

SKRIPSI
OPTIMASI PENGELOLAAN DAYA BATERAI PADA SISTEM
PEMBANGKIT LISTRIK HYBRID PLTS–PLTMH MENGGUNAKAN
PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO)



Diajukan sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik di
Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah
Palembang

Dipersiapkan dan Disusun Oleh :

ACHMAD ALFARIZI

132020123

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH PALEMBANG
2026

SKRIPSI
OPTIMASI PENGELOLAAN DAYA BATERAI PADA SISTEM
PEMBANGKIT LISTRIK HYBRID PLTS-PLTMH MENGGUNAKAN
PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO)

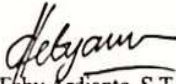


Merupakan syarat untuk memperoleh gelar sarjana
Telah dipertahankan di depan dewan penguji
26 Agustus 2026

Dipersiapkan dan Disusun Oleh
ACHMAD ALFARIZI

Susunan Dewan Penguji

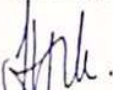
Pembimbing 1


Dr. Feby Ardianto, S.T., M.Cs
NIDN. 0207038101

Penguji 1


Taufik Barlian, S.T., M.Eng
NIDN. 0218017202

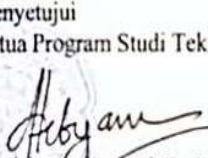
Pembimbing 2


Fadhilah, S.T., M.T
NIDN. 0215089003

Penguji 2


Dr. Wiwin A. Oktaviani, S.T., M.Sc
NIDN. 0002107302


Mengetahui
Dekan Fakultas Teknik
H. A. J. Naidi, M.T
NIDN. 0202026502


Menyetujui
Ketua Program Studi Teknik Elektro
Dr. Feby Ardianto, S.T., M.Cs
NIDN. 0207038101

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi, sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan di dalam daftar pustaka.

Palembang, 26 Agustus 2026

Yang membuat pernyataan



Achmad Alfarizi

MOTO DAN PERSEMBAHAN

MOTO

هَلْ جَزَاءُ الْإِحْسَانِ إِلَّا الْإِحْسَانُ

“Tidak ada balasan untuk kebaikan selain kebaikan (pula).”

(QS ; Ar Rahman ayat 60)

PERSEMBAHAN :

1. Alhamdulillah, puja dan puji syukur kepada Allah SWT. Atas segala nikmat, karunia dan ridho-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini, yang selalu memberikan kesehatan, perlindungan, rezeki, kemudahan, dan pertolongan yang tiada henti – hentinya.
2. Kepada kedua orangtua saya, Ayah Alyazir AR dan Bunda Sumiati beserta kedua Abang saya Muhammad Zikri dan Fazlun Ihsan, dan Kakak perempuan saya Chairunnisa yang dimana mereka merupakan orang – orang yang paling saya cintai, sayangi, dan yang paling berharga dalam hidup saya. Saya Persembahkan keberhasilan ini untuk keluarga saya, terima kasih banyak atas perhatiannya yang selalu memberikan doa – doa, bantuan, masukan, dan semangat, serta kasih sayang yang tulus.
3. Kepada dosen pembimbing I Bapak Dr. Feby Ardianto, S.T., M.Cs. dan dosen pembimbing II Ibu Fadilah, S.T,M.T. yang telah dengan sabar membimbing dan membantu penulis untuk menyelesaikan skripsi ini.
4. Seluruh Dosen Program Studi Teknik Elektro dan Staf Program Studi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Palembang.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT, atas rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul **“Optimasi pengelolaan daya baterai pada sistem pembangkit listrik *hybrid* plts-pltmh menggunakan *particle swarm optimization* (pso)”** yang disusun guna untuk syarat mendapatkan gelar sarjana pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Palembang.

