelum turun kembali dan stabil di kisaran 2,2 kW pada bulan 8–12. Lonjakan beban di pertengahan tahun kemungkinan dipengaruhi oleh meningkatnya aktivitas penggunaan energi, yang diakibatkan oleh faktor musim, cuaca, atau peningkatan kebutuhan operasional yang lebih tinggi dibandingkan bulan-bulan sebelumnya. Setelah melewati puncak tersebut, beban mengalami penurunan karena kebutuhan energi berangsur

menurun dan kemudian berada pada titik yang relatif stabil hingga akhir tahun. Pola ini memperlihatkan adanya fluktuasi permintaan energi yang perlu diantisipasi agar tidak terjadi defisit pasokan.

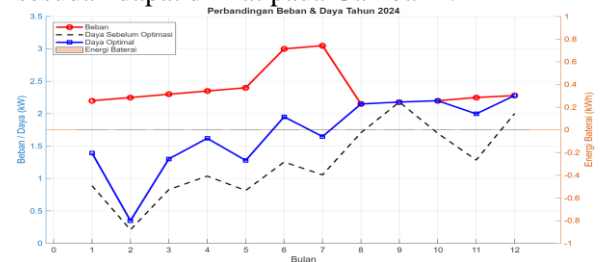
Sementara itu, daya sebelum optimasi menunjukkan kinerja yang kurang maksimal karena nilainya sangat rendah pada bulan 1–4, yang mengindikasikan ketidakmampuan sistem dalam memenuhi beban pada awal tahun. Pada bulan 5–8 daya mulai mengalami kenaikan seiring dengan meningkatnya kebutuhan, namun nilainya masih tertinggal dari beban sehingga tidak mampu menutup gap yang ada. Puncak daya sebelum optimasi terjadi pada bulan 9, mencapai sekitar 2 kW yang mendekati nilai beban, namun kondisi ini tidak berlangsung lama karena pada bulan 10–12 daya kembali menurun signifikan. Ketidakseimbangan ini menunjukkan bahwa tanpa optimasi, sistem daya yang tersedia tidak mampu secara konsisten menyesuaikan diri dengan pola fluktuasi beban. Hal ini berpotensi menimbulkan masalah pada keandalan sistem, karena pada saat beban berada pada level tinggi, suplai energi yang ada tidak mencukupi sehingga risiko terjadinya kekurangan pasokan semakin besar.

Berbeda halnya dengan daya optimal yang menunjukkan hasil perbaikan yang jauh lebih baik. Sejak bulan 3 daya optimal mulai meningkat secara perlahan, kemudian melonjak signifikan pada bulan 5 dan terus mengalami kenaikan meskipun sedikit berfluktuasi pada bulan 6–7. Pada bulan 9–10 daya optimal mencapai kinerja terbaik dengan nilai hampir sama dengan beban, yang berarti sistem hasil optimasi mampu menutup gap kekurangan energi yang sebelumnya terjadi. Setelah itu, pada bulan 11–12 daya optimal mengalami sedikit penurunan seiring dengan turunnya beban, sehingga pola keduanya tetap selaras. Hal ini menunjukkan bahwa optimasi yang dilakukan dengan Firefly Algorithm (FA) efektif dalam menyesuaikan ketersediaan daya terhadap kebutuhan beban secara dinamis, serta mampu menjaga kestabilan sistem meskipun terjadi fluktuasi permintaan energi. Dengan demikian, optimasi bukan hanya meningkatkan efisiensi daya, tetapi juga menjaga keandalan sistem dalam jangka panjang.

Selain itu, status energi baterai pada grafik menunjukkan nilai yang relatif rendah sepanjang tahun dan cenderung stagnan di sekitar nol.

Kondisi ini menandakan bahwa peranan baterai dalam sistem masih belum optimal, baik sebagai penyimpan energi cadangan maupun sebagai penyeimbang fluktuasi daya. Rendahnya kontribusi baterai kemungkinan dipengaruhi oleh keterbatasan kapasitas penyimpanan atau strategi pengoperasian yang kurang maksimal, sehingga energi yang tersimpan tidak cukup signifikan untuk mendukung suplai ketika beban berada pada level puncak. Dampaknya, sebagian besar kebutuhan energi lebih banyak ditopang oleh daya hasil optimasi dibandingkan kontribusi baterai. Integrasi algoritma optimasi berbasis kecerdasan buatan berpotensi untuk meningkatkan efisiensi alokasi daya sekaligus memperbaiki strategi pemanfaatan baterai. Jika peranan baterai dapat ditingkatkan, maka sistem hybrid ini tidak hanya mampu menyeimbangkan fluktuasi energi, tetapi juga mengurangi risiko defisit daya pada periode kritis. Dengan demikian, grafik ini menegaskan pentingnya optimasi tidak hanya dalam meningkatkan efisiensi daya, tetapi juga dalam mendorong perbaikan sistem penyimpanan energi agar keandalan dan kesinambungan suplai listrik dapat terjamin di masa mendatang.

