

**OPTIMASI ADOPSI PLTS SKALA RUMAH TANGGA DAYA
TERPASANG 1.300 VA DENGAN MENGGUNAKAN METODE *MULTI-
OBJECTIVE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION***

(Skripsi)

Oleh

**IPNA PANCA RATIH
2015031026**



**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

OPTIMASI ADOPTI PLTS SKALA RUMAH TANGGA DAYA TERPASANG 1.300 VA DENGAN MENGGUNAKAN METODE *MULTI- OBJECTIVE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION*

Oleh

IPNA PANCA RATIH

Potensi energi terbarukan yang dimiliki Indonesia sangatlah besar, terutama dari energi surya yang mencapai 207,8 GWp. Namun, hingga 2023 pemanfaatannya masih belum optimal akibat berbagai kendala termasuk regulasi yang belum sepenuhnya mendukung. Untuk mengatasi hal ini, penelitian ini berfokus pada optimalisasi *Feed-in Tariff* (FiT), kapasitas pembangkitan, dan tarif rata-rata guna memberikan keuntungan optimal bagi konsumen, prosumer, dan utilitas PT. PLN. Studi ini menggunakan model ekonomi *stakeholder* dengan mengambil kasus pelanggan PT PLN (Persero) UP3 Tanjung Karang kapasitas daya terpasang 1.300 VA. Optimasi dilakukan menggunakan metode *Multi-Objective Particle Swarm Optimization* (MOPSO) dan *Genetic Algorithm* (GA), dengan mempertimbangkan variabel seperti FiT, kapasitas pembangkitan, permintaan energi, tarif rata-rata, dan biaya penyediaan energi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode *Particle Swarm Optimization* menghasilkan FiT optimal Rp718,12/kWh, dengan penghematan prosumer Rp230.681 dan laba utilitas Rp179.676. Sementara itu, *Genetic Algorithm* menghasilkan FiT Rp564,85/kWh, dengan penghematan prosumer Rp205.172 dan laba utilitas Rp179.692. Berdasarkan hasil optimasi, kedua metode memberikan solusi optimal, namun FiT Rp718,12/kWh direkomendasikan karena menghasilkan periode balik modal lebih cepat serta keuntungan ekonomi lebih besar bagi prosumer dan utilitas. Optimalisasi FiT diharapkan dapat meningkatkan adopsi PLTS atap dan mendukung pencapaian target bauran energi terbarukan di Indonesia.

Kata Kunci: *Feed-in Tariff*, PLTS atap, kebijakan, optimasi, *particle swarm optimization*, *algoritma genetika*.

ABSTRACT

OPTIMIZATION OF 1.300 VA HOUSEHOLD-SCALE SOLAR POWER PLANT ADOPTION USING MULTI-OBJECTIVE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION METHODS

By

IPNA PANCA RATIH

Indonesia has enormous renewable energy potential, especially from solar energy which reaches 207.8 GWp. However, until 2023 its utilization is still not optimal due to various obstacles including regulations that are not fully supportive. To overcome this, this study focuses on optimizing the Feed-in Tariff (FiT), generation capacity, and average tariff to provide optimal benefits for consumers, prosumers, and utility PT PLN. This study uses a stakeholder economic model by taking the case of PT PLN (Persero) UP3 Tanjung Karang customers with an installed power capacity of 1,300 VA. Optimization is carried out using the Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO) and Genetic Algorithm (GA) methods, taking into account variables such as FiT, generation capacity, energy demand, average tariffs, and energy supply costs. The results showed that the Particle Swarm Optimization method resulted in an optimal FiT of Rp718.12/kWh, with prosumer savings of Rp230,681 and utility profit of Rp179,676. Meanwhile, Genetic Algorithm produced a FiT of Rp564.85/kWh, with prosumer savings of Rp205,172 and utility profit of Rp179,692. Based on the optimization results, both methods provide optimal solutions, but the FiT of Rp718.12/kWh is recommended because it results in a faster payback period and greater economic benefits for prosumers and utilities. FiT optimization is expected to increase rooftop solar PV adoption and support the achievement of Indonesia's renewable energy mix target.

Key words: Feed-in Tariff, rooftop solar PV, policy, optimization, particle swarm optimization, genetic algorithm.

**OPTIMASI ADOPSI PLTS SKALA RUMAH TANGGA DAYA
TERPASANG 1.300 VA DENGAN MENGGUNAKAN METODE *MULTI-
OBJECTIVE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION***

Oleh

IPNA PANCA RATIH

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

Judul Skripsi

**OPTIMASI ADOPSI PLTS SKALA RUMAH
TANGGA DAYA TERPASANG 1.300 VA
DENGAN MENGGUNAKAN METODE
MULTI-OBJECTIVE PARTICLE SWARM
OPTIMIZATION**

Nama Mahasiswa

Ipna Panca Ratih

Nomor Pokok Mahasiswa

2015031026

Program Studi

Teknik Elektro

Fakultas

Teknik



Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T.

Zulmiftah Huda, S.T., M.Eng.

NIP 19710813 199903 1 003

NIP 19880624 201903 1 015

2. Mengetahui

**Ketua Jurusan
Teknik Elektro**

**Ketua Program Studi
Teknik Elektro**

Herlinawati, S.T., M.T.

Sumadi, S.T., M.T.

NIP 19710314 199903 2 001

NIP 19731104 200003 1 001

MENGESAHKAN

1. **Tim Penguji**

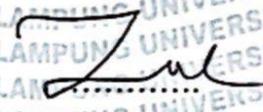
Ketua

Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T.



Sekretaris

Zulmiftah Huda, S.T., M.Eng.



Penguji

Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc.

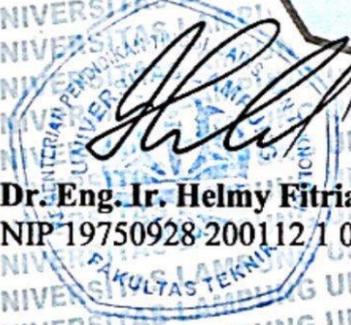


2. **Dekan Fakultas Teknik**



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

NIP 19750928 200112 1 002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 17 Desember 2024

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa di dalam skripsi saya yang berjudul "OPTIMASI ADOPSI PLTS SKALA RUMAH TANGGA DAYA TERPASANG 1.300 VA DENGAN MENGGUNAKAN METODE *MULTI-OBJECTIVE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION*" tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana yang disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu, saya nyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung 13 Februari 2025



Ipna Panca Ratih
NPM 2015031026

RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir di Tulang Bawang Barat pada 14 April 2002. Penulis merupakan anak bungsu dari lima bersaudara dari pasangan Bapak Karyadi dan Ibu Sri Lestari. Penulis bertempat tinggal di Jl. Menak Suttan 001/003, Kecamatan Tulang Bawang Udik, Kabupaten Tulang Bawang Barat. Penulis mengawali pendidikan di TK Dharma Wanita (2007—2008), SD Negeri 01 Kagungan Ratu (2008—2014), SMP Negeri 1 Tulang Bawang Udik (2014—2017), dan SMA Negeri 1 Tulang Bawang Tengah (2017—2020). Pada tahun 2020, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN).

Selama menjadi mahasiswa penulis bergabung dalam organisasi intra kampus Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (HIMATRO) yang pada tahun 2021 diamanahkan tergabung dalam Departemen Pendidikan dan Pengembangan Diri sebagai anggota Divisi Pendidikan hingga tahun 2022. Penulis tergabung dalam organisasi UKM-U Sains dan Teknologi sebagai anggota Departemen Riset dan Teknologi pada tahun 2021. Penulis juga berkesempatan menjadi Asisten Laboratorium Sistem Tenaga Listrik (STL) pada tahun 2022 hingga 2023. Penulis melaksanakan Kerja Praktik di PT. PLN Nusantara Power PLTD/G Teluk Betung pada tahun 2023 dan membuat laporan yang berjudul “Analisa Pengaruh Injeksi Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) Teluk Betung Terhadap Profil Tegangan Menggunakan *Software* ETAP 19.0.1”. Penulis memiliki pengalaman magang di PT. PLN (PERSERO) Unit Induk Distribusi (UID) Lampung dan PT. PLN (PERSERO) UP2D Lampung sebagai bagian dari Divisi Perencanaan pada tahun 2023.

MOTTO

“Setetes keringat orang tuaku yang keluar, ada seribu langkahku untuk maju”

“Natus Vincere”

-Terlahir Untuk Menang-

“Semua jatuh bangunmu hal yang biasa, angan dan pertanyaan waktu yang menjawabnya, berikan tenggat waktu bersedihlah secukupnya, rayakan perasaanmu sebagai manusia”

(Baskara Putra – Hindia)

“Perang telah usai, aku bisa pulang.

Kubaringkan panah dan berteriak MENANG”

(Nadin Amizah)

“Kegagalan adalah pengalaman, dan pengalaman adalah guru terbaikmu”

“Tak ada kata TIDAK, ku pasti BISA”

(Maudy Ayunda)

“Maka sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan. Maka apabila engkau telah selesai (dari suatu urusan), tetaplah bekerja keras (untuk urusan yang lain).

Dan hanya kepada TUHAN mu lah engkau berharap”

(Q.S Al-Insyirah, 6-8)



PERSEMBAHAN

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dengan Ridho Allah SWT
Teriring shalawat kepada Nabi Muhammad SAW, Karya Tulis ini ku
persembahkan untuk:

Ayah dan Ibuku Tercinta

Karyadi dan Sri Lrestari

Kakak-kakakku Tersayang

*Agus Sutopo
Dwi Ratna Wati
Fitri Astuti
Cici Catur Cahyati*

Serta Yang Paling Tersayang

Alm. Sea Mahameru

Terimakasih untuk semua dukungan dan doa selama ini, sehingga Aku dapat
menyelesaikan hasil karyaku ini



SANWACANA

Segala puji bagi Allah SWT, atas limpahan nikmat dan karunia-Nya yang diberikan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Shalawat dan salam senantiasa dicurahkan kepada Nabi Muhammad SAW, suri teladan yang mampu membuka sesuatu yang terkunci, penutup dari semua yang terdahulu, penolong kebenaran dengan jalan yang benar, dan petunjuk kepada jalan-Mu yang lurus.

