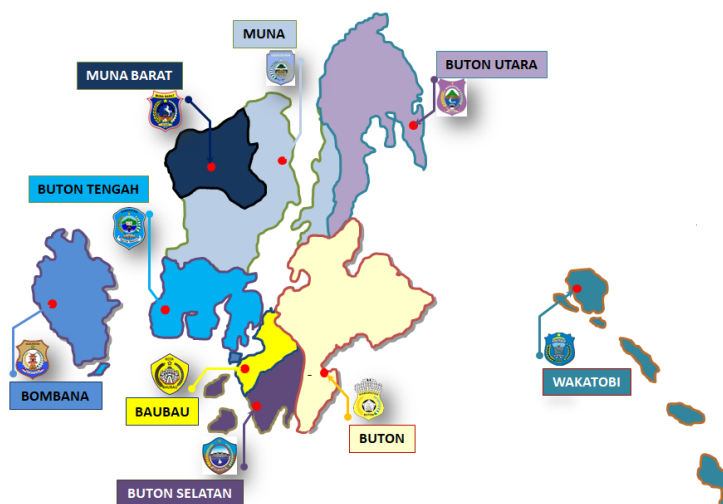


## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dalam upaya meningkatkan kualitas sistem tenaga listrik di Indonesia, aspek efisiensi, keandalan, dan kestabilan jaringan menjadi perhatian utama dalam perencanaan dan pengoperasian sistem kelistrikan nasional (Kunaifi and Reinders, 2018; Shair et al., 2021; Younesi et al., 2022). Salah satu tantangan signifikan yang masih dihadapi adalah tingginya rugi-rugi daya, khususnya pada sisi transmisi dan distribusi, yang secara langsung mempengaruhi performa sistem secara keseluruhan (Apata, Adebayo and Ainah, 2022). Rugi-rugi ini meliputi rugi daya aktif maupun rugi daya reaktif, dengan daya reaktif berperan penting dalam menjaga profil tegangan yang stabil serta meminimalkan kehilangan energi dalam jaringan.

Analisis dan optimasi aliran daya reaktif (*reactive power flow*) merupakan salah satu pendekatan strategis untuk mengurangi rugi-rugi daya dan memperbaiki stabilitas tegangan dalam sistem tenaga. Proses ini mencakup pengaturan berbagai variabel kontrol, seperti tegangan pada terminal generator, tap posisi transformator, serta kapasitas kompensasi reaktif, baik yang bersifat pasif (seperti kapasitor) maupun aktif (seperti SVC atau D-STATCOM) (Mahato et al., 2024). Optimasi aliran daya reaktif diperlukan untuk menjaga tegangan bus dalam batas normal dan menekan rugi-rugi daya, terutama pada sistem kelistrikan daerah yang memiliki struktur jaringan yang lemah atau distribusi pembangkit yang tersebar.



Gambar 1 Wilayah Layanan PLN UP3 Baubau (PLN Baubau)

Salah satu studi kasus yang relevan adalah sistem kelistrikan di wilayah Kepulauan Buton dan Muna, Provinsi Sulawesi Tenggara. Gambar 1 memperlihatkan wilayah sistem layanan PLN UP3 Baubau yang dilayani oleh beberapa pembangkit yang tersebar, antara lain PLTMG Baubau, PLTD Baubau, PLTD Pasar Wajo, PLTMH Wining, PLTMH Rongi, PLTU Baruta, serta PLTD Raha. Di wilayah Pulau Muna,

sistem kelistrikan masih didominasi oleh pembangkit tenaga diesel (PLTD) dengan kapasitas terpasang sebesar 4,7 MW dan beban puncak mencapai 4,2 MW. Sementara itu, di Pulau Buton, total kapasitas terpasang sebesar 30,15 MW belum mencukupi beban puncak yang mencapai 33,2 MW (Fatana, Sarjiya and Putranto, 2022). Operasi paralel antar pembangkit dalam sistem ini menyebabkan tantangan dalam pengaturan tegangan dan aliran daya reaktif, terutama di daerah-daerah yang jauh dari pusat pembangkitan, seperti Kabupaten Buton Utara dan Kabupaten Muna. Ketidakseimbangan distribusi daya reaktif dan penurunan tegangan di beberapa bus menyebabkan efisiensi sistem menurun dan meningkatkan risiko ketidakstabilan jaringan.

Berbagai pendekatan optimasi telah dikembangkan untuk menyelesaikan permasalahan aliran daya reaktif. Metode-metode berbasis algoritma evolusioner dan kecerdasan buatan, seperti algoritma genetika (GA), algoritma semut (ACO), dan *Particle Swarm Optimization* (PSO), telah banyak digunakan karena fleksibilitas dan efektivitasnya dalam menangani sistem non-linear dengan banyak variabel bebas dan kendala (Abdel-Basset et al., 2024). Namun, setiap metode memiliki kelebihan dan keterbatasan tersendiri. Algoritma PSO dikenal memiliki konvergensi yang cepat dan kemampuan eksplorasi global yang baik, tetapi sering kali sensitif terhadap parameter inisialisasi dan rawan terjebak pada solusi lokal. Di sisi lain, *Genetic Algorithm* (GA) memiliki kemampuan eksploitasi yang kuat melalui mekanisme seleksi dan *crossover*, sehingga dapat menelusuri ruang solusi secara lebih menyeluruh dan menghindari prematur konvergensi.

Penelitian-penelitian terdahulu umumnya masih berfokus pada sistem standar seperti IEEE 33-bus, tanpa mempertimbangkan karakteristik sistem kelistrikan nyata yang terisolasi seperti Pulau Buton dan Muna, belum mengintegrasikan analisis *multi-platform* antara MATLAB dan ETAP, tidak menyertakan evaluasi kestabilan tegangan maupun kelayakan ekonomi, serta terbatas pada penempatan tunggal D-STATCOM, sehingga penelitian ini menjadi penting karena menawarkan pendekatan hibrid PSO–GA yang diimplementasikan pada sistem riil untuk optimasi multi-lokasi D-STATCOM dengan analisis teknis dan ekonomis yang lebih komprehensif. Penelitian ini mengusulkan penerapan dua metode optimasi cerdas, yaitu PSO dan GA, untuk menyelesaikan permasalahan optimasi aliran daya reaktif pada sistem kelistrikan Pulau Buton dan Muna. Kedua metode ini digunakan secara terpisah dan hasilnya dibandingkan untuk menilai efektivitas masing-masing algoritma dalam menurunkan rugi-rugi daya reaktif, menjaga profil tegangan bus dalam batas aman, serta meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan. Model simulasi dikembangkan berdasarkan data sistem kelistrikan nyata dan dianalisis menggunakan pendekatan numerik berbasis perangkat lunak MATLAB.

Melalui pendekatan ini, penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan strategi optimasi aliran daya reaktif yang lebih adaptif dan efisien, khususnya pada sistem kelistrikan daerah terpencil dan tersebar di Indonesia. Selain itu, hasil yang diperoleh dapat menjadi dasar perencanaan teknis

yang lebih akurat dalam peningkatan keandalan sistem distribusi tenaga listrik nasional.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan sebelumnya, terdapat beberapa permasalahan utama yang menjadi fokus dalam penelitian ini, yaitu:

1. Bagaimana menentukan lokasi dan kapasitas optimum penempatan D-STATCOM agar dapat meminimalkan kerugian daya aktif dan memperbaiki profil tegangan?
2. Bagaimana perbandingan kinerja antara metode optimasi GA, PSO dan HGAPSO, khususnya ditinjau dari aspek nilai rugi-rugi daya, kecepatan komputasi (waktu pemrosesan) dan generasi konvergen?
3. Bagaimana evaluasi kelayakan Pemasangan D-STATCOM ditinjau dari sisi finansial melalui penerapan metode optimasi HGAPSO?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mendapatkan lokasi dan kapasitas optimum penempatan D-STATCOM pada Sistem kelistrikan Pulau Buton dan Muna.
2. Membandingkan kinerja metode GA, PSO, HGAPSO untuk optimasi lokasi dan kapasitas D-STATCOM.
3. Mengevaluasi kelayakan secara finansial pemasangan D-STATCOM.

## 1.4 Tinjauan Pustaka

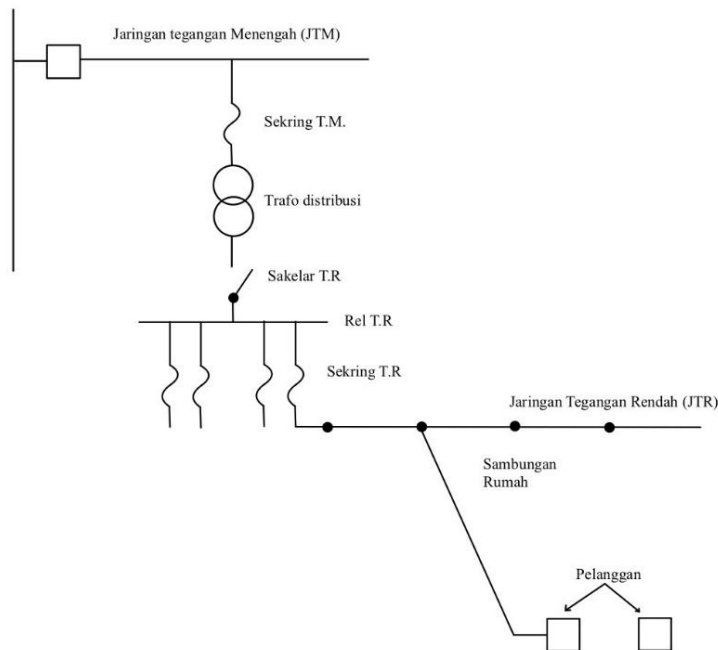
Kajian pustaka pada bagian ini membahas teori-teori yang relevan dan perkembangan penelitian terdahulu yang mendasari studi ini. Peninjauan literatur dilakukan untuk memahami konsep aliran daya dalam sistem tenaga listrik, prinsip optimasi aliran daya reaktif, serta metode optimasi yang digunakan, yaitu *PSO* dan *GA*. Selain itu, disajikan pula studi-studi terdahulu yang terkait, guna mengidentifikasi kesenjangan penelitian yang akan dijawab dalam penelitian ini.

### 1.4.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan infrastruktur kompleks yang esensial dalam kehidupan modern, menyediakan pasokan energi yang stabil dan andal. Secara sederhana, sistem ini terdiri dari beberapa komponen utama yang saling terhubung dan bekerja sama untuk menghasilkan, menyalurkan, dan mendistribusikan listrik kepada konsumen. Komponen-komponen tersebut meliputi sistem pembangkit, sistem transmisi dan gardu induk, sistem distribusi, serta sistem sambungan pelayanan. Keterkaitan antar sistem ini membentuk suatu kesatuan yang utuh dalam penyediaan tenaga listrik.

Sistem distribusi adalah bagian krusial dari sistem tenaga listrik yang bertanggung jawab mendistribusikan energi listrik dari gardu induk atau pusat pembangkit ke konsumen akhir. Sistem ini terbagi menjadi dua kategori utama berdasarkan tingkat tegangannya:

1. Sistem Distribusi Tegangan Menengah (TM): Sistem ini beroperasi pada tegangan kerja di atas 1 kV hingga setinggi-tingginya 35 kV.
2. Sistem Distribusi Tegangan Rendah (TR): Sistem ini beroperasi pada tegangan kerja hingga setinggi-tingginya 1 kV.



Gambar 2 Jaringan Distribusi Tegangan Menengah (JTM), Jaringan Tegangan Rendah (JTR), dan Sambungan Rumah ke pelanggan

(Buku I PLN Kriteria Desain Jaringan Distribusi, 2010)

Gambar 2 memperlihatkan jaringan distribusi tegangan menengah dan jaringan tegangan rendah. Jaringan distribusi Tegangan Menengah (TM) umumnya berawal dari Gardu Induk atau Pusat Listrik, terutama pada sistem terpisah (isolated). Bentuk jaringan TM dapat berupa radial atau tertutup (radial open loop). Sementara itu, jaringan distribusi Tegangan Rendah (TR) umumnya berbentuk radial murni. Sambungan Pelayanan merupakan bagian paling hilir dari sistem distribusi, tempat Alat Pembatas dan Pengukur (APP) terpasang untuk menyalurkan tenaga listrik kepada pemanfaat.

Konstruksi dari keempat sistem ini (pembangkit, transmisi, distribusi, dan sambungan pelayanan) dapat berupa Saluran Udara (SUTM/SUTR) atau Saluran Bawah Tanah (SKTM/SKTR). Pemilihan jenis konstruksi disesuaikan dengan berbagai faktor, termasuk kebijakan manajemen, kebutuhan kontinuitas pelayanan, jenis pelanggan, permintaan khusus, dan pertimbangan biaya investasi.

