

Skema Pendanaan: Mandiri

## LAPORAN KEMAJUAN PENELITIAN



# **Multi-Objective Optimal PMU Placement berbasis Adaptive Hybrid BFPA-BPSO**

**TIM PENELITIAN**

SUJONO

ANGGA RIZKI PRATAMA

ZABUUR BOY

**PUSAT STUDI KENDARAAN LISTRIK**

**UNIVERSITAS BUDI LUHUR**

**AGUSTUS 2026**

**HALAMAN PENGESAHAN**  
**LAPORAN KEMAJUAN**

|                                    |   |                                                                          |
|------------------------------------|---|--------------------------------------------------------------------------|
| <b>Judul Penelitian</b>            | : | Multi-Objective Optimal PMU Placement berbasis Adaptive Hybrid BFPA-BPSO |
| <b>Bidang Penelitian</b>           | : | Teknik                                                                   |
| <b>Ketua Peneliti</b>              |   |                                                                          |
| a. Nama lengkap                    | : | Sujono                                                                   |
| b. NIP/NIDN/IS SINTA               | : | 990002/0331087201/ 5984639                                               |
| c. Jabatan Fungsional              | : | Lektor Kepala                                                            |
| d. Program Studi                   | : | Teknik Elektro                                                           |
| e. No. HP                          | : | 0812 1827 8184                                                           |
| f. Alamat e-mail                   | : | sujono@budiluhur.ac.id                                                   |
| <b>Anggota Peneliti</b>            |   |                                                                          |
| <b>Mahasiswa (1)</b>               |   |                                                                          |
| a. Nama lengkap                    | : | Angga Rizky Pratama                                                      |
| b. NIM                             | : | 2252500117                                                               |
| <b>Mahasiswa (2)</b>               |   |                                                                          |
| a. Nama lengkap                    | : | Zabur Booy                                                               |
| b. NIM                             | : | 2252500125                                                               |
| <b>Lama Penelitian</b>             | : | 1 tahun                                                                  |
| <b>Biaya Penelitian</b>            |   |                                                                          |
| a. Sumber Universitas Budi Luhur   | : | -                                                                        |
| b. Sumber lain (sebutkan jika ada) | : | -                                                                        |

Jakarta, 10 Agustus 2026

Mengetahui,  
Kepala Pusat Studi Kendaraan Listrik

Ketua Pengusul



(Sujono)  
NIP. 990002



(Sujono)  
NIP. 990002

Menyetujui  
Direktur Riset dan Pengabdian Kepada Masyarakat

(Prof. Dr. Ir. Prudensius Maring, M.A.)  
NIP. 190043

## DAFTAR ISI

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| Daftar isi .....                                                     | 1  |
| BAB I PENDAHULUAN .....                                              | 2  |
| 1.1 Latar Belakang .....                                             | 2  |
| 1.2 Rumusan Masalah .....                                            | 3  |
| 1.3 Tujuan Penelitian .....                                          | 3  |
| 1.4 Kebaruan Penelitian .....                                        | 4  |
| 1.5 Kontribusi Penelitian .....                                      | 4  |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....                                        | 5  |
| 2.1 Phasor Measurement Unit dan Wide Area Measurement System .....   | 5  |
| 2.2 Perkembangan Penelitian Optimal PMU Placement .....              | 5  |
| 2.3 Penelitian OPP Berbasis Jumlah PMU dan Redundancy .....          | 5  |
| 2.4 Penelitian Multi-Objective Optimal PMU Placement .....           | 6  |
| 2.5 Penelitian OPP dengan Pertimbangan State Estimation .....        | 6  |
| 2.6 Penelitian OPP dengan Communication Cost .....                   | 6  |
| 2.7 Penelitian OPP Berbasis Metaheuristic .....                      | 7  |
| 2.8 Perkembangan BPSO dan BFPA dalam OPP .....                       | 7  |
| 2.9 Perkembangan Penelitian Tahun 2025 .....                         | 7  |
| 2.12 State-of-the-Art .....                                          | 8  |
| BAB III METODE PELAKSANAAN PENELITIAN .....                          | 10 |
| 3.1 Identifikasi dan Perumusan Permasalahan .....                    | 11 |
| 3.2 Formulasi Matematis Multi-Objective .....                        | 11 |
| 3.2.1 Objective 1 — Minimasi Jumlah PMU .....                        | 11 |
| 3.2.2 Objective 2 — Maksimasi Observability .....                    | 11 |
| 3.2.3 Objective 3 — Maksimasi Redundancy .....                       | 12 |
| 3.2.4 Objective 4 — Minimasi Communication Cost .....                | 13 |
| 3.3 Formulasi Multi-Objective .....                                  | 13 |
| 3.4 Representasi Binary .....                                        | 14 |
| 3.5 Inisialisasi Populasi .....                                      | 14 |
| 3.6 Evaluasi Fitness .....                                           | 14 |
| 3.7 Pengembangan Hybrid BFPA-BPSO .....                              | 15 |
| 3.7.1 Peran BFPA .....                                               | 15 |
| 3.7.2 Peran BPSO .....                                               | 16 |
| 3.7.3 Mekanisme Adaptive Hybrid BFPA dan BPSO .....                  | 16 |
| 3.8 Pareto Dominance dan Archive .....                               | 16 |
| 3.9 Kriteria Terminasi .....                                         | 17 |
| 3.10 Validasi Algoritma .....                                        | 17 |
| BAB 4 HASIL PENELITIAN .....                                         | 19 |
| 4.2 Optimisasi PMU pada Jaringan Distribusi Radial IEEE 33-bus ..... | 19 |
| 4.3 Rencana Tindak Lanjut Penelitian .....                           | 22 |
| DAFTAR PUSTAKA .....                                                 | 23 |