Pada kesempatan ini penulis secara khusus mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada,

1. Bapak Dr. Feby Ardianto, S.T., M.Cs., selaku Pembimbing 1
2. Ibu Fadilah, S.T,M.T., selaku Pembimbing 2

Dan tak lupa pula penulis mengucapkan terima kasih kepada,

1. Bapak Prof. Abid Djazuli, S.E., M.M, selaku Rektor Universitas Muhammadiyah Palembang.
2. Bapak Ir. A. Junaidi, M.T. Selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Palembang Palembang.
3. Bapak Dr. Feby Ardianto, S.T., M.Cs., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Palembang.
4. Bapak Muhammad Huraiah, S.T., M.T, selaku Sekretaris Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Palembang.
5. Bapak dan Ibu Staf Dosen pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Palembang.
6. Bapak dan Ibu Staf Tata Usaha Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Palembang.
7. Rekan-rekan Mahasiswa Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Palembang.

Yang telah banyak membantu penulis baik secara moril maupun material dalam menyelesaikan skripsi ini, semoga amal baik yang diberikan kepada penulis mendapatkan imbalan yang sesuai dari Allah SWT. Penulis menyadari penulisan skripsi ini jauh dari sempurna, dengan kondisi tersebut kritik dan saran dari pembaca akan penulis terima dengan sangat senang hati. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat khususnya bagi penulis sendiri dan umumnya bagi rekan-rekan pembaca di Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palembang.

Palembang, 26 Agustus 2026

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Achmad Alfarizi', with a stylized, cursive script.

Achmad Alfarizi

ABSTRAK

Pemanfaatan sistem pembangkit listrik hybrid PLTS–PLTMH memerlukan pengelolaan daya yang mampu menyesuaikan perbedaan antara daya pembangkitan dan kebutuhan beban secara efektif. Penelitian ini bertujuan menerapkan metode Particle Swarm Optimization (PSO) untuk menentukan pengoperasian daya baterai berdasarkan kondisi daya pembangkitan dan beban, serta menganalisis kemampuan PSO dalam meminimalkan ketidakseimbangan daya pada sistem. Data penelitian terdiri atas 250 titik pengukuran PLTS, PLTMH, beban, dan baterai yang telah disinkronkan berdasarkan kondisi pengukuran. Daya PLTS dan PLTMH digunakan untuk membentuk total daya hybrid, sedangkan daya baterai (P_{bat}) ditetapkan sebagai variabel keputusan pada proses optimasi. Fungsi fitness dirumuskan dalam bentuk kuadrat residual ketidakseimbangan daya agar solusi yang diperoleh mampu mendekati kondisi keseimbangan daya. Optimasi dilakukan menggunakan 30 partikel dan 80 iterasi, dengan batas daya baterai empiris sebesar -63,415 W hingga 26,532 W serta batas State of Charge (SOC) antara 20% dan 90%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebelum kompensasi baterai diperoleh nilai MAE sebesar 18,0334 W dan RMSE sebesar 23,9512 W. Setelah optimasi PSO, nilai MAE menurun menjadi 0,0000000496 W dan RMSE menjadi 0,00000140 W, sedangkan residual maksimum berkurang dari 60,0200 W menjadi 0,0000007457 W. Dari 250 titik pengukuran, PSO menghasilkan 82 kondisi charging dan 168 kondisi discharging. Residual yang mendekati nol menunjukkan tercapainya optimum numerik pada model matematis karena kebutuhan kompensasi masih berada dalam batas ruang pencarian daya baterai. Penerapan ini menunjukkan bahwa strategi optimasi mampu memberikan respons pengaturan baterai yang sesuai terhadap kondisi daya sistem. Dengan demikian, PSO berhasil diterapkan untuk menentukan dispatch baterai dan meminimalkan ketidakseimbangan daya pada sistem hybrid PLTS–PLTMH yang diteliti.