Tugas Akhir dengan judul “OPTIMASI ADOPSI PLTS SKALA RUMAH TANGGA DAYA TERPASANG 1.300 VA DENGAN MENGGUNAKAN METODE *MULTI-OBJECTIVE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION*” ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Kedua Orang tuaku tercinta, Bapak Karyadi dan Ibu Sri Lestari yang terus memberikan motivasi, dukungan, nasihat, dan doa tanpa henti kepada penulis untuk menyelesaikan perkuliahan dengan baik.
2. Kakak-kakakku tersayang, Mas Agus, Mba Ratna, Mba Fitri, dan Mba Cici, Iparku Mba Witi, Mas Iyon, Mas Irfan, Mas Arief, serta ponakan terutama Adek Panji yang menjadi penyemangat dan memberikan doa untuk penulis, semoga kelak kita menjadi orang yang sukses agar dapat membahagiakan dan membanggakan Orang tua kita.
3. My Big Dream, Bang Satriyo Dwi Cahyo, S.M. dan Alm. Sea Mahameru yang memberikan semangat dan dukungannya selama menyusun skripsi
4. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., I.P.M., selaku Rektor Universitas Lampung.
5. Bapak Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.

6. Ibu Herlinawati, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung.
7. Bapak Sumadi, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung.
8. Bapak Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing utama yang selalu memberikan motivasi dan pandangan kehidupan, mengarahkan dan membimbing dengan tulus dan penuh kesabaran.
9. Bapak Zulmiftah Huda, S.T. M.Eng., selaku dosen pembimbing pendamping yang telah memberikan saran, bimbingan dan arahan dengan baik.
10. Bapak Dr.Eng. Ir. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc., selaku dosen penguji yang telah memberikan masukan, kritik dan saran.
11. Bapak Dr. Ing. Ardian Ulvan, S.T., M.Sc., selaku dosen Pembimbing Akademik (PA) yang telah memberikan nasihat, arahan, bimbingan dengan baik dan tulus bagi penulis selama perkuliahan.
12. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu, pengajaran, dan pandangan hidup selama perkuliahan.
13. Staff administrasi Jurusan Teknik Elektro dan Fakultass Teknik Universitas Lampung yang telah membantu penulis dalam hal administrasi.
14. Bapak Adam Agustian, selaku pembimbing kerja praktik di PT. PLN Nusantara Power PLTD/G Teluk Betung
15. Bapak Roesdi, selaku pembimbing magang di PT. PLN (Persero) UP2D Lampung.
16. Pejuang S.T : Altika, Cahya, Desi, Kenya, Vica yang selalu memberikan dukungan dan selalu menjadi rekan perkuliahan penulis selama masa perkuliahan.
17. Sahabat Corleone House, Kak Rusni Mayang Sari, S.H. dan Mila Ana Siska
18. Rekan-rekan yang berhati mulia, Icus, Bang Cuko, Bang Jack, Bang Alos, Bang Ridho, Pizroni, Unedo, Benyamin
19. Keluarga besar angkatan HELLIOS 2020, yang telah memberikan banyak motivasi, nilai nilai sosial, dan bantuan dalam berbagai hal.

20. Keluarga besar HIMATRO UNILA, yang telah menjadi wadah dalam mengembangkan nilai nilai organisasi bagi penulis.
21. Keluarga besar Laboratorium STL, rekan-rekan Lab. STL seperjuangan 20 dan 21
22. Semua pihak yang terlibat dalam proses perkuliahan dan penulisan skripsi ini, penulis ucapkan terima kasih atas bantuan dan kerjasamanya.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi kesempurnaan skripsi ini yang akan datang. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis khususnya dan masyarakat pada umumnya.

Bandar Lampung, 13 Januari 2025

Penulis



Ipna Panca Ratih

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xvii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	3
1.3 Manfaat Penelitian	3
1.4 Rumusan Masalah	3
1.5 Batasan Penelitian	4
1.6 Hipotesis	4
1.7 Sistematika Penulisan	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Penelitian Terdahulu	6
2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)	7
2.2.1 PLTS Sistem <i>On-Grid</i>	8
2.2.2 PLTS Sistem <i>Off-Grid</i>	9
2.2.3 PLTS <i>Hybrid</i>	10
2.3 PLTS Atap (<i>Rooftop</i>)	11
2.4 Kebijakan PLTS Atap di Indonesia	11
2.5 <i>Particle Swarm Optimization</i>	12
2.6 <i>Genetic Algorithm</i>	16
III. METODE PENELITIAN	18
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	18
3.2 Alat dan Bahan	18

3.3 Tahapan Penelitian	19
3.4 Diagram Alir Penelitian	20
3.5 Pemodelan Ekonomi <i>Stakeholder</i>	21
3.6 Diagram Alir Program.....	26
3.6.1 <i>Particle Swarm Optimization</i>	26
3.6.2 <i>Genetic Algorithm</i>	27
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	28
4.1 Parameter Pemodelan Ekonomi <i>Stakeholder</i>	28
4.2 Skenario PLTS Atap Skala Rumah Tangga 1.300 VA.....	29
4.3 Biaya Investasi Pemasangan PLTS Atap	32
4.4 Inisialisasi Parameter Optimasi.....	34
4.4.1. <i>Particle Swarm Optimization</i>	34
4.4.2. <i>Genetic Alghorithm</i>	35
4.5 Hasil Simulasi Optimasi	37
4.5.1 <i>Particle Swarm Optimization</i>	37
4.5.2 <i>Genetic Alghorithm</i>	40
V. PENUTUP.....	45
5.1 Kesimpulan	45
5.2 Saran	45
DAFTAR PUSTAKA.....	46
LAMPIRAN.....	49

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya	8
Gambar 2 PLTS On-Grid	9
Gambar 3 Sistem PLTS Off-Grid.....	10
Gambar 4 Sistem PLTS Hybrid.....	10
Gambar 5 PV Rooftop.....	11
Gambar 6 Roadmap kebijakan PLTS Indonesia	12
Gambar 7 Perpindahan Partikel	13
Gambar 8 Partikel PSO	14
Gambar 9 Siklus GA	17
Gambar 10 Diagram Alir Penelitian.....	20
Gambar 11 Model bisnis ekonomis sentris	21
Gambar 12 Diagram Alir Program PSO	26
Gambar 13 Diagram Alir Program GA	27
Gambar 14 Penentuan parameter PLTS 1.110 Wp.....	31
Gambar 15 Grafik DPP scenario PLTS 1.110 Wp	33
Gambar 16 Solusi optimal pareto PLTS atap 1.110 Wp	39
Gambar 17 Solusi optimal pareto PLTS atap 1.110 Wp	42

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1 Jadwal Penelitian.....	18
Tabel 2 Rentang variable Keputusan dan kendala	28
Tabel 3 Datasheet Modul LR6-72 PE 370 M.....	29
Tabel 4 Datasheet Inverter Solis-1K-2G	30
Tabel 5 Energi yang dihasilkan oleh PLTS kapasitas 1.110 Wp	31
Tabel 6 Biaya investasi awal pemasangan PLTS 1.110 Wp.....	32
Tabel 7 Parameter optimasi menggunakan PSO	35
Tabel 8 Parameter optimasi menggunakan GA.....	35
Tabel 9 Perbandingan <i>best fitness</i> hasil optimasi 5 percobaan PLTS Atap 1.110 Wp.....	37
Tabel 10 Hasil Optimasi PSO PLTS Atap 1.110 Wp	38
Tabel 11 Perbandingan <i>best fitness</i> hasil optimasi 5 percobaan PLTS atap 1110 Wp	40
Tabel 12 Hasil Optimasi Algoritma Genetika PLTS atap 1.110 Wp.....	41
Tabel 13 Perbandingan hasil optimasi PSO dengan GA.....	43

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Konsumsi energi listrik di Indonesia terus meningkat seiring perkembangan teknologi dan pertumbuhan penduduk. Pada tahun 2023, konsumsi listrik per kapita mencapai 1.337 kWh, melebihi target 1.336 kWh dan meningkat 13,98% dari 1.173 kWh pada tahun 2022. Rasio elektrifikasi nasional juga naik dari 99,67% pada 2022 menjadi 99,78% pada 2023 [1]. Namun, konsumsi listrik per kapita Indonesia masih lebih rendah dibandingkan rata-rata ASEAN yang mencapai 3.896 kWh [2].

Selain itu, pasokan energi masih didominasi oleh sumber fosil seperti minyak bumi, gas, dan batubara, yang menyebabkan defisit energi karena konsumsi melebihi pasokan. Untuk mengatasi hal ini dan mengurangi emisi karbon, pemerintah berupaya menyelaraskan penyediaan energi nasional dengan program *Net Zero Emissions* (NZE) melalui pengembangan pembangkit berbasis *Variable Renewable Energy* (VRE) seperti Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) [3]. Namun, transisi ini menghadapi tantangan besar, mengingat Indonesia sebagai negara berkembang juga harus beradaptasi guna mewujudkan energi bersih dan terjangkau.

Indonesia memiliki potensi energi terbarukan yang besar, beragam, dan tersebar di berbagai wilayah. Menurut data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, total potensi energi baru terbarukan (EBT) di Indonesia mencapai 3.686 GW, dengan energi surya sebagai yang terbesar, yaitu sekitar 3.295 GW [4]. Berdasarkan Peraturan Presiden Nomor 112 Tahun 2022 tentang Kebijakan Energi Nasional, pemerintah menargetkan bauran EBT mencapai minimal 23% pada 2025 dan meningkat menjadi 31% pada 2050 [5], sejalan dengan upaya menuju *Net Zero Emission* (NZE) pada 2060. Namun, pemanfaatan energi surya di Indonesia masih tergolong rendah, meskipun potensinya lebih dari 400.000 MW, realisasi

penggunaannya baru sekitar 150 MW atau hanya 0,08% dari total potensi yang tersedia.