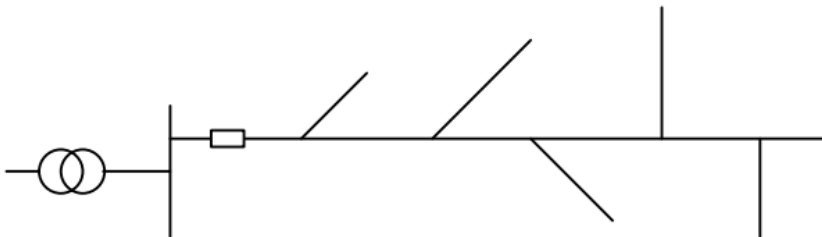
#### 1.4.2 Konfigurasi Sistem Distribusi

Secara umum, konfigurasi suatu jaringan tenaga listrik memiliki dua konsep dasar yaitu:

1. Jaringan Radial: Jaringan ini hanya memiliki satu pasokan tenaga listrik. Jika terjadi gangguan, akan terjadi pemadaman (black-out) pada bagian yang tidak dapat dipasok.
2. Jaringan Bentuk Tertutup (Loop): Jaringan ini memiliki alternatif pasokan tenaga listrik jika terjadi gangguan, sehingga area yang mengalami pemadaman dapat dikurangi atau bahkan dihindari.

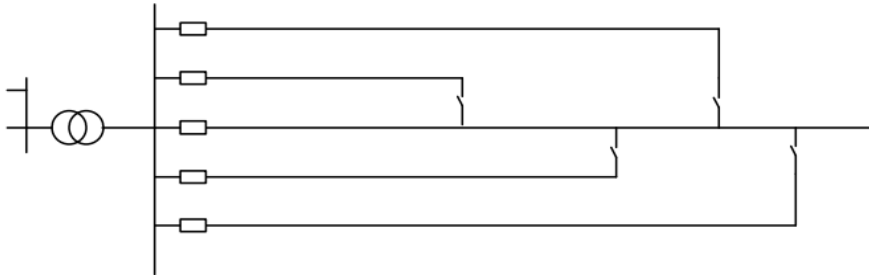
Berdasarkan kedua pola dasar tersebut, terdapat beberapa konfigurasi jaringan yang umum digunakan, disesuaikan dengan tujuan perencanaannya:

- a. Konfigurasi Tulang Ikan (Fish-Bone): Ini adalah tipikal konfigurasi saluran udara Tegangan Menengah yang beroperasi secara radial. Untuk mengurangi luas area pemadaman, bagian yang terkena gangguan diisolasi menggunakan pemisah seperti Pole Top Switch (PTS) atau Air Break Switch (ABS) dengan koordinasi relai atau sistem SCADA. Pemutus balik otomatis (PBO) atau Automatic Recloser dipasang pada saluran utama, dan saklar seksi otomatis (SSO) atau Automatic Sectionalizer pada pencabangan.



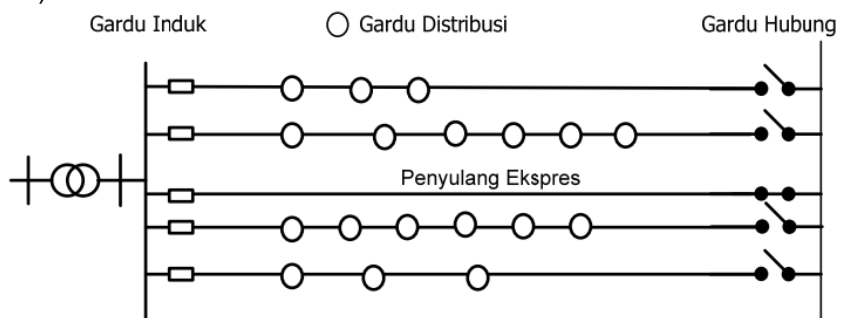
Gambar 3 Konfigurasi Tulang Ikan (*Fishbone*)  
(Buku I PLN Kriteria Desain Jaringan Distribusi, 2010)

- b. Konfigurasi Kluster (Cluster / Leap Frog): Konfigurasi saluran udara Tegangan Menengah ini sudah bertipikal sistem tertutup namun beroperasi secara radial (Radial Open Loop). Saluran bagian tengah berfungsi sebagai penyulang cadangan dengan luas penampang penghantar yang besar.



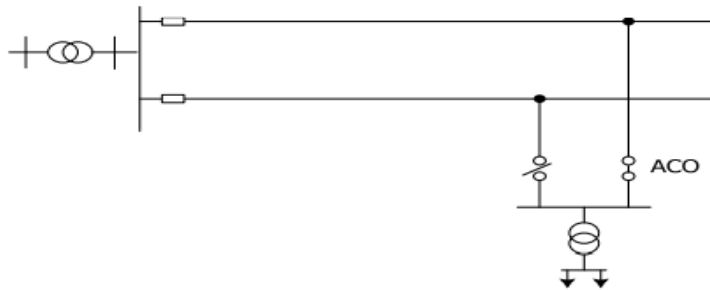
Gambar 4 Konfigurasi Kluster (*Cluster/Leap Frog*)  
(Buku I PLN Kriteria Desain Jaringan Distribusi, 2010)

- c. Konfigurasi Spindel (Spindle Configuration): Konfigurasi spindel umumnya digunakan pada saluran kabel bawah tanah. Terdapat dua jenis penyulang: penyulang cadangan (standby atau express feeder) dan penyulang operasi (working feeder). Penyulang cadangan tidak dibebani dan berfungsi sebagai back-up supply jika terjadi gangguan pada penyulang operasi. Untuk konfigurasi dua penyulang, faktor pembebanan hanya 50%. Berdasarkan konsep spindel, jumlah penyulang pada satu spindel penuh adalah enam penyulang operasi dan satu penyulang cadangan, sehingga faktor pembebanan mencapai 85%. Ujung-ujung penyulang berakhir pada gardu yang disebut Gardu Hubung, dengan kondisi penyulang operasi “NO” (*normally open*), kecuali penyulang cadangan dengan kondisi “NC” (*normally close*).



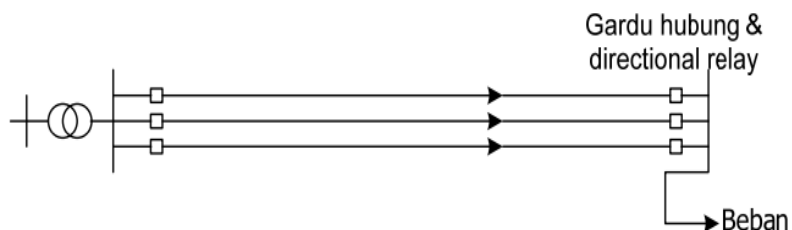
Gambar 5 Konfigurasi Spindel (*Spindel Configuration*)  
(Buku I PLN Kriteria Desain Jaringan Distribusi, 2010)

- d. Konfigurasi Fork: Konfigurasi ini memungkinkan satu Gardu Distribusi dipasok dari dua penyulang berbeda dengan selang waktu pemadaman yang sangat singkat (Short Break Time). Jika penyulang operasi mengalami gangguan, pasokan dapat dialihkan dari penyulang cadangan secara efektif dalam waktu singkat menggunakan fasilitas Automatic Change Over Switch (ACOS). Pencabangan dapat dilakukan dengan sadapan Tee-Off (TO) dari Saluran Udara atau dari Saluran Kabel tanah melalui Gardu Distribusi.



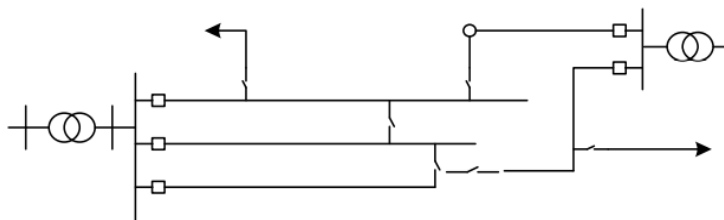
Gambar 6 Konfigurasi *Fork*  
(Buku I PLN Kriteria Desain Jaringan Distribusi,2010)

- e. Konfigurasi Spotload (Parallel Spot Configuration): Konfigurasi ini terdiri dari sejumlah penyulang yang beroperasi paralel dari sumber atau Gardu Induk dan berakhir pada Gardu Distribusi. Konfigurasi ini digunakan jika beban pelanggan melebihi kemampuan hantar arus penghantar. Salah satu penyulang berfungsi sebagai penyulang cadangan untuk mempertahankan kontinuitas penyaluran. Sistem ini harus dilengkapi dengan rele arah (Directional Relay) pada Gardu Hilir (Gardu Hubung).



Gambar 7 Konfigurasi *Spotload*  
(Buku I PLN Kriteria Desain Jaringan Distribusi,2010)

- f. Konfigurasi Jala-Jala (Grid, Mesh): Konfigurasi jala-jala memungkinkan pasokan tenaga listrik dari berbagai arah ke titik beban. Meskipun rumit dalam proses pengoperasian, konfigurasi ini umumnya digunakan di daerah padat beban tinggi dan untuk pelanggan dengan pemakaian khusus.



Gambar 8 Konfigurasi Jala-jala  
(Buku I PLN Kriteria Desain Jaringan Distribusi,2010)

- g. Konfigurasi Lain-lain: Selain model konfigurasi jaringan yang umum dikenal, terdapat beberapa model struktur jaringan alternatif yang dapat dipergunakan:
  - a. Struktur Garpu dan Bunga: Struktur ini dipakai jika pusat beban berada jauh dari pusat listrik atau Gardu Induk. Jaringan Tegangan Menengah (JTM) berfungsi sebagai pemasok, Gardu Hubung sebagai Gardu Pembagi, dan Pemutus Tenaga sebagai pengaman dengan rele proteksi gangguan fasa-fasa dan fasa-tanah pada JTM yang berawal dari Gardu Hubung.
  - b. Struktur Rantai: Struktur ini digunakan pada suatu kawasan yang luas dengan pusat-pusat beban yang berjauhan satu sama lain.

#### 1.4.3 Aliran Daya dalam Sistem Tenaga Listrik

Analisis aliran daya (*power flow analysis*) merupakan salah satu aspek fundamental dalam perencanaan dan operasi sistem tenaga listrik (Cengiz et al., 2019). Tujuan utamanya adalah untuk menentukan distribusi tegangan, arus, serta aliran daya aktif dan reaktif pada setiap elemen jaringan listrik dalam kondisi operasi tunak (*steady-state*). Informasi ini sangat penting untuk memastikan bahwa sistem beroperasi secara efisien, andal, dan dalam batas-batas teknis yang diizinkan.

Tujuan utama dari studi analisis aliran daya antara lain:

1. Mengetahui tegangan pada setiap bus dalam sistem.
2. Mengetahui daya aktif dan daya reaktif yang mengalir dalam setiap saluran dalam sistem.
3. Mengetahui kondisi semua peralatan, apakah memenuhi batas-batas yang ditentukan untuk menyalurkan daya listrik yang diinginkan.
4. Memperoleh kondisi awal untuk perencanaan sistem yang baru.
5. Memperoleh kondisi awal untuk studi-studi selanjutnya, seperti studi hubung singkat, stabilitas, dan pembebanan ekonomis.

Dalam konteks sistem tenaga listrik, aliran daya aktif ( $P$ ) berkaitan dengan energi yang dikonsumsi oleh beban untuk melakukan kerja nyata, sementara aliran daya reaktif ( $Q$ ) berhubungan dengan energi yang disimpan dan dilepaskan oleh elemen-elemen reaktif seperti induktor dan kapasitor. Meskipun daya reaktif tidak melakukan kerja nyata, keberadaannya sangat penting untuk mempertahankan profil tegangan yang stabil di seluruh sistem. Ketidakseimbangan atau distribusi daya reaktif yang tidak optimal dapat menyebabkan penurunan tegangan (*voltage drop*), peningkatan rugi-rugi daya, serta gangguan terhadap kestabilan sistem secara keseluruhan (Elkholy et al., 2024).