Kata kunci: *Particle Swarm Optimization; PLTS; PLTMH; sistem hybrid; daya baterai; ketidakseimbangan daya.*

ABSTRACT

The utilization of a hybrid PV–micro-hydropower generation system requires effective power management to accommodate differences between generated power and load demand. This study aims to apply the Particle Swarm Optimization (PSO) method to determine battery power operation based on generation and load conditions and to analyze the capability of PSO to minimize power imbalance in the system. The research data consist of 250 measurement points of PV, micro-hydropower, load, and battery power synchronized according to measurement conditions. PV and micro-hydropower outputs are combined to form total hybrid power, while battery power (P_{bat}) is defined as the decision variable in the optimization process. The fitness function is formulated as the squared residual of power imbalance so that the obtained solution approaches power balance. Optimization is performed using 30 particles and 80 iterations, with empirical battery power limits from -63.415 W to 26.532 W and State of Charge (SOC) limits of 20–90%. The results show that, before battery compensation, the MAE and RMSE are 18.0334 W and 23.9512 W, respectively. After PSO optimization, the MAE decreases to 0.0000000496 W and the RMSE to 0.00000140 W, while the maximum residual decreases from 60.0200 W to 0.0000007457 W. Of the 250 measurement points, PSO produces 82 charging conditions and 168 discharging conditions. Residual values approaching zero indicate numerical optimum because the required compensation remains within the battery power search-space limits. These results demonstrate that PSO successfully determines battery dispatch and minimizes power imbalance in the investigated hybrid PV–micro-hydropower system under the evaluated operating conditions.

Keywords: Particle Swarm Optimization; solar PV; microhydro; hybrid system; battery power; power imbalance.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
SURAT PERNYATAAN.....	iii
MOTO DAN PERSEMBAHAN.....	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xv
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Sistematika Penulisan.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Sistem Pembangkit Listrik Hybrid	6
2.1.1 Pengertian Sistem Pembangkit Listrik Hybrid	6
2.1.2 Konfigurasi Sistem Hybrid PLTS–PLTMH–Baterai	7
2.1.3 Manajemen Energi Sistem Hybrid	8
2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)	9
2.2.1 Prinsip Kerja PLTS.....	9

2.2.2 Tegangan, Arus, dan Daya PLTS	10
2.2.3 Faktor yang Memengaruhi Keluaran PLTS.....	10
2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH)	11
2.3.1 Prinsip Kerja PLTMH.....	12
2.3.2 Daya Keluaran PLTMH.....	13
2.3.3 Debit, Head, dan Efisiensi PLTMH.....	13
2.3.4 Karakteristik PLTMH dalam Sistem Hybrid.....	14
2.4 Beban Listrik	14
2.4.1 Pengertian Beban Listrik	14
2.4.2 Daya dan Kebutuhan Beban	14
2.5 Sistem Penyimpanan Energi Baterai	15
2.5.1 Pengertian dan Fungsi Baterai.....	15
2.5.2 Kapasitas Baterai	15
2.5.3 Charging dan Discharging	15
2.5.4 State of Charge (SOC).....	16
2.5.5 Batas Operasi Baterai	17
2.5.6 Daya Baterai	17
2.6 Pengelolaan Daya Sistem Hybrid PLTS–PLTMH–Baterai.....	18
2.6.1 Keseimbangan Daya Sistem	19
2.6.2 Kondisi Surplus Daya.....	20
2.6.3 Kondisi Defisit Daya	20
2.6.4 Pengaturan Charging dan Discharging Baterai.....	20
2.7 Pemodelan Baterai dalam Pengelolaan Daya	21
2.7.1 Daya Baterai	21
2.7.2 Pemodelan State of Charge.....	21