Rendahnya pemanfaatan energi surya di Indonesia dipengaruhi oleh hubungan antara pemerintah dan pemangku kepentingan, yang menghadapi berbagai hambatan sosial, teknis, manajerial, ekonomi, dan kebijakan [6]. Salah satu tantangan utama adalah biaya produksi energi terbarukan yang masih tinggi, membuatnya sulit bersaing dengan pembangkit berbahan bakar fosil, terutama PLTU yang mendominasi sistem ketenagalistrikan sebagai *base load*. Selain itu, keterbatasan pendanaan dan kebijakan yang belum optimal menghambat efisiensi serta skala pengembangan energi terbarukan [7]. Pemerintah telah menerapkan berbagai kebijakan untuk mendorong pemanfaatan energi surya, termasuk skema *net-metering* dan *net-billing* yang bertujuan meningkatkan adopsi PLTS atap skala rumah tangga dalam mendukung transisi energi dan program *Net Zero Emission*. Namun, efektivitas kebijakan ini masih perlu dikaji lebih lanjut, terutama dalam menghadapi tantangan yang semakin kompleks di tengah kebutuhan percepatan transisi energi serta dinamika pasar energi global yang terus berkembang [8].

Pengaruh kebijakan terhadap pengembangan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sangat signifikan. Perancangan kebijakan juga harus memperhatikan parameter *Feed-in Tariff* (FiT), kapasitas pembangkitan, dan tarif tagihan rata-rata untuk memaksimalkan keuntungan bagi pemangku kepentingan (*stakeholder*) [6]. Oleh karena itu, dalam penelitian ini penulis mengambil topik “Optimasi Adopsi PLTS Skala Rumah Tangga Daya Terpasang 1300 VA dengan Menggunakan Metode *Particle Swarm Optimization* (PSO)”. Dalam penelitian ini metode yang digunakan adalah *Particle Swarm Optimization* (PSO) dan *Genetic Algorithm* (GA) sebagai perbandingan dalam menyelesaikan masalah optimasi adopsi PLTS. Melalui penelitian ini, diharapkan dapat menjadi pertimbangan dalam menentukan instrumen kebijakan terkait *Feed-in Tariff* (FiT) dan kapasitas PLTS yang diizinkan di Indonesia, sehingga dapat meningkatkan pertumbuhan PLTS atap skala rumah tangga, menguntungkan semua *stakeholder*.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Meneliti skema adopsi kebijakan yang berkaitan dengan laba utilitas (PLN) dan penghematan prosumer secara optimal guna memastikan manfaat bagi semua *stakeholder* yaitu konsumen, prosumer, dan utilitas sehingga dapat mendorong perkembangan PLTS atap untuk skala rumah tangga di Indonesia.
2. Menghitung *Feed-in Tariff* (FiT) yang optimal dengan menggunakan metode *Particle Swarm Optimization* dan *Genetic Algorithm*.

1.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini bermanfaat dalam mendukung perkembangan sistem kelistrikan terutama dalam mendorong pertumbuhan PLTS atap skala rumah tangga, meningkatkan adopsi PLTS atap oleh masyarakat, serta berkontribusi pada pencapaian program *Net Zero Emission* di Indonesia sebagai bagian dari upaya percepatan transisi energi menuju sumber energi terbarukan.

1.4 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang model skema adopsi PLTS yang mempertimbangkan laba utilitas (PLN) dan penghematan prosumer secara optimal sehingga dapat memberikan manfaat bagi semua *stakeholder*?
2. Bagaimana cara menghitung *Feed-in Tariff* (FiT) yang optimal menggunakan metode *Particle Swarm Optimization* dan *Genetic Algorithm* untuk meningkatkan adopsi PLTS atap skala rumah tangga?

1.5 Batasan Penelitian

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Kapasitas maksimum PLTS yang dianalisis dalam penelitian ini adalah 1,3 kW, yang disesuaikan dengan daya listrik rumah tangga PLN sebesar 1.300 VA.
2. Perhitungan energi yang dihasilkan oleh prosumer pemilik PLTS dilakukan dengan menggunakan *software* PVsyst.
3. Penelitian ini berfokus pada konsumen pascabayar di PT PLN (Persero) UP3 Tanjung Karang.
4. Suku bunga yang digunakan dalam penelitian ini ditetapkan sebesar 8,91% per tahun.

1.6 Hipotesis

Optimalisasi skema adopsi PLTS atap skala rumah tangga dengan daya terpasang 1.300 VA dapat dilakukan menggunakan metode *Particle Swarm Optimization* dan *Genetic Algorithm* guna memaksimalkan penghematan prosumer serta laba utilitas sehingga diperoleh rekomendasi kebijakan *Feed-in Tariff* (FiT) yang optimal agar dapat meningkatkan adopsi PLTS atap skala rumah tangga di Indonesia.

1.7 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

BAB I. PENDAHULUAN

Memuat latar belakang, tujuan penelitian, rumusan masalah, batasan masalah, manfaat penelitian, hipotesis dan sistematika penulisan.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Memuat teori yang mendukung dan berkaitan dengan topik penelitian yang diperoleh dari berbagai sumber buku, jurnal, dan penelitian ilmiah yang digunakan untuk penulisan laporan tugas akhir ini.

BAB III. METODE PENELITIAN

Memaparkan latar waktu dan tempat, alat dan bahan, serta tahapan penelitian dalam pembuatan tugas akhir.

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perancangan sistem PLTS dengan menentukan aspek teknis pada komponen yang akan digunakan, mensimulasikan sistem PLTS, serta menganalisis kelayakan dari aspek teknis dan ekonomi sebagai pembahasan pada penelitian ini.

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi kesimpulan yang diperoleh dari data dan pembahasan yang telah dianalisis serta saran untuk pengembangan penelitian berikutnya.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Menurut Ahsan Kabir *et al.* [9], kebijakan *net-metering* memberikan fleksibilitas lebih bagi pelanggan dalam menentukan kapasitas sistem PV mereka. Dibandingkan dengan *net-billing*, *net-metering* menghasilkan variasi penghematan tagihan yang lebih kecil. Sementara itu, dalam skema *net-billing*, pelanggan harus menyesuaikan kapasitas sistem PV mereka dengan rasio PV terhadap beban yang lebih tinggi. Namun, *net-billing* tetap dapat diterapkan jika tarif pembelian kembali yang ditawarkan cukup menarik bagi pelanggan. Penelitian Pasapong Gamonwet yang berjudul “*The assessment of the value of electricity saving and economic benefit to residential solar rooftop PV customer: The case of Thailand*” [10] juga membahas aspek ini.

Penelitian Dinita Setyawati *et al.* dalam “*Analysis of Perceptions Towards the Rooftop Photovoltaic Solar System Policy in Indonesia*” [11] menyoroti efektivitas kebijakan *net-metering* dalam meningkatkan ketahanan energi dan mengurangi emisi gas rumah kaca. Dengan mengadopsi pendekatan dinamika sistem, analisis kebijakan dilakukan secara sistematis dan komprehensif untuk menilai perkembangan PLTS. Model simulasi SFD digunakan untuk mengevaluasi efektivitas *net-metering* dan *net-billing* berdasarkan tiga indikator utama: penghematan listrik, tingkat adopsi PLTS atap, dan pengurangan emisi CO₂. Penelitian ini juga mempertimbangkan empat aspek yang saling terkait, yaitu teknis, ekonomi, sosial, dan lingkungan. Hasilnya menunjukkan bahwa kebijakan *net-metering* lebih efektif dibandingkan *net-billing* dalam meningkatkan adopsi PLTS atap di sektor rumah tangga.

Dalam penelitian berjudul “*Economic Analysis of Grid-connected Residential Rooftop PV System in Turkey*” [12] Duman dan Guler menganalisis aspek ekonomi sistem PV atap perumahan yang terhubung ke jaringan listrik di Turki dengan skema *Feed-in Tariff* (FiT). Hasil penelitian menunjukkan bahwa periode pengembalian diskonto (DPBP) berkisar antara 7,75 hingga 14,43 tahun, tingkat pengembalian internal (IRR) berada dalam rentang 13,68% hingga 6,87%, dan indeks profitabilitas (PI) berkisar antara 2,02 hingga 1,28. Untuk mengevaluasi kelayakan sistem serta dampak kebijakan, dilakukan analisis sensitivitas terhadap variasi biaya awal FiT dan PV.

Penelitian yang berjudul “*Policy Optimization of Residential Rooftop Solar PV System Adoption in Indonesia ; Considering Stakeholders,*” oleh Herri Gusmedi *et al*, [13] melakukan analisis komprehensif terkait model bisnis yang berpusat pada konsumen untuk instalasi PLTS atap di Indonesia. Mereka mengoptimalkan *Feed in Tariff* (FiT), kapasitas PV, dan tarif tagihan rata-rata untuk memaksimalkan manfaat *stakeholder*. *Stakeholder* yang dipertimbangkan adalah konsumen, prosumer, dan utilitas. Model untuk laba utilitas dan penghematan prosumer dikembangkan, dan dirumuskan dengan FiT, kapasitas pembangkitan (sebagai fungsi permintaan), dan tarif tagihan rata-rata sebagai variabel keputusan. Penelitian ini juga membandingkan tarif yang berlaku dan tarif FiT dari utilitas PLN, serta dampaknya terhadap penghematan prosumer dan laba utilitas.