Metode perhitungan aliran daya tradisional, seperti metode Newton-Raphson dan Gauss-Seidel, telah lama digunakan dalam analisis sistem tenaga. Namun, dengan meningkatnya kompleksitas sistem modern, termasuk integrasi sumber energi terbarukan dan beban non-linear, metode-metode ini menghadapi tantangan dalam hal konvergensi dan akurasi. Sebagai respons terhadap tantangan ini, pendekatan berbasis data dan algoritma cerdas telah dikembangkan. Sebagai contoh, studi terbaru oleh (Hu et al., 2024) mengusulkan model analisis aliran daya berbasis jaringan perhatian graf (*Edge Graph Attention Network*) yang menunjukkan

adaptabilitas tinggi dan performa lebih baik dalam menangani dinamika sistem tenaga modern.

Selain itu, dalam sistem distribusi aktif yang semakin kompleks, strategi kontrol *volt/var* berbasis data telah diperkenalkan untuk mengoptimalkan aliran daya reaktif dan profil tegangan. Pendekatan ini menggunakan model pembelajaran mesin seperti CatBoost untuk memetakan hubungan non-linear antara kondisi sistem dan hasil aliran daya, memungkinkan optimasi yang lebih akurat meskipun terdapat ketidakpastian dalam parameter jaringan (Rui-Ming et al., 2025).

#### 1.4.4 Konsep Perhitungan Aliran Daya

Dalam perhitungan aliran daya, sistem dioperasikan dalam kondisi tunak dan seimbang. Setiap bus pada sistem tenaga listrik memiliki empat besaran: daya aktif ( $P$ ), daya reaktif ( $Q$ ), besar tegangan ( $|V|$ ), dan sudut fasa tegangan ( $\delta$ ). Dalam studi aliran daya, dua dari empat besaran ini diketahui, dan dua lainnya perlu dicari. Berdasarkan hal ini, bus-bus dibedakan menjadi tiga jenis:

1. Bus Beban (Bus P-Q): Bus ini terhubung langsung ke beban. Pada bus ini, daya aktif ( $P$ ) dan daya reaktif ( $Q$ ) diketahui nilainya, sedangkan besar tegangan ( $|V|$ ), dan sudut fasa tegangan ( $\delta$ ) harus dicari. Daya aktif diukur dalam Watt (W), dan daya reaktif dalam Volt Ampere Reaktif (VAR).
2. Bus Generator (Bus P- $|V|$ ): Bus ini terhubung dengan generator yang daya aktif ( $P$ ) dan tegangannya ( $|V|$ ) dapat dikontrol dan biasanya dijaga konstan. Pengaturan daya aktif dilakukan dengan mengontrol penggerak mula (prime mover), sedangkan pengaturan tegangan dengan mengontrol arus eksitasi pada generator. Pada bus ini, daya reaktif ( $Q$ ) dan sudut fasa tegangan ( $\delta$ ) harus dicari.
3. Bus Referensi (Slack Bus): Bus ini memiliki kapasitas daya terbesar. Pada bus ini, hanya nilai tegangan ( $|V|$ ) dan sudut fasa tegangan ( $\delta$ ) yang dapat diatur, sedangkan daya aktif ( $P$ ) dan daya reaktif ( $Q$ ) akan dicari dalam perhitungan.

Dalam pemrograman, tipe bus diidentifikasi dengan kode angka: bus referensi (1), bus generator (2), dan bus beban (3). Ringkasan tipe bus dan nilai yang diketahui/dihitung disajikan dalam tabel di bawah.

Tabel 1 Tipe Bus dalam Sistem Tenaga Listrik.

(Buku I PLN Kriteria Desain Jaringan Distribusi, 2010)

| Tipe Bus      | Kode Bus | Nilai yang diketahui | Nilai yang dihitung |
|---------------|----------|----------------------|---------------------|
| Bus Beban     | 3        | $P, Q$               | $ V , \delta$       |
| Bus Generator | 2        | $P,  V $             | $Q, \delta$         |
| Bus Referensi | 1        | $ V , \delta$        | $P, Q$              |

#### 1.4.5 Optimasi Aliran Daya Reaktif

Optimasi aliran daya reaktif (*reactive power flow optimization*) merupakan langkah penting dalam meningkatkan efisiensi dan stabilitas sistem tenaga listrik.

Tujuan utama dari optimasi ini adalah meminimalkan rugi-rugi daya (*losses*), menjaga profil tegangan pada setiap bus dalam batas yang dapat diterima, serta mengoptimalkan penggunaan sumber daya reaktif seperti kapasitor, reaktor, dan kendali tegangan generator (AlRashidi and El-Hawary, 2009). Pengelolaan daya reaktif yang efektif memungkinkan peningkatan efisiensi jaringan, penurunan biaya operasi, serta pengurangan emisi karbon akibat konsumsi bahan bakar pada pembangkit termal.

Secara teknis, optimasi aliran daya reaktif diklasifikasikan sebagai masalah optimasi nonlinier dengan banyak variabel dan batasan, baik linier maupun nonlinier. Variabel yang biasa dikendalikan dalam proses ini mencakup tegangan pada terminal generator, posisi tap transformator, serta injeksi daya reaktif dari kompensator statis (D-STATCOM atau SVC) (Abdel-Basset et al., 2024). Kompleksitas optimasi meningkat seiring dengan pertumbuhan sistem tenaga modern, terutama karena penetrasi tinggi energi terbarukan yang bersifat intermiten dan variatif terhadap waktu.

Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk menyelesaikan masalah ini, mulai dari metode deterministik seperti pemrograman linier, kuadrat, dan non-linier, hingga metode berbasis kecerdasan buatan (Artificial Intelligence/AI). Dalam dekade terakhir, algoritma metaheuristik seperti Particle Swarm Optimization (PSO), Genetic Algorithm (GA), Ant Colony Optimization (ACO), dan Differential Evolution (DE) telah banyak digunakan karena keunggulannya dalam mencari solusi optimal global tanpa memerlukan informasi turunan fungsi obyektif (Zhao, Guo and Cao, 2005; Ngoc, Nguyen and Kien, 2015).

Salah satu keunggulan metode PSO adalah kemampuannya dalam menghindari jebakan solusi lokal dan kecepatan konvergensi yang relatif tinggi, menjadikannya populer dalam aplikasi optimasi sistem tenaga listrik (Subhani, Babu and Reddy, 2012). Di sisi lain, Genetic Algorithm dikenal memiliki fleksibilitas tinggi dalam menangani berbagai jenis variabel keputusan dan batasan sistem, serta ketahanan terhadap perubahan parameter sistem (S.N. Sivanandam and S.N. Deepa, 2008).

Penggabungan kedua metode ini, atau penggunaan *hybrid approach*, menjadi alternatif menjanjikan untuk menggabungkan kelebihan PSO dalam eksplorasi ruang solusi dan keunggulan GA dalam eksploitasi solusi terbaik. Studi terbaru juga menunjukkan bahwa pendekatan hibrida tersebut mampu memberikan hasil yang lebih baik dalam hal efisiensi dan waktu komputasi dibandingkan metode tunggal (Abdel-Basset et al., 2024).

#### 1.4.6 D-STATCOM

D-STATCOM, adalah perangkat kompensator daya reaktif yang terhubung secara *shunt* dalam sistem distribusi tenaga listrik (Sirjani & Jordehi, 2017). Perangkat ini memainkan peran krusial dalam meningkatkan kualitas daya dan stabilitas tegangan pada jaringan distribusi modern. D-STATCOM merupakan salah satu jenis perangkat FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) yang dirancang khusus untuk aplikasi di tingkat distribusi.

Fungsi utama D-STATCOM adalah untuk mengelola dan mengkompensasi daya reaktif secara dinamis, yang pada gilirannya membantu dalam pengaturan tegangan yang lebih baik. Dengan kemampuan untuk menghasilkan atau menyerap daya reaktif, D-STATCOM dapat menjaga profil tegangan pada titik sambungan umum (PCC) agar tetap stabil, terutama saat terjadi fluktuasi beban atau gangguan pada sistem. Selain pengaturan tegangan, D-STATCOM juga memiliki beberapa fungsi penting lainnya:

1. Kompensasi Arus Tidak Seimbang: D-STATCOM dapat digunakan untuk menyeimbangkan arus beban yang tidak seimbang, sehingga mengurangi ketidakseimbangan fasa dalam sistem distribusi.
2. Pengurangan Harmonik: Perangkat ini efektif dalam mengurangi distorsi harmonik pada arus sumber, bahkan ketika berhadapan dengan beban non- linier. Ini berkontribusi pada peningkatan kualitas daya secara keseluruhan.
3. Peningkatan Faktor Daya: Dengan menyuplai atau menyerap daya reaktif sesuai kebutuhan, D-STATCOM membantu memperbaiki faktor daya sistem, yang mengarah pada efisiensi energi yang lebih baik dan pengurangan kerugian.

Secara umum, D-STATCOM terdiri dari tiga elemen dasar: konverter sumber tegangan (*Voltage Source Converter/VSC*), kapasitor DC, dan filter tipe reaktor.

1. Konverter Sumber Tegangan (VSC): Ini adalah inti dari D-STATCOM, yang memungkinkan aliran daya dua arah. VSC direalisasikan menggunakan perangkat semikonduktor daya seperti *Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)*. IGBT dipilih karena kemampuannya dalam switching frekuensi tinggi dan penanganan daya tinggi, menjadikannya ideal untuk aplikasi ini.
2. Kapasitor DC: Kapasitor ini berfungsi sebagai sumber tegangan DC untuk VSC dan juga sebagai penyimpan energi. Tegangan pada kapasitor DC harus dijaga konstan untuk memastikan operasi VSC yang optimal.
3. Filter Tipe Reaktor: Filter ini digunakan untuk mengurangi harmonik yang dihasilkan oleh proses switching VSC dan untuk memastikan injeksi arus yang bersih ke sistem.

D-STATCOM dihubungkan secara paralel dengan beban pada sistem distribusi. Prinsip operasinya mirip dengan mesin sinkron, di mana ia dapat menghasilkan atau menyerap daya reaktif. D-STATCOM juga dapat menukarkan daya aktif jika dilengkapi dengan sumber DC eksternal, seperti sistem penyimpanan energi baterai. Penukaran daya reaktif pada D-STATCOM terjadi berdasarkan perbandingan antara tegangan output VSC dan tegangan sistem:

- Jika tegangan output VSC lebih besar dari tegangan sistem, D-STATCOM akan menyuplai daya reaktif ke sistem.
- Jika tegangan output VSC lebih rendah dari tegangan sistem, D-STATCOM akan menyerap daya reaktif dari sistem.
- Jika tegangan sistem lebih rendah dari nilai referensi, D-STATCOM akan menyuplai daya reaktif ke sistem untuk menaikkan tegangan. Sebaliknya, jika tegangan sistem terlalu tinggi, D-STATCOM akan menyerap daya reaktif untuk menurunkan tegangan.

D-STATCOM bekerja seperti *Voltage Source Converter* (VSC) yang dihubungkan ke sistem melalui reaktor induktif (L), setelah D-STATCOM dipasang pada bus tertentu  $k$ , tegangan bus dapat ditulis sebagai (Padiyar, 2007):

$$V'_k = V_k + \frac{jQ_{inj,k}}{V_k^* Y_{kk}} \quad (1)$$

Keterangan:

- $V'_k$  = tegangan baru setelah injeksi daya reaktif
- $Q_{inj,k}$  = daya reaktif yang disuntikkan oleh D-STATCOM pada bus ke- $k$
- $Y_{kk}$  = elemen diagonal matriks admitansi bus
- $V_k^*$  = konjugat kompleks dari tegangan bus

Dalam optimasi berbasis GA, PSO, atau HGAPSO, lokasi dan kapasitas D-STATCOM ditentukan dengan minimal fungsi objektif gabungan:

$$\min F = w_1 P_{loss} + w_2 \sum_{i=1}^N |V_i - 1.0| + w_3 VSI + w_4 (Q_{rated} - Q_{needed})^2 \quad (2)$$

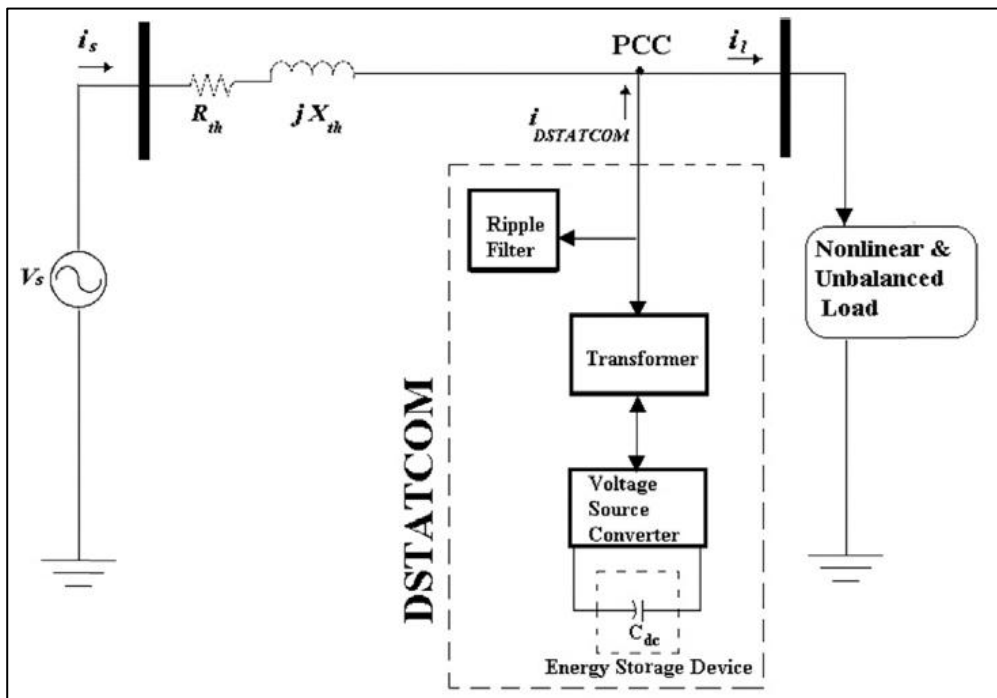
Keterangan:

- $P_{loss}$ : total rugi daya aktif setelah pemasangan D-STATCOM,
- $V_i$ : tegangan masing-masing bus,
- $VSI$ : indeks kestabilan tegangan,
- $Q_{rated}$ : kapasitas D-STATCOM yang dipasang,
- $Q_{needed}$ : kapasitas yang dibutuhkan berdasarkan hasil analisis,
- $w_1, w_2, w_3, w_4$ : bobot fungsi objektif.