Selanjutnya pada tahun 2024 memperlihatkan pola perbandingan efisiensi sistem sebelum dan sesudah dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik Perbandingan Beban dan Daya Tahun 2024

Grafik pada Gambar 2 memperlihatkan perbandingan antara beban, daya sebelum optimasi, daya optimal, dan energi baterai pada tahun 2024. Beban menunjukkan tren peningkatan bertahap dari awal tahun sekitar 2,2 kW hingga mencapai puncak lebih dari 3 kW pada bulan ke-7, kemudian mengalami penurunan mendekati 2,2 kW pada bulan ke-8, dan akhirnya relatif stabil pada kisaran 2,3–2,4 kW hingga akhir tahun. Pola ini mengindikasikan adanya fluktuasi kebutuhan energi yang kemungkinan besar dipengaruhi oleh variasi aktivitas masyarakat, pola konsumsi energi harian, maupun faktor musiman seperti

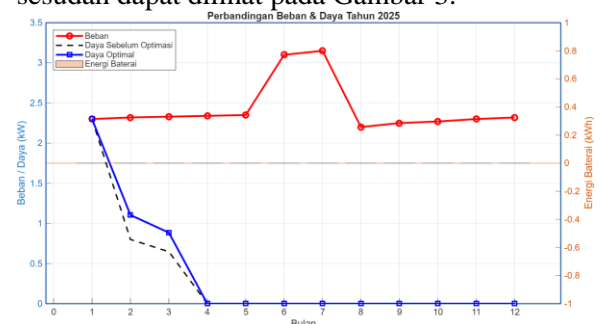
cuaca atau intensitas produksi pada sektor tertentu. Dengan demikian, beban yang berfluktuasi tersebut menuntut adanya penyesuaian suplai daya agar tetap seimbang dengan kebutuhan aktual. Ketidaksesuaian antara pola beban dengan ketersediaan daya tanpa optimasi dapat berpotensi menimbulkan defisit energi yang berdampak pada keandalan sistem hybrid secara keseluruhan. Oleh sebab itu, pemantauan beban secara detail menjadi sangat penting dalam menentukan strategi optimasi distribusi daya.

Daya sebelum optimasi terlihat berfluktuasi dengan nilai relatif rendah di awal tahun, bahkan sempat mencapai titik terendah sekitar 0,3 kW pada bulan ke-2, sebelum kemudian mengalami peningkatan bertahap dan mencapai hampir 2 kW pada bulan ke-9. Meskipun meningkat, daya sebelum optimasi tetap tidak mampu sepenuhnya memenuhi kebutuhan beban, khususnya pada bulan ke-1 hingga bulan ke-6, sehingga terdapat indikasi defisit energi yang cukup signifikan. Sebaliknya, daya optimal yang dihasilkan setelah penerapan Firefly Algorithm (FA) memperlihatkan tren yang lebih stabil dan konsisten. Nilai daya optimal dimulai dari sekitar 1,4 kW pada bulan ke-1, sempat menurun pada bulan ke-2 dan 3, lalu meningkat kembali hingga mendekati beban pada bulan ke-8–9, serta bertahan di kisaran 2,1–2,3 kW hingga akhir tahun. Kondisi ini menunjukkan bahwa hasil optimasi mampu meningkatkan keselarasan distribusi daya dengan pola beban. Dengan demikian, FA terbukti efektif dalam mengurangi ketidakseimbangan daya yang terjadi sebelum optimasi. Hal ini juga mengindikasikan bahwa FA dapat berfungsi sebagai mekanisme penyesuaian adaptif yang responsif terhadap variasi beban, sehingga sistem lebih efisien dan dapat diandalkan.

Energi baterai pada grafik tampak relatif stagnan di sekitar nol sepanjang tahun, menandakan bahwa kontribusinya masih sangat minim dalam mendukung keseimbangan sistem. Kondisi ini dapat disebabkan oleh keterbatasan kapasitas penyimpanan baterai atau strategi pengoperasian yang belum dioptimalkan untuk menutup defisit energi pada bulan-bulan awal. Meskipun daya optimal setelah FA mengalami peningkatan signifikan, keberadaan baterai tetap krusial dalam sistem hybrid karena berfungsi sebagai penyangga daya saat beban puncak atau ketika sumber energi utama tidak mencukupi.

