OPTIMASI ADOPSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA SKALA RUMAH TANGGA 1.300 VA DENGAN PENDEKATAN *STAKEHOLDER* MENGGUNAKAN METODE *MULTI-OBJECTIVE GENETIC ALGORITHM*

(SKRIPSI)

Oleh

DWI KURNIAWAN
NPM 1915031003

FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023

ABSTRAK

OPTIMASI ADOPSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA SKALA RUMAH TANGGA 1.300 VA DENGAN PENDEKATAN *STAKEHOLDER* MENGGUNAKAN METODE *MULTI-OBJECTIVE GENETIC ALGORITHM*

Oleh

DWI KURNIAWAN

Indonesia merupakan negara yang memiliki potensi energi terbarukan melimpah, dengan 207,8 GWp berasal dari energi surya. Namun kenyataannya, pemanfaatan energi surya di Indonesia pada tahun 2021 masih tergolong cukup rendah yang diakibatkan oleh beberapa faktor, salah satunya faktor kebijakan. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengoptimalkan *Feed-in Tariff* (FiT), kapasitas pembangkitan, dan tarif tagihan rata-rata sehingga dapat memaksimalkan keuntungan *stakeholder*, yaitu konsumen, prosumer (konsumen sekaligus produsen/pengguna PLTS atap), dan utilitas PT PLN. Pemodelan ekonomi *stakeholder* menggunakan studi kasus pelanggan 1.300 VA. Model untuk penghematan prosumer dan laba utilitas dioptimasi dengan metode multi-objektif algoritma genetika dan fungsi kendala dirumuskan dengan FiT, kapasitas pembangkitan, permintaan energi, tagihan rata-rata, dan biaya pokok penyediaan pembangkitan sebagai sebagai variabel keputusan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa skenario 1 PLTS atap 1.100 Wp menggunakan modul PV 220 Wp JA Solar diperoleh skema FiT yang optimal adalah Rp523,13/kWh dengan penghematan prosumer Rp99.992 (35,75%) dan laba utilitas Rp179.702 (64,25%). Pada skenario 2 PLTS atap 1.100 Wp menggunakan modul PV 550 Wp Longi Solar diperoleh skema FiT yang optimal adalah Rp522,41/kWh dengan penghematan prosumer Rp102.098 (36,23%) dan laba utilitas Rp179.703 (63,77%). Dengan demikian, dari hasil optimasi algoritma genetika solusi yang paling optimal adalah skenario kedua dengan rekomendasi skema FiT Rp522,41/kWh karena periode balik modal, penghematan prosumer, dan laba utlitas yang dihasilkan lebih optimal.

Kata kunci: *Feed-in Tariff*, PLTS atap, kebijakan, optimasi, algoritma genetika

ABSTRACT

OPTIMIZING THE ADOPTION OF A 1,300 VA RESIDENTIAL SCALE ROOFTOP SOLAR PHOTOVOLTAIC WITH A STAKEHOLDER APPROACH USING A MULTI-OBJECTIVE GENETIC ALGORITHM METHOD

By

DWI KURNIAWAN

Indonesia is a country that has abundant renewable energy potential, with 207.8 GWp coming from solar energy. But in reality, the utilization of solar energy in Indonesia in 2021 will still be quite low due to several factors, one of which is policy. The purpose of this study is to optimize the Feed-in Tariff (FiT), generation capacity, and average billing rates so as to maximize stakeholder profits, namely those of consumers, prosumers (users of rooftop solar PV), and utilitiy (PT PLN). Stakeholder economic modeling uses a case study of 1,300 VA customers. The model for prosumer savings and utility profits is optimized with the multi-objective method of a genetic algorithm, and the constraint function is formulated with FiT, generation capacity, energy demand, average bill, and cost of supply of generation as decision variables. The results show that scenario 1 of 1,100 Wp rooftop solar PV using 220 Wp JA Solar PV modules obtained the optimal FiT scheme of Rp523.13/kWh with prosumer savings of Rp99,992 (35.75%) and utility profit of Rp179,702 (64.25%). In scenario 2 of 1,100 Wp rooftop solar PV using 550 Wp Longi Solar PV modules, the optimal FiT scheme is Rp522.41/kWh with prosumer savings of Rp102,098 (36.23%) and utility profit of Rp179,703 (63.77%). Thus, from the results of genetic algorithm optimization, the most optimal solution is the second scenario with a recommended FiT scheme of Rp522.41/kWh because the payback period, prosumer savings, and utility profit generated are more optimal.

Key word: *Feed-in Tariff*, rooftop solar PV, policy, optimization, genetic algorithm

OPTIMASI ADOPSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA SKALA RUMAH TANGGA 1.300 VA DENGAN PENDEKATAN *STAKEHOLDER* MENGGUNAKAN METODE *MULTI-OBJECTIVE GENETIC ALGORITHM*

Oleh

DWI KURNIAWAN

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung

FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023

Judul Skripsi	:	**OPTIMASI ADOPSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA SKALA RUMAH TANGGA 1.300 VA DENGAN PENDEKATAN *STAKEHOLDER* MENGGUNAKAN METODE *MULTI-OBJECTIVE GENETIC ALGORITHM***
Nama Mahasiswa	:	Dwi Kurniawan
Nomor Pokok Mahasiswa	:	1915031003
Program Studi	:	*Teknik Elektro*
Fakultas	:	Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T.	**Dr. Eng. Ir. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc.**
NIP 197108131999031003	NIP 197209232000121002

2. Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro	Ketua Program Studi Teknik Elektro
Herlinawati, S.T., M.T.	**Dr. Eng. Nining Purwasih, S.T., M.T.**
NIP 197103141999032001	NIP 197404222000122001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T.** .....

Sekretaris : **Dr. Eng. Ir. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc.** .....

Penguji
Bukan Pembimbing : **Osea Zebua, S.T., M.T.** .....

2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung

Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.
NIP 197509282001121002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: **29 Maret 2023**

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepanjang sepengatahuan saya tidak terdapat atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana yang disebutkan dalam daftar Pustaka. Selain itu, saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

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

Bandar Lampung, 29 Maret 2023

Dwi Kurniawan
NPM 1915031003

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Natar, Lampung Selatan pada tanggal 13 Mei 2001, sebagai anak kedua dari tiga bersaudara, dari Bapak Sartim dan Ibu Tursini.

Riwayat pendidikan penulis dimulai dari SD Negeri 1 Tanjung Sari pada tahun 2007 hingga 2013, SMP Negeri 1 Natar pada tahun 2013 hingga 2016, dan SMA Negeri 1 Natar pada tahun 2016 hingga tahun 2019.

Penulis menjadi mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung, pada tahun 2019 melalui jalur SNMPTN. Selama menjadi mahasiswa penulis berkesempatan menjadi asisten Laboratorium Sistem Tenaga Listrik dari tahun 2021. Selain itu, penulis juga tergabung dalam organisasi intra kampus Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (Himatro) yang pada tahun 2020 diamanahkan sebagai anggota Divisi Pendidikan dan pada tahun 2021 diamanahkan sebagai anggota Divisi Pengembangan Keteknikan. Penulis juga tergabung dalam organisasi UKM-U Sains dan Teknologi yang diamanahkan sebagai Kepala Departemen Riset dan Teknologi pada tahun 2021. Penulis melaksanakan kerja praktik di PT. Syntek Otomasi Indonesia, Jakarta dalam Divisi *Engineering Center* sebagai *Junior Engineer* dan membuat laporan yang berjudul "Perencanaan Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *Rooftop On-Grid* 622,62 kWp di PT. Mane Indonesia, Karawang." Pada tahun 2021, penulis terpilih sebagai Mahasiswa Berprestasi Fakultas Teknik Universitas Lampung dan terpilih sebagai peneliti tingkat nasional pada Program Kreativitas Mahasiswa (PKM) skema PKMRE. Pada tahun 2022, penulis juga terpilih sebagai finalis Olimpiade Nasional Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Perguruan Tinggi (ONMIPA-PT) tingkat nasional yang diselenggarakan di Universitas Brawijaya.

"Ku persembahkan dan ku dedikasikan Skripsi ini untuk Kedua Orangtua saya, Ayahanda Sartim dan Ibunda Tursini yang memberikan semua hal terbaik demi anaknya dalam mencapai kesuksesan"

MOTTO

“Barangsiapa yang menempuh suatu jalan dalam rangka menuntut ilmu maka Allah akan memudahkan baginya jalan menuju surga”
(HR. Muslim no. 7028)

“Sesungguhnya Allah tidak akan mengubah keadaan suatu kaum, sebelum kaum itu sendiri yang mengubah apa yang ada pada diri mereka. Dan apabila Allah menghendaki keburukan terhadap suatu kaum, maka tak ada yang dapat menolaknya dan tidak ada pelindung bagi mereka selain Dia”
(QS. Ar-Ra’d:11)

“Maka nikmat Tuhanmu yang manakah yang kamu dustakan”
(QS: Ar-Rahman:13)

“Jadilah layaknya seekor burung elang, yang melesat menembus awan, yang teguh dalam mencengkeram, yang paham akan kemana langkahnya, serta yang tak pernah lupa dimana sangkarnya”
(Kevin Joan)

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 Pembangkit Listrik Tenaga Surya Skala Rumah Tangga dengan Pendekatan *Stakeholder* Menggunakan Metode *Multi-Objective Genetic Algorithm*" 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. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., I.P.M., selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Ibu Herlinawati, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung.
4. 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.
5. Bapak Dr. Eng. Ir. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc., selaku dosen pembimbing pendamping yang telah memberikan saran, bimbingan dan arahan dengan baik dan ramah.

6. Bapak Osea Zebua, S.T. M.T., selaku dosen penguji yang telah memberikan saran, masukkan, kritik dan arahan.
7. Ibu Dr. Eng. Diah Permata, S.T., M.T., selaku dosen Pembimbing Akademik (PA) yang telah memberikan nasihat, arahan, bimbingan dengan baik dan tulus bagi penulis selama perkuliahan.
8. Ibu Anisa Ulya Darajat, S.T. M.T., yang telah membantu saya dalam membimbing metode yang digunakan dalam tugas akhir.
9. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah memberikan pengajaran dan pandangan hidup selama perkuliahan.
10. Staff administrasi Jurusan Teknik Elektro dan Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah membantu penulis dalam hal administrasi.
11. Bapak Sartim dan Ibu Tursini selaku orangtua yang terus memberikan motivasi, dukungan, nasihat, dan doa tanpa henti kepada penulis untuk menyelesaikan perkuliahan dengan baik.
12. Segenap Keluarga Besar Laboratorium Sistem Tenaga Listrik; Pak Rahman atas kerjasamanya selama menjadi asisten laboratorium; Al Hadi, Fatur, Khairan, Adam, Aqila, Adhi, Natasya, Adrian, dan Muchlas sebagai asisten laboratorium semoga segera menyusul dan dipermudah segala urusan tugas akhir, dan tidak lupa adik-adik 2020, Rizki, Aymanul, Arnes, Ipna, Syawal, dan Saka.
13. Kak Kevin Joan, S.E. yang telah banyak memberikan ilmu yang sangat bermanfaat, terutama dalam bidang kepenulisan dan *public speaking*, selalu memberikan motivasi untuk menggapai cita-cita, dan telah membantu dalam seleksi Mahasiswa Berprestasi.
14. Usman Agani, Tri Rizky, Rio Pratama, Rifka Fariyanti, Murti, Zahwa, Zaki, Ahlul, dan Yunita yang selalu menemani saya dalam belajar dari semester awal hingga selesai perkuliahan, meminta solusi dari permasalahan, dan pernah menjadi *partner* dalam perlombaan.
15. Keluarga besar Angkatan ETERNITY 2019, yang telah memberikan banyak motivasi, nilai-nilai sosial, dan bantuan dalam berbagai hal.

16. Keluarga besar HIMATRO UNILA, yang telah menjadi wadah dalam mengembangkan nilai-nilai organisasi bagi penulis.
17. Keluarga besar UKM-U SAINTEK UNILA, yang telah menjadi wadah dalam mengembangkan nilai-nilai organisasi bagi penulis.
18. 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, Maret 2023

Dwi Kurniawan

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR ISI xiv

DAFTAR GAMBAR xvii

DAFTAR TABEL xviii

I. PENDAHULUAN 1

1.1. Latar Belakang 1

1.2. Tujuan Penelitian 3

1.3. Rumusan Masalah 4

1.4. Batasan Masalah 4

1.5. Manfaat Penelitian 4

1.6. Hipotesis 5

1.7. Sistematika Penulisan 5

II. TINJAUAN PUSTAKA 7

2.1. Penelitian Terdahulu 7

2.2. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) 8

2.2.1. PLTS Sistem *On-grid* 9

2.2.2. PLTS Sistem *Off-grid* 10

2.2.3. PLTS Sistem *Hybrid* 11

2.3. PLTS Atap (*Rooftop*) 12

2.4. Perkembangan Instrumen Kebijakan PLTS Atap di Indonesia 14

2.5. *Multi-Objective Optimization* 16

2.6. Algoritma Genetika (*Genetic Algorithms*) 19

2.6.1. Terminologi Algoritma Genetika 19

2.6.2. Komponen Utama Algoritma Genetika 21

2.6.2.1. Teknik Pengkodean 21

2.6.2.2. Prosedur Inisialisasi (Populasi Awal) 22

2.6.2.3. Fungsi Evaluasi 22
2.6.2.4. Seleksi 23
2.6.2.5. Operator Algoritma Genetika 24
III. METODE PENELITIAN 25
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian 25
3.2. Alat dan Bahan 25
3.3. Tahapan Penelitian 26
3.4. Diagram Alir Penelitian 28
3.5. Pemodelan Ekonomi *Stakeholder* 28
3.6. Langkah-langkah Optimasi Algoritma Genetika 34
3.7. Diagram Alir Program 36
3.8. Pengujian Optimasi Algoritma Genetika 37
3.8.1. Inisialisasi Populasi 37
3.8.2. Evaluasi Nilai *Fitness* 38
3.8.3. Seleksi 39
3.8.4. *Crossover* dan Mutasi 40
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN 43
4.1. Parameter Pemodelan Ekonomi *Stakeholder* 43
4.2. Skenario PLTS Atap Skala Rumah Tangga 1.300 VA 44
4.2.1. Skenario 1 PLTS Atap 1.100 Wp 44
4.2.2. Skenario 2 PLTS Atap 1.100 Wp 47
4.3. Biaya Investasi Pemasangan PLTS Atap 49
4.3.1. Skenario 1 PLTS Atap 1.100 Wp 49
4.3.2. Skenario 2 PLTS Atap 1.100 Wp 51
4.4. Inisialisasi Parameter Optimasi Algoritma Genetika 53
4.5. Hasil Simulasi Optimasi Algoritma Genetika 55
4.5.1. Skenario 1 PLTS Atap 1.100 Wp 55
4.5.2. Skenario 2 PLTS Atap 1.100 Wp 58
V. SIMPULAN DAN SARAN 63
5.1. Simpulan 63
5.2. Saran 63

DAFTAR PUSTAKA 64
LAMPIRAN 68

DAFTAR GAMBAR

Gambar Halaman

1. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) 9
2. PLTS sistem *on-grid* 10
3. PLTS sistem *off-grid* 11
4. PLTS sistem *hybrid* 12
5. PLTS atap (*rooftop*) 13
6. *Roadmap* kebijakan PLTS di Indonesia 14
7. Daerah *feasible* dan *Pareto-optimal front* 17
8. Visualisasi gen, *allele*, kromosom, individu, dan populasi pada algoritma genetika 19
9. Siklus algoritma genetika 20
10. Diagram alir penelitian 28
11. Model bisnis konsumen-sentris 29
12. Diagram alir pengambilan keputusan kebijakan untuk instalasi PLTS atap 33
13. Diagram alir algoritma genetika 36
14. Penentuan parameter skenario 1 PLTS atap 1.100 Wp 46
15. Penentuan parameter skenario 2 PLTS atap 1.100 Wp 48
16. Grafik DPP skenario 1 PLTS atap 1.100 Wp 50
17. Grafik DPP skenario 2 PLTS atap 1.100 Wp 52
18. Solusi optimal pareto PLTS atap 1.100 Wp skenario 1 57
19. Solusi optimal pareto PLTS atap 1.100 Wp skenario 2 60