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya) adalah pembangkit listrik yang mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik. PLTS secara umum dapat beroperasi dengan tiga macam sistem, yaitu Sistem PLTS *off grid*, sistem PLTS *On Grid*, dan PLTS *Hybrid*. Pada sistem PLTS *off grid*, biasanya energi listrik yang telah dihasilkan akan disimpan terlebih dahulu didalam baterai. Pada sistem PLTS *On Grid* energi listrik yang dihasilkan akan dihubungkan dengan jaringan transmisi. PLTS *hybrid* adalah gabungan sistem PLTS dengan sistem pembangkit listrik lain

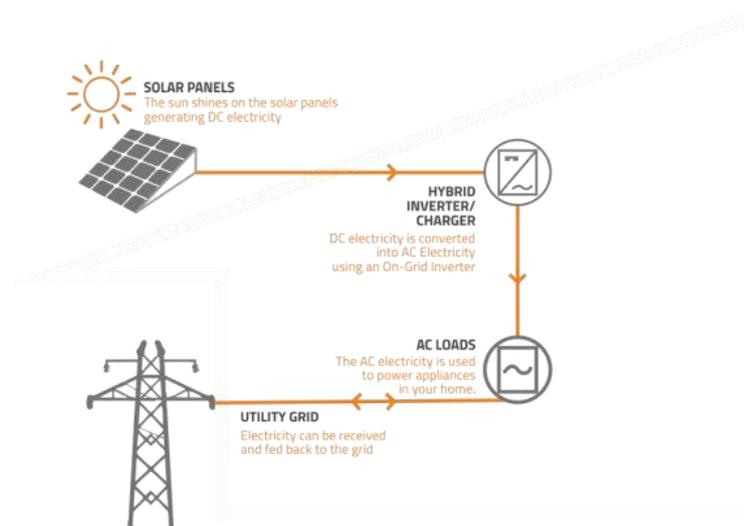
yang bertujuan untuk menjaga kesinambungan suplai energi dan mengoptimalkan penunggunaan energi hijau. Komponen pada PLTS yang berperan mengubah energi matahari menjadi energi listrik adalah Modul Surya. Modul surya menghasilkan jenis listrik DC (*Direct Current*). Agar dapat digunakan pada beban atau kebutuhan sehari – hari, maka tegangan DC harus di ubah menjadi AC. Alat yang berperan untuk mengkonversikan energi yang dihasilkan oleh modul surya ini adalah Inverter [5].



Gambar 1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

2.2.1 PLTS Sistem *On-Grid*

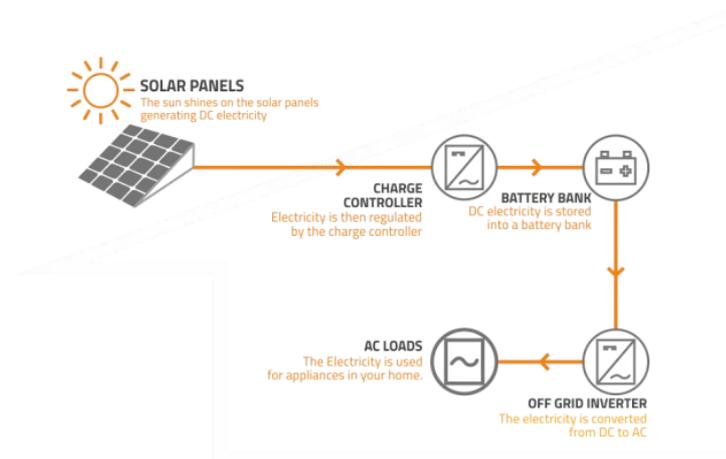
Sistem operasi on-grid seperti namanya merupakan sistem operasi dimana panel surya tetap terhubung dengan grid utama yaitu PLN. Dalam sistem operasi ini grid utama dapat menangani kekurangan atau kelebihan energi dari panel surya, sehingga panel surya dapat bekerja untuk menghasilkan energi semaksimal mungkin, karena kestabilan energinya akan disuplai oleh grid utama [14] . Energi yang dihasilkan panel surya dapat mengurangi kebutuhan listrik dari PLN, sehingga memiliki keuntungan menghemat tagihan listrik. Sistem on-grid disebut sistem yang paling mudah diaplikasikan dan paling cost-effective. Penghematan sistem ini akan memberikan pengembalian biaya pemasangan (payback period) antara 7 tahun sampai 9 tahun tergantung pada ukuran instalasinya.



Gambar 2 PLTS *On-Grid*

2.2.2 PLTS Sistem *Off-Grid*

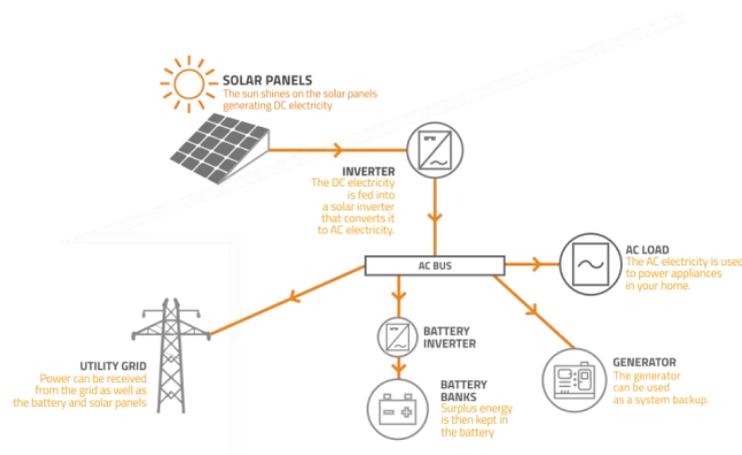
Sistem operasi off-grid seperti namanya merupakan sistem operasi dimana panel surya bekerja terpisah dari grid utama yaitu PLN. Dalam hal ini panel surya berperan sebagai satu-satunya sumber energi bagi beban. Energi berlebih akan di simpan pada baterai, dan akan digunakan kembali saat intensitas cahaya matahari sedang tidak baik, sehingga komponen baterai menjadi komponen yang sangat penting pada sistem operasi ini [15]. Di Indonesia menteri ESDM menyarankan konsumen yang menggunakan sistem operasi off-grid untuk menggunakan baterai yang dapat menyuplai cadangan energi minimal 3 hari.



Gambar 3 Sistem PLTS *Off-Grid*

2.2.3 PLTS *Hybrid*

Sistem operasi hybrid adalah sistem operasi dimana satu atau lebih sumber energi bekerja bersama panel surya dalam memasok energi bagi beban, biasanya berupa generator diesel, mikrohidro, dan tenaga angin. Dalam sistem operasi ini panel surya bertugas sebagai pemasok energi primer, dimana sumber energi lain bertugas untuk mengisi selisih energi yang dihasilkan panel surya dengan energi yang dibutuhkan beban. Sistem operasi ini biasa digunakan pada daerah yang tidak terjangkau jaringan grid utama PLN [16].



Gambar 4 Sistem PLTS *Hybrid*

2.3 PLTS Atap (Rooftop)

Metode Rooftop Rack diaplikasikan pada atap rumah ataupun gedung yang posisinya miring. Besi penyangga akan dipasang dengan menggunakan baut sebagai penguat agar kokoh. Metode pemasangan ini ditempatkan pada bangunan yang memiliki atap miring, sehingga modul panel ditempatkan sesuai dengan kemiringan dan kontur atap bangunan itu sendiri [3]. Gambar di bawah ini menunjukkan metode pemasangan Rooftop Rack.



Gambar 5 *PV Rooftop*

2.4 Kebijakan PLTS Atap di Indonesia

Pemerintah Indonesia telah merancang kebijakan untuk memungkinkan pengembangan sektor energi surya yang cepat dan stabil. Pemerintah menetapkan target untuk meningkatkan pangsa energi terbarukan dan mengembangkan kebijakan baru sebagai tanggapan atas meningkatnya kepentingan publik dan komersial dalam energi surya [2]. Kebijakan tersebut diamanatkan melalui beberapa regulasi, seperti Peraturan Menteri ESDM No. 17/2013, Peraturan Menteri ESDM No. 79/2014 yang diharapkan dapat meningkatkan target energi terbarukan, yaitu minimal 23% pada tahun 2025, Peraturan Menteri ESDM No. 50/2017, Peraturan Menteri ESDM No. 49/2018, Peraturan Menteri ESDM No.16/2019, dan Peraturan Menteri ESDM No. 26/2021.



Gambar 6 *Roadmap* kebijakan PLTS Indonesia

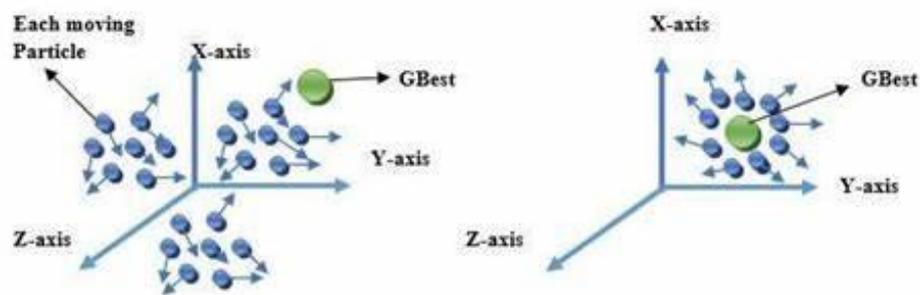
PLTS Atap memiliki sifat *intermittent* sehingga pengembangan PLTS Atap harus dihitung secara cermat dengan memperhatikan keandalan sistem, sehingga perlu ditetapkan kuota PLTS setiap tahunnya yang masuk ke suatu system. Melalui Peraturan Menteri ESDM Nomor 2/2024 pemerintah melakukan beberapa perbaikan pengaturan yang secara umum bertujuan untuk efisiensi dan transparansi sekaligus meningkatkan minat masyarakat dalam memasang PLTS Atap. Upaya lain penerapan energi surya adalah kebijakan metering. Kedua instrumen kebijakan metering tersebut yaitu *Net-metering* (Peraturan PLN No. 0733/2013). Peraturan PLN No. 0733 merupakan peraturan meteran bersih pertama yang diterbitkan dengan mekanisme ekspor-impor. *Net-billing* (Peraturan ESDM No. 49/2018). Permen ESDM No. 49/2018 dikeluarkan oleh ESDM untuk mendukung pengembangan energi surya yang menerapkan mekanisme ekspor-impor. Namun berbeda dengan *net-metering*, kelebihan listrik pemilik dijadikan kredit untuk *net-off* penggunaan listrik pemilik dari PLN.

2.5 *Particle Swarm Optimization*

Particle Swarn Optimization (PSO) merupakan sebuah proses algoritma yang terinspirasi dari perilaku sosialpergerakan burung atau ikan dalam mencari makan yang dikembangkan oleh James Kennedy dan Russell C. Eberhart pada tahun 1995. *Particle Swarn Optimization* termasuk kedalam golongan metaheuristik optimasi Swarn Intelligence (SI) dimana prinsip sosio - psikologi yang mempengaruhi perilaku sosial makhluk hidup diadopsi [17] .