Berbagai penelitian telah menunjukkan keunggulan D-STATCOM dalam mengatasi masalah kualitas daya di sistem distribusi:

- Pengurangan Harmonik dan Koreksi Faktor Daya: Studi simulasi menunjukkan bahwa penggunaan D-STATCOM efektif dalam mengatasi arus harmonik dan mengoreksi faktor daya pada jaringan distribusi dengan beban non-linier.
- Peningkatan Kualitas Tegangan: D-STATCOM terbukti mampu mengatasi berbagai masalah tegangan, termasuk penurunan tegangan (*sags*), gangguan tegangan (*interruptions*), dan kenaikan tegangan (*swells*). Misalnya, satu penelitian melaporkan bahwa D-STATCOM dapat mengatasi penurunan tegangan sebesar 13%, gangguan tegangan sebesar 25%, dan kenaikan tegangan sebesar 11%.

D-STATCOM dapat diaplikasikan baik pada jaringan (*grid*) maupun untuk aplikasi spesifik dalam sistem distribusi, menjadikannya solusi yang fleksibel untuk berbagai tantangan kualitas daya.



Gambar 9 Konfigurasi D-STATCOM dalam jaringan distribusi

(Sirjani & Jordehi, 2017)

#### 1.4.7 Particle Swarm Optimization (PSO)

PSO adalah salah satu algoritma metaheuristik yang terinspirasi dari perilaku sosial kawanan burung atau gerombolan ikan dalam mencari makanan (Kennedy and Eberhart, 1995). Dalam konteks optimasi, PSO menggunakan sejumlah partikel (solusi kandidat) yang bergerak dalam ruang pencarian untuk menemukan solusi terbaik. Setiap partikel memperbarui posisi dan kecepatannya berdasarkan pengalaman terbaiknya sendiri dan partikel lainnya, sehingga secara bertahap mendekati solusi optimal global.

PSO dikenal luas karena kemampuannya yang tinggi dalam eksplorasi ruang solusi, kemudahan implementasi, dan efisiensi komputasi, terutama dalam menyelesaikan masalah optimasi nonlinier dengan banyak variabel seperti pada sistem tenaga listrik (Cai, Ren and Yu, 2007; Zhang, Wang and Ji, 2015). Dalam analisis aliran daya reaktif, PSO digunakan untuk mengoptimalkan variabel-variabel seperti tegangan terminal generator, posisi tap transformator, dan nilai injeksi daya reaktif guna meminimalkan rugi-rugi daya dan menjaga stabilitas tegangan pada setiap bus (Ben Oualid Medani and Sayah, 2016).

Keunggulan utama PSO meliputi:

1. Konvergensi cepat ke arah solusi optimal,

2. Robust terhadap perubahan parameter sistem,
3. Tidak memerlukan informasi turunan fungsi obyektif, sehingga cocok untuk sistem dengan karakteristik kompleks dan non-diferensiabel.

Dalam penelitian terbaru yang dilakukan oleh (Utamidewi, Gunadin and Syafaruddin, 2023), pendekatan *multi-objective optimization* diterapkan untuk mengoptimalkan sistem pembangkit hibrida yang terdiri dari panel surya, baterai, dan generator di wilayah off-grid. Studi ini menunjukkan bahwa penggunaan kombinasi algoritma cerdas dapat meningkatkan efisiensi operasional sistem tenaga, terutama dalam kondisi dengan keterbatasan sumber daya dan variabilitas beban. Pendekatan serupa dalam konteks optimasi aliran daya reaktif menunjukkan potensi signifikan dalam menggabungkan keunggulan masing-masing algoritma untuk mencapai solusi optimal yang lebih stabil dan akurat.

PSO mengupdate kecepatan dan posisi setiap partikel pada iterasi  $t$  dengan persamaan: (Kennedy & Eberhart, 1995)

$$\begin{aligned} v_i^{t+1} &= w v_i^t + c_1 r_1 (pbest_i - x_i^t) + c_2 r_2 (gbest - x_i^t) \\ x_i^{t+1} &= x_i^t + v_i^{t+1} \end{aligned} \quad (3)$$

Keterangan:

- $x_i^t$ : posisi (solusi) partikel ke- $i$  pada iterasi  $t$ .
- $v_i^t$ : kecepatan partikel ke- $i$  pada iterasi  $t$ .
- $pbest_i$ : posisi terbaik yang pernah dicapai partikel  $i$ .
- $gbest$ : posisi terbaik di seluruh populasi (global best).
- $w$ : inertia weight (mengontrol eksploitasi vs eksplorasi).
- $c_1, c_2$ : koefisien pembelajaran kognitif dan sosial (biasanya 1.0–2.5).
- $r_1, r_2$ : bilangan acak uniform di  $[0,1]$ .

Varian yang sering dipakai: TVAC (*Time-Varying Acceleration Coefficients*) dan penurunan  $w$  linear dari  $w_{max}$  ke  $w_{min}$  untuk memperbaiki konvergensi.

#### 1.4.8 Genetic Algorithm (GA)

GA merupakan salah satu algoritma pencarian dan optimasi berbasis populasi yang terinspirasi dari prinsip-prinsip seleksi alam dan genetika dalam biologi evolusioner (Holland, 1992). Dalam GA, populasi awal yang terdiri dari sejumlah individu (solusi kandidat) akan mengalami proses seleksi, *crossover*, dan mutasi secara berulang untuk menghasilkan generasi baru yang lebih baik. Proses ini terus berlangsung hingga diperoleh solusi yang mendekati optimal.

GA terbukti efektif dalam menangani permasalahan optimasi nonlinier dan multivariat yang kompleks, seperti pada sistem tenaga listrik, di mana banyak variabel kendali dan batasan sistem yang saling berkaitan. Dalam konteks optimasi aliran daya reaktif, GA digunakan untuk menentukan konfigurasi optimal dari tegangan bus, posisi tap transformator, serta kapasitor, sehingga rugi-rugi daya dapat diminimalkan dan stabilitas tegangan tetap terjaga (Sivanandam & Deepa, 2008).

Keunggulan utama GA dalam sistem tenaga listrik meliputi:

1. Kemampuan menjelajahi ruang solusi secara luas (*global search*),
2. Fleksibilitas dalam menangani variabel diskrit dan kontinu,
3. Tidak memerlukan informasi turunan atau karakteristik khusus dari fungsi obyektif.

Dalam studi oleh (Masamvu, Dzobo and Sun, 2023), GA diterapkan untuk menyelesaikan permasalahan optimasi daya reaktif pada sistem distribusi dengan penetrasi tinggi energi terbarukan. Hasilnya menunjukkan bahwa GA mampu memberikan solusi yang kompetitif dalam hal minimisasi rugi-rugi daya dan peningkatan efisiensi jaringan. Penerapan GA juga memungkinkan sistem tenaga lebih adaptif terhadap fluktuasi daya dari sumber intermiten seperti panel surya dan turbin angin.

Lebih lanjut, kombinasi GA dengan algoritma lain seperti PSO telah menjadi pendekatan yang menjanjikan untuk mempercepat konvergensi dan meningkatkan kualitas solusi dalam aplikasi optimasi sistem tenaga (Utamidewi, Gunadin and Syafaruddin, 2023).

Dalam *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, proses GA dapat dinyatakan secara matematis di mana  $f_i$  adalah fungsi objektif dari individu ke- $i$ . Untuk permasalahan minimisasi rugi-rugi daya, fungsi objektif dirumuskan sebagai (Sivanandam & Deepa, 2008):

$$f = w_1 P_{loss} + w_2 \sum_{i=1}^N |V_i - 1.0| + w_3 C_{inv} \quad (4)$$

Keterangan:

- $f$  = fungsi objektif yang ingin diminimasi
- $P_{loss}$  = total rugi daya aktif (kW),
- $V_i$  = tegangan bus ke- $i$  (p.u.),
- $C_{inv}$  = biaya investasi kompensasi daya reaktif,
- $w_1, w_2, w_3$  = bobot prioritas dari masing-masing parameter.

#### 1.4.9 Hybrid Approach GA-PSO

Pendekatan HGAPSO merupakan salah satu strategi yang berkembang pesat dalam bidang optimasi sistem tenaga listrik, khususnya dalam menyelesaikan permasalahan kompleks seperti optimasi aliran daya reaktif. Pendekatan ini bertujuan menggabungkan keunggulan masing-masing algoritma: PSO yang unggul dalam eksplorasi ruang solusi dengan kecepatan konvergensi tinggi, serta GA yang efektif dalam eksploitasi solusi dan ketahanan terhadap jebakan solusi lokal (Utamidewi, Gunadin and Syafaruddin, 2023).

PSO cenderung cepat dalam menemukan solusi yang mendekati optimal pada tahap awal iterasi, namun rentan terhadap konvergensi prematur. Di sisi lain, GA memiliki mekanisme seleksi, *crossover*, dan mutasi yang dapat mempertahankan

keragaman populasi serta mengeksplorasi ruang solusi secara lebih luas. Kombinasi keduanya menghasilkan algoritma yang lebih seimbang dalam mengeksplorasi dan mengeksploitasi ruang pencarian, sehingga dapat meningkatkan kualitas solusi dan mengurangi waktu komputasi (Vasant, Ganesan and Elamvazuthi, 2012).

Dalam implementasinya, pendekatan HGAPSO dapat dilakukan melalui berbagai skema, seperti:

1. Integrasi iteratif, dimana solusi dari satu algoritma digunakan sebagai inisialisasi algoritma lain;
2. Koordinasi paralel, yang menjalankan PSO dan GA secara simultan lalu menggabungkan solusi terbaik dari keduanya;
3. Model adaptif, yang secara dinamis menyesuaikan kontribusi masing-masing algoritma berdasarkan performa saat iterasi berlangsung.

Penelitian oleh (Utamidewi, Gunadin and Syafaruddin, 2023) pada sistem pembangkit hibrida *off-grid* menunjukkan bahwa pendekatan *multi-objective* hibrid GA-PSO mampu mengoptimalkan pengaturan daya dari panel surya, baterai, dan generator dengan hasil yang lebih efisien dan andal dibanding metode tunggal. Studi tersebut memberikan justifikasi kuat bahwa pendekatan hibrida juga berpotensi besar untuk diterapkan dalam optimasi aliran daya reaktif pada sistem distribusi modern yang kompleks dan dinamis.