DAFTAR TABEL

Tabel Halaman

1. Jadwal penelitian 25
2. Inisialisasi populasi 37
3. Evaluasi nilai *fitness* 38
4. Probabilitas seleksi dan probabilitas kumulatif 39
5. Populasi baru 40
6. Proses mutasi 41
7. Proses mutasi 41
8. Populasi akhir 42
9. Evaluasi nilai *fitness* dan fungsi objektif 42
10. Rentang variabel keputusan dan kendala 44
11. *Datasheet* Modul JAM5(R)-72-220 45
12. *Datasheet* Inverter Solis-1K-2G 45
13. Energi yang dihasilkan oleh PLTS atap kapasitas 1.100 Wp skenario 1 46
14. *Datasheet* Modul Longi LR5-72HPH-550M 47
15. Energi yang dihasilkan oleh PLTS atap kapasitas 1.100 Wp skenario 2 48
16. Biaya investasi awal pemasangan PLTS atap 1.100 Wp skenario 1 49
17. Biaya investasi awal pemasangan PLTS atap 1.100 Wp skenario 2 51
18. *Payback period* dan anuitas skenario 1 dan 2 PLTS atap 1.100 Wp 52
19. Parameter optimasi algoritma genetika 53
20. Perbandingan best *fitness* hasil optimasi 5 percobaan PLTS atap 1.100 Wp skenario 1 55
21. Hasil optimasi algoritma genetika PLTS atap 1.100 Wp skenario 1 56

22. Perbandingan best *fitness* hasil optimasi 5 percobaan PLTS atap 1.100 Wp skenario 2 58
23. Hasil optimasi algoritma genetika PLTS atap 1.100 Wp skenario 2 59
24. Perbandingan hasil optimasi skenario 1 dan 2 sebelum periode balik modal 61
25. Perbandingan hasil optimasi skenario 1 dan 2 setelah periode balik modal 61

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perkembangan teknologi yang cukup pesat mengakibatkan kebutuhan akan energi mengalami peningkatan. Konsumsi tenaga listrik per kapita nasional di Indonesia mengalami peningkatan sebesar 178,6 GWh dari tahun 2015 yang hanya 909,91 GWh dengan rasio elektrifikasi 88,30% menjadi 1.088,51 GWh pada tahun 2020 dengan rasio elektrifikasi sebesar 99,20% [1]. Peningkatan konsumsi listrik ini selaras dengan kemajuan perekonomian nasional.

Energi listrik saat ini telah menjadi suatu kebutuhan pokok dan memainkan peranan yang sangat penting dalam kehidupan manusia. Sektor energi dan sumber daya mineral merupakan sektor yang strategis dan masih tetap menjadi andalan dalam mendukung pembangunan dan perekonomian nasional, baik melalui sisi fiskal, moneter, maupun sektor riil. Selain itu, sektor energi dan sumber daya mineral juga memiliki peranan penting, sesuai dengan program *Sustainable Development Goals* (SDGs) pada poin ke-7, yaitu menjamin sumber pasokan energi yang bersih dan juga terjangkau, pendorong aktivitas ekonomi dan peningkatan nilai tambah sumber daya alam energi dan mineral. Peningkatan konsumsi energi ini harus dikompensasi dengan bertransisi ke sumber energi terbarukan untuk mengurangi tingkat emisi karbon yang parah [2]. Tentunya, ambisi ini akan menjadi sebuah tantangan tersendiri bagi negara-negara berkembang, khususnya Indonesia mengingat pada saat yang bersamaan dalam menghadapi revolusi industri 5.0 guna mengatasi permasalahan energi bersih dan terjangkau.

Indonesia merupakan negara khatulistiwa dengan memiliki potensi energi terbarukan yang melimpah, yaitu sekitar 442 GW dan 207,8 GWp diantaranya

berasal dari energi surya. Menurut PP No. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional, target bauran energi baru terbarukan pada tahun 2025 paling sedikit 23% dan 31% pada tahun 2050 [3]. Namun kenyataannya, hingga akhir tahun 2021 pemanfaatan bauran energi terbarukan di Indonesia baru mencapai 11,5% dari total energi nasional [4]. Pemanfaatan energi surya sendiri pada tahun 2021 hanya sekitar 0,08% dari potensinya atau sebesar 150 MW. Tentunya hal tersebut menunjukkan bahwa, pemanfaatan energi baru terbarukan khususnya energi surya melalui Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Indonesia masih tergolong cukup rendah [5].

Rendahnya pemanfaatan dalam pengembangan energi surya di Indonesia disebabkan oleh pemerintah dan *stakeholder* (pemangku kepentingan). Hambatan-hambatan dalam pengembangan energi surya terbagi menjadi empat kategori yang saling berkaitan, yaitu hambatan sosial teknis, manajemen, ekonomi, dan kebijakan [6]. Minimnya pemanfaatan energi terbarukan dikarenakan masih tingginya harga produksi pembangkit listrik berbasis energi baru terbarukan, sehingga sulit bersaing dengan pembangkit fosil, terutama yang berasal dari batubara. Kurangnya dukungan industri dalam negeri terkait komponen pembangkit energi terbarukan dan masih sulitnya untuk mendapatkan pendanaan yang memiliki bunga rendah, juga menjadi penyebab terhambatnya dalam pengembangan energi terbarukan [3].

Faktor kebijakan dianggap paling esensial dalam pengembangan energi surya, karena dapat mendukung pasar melalui investasi energi surya [6]. Terdapat dua instrumen kebijakan yang telah diterapkan guna mendorong pengembangan energi surya skala rumah tangga, yaitu *net-metering* (diamanatkan oleh PT PLN sesuai dengan Peraturan No. 0733/2013) dan *net-billing* (diamanatkan oleh Peraturan Menteri ESDM No.49/2018). Instrumen kebijakan tersebut memiliki mekanisme dan tingkat otoritas yang berbeda, tetapi memiliki tujuan yang sama, yaitu untuk meningkatkan pengembangan energi surya dan misi untuk mengurangi emisi gas rumah kaca di Indonesia. Namun, diperlukan penyelidikan lebih lanjut untuk mengetahui efektivitas dari kedua instrumen kebijakan dalam meningkatkan adopsi PLTS atap di sektor rumah tangga [7].

Kebijakan yang efektif dan stabil sangat penting dalam pengembangan sistem PLTS [8]. Perancangan kebijakan juga harus memperhatikan parameter *Feed-in Tariff* (FiT), kapasitas pembangkitan, dan tarif tagihan rata-rata untuk memaksimalkan keuntungan bagi pemangku kepentingan (*stakeholder*). *Stakeholder* yang harus dipertimbangkan dalam pengembangan adopsi sistem PLTS atap di Indonesia adalah konsumen, prosumer (pengguna PLTS atap), dan utilitas yang merupakan pihak dari PT PLN [9]. Oleh karena itu, dalam penelitian ini penulis mengambil topik "Optimasi Adopsi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Skala Rumah Tangga dengan Pendekatan *Stakeholder* Menggunakan Metode *Multi-Objective Genetic Algorithm*." 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*, dan tentunya mewujudkan program *Net Zero Emissions* (NZE). Fungsi objektif pada penelitian ini adalah model untuk laba utilitas dan penghematan prosumer dengan fungsi kendala dirumuskan dengan FiT, kapasitas PLTS, permintaan energi dari prosumer, dan tarif tagihan rata-rata sebagai variabel keputusan.

1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui skema adopsi kebijakan terkait laba utilitas (PLN) dan penghematan prosumer yang optimal agar menguntungkan semua *stakeholder* baik pihak konsumen, prosumer, dan utilitas sehingga dapat meningkatkan pengembangan PLTS atap skala rumah tangga di Indonesia.
2. Mengetahui rekomendasi kebijakan *Feed-in Tariff* (FiT) yang optimal dengan menggunakan metode multi-objektif algoritma genetika untuk meningkatkan adopsi PLTS atap skala rumah tangga.

1.3. Rumusan Masalah

Berdasarkan dari latar belakang di atas, maka peneliti merumuskan permasalahannya sebagai berikut:

1. Bagaimana cara memodelkan skema adopsi PLTS terkait laba utilitas (PLN) dan penghematan prosumer yang maksimum agar menguntungkan semua *stakeholder* sehingga dapat meningkatkan pengembangan PLTS atap skala rumah tangga di Indonesia?
2. Bagaimana cara mengetahui rekomendasi kebijakan *Feed-in Tariff* (FiT) yang optimal dengan menggunakan metode multi-objektif algoritma genetika untuk meningkatkan adopsi PLTS atap skala rumah tangga dan mewujudkan program NZE di Indonesia?

1.4. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang diterapkan oleh penulis dalam melaksanakan penelitian ini meliputi beberapa hal, yaitu sebagai berikut:

1. Batas maksimum kapasitas PLTS yang dibahas pada penelitian ini adalah 1,3 kW yang disesuaikan dengan daya rumah tangga listrik PLN 1.300 VA.
2. Asumsi energi yang dihasilkan prosumer pemilik PLTS dengan menggunakan *software* PVsyst.
3. Konsumen yang akan dibahas dibatasi pada PT PLN (Persero) UP3 Tanjung Karang pascabayar.
4. Tingkat suku bunga yang digunakan pada penelitian ini adalah 8,66% per tahun.

1.5. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah dapat memberikan kontribusi terhadap perkembangan sistem kelistrikan, khususnya untuk meningkatkan pertumbuhan PLTS atap skala rumah tangga dan mewujudkan program NZE di Indonesia.

1.6. Hipotesis

Skema adopsi PLTS skala rumah tangga 1.300 VA dapat dioptimasi menggunakan metode multi-objektif algoritma genetika untuk memaksimalkan penghematan prosumer dan laba utilitas, sehingga mendapatkan rekomendasi kebijakan *Feed-in Tariff* (FiT) yang optimal untuk meningkatkan adopsi PLTS atap skala rumah tangga di Indonesia.

1.7. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan akhir bertujuan guna memberikan suatu gambaran secara sederhana terkait pembahasan yang ada di dalam tugas akhir skripsi dan untuk memudahkan dalam memahami isi yang disajikan dalam skripsi ini. Adapun sistematika yang digunakan oleh penulis adalah sebagai berikut:

BAB I. PENDAHULUAN

Bab ini berisikan latar belakang dan masalah, tujuan penelitian, rumusan masalah, batasan masalah, manfaat penelitian, hipotesis, dan sistematika penelitian.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisikan teori pendukung materi tugas akhir yang merupakan pengantar dalam pemahaman terkait materi tugas akhir yang dikutip dari berbagai sumber ilmiah, seperti jurnal, proseding, dan buku yang digunakan sebagai panduan dalam penulisan laporan tugas akhir ini.

BAB III. METODE PENELITIAN

Bab ini berisikan tentang waktu dan tempat penelitian tugas akhir, alat dan bahan yang digunakan dalam menyelesaikan tugas akhir ini, metode yang digunakan, dan pelaksanaan serta pengamatan dalam pengerjaan tugas akhir.

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisikan tentang hasil dan pembahasan data simulasi dan memaparkan data yang didapat dari tugas akhir ini.

BAB V. SIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisikan tentang simpulan yang diperoleh dari pembahasan pada laporan tugas akhir dan saran yang berhubungan dengan pokok-pokok pembahasan tugas akhir ini.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terdahulu

Chaianong *et al.* [10] menyatakan bahwa kebijakan *net-metering* di Thailand memungkinkan fleksibilitas yang lebih besar bagi pelanggan untuk mengatur kapasitas sistem PV. Kebijakan *net-metering* menciptakan variasi penghematan tagihan pelanggan yang lebih kecil jika dibandingkan dengan kebijakan *net-billing*. Pada *net-billing*, pelanggan harus membatasi kapasitas sistem PV mereka sehubungan dengan beban yang disebabkan oleh rasio PV terhadap beban yang lebih tinggi. Namun, *net-billing* dapat diterima jika tarif pembelian kembali yang tepat menarik bagi pelanggan. Penelitian yang berjudul "*Thailand's Feed-in Tariff for Residential Rooftop Solar PV System: Progress so Far*," oleh Tongsopit [11], sistem PV surya skala perumahan dapat distimulasi oleh insentif pajak yang diberikan sebagai potongan harga sebesar 20% dari biaya investasi.

Hidayatno *et al.* [12] dalam penelitian "*Investigating Policies on Improving Household Rooftop Photovoltaics Adoption in Indonesia*," efektivitas instrumen kebijakan tentunya untuk meningkatkan ketahanan energi dan pengurangan emisi gas rumah kaca di Indonesia. Pendekatan dinamika sistem yang dipadukan dalam analisis kebijakan memungkinkan dilakukannya analisis yang sistematis dan komprehensif mengenai kondisi pengembangan PLTS di Indonesia. Simulasi model SFD digunakan untuk menilai efektivitas *net-metering* dan implementasi *net-billing* dengan melihat hasil dari tiga indikator, yaitu penghematan listrik (*electricity saving*), pengadopsi PLTS atap (*rooftop PV adopters*), dan pengurangan emisi CO_2. Pada penelitian ini juga mengintegrasikan empat aspek yang saling berhubungan, yaitu aspek teknis, ekonomi, sosial, dan lingkungan. Hasil yang

diperoleh bahwa instrumen kebijakan *net-metering* lebih efektif dibandingkan dengan kebijakan *net-billing* dalam peningkatan adopsi PLTS atap rumah tangga.

Duman dan Güler [13] dalam penelitian yang berjudul "*Economic Analysis of Grid-connected Residential Rooftop PV System in Turkey*," analisis ekonomi PV atap perumahan yang terhubung dengan jaringan di Turki menggunakan skema *Feed-in Tariff* (FiT). Hasil penelitian menunjukkan bahwa periode pengembalian diskonto (DPBP), tingkat pengembalian internal (IRR), dan indeks profitabilitas (PI) masing-masing berada pada kisaran 7,75-14,43 tahun, 13,68%-6,87%, dan 2,02-1,28. Analisis sensitivitas dilakukan untuk menganalisis pengaruh biaya awal FiT dan PV yang bervariasi terhadap kelayakan sistem dan memuat implikasi kebijakan.

Penelitian yang berjudul "*Policy Assistance for Adoption of Residential Solar PV in India: A Stakeholder-centric Approach for Welfare Optimization*," oleh Mohan *et al.* [14], analisis komprehensif terkait model bisnis yang berpusat pada konsumen untuk instalasi PLTS atap di India dengan 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 masalah multi-objektif dirumuskan dengan FiT, kapasitas pembangkitan (sebagai fungsi permintaan) dan tarif tagihan rata-rata sebagai variabel keputusan. Kesesuaian tarif yang berlaku dan tarif FiT dari dua utilitas India yaitu, MSEDCL dan TATA POWER, Delhi dan dampaknya terhadap penghematan prosumer dan laba utilitas.