Minimnya peran baterai menunjukkan perlunya pengembangan strategi manajemen energi yang lebih terintegrasi, seperti peningkatan kapasitas baterai, penerapan skema pengisian dan pengosongan yang lebih efisien, atau integrasi dengan teknologi penyimpanan energi lain. Dengan demikian, meskipun FA telah berhasil meningkatkan keandalan sistem hybrid melalui penyesuaian distribusi daya antara Photovoltaic (PV) dan Mikrohidro, pencapaian kinerja yang benar-benar berkelanjutan masih memerlukan dukungan dari sistem penyimpanan energi yang optimal. Oleh karena itu, langkah ke depan adalah mengombinasikan optimasi algoritmik dengan manajemen energi baterai yang lebih baik agar kontinuitas suplai daya dapat terjamin di semua kondisi beban.

Selanjutnya pada tahun 2025 memperlihatkan pola perbandingan efisiensi sistem sebelum dan sesudah dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik Perbandingan Beban dan Daya Tahun 2025

Grafik pada Gambar 3 menunjukkan perbandingan beban, daya sebelum optimasi, daya optimal, serta energi baterai pada tahun 2025, dengan pola perubahan yang cukup mencolok dari bulan ke-1 hingga bulan ke-12. Pada periode awal tahun, yaitu bulan ke-1 hingga bulan ke-3, beban relatif stabil di kisaran 2,3–2,4 kW. Namun, daya sebelum optimasi justru menurun tajam dari sekitar 2,2 kW pada bulan ke-1 menjadi hanya sekitar 1,1 kW di bulan ke-2, lalu merosot lebih jauh hingga 0,3 kW pada bulan ke-3. Daya optimal juga menunjukkan kecenderungan yang sama, di mana nilainya turun dari sekitar 2,2 kW di bulan ke-1 menjadi 0,8 kW di bulan ke-2, dan akhirnya menyentuh titik nol pada bulan ke-3. Hal ini mengindikasikan bahwa baik sistem sebelum maupun sesudah optimasi tidak mampu mempertahankan kestabilan suplai daya pada awal tahun, meskipun kebutuhan beban relatif stabil. Kondisi ini dapat disebabkan oleh

berkurangnya produksi energi primer akibat faktor eksternal seperti berkurangnya radiasi matahari di musim hujan, rendahnya debit air yang menggerakkan turbin mikrohidro, atau bahkan penurunan efisiensi sistem akibat faktor teknis. Dengan demikian, sejak awal tahun sudah terlihat adanya potensi ketidakseimbangan serius antara ketersediaan daya dengan kebutuhan energi beban.

Memasuki periode bulan ke-4 hingga ke-7, kondisi semakin kritis karena baik daya sebelum optimasi maupun daya optimal tetap berada di titik nol, sementara beban justru mengalami peningkatan signifikan. Pada bulan ke-6 dan bulan ke-7, beban mencapai puncak lebih dari 3 kW, menciptakan kesenjangan yang sangat besar antara kebutuhan energi dan suplai daya. Ketidakmampuan sistem dalam menghasilkan daya pada periode ini menunjukkan bahwa sumber energi utama, baik Photovoltaic (PV) maupun Mikrohidro, tidak dapat beroperasi secara efektif. Faktor cuaca ekstrem, intensitas hujan tinggi, atau musim kemarau yang memengaruhi debit sungai bisa menjadi penyebab utama penurunan produksi energi. Selain itu, jika sistem PV mengalami shading atau penurunan intensitas radiasi matahari, kinerjanya juga otomatis menurun drastis. Kondisi ini memperlihatkan kelemahan mendasar sistem hybrid tanpa dukungan penyimpanan energi, di mana fluktuasi beban tidak dapat diimbangi dengan pasokan daya yang tersedia. Akibatnya, sistem berisiko besar mengalami pemadaman atau defisit energi pada periode puncak kebutuhan, sehingga keandalan sistem semakin diragukan.