Particle Swarn Optimization (PSO) adalah sebuah optimasi dimana prosedur pencarian berdasarkan populasi yang ada didalam individu - individu (partikel - partikel),mengubah posisi (*state*) mereka terhadap waktu. Dalam sistem *Particle*

Swarm Optimization (PSO), partikel mencari dalam ruang pencarian multidimensi. Selama pencarian setiap partikel menyesuaikan posisinya menurut pengalaman pribadinya, dan menurut pengalaman individu disebelahnya, maka dapat membentuk posisi terbaik yang sesuai untuk dirinya dan individu sebelahny. *Particle Swarm Optimization* (PSO) menerapkan sifat masing-masing individu dalam satu kelompok besar, kemudian menggabungkan sifat-sifat tersebut untuk menyelesaikan permasalahan atau menggabungkan metode *local search* dengan metode *global search* yang menyeimbangkan antara eksplorasi dan eksploitasi [18].

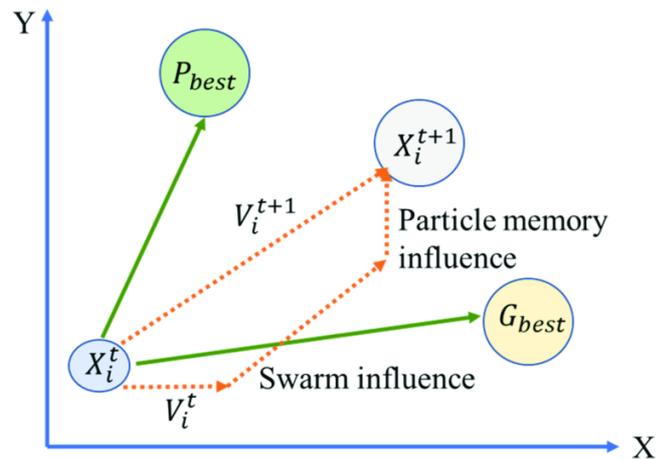


Gambar 7 Perpindahan Partikel

Dalam *Particle Swarm Optimization* (PSO) *Potensial Solutions* (partikel) bergerak melalui penelusuran ruang dengan kecepatan (*Velocity*) yang dinamis sampai ditemukan posisi yang relatif tidak berubah, atau sampai keterbatasan komputasi terlampaui. Maka dari itu, partikel-partikel memiliki kecenderungan untuk bergerak karena penelusuran yang lebih baik setelah melewati proses penelusuran. Sehingga mekanisme berbagai informasi yang dimiliki *Particle Swarm Optimization* berbeda secara signifikan dengan yang dimiliki *Genetik Algorithms* (GA). Dalam *Particle Swarm Optimization* (PSO) hanya *Gbest* atau *Pbest* yang memberi informasi kepada yang lain. mekanisme ini merupakan mekanisme berbagi informasi satu arah. proses evolusi hanya mencari solusi yang terbaik [19]. Dengan demikian, seluruh individu yang disebut partikel-partikel bergerak konvergen secara cepat ke solusi lain.

Koordinat x dan v menunjukkan koordinat partikel dan *velocity* dalam ruang pencarian. *Pbest* direpresentasikan sebagai posisi terbaik partikel. *Gbest*

direpresentasikan sebagai indeks partikel terbaik diantara semua partikel dalam kelompok. Untuk menghitung kecepatan (*velocity*) yang baru (update kecepatan) dapat dilakukan dengan persamaan dibawah ini :



Gambar 8 Partikel PSO

$$V_{i,j}^{k+1} = w \cdot V_{i,j}^k + c_1 \cdot r_1 \cdot (P_{best_{i,j}}^k - X_{i,j}^k) + c_2 \cdot r_2 \cdot (G_{best_j}^k - X_{i,j}^k) \quad (1)$$

Untuk update posisi dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini :

$$X_{i,j}^{k+1} = X_{i,j}^k + V_{i,j}^{k+1} \quad (2)$$

Dimana :

w = Bobot inersia

c_1, c_2 = Variabel acceleration factor

$V_{i,j}^k$ = Kecepatan arus partikel

$X_{i,j}^k$ = Posisi partikel

$V_{i,j}^{k+1}$ = Update velocity (kecepatan)

$X_{i,j}^{k+1}$ = Update posisi

r, r_2 = Bilangan Random

Pada setiap iterasi, posisi saat ini dapat dievaluasi sebagai solusi masalah. Jika posisi yang lebih baik ditemukan dari posisi sebelumnya maka titik tersebut yang menjadi *Pbest* dan posisi terbaik titik tersebut akan disimpan dan menjadi perbandingan untuk iterasi selanjutnya. Hal ini dilakukan agar didapat posisi terbaik dan mulai *Pbest* yang terus diperbaharui.

Pemilihan berat inersia (w_0) membuat keseimbangan antara eksplorasi global dan local. Berat inersia berfungsi untuk meredam kecepatan selama proses iterasi, sehingga memungkinkan kawanan untuk konvergen lebih akurat dan efisiensi. Untuk menentukan w_0 maka dapat dilihat pada persamaan ... dibawah ini :

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} \cdot iter \quad (3)$$

Dimana :

$iter_{max}$ = Jumlah maksimal iterasi

Iter = Iterasi saat ini

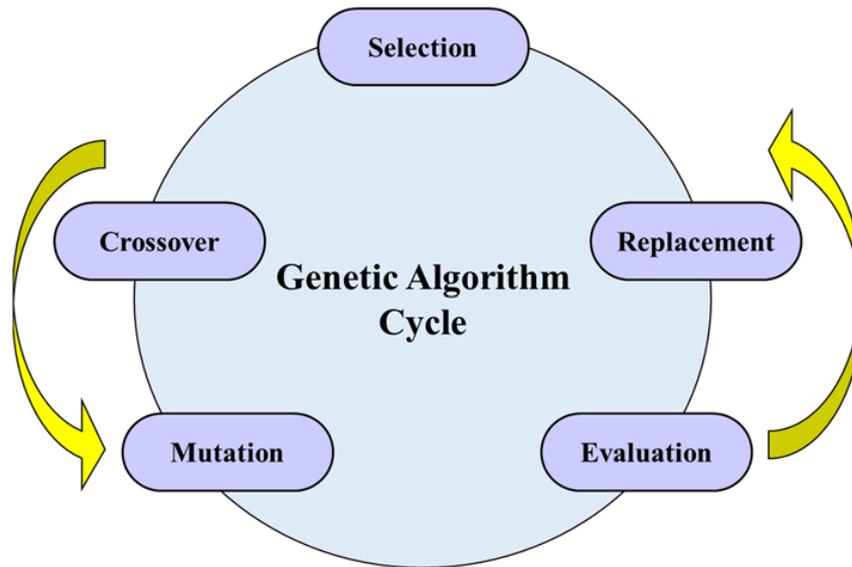
Algoritma PSO dasarnya untuk mengatur suatu populasi dari partikel, dimana pada setiap partikel merupakan suatu hasil yang potensial bagi sebuah permasalahan optimasi. Berikut merupakan algoritma dari PSO :

1. Menentukan populasi dan menentukan nilai awal dari masing-masing partikel secara *random* (acak).
2. Mengevaluasi nilai fungsi tujuan untuk setiap partikel.
3. Menentukan *velocity* mula-mula.
4. Menghitung *Pbest* dan *Gbest* mula-mula.
5. Menghitung *velocity* pada iterasi berikutnya.
6. Menentukan posisi partikel pada iterasi berikutnya.
7. Mengevaluasi nilai fungsi tujuan pada iterasi selanjutnya.
8. Memperbarui nilai *Pbest* dan *Gbest*.
9. Mengecek apakah Solusi sudah optimal atau belum. Bila sudah optimal maka proses algoritma berhenti. Namun, bila belum optimal, Kembali ke langkah 5.

2.6 Genetic Algorithm

Algoritma genetika merupakan algoritma komputasi yang ditemukan oleh John H. Holland dari University of Michigan yang memulai penelitiannya pada tahun 1960 dan dikembangkan oleh muridnya yang bernama David Goldberg. Dalam penelitian Holland penerapan algoritma genetika dikaitkan dengan metode adaptif untuk memecahkan masalah dan optimasi yang terinspirasi dari teori evolusi Darwin atau evolusi alami [20].

Metode GA merupakan bagian dari *Evolutionary Algorithm*, yaitu algoritma yang mengikuti proses evolusi alami. Konsep utama dari *Evolutionary Algorithm* adalah individu yang paling unggul akan bertahan hidup, sedangkan individu yang lemah akan punah. Oleh sebab itu, metode ini digunakan untuk menemukan solusi optimal pada masalah komputasi yang diberikan. Solusi optimal yang didapatkan oleh GA didapatkan dengan cara memaksimalkan atau meminimalkan fungsi tertentu [19]. Pencarian solusi algoritma GA diawali dengan menentukan populasi awal. Populasi awal terdiri dari himpunan solusi yang dihasilkan secara acak. Setiap individu yang berada dalam populasi disebut kromosom, yang merupakan representasi dari kandidat-kandidat solusi. Setiap kromosom kemudian dievaluasi tingkat ketangguhannya (*fitness*) oleh fungsi yang telah ditentukan. Setelah itu akan dilakukan seleksi alam gen dari dua kromosom (*parent*). Seleksi alam akan menghasilkan kromosom baru dengan *fitness* yang lebih tinggi sebagai generasi baru (*offspring*). Kromosom tersebut akan mengalami iterasi yang disebut generasi. Setiap generasi kromosom dievaluasi berdasarkan nilai fungsi *fitness*. Setelah melalui beberapa generasi, maka GA akan mendapatkan kromosom terbaik yang merupakan solusi optimal.



Gambar 9 Siklus GA

Algoritma genetika memiliki keunggulan sebagai berikut:

1. Bekerja dengan cara memanipulasi kode-kode set parameter, bukan dengan hasil manipulasi nilai parameter itu sendiri.
2. Algoritma genetika bebas untuk mengkodekan masalah dengan berbagai macam cara sehingga algoritma genetika tidak dibatasi dengan batasan dari metode lainnya.
3. Algoritma genetika bekerja dengan populasi titik, bukan satu titik.
4. Menggunakan informasi fungsi tujuan, bukan turunan dan sebagainya.
5. Menggunakan aturan perpindahan probabilistik, bukan deterministic
6. Membutuhkan iterasi yang berulang-ulang dalam jumlah yang relatif banyak, sehingga perlu dibangun dalam sebuah program aplikasi komputer untuk menyelesaikan masalah.