2.2. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan suatu pembangkit listrik yang sumber energinya berasal dari sinar atau cahaya matahari dengan menggunakan bantuan sel surya (*photovoltaic*) untuk melakukan konversi dari radiasi sinar foton matahari menjadi energi listrik. PLTS merupakan salah satu jenis energi terbarukan yang ramah lingkungan, karena tidak menimbulkan kebisingan yang diakibatkan

oleh adanya benda berputar dan tidak memicu limbah yang dapat merugikan lingkungan sekitarnya. Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi efisiensi daya keluaran sel surya, yaitu radiasi matahari, temperatur sel surya, orientasi panel surya, dan pengaruh bayangan [15].

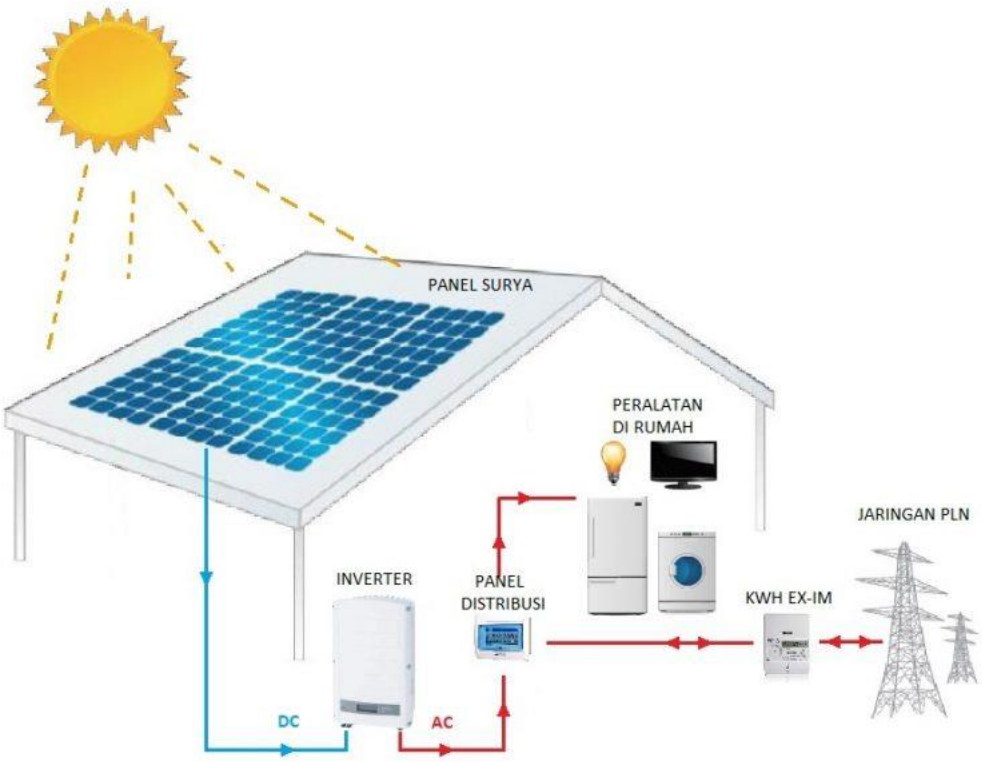
Gambar 1. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Berdasarkan konfigurasinya terdapat tiga macam PLTS, yaitu PLTS yang terhubung dengan jaringan listrik PLN (*on-grid*), PLTS yang tidak terhubung dengan jaringan listrik PLN (*off-grid*), dan PLTS *hybrid* [16].

2.2.1. PLTS Sistem *On-grid*

PLTS sistem *on-grid* (terinterkoneksi) merupakan sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan energi matahari melalui modul surya yang sistemnya dihubungkan dengan jaringan listrik PLN (sistem eksisting) [17]. PLTS *on-grid* dapat beroperasi tanpa menggunakan komponen baterai sebagai tempat penyimpanan energi yang dihasilkan oleh modul surya, karena *output* listriknya dapat langsung disalurkan ke jaringan distribusi yang telah disuplai pembangkit lainnya, seperti jaringan listrik PLN [18]. Ketika siang hari dan terkoneksi dengan jaringan PLN, modul surya akan bekerja untuk menyuplai daya utama ke beban dan pembangkitan berlebih akan disalurkan ke jaringan distribusi. Namun saat malam hari atau saat siang hari dan tidak terkoneksi dengan jaringan PLN maka modul surya tidak bekerja sehingga beban akan disuplai oleh jaringan listrik [7]. PLTS *on-grid* memiliki kelebihan,

yaitu biaya instalasi yang lebih murah, dapat mengurangi tagihan listrik karena dapat berbagi beban atau mengurangi beban pembangkit lain yang terhubung dengan jaringan yang sama [18].

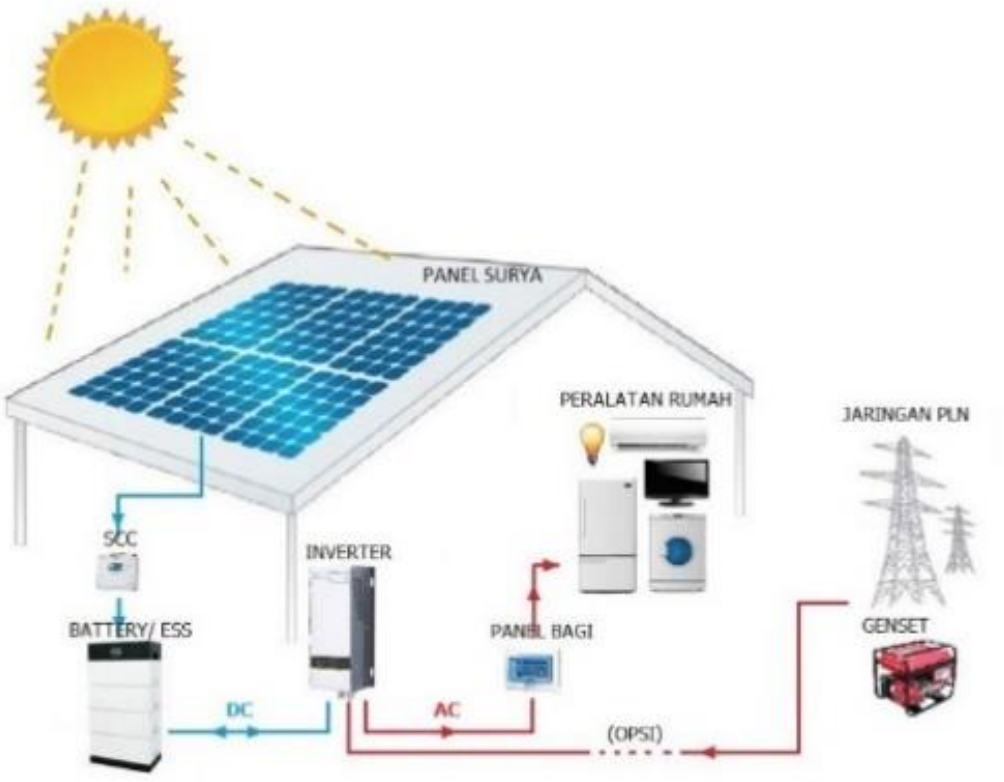


Gambar 2. PLTS sistem *on-grid*

2.2.2. PLTS Sistem *Off-grid*

PLTS sistem *off-grid* atau *stand alone system* merupakan sistem PLTS yang tidak terhubung dengan jaringan listrik PLN sehingga output daya listriknya secara mandiri menyuplai listrik ke jaringan distribusi pelanggan (beban). PLTS *off-grid* membutuhkan baterai sebagai tempat menyimpan energi yang dihasilkan oleh modul surya untuk menyuplai listrik sesuai dengan kebutuhan beban dan biasanya digunakan untuk menjangkau daerah-daerah yang belum ada jaringan listrik PLN [18] Biaya instalasi PLTS *off-grid* lebih mahal jika dibandingkan dengan PLTS *on-grid* karena membutuhkan baterai dan biasanya diperlukan *back-up* dari generator diesel untuk menjaga kestabilan frekuensi jaringan saat malam hari [16] PLTS *off-grid* memiliki kelebihan, yaitu ketika jaringan listrik PLN dan modul surya tidak bekerja maka baterai akan bekerja untuk menyuplai beban. Ketika siang hari modul

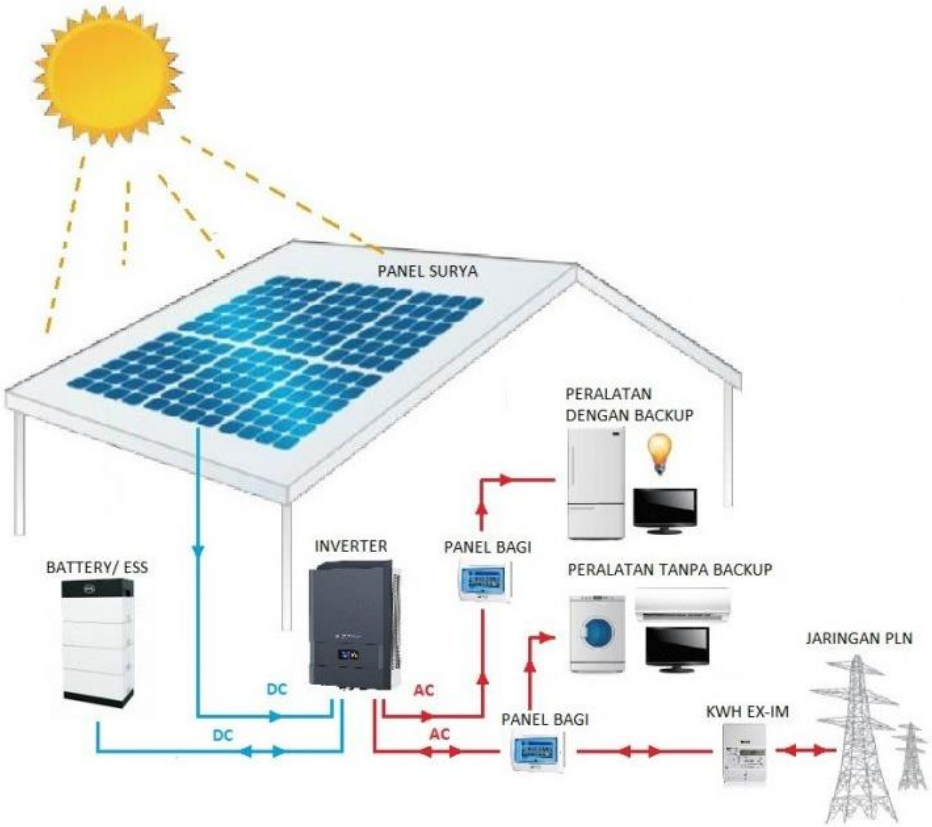
surya bekerja untuk menyuplai daya utama ke beban sedangkan kelebihan daya yang dihasilkan oleh modul surya akan disalurkan menuju baterai dan disimpan sebagai energi cadangan yang nantinya akan digunakan ketika malam hari (modul surya tidak bekerja) [7]



Gambar 3. PLTS sistem *off-grid*

2.2.3. PLTS Sistem *Hybrid*

PLTS sistem *hybrid* merupakan gabungan dari sistem PLTS dengan pembangkit lainnya, misalnya Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), dan lainnya. PLTS *hybrid* juga merupakan kombinasi dari PLTS *on-grid* (tanpa baterai) ataupun *off-grid* (menggunakan baterai). PLTS *hybrid* memiliki kelebihan yaitu dapat memaksimalkan penyediaan energi dari berbagai macam potensi sumber daya daerah yang ada [18]. PLTS sistem *hybrid* memiliki kehandalan yang lebih tinggi karena dilengkapi dengan ekstra penyimpanan energi (baterai) sehingga tidak akan terjadi kedip listrik dan pengguna dapat menentukan sendiri daya yang akan disuplai ke beban [16].



Gambar 4. PLTS sistem *hybrid*

2.3. PLTS Atap (*Rooftop*)

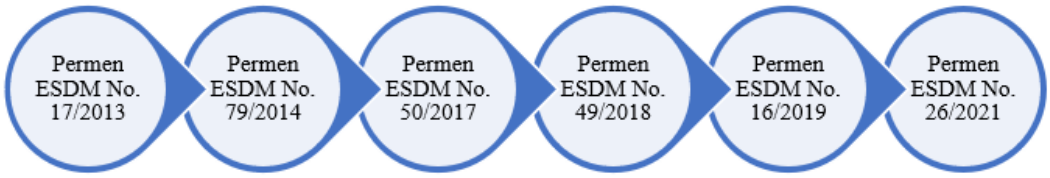
Instalasi pembangkit tersebar yang berasal dari sumber energi baru terbarukan terus mengalami peningkatan di berbagai negara. Hal tersebut tentunya didukung oleh adanya kebijakan energi terbarukan dan pengurangan emisi karbon. Pengurangan subsidi listrik dan diberlakukannya insentif penggunaan PLTS menyebabkan peningkatan pengembangan dan pembangunan PLTS di atas rumah dan gedung. Selain ramah lingkungan, PLTS atap dapat memanfaatkan lahan yang ada, sehingga dapat mengurangi biaya investasi lahan dan turut serta dalam mengurangi rugi-rugi jaringan (*losses*) karena lokasinya yang dekat atau pada pusat-pusat beban [19].

Gambar 5. PLTS atap (*rooftop*)

PLTS atap merupakan salah satu teknologi pembangkit listrik masa depan yang sangat ramah lingkungan dan dapat menjadi solusi untuk penghematan terhadap tingginya tarif listrik saat ini. Selain ramah lingkungan, efek *shading* atau bayangan yang ditimbulkan dari PLTS sangat minimal, sehingga sangat efisien jika dipasang pada atap suatu bangunan atau gedung karena akan berdampak baik pada penyerapan energi matahari [20]. PLTS atap secara konfigurasi menggunakan sistem *on-grid*, karena terhubung dengan *grid* atau jaringan listrik PLN. Artinya, daya yang diproduksi oleh PLTS tidak hanya untuk digunakan sendiri, tetapi apabila daya yang diproduksi lebih maka akan disalurkan ke sistem yang terhubung dengan PLN. Pada saat siang hari, ketika produksi listrik PLTS melebihi kebutuhan bebannya, maka kelebihan tersebut secara otomatis akan disalurkan menuju *grid* dan secara otomatis akan dicatat oleh kWh ekspor-impor (kWh *exim*). Namun, ketika produksi listrik dari PLTS tidak mencukupi beban, maka energi listrik PLTS akan diprioritaskan untuk digunakan sendiri dan sisa kekurangannya akan disuplai dari *grid* [7].

2.4. Perkembangan Instrumen 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 [21]. 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. Berikut *roadmap* terkait kebijakan PLTS di Indonesia ditunjukkan oleh Gambar 6.



Gambar 6. *Roadmap* kebijakan PLTS di Indonesia

Kebijakan PLTS di Indonesia dapat dikategorikan ke dalam PLTS skala utilitas (kebijakan insentif tarif) dan PLTS atap (kebijakan meteran). Masing-masing kebijakan tersebut diwujudkan melalui mekanisme dan prosedur yang berbeda. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM) mulai mendorong pengembangan PLTS skala utilitas dengan memperkenalkan FiT yang dibatasi sebagai kebijakan insentif tarif pertama. Peraturan ini juga memperkenalkan sistem lelang kapasitas kuota. FiT memberikan insentif kepada investor di pasar sektor PLTS awal untuk merangsang pertumbuhan pasar, namun FiT pertama ini hanya dilaksanakan dalam waktu singkat, yaitu pada tahun 2013-2014 karena persyaratan konten lokal.