Pendekatan HGAPSO menggabungkan mekanisme pembaruan posisi partikel pada PSO dengan operator Genetika pada GA, sehingga setiap solusi  $x_i$  diperbarui melalui kombinasi linear berbobot antara hasil eksplorasi PSO dan hasil eksploitasi GA yang secara matematis dinyatakan sebagai (Ali & Kim, 2020):

$$x_i^{(t+1)} = \lambda[x_i^{(t)} + wv_i^{(t)} + c_1r_1(pbest_i - x_i^{(t)}) + c_2r_2(gbest - x_i^{(t)})] + (1 - \lambda)[\alpha x_{p1} + (1 - \alpha)x_{p2} + \beta(x_{best} - x_i) + \gamma(x_{rand} - x_i)] \quad (5)$$

Keterangan :

- $x_i^{(t)}$ : posisi solusi partikel saat ini.
- $v_i^{(t)}$ : kecepatan partikel (arah pergerakan).
- $pbest_i$ : posisi terbaik individu.
- $gbest$ : posisi terbaik seluruh populasi.
- $w$ : inertia weight (mengontrol pergerakan partikel).
- $c_1, c_2$ : koefisien pembelajaran (kognitif & sosial).
- $r_1, r_2$ : angka acak untuk memberi efek stokastik.
- $\lambda$ : bobot dominasi PSO (0–1).
- $\alpha x_{p1} + (1 - \alpha)x_{p2}$ : operator *crossover* GA.
- $\beta(x_{best} - x_i)$ : mutasi terarah menuju solusi terbaik.
- $\gamma(x_{rand} - x_i)$ : mutasi acak untuk menjaga diversitas.

Pendekatan ini memungkinkan eksplorasi global cepat (melalui PSO) dan eksploitasi solusi lokal yang presisi (melalui GA) sehingga menghasilkan konvergensi yang stabil, efisien, dan tidak mudah terjebak pada solusi lokal.

Dengan demikian, pendekatan GA-PSO tidak hanya memperluas kemungkinan pencapaian solusi optimal dalam sistem tenaga, tetapi juga memperkuat adaptabilitas algoritma terhadap kondisi sistem yang berubah-ubah, seperti fluktuasi beban atau integrasi energi terbarukan.

#### 1.4.10 Evaluasi Investasi

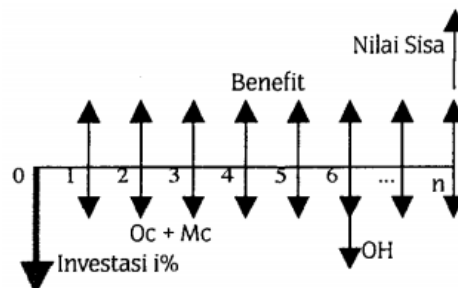
Kegiatan investasi merupakan kegiatan penting yang memerlukan biaya besar dan berdampak jangka panjang terhadap kelanjutan usaha. Oleh karena itu, analisis yang sistematis dan rasional sangat dibutuhkan sebelum kegiatan itu direalisasikan. Pertanyaan yang paling penting diajukan sebelum keputusan diambil adalah sebagai berikut:

1. Apakah investasi tersebut akan memberikan manfaat ekonomis terhadap perusahaan?
2. Apakah investasi yang dimaksud sudah merupakan pilihan yang optimal dari berbagai kemungkinan yang ada?

Untuk menjawab pertanyaan pertama diperlukan analisis evaluasi investasi yang bisa menjelaskan apakah kegiatan investasi tersebut akan menjanjikan suatu keuntungan (*profit*) dalam jangka panjang atau tidak. Sementara itu, untuk menjelaskan apakah pilihan yang akan diambil sudah merupakan pilihan yang terbaik dari alternatif yang tersedia, perlu dilakukan analisis pemilihan alternatif.

Suatu investasi merupakan kegiatan menanamkan modal jangka panjang, di mana selain investasi tersebut perlu pula disadari dari awal bahwa investasi akan diikuti oleh sejumlah pengeluaran lain yang secara periodik perlu disiapkan. Pengeluaran tersebut terdiri dari biaya operasional (*operation cost*), biaya perawatan (*maintenance cost*), dan biaya-biaya lainnya yang tidak dapat dihindarkan. Di samping pengeluaran, investasi akan menghasilkan sejumlah keuntungan atau manfaat, mungkin dalam bentuk penjualan-penjualan produk benda atau jasa atau penyewaan fasilitas.

Secara umum kegiatan investasi akan menghasilkan komponen cash flow seperti Gambar 10 berikut:



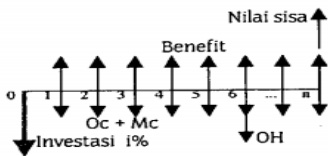
Gambar 10 Cash Flow Investasi  
(Giatman, 2006)

Berbagai metode dalam mengevaluasi kelayakan investasi dan yang umum dipakai di PLN adalah:

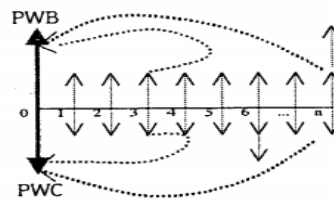
a. Metode *Net Present Value* (NPV)

NPV adalah metode menghitung nilai bersih (*netto*) pada waktu sekarang (*present*). Asumsi *Present* yaitu menjelaskan waktu awal perhitungan bertepatan dengan saat evaluasi dilakukan atau pada periode tahun ke-nol (0) dalam perhitungan *cash flow* investasi (lihat Gambar 11a dan 11b).

(a) Kondisi Awal



(b) Kondisi Present



Gambar 11 Perhitungan NPV (Giatman, 2006)

Dengan demikian, metode NPV pada dasarnya memindahkan *cash flow* yang menyebar sepanjang umur investasi ke waktu awal investasi ( $t=0$ ) atau kondisi *present*. Untuk mendapatkan nilai NPV, dapat menggunakan aplikasi excel sederhana atau menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Net Present Value (NPV)} = -C_0 + \sum_{t=0}^n \frac{A_t}{(1+r)^n} \quad (6)$$

Dimana:

- $n$  = Periode yang terakhir dimana *Cash Flow* diharapkan
- $r$  = *Discount Rate* yang digunakan
- $A_t$  = *Cash Flow* pada Periode  $t$
- $C_0$  = Investasi Awal

Untuk mengetahui apakah rencana suatu investasi tersebut layak ekonomis atau tidak, diperlukan suatu ukuran/kriteria tertentu dalam metode NPV yaitu:

Jika:

NPV > 0 artinya investasi akan menguntungkan/layak (*feasible*)

NPV < 0 artinya investasi tidak menguntungkan/tidak layak (*unfeasible*)

Jika rencana investasi tersebut dinyatakan layak, maka direkomendasikan untuk dilaksanakan investasi itu, namun jika ternyata tidak layak, maka rencana tersebut tidak direkomendasikan untuk dilanjutkan. Namun, layak atau tidaknya suatu rencana investasi belumlah keputusan akhir dari suatu program investasi, sering kali pertimbangan-pertimbangan tertentu ikut pula memengaruhi keputusan yang akan diambil.

b. Metode *Benefit Cost Ratio* (BCR)

BCR adalah salah satu metode yang sering digunakan dalam tahap-tahap evaluasi awal perencanaan investasi atau sebagai analisis tambahan dalam rangka memvalidasi hasil evaluasi yang telah dilakukan dengan metode lainnya. Di samping itu, metode ini sangat baik dilakukan dalam rangka mengevaluasi proyek-proyek pemerintah yang berdampak langsung pada masyarakat banyak (*Public government project*), dampak yang dimaksud baik yang bersifat positif maupun yang negatif. Metode BCR ini memberikan penekanan terhadap nilai perbandingan antara aspek manfaat (*benefit*) yang akan diperoleh dengan aspek biaya dan kerugian yang akan ditanggung (*cost*) dengan adanya investasi tersebut.

Aspek *benefit* dan *cost* dalam proyek-proyek pemerintah mempunyai pengertian yang lebih luas daripada pengertian biasa, di mana *benefit* dan *cost* itu sendiri sering kali ditemukan dalam bentuk manfaat maupun biaya tidak langsung yang diperoleh pemerintah atau masyarakat. Contohnya investasi terhadap pembukaan jalan baru, pembangunan pasal terminal, pelabuhan, bendungan, waduk, pertamanan, kompleks wisata, rumah sakit, rumah ibadah, sekolah, dan sebagainya. Sebagai contoh, pembangunan jalan baru yang melalui suatu daerah tertentu, *benefit* langsungnya pada masyarakat tentu tidak hanya efisiensi perjalanan, tetapi juga akan menghasilkan manfaat turutan lain seperti peningkatan produktivitas lahan di sekitar jalan tersebut, peningkatan pertumbuhan ekonomi masyarakat, dan sebagainya. Begitu pula dengan biaya yang timbul akibat dibangunnya jalan tersebut juga bukan hanya biaya langsung seperti investasi yang dikeluarkan untuk membangun fisik jalan, tetapi akan muncul pula biaya lain yang harus dikeluarkan masyarakat yang disebut dengan *disbenefit*, yaitu dampak negatif dari investasi seperti biaya terhadap dampak perubahan lingkungan, meningkatnya kecelakaan, menurunnya keamanan dan kenyamanan masyarakat sekitar, intrusi nilai-nilai budaya sosial yang tidak menguntungkan, dan sebagainya.

Rumus Umum BCR adalah:

$$BCR = \frac{Benefit}{Cost} \quad \text{atau} \quad \frac{\Sigma Benefit}{\Sigma Cost} \quad (7)$$

Untuk mengetahui apakah suatu rencana investasi layak ekonomis atau tidak setelah melalui metode ini adalah:

Jika:

$BCR > 1 \rightarrow$  investasi layak (*feasible*)

$BCR < 1 \rightarrow$  investasi tidak layak (*unfeasible*)

c. Metode *Payback Period* (PBP)

*Analisis Payback Period* pada dasarnya bertujuan untuk mengetahui seberapa lama (periode) investasi akan dapat dikembalikan saat terjadinya kondisi pulang pokok (*break even-point*). Lamanya periode pengembalian ( $k$ ) saat kondisi BEP adalah (Giatman, 2006):

$$k(PBP) = \sum_{t=0}^k CF_t \geq 0 \quad (8)$$

Dimana:

$k$  = Periode Pengembalian  
 $CF_t$  = Cash Flow Periode ke  $t$

Jika komponen *cash flow benefit* dan *cost*-nya bersifat *annual*, maka formulanya menjadi:

$$k(PBP) = \frac{\text{Investasi}}{\text{Annual Benefit}} \times \text{periode waktu} \quad (9)$$

Untuk mengetahui apakah rencana suatu investasi tersebut layak ekonomis atau tidak, diperlukan suatu ukuran/kriteria tertentu. Dalam metode *Payback Period* ini rencana investasi dikatakan layak (*feasible*):

Jika:

$k < n$  dan sebaliknya.  
 $k$  = jumlah periode pengembalian.  
 $n$  = umur investasi.

d. Metode *Internal Rate of Return* (IRR)

Berbeda dengan metode sebelumnya, di mana umumnya dicari nilai ekuivalensi *cash flow* dengan mempergunakan suku bunga sebagai faktor penentu utamanya, maka pada metode *Internal Rate of Return* (IRR) ini justru yang akan dicari adalah suku bunganya di saat NPV sama dengan nol. Rumus yang digunakan dalam menghitung IRR adalah sebagai berikut:

$$\sum_{t=0}^n \frac{At}{(1+r)^t} = 0 \quad (10)$$

Dimana:

$r$  = Tingkat bunga yang akan menjadikan PV dari *proceeds* sama dengan PV dari *capital outlays*.  
 $At$  = *Cash flow* untuk periode  $t$   
 $n$  = Periode terakhir dimana *cash flow* diharapkan

Selanjutnya melakukan interpolasi sesuai persamaan (7) di bawah ini untuk 2 (dua) tingkat bunga yang dipilih secara coba-coba.

$$IRR = i_1 + \frac{NPV_1}{(NPV_1 - NPV_2)} \times (i_2 - i_1) \quad (11)$$

Dimana:

- $i_1$  = Tingkat bunga pertama
- $i_2$  = Tingkat bunga kedua
- $NPV_1$  = Net Present Value pertama
- $NPV_2$  = Net Present Value kedua

Pada metode IRR ini informasi yang dihasilkan berkaitan dengan tingkat kemampuan *cash flow* dalam mengembalikan investasi yang dijelaskan dalam bentuk % periode waktu. Logika sederhananya menjelaskan seberapa kemampuan *cash flow* dalam mengembalikan modalnya dan seberapa besar pula kewajiban yang harus dipenuhi. Kemampuan inilah yang disebut dengan *Internal Rate of Return* (IRR), sedangkan kewajiban disebut dengan *Minimum Atractive Rate of Return* (MARR). Dengan demikian, suatu rencana investasi akan dikatakan layak/menguntungkan jika:  $IRR > MARR$

Nilai MARR umumnya ditetapkan secara subjektif melalui suatu pertimbangan-pertimbangan tertentu dari investasi tersebut dimana pertimbangan yang dimaksud adalah:

- Suku bunga investasi ( $i$ );
- Biaya lain yang harus dikeluarkan untuk mendapatkan investasi ( $C_c$ );
- Faktor risiko investasi ( $\alpha$ ).