2.7.3 Batas State of Charge.....	21
2.7.4 Batas Daya Charging dan Discharging.....	22
2.8 Optimasi Pengelolaan Daya.....	22
2.8.1 Pengertian Optimasi	22
2.8.2 Optimasi Pengelolaan Daya Baterai	23
2.8.3 Variabel Keputusan	23
2.8.4 Fungsi Objektif dan Kendala Optimasi	23
2.9 Particle Swarm Optimization (PSO).....	23
2.9.1 Pengertian PSO.....	27
2.9.2 Prinsip Kerja PSO.....	27
2.9.3 Partikel dan Ruang Pencarian.....	27
2.9.4 Posisi dan Kecepatan Partikel.....	28
2.9.5 Personal Best dan Global Best.....	28
2.9.6 Persamaan Kecepatan PSO.....	28
2.9.7 Persamaan Posisi PSO	29
2.9.8 Parameter PSO.....	30
2.9.9 Tahapan Iterasi PSO	30
2.10 Fungsi Fitness PSO untuk Pengelolaan Daya Baterai	31
2.10.1 Residual Ketidakseimbangan Daya	32
2.10.2 Fungsi Fitness	32
2.10.3 Penalti Batas Operasi Baterai	32
2.11 Parameter Optimasi PSO pada Sistem Hybrid	33
2.12 Evaluasi Kinerja Optimasi.....	33
2.12.1 Mean Absolute Error (MAE).....	33
2.12.2 Root Mean Square Error (RMSE)	34

2.12.3 Residual Maksimum	35
2.12.4 Konvergensi PSO	35
2.12.5 Evaluasi Charging dan Discharging	36
2.13 Implementasi PSO Menggunakan Python	36
2.13.1 Python sebagai Perangkat Komputasi	36
2.13.2 Pengolahan Data Menggunakan Python.....	37
2.13.3 Implementasi Algoritma PSO.....	37
2.13.4 Library Python yang Digunakan.....	37
2.14 Penelitian Terdahulu dan Posisi Penelitian.....	37
2.15 Kerangka Pemikiran Penelitian	40
BAB 3 METODE PENELITIAN	42
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian.....	42
3.2 Diagram Penelitian	43
3.3 Alat dan Bahan	44
3.3.1 Alat yang Digunakan	44
3.3.2 Bahan yang digunakan.....	46
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	47
4.1 Data.....	47
4.1.1 Data Hasil Pengukuran PLTS.....	47
4.1.2 Data Hasil Pengukuran PLTMH.....	48
4.1.3 Data Hasil Pengukuran Beban.....	50
4.1.4 Data Hasil Pengukuran Baterai.....	50
4.1.5 Dataset Particle Swarm Optimization (PSO).....	51
4.2 Perhitungan	52
4.2.1 Perhitungan Daya PLTS	52

4.2.2 Perhitungan Debit Air PLTMH	53
4.2.3 Perhitungan Daya Hidrolik PLTMH	54
4.2.4 Perhitungan Daya Generator PLTMH	54
4.2.5 Perhitungan Daya Beban	55
4.2.6 Perhitungan Daya Hybrid	56
4.2.7 Perhitungan Ketidakseimbangan Daya.....	57
4.3 Pengolahan Data <i>Particle Swarm Optimization</i> (PSO)	57
4.3.1 Pembentukan Dataset PSO	57
4.3.2 Variabel Keputusan PSO	59
4.3.3 Perancangan Parameter dan Model PSO	60
4.3.4 Proses Optimasi Pengolaan Daya Baterai Menggunakan PSO ..	61
4.3.5 Hasil Optimasi Daya Baterai Menggunakan PSO	63
4.3.6 Analisis Hasil Optimasi PSO.....	64
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	69
5.1 Kesimpulan	69
5.2 Saran	69
DAFTAR PUSTAKA	71
LAMPIRAN	73