Algoritma genetika juga memiliki kekurangan, yaitu sebagai berikut:

1. Bekerja dengan bilangan acak pada kromosom awal, sehingga memungkinkan kromosom terbaik tidak terlibat dalam proses.
2. Menggunakan pembangkitan bilangan random dalam setiap pemilihan kromosom baik untuk induk, proses persilangan maupun mutasi.

Solusi yang dihasilkan belum tentu merupakan solusi yang optimal, karena sangat dipengaruhi oleh bilangan acak yang dibangkitkan

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan dalam kurun waktu 4 bulan, yaitu pada bulan Juni – September 2024 di Laboratorium Terpadu Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung.

Tabel 1 Jadwal Penelitian

No	Nama Kegiatan	Bulan			
		Juni	Juli	Agustus	September
1.	Studi Literatur dan terbimbing				
2.	Pembuatan Proposal				
3.	Seminar Proposal				
4.	Pengumpulan data				
5.	Pengolahan data dan pembuatan program				
6.	Evaluasi hasil simulasi				
7.	Penyusunan laporan				
8.	Seminar hasil				
9.	Ujian komprehensif				

3.2 Alat dan Bahan

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

1. Satu unit laptop dengan spesifikasi AMD Ryzen 3 5300U Radeon Graphics dilengkapi prosesor 2.60 GHz, serta sistem operasi Windows 10 64-bit sebagai perangkat pemodelan dan simulasi.

2. Software MATLAB komputasi R2021a sebagai perangkat lunak utama untuk simulasi *Particle Swarm Optimization* dan *Genetic Algorithm*.
3. Software PVsyst untuk mengetahui kapasitas ukuran PLTS atap, energi yang dihasilkan dari system PLTS atap, dan tagihan bulanan prosumer ke Utilitas (PLN)
4. Software Microsoft Excel digunakan untuk memvalidasi perhitungan dan pembuatan grafik
5. Data-data yang mencakup jumlah konsumen dan prosumer, tarif tagihan rata-rata, biaya pokok penyediaan pembangkitan, tagihan bulanan prosumer dan konsumen, serta kapasitas PLTS atap yang terpasang beserta energi yang dibangkitkannya.

3.3 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur
Proses mendapatkan teori-teori yang mendukung mengenai PLTS *Hybrid* dari berbagai referensi seperti jurnal, penelitian terdahulu, maupun buku.
2. Studi Terbimbing
Pada tahap ini penulis melakukan diskusi dan tanya jawab dengan dosen pembimbing guna menambah wawasan dan mengenai permasalahan-permasalahan yang dihadapi selama proses pengerjaan penelitian.
3. Pengumpulan Data dan Pengolahan Data
Penulis mengumpulkan data-data yang dibutuhkan penelitian yang akan digunakan untuk analisis menggunakan perangkat lunak. Adapun data-data yang dibutuhkan untuk penelitian ini
4. Simulasi dan Analisis
Data-data yang telah diolah sebelumnya, kemudian dilakukan perhitungan dengan menggunakan *Particle Swarm Optimization* dan *Genetic Algorithm*

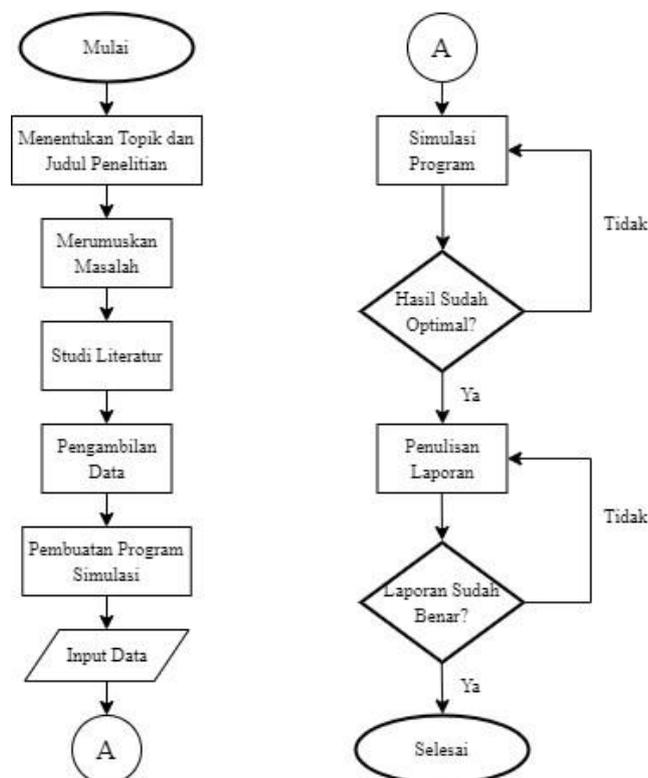
untuk mengoptimalkan laba utilitas (PLN) dan penghematan prosumer (pemilik PLTS atap) dengan tujuan memaksimalkan keuntungan *stakeholder* (konsumen, prosumer, dan utilitas). Fungsi kendala pada penelitian ini dirumuskan dengan FiT, kapasitas pembangkitan (sebagai fungsi permintaan), permintaan energi oleh prosumer, dan tarif tagihan rata-rata sebagai variabel Keputusan.

5. Penulisan Laporan

Pada tahap ini, penulis membuat laporan terkait hasil yang telah didapatkan dan sebagai sarana pertanggungjawaban terhadap penelitian yang telah dikerjakan. Laporan penelitian ini dibagi menjadi dua tahap, yaitu laporan awal yang digunakan untuk seminar proposal dan laporan akhir yang digunakan untuk seminar hasil.

3.4 Diagram Alir Penelitian

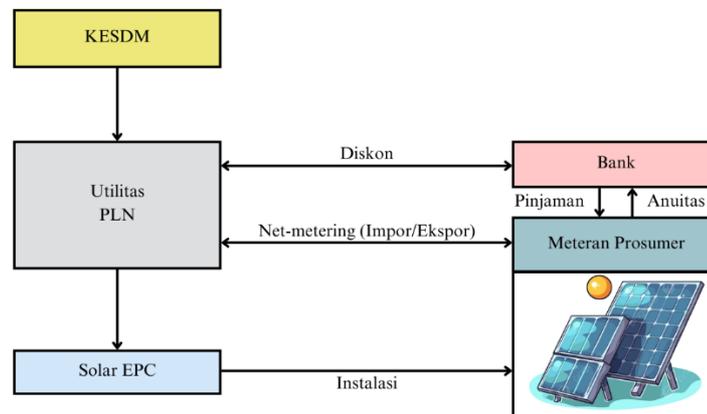
Adapun diagram alir pada penelitian ini adalah sebagai berikut:



Gambar 10 Diagram Alir Penelitian

3.5 Pemodelan Ekonomi *Stakeholder*

Penelitian ini membahas pemodelan dengan pendekatan sentris konsumen, yaitu konsumen menanggung biaya modal dan operasional untuk pemasangan PLTS atap serta memiliki kepemilikan penuh atas sistem tersebut. Dalam investasi pemasangan PLTS atap konsumen memperoleh potongan harga sebesar 20%. Prosumer yang dianalisis dalam penelitian ini memiliki kapasitas maksimum 1,3 kW, sesuai dengan kategori tarif listrik R-1/TR untuk daya 1.300 VA. Manfaat yang diperoleh utilitas dihitung berdasarkan laba dari penjualan energi dengan tarif rata-rata setelah memperhitungkan biaya pengadaan energi. Sementara itu, manfaat bagi prosumer dimodelkan dalam bentuk penghematan yang diperoleh dari penggunaan PLTS atap, dengan mempertimbangkan pembayaran angsuran investasi (anuitas) untuk biaya pemasangan serta pendapatan dari penjualan energi surya yang dihasilkan secara lokal.



Gambar 11 Model bisnis ekonomis sentris

Pendapatan dari penjualan energi di tagihan rata-rata ke konsumen tanpa PLTS, pendapatan dari penjualan energi defisit di tarif tagihan rata-rata dari prosumer, dan biaya bulanan tetap dari prosumer dan konsumen ditunjukkan oleh persamaan (4), (5), dan (6).

$$P_k = c_1 \times c_2 \quad (4)$$

$$P_p = (x_1 - x_2) \times (c_3 - 1) \times c_2 \quad (5)$$

$$B_{bt} = c_4 \times (c_5 + c_6) \quad (6)$$

Oleh karena itu, pendapatan utilitas diperoleh dengan persamaan sebagai berikut.

$$\text{Pendapatan utilitas} = P_k + P_p + B_{bt} \quad (7)$$

$$\text{Pendapatan utilitas} = (c_1 \times c_2) + \{(x_1 - x_2) \times (c_3 - 1) \times c_2\} + c_4 \times (c_5 + c_6) \quad (8)$$

Nilai c_3 ditentukan oleh persamaan (9) yang menunjukkan apakah prosumer mengalami kelebihan energi atau defisit energi.

$$c_3 = \begin{cases} 1, & (x_1 - x_2) > 0 \\ 0, & (x_1 - x_2) \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

Keterangan:

P_k : Pendapatan dari penjualan energi di tarif tagihan rata-rata ke konsumen tanpa PLTS (Rp)

P_p : Pendapatan dari penjualan energi defisit di tarif tagihan rata-rata dari prosumer (Rp)

B_{bt} : Biaya bulanan tetap dari prosumer dan konsumen (Rp)

c_1 : Permintaan energi dari konsumen (kWh)

c_2 : Tarif tagihan rata-rata (Rp/kWh)

c_3 : Selisih energi yang dihasilkan oleh prosumer dengan energi yang dibutuhkan prosumer

c_4 : Biaya beban tetap (Rp)

c_5 : Jumlah prosumer

c_6 : Jumlah konsumen

x_1 : Total energi yang dibangkitkan oleh PLTS milik prosumer (kWh)

x_2 : Permintaan energi dari prosumer (kWh)