Dengan demikian,  $MARR = i + C_c + \alpha$  jika  $C_c$  dan  $\alpha$  tidak ada atau nol, maka  $MARR = i$  (suku bunga), sehingga  $MARR \geq i$ .

Investasi layak jika  $IRR > MARR$ .

### 1.5 Studi Terkait dan Gap Penelitian

Berbagai studi telah dilakukan untuk mengoptimasi aliran daya reaktif dalam sistem tenaga listrik, khususnya dalam upaya mengurangi rugi-rugi daya dan menjaga kestabilan tegangan. Penelitian oleh (Ben Oualid Medani and Sayah, 2016) menunjukkan efektivitas penggunaan PSO dalam meminimalkan rugi-rugi daya reaktif dengan konvergensi yang cepat. Di sisi lain, (Masamvu, Dzobo and Sun, 2023) menggunakan GA pada sistem distribusi dengan penetrasi energi terbarukan dan menunjukkan hasil yang kompetitif dalam mengatur tegangan dan daya reaktif.

Studi-studi tersebut sebagian besar dilakukan pada sistem tenaga yang besar dan terkoneksi secara nasional (*grid-connected*). Namun, penelitian tentang penerapan optimasi daya reaktif di sistem kelistrikan daerah terpencil atau wilayah kepulauan yang memiliki karakteristik khusus, seperti sistem kelistrikan Pulau Buton dan Muna, masih sangat terbatas. Sistem kelistrikan di daerah tersebut umumnya bersifat *isolated grid*, dengan sumber daya yang terbatas dan profil beban yang fluktuatif.

Selain itu, pendekatan optimasi tunggal (*single metaheuristic*) seperti PSO atau GA sering kali memiliki keterbatasan, misalnya PSO cenderung terjebak dalam solusi lokal dan GA memiliki waktu konvergensi yang relatif lama (Subhani, Babu and Reddy, 2012; Gad, 2022; Shami et al., 2022). Beberapa penelitian telah mengusulkan penggunaan pendekatan hibrida, seperti GA-PSO, untuk mengatasi kelemahan masing-masing algoritma (Utamidewi, Gunadin and Syafaruddin, 2023; Abdel-Basset et al., 2024), namun aplikasinya dalam konteks sistem kelistrikan kepulauan Indonesia masih jarang ditemukan.

Berbagai pendekatan optimasi telah diterapkan untuk menyelesaikan permasalahan *Optimal Reactive Power Dispatch (ORPD)*, dengan fokus utama pada pengurangan rugi-rugi daya dan peningkatan kestabilan tegangan dalam sistem tenaga listrik. Beberapa algoritma populer seperti PSO, GA, dan pendekatan HGAPSO telah banyak diimplementasikan dalam studi-studi terdahulu (Shaheen, Hasanien and Alkuhayli, 2021; Altuma et al., 2023; Papazoglou and Biskas, 2023). Tabel 2 merangkum beberapa penelitian kunci yang menjadi landasan dalam studi ini, termasuk judul referensi, penulis, hasil utama, serta ulasan kritis yang menunjukkan posisi kontribusi masing-masing terhadap pengembangan algoritma optimasi daya reaktif.

Tabel 2 State-of-The-Art Penelitian Terkait

| No | Judul Penelitian                                                                                                                                                                        | Temuan                                                                                                                                          | Ulasan                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Gap Penelitian                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | <i>Artificial Intelligence-Based Optimization Techniques for Optimal Reactive Power Dispatch Problem: A Contemporary Survey, Experiment s, and Analysis</i> (Abdel-Basset et al., 2024) | Studi komprehensif yang membandingkan berbagai teknik AI (PSO, GA, DE, dll.) dalam menyelesaikan ORPD dan menunjukkan keunggulan metode hybrid. | Memberikan tinjauan menyeluruh terhadap algoritma cerdas dalam penyelesaian masalah ORPD, termasuk PSO, GA, dan teknik hibrid. Studi ini kuat dalam aspek eksperimen dan komparasi performa, namun masih bersifat umum dan belum mengkaji penerapan pada sistem kelistrikan yang spesifik seperti <i>isolated grid</i> atau sistem kepulauan. | Penelitian ini menerapkan konsep HGAPSO secara praktis pada sistem kepulauan nyata (Pulau Buton dan Muna), bukan hanya pada sistem simulasi. Selain itu, penelitian ini juga menambahkan analisis kestabilan tegangan dan kelayakan ekonomi (NPV & PP) yang tidak dibahas dalam studi Abdel-Basset. |

Lanjutan Tabel 2

| No | Judul Penelitian                                                                                                                         | Temuan                                                                                                                                         | Ulasan                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Gap Penelitian                                                                                                                                                                                                                         |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2  | A Survey of Particle Swarm Optimization Applications in Electric Power Systems (AlRashidi & El-Hawary, 2009)                             | Memberikan ringkasan penerapan PSO dalam berbagai aplikasi sistem tenaga, termasuk ORPD, <i>economic dispatch</i> , dan perencanaan transmisi. | Studi ini bersifat <i>foundational</i> dan menyajikan kerangka pemahaman awal tentang peran PSO dalam sistem tenaga listrik. Meskipun bermanfaat sebagai landasan teori, referensi ini tidak membahas penerapan PSO dalam konteks sistem distribusi kecil atau sistem dengan penetrasi energi terbarukan. | Penelitian ini mengembangkan penerapan PSO untuk sistem distribusi kepulauan (20 kV) yang memiliki profil beban tidak stabil dan keterbatasan kapasitas pembangkit, sehingga hasilnya lebih aplikatif untuk daerah non-grid.           |
| 3  | <i>Optimal Reactive Power Dispatch Based on Modified Particle Swarm Optimization Considering Voltage Stability</i> (Cai, Ren & Yu, 2007) | Mengembangkan PSO termodifikasi untuk mempertimbangkan kestabilan tegangan, terbukti meningkatkan efisiensi dan keandalan ORPD.                | Relevan dalam peningkatan kinerja PSO dengan mempertimbangkan aspek kestabilan tegangan, sehingga meningkatkan kualitas solusi ORPD. Namun, studi ini tetap fokus pada sistem grid skala besar dan tidak membahas tantangan operasional pada sistem yang terisolasi atau terbatas sumber dayanya.         | Penelitian ini tidak hanya mempertimbangkan stabilitas tegangan, tetapi juga penentuan lokasi dan kapasitas optimal D-STATCOM di sistem 29-bus nyata dengan optimasi multiobjektif (rugi daya, stabilitas, efisiensi waktu komputasi). |

| No | Judul Penelitian                                                                                                                                                           | Temuan                                                                                                                                                | Ulasan                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Gap Penelitian                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4  | <i>Optimal Reactive Power Dispatch Using Particle Swarm Optimization with Time Varying Acceleration Coefficients</i> (Medani & Sayah, 2017)                                | Mengembangkan PSO termodifikasi untuk mempertimbangkan kestabilan tegangan, terbukti meningkatkan efisiensi dan keandalan ORPD.                       | Menunjukkan efektivitas pendekatan PSO dengan koefisien percepatan yang bervariasi untuk menghindari jebakan solusi lokal dan mempercepat konvergensi. Kendati memberikan kontribusi penting dalam pengembangan PSO, studi ini masih terbatas pada jaringan listrik konvensional dan tidak menyentuh isu geografis atau kondisi kelistrikan yang tidak stabil. | Penelitian ini menggabungkan PSO dengan GA (Hibrid GA-PSO) untuk menghindari jebakan solusi lokal sekaligus mempercepat konvergensi. Selain itu, penerapannya dilakukan pada sistem kelistrikan kepulauan yang memiliki fluktuasi beban tinggi, sehingga hasilnya lebih relevan untuk sistem nyata.               |
| 5  | <i>Particle Swarm Optimization with Time Varying Acceleration Coefficients for Economic Dispatch Considering Valve Point Loading Effects</i> (Subhani, Babu & Reddy, 2012) | Modifikasi PSO-TVAC diterapkan pada economic dispatch, terbukti meningkatkan keakuratan hasil dengan mempertimbangkan karakteristik nonlinier sistem. | Walaupun studi ini lebih fokus pada economic dispatch, pendekatan PSO-TVAC yang digunakan sangat relevan bagi konteks ORPD karena mampu menangani permasalahan nonlinier dan kompleks. Namun, aplikasi dalam sistem tenaga berskala kecil atau wilayah dengan profil beban tidak stabil masih belum dieksplorasi secara langsung.                              | Penelitian ini memperluas konsep PSO-TVAC dengan menggabungkan algoritma GA serta menerapkannya pada sistem kelistrikan 20 kV di Pulau Buton dan Muna untuk mereduksi rugi daya dan memperbaiki profil tegangan secara simultan, menjadikannya studi terapan berbasis AI pertama pada sistem kepulauan Indonesia. |

Meskipun studi-studi sebelumnya memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan metode optimasi dalam sistem tenaga, sebagian besar masih berfokus pada sistem grid besar dan terkoneksi secara nasional. Berdasarkan hasil dalam tabel *State-of-The-Art*, dapat diidentifikasi bahwa masih terdapat sejumlah celah penelitian (*research gap*), khususnya yang berkaitan dengan sistem distribusi di wilayah kepulauan atau daerah terpencil dengan kondisi kelistrikan yang unik. Berikut adalah beberapa aspek penting yang menandai keterbatasan penelitian sebelumnya dan menjadi dasar bagi urgensi serta relevansi studi ini:

1. Kurangnya studi optimasi daya reaktif yang fokus pada sistem kelistrikan kepulauan, khususnya di Indonesia.
2. Minimnya penerapan algoritma HGAPSO dalam konteks sistem isolated grid dengan karakteristik beban dan topologi jaringan yang khas.
3. Kebutuhan akan pendekatan yang adaptif dan efisien untuk meningkatkan keandalan dan efisiensi sistem distribusi kelistrikan di daerah dengan keterbatasan infrastruktur.

### 1.6 Kebaruan Penelitian (*Novelty*)

Penelitian ini menghadirkan pendekatan baru dalam optimasi aliran daya reaktif dengan menerapkan algoritma HGAPSO pada sistem kelistrikan Pulau Buton dan Muna, dua wilayah yang secara geografis terpencil dan belum banyak diteliti dalam konteks optimasi sistem tenaga.

Beberapa aspek kebaruan dari penelitian ini adalah:

1. Fokus geografis: Penelitian ini menjadi salah satu studi pertama yang mengkaji optimasi daya reaktif pada sistem kelistrikan Pulau Buton dan Muna, yang memiliki karakteristik isolated grid.
2. Pendekatan metode: Kombinasi PSO dan GA digunakan untuk mengeksplorasi dan mengeksploitasi ruang solusi secara efisien, dengan harapan memperoleh hasil optimasi yang lebih baik dibandingkan metode tunggal.
3. Kontribusi praktis: Penelitian ini menghasilkan rekomendasi konfigurasi variabel kontrol (tegangan bus, tap transformator, kompensator reaktif) yang dapat diterapkan secara langsung untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem distribusi di wilayah studi.
4. Pemodelan spesifik sistem lokal: Simulasi dilakukan berdasarkan data aktual dari sistem kelistrikan Pulau Buton dan Muna, sehingga hasilnya lebih aplikatif dan relevan dibandingkan model sistem generik yang sering digunakan dalam literatur.

Dengan pendekatan ini, diharapkan hasil penelitian tidak hanya memberikan kontribusi pada pengembangan metode optimasi, tetapi juga mendukung perencanaan sistem kelistrikan daerah terpencil di Indonesia secara lebih cerdas dan efisien.

### 1.7 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan di bidang teknik elektro, khususnya pada studi optimasi aliran daya reaktif dalam sistem tenaga listrik menggunakan algoritma *HGAPSO*. Secara teoretis, penelitian ini dapat memperkaya referensi akademik terkait penerapan algoritma metaheuristik untuk menyelesaikan permasalahan optimasi nonlinier pada sistem distribusi listrik yang kompleks dan dinamis.