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Konfigurasi konseptual sistem <i>hybrid</i> PLTS–PLTMH–baterai	8
Gambar 2.2 Prinsip konversi energi pada PLTS	9
Gambar 2.3 Rantai konversi energi pada PLTMH.....	12
Gambar 2.4 Alur dasar <i>Particle Swarm Optimization</i>	24
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	43
Gambar 4.1 Kurva Konvergensi PSO	63
Gambar 4.2 Perbandingan Daya Beban dan Daya Total Setelah Optimasi PSO...	66
Gambar 4.3 Perbandingan Error Daya Sebelum dan Setelah Optimasi PSO	66
Gambar 4.4 Daya Charging dan Discharging Baterai Hasil Optimasi PSO	67
Gambar 4.5 State of Charge (SOC) Baterai Hasil Optimasi PSO.....	67
Gambar 4.6 Distribusi Operasi Baterai Hasil Optimasi PSO.....	68

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Parameter PSO yang digunakan.....	33
Tabel 2.2 Posisi Penelitian	38
Tabel 2.3 Hubungan variabel dalam kerangka teoretis penelitian	40
Tabel 3.1 Alat yang Digunakan	45
Tabel 3.2 Bahan yang Digunakan	46
Tabel 4.1 Data Pengukuran PLTS.....	48
Tabel 4.2 Data Pengukuran Debit Air dan Putaran Turbin.....	49
Tabel 4.3 Data Daya Hidrolik PLTMH.....	49
Tabel 4.4 Data Pengukuran Daya Generator PLTMH	49
Tabel 4.5 Data Pengukuran Beban.....	50
Tabel 4.6 Data Pengukuran Baterai Hybrid	51
Tabel 4.7 Dataset Particle Swarm Optimization (PSO).....	51
Tabel 4.8 Parameter Particle Swarm Optimization (PSO).....	58
Tabel 4.9 Parameter Penerapan PSO	61
Tabel 4.10 Parameter dan Data Proses Optimasi PSO di Python	62
Tabel 4.11 Rekapitulasi Hasil Optimasi PSO	63
Tabel 4.12 Ringkasan Hasil Analisis Optimasi PSO	65

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik yang terus berkembang mendorong pemanfaatan sumber energi terbarukan sebagai alternatif untuk mengurangi ketergantungan terhadap sumber energi konvensional. Energi surya dan energi air merupakan dua sumber energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) memanfaatkan radiasi matahari melalui modul fotovoltaik, sedangkan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) memanfaatkan energi aliran air untuk menggerakkan turbin dan generator. (Syahputra & Soesanti, 2020; Adeleye et al., 2024)

Masing-masing sumber memiliki karakteristik pembangkitan yang berbeda. Daya keluaran PLTS dipengaruhi oleh kondisi radiasi matahari, suhu, cuaca, dan karakteristik modul, sedangkan keluaran PLTMH dipengaruhi oleh debit air, *head*, serta karakteristik turbin dan generator. Perubahan kondisi sumber energi menyebabkan daya yang dihasilkan tidak selalu sama dengan kebutuhan daya beban. Integrasi PLTS dan PLTMH dalam suatu sistem *hybrid* dapat digunakan untuk memanfaatkan karakteristik kedua sumber agar penyediaan energi menjadi lebih saling melengkapi. (Green et al., 2025; Syahputra & Soesanti, 2020)

Pada sistem pembangkit listrik *hybrid*, permasalahan tidak hanya terletak pada kemampuan menghasilkan energi, tetapi juga pada pengelolaan aliran daya. Ketika daya total PLTS dan PLTMH lebih besar daripada kebutuhan beban, terjadi *surplus* daya. Sebaliknya, ketika daya pembangkitan lebih kecil daripada kebutuhan beban, terjadi defisit daya. Kondisi tersebut menimbulkan ketidakseimbangan antara pembangkitan dan beban sehingga diperlukan mekanisme pengelolaan energi yang mampu menentukan penggunaan energi secara tepat. (Bhayo et al., 2022; Aguila-Leon et al., 2022)