Pembelian energi dari prosumer di FiT dan pembelian sisa energi untuk memenuhi permintaan sistem prosumer di biaya suplai rata-rata ditunjukkan oleh persamaan (10) dan (11).

$$B_{pf} = c_3 \times (x_1 - x_2) \times x_3 \quad (10)$$

$$B_{sa} = \{c_1 - (x_1 - x_2)\} \times c_7 \quad (11)$$

Dengan demikian, biaya yang dikeluarkan oleh utilitas adalah sebagai berikut:

$$\text{Pengeluaran utilitas} = B_{pf} + B_{sa} \quad (12)$$

$$\text{Pengeluaran utilitas} = \{c_3 \times (x_1 - x_2) \times x_3\} + \{c_1 - (x_1 - x_2)\} \times c_7 \quad (13)$$

Laba yang diperoleh utilitas ditunjukkan oleh persamaan (14).

$$\text{Laba utilitas} = \text{Pendapatan utilitas} - \text{Pengeluaran utilitas} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \text{Laba utilitas} = & [(c_1 \times c_2) + \{(x_1 - x_2) \times (c_3 - 1) \times c_2\} + c_4 \times (c_5 + c_6)] - \\ & [\{c_3 \times (x_1 - x_2) \times x_3\} + \{c_1 - (x_1 - x_2)\} \times c_7] \end{aligned} \quad (15)$$

Keterangan:

B_{pf} : Pembelian energi dari prosumer di FiT (Rp)

B_{sa} : Pembelian sisa energi untuk memenuhi permintaan sistem prosumer di biaya suplai rata-rata (Rp)

c_7 : Biaya suplai rata-rata (Rp/kWh)

x_3 : *Feed in Tariff* (Rp)

Biaya pembelian energi di tarif tagihan rata-rata oleh prosumer dan tagihan tetap bulanan prosumer tanpa PLTS ditunjukkan oleh persamaan (16) dan (17).

$$B_{bap} = x_2 \times c_2 \quad (16)$$

$$T_{bpt} = c_4 \times c_5 \quad (17)$$

Keterangan:

B_{bap} : Biaya pembelian energi di tarif tagihan rata-rata oleh prosumer (Rp)

T_{bpt} : Tagihan tetap bulanan prosumer (Rp)

Maka besarnya tagihan listrik bulanan yang ditanggung oleh prosumer tanpa PLTS adalah sebagai berikut:

$$\text{Tagihan prosumer tanpa PLTS} = B_{bap} + T_{bpt} \quad (18)$$

$$\text{Tagihan prosumer tanpa PLTS} = (x_2 \times c_2) + (c_4 \times c_5) \quad (19)$$

Biaya pembelian defisit energi prosumer di tarif tagihan rata-rata dan pendapatan dari penjualan surplus energi di FiT dari prosumer ditunjukkan oleh persamaan (20) dan (21).

$$B_{bdp} = (1 - c_3) \times (x_2 - x_1) \times c_2 \quad (20)$$

$$P_{psf} = (x_2 - x_1) \times x_3 \times c_3 \quad (21)$$

Maka besarnya tagihan listrik bulanan prosumer dengan PLTS adalah sebagai berikut:

$$\text{Tagihan prosumer PLTS} = B_{pdp} + P_{psf} + T_{bpt} + c_8 \quad (22)$$

$$\text{Tagihan prosumer PLTS} = \{(1 - c_3) \times (x_2 - x_1) \times c_2\} + \{(x_2 - x_1) \times x_3 \times c_3\} + (c_4 \times c_5) + c_8 \quad (23)$$

Angsuran bulanan investasi (anuitas) ditunjukkan oleh persamaan (24).

$$c_8 = p \times i \times \frac{(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (24)$$

Keterangan:

B_{pdp} : Biaya pembelian defisit energi prosumer di tarif tagihan rata-rata (Rp)

P_{psf} : Pendapatan dari penjualan surplus energi di FiT oleh prosumer (Rp)

c_8 : Angsuran bulanan investasi (anuitas)

p : Biaya total instalasi

i : Tingkat suku bunga

n : Periode pengembalian

Penghematan prosumer yang menjadi fungsi objektif ditunjukkan oleh persamaan (25).

$$\text{Penghematan prosumer} = \text{Tagihan prosumer tanpa PLTS} - \text{Tagihan prosumer PLTS} \quad (25)$$

$$\text{Penghematan prosumer} = [(x_2 \times c_2) + (c_4 \times c_5)] - [\{(1 - c_3) \times (x_2 - x_1) \times c_2\} + \{(x_2 - x_1) \times x_3 \times c_3\} + (c_4 \times c_5) + c_8] \quad (26)$$

Kedua fungsi objektif tersebut dapat dituliskan dalam bentuk matematis sebagai berikut:

$$f_1(x_1, x_2, x_3) = c_2(1 - c_3)x_1 + (c_2 \cdot c_3)x_2 + c_3(x_1 - x_2)x_3 - c_8 \quad (27)$$

$$f_2(x_1, x_2, x_3) = (c_7 - c_2(1 - c_3))x_1 - (c_7 - c_2(1 - c_3))x_2 - c_3(x_1 - x_2)x_3 + c_1(c_2 - c_7) \quad (28)$$

Atau dapat ditulis ke dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} f_1(x_1, x_2, x_3) \\ f_2(x_1, x_2, x_3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_2(1 - c_3) & (c_2 \cdot c_3) & c_3(x_1 - x_2) \\ (c_7 - c_2(1 - c_3)) & -(c_7 - c_2(1 - c_3)) & -c_3(x_1 - x_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -c_8 \\ c_1(c_2 - c_7) \end{bmatrix} \quad (29)$$

Keterangan:

$f_1(x_1, x_2, x_3)$: Penghematan prosumer

$f_2(x_1, x_2, x_3)$: Laba utilitas (PLN)

Batasan pertidaksamaan (*inequality constraint*) kapasitas PLTS adalah sebagai berikut:

$$\text{Kapasitas PLTS} \leq 1.300 \text{ VA} \quad (30)$$

Batasan pertidaksamaan untuk energi yang dibutuhkan prosumer untuk analisis sensitivitas adalah sebagai berikut:

$$x_{2min} \leq x_2 \leq x_{2max} \quad (31)$$

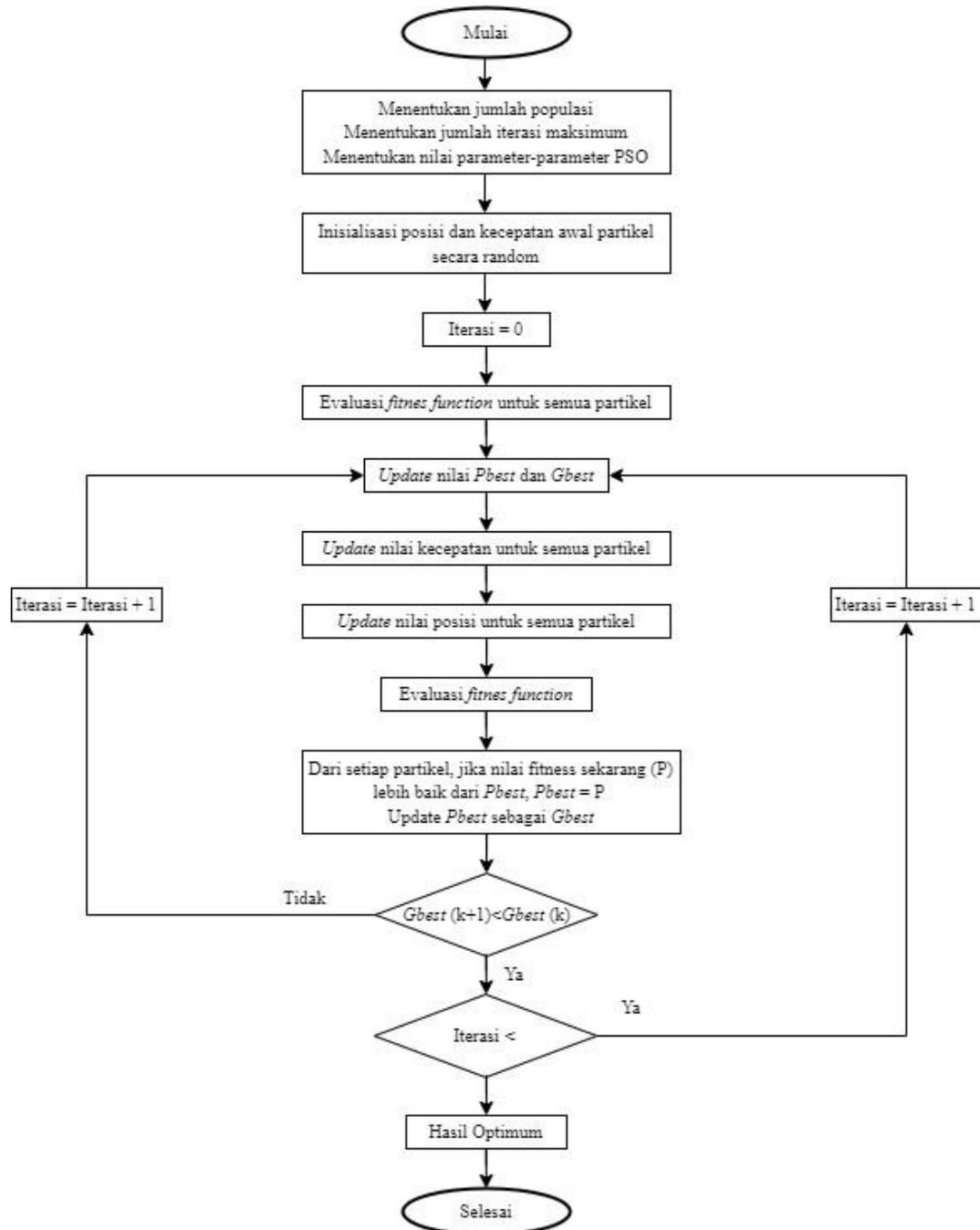
$$0,5 x_1 \leq x_2 \leq 1,5 x_1 \quad (32)$$