Pada tahun 2016, Kementerian ESDM mengumumkan skema FiT dengan harga terjangkau untuk *Independent Power Producer* (IPP) surya. Namun, perubahan manajerial Kementerian ESDM pada tahun 2016 menghambat pergerakan tersebut

dan menyebabkan dikeluarkannya rezim tarif solar yang baru pada awal tahun 2017 (Peraturan ESDM No. 50/2017). Peraturan tersebut menyatakan bahwa tarif solar harus ditentukan dengan pembanding, jika Biaya Pokok Pembangunan (BPP) daerah lebih tinggi dari BPP nasional, maka akan diberlakukan maksimal 85% dari BPP daerah untuk tarif tersebut [21]. Peraturan ini telah memperburuk situasi IPP terbarukan dan mengakibatkan berlanjutnya periode volatilitas peraturan yang berdampak negatif terhadap kepercayaan pasar energi terbarukan, yang kini terpaksa bersaing dengan fasilitas batubara yang menggunakan batubara domestik yang murah. Selain itu, keputusan untuk menggunakan BPP sebagai patokan penting untuk menentukan tarif solar patut dipertanyakan karena perhitungan BPP tidak transparan, dan tidak ada pengungkapan bagaimana perubahannya setiap tahun. Transparansi dalam perhitungan ini memungkinkan pengembang menilai proyek tenaga surya untuk mengevaluasinya sesuai dengan biaya riil pembangkit energi.

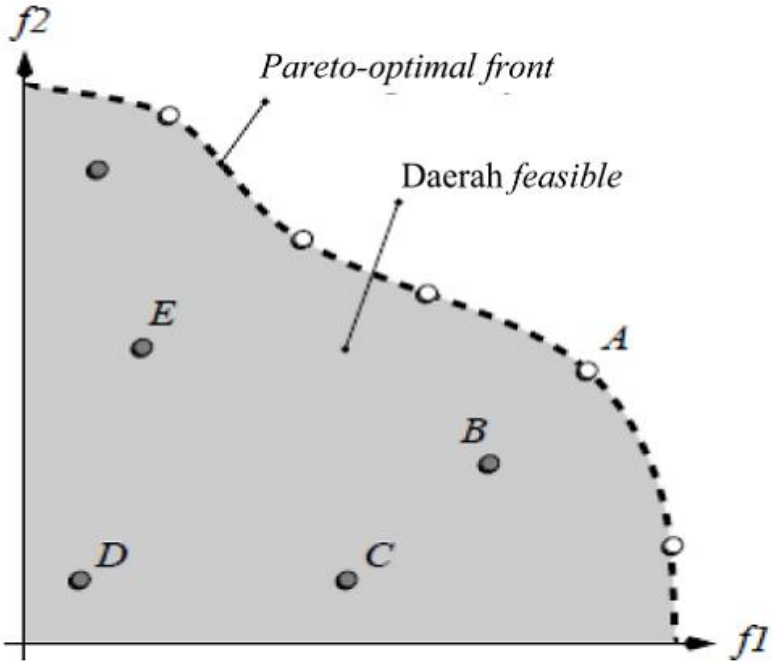
Upaya lain penerapan energi surya adalah kebijakan metering. Kedua instrumen kebijakan metering tersebut adalah sebagai berikut:

1. *Net-metering* (Peraturan PLN No. 0733/2013). Peraturan PLN No. 0733 merupakan peraturan meteran bersih pertama yang diterbitkan dengan mekanisme ekspor-impor. Namun, tidak ada *multiplier effect* terhadap jumlah listrik yang diekspor dari konsumen. Oleh karena itu, jumlah yang diterima PLN dianggap sama dengan jumlah yang diekspor dari pelanggan [22]. Dengan demikian, untuk setiap kWh energi yang diekspor ke jaringan PLN, pelanggan akan diberikan kredit sebesar tarif pelanggan reguler
2. *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. Kelebihan listrik yang diekspor dihitung setiap bulan dan diubah menjadi kredit, yang habis masa berlakunya setelah tiga bulan [21]. Jumlah listrik yang diekspor dari konsumen dikalikan dengan 65%. Model hanya akan menghitung variabel insentif 65% [23], artinya setiap energi yang diekspor oleh pelanggan ke jaringan PLN akan didiskon sebesar 35% [28].

Berdasarkan Peraturan Menteri ESDM No. 26 Tahun 2021 tentang PLTS atap, kapasitas terpasang yang diizinkan maksimal 100% dari daya tersambung. Ketentuan jumlah energi listrik yang diekspor dari konsumen, semula dihargai 65% berubah menjadi 100%. Artinya, setiap energi yang diekspor oleh pelanggan ke jaringan PLN akan dihargai sama dengan harga tarif listrik PLN sesuai dengan daya terpasang. Kemudian apabila jumlah energi listrik yang diekspor lebih besar dari jumlah energi listrik yang diimpor oleh PLN pada bulan berjalan, maka selisih lebih akan diakumulasikan dan diperhitungkan sebagai pengurang tagihan listrik pada bulan berikutnya [24]. Melalui ketentuan Permen ESDM No. 26 Tahun 2021 yang merevisi Permen ESDM No. 49 Tahun 2018 akan mengakibatkan meningkatnya adopsi PLTS atap di sektor industri dan skala perumahan, sehingga juga akan meningkatkan daya saing Indonesia di sektor produk dan jasa hijau [25].

2.5. *Multi-Objective Optimization*

Permasalahan optimasi tujuan tunggal, solusi alternatif yang diperoleh dengan menggunakan algoritma optimasi dibandingkan satu sama lain dan solusi alternatif yang memberikan nilai terbaik (yaitu nilai minimum untuk kasus minimalisasi atau nilai maksimum untuk kasus maksimalisasi) dapat dipilih oleh pengambil keputusan. Namun, dalam kasus masalah pengoptimalan multi-objektif atau banyak tujuan, tidak mudah untuk memilih solusi alternatif tertentu sebagai solusi yang lebih baik, karena solusi ini mungkin tidak lebih baik sehubungan dengan semua tujuan (yaitu solusi alternatif mungkin lebih baik dalam kasus beberapa tujuan tetapi mungkin tidak lebih baik dalam kasus tujuan lain). Terdapat tiga kategori konsep dalam optimalisasi multi-objektif, yaitu *aggregating function,* pendekatan non-pareto, dan pendekatan pareto.



Gambar 7. Daerah *feasible* dan *Pareto-optimal front*

Pareto optimal merupakan suatu kondisi jika dan hanya jika tidak ada keadaan alternatif yang akan membuat fungsi tujuan menjadi lebih baik tanpa membuat fungsi tujuan yang lain menjadi lebih buruk. Pareto optimal atau optimalitas Pareto merupakan konsep optimalitas yang dikemukakan oleh Pareto. Himpunan (*set*) solusi alternatif yang tidak didominasi oleh salah satu anggota solusi dari himpunan tersebut disebut himpunan solusi non-dominasi atau *non-dominated solution/set*. Himpunan tak terdominasi dari ruang solusi layak lengkap disebut himpunan solusi optimal Pareto (*Pareto-optimal solution*). Batas yang dibentuk oleh semua solusi yang dipetakan dari himpunan solusi optimal Pareto disebut *Pareto-optimal front*. Berdasarkan Gambar 7, daerah pada titik B, C, D, dan E merupakan daerah himpunan solusi optimal Pareto (*feasible*), sedangkan daerah pada titik A merupakan batas yang dibentuk oleh semua solusi yang dipetakan dari himunan solusi optimal Pareto (*Pareto-optimal front*) [26].

Secara matematis, suatu multi-objektif yang memiliki m fungsi tujuan berbentuk sebagai berikut.

$$Max/Min \begin{cases} z_1 = f_1(x) = c_{11}x_1 + c_{12}x_2 + \cdots + c_{1n}x_n \\ z_2 = f_2(x) = c_{21}x_1 + c_{22}x_2 + \cdots + c_{2n}x_n \\ z_m = f_m(x) = c_{m1}x_1 + c_{m2}x_2 + \cdots + c_{mn}x_n \end{cases} \quad (1)$$

Simbol max atau min menandakan bahwa fungsi tujuan semuanya akan dimaksimalkan ataupun diminimalkan bersamaan. Adapun fungsi kendala ditunjukkan oleh pertidaksamaan (2).

$$a_m x_1 + a_{m2} x_2 + \cdots + a_{mn} x_n \leq b_m \tag{2}$$

Batasan pertidaksamaan (*inequality constraint*):

$$x_1, x_2, \ldots, x_n \geq 0 \tag{3}$$

Metode yang dapat digunakan dalam optimasi multi-objektif terdiri dari metode pembobotan, metode jarak, pendekatan kompromi, dan pendekatan *goal-programming*. Setiap metode memiliki caranya masing-masing dalam proses penyelesaiannya. Metode pembobotan merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengubah fungsi multi-objektif menjadi fungsi tunggal. Terdapat tiga metode penyelesaian dalam metode pembobotan, yaitu *fixed-weight* atau *weight sum method*, *random-weight method*, dan *adaptive-weight method*. Metode *weight sum* merupakan metode yang paling sederhana dan mudah dipahami dalam menyelesaikan optimalisasi multi-objektif, karena metode ini menggabungkan semua fungsi tujuan menjadi satu fungsi tujuan saja. Setelah memperoleh fungsi tujuan tunggal, maka akan diperoleh solusi yang layak (*feasible*), yang dapat diselesaikan dengan beberapa cara, yaitu metode grafik, metode simpleks, ataupun algoritma genetika. Metode ini bergantung pada pemberi keputusan (*decision maker*) [27], [28]. Adapun formulasi dari metode *weight sum* ini ditunjukkan oleh persamaan (4).

$$Max/Min\ z = \sum_{k=1}^{m} w_k f_k(x) \tag{4}$$

Dengan

$$w_1 + w_2 + \cdots + w_m = 1 \tag{5}$$

Keterangan:

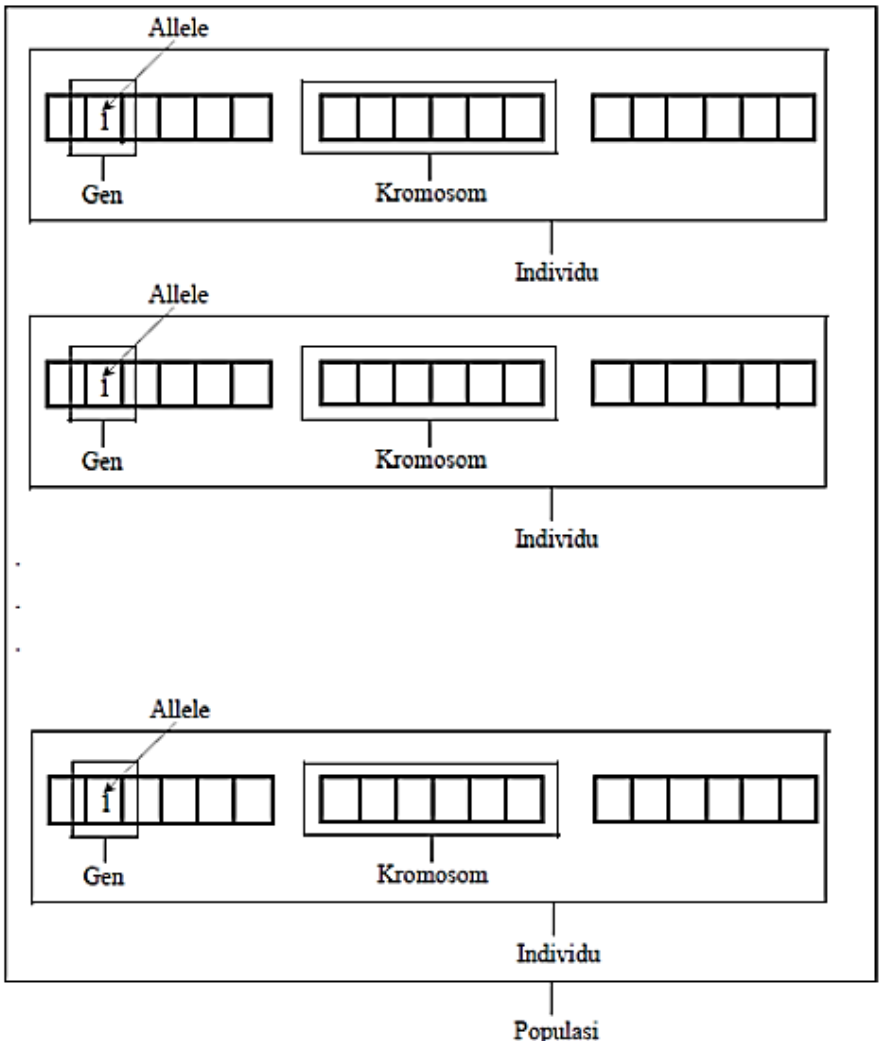
w_k : Bobot untuk fungsi tujuan ke-k

$f_k(x)$: Fungsi objektif ke-k

2.6. Algoritma Genetika (*Genetic Algorithms*)

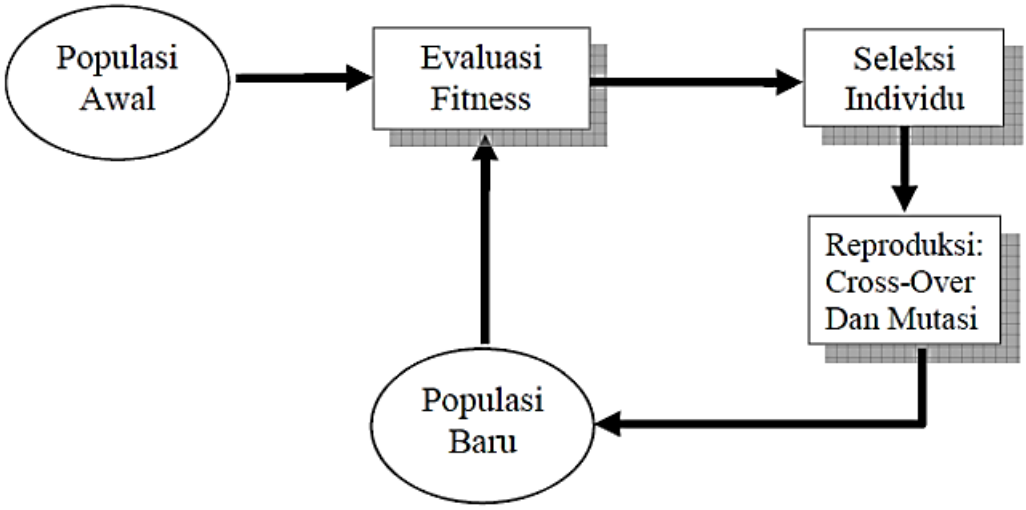
2.6.1. Terminologi Algoritma Genetika

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 [29]. Algoritma ini mengubah proses penyelesaian masalah menjadi proses *crossover* (penyilangan) dan mutasi gen kromosom dalam evolusi biologis yang serupa, dan dapat dengan cepat memperoleh hasil optimasi yang lebih baik saat menyelesaikan masalah optimasi kombinatorial yang kompleks [30].



Gambar 8. Visualisasi gen, *allele*, kromosom, individu, dan populasi pada algoritma genetika

Prinsip utama algoritma genetika yaitu dengan meniru proses seleksi alam dan prinsip-prinsip ilmu genetika. Dalam seleksi alam, individu-individu akan bersaing untuk mempertahankan hidup dan melakukan reproduksi. Individu-individu yang *fit* akan memiliki peluang untuk terus melanjutkan hidup (*survive*) dan melakukan reproduksi (menghasilkan keturunan). Namun sebaliknya, individu-individu yang kurang *fit* akan tereliminasi (mati) dan punah, prinsip ini disebut juga dengan *survival of the fittest*. Selanjutnya dalam proses seleksi alam tersebut, individu yang lebih *fit* dari kedua orang tuanya akan dilahirkan melalui proses yang disebut penyilangan (*crossover*) dan mutasi. *Crossover* atau kawin silang merupakan proses penukaran sebagian gen pada kromosom satu dengan kromosom lainnya, sehingga membutuhkan dua buah kromosom untuk melakukan pertukaran gen. Mutasi merupakan proses perubahan komposisi gen pada kromosom itu sendiri yang berperan untuk menggantikan gen yang hilang dalam sebuah populasi yang diakibatkan dari adanya proses seleksi dan *crossover*. Proses *crossover* dan mutasi tersebut terjadi pada kromosom-kromosom individu yang melakukan reproduksi. Proses seleksi dan reproduksi (penyilangan dan mutasi) ini akan berlangsung berulang kali sampai individu yang paling *fit* dihasilkan [31].