Baterai dapat digunakan sebagai komponen penyimpan energi pada sistem *hybrid*. Pada saat terjadi *surplus* pembangkitan, baterai dapat menyerap daya melalui proses *charging*. Pada saat pembangkitan tidak mencukupi kebutuhan

beban, baterai dapat memberikan daya melalui proses *discharging*. Dengan demikian, pengoperasian baterai menjadi salah satu bagian penting dalam upaya menjaga keseimbangan daya pada sistem *hybrid* PLTS-PLTMH. (Datta et al., 2021; Bhayo et al., 2022)

Pengaturan daya baterai dapat dirumuskan sebagai suatu permasalahan optimasi. Dalam penelitian ini, optimasi tidak diarahkan untuk menentukan ukuran atau kapasitas optimal PLTS, PLTMH, maupun baterai, melainkan untuk mengoptimalkan pengoperasian daya baterai berdasarkan kondisi pembangkitan dan beban. Tujuan optimasi adalah memperkecil *residual* atau ketidakseimbangan antara total daya pembangkitan *hybrid* dan kebutuhan daya beban. (Aguila-Leon et al., 2022; Mquqwana & Krishnamurthy, 2024)

Salah satu metode optimasi yang dapat digunakan adalah *Particle Swarm Optimization* (PSO). PSO merupakan algoritma optimasi berbasis populasi yang menggunakan sejumlah *particle* sebagai kandidat solusi. Setiap *particle* bergerak di ruang pencarian berdasarkan pengalaman terbaik *particle* tersebut (*personal best/Pbest*) dan pengalaman terbaik seluruh *swarm* (*global best/Gbest*). Pada penelitian ini, posisi *particle* merepresentasikan kandidat daya baterai, sedangkan kualitas solusi dinilai menggunakan fungsi *fitness* yang dibentuk dari kuadrat ketidakseimbangan daya. (Gad, 2022)

Penerapan PSO dilakukan menggunakan pemrograman *Python* dengan data hasil pengukuran sebagai masukan. Data penelitian terdiri atas data PLTS, PLTMH, beban, dan baterai yang disimpan dalam *Microsoft Excel*. Sebanyak 250 titik data disinkronkan berdasarkan kondisi pengukuran. Daya PLTS dan PLTMH digunakan untuk membentuk daya pembangkitan *hybrid*, kemudian dibandingkan dengan daya beban. Algoritma PSO selanjutnya mencari nilai daya baterai yang dapat meminimalkan ketidakseimbangan daya pada setiap titik pengukuran. (Aguila-Leon et al., 2022; Mquqwana & Krishnamurthy, 2024)

Hasil optimasi dievaluasi melalui *residual* keseimbangan daya, *Mean Absolute Error* (MAE), *Root Mean Square Error* (RMSE), pola *charging* dan *discharging* baterai, serta konvergensi algoritma PSO. Dengan pendekatan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat menunjukkan penerapan PSO sebagai metode

pengelolaan daya pada sistem *hybrid* PLTS-PLTMH berdasarkan data hasil pengukuran, sehingga hubungan antara pembangkitan, beban, dan operasi baterai dapat dianalisis secara kuantitatif. (Hodson, 2022; Mquqwana & Krishnamurthy, 2024)

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian disusun agar sesuai dengan metode optimasi dan hasil yang dianalisis pada penelitian ini, yaitu:

1. Menerapkan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) pada sistem pembangkit listrik *hybrid* PLTS-PLTMH untuk menentukan pengoperasian daya baterai berdasarkan kondisi daya pembangkitan dan kebutuhan daya beban.
2. Menganalisis hasil optimasi PSO dalam meminimalkan ketidakseimbangan daya antara pembangkitan *hybrid* PLTS-PLTMH dan kebutuhan daya beban.