Batasan pertidaksamaan untuk *Feed in Tariff* (FiT) adalah sebagai berikut :

$$x_{3min} \leq x_3 \leq x_{3max} \quad (33)$$

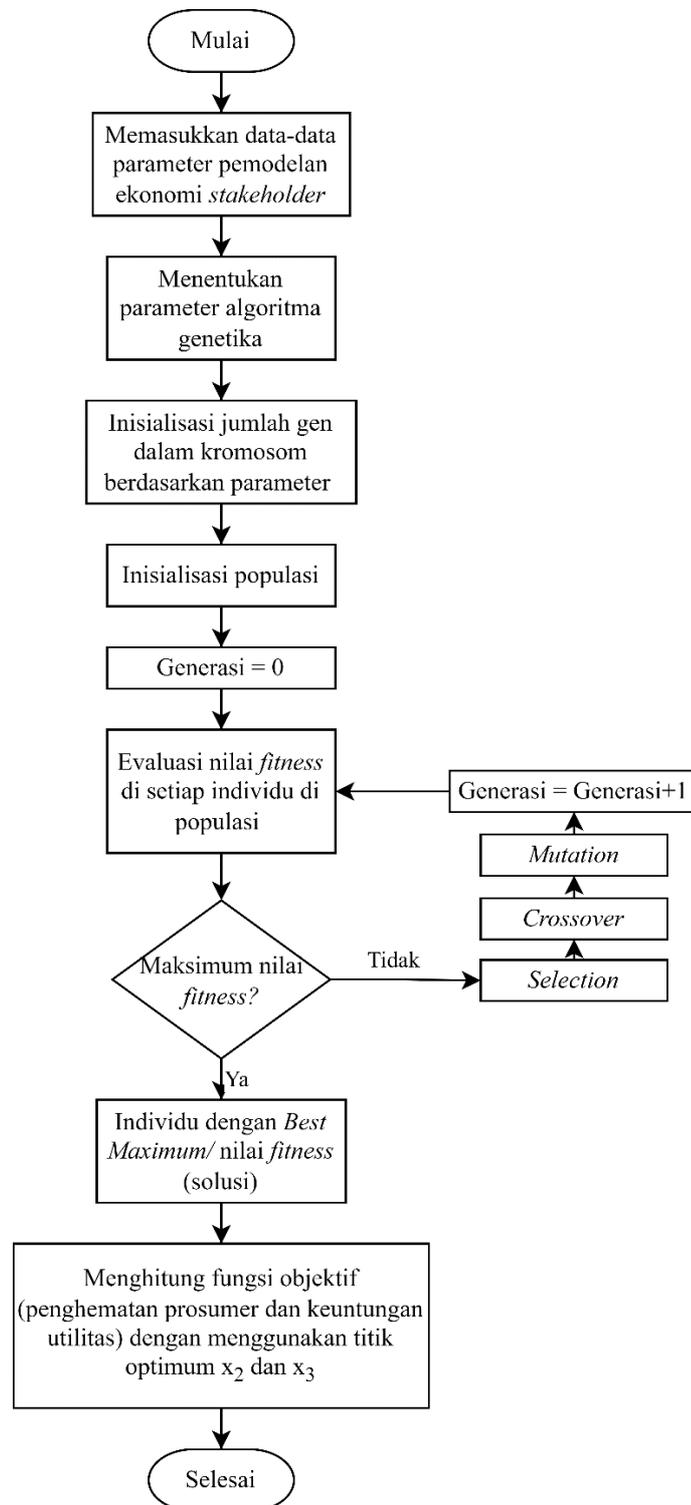
3.6 Diagram Alir Program

3.6.1 Particle Swarm Optimization



Gambar 12 Diagram Alir Program PSO

3.6.2 Genetic Algorithm



Gambar 13 Diagram Alir Program GA

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Adapun simpulan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Skema adopsi PLTS atap skala rumah tangga daya terpasang 1.300 VA menghasilkan penghematan prosumer dan laba utilitas yang optimal untuk kedua metode yang digunakan yaitu *Particle Swarm Optimization* dan *Genetic Algorithm*
2. Rekomendasi skema *Feed-in Tariff* (FiT) dari hasil optimasi menggunakan metode *Particle Swarm Optimization* untuk kapasitas PLTS 1.110 Wp adalah Rp718,12/kWh (49% dari tarif tenaga listrik utilitas PLN) dan metode *Genetic Algorithm* untuk kapasitas PLTS 1.110 Wp adalah Rp564,85/kWh.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk perbaikan dan pengembangan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Perlu adanya pembahasan terkait golongan pelanggan kapasitas daya terpasang dengan skema yang berbeda dari sebelumnya diatas 1.300 VA yaitu 2.200 VA, 3.500 VA, 5.500 VA, dan 6.600 VA untuk memperoleh skema *Feed-in Tariff* (FiT) optimal sehingga dapat meningkatkan adopsi PLTS atap di Indonesia.
2. Perlu adanya pengembangan untuk metode yang digunakan, seperti *Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) dan *Ant Colony Optimization* (ACO).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] KESDM, "Kementerian Energi Sumber Daya Mineral," Statistik Ketenagalistrikan, 30 October 2022. [Online]. Available: https://gatrik.esdm.go.id/assets/uploads/download_index/file/8f7e7-20221110-statistik-2022-rev03.pdf. [Accessed 17 May 2024].
- [2] E. I. Outlook, "Dewan Energi Nasional," Jakarta Selatan, 2020. [Online]. [Accessed June 2024].
- [3] M. C. Z. NURUL M, "Analisis Desain PLTS Atap Tipe Gable Roof menggunakan Metode Weight Score," *Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, vol. 11, no. 2, pp. 408-423, 2023.
- [4] I. A. S. W. Bagas M, "DESAIN PLTS ATAP KAMPUS UNIVERSITAS UDAYANA: GEDUNG REKTORAT," *SPEKTRUM*, vol. 7, no. 2, 2020.
- [5] I. N. S. I. W. S. Allan Ardiansyah, "PERANCANGAN PLTS ATAP ON GRID SYSTEM PADA KANTOR BADAN PERENCANAAN PEMBANGUNAN DAERAH PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN KOTA PROBOLINGGO," *SPEKTRUM*, vol. 8, no. 4, 2021.
- [6] J. W. Handoko Bayu, "Tinjauan Kebijakan dan Regulasi Pengembangan PLTS di," *Jurnal Energi Baru & Terbarukan*, vol. 2, no. 3, pp. 123-132, 2021.
- [7] E. Tarigan, "SIMULASI OPTIMASI KAPASITAS PLTS ATAP UNTUK RUMAH TANGGA DI SURABAYA," *Jurnal Ilmiah*, vol. 14, no. 1, pp. 13-22, 2020.
- [8] E. Tarigan, "Simulasi Sistem PLTS Atap dan Harga Satuan Energi Listrik untuk Skala Rumah Tangga di Surabaya," *Rekayasa Elektrika*, vol. 2, no. 18, pp. 92-99, 2022.
- [9] F. F. R. C. A. I. K. Md. Ahsan Kabira, "Net-metering and Feed-in-Tariff policies for the optimum billing scheme for future industrial PV systems in Bangladesh," *Alexandria Engineering Journal*, no. 63, pp. 157-174, 2022.
- [10] P. Gamonwet, "The assessment of the value of electricity saving and economic benefit to residential solar rooftop PV customer: The case of Thailand," *Energy Strategy Reviews*, no. 50, 2023.
- [11] D. Setyawati, "Analysis of perceptions towards the rooftop photovoltaic solar system policy in Indonesia," *Energy Policy*, 2020.

- [12] G. Duman, "Economic Analysis of Grid-connected Residential Rooftop PV System in Turkey," *Electrician*, 2020.
- [13] D. K. Herri Gusmedi, "Policy Optimization of Residential Rooftop Solar PV System Adoption in Indonesia," *Journal of Harbin Engineering University*, vol. 44, no. 7, 2023.
- [14] S. Y. K. Vinayagam Arangarajan, "PV Based Microgrid with Grid-Support Grid-Forming Inverter Control (Simulation and Analysis)," *Faculty of Science, Engineering and Build Environment, Deakin University, Geelong, Australia*, 2020.
- [15] M. M. Isinki, "Standalone PV System," *Indonesia Dec*, 2020.
- [16] IESR, "Solar Hybrid Power," The Free Encyclopedia, 1 December 2020. [Online]. [Accessed 14 April 2024].
- [17] D. T. H. M. A. Muhammad Agil Haikal, "Desain Optimasi PID Controller Pada Heating Furnace Temperature Menggunakan Metode Particle Swarm Optimization (PSO)," *ALINIER JURNAL*, vol. 2, 2021.
- [18] G. W. A. H. Suhardjono, "PREDIKSI WAKTU KELULUSAN MAHASISWA MENGGUNAKAN SVM BERBASIS PSO," *Bianglala Informatika*, vol. 2, 2019.
- [19] R. A. R. H. N. Nanda Febri Istighfarin, "PENERAPAN METODE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO) DAN GENETIC ALGORITHM (GA)," *Jurnal SIMETRIS*, vol. 11, 2020.
- [20] N. A. Maori, "PERBANDINGAN METODE ANN-PSO DAN ANN-GA UNTUK PENINGKATAN AKURASI PREDIKSI HARGA EMAS ANTAM," *DISPROTEK*, vol. 10, no. 2, 2019.
- [21] KESDM, "Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Tentang Besaran Biaya Pokok Penyediaan Pembangkitan PT PLN," Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Desember 2021. [Online]. [Accessed 1 Juni 2024].
- [22] OJK, "Suku Bunga Dasar Kredit," Otoritas Jasa Keuangan, 27 Juni 2022. [Online]. [Accessed Juni 2024].
- [23] K. D. B. H. Bagaskara A, "Indonesia Solar Energy Outlook 2023 The Emergence of Solar PV in Fueling Indonesia's Energy Transition 2 Authors," *Indonesia Solar Energy*, Jakarta, 2023.
- [24] PLN, "Solusi Smart Green," PLN Icon Plus, Jakarta, 2023.

- [25] S. D, "Buku Panduan Perencanaan, Pembangunan, Operasional dan Pemeliharaan PLTS Atap," Jakarta, Yayasan Mitra Hijau, 2023.