Secara praktis, hasil penelitian ini dapat menjadi rujukan teknis dalam pengambilan keputusan operasional maupun perencanaan sistem tenaga listrik di wilayah Pulau Buton dan Muna. Dengan pendekatan optimasi yang diterapkan, diharapkan dapat ditemukan konfigurasi sistem yang mampu meminimalkan rugi-rugi daya, menjaga profil tegangan tetap stabil, serta meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem distribusi setempat, khususnya dalam menghadapi keterbatasan sumber daya dan fluktuasi beban.

Dari sisi sosial dan kebijakan, penelitian ini memberikan potensi manfaat dalam mendukung pengembangan infrastruktur energi yang berkelanjutan dan adaptif di wilayah kepulauan. Dengan menyediakan pendekatan yang berbasis data dan kecerdasan buatan, hasil penelitian ini dapat dijadikan dasar dalam merumuskan strategi pengelolaan daya yang lebih efisien dan berorientasi pada peningkatan kualitas layanan listrik bagi masyarakat di daerah terpencil.

### 1.8 Sistematika Penulisan

Tesis ini disusun secara sistematis dalam beberapa bab untuk memudahkan pembaca dalam memahami alur penelitian yang dilakukan. Adapun sistematika penulisan tesis ini adalah sebagai berikut:

1. Bab I Pendahuluan: Bab ini memuat latar belakang permasalahan, rumusan masalah, tujuan penelitian, tinjauan pustaka terkait aliran daya, metode optimasi (PSO, GA, dan *HGAPSO*), kebaruan penelitian, manfaat penelitian, serta sistematika penulisan.
2. Bab II Metode Penelitian: Bab ini menjelaskan tempat dan waktu penelitian, bahan dan alat yang digunakan, desain penelitian dan tahapan simulasi, konfigurasi sistem distribusi 13 bus, serta uraian mendetail mengenai algoritma PSO, GA, *HGAPSO* sebagai metode optimasi. Tahapan simulasi dan evaluasi performa juga dijelaskan.
3. Bab III Hasil dan Pembahasan: Bab ini menyajikan hasil simulasi dari masing-masing algoritma (PSO, GA, dan *HGAPSO*), analisis perbandingan kinerja ketiga metode tersebut, serta pembahasan terkait efektivitas metode hibrid, dampaknya terhadap rugi-rugi daya, stabilitas tegangan, dan potensi implementasi di wilayah kepulauan.
4. Bab IV Kesimpulan: Bab ini memuat kesimpulan utama dari hasil penelitian yang menjawab rumusan masalah dan tujuan penelitian, serta memberikan saran untuk pengembangan lebih lanjut.

## **BAB II METODE PENELITIAN**

### **2.1 Tempat dan Waktu**

Penelitian ini mengambil data primer di Sistem Kelistrikan Pulau Buton dan Muna pada PLN Unit Pelaksana Pelayanan Pelanggan BauBau. Selanjutnya, untuk simulasi penelitian dilakukan di Laboratorium Elektronika Daya, Departemen Teknik Elektro Universitas Hasanuddin. Keseluruhan tahapan penelitian dilaksanakan dari Januari 2024 sampai dengan Desember 2024.

### **2.2 Bahan dan Alat**

Alat yang digunakan pada Penelitian ini yaitu:

1. Satu unit Laptop dengan sistem operasi Windows 10 Pro 64 bit sebagai media perancangan dan pengujian simulasi.
2. Perangkat lunak MATLAB 2022 sebagai perangkat lunak utama untuk perancangan dan perhitungan.
3. Data-data bus pembangkit atau generator, tap transformator, kapasitor yang terpasang pada bus pada sistem tenaga listrik Baubau.

### **2.3 Metode Penelitian**

Diagram alir pada Gambar 9 menggambarkan langkah-langkah sistematis dalam pelaksanaan penelitian yang bertujuan untuk mengoptimasi aliran daya reaktif menggunakan algoritma PSO dan GA berbasis simulasi MATLAB. Tahapan metode tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Mulai  
Penelitian diawali dengan inisiasi kegiatan melalui perumusan masalah, tujuan, serta ruang lingkup studi.
2. Studi Literatur  
Tahap ini melibatkan penelaahan referensi dan publikasi ilmiah terkini yang relevan dengan topik optimasi daya reaktif, algoritma metaheuristik (PSO dan GA), serta aplikasi pada sistem distribusi kelistrikan. Studi literatur bertujuan untuk memperkuat landasan teori dan mengidentifikasi gap penelitian.
3. Pengumpulan dan Pengolahan Data  
Data sistem kelistrikan yang diperlukan dikumpulkan, mencakup data topologi jaringan, impedansi saluran, data pembebanan, serta spesifikasi pembangkit dan kompensator daya reaktif. Data yang terkumpul selanjutnya diolah agar siap digunakan dalam tahap pemodelan dan simulasi.
4. Penerapan Algoritma PSO dan GA untuk Optimasi Beban Reaktif  
Pada tahap ini, algoritma PSO dan GA dikembangkan dan dimasukkan ke dalam pemodelan sistem untuk menyelesaikan masalah Optimal Reactive Power Dispatch (ORPD). Tujuannya adalah meminimalkan rugi-rugi daya dan meningkatkan profil tegangan pada sistem.

5. Simulasi Analisis Aliran Daya di MATLAB

Model sistem kelistrikan yang telah dilengkapi dengan algoritma optimasi disimulasikan menggunakan MATLAB/Simulink atau MATLAB berbasis kode numerik (misalnya dengan PSAT atau MATPOWER). Simulasi ini bertujuan mengevaluasi performa sistem berdasarkan solusi yang dihasilkan.

6. Evaluasi Hasil Simulasi

Hasil simulasi dianalisis untuk mengetahui apakah solusi yang diperoleh telah memenuhi kriteria optimal, seperti minimisasi rugi-rugi daya aktif, kestabilan tegangan, dan batasan teknis lainnya.

7. Iterasi Jika Belum Optimum

Jika hasil simulasi belum mencapai kondisi optimum, parameter algoritma atau model akan disesuaikan dan simulasi diulang hingga diperoleh hasil yang memuaskan.

8. Pembuatan tesis dan publikai ilmiah

Setelah diperoleh hasil yang optimum, penelitian dilanjutkan dengan penyusunan tesis dan publikasi ilmiah yang memuat metode, hasil, dan analisis dari studi yang dilakukan.

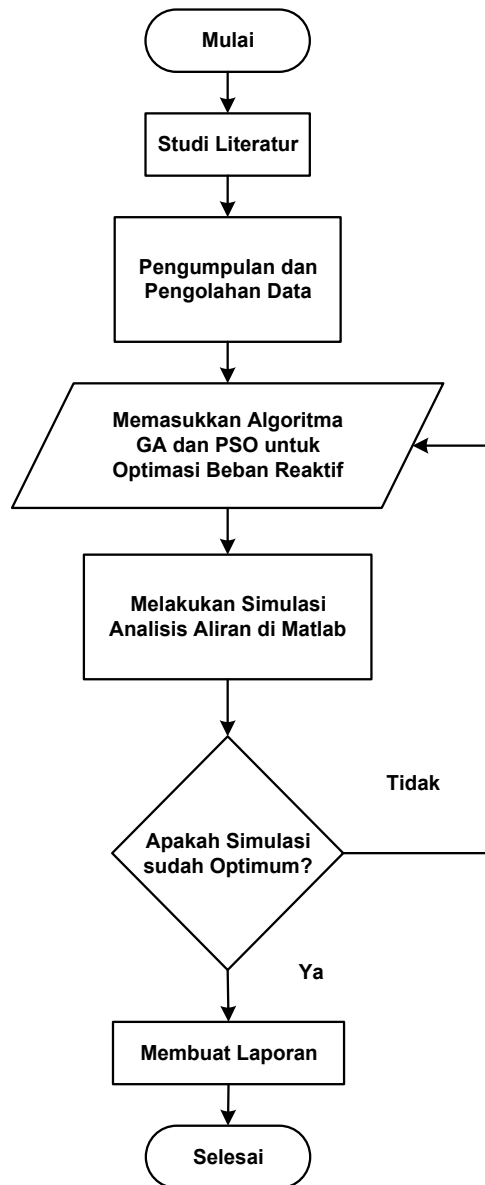
9. Selesai

Penelitian diakhiri setelah semua tahapan dilalui dan tujuan penelitian tercapai.

## 2.4 Metode Optimasi HGAPSO

Dalam penelitian ini, digunakan pendekatan optimasi berbasis algoritma HGAPSO untuk menyelesaikan permasalahan optimasi aliran daya reaktif pada sistem kelistrikan Pulau Buton dan Muna. Tujuan utama dari penggunaan metode ini adalah untuk memperoleh solusi optimal yang dapat meminimalkan rugi-rugi daya dan menjaga profil tegangan dalam batas yang diizinkan.

Metode HGAPSO dipilih karena mampu mengombinasikan kelebihan PSO dalam konvergensi cepat dan kemampuan eksplorasi awal, dengan kekuatan GA dalam mengeksplorasi solusi terbaik melalui mekanisme evolusi populasi.



Gambar 12 Diagram Alir Penelitian

Langkah-langkah utama dalam algoritma HGAPSO adalah sebagai berikut:

1. Inisialisasi Parameter dan Populasi Awal

Langkah pertama adalah memasukkan parameter awal untuk PSO dan GA, termasuk jumlah partikel (solusi), kecepatan awal, posisi awal, dan batas-batas ruang pencarian. Setiap partikel direpresentasikan sebagai kandidat

solusi yang menyatakan variabel-variabel kontrol, seperti tap changer transformator, kapasitor shunt, atau injeksi daya reaktif dari pembangkit.

## 2. Perhitungan Fungsi Objektif dan Pembaruan PSO

Nilai fungsi tujuan (misalnya total rugi-rugi daya reaktif atau deviasi tegangan) dihitung untuk setiap partikel. Posisi dan kecepatan partikel diperbarui berdasarkan nilai terbaik individu ( $pBest$ ) dan nilai terbaik global ( $gBest$ ). Proses ini berulang hingga ditemukan posisi  $gBest$  yang merepresentasikan solusi terbaik sementara.

## 3. Integrasi Output PSO ke GA (Proses Hibrid)

Setelah memperoleh nilai  $gBest$  dari proses PSO, posisi terbaik tersebut digunakan sebagai solusi awal dalam algoritma GA. Hal ini dimaksudkan untuk memperkuat proses pencarian solusi GA dengan memulai dari titik yang telah dieksplorasi secara efisien oleh PSO, sehingga mempercepat konvergensi menuju solusi optimal. Di sinilah inti hibrid terjadi. Posisi  $gBest$  hasil eksplorasi PSO dipakai sebagai populasi awal untuk algoritma GA. Dengan demikian, GA memulai pencarian dari solusi yang sudah “dieksplor” atau “dipetakan” oleh PSO. Langkah ini menggabungkan kemampuan eksplorasi cepat PSO dengan eksploitasi GA

## 4. Penerapan Algoritma GA

GA bekerja dengan melakukan proses *selection*, *crossover*, dan *mutation* terhadap populasi yang diperoleh dari PSO. Tujuannya adalah untuk menghasilkan generasi solusi baru yang lebih baik dengan mengombinasikan atribut solusi-solusi terbaik. Evaluasi dilakukan terhadap setiap generasi untuk memaksimalkan fungsi objektif.