1.3 Batasan Masalah

Agar pembahasan penelitian terarah dan sesuai dengan data serta model yang diterapkan, batasan masalah ditetapkan sebagai berikut:

1. Penelitian membahas sistem pembangkit listrik *hybrid* yang terdiri atas PLTS, PLTMH, baterai, dan beban.
2. Data masukan yang digunakan merupakan data hasil pengukuran PLTS, PLTMH, beban, dan baterai dengan 250 titik data yang digunakan dalam pemodelan.
3. Optimasi difokuskan pada operasi atau pengelolaan daya sistem, bukan pada *optimal sizing* kapasitas panel surya, PLTMH, *inverter*, maupun baterai.
4. Variabel keputusan pada algoritma PSO adalah daya baterai (P_{bat}) yang merepresentasikan kondisi *charging* atau *discharging*.
5. Daya PLTS, daya PLTMH, dan daya beban diperlakukan sebagai data masukan hasil pengukuran dan tidak diubah oleh algoritma PSO.
6. Fungsi objektif PSO adalah meminimalkan kuadrat *residual* ketidakseimbangan daya antara pembangkitan *hybrid*, beban, dan daya baterai.

7. Penerapan algoritma PSO dilakukan menggunakan pemrograman *Python*, sedangkan *Microsoft Excel* digunakan sebagai sumber data penelitian.
8. Batas daya baterai pada model menggunakan rentang empiris yang terdapat pada *dataset*, yaitu -63,415 W sampai 26,532 W. Nilai tersebut merupakan batas pemodelan berdasarkan data, bukan *rating* pabrik.
9. SOC digunakan sebagai batas kelayakan operasi sederhana, dengan *discharging* tidak diperbolehkan pada $SOC \leq 20\%$ dan *charging* tidak diperbolehkan pada $SOC \geq 90\%$.
10. Model belum memasukkan kapasitas energi baterai dalam Ah atau Wh, efisiensi *charging/discharging*, rugi-rugi *inverter* atau *converter*, *C-rate*, dan dinamika SOC antartitik waktu karena parameter tersebut belum digunakan sebagai bagian lengkap dari model.
11. Evaluasi hasil optimasi dibatasi pada *residual* ketidakseimbangan daya, MAE, RMSE, kondisi *charging/discharging*, dan konvergensi PSO.

1.4 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam penelitian ini disusun secara sistematis untuk memudahkan pembahasan dan pemahaman terhadap isi skripsi. Adapun sistematika penulisan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

BAB 1 : PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB 2 : TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas teori sistem pembangkit listrik *hybrid*, PLTS, PLTMH, baterai dan SOC, keseimbangan daya, optimasi operasi, *Particle Swarm Optimization*, fungsi *fitness*, parameter PSO, indikator MAE dan RMSE, serta kerangka teoretis penelitian.

BAB 3 : METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan metode yang digunakan dalam penelitian, meliputi tempat dan waktu penelitian, diagram penelitian, serta alat dan bahan yang digunakan dalam penerapan Particle Swarm Optimization (PSO) menggunakan Python.

BAB 4 : HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas hasil pengolahan data dan penerapan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) pada sistem *hybrid* PLTS–PLTMH serta evaluasi pengoperasian daya baterai.