Gambar 9. Siklus algoritma genetika

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 deterministik.
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.
3. Solusi yang dihasilkan belum tentu merupakan solusi yang optimal, karena sangat dipengaruhi oleh bilangan acak yang dibangkitkan [32].

2.6.2. Komponen Utama Algoritma Genetika

2.6.2.1. Teknik Pengkodean

Teknik pengkodean merupakan suatu teknik yang digunakan untuk mempresentasikan populasi awal sebagai calon solusi suatu masalah ke dalam suatu kromosom. Teknik pengkodean mencakup pengkodean gen dan pengkodean kromosom. Gen merupakan bagian dari kromosom yang dapat direpresentasikan dalam bentuk string, bit, bilangan real, daftar aturan, elemen permutasi, dan elemen program yang dapat diimplementasikan pada operator genetika [33]. Pada optimasi algoritma genetika, untuk mencari nilai maksimal atau minimal sebuah fungsi *f(x)* dengan batasan variabel *x* adalah (a_x, b_x) dan memiliki akurasi *p* angka di belakang koma. Panjang kode bit untuk variabel *x* adalah *m*, maka panjang kromosom (*chromosome size*) adalah m dengan perhitungan sebagai berikut [34]:

$$2^{m-1} < (b_x - a_x)10^p \leq 2^m - 1 \quad (6)$$

atau dapat juga ditulis sebagai berikut:

$$m < \log_2[(b_x - a_x) \times 10^p] + 1 \quad (7)$$

dan

$$m \geq \log_2[(b_x - a_x) \times 10^p + 1] \quad (8)$$

Keterangan:

m : Panjang kode bit (panjang kromosom)

b_x : Nilai batas maksimal dari variabel *x*

a_x : Nilai batas minimal dari variabel *x*

p : Jumlah angka di belakang koma (akurasi)

2.6.2.2. Prosedur Inisialisasi (Populasi Awal)

Proses inisialisasi (populasi awal) merupakan suatu proses yang bertujuan untuk menghasilkan sejumlah individu secara acak (*random*). Jumlah populasi tentunya bergantung pada masalah yang akan diselesaikan dan jenis operator genetika yang akan digunakan. Setelah itu dilakukan inisialisasi terhadap kromosom yang ada di dalam populasi tersebut yang dilakukan secara acak dengan memperhatikan domain solusi dan kendala pada permasalahan yang tersedia.

2.6.2.3. Fungsi Evaluasi

Individu akan dievaluasi berdasarkan fungsi tertentu sebagai ukuran kinerjanya. Individu yang memiliki nilai *fitness* tinggi pada kromosomnya akan dipertahankan, sedangkan individu yang kromosomnya memiliki nilai *fitness* rendah akan diganti. Fungsi *fitness* menyatakan suatu fungsi tujuan dan akan bergantung pada permasalahan tertentu dari representasi yang digunakan [33]. Pada optimasi algoritma genetika kasus maksimasi, maka nilai *fitness* adalah nilai dari fungsi itu sendiri, tetapi jika yang dibutuhkan adalah kasus minimasi, maka nilai *fitness* merupakan invers dari nilai fungsi itu sendiri. Kasus maksimasi ditunjukkan oleh persamaan (9) sebagai berikut:

$$F(x) = f(x) \quad (9)$$

Kasus minimasi ditunjukkan oleh persamaan (10) sebagai berikut [35]:

$$F(x) = \frac{1}{1+f(x)} \quad (10)$$

Keterangan:

$F(x)$: Fungsi *fitness*

$f(x)$: Fungsi objektif (fungsi tujuan)

Guna mendapatkan nilai *x* dari sebuah kromosom, yaitu dengan cara sebagai berikut:

$$x = a_x + c_x . \frac{b_x - a_x}{2^m - 1} \quad (11)$$

Keterangan:

c_x : Nilai desimal dari *m* bit kromosom

2.6.2.4. Seleksi

Proses seleksi bertujuan untuk memilih individu-individu yang akan dipilih lebih lanjut dalam proses persilangan (*crossover*) dan mutasi untuk memperoleh calon induk yang baik. Induk yang baik tentunya juga akan menghasilkan keturunan yang baik. Langkah awal dalam seleksi adalah pencarian nilai *fitness* yang masing-masing individu dalam suatu wadah seleksi akan menerima probabilitas reproduksi yang bergantung pada nilai objektifnya sendiri terhadap nilai objektif dari semua individu dalam wadah seleksi. Nilai *fitness* tersebut akan digunakan pada tahap seleksi berikutnya. Terdapat beberapa metode untuk memilih kromosom yang digunakan, yaitu *roulette wheel selection* dan seleksi *good fitness*.

Pada penelitian ini akan menggunakan metode seleksi dengan mesin *roulette*. Metode seleksi mesin *roulette* merupakan metode yang sederhana dan dikenal dengan nama *stochastic sampling with replacement*. Proses tersebut diibaratkan sebuah permainan roda rolet, semua kromosom ditempatkan dalam populasi, setiap tempat besar sesuai dengan fungsi *fitness*. Kromosom akan dipilih berdasarkan nilai *fitness*, semakin besar nilai *fitness* maka kromosom tersebut memiliki peluang untuk dipilih beberapa kali. Probabilitas nilai *fitness* dapat ditunjukkan dengan persamaan (12) sebagai berikut:

$$P_i = \frac{F_i(x)}{\sum_i^n F_i(x)} \quad (12)$$

Keterangan:

P_i : Probabilitas fungsi *fitness* ke-i

$F_i(x)$: *Fitness* individu ke-i

2.6.2.5. Operator Algoritma Genetika

a. Kawin Silang (*Crossover*)

Crossover merupakan proses di dalam algoritma genetika yang bertujuan untuk menggabungkan dua kromosom *parent* menjadi kromosom yang baru (*offspring*). Sebuah kromosom yang mengarah pada solusi baik dapat diperoleh melalui proses *crossover* dengan cara memilih satu titik yang dipisahkan secara acak dan kemudian akan membentuk *offspring* dengan cara mengkombinasikan segmen dari satu induk ke sebelah kiri dari titik yang dipisahkan dengan segmen dari induk yang lain ke sebelah kanan dari titik yang dipisahkan.

Probabilitas *crossover* (Pc) akan mempengaruhi jumlah terjadinya proses persilangan antarindividu. Semakin besar nilai probabilitas *crossover*, maka akan semakin cepat struktur individu baru terbentuk ke dalam populasi baru. Apabila nilai *crossover* terlalu besar, maka individu yang merupakan kandidat solusi terbaik mungkin akan dapat hilang lebih cepat pada generasi berikutnya. Nilai probabilitas *crossover* yang disarankan adalah 0,8-0,95.

b. Mutasi (*Mutation*)

Mutasi merupakan proses perubahan salah satu atau lebih beberapa gen dari suatu kromosom. Proses mutasi memiliki fungsi untuk menggantikan gen yang hilang dari suatu populasi akibat proses seleksi yang memungkinkan munculnya kembali gen yang tidak muncul pada inisialisasi populasi.

Probabilitas mutasi (Pm) akan mengendalikan operator mutasi pada setiap generasi dengan peluang mutasi yang lebih kecil daripada peluang *crossover*. Pada seleksi alam murni, mutasi jarang sekali muncul, sehingga operator mutasi pada optimasi algoritma genetika tidak selalu terjadi. Nilai probabilitas mutasi yang disarankan kecil, yaitu 0,005-0,01 [33].

III. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan dalam kurun waktu 4 bulan, yaitu pada bulan Januari - April 2023 di Laboratorium Terpadu Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung.

Tabel 1. Jadwal penelitian

No.	Nama Kegiatan	Bulan		
		Januari	Februari	Maret
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 5 3500U Radeon Vega Mobile, dilengkapi prosesor 2,10 GHz, serta sistem operasi Windows 11 Pro 64-bit sebagai media pemodelan dan simulasi.
2. Perangkat lunak komputasi R2021a sebagai perangkat lunak utama untuk simulasi multi-objektif algoritma genetika.

3. Perangkat lunak PVsyst untuk mengetahui kapasitas ukuran PLTS atap, energi yang dihasilkan dari sistem PLTS atap, dan tagihan bulanan prosumer ke PLN.
4. Perangkat lunak Microsoft Excel untuk validasi perhitungan dan pembuatan grafik.
5. Data-data jumlah konsumen dan prosumer, tarif tagihan rata-rata, biaya pokok penyediaan pembangkitan, tagihan bulanan prosumer dan konsumen, dan kapasitas ukuran PLTS atap yang terpasang dan energi yang dibangkitkan.

3.3. Tahapan Penelitian

Adapun tahapan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Identifikasi Masalah

   Pada tahap ini penulis mengidentifikasi permasalahan yang terdapat pada instrumen kebijakan PLTS atap di Indonesia terkait laba utilitas (PLN) dan penghematan prosumer (pemilik PLTS atap).
2. Studi Literatur

   Pada tahap ini merupakan proses pencarian data dan referensi yang akan dijadikan acuan untuk menunjang proses pelaksanaan penelitian. Studi literatur akan diperoleh data sekunder, buku, skripsi, laporan terdahulu, artikel, dan jurnal-jurnal nasional maupun internasional yang berkaitan dengan topik skripsi.
3. 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.
4. 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 meliputi:

   a. Jumlah prosumer (*number of procumers*) (n_p) dan jumlah konsumen (*number of consumers*) (n_c).
   b. Tarif tagihan rata-rata (*average billing* rate) (abr) (Rp/kWh).

c. Biaya pokok penyediaan pembangkitan (*average cost of supply*) (*acos*) (Rp/kWh).
d. Tagihan bulanan prosumer ke PLN (*bill with solar*) (Rp) dan tagihan bulanan konsumen ke PLN (*bill without solar*) (Rp).
e. Biaya beban listrik/abonemen 1.300 VA (*fixed charge*) (FC) (Rp).
f. Permintaan energi prosumer (*energy demand of procumer*) (E_{dp}) (kWh) dan permintaan energi konsumen (*energy demand of consumer*) (E_{dc}) (kWh).
g. Kapasitas ukuran PLTS atap yang terpasang dan energi yang dibangkitkan (*total energy generation by prosumer*) (E_{gp}) (kWh).
h. Anuitas yang harus dibayarkan oleh prosumer atau EMI (Rp).

5. Simulasi dan Analisis

Data-data yang telah diolah sebelumnya, kemudian dilakukan perhitungan dengan menggunakan algoritma genetika 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 dari prosumer, dan tarif tagihan rata-rata sebagai variabel keputusan.

$$\text{Penghematan Prosumer} = \left[E_{dp} \times abr + FC \times n_p\right] - \left\{\left(E_{dp} - E_{gp}\right) \times [(1 - k) \times abr + FiT \times k] + FC \times n_p + EMI\right\} \quad (13)$$

$$\text{Laba Utilitas} = \left[\{E_{dc} \times (abr - acos)\} - \left\{\left(E_{gp} - E_{dp}\right) \times (abr \times (1 - k) - acos)\right\}\right] + \left[FC \times \left(n_p + n_c\right)\right] - [k \times \left(E_{gp} - E_{dp} \times FiT\right] \quad (14)$$

Nilai *k* merupakan selisih energi yang dibangkitkan prosumer dan energi yang dibutuhkan prosumer yang ditunjukkan oleh persamaan (15).

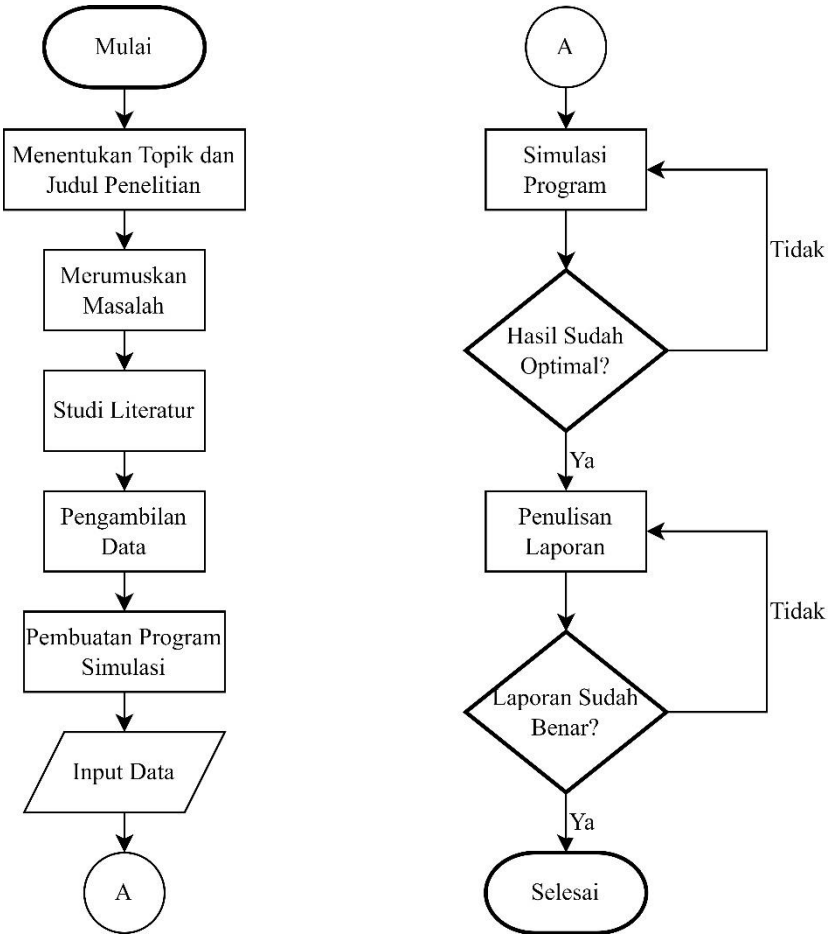
$$k = \begin{cases} 1, & \left(E_{gp} - E_{dp}\right) \geq 0 \\ 0, & \left(E_{gp} - E_{dp}\right) < 0 \end{cases} \quad (15)$$

6. Pembuatan 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 dari penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 10 di bawah ini.