Pada periode bulan ke-8 hingga bulan ke-12, beban kembali menurun dan relatif stabil di kisaran 2,2–2,3 kW. Akan tetapi, daya sebelum optimasi maupun daya optimal tetap tidak menunjukkan perbaikan, karena keduanya terus berada pada titik nol hingga akhir tahun. Kondisi ini menandakan bahwa sepanjang paruh kedua tahun, sistem tetap tidak mampu menyalurkan daya untuk memenuhi kebutuhan beban, sehingga ketidakseimbangan suplai dan permintaan energi berlangsung secara terus-menerus. Fakta ini mempertegas bahwa strategi optimasi yang sebelumnya terbukti efektif, seperti Firefly Algorithm (FA), pada tahun 2025 tidak lagi memberikan hasil signifikan akibat keterbatasan sumber daya energi yang tersedia. Dengan kata lain, sistem hybrid yang

dioperasikan tidak hanya mengalami penurunan kinerja, tetapi juga gagal dalam menjaga keandalan suplai energi dalam jangka panjang. Jika kondisi ini berlanjut, maka sistem berpotensi tidak layak lagi dioperasikan tanpa adanya intervensi besar, baik melalui peningkatan kapasitas sumber energi, penambahan baterai, maupun integrasi dengan jaringan listrik eksternal.

Selain itu, grafik juga menunjukkan bahwa energi baterai stagnan di nilai nol sepanjang tahun, yang berarti tidak ada peran cadangan energi dalam mendukung sistem. Tidak adanya kontribusi dari baterai, baik untuk menyimpan kelebihan daya maupun menutupi kekurangan saat terjadi defisit energi, menjadi faktor penghambat utama dalam menjaga kontinuitas suplai daya. Kapasitas baterai yang terbatas atau bahkan tidak berfungsi optimal membuat sistem sepenuhnya bergantung pada ketersediaan sumber energi primer. Kondisi ini semakin memperburuk ketidakseimbangan suplai karena ketika sumber energi primer gagal, tidak ada mekanisme backup yang bisa diandalkan. Hal ini mempertegas bahwa meskipun FA efektif dalam meningkatkan efisiensi distribusi daya pada tahun-tahun sebelumnya, pada tahun 2025 sistem menunjukkan penurunan kinerja yang drastis akibat minimnya dukungan penyimpanan energi. Oleh karena itu, diperlukan strategi manajemen energi yang lebih terintegrasi, yang tidak hanya mengandalkan optimasi algoritma, tetapi juga memperkuat kapasitas penyimpanan serta pengelolaan sumber energi terbarukan agar sistem hybrid dapat berfungsi lebih andal dan berkelanjutan. Dengan demikian, fokus pada investasi baterai berkapasitas lebih besar, diversifikasi sumber energi, serta penerapan strategi kontrol cerdas berbasis Artificial Intelligence (AI) menjadi langkah penting untuk meningkatkan keandalan sistem di masa depan.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Optimasi pembangkit listrik hybrid berbasis Mikrohidro dan PV dengan implementasi Firefly Algorithm (FA) terbukti meningkatkan distribusi daya dan efisiensi sistem. Pada tahun 2023 dan 2024, daya optimal mendekati kebutuhan beban dengan efisiensi hingga 100%, menunjukkan FA efektif menyeimbangkan pasokan energi terbarukan dengan kebutuhan beban listrik.

2. Pada tahun 2025, optimasi dengan FA menunjukkan keterbatasan karena pasokan energi PV dan Mikrohidro menurun drastis, sehingga daya optimal pada banyak bulan tidak tercapai ( $Total_{opt} = 0$ ) dan efisiensi sistem rendah. Hal ini menegaskan bahwa meskipun hasil sesudah optimasi berbantu MATLAB lebih baik dibanding sebelum optimasi pada periode awal, keberhasilan tetap sangat dipengaruhi oleh ketersediaan energi primer dan kapasitas baterai. Dengan demikian, FA tidak dapat berdiri sendiri untuk menjamin kinerja sistem hybrid secara berkelanjutan.

#### 5.2. Saran

Berdasarkan kesimpulan yang telah diuraikan di atas, maka penulis akan memberikan beberapa saran sebagai berikut:

## V. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1. Kesimpulan

3. Diperlukan peningkatan kapasitas penyimpanan energi dan strategi manajemen yang adaptif agar energi surplus dapat dimanfaatkan saat defisit, sehingga ketergantungan pada kondisi alam berkurang dan kinerja optimasi lebih stabil.
  4. Penelitian selanjutnya disarankan mengombinasikan Firefly Algorithm (FA) dengan metode optimasi lain serta mempertimbangkan aspek ekonomi, agar hasil optimasi lebih robust dan aplikatif untuk implementasi nyata.
- . 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

#### DAFTAR PUSTAKA

..., Ambarita, H., Sudiro, E. N., Riman, A., Jobiliong, E., & ... (2014). *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*. 1(1), 41–48.

- 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., & 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.
- 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>