BAB 5 : KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil penelitian serta saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Adeleye, S. A., Adebajji, B., & Awogbemi, O. (2024). Renewable energy sources acceptability for decentralized energy *system* in Nigeria: Issues, challenges and prospects. *Science and Technology for Energy Transition*, 79, 44. <https://doi.org/10.2516/stet/2024039>
- Aguila-Leon, J., Vargas-Salgado, C., Chiñas-Palacios, C., & Díaz-Bello, D. (2022). Energy Management Model for a Standalone *Hybrid* Microgrid through a *Particle Swarm Optimization* and Artificial Neural Networks Approach. *Energy Conversion and Management*, 267, 115920. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115920>
- Bhayo, B. A., Al-Kayiem, H. H., Gilani, S. I. U., Oo, N. K. T., & Kumar, D. (2022). Energy management strategy of *hybrid solar-hydro system* with various probabilities of *power* supply loss. *Solar Energy*, 233, 230–245. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.01.043>
- Cortés-Caicedo, B., Ocampo, J., Bolaños, R. I., & Montoya-Giraldo, O. D. (2024). A multi-objective PSO for DC microgrids: Efficient battery management to minimize energy losses and operating costs. *Journal of Energy Storage*, 96, 112550. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112550>
- Datta, U., Kalam, A., & Shi, J. (2021). A review of key functionalities of *battery* energy storage *system* in renewable energy integrated *power* systems. *Energy Storage*, 3(5), e224. <https://doi.org/10.1002/est2.224>
- El Boujdaini, L., Mezrhab, A., Moussaoui, M. A., Naji, H., & Mhammedi, F. (2022). Sizing of a stand-alone PV–wind–*battery*–diesel *hybrid* energy *system* and optimal combination using a *particle swarm optimization* algorithm. *Electrical Engineering*, 104, 3339–3359. <https://doi.org/10.1007/s00202-022-01529-0>
- Figueroa-Saavedra, H. A., Grisales-Noreña, L. F., & Cortés-Caicedo, B. (2025). Energy management system using particle swarm optimization for operating costs reduction in AC microgrids with battery storage during grid-connected and islanded operation. *Ingeniería*, 30(2). <https://doi.org/10.14483/23448393.23474>
- Gad, A. G. (2022). *Particle Swarm Optimization* Algorithm and Its Applications: A Systematic Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29, 2531–2561. <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09694-4>
- Green, M. A., Dunlop, E. D., Yoshita, M., Kopidakis, N., Bothe, K., Siefer, G., Hao, X., & Jiang, J. Y. (2025). *Solar* Cell Efficiency Tables (Version 66). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 33(7), 795–810. <https://doi.org/10.1002/pip.3919>
- Hodson, T. O. (2022). Root-mean-square error (RMSE) or *mean absolute error* (MAE): when to use them or not. *Geoscientific Model Development*, 15, 5481–5487. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-5481-2022>

- Ibrahim, O., Abdul Aziz, M. J., Ayop, R., Dahiru, A. T., Low, W. Y., Sulaiman, M. H., & Amosa, T. I. (2024). Fuzzy logic-based particle swarm optimization for integrated energy management system considering battery storage degradation. *Results in Engineering*, 24, 102816. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102816>
- Iweh, C. D., & Akupan, E. R. (2023). Control and optimization of a hybrid solar PV–hydro power system for off-grid applications using particle swarm optimization (PSO) and differential evolution (DE). *Energy Reports*, 10, 4253–4270. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.10.080>
- Merabet, A., Al-Durra, A., & El-Saadany, E. F. (2022). Energy management system for optimal cost and storage utilization of renewable hybrid energy microgrid. *Energy Conversion and Management*, 252, 115116. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115116>
- Mquqwana, M. A., & Krishnamurthy, S. (2024). *Particle swarm optimization* for an optimal *hybrid* renewable energy microgrid system under uncertainty. *Energies*, 17(2), 422. <https://doi.org/10.3390/en17020422>
- Panda, S. (2025). Optimization-based energy management for grid-connected photovoltaic–battery systems in smart grids using demand response and particle swarm optimization. *Engineering Reports*, 7(7), e70305. <https://doi.org/10.1002/eng2.70305>
- Syahputra, R., & Soesanti, I. (2020). Planning of *hybrid* micro-hydro and *solar photovoltaic* systems for rural areas of Central Java, Indonesia. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2020, 5972342. <https://doi.org/10.1155/2020/5972342>
- Siddaraj, S., Yaragatti, U. R., & Harischandrappa, N. (2023). Coordinated PSO-ANFIS-based 2 MPPT control of microgrid with solar photovoltaic and battery energy storage system. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 12(3), 45. <https://doi.org/10.3390/jsan12030045>
- Tayab, U. B., Lu, J., Yang, F., AlGarni, T. S., & Kashif, M. (2021). Energy management system for microgrids using weighted salp swarm algorithm and hybrid forecasting approach. *Renewable Energy*, 180, 467–481. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.070>