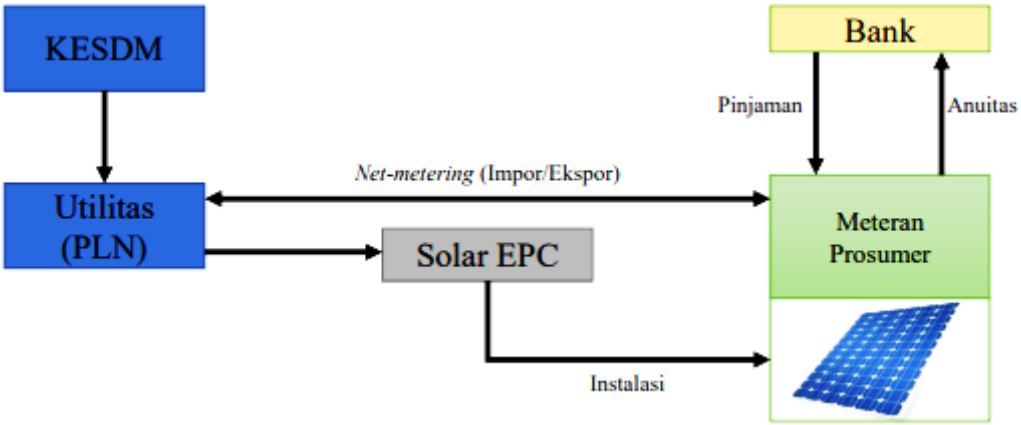


Gambar 10. Diagram alir penelitian

3.5. Pemodelan Ekonomi *Stakeholder*

Pemodelan konsumen sentris yang akan dibahas dalam penelitian ini, yaitu terdapat *stakeholder* yang terdiri dari konsumen (tanpa menggunakan PLTS atap), prosumer (produsen sekaligus konsumen atau dapat disebut juga dengan konsumen yang menggunakan PLTS atap), dan utilitas PLN. Prosumer menanggung pengeluaran modal, operasional untuk pemasangan PLTS atap, dan memiliki kepemilikan penuh atas sistem tersebut. Prosumer yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah maksimal 1,3 kW. Kategori tersebut berdasarkan golongan tarif tenaga listrik R-1/TR, yaitu 1.300 VA. Manfaat utilitas adalah laba yang diperoleh dari penjualan

energi di tarif tagihan rata-rata setelah mempertimbangkan biaya pengadaan energi. Manfaat dari prosumer dimodelkan dalam hal penghematan yang diperoleh dari adopsi surya atap setelah mempertimbangkan pengeluaran angsuran bulanan investasi (anuitas) terhadap biaya pemasangan dan pendapatan dari penjualan energi surya atap yang dihasilkan secara lokal [9]. Model bisnis konsumen-sentris yang akan dianalisis dalam penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 11.



Gambar 11. Model bisnis konsumen sentris

Pendapatan dari penjualan energi di tagihan rata-rata ke konsumen tanpa PLTS atap, pendapatan dari penjualan energi defisit di tarif tagihan rata-rata dari prosumer, dan biaya bulanan tetap dari prosumer dan konsumen ditunjukkan oleh persamaan (16), (17), dan (18).

$$P_k = c_1 \times c_2 \tag{16}$$

$$P_p = (x_1 - x_2) \times (c_3 - 1) \times c_2 \tag{17}$$

$$B_{bt} = c_4 \times (c_5 + c_6) \tag{18}$$

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

$$\text{Pendapatan utilitas} = P_k + P_p + B_{bt} \tag{19}$$

$$\text{Pendapatan utilitas} = (c_1 \times c_2) + \{(x_1 - x_2) \times (c_3 - 1) \times c_2\} + c_4 \times (c_5 + c_6) \tag{20}$$

Nilai c_3 ditentukan oleh persamaan (21) yang menunjukkan apakah prosumer mengalami kelebihan energi atau defisit energi.

$$c_3 = \begin{cases} 1, & (x_1 - x_2) \geq 0 \\ 0, & (x_1 - x_2) < 0 \end{cases} \tag{21}$$

Keterangan:

P_k : Pendapatan dari penjualan energi di tarif tagihan rata-rata ke konsumen tanpa PLTS atap (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 atap 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 pokok penyediaan pembangkitan ditunjukkan oleh persamaan (22) dan (23).

$$B_{pf} = c_3 \times (x_1 - x_2) \times x_3 \quad (22)$$

$$B_{sa} = \{c_1 - (x_1 - x_2)\} \times c_7 \quad (23)$$

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

$$\text{Pengeluaran utilitas} = B_{pf} + B_{sa} \quad (24)$$

$$\text{Pengeluaran utilitas} = \{c_3 \times (x_1 - x_2) \times x_3\} + \{c_1 - (x_1 - x_2)\} \times c_7 \quad (25)$$

Laba yang diperoleh utilitas ditunjukkan oleh persamaan (26).

$$\text{Laba utilitas} = \text{Pendapatan utilitas} - \text{Pengeluaran utilitas} \quad (26)$$

$$\text{Laba utilitas} = [(c_1 \times c_2) + \{(x_1 - x_2) \times (c_3 - 1) \times c_2\} + c_4 \times (c_5 + c_6)] - [\{c_3 \times (x_1 - x_2) \times x_3\} + \{c_1 - (x_1 - x_2)\} \times c_7] \quad (27)$$

Keterangan:

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

B_{sa} : Pembelian sisa energi untuk memenuhi permintaan sistem prosumer di biaya pokok penyediaan pembangkitan (Rp)

c_7 : Biaya pokok penyediaan pembangkitan (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 atap ditunjukkan oleh persamaan (28) dan (29).

$$B_{bap} = x_2 \times c_2 \quad (28)$$

$$T_{bpt} = c_4 \times c_5 \quad (29)$$

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 atap adalah sebagai berikut:

$$\text{Tagihan prosumer tanpa PLTS} = B_{bap} + T_{bpt} \quad (30)$$

$$\text{Tagihan prosumer tanpa PLTS} = (x_2 \times c_2) + (c_4 \times c_5) \quad (31)$$

Biaya pembelian defisit energi prosumer di tarif tagihan rata-rata dan pendapatan dari penjualan surplus energi di FiT dari prosumer ditunjukkan oleh persamaan (32) dan (33).

$$B_{bdp} = (1 - c_3) \times (x_2 - x_1) \times c_2 \quad (32)$$

$$P_{psf} = (x_2 - x_1) \times x_3 \times c_3 \quad (33)$$

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

$$\text{Tagihan prosumer PLTS} = B_{pdp} + P_{psf} + T_{bpt} + c_8 \quad (34)$$

$$\text{Tagihan prosumer PLTS} = \{(1 - c_3) \times (x_2 - x_1) \times c_2\} + \{(x_2 - x_1) \times x_3 \times c_3\} + (c_4 \times c_5) + c_8 \quad (35)$$

Angsuran bulanan investasi (anuitas) ditunjukkan oleh persamaan (36).

$$c_8 = p \times i \times \frac{(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (36)$$

Keterangan:

B_{bdp} : 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) (Rp)

p : Biaya total instalasi (Rp)

i : Tingkat suku bunga

n : Periode pengembalian

Penghematan prosumer yang menjadi fungsi objektif ditunjukkan oleh persamaan (37).

Penghematan prosumer = Tagihan prosumer tanpa PLTS – Tagihan prosumer PLTS (37)

$$\text{Penghematan prosumer} = [(x_2 \times c_2) + (c_4 \times c_5)] - [\{(1 - c_3) \times (x_2 - x_1) \times c_2\} + \{(x_2 - x_1) \times x_3 \times c_3\} + (c_4 \times c_5) + c_8] \quad (38)$$

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

$$f_1(x_1, x_2, x_3) = c_2(1 - c_3)x_1 + (c_2.c_3)x_2 + c_3(x_1 - x_2)x_3 - c_8 \quad (39)$$

$$f_2(x_1, x_2, x_3) = \big(c_7 - c_2(1 - c_3)\big)x_1 - \big(c_7 - c_2(1 - c_3)\big)x_2 - c_3(x_1 - x_2)x_3 + c_1(c_2 - c_7) + c_4(c_5 + c_6) \quad (40)$$

Atau dapat ditulis ke dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} f_1(x_1,x_2,x_3) \\ f_2(x_1,x_2,x_3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_2(1 - c_3) & (c_2.c_3) & c_3(x_1 - x_2) \\ \big(c_7 - c_2(1 - c_3)\big) & -\big(c_7 - c_2(1 - c_3)\big) & -c_3(x_1 - x_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -c_8 \\ c_1(c_2 - c_7) + c_4(c_5 + c_6) \end{bmatrix} \quad (41)$$

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 atap adalah sebagai berikut:

Kapasitas PLTS ≤ 1.300 VA (42)

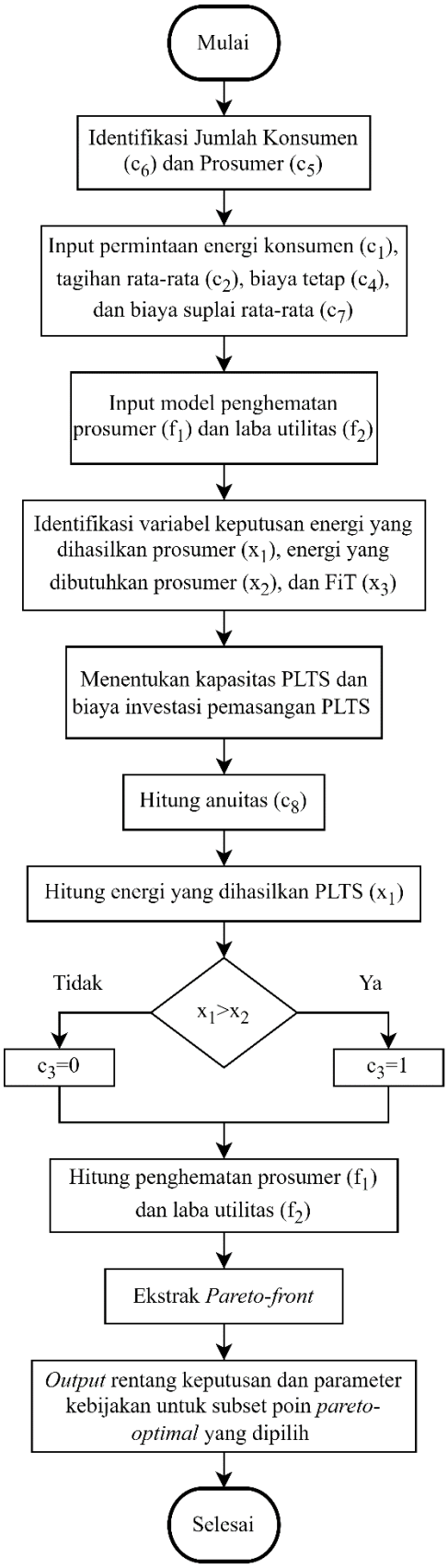
Batasan pertidaksamaan untuk energi yang dibutuhkan prosumer untuk analisis sensitivitas adalah sebagai berikut:

$$x_{2min} \leq x_2 \leq x_2 max \quad (43)$$

$$50\%\ x_1 \leq x_2 \leq 100\%\ x_1 \quad (44)$$

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

$$x_{3_{min}} \leq x_3 \leq x_{3_{max}} \quad (45)$$



Gambar 12. Diagram alir pengambilan keputusan kebijakan untuk instalasi PLTS atap

3.6. Langkah-langkah Optimasi Algoritma Genetika

Adapun prosedur dalam menentukan skema kebijakan FiT yang optimal dengan metode multi-objektif algoritma genetika adalah sebagai berikut:

1. Memasukkan data-data sebagai berikut:
   a. Tagihan listrik (Rp/kWh).
   b. Biaya pokok penyediaan pembangkitan (Rp/kWh).
   c. Jumlah pelanggan PLN 1.300 VA.
   d. Jumlah prosumer (pengguna PLTS atap).
   e. Biaya beban listrik pelanggan PLN 1.300 VA (Rp).
   f. Energi yang dihasilkan prosumer dengan menggunakan *software* PVsyst.
   g. Angsuran biaya investasi PLTS atap.
   h. Parameter energi yang dihasilkan PLTS atap (50%-150% dari energi yang dihasilkan prosumer) (kWh).
   i. Parameter *Feed-in Tariff* (FiT) (Rp).
2. Menentukan parameter algoritma genetika, yaitu sebagai berikut:
   a. Jumlah generasi (iterasi).
   b. Panjang kromosom (bit).
   c. Jumlah individu.
   d. Probabilitas *crossover* (Pc).
   e. Probabilitas mutasi (Pm).
3. Inisialisasi populasi secara acak (*random*). Masing-masing populasi direpresentasikan dengan bilangan biner dalam matriks 2 dimensi mengikuti persamaan berikut:

   $$X = [x_2, x_3] \quad (46)$$

4. Menghitung evaluasi *fitness value* di setiap individu di populasi. Fungsi *fitness* yang digunakan adalah fungsi maksimum yang ditunjukkan oleh persamaan (47) sebagai berikut:

   $$Fitness[i] = w_1 . f_1(x_1, x_2, x_3) + w_2 . f_2(x_1, x_2, x_3) \quad (47)$$

   $$0{,}1 \leq w_1 \leq 0{,}9 \quad (48)$$

   $$0{,}1 \leq w_2 \leq 0{,}9 \quad (49)$$

   Keterangan:

   w_1 : Bobot untuk fungsi penghematan prosumer (f_1)

w_2 : Bobot untuk fungsi laba utilitas (PLN) (f_2)

5. Menghitung nilai probabilitas masing-masing fungsi *fitness* dan probabilitas *fitness* kumulatif yang ditunjukkan oleh persamaan sebagai berikut:

$$p_i = \frac{Fitness[i]}{\sum_i^n Fitness[i]} \quad (50)$$

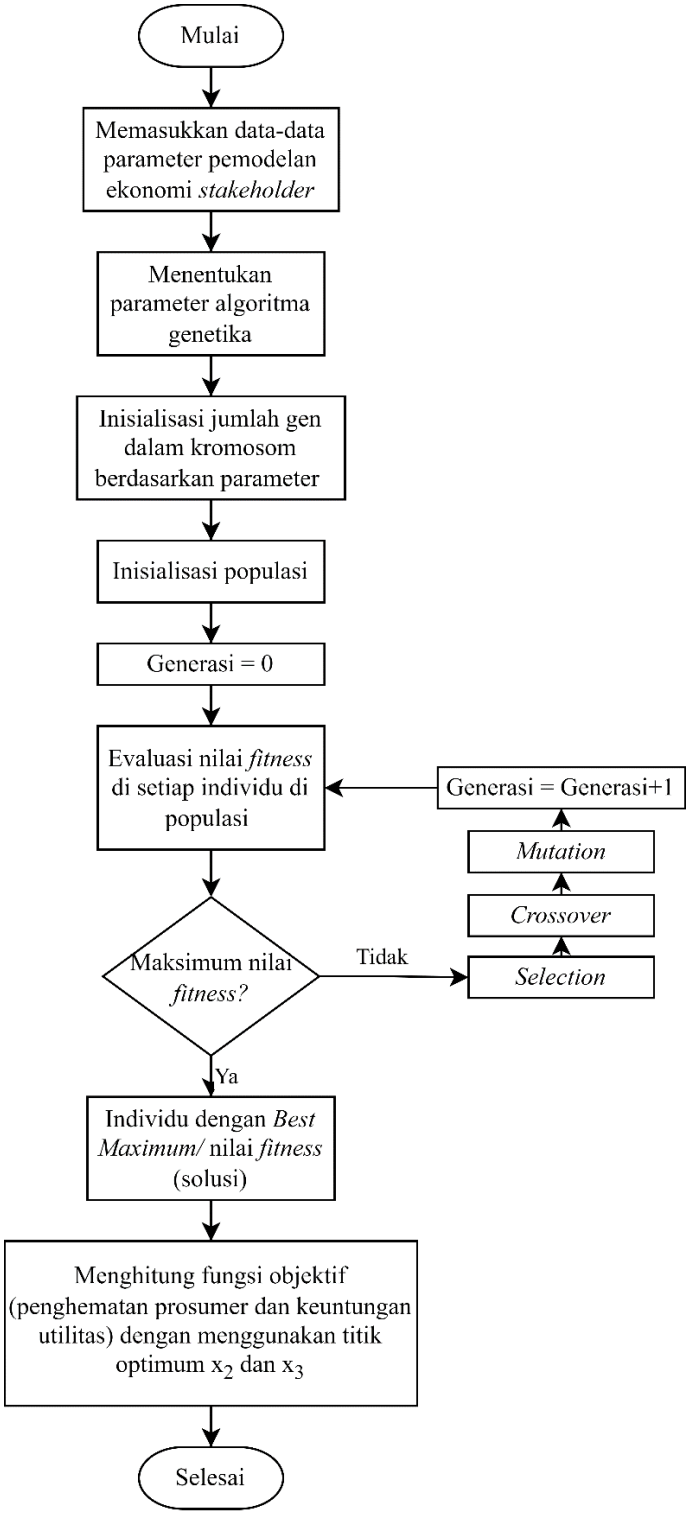
Keterangan:

p_i : Probabilitas nilai *fitness* ke-*i*

6. Membangkitkan bilangan acak (*random*) untuk proses seleksi dengan cara melihat posisi bilangan acak yang dibangkitkan pada interval probabilitas kumulatif. Metode seleksi menggunakan *roulette wheel* untuk mendapatkan kromosom baru.
7. Membangkitkan bilangan acak (*random*) untuk dibandingkan dengan peluang pindah silang (*crossover*). Metode *crossover* menggunakan *one-cut-point*. Apabila nilai *random* lebih kecil dari peluang pindah silang, proses pindah silang akan dilakukan, tetapi jika tidak proses mutasi yang terlebih dahulu dilakukan.
8. Menentukan titik potong urutan gen yang ditentukan untuk dilakukan pertukaran gen atau pindah silang.
9. Melakukan proses mutasi dengan cara memilih satu induk secara acak. Individu yang terpilih akan dilakukan proses mutasi untuk tiap nilai gen yang terpilih *(allele*) secara *random*. Kemudian proses kembali ke langkah 4 hingga generasi maksimum.
10. Apabila sudah mendapatkan nilai maksimum, maka selanjutnya akan menghitung nilai fungsi objektif, yaitu penghematan prosumer dan laba utilitas (PLN) dengan menggunakan nilai individu *best maximum* (x_2 dan x_3) yang sudah didapatkan.