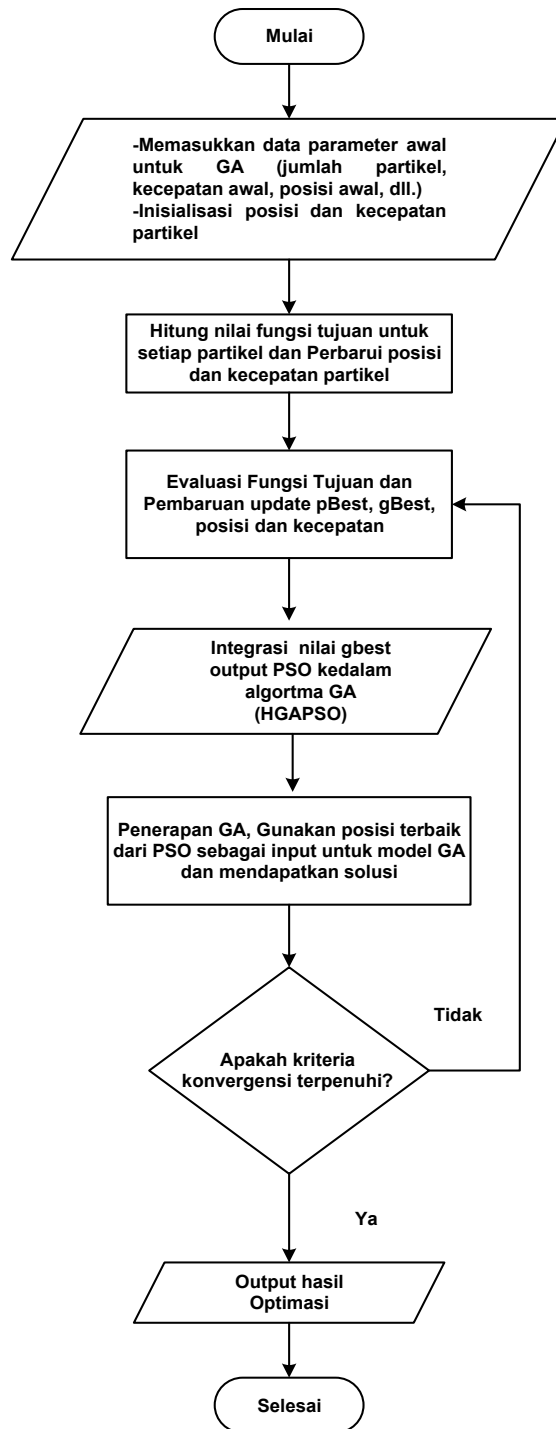
## 5. Evaluasi Kriteria Konvergensi

Proses GA berlanjut hingga terpenuhinya kriteria konvergensi, seperti jumlah iterasi maksimum, perbaikan fungsi objektif yang sangat kecil, atau tidak adanya perubahan signifikan pada solusi. Jika belum konvergen, maka proses kembali ke tahap sebelumnya untuk iterasi lebih lanjut.

## 6. Output Solusi Optimal

Setelah konvergensi tercapai, hasil optimasi akhir yang diperoleh dianggap sebagai solusi optimal dan akan digunakan sebagai dasar analisis performa sistem tenaga terhadap pengaturan aliran daya reaktif.

Dengan pendekatan hibrida ini, diharapkan algoritma mampu mengatasi keterbatasan masing-masing metode individu, seperti PSO yang cenderung terjebak pada solusi lokal, dan GA yang memerlukan waktu konvergensi relatif lama. Kombinasi keduanya memberikan keseimbangan antara eksplorasi dan eksploitasi dalam pencarian solusi yang efisien.



Gambar 13 Alur Kerja Metode HGAPSO

## 2.5 Simulasi Program

Simulasi dalam penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi performa sistem tenaga listrik dalam hal penyaluran daya reaktif menggunakan perangkat lunak MATLAB 2022 yang terintegrasi dengan *toolbox* MATPOWER. MATPOWER merupakan paket perangkat lunak *open-source* yang secara luas digunakan untuk analisis aliran daya dan optimasi sistem tenaga, terutama dalam lingkungan akademik dan penelitian. Proses simulasi dilakukan untuk membandingkan hasil optimasi aliran daya reaktif dengan dan tanpa penerapan algoritma GA-PSO, guna mengamati sejauh mana efektivitas metode tersebut dalam mereduksi rugi-rugi daya dan menjaga profil tegangan sistem.

Adapun tahapan simulasi dilakukan secara sistematis sebagai berikut:

### 1. Persiapan Data dan Pembuatan Format Kasus

Langkah awal dalam proses simulasi adalah menyusun dan memformat data sistem tenaga ke dalam bentuk yang kompatibel dengan MATPOWER. Data disusun mengikuti struktur yang sesuai dengan format case file (.m-file) dalam MATLAB. Data yang dimasukkan mencakup:

- **Data Bus**  
Berisi informasi masing-masing bus dalam sistem, termasuk jenis bus, nilai tegangan, sudut tegangan, beban aktif dan reaktif, serta batasan tegangan minimum dan maksimum.
- **Data Generator**  
Mencakup informasi lokasi generator, kapasitas daya aktif dan reaktif, serta batasan operasi generator.
- **Data Saluran (*Branch Data*)**  
Berisi informasi koneksi antar bus, impedansi saluran, batasan aliran daya, dan parameter lainnya yang memengaruhi aliran daya dalam sistem.

Semua data tersebut dirancang sedemikian rupa agar sesuai dengan kondisi sistem kelistrikan Pulau Buton dan Muna yang menjadi objek studi dalam penelitian ini.

### 2. Eksekusi Program MATLAB

Setelah data selesai disiapkan, langkah selanjutnya adalah membuka lingkungan kerja MATLAB 2022. Toolbox MATPOWER harus telah terinstal dan ditambahkan ke dalam path MATLAB agar dapat digunakan secara langsung. File studi kasus yang telah dibuat sebelumnya dimuat dan dijalankan sebagai input dalam lingkungan pemrograman MATLAB.

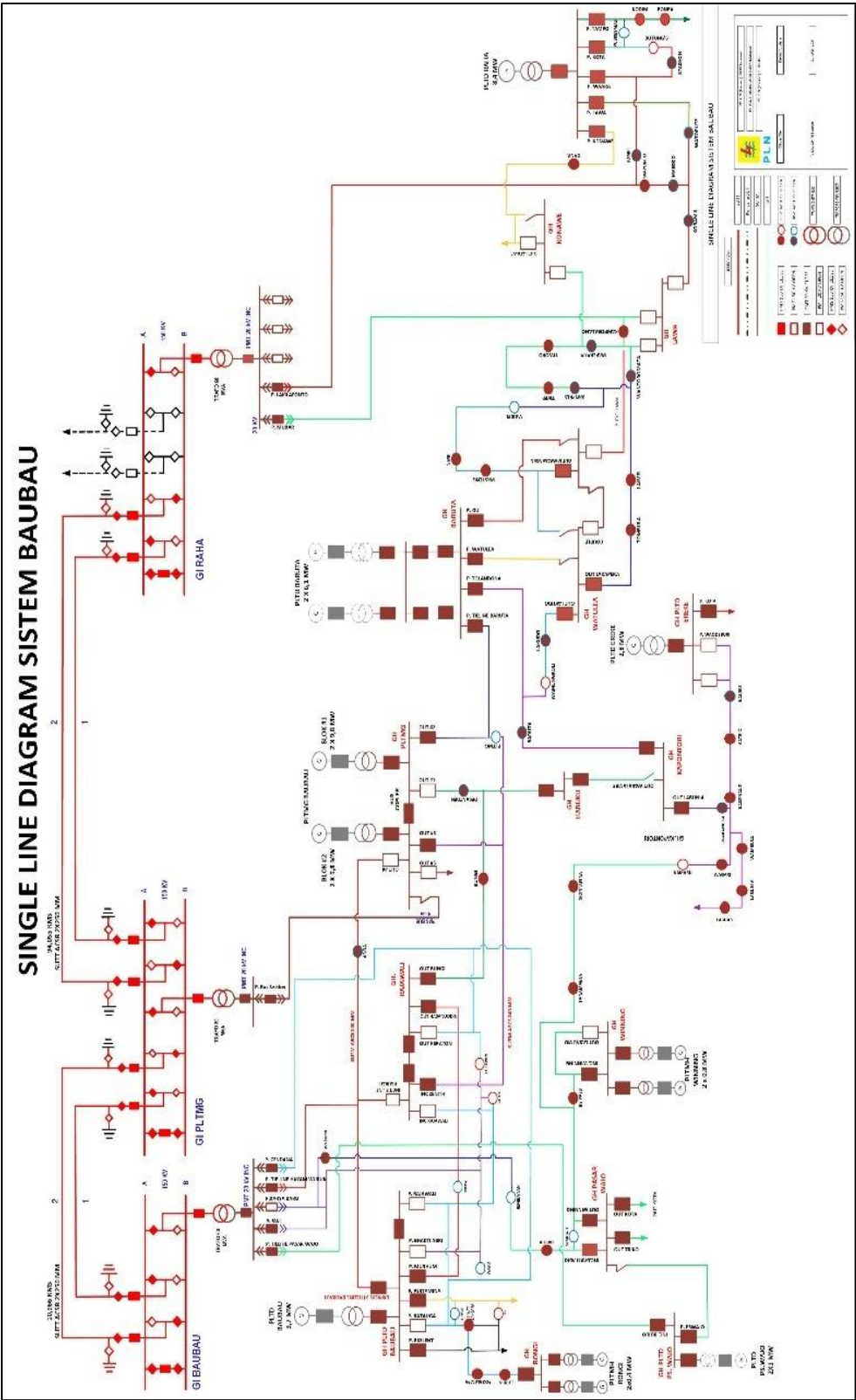
### 3. Pelaksanaan Simulasi Aliran Daya

Simulasi dilakukan dengan memanggil nama file studi kasus menggunakan perintah fungsi aliran daya standar yang tersedia dalam MATPOWER, seperti *runpf*, *rundcopf*, atau varian lainnya tergantung kebutuhan analisis. Fungsi-fungsi ini akan menghitung parameter-parameter utama dalam sistem seperti aliran daya aktif dan reaktif, tegangan bus, rugi-rugi daya, serta performa generator dan saluran transmisi. Untuk kasus optimasi, file

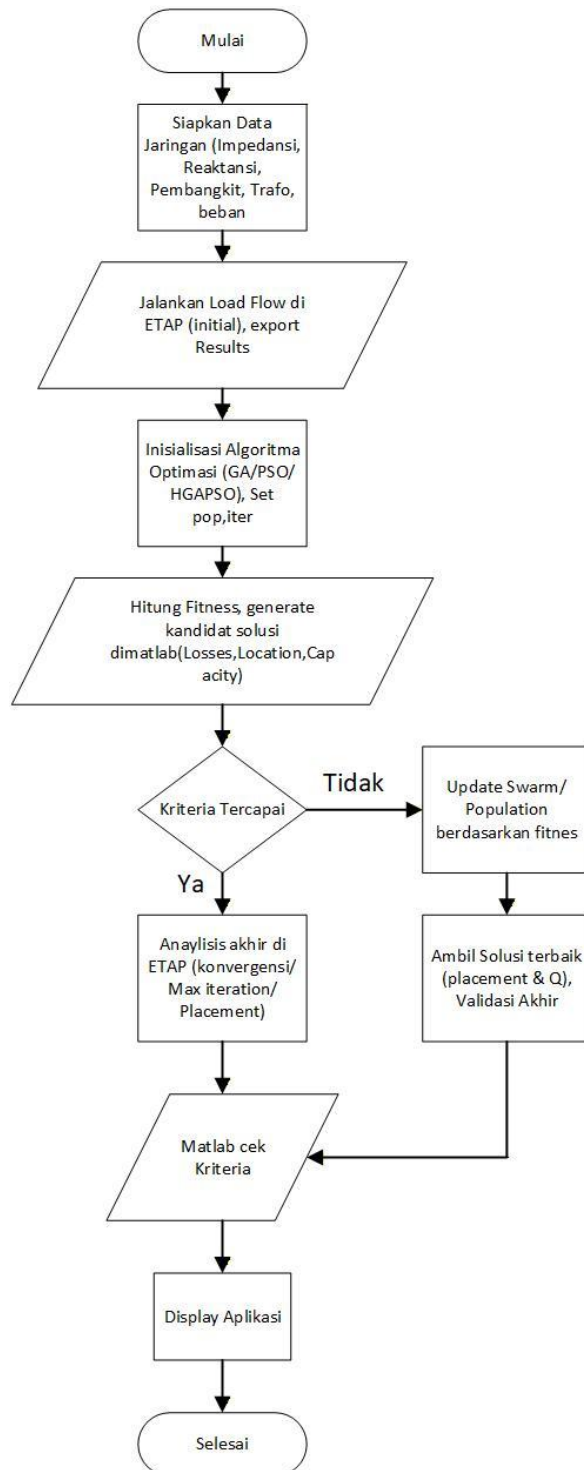
simulasi dilengkapi dengan parameter dan fungsi objektif hasil dari algoritma HGAPSO yang telah diintegrasikan sebelumnya, guna melihat pengaruh algoritma terhadap performa sistem.

4. Analisis Hasil dan Penyusunan Laporan

Setelah seluruh proses simulasi selesai, data output yang diperoleh kemudian dianalisis secara mendalam. Hasil analisis disusun ke dalam bentuk tabel, grafik, dan pembahasan yang dijadikan dasar pengambilan kesimpulan. Simulasi ini diharapkan mampu menunjukkan bahwa penerapan algoritma HGAPSO dapat memberikan solusi yang optimal dalam manajemen daya reaktif, sekaligus meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem distribusi tenaga listrik pada sistem kelistrikan studi kasus.



Gambar 14 Single Line Diagram Sistem Baubau-Muna (Sumber PLN baubau)



Gambar 15 Diagram Alir Optimasi HGAPSO