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Perkembangan sistem tenaga listrik menuju sistem yang semakin kompleks, terintegrasi, dan dinamis menuntut tersedianya sistem monitoring yang mampu menyediakan informasi kondisi sistem secara cepat, akurat, dan menyeluruh. Integrasi pembangkit energi terbarukan, perubahan pola pembebanan, interkoneksi sistem tenaga, serta meningkatnya kebutuhan terhadap keandalan dan keamanan operasi menyebabkan karakteristik sistem tenaga menjadi semakin dinamis. Kondisi tersebut meningkatkan kebutuhan terhadap teknologi *Wide Area Measurement System* (WAMS) yang mampu melakukan pemantauan kondisi sistem secara real-time. Salah satu komponen utama WAMS adalah *Phasor Measurement Unit* (PMU). PMU mampu mengukur *voltage phasor* dan *current phasor* secara tersinkronisasi berdasarkan referensi waktu yang sama. Informasi tersebut memberikan representasi kondisi sistem tenaga yang lebih lengkap dibandingkan pengukuran konvensional. Data PMU dapat dimanfaatkan untuk *state estimation*, deteksi gangguan, pemantauan stabilitas, analisis kontingensi, serta pengembangan sistem proteksi dan pengendalian berbasis wide area.

Meskipun PMU memberikan kemampuan pengukuran yang tinggi, pemasangan PMU pada setiap bus bukan merupakan solusi yang ekonomis. Oleh karena itu, salah satu permasalahan penting dalam pengembangan WAMS adalah menentukan lokasi PMU yang optimal sehingga seluruh atau sebagian besar sistem dapat diamati dengan jumlah perangkat yang minimum. Permasalahan tersebut dikenal sebagai *Optimal PMU Placement* (OPP). Pada pendekatan OPP konvensional, tujuan utama yang sering digunakan adalah meminimalkan jumlah PMU dengan tetap memenuhi kondisi *system observability*. Formulasi tersebut dapat menghasilkan konfigurasi PMU yang memenuhi observabilitas dengan jumlah perangkat minimum. Namun, konfigurasi dengan jumlah PMU minimum belum tentu merupakan konfigurasi terbaik dari perspektif operasional. Dua konfigurasi dapat mempunyai jumlah PMU yang sama dan sama-sama memenuhi observabilitas, tetapi memiliki tingkat *measurement redundancy* yang berbeda. Konfigurasi dengan redundancy yang lebih tinggi mempunyai alternatif pengukuran yang lebih banyak ketika terjadi kegagalan perangkat atau hilangnya suatu jalur pengukuran.

Selain redundancy, aspek lain yang semakin penting adalah biaya komunikasi. PMU merupakan bagian dari WAMS yang tidak hanya membutuhkan perangkat pengukuran tetapi juga infrastruktur komunikasi untuk mengirimkan data pengukuran menuju *Phasor Data Concentrator* (PDC) atau pusat kendali. Dengan demikian, lokasi PMU akan memengaruhi kebutuhan jaringan komunikasi, jumlah jalur komunikasi, panjang atau jarak jaringan, serta biaya pembangunan dan pengoperasian infrastruktur komunikasi. Konfigurasi PMU yang optimal dari sisi sistem tenaga belum tentu optimal dari sisi komunikasi.

Permasalahan tersebut menunjukkan bahwa OPP merupakan permasalahan yang bersifat multi-dimensional. Minimasi jumlah PMU dapat berkonflik dengan peningkatan redundancy. Peningkatan redundancy dapat membutuhkan PMU tambahan, sedangkan pemilihan lokasi tertentu dapat meningkatkan biaya komunikasi. Oleh sebab itu, pendekatan *multi-objective optimization* diperlukan untuk mendapatkan sekumpulan solusi yang merepresentasikan berbagai trade-off antara tujuan-tujuan tersebut.

Dalam penelitian ini, empat objective utama dipertimbangkan secara simultan, yaitu **minimasi jumlah PMU, maksimasi redundancy, maksimasi observability, dan minimasi communication cost**. Karakteristik permasalahan OPP yang bersifat diskrit, kombinatorial, dan multi-objective menyebabkan metode optimisasi