3.7. Diagram Alir Program

Adapun diagram alir program dari algoritma genetika ditunjukkan oleh Gambar 13 sebagai berikut:



Gambar 13. Diagram alir algoritma genetika

3.8. Pengujian Optimasi Algoritma Genetika

Proses perhitungan optimasi algoritma genetika untuk adopsi PLTS atap skala rumah tangga 1.300 VA meliputi beberapa proses, yaitu sebagai berikut:

3.8.1. Inisialisasi Populasi

Kromosom mempresentasikan sebuah solusi dari masalah multi-objektif. Pada PLTS atap skema 1.100 Wp memiliki panjang kromosom 48 yang akan menjadi suatu individu yang terdiri dari 2 variabel, yaitu energi yang dibutuhkan prosumer (x_2) dan FiT (x_3). Berikut ini conto dari inisialisasi populasi pada permasalahan optimasi algoritma genetika dengan jumlah kromosom sebanyak 10 individu.

Tabel 2. Inisialisasi populasi

No.	Kromosom (v_i)	Nilai x_2	Nilai x_3
1.	[000001010100000101011101 011110001001000111001110]	723,55	944,93
2.	[000110101111000100010000 001000110101011111001010]	783,62	630,42
3.	[001001010010100110110000 000100010110001101010101]	811,92	564,17
4.	[100001110000000011110011 100110001000110101100100]	1.082,90	1.062,95
5.	[010001010101101010101101 101010101010010101101101]	901,08	1.129,72
6.	[001001101100101011010110 001001010101010100110101]	816,44	637,77
7.	[010110000010110110000110 000000000100101001010101]	953,21	501,07
8.	[101101111101100110101101 110001110110001000000000]	1.218,18	1.235,77
9.	[010101010011011010110110 000101010010010101011001]	945,00	578,03
10.	[100011001011010110100101 101001011010101011011010]	1.098,70	1.111,35

Pada individu yang pertama, konversi bilangan biner ke desimal memiliki nilai x_2 dan x_3 sebesar 344.413 dan 7.901.646. Nilai variabel x_2 dan x_3 dapat dihitung dengan persamaan (11), pada kromosom ke-1 memiliki nilai sebagai berikut:

$$x_2 = 707{,}5 + 344.413 \times \frac{1.418-709}{2^{24}-1}$$

$$x_2 = 723{,}5548$$

$$x_3 = 500 + 7.901.646 \times \frac{1.444,7-500}{2^{24}-1}$$

$$x_3 = 944,9299$$

3.8.2. Evaluasi Nilai *Fitness*

Optimasi algoritma genetika bertujuan untuk mencari nilai maksimum dari dua fungsi objektif, yaitu penghematan prosumer dan laba utilitas. Fungsi multi-objektif tersebut digabungkan menjadi sebuah fungsi *fitness* dengan menggunakan pembobotan. Pada perhitungan ini, bobot untuk contoh dari perhitungan adalah 0,5 untuk penghematan prosumer dan 0,5 untuk laba utilitas. Nilai fungsi kemampuan dari masing-masing kromosom di atas dapat dihitung dengan memasukkan bilangan desimal ke fungsi $fitness(x_2, x_3)$. Fungsi *fitness* pada perhitungan ini dapat ditunjukkan ke dalam persamaan sebagai berikut:

$$fitness(x_1, x_2, x_3) = 0,5 \times f_1(x_1, x_2, x_3) + 0,5 \times f_2(x_1, x_2, x_3) \quad (51)$$

$$fitness(x_1, x_2, x_3) = 0,5 \times (c_2(1 - c_3)x_1 + (c_2.c_3)x_2 + c_3(x_1 - x_2)x_3 - c_8) + 0,5 \times \Big(\big(c_7 - c_2(1 - c_3)\big)x_1 - \big(c_7 - c_2(1 - c_3)\big)x_2 - c_3(x_1 - x_2)x_3 + c_1(c_2 - c_7) + c_4(c_5 + c_6)\Big) \quad (52)$$

Tabel 3. Evaluasi nilai *fitness*

No.	Nilai x_2	Nilai x_3	Nilai *fitness* (F_i)
1.	723,55	944,93	969.319.616
2.	783,62	630,42	969.327.460
3.	811,92	564,17	969.331.157
4.	1.082,90	1.062,95	969.366.543
5.	901,08	1.129,72	969.342.799
6.	816,44	637,77	969.331.746
7.	953,21	501,07	969.349.607
8.	1.218,18	1.235,77	969.384.209
9.	945,00	578,03	969.348.535
10.	1.098,70	1.111,35	969.368.607

Pada skenario PLTS atap 1.100 Wp, energi yang dihasilkan oleh 11 prosumer (x_1) adalah 1.418 kWh, sehingga pada individu yang pertama memiliki nilai *fitness* sebagai berikut:

$$f_1(x_1, x_2, x_3)[1] = 1.257,16(1 - 1)1.418 + (1.257,16 \times 1)723,55 + 1(1.418 - 723,55)944,93 - 182.043$$

$$f_1(x_1, x_2, x_3)[1] = 1.383.783$$

$$f_2(x_1, x_2, x_3)[1] = \big(995{,}98 - 1.257{,}16(1-1)\big)1.418 - \big(995{,}98 - 1.257{,}16(1-1)\big)723{,}55 - 1(1.418 - 723{,}55)944{,}93 + 4.315.924(1.257{,}16 - 995{,}98) + 75.124(11 + 10.771)$$

$$f_2(x_1, x_2, x_3)[1] = 1.937.255.450$$

$$fitness[1] = 0{,}5(1.383.783) + 0{,}5(1.937.255.450) = 969.319.616$$

3.8.3. Seleksi

Terlihat dari hasil evaluasi, bahwa kromosom ke-8 adalah yang terkuat dengan nilai *fitness* terbesar, sedangkan kromosom ke-1 adalah yang terlemah dengan nilai *fitness* terendah. Total kemampuan *fitness* populasi adalah 9.693.470.280 yang diperoleh dengan cara menjumlah semua nilai *fitness*. Perhitungan probabilitas masing-masing kromosom diperoleh dengan cara seperti pada persamaan (50). Berikut ini merupakan probabilitas masing-masing kromosom dan probabilitas kumulatif ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Probabilitas seleksi dan probabilitas kumulatif

No.	Nilai *Fitness* (F_i)	Probabilitas Seleksi (P_i)	Probabilitas Kumulatif (Q_i)
1.	969.319.616	0,099997	0,099997
2.	969.327.460	0,099998	0,199995
3.	969.331.157	0,099998	0,299994
4.	969.366.543	0,100002	0,399996
5.	969.342.799	0,100000	0,499995
6.	969.331.746	0,099998	0,599994
7.	969.349.607	0,100000	0,699994
8.	969.384.209	0,100004	0,799998
9.	969.348.535	0,100000	0,899998
10.	969.368.607	0,100002	1,000000

Setelah memperoleh nilai probabilitas seleksi dari masing-masing kromosom dan probabilitas kumulatif, *roulette* diputar 10 kali. Asumsi bahwa 10 urutan acak dari kisaran [0,1] adalah sebagai berikut:

$r_1 = 0{,}30143$ $\quad$ $r_6 = 0{,}40280$

$r_2 = 0{,}42156$ $\quad$ $r_7 = 0{,}17761$

$r_3 = 0{,}28763$ $\quad$ $r_8 = 0{,}23432$

$r_4 = 0{,}88189$ $\quad$ $r_9 = 0{,}03268$

$r_5 = 0{,}35087$ $\quad$ $r_{10} = 0{,}19757$

Angka pertama $r_1 = 0{,}30143$ lebih besar dari Q3 dan lebih kecil dari Q4, artinya kromosom v_4 dipilih sebagai populasi baru. Angka kedua $r_2 = 0{,}42156$ lebih besar dari Q4 dan lebih kecil dari Q5, artinya kromosom v_5 dipilih sebagai populasi baru. Berikut ini merupakan populasi baru yang terbentuk ditunjukkan oleh Tabel 5.

Tabel 5. Populasi baru

No.	Kromosom Baru (v_i)	Kromosom Asal
1.	[100001110000000011110011100110001000110101100100]	Kromosom 4
2.	[010001010101101010101101101010101010010101101101]	Kromosom 5
3.	[001001010010100110110000000100010110001101010101]	Kromosom 3
4.	[010101010011011010110110000101010010010101011001]	Kromosom 9
5.	[100001110000000011110011100110001000110101100100]	Kromosom 4
6.	[010001010101101010101101101010101010010101101101]	Kromosom 5
7.	[000110101111000100010000001000110101011111001010]	Kromosom 2
8.	[001001010010100110110000000100010110001101010101]	Kromosom 3
9.	[000001010100000101011101011110001001000111001110]	Kromosom 1
10.	[000110101111000100010000001000110101011111001010]	Kromosom 2

3.8.4. *Crossover* dan Mutasi

Metode *crossover* yang digunakan adalah *one-cut-point*, yang diseleksi secara acak suatu bagian dari deretan bilangan saling tukar dari kedua orang tuanya. Probabilitas *crossover* yang digunakan adalah $P_c = 0{,}8$, yang berarti bahwa 80% kromosom mengalami *crossover*. Asumsi bahwa bilangan acak yang dibangkitkan sebagai berikut:

$r_1 = 0{,}52710$ $\quad$ $r_6 = 0{,}88339$

$r_2 = 0{,}80010$ $\quad$ $r_7 = 0{,}90326$

$r_3 = 0{,}89102$ $\quad$ $r_8 = 0{,}80031$

$r_4 = 0{,}05994$ $\quad$ $r_9 = 0{,}91267$

$r_5 = 0{,}91108$ $\quad$ $r_{10} = 0{,}87528$

Berdasarkan hasil bilangan acak di atas, terlihat bahwa angka yang lebih kecil dari 0,8 adalah pada deretan ke-1 dan ke-4 ini berarti kromosom $v_1{}'$ dan $v_4{}'$ digunakan sebagai tempat terjadinya penukaran gen (terjadi pertukaran letak bilangan biner). Penentuan titik potong pindah silang (*crossover*) dilakukan dengan cara membangkitkan bilangan acak dari 1-48 (sesuai dengan panjang kromosom). Asumsi bahwa nilai acak yang dibangkitkan adalah $r_1 = 16$.

$$v_1 \times v_4 = \begin{matrix}[100001110000000011110011100110001000110101100100] \\ [010101010011011010110110000101010010010101011001]\end{matrix}$$

$$v_1{}' = [100001110000000010110110000101010010010101011001]$$

$$v_4' = [010101010011011011110011100110001000110101100100]$$

Proses mutasi akan memperbaiki satu gen atau lebih sesuai dengan probabilitas laju mutasi. Probabilitas mutasi $p_m = 0{,}01$, sehingga dapat diduga bahwa rata-rata 1% dari total bit populasi mengalami mutasi. Bit yang ada $mj \times$ populasi $= 48 \times 10 = 480$, jadi terdapat $480 \times 0{,}01 = 4{,}8$ mengalami mutasi per generasi untuk perhitungan diambil 5, misalnya untuk mutasi diperoleh sebagai berikut:

Tabel 6. Proses mutasi

No.	Angka Acak	Nomor Kromosom (angka acak/jumlah bit)	Letak Bit
1.	105	$105 : 48 = 2{,}1875 \approx 3$	$0{,}1875 \times 48 = 9$
2.	164	$164 : 48 = 3{,}4167 \approx 4$	$0{,}4167 \times 48 \approx 21$
3.	199	$199 : 48 = 4{,}1458 \approx 5$	$0{,}1458 \times 48 \approx 7$
4.	330	$330 : 48 = 6{,}8750 \approx 7$	$0{,}8750 \times 48 = 42$
5.	408	$408 : 48 = 8{,}5000 \approx 9$	$0{,}5000 \times 48 = 24$

Populasi akhir setelah terjadinya proses mutasi ditunjukkan oleh Tabel 7 sebagai berikut:

Tabel 7. Proses mutasi

No.	Populasi Akhir Proses Mutasi
1.	$v_3 = [10000111\mathbf{0}00000001111001110011000100011010110010 0]$ $v_3' = [10000111\mathbf{1}00000001111001110011000100011010110010 0]$
2.	$v_4 = [01010101001101101111\mathbf{0}01110011000100011010110010 0]$ $v_4' = [01010101001101101111\mathbf{1}01110011000100011010110010 0]$
3.	$v_5 = [100001\mathbf{1}100000000111100111001100010001101011001 00]$ $v_5' = [100001\mathbf{0}100000000111100111001100010001101011001 00]$
4.	$v_7 = [00011010111100010001000000100011010101111\mathbf{1}001010]$ $v_7' = [00011010111100010001000000100011010101111\mathbf{0}001010]$
5.	$v_9 = [00000101010000010101110\mathbf{1}01111000100100011100111 0]$ $v_9' = [00000101010000010101110\mathbf{0}01111000100100011100111 0]$

Populasi akhir setelah proses *crossover* dan mutasi ditunjukkan oleh Tabel 8.

Tabel 8. Populasi akhir

No.	Kromosom Akhir (v_i')
1.	[1000011100000000101101100001010100100101011001]
2.	[0100010101011010101011011010101010010101101101]
3.	[1000011110000000011110011100110001000110101100100]
4.	[0101010100110110111110111001100010001101011001 00]
5.	[1000010100000000011110011100110001000110101100100]
6.	[0100010101011010101000111001100010001101011001 00]
7.	[0001101011110001000100000010001101010111100010 10]
8.	[0010010100101001101100000001000101100011010101 01]
9.	[0000010101000001010111000111100010010001110011 10]
10.	[0001101011110001000100000010001101010111110010 10]

Nilai konversi dari bilangan biner masing-masing kromosom untuk x_2 dan x_3, perhitungan nilai *fitness*, nilai penghematan prosumer, dan laba utilitas ditunjukkan pada Tabel 9.

Tabel 9. Evaluasi nilai fitness dan fungsi objektif

No.	Nilai x_2	Nilai x_3	Nilai *Fitness*	Penghematan Prosumer (Rp)	Laba Utilitas (Rp)
1.	1.082,89	578,03	775.767.840	1.373.031	1.937.360.055
2.	901,08	1.129,72	775.781.187	1.534.736	1.937.150.863
3.	1.084,28	1.062,95	775.800.539	1.535.800	1.937.197.648
4.	945,00	1.062,95	775.780.579	1.508.751	1.937.188.320
5.	1.077,36	1.062,95	775.799.547	1.534.455	1.937.197.184
6.	901,08	1.062,95	775.774.284	1.500.220	1.937.185.378
7.	783,62	630,42	775.702.571	1.203.016	1.937.451.904
8.	811,92	564,17	775.701.046	1.180.603	1.937.481.711
9.	723,55	944,93	775.732.450	1.383.783	1.937.255.450
10.	783,62	630,42	775.702.572	1.203.018	1.937.451.901

Berdasarkan hasil percobaan perhitungan algoritma genetika dengan 10 individu dengan bobot 0,5 untuk penghematan prosumer dan 0,5 untuk laba utilitas, nilai *fitness* terbesar adalah 775.800.539 yang berada pada kromosom ke-3 dengan nilai $x_2 = 1.084{,}28$ dan $x_3 = 1.062{,}95$. Artinya, nilai *Feed-in Tariff* (harga jual energi yang dihasilkan PLTS atap dari prosumer) adalah Rp1.062,95/kWh, sehingga didapatkan penghematan prosumer sebesar Rp1.535.800 dan laba utilitas sebesar Rp1.937.197.648.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan

Adapun simpulan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Skema adopsi PLTS atap skala rumah tangga 1.300 VA dengan pendekatan *stakeholder* (konsumen, prosumer, dan utilitas PLN) menghasilkan penghematan prosumer dan laba utilitas yang optimal untuk kedua skenario.
2. Rekomendasi skema *Feed-in Tariff* (FiT) dari hasil optimasi algoritma genetika untuk kapasitas PLTS atap 1.100 Wp adalah Rp522,41/kWh (36% dari tarif tenaga listrik utilitas PLN).

5.2. Saran

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

1. Perlu adanya pembahasan terkait golongan pelanggan PLN 2.200 VA, 3.500 VA, 5.500 VA, dan 6.600 VA untuk memperoleh skema *Feed-in Tariff*, sehingga dapat meningkatkan adopsi PLTS atap skala rumah tangga di Indonesia.
2. Perlu adanya pengembangan untuk metode yang digunakan, seperti *Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm* II (NSGA-II) dan *Particle Swarm Optimization* (PSO).

DAFTAR PUSTAKA

[1] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, *Statistik Ketenagalistrikan Tahun 2020*, 34th ed. Jakarta: Sekretariat Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan, 2021. Accessed: Oct. 30, 2022. [Online]. Available: https://gatrik.esdm.go.id/assets/uploads/download_index/files/8f7e7-20211110-statistik-2020-rev03.pdf

[2] Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional (PPN)/Badan Perencanaan Pembangunan Nasional (Bappenas), "Energi Bersih dan Terjangkau," in *Ringkasan Eksekutif Pelaksanaan Pencapaian TPB/SDGs Indonesia Tahun 2019*, V. et. al. Yulaswati, Ed. Jakarta: Kedeputian Bidang Kemaritiman dan Sumber Daya Alam, Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional/Badan Perencanaan Pembangunan Nasional, 2020, pp. 1–9.

[3] Dewan Energi Nasional, *Outlook Energi Indonesia 2019*. Jakarta Selatan, 2019. Accessed: Nov. 30, 2022. [Online]. Available: https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-outlook-energi-indonesia-2019-bahasa-indonesia.pdf

[4] Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi and Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, "Siaran Pers Nomor: 63.Pers.04/SJI/2022 Tanggal: 8 Februari 2022, Pemerintah Kawal COD Pembangkit EBT Sesuai Target," *ebtke.esdm.go.id*, Feb. 07, 2022. https://ebtke.esdm.go.id/post/2022/02/08/3076/pemerintah.kawal.cod.pembangkit.ebt.sesuai.target (accessed Dec. 01, 2022).

[5] Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi and Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, "Siaran Pers Nomor: 303.Pers/04/SJI/2021 Indonesia Kaya Energi Surya, Pemanfaatan Listrik Tenaga Surya oleh Masyarakat Tidak Boleh Ditunda," *ebtke.esdm.go.id*, Sep. 02, 2021. https://ebtke.esdm.go.id/post/2021/09/02/2952/indonesia.kaya.energi.surya.pemanfaatan.listrik.tenaga.surya.oleh.masyarakat.tidak.boleh.ditunda (accessed Dec. 01, 2022).

[6] E. Karakaya and P. Sriwannawit, "Barriers to the Adoption of Photovoltaic Systems: The State of the Art," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49. Elsevier Ltd, pp. 60–66, May 10, 2015. doi: 10.1016/j.rser.2015.04.058.

[7] Indonesia Clean Energy Development (ICED), *Panduan Perencanaan dan Pemanfaatan PLTS Atap di Indonesia*. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2020. Accessed: Dec. 02, 2022. [Online]. Available:

https://drive.esdm.go.id/wl/?id=XOegh8pXO9FMjebl4x0joDD6hIZe94Fm&mode=list&download=1

[8] F. J. W. Osseweijer, L. B. P. van den Hurk, E. J. H. M. Teunissen, and W. G. J. H. M. van Sark, "A Comparative Review of Building Integrated Photovoltaics Ecosystems in Selected European countries," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 90, pp. 1027–1040, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.001.

[9] V. Mohan *et al.*, "Policy Assistance for Adoption of Residential Solar PV in India: A Stakeholder-centric Approach for Welfare Optimization," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 197–206, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.05.109.

[10] A. Chaianong, S. Tongsopit, A. Bangviwat, and C. Menke, "Bill Saving Analysis of Rooftop PV Customers and Policy Implications for Thailand," *Renew Energy*, vol. 131, pp. 422–434, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.07.057.

[11] S. Tongsopit, "Thailand's Feed-in Tariff for Residential Rooftop Solar PV Systems: Progress so Far," *Energy for Sustainable Development*, vol. 29, pp. 127–134, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.esd.2015.10.012.

[12] A. Hidayatno, A. D. Setiawan, I. M. Wikananda Supartha, A. O. Moeis, I. Rahman, and E. Widiono, "Investigating Policies on Improving Household Rooftop Photovoltaics Adoption in Indonesia," *Renew Energy*, vol. 156, pp. 731–742, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.04.106.

[13] A. C. Duman and Ö. Güler, "Economic Analysis of Grid-Connected Residential Rooftop PV Systems in Turkey," *Renew Energy*, vol. 148, pp. 697–711, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.10.157.

[14] V. Mohan *et al.*, "Policy Assistance for Adoption of Residential Solar PV in India: A Stakeholder-centric Approach for Welfare Optimization," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 197–206, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.05.109.

[15] I. K. A. Setiawan, I. N. S. Kumara, and I. W. Sukerayasa, "Analisis Unjuk Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Satu MWp Terinterkoneksi Jaringan di Kayubihi, Bangli," *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, vol. 13, no. 1, pp. 27–33, Jun. 2014, Accessed: Dec. 03, 2022. [Online]. Available: https://ojs.unud.ac.id/index.php/JTE/article/view/14026

[16] P. Surya and M. Junus, "Kajian PLTS On–Grid pada Gedung X Politeknik Negeri Malang untuk Melayani Beban Perkantoran Menggunakan Perangkat Homer Pro," *JURNAL ELTEK*, vol. 19, no. 2, p. 96, Oct. 2021, doi: 10.33795/eltek.v19i2.320.

[17] T. Koerniawan and A. W. Hasanah, "Kajian Sistem Kinerja PLTS Of-Grid di STT-PLN," *Energi & Kelistrikan*, vol. 10, no. 1, pp. 38–44, Feb. 2019, doi: 10.33322/energi.v10i1.322.

[18] T. Tech, *Panduan Studi Kelayakan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Terpusat*. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2018. Accessed: Dec. 03, 2022. [Online]. Available: https://drive.esdm.go.id/wl/?id=LywF3lwAFv4vjOBJMVvoRkd03FxBwTJ2&mode=list&download=1

[19] S. Hagerman, P. Jaramillo, and M. G. Morgan, "Is Rooftop Solar PV at Socket Parity Without Subsidies?," *Energy Policy*, vol. 89, pp. 84–94, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.enpol.2015.11.017.

[20] R. Ikhsan, I. D. Sara, and R. S. Lubis, "Studi Kasus Kelayakan Penerapan Sistem Hybrid Building Applied Photovoltaics (BAPV)-PLN pada Atap

Gedung Politeknik Aceh," *Jurnal Rekayasa Elektrika*, vol. 13, no. 1, pp. 48–56, Apr. 2017, doi: 10.17529/jre.v13i1.6071.

[21] E. Hamdi, "Indonesia's Solar Policies-Designed to Fail?," Institute for Energy Economics and Financial Analysis, Jakarta, Feb. 2019. Accessed: Dec. 04, 2022. [Online]. Available: https://ieefa.org/articles/ieefa-report-indonesias-solar-policies-designed-fail

[22] PT PLN (Persero), *Peraturan Direksi PT PLN (Persero) Nomor: 0733.K/DIR/2013 Tentang Pemanfaatan Energi Listrik dari Fotovoltaik oleh Pelanggan PT PLN (Persero)*. Jakarta: PT PLN (Persero), 2013. Accessed: Dec. 04, 2022. [Online]. Available: https://www.rekasurya.com/download/Peraturan%20Pemerintah%20dan%20PLN%20terkait%20PLTS/PERATURAN-DIREKSI-0773.K.DIR_.2013-FOTOVOLTAIK.pdf

[23] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, *Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 49 Tahun 2018 Tentang Penggunaan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap oleh Konsumen PT Perusahaan Listrik Negara (Persero)*. jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2018, pp. 1–18. Accessed: Dec. 04, 2022. [Online]. Available: https://jdih.esdm.go.id/peraturan/Permen%20ESDM%20Nomor%2049%20Tahun%202018.pdf

[24] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, *Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 26 Tahun 2021 Tentang Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap yang Terhubung pada Jaringan Tenaga Listrik Pemegang Izin Usaha Penyediaan Tenaga Listrik untuk Kepentingan Umum*. Jakarta, Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2021, pp. 1–33. Accessed: Dec. 04, 2022. [Online]. Available: https://drive.esdm.go.id/wl/?id=5XQv80ogkSp0tLQsY4wJNUPVSPpcgGtz

[25] Institute for Essential Services Reform (IESR), "Annual Impact Report 2021," Jakarta, May 2022. Accessed: Dec. 05, 2022. [Online]. Available: https://iesr.or.id/laporan-tahunan

[26] R. V. Rao and R. J. Lakshmi, "Ranking of Pareto-Optimal Solutions and Selecting the Best Solution in Multi- and Many-Objective Optimization Problems Using R-Method," *Soft Computing Letters*, vol. 3, p. 100015, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.socl.2021.100015.

[27] F. Mulyani Zenis, M. Yusuf Fajar, and D. Ramdani, "Program Liniear Multi-Objective dengan Fixed-weight Method," *Jurnal Matematika*, vol. 14, no. 1, pp. 1–7, 2015, [Online]. Available: http://ejournal.unisba.ac.id

[28] Azis, M. F. Soeprijanto, and D. Fahmi, "Analisis Optimal Power Flow Mempertimbangkan Emisi Menggunakan Metode Multi-Objective Particle Swarm Optimization," *Jurnal Teknik Pomits*, vol. 1, no. 1, pp. 1–6, 2015, Accessed: Dec. 09, 2022. [Online]. Available: https://repository.its.ac.id/72205/2/2211100703-Paper.pdf

[29] E. Gautama, "Algoritma Genetika untuk Menyelesaikan Coin Problem: Aplikasi Pada Mesin ATM," Palembang, Oct. 2016. [Online]. Available: http://ejournal.unsri.ac.id/index.php/jsi/index

[30] Y. Qin, Z. Li, J. Ding, F. Zhao, and M. Meng, "Automatic Optimization Model of Transmission Line Based on GIS and Genetic Algorithm," *Array*, vol. 17, p. 100266, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.array.2022.100266.

[31] Y. Arkeman, Y. Herdiyeni, I. Hermandi, and G. F. Laxmi, *Algoritma Genetika Tujuan Jamak (Multi-Objective Genetic Algorithms): Teori dan Aplikasinya untuk Bisnis dan Agroindustri*, 1st ed. Bogor: Institut Pertanian Bogor, 2014. Accessed: Jan. 05, 2023. [Online]. Available: https://repository.ipb.ac.id/jspui/bitstream/123456789/83766/1/algoritma%20genetika%20tujuan%20jamak.pdf

[32] I. A. Ashari, "Perbandingan Performansi Algoritma Genetika dan Algoritma Ant Colony Optimization dalam Optimasi Penjadwalan Mata Kuliah," Skripsi, Universitas Negeri Semarang, Semarang, 2016. Accessed: Jan. 07, 2023. [Online]. Available: http://lib.unnes.ac.id/28048/1/4611412015.pdf

[33] N. Tiandini, "Penerapan Metode Kombinasi Algoritma Genetika dan Tabu Search dalam Optimasi Alokasi Kapal Peti Kemas (Studi Kasus: PT. XYZ)," Skripsi, Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya, 2017. Accessed: Jan. 07, 2023. [Online]. Available: https://repository.its.ac.id/1713/1/5213100075-Undergraduate_Theses.pdf

[34] I. Berlianty and M. Arifin, *Teknik Teknik Optimasi Heuristik*. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2010.

[35] P. Y. Utami, C. Suhery, and Ilhamsyah, "Aplikasi Pencarian Rute Terpendek Menggunakan Algoritma Genetika (Studi Kasus: Pencarian Rute Terpendek untuk Pemadam Kebakaran di Wilayah Kota Pontianak)," *Jurnal Coding Sistem Komputer Universitas Tanjungpura*, vol. 2, no. 1, pp. 19–25, 2014, Accessed: Feb. 10, 2023. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.26418/coding.v2i1.4267

[36] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, *Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor: 169.K/HK.02/MEM.M/2021 Tentang Besaran Biaya Pokok Penyediaan Pembangkitan PT Perusahaan Listrik Negara (Persero) Tahun 2020*. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2021, pp. 1–8.

[37] Otoritas Jasa Keuangan, "Suku Bunga Dasar Kredit," *Otoritas Jasa Keuangan*, 2022. https://www.ojk.go.id/id/kanal/perbankan/pages/suku-bunga-dasar.aspx (accessed Jan. 27, 2023).

[38] A. Bagaskara, D. Kurniawan, H. M. Bintang, R. J. Suryadi, and S. N. Firdausi, "Indonesia Solar Energy Outlook 2023 The emergence of solar PV in Fueling Indonesia's Energy Transition 2 Authors (Alphabetically): Indonesia Solar Energy Outlook 2023," Jakarta, Oct. 2022. Accessed: Jan. 31, 2023. [Online]. Available: https://iesr.or.id/pustaka/indonesia-solar-energy-outlook-2023

[39] Haryanto and T. Willay, "Optimasi Penyusunan Jadwal Ujian Mata Kuliah Menggunakan Algoritma Genetika Pada Universitas Widya Dharma Pontianak," *METIK JURNAL*, vol. 5, no. 2, pp. 28–34, Dec. 2021, doi: 10.47002/metik.v5i2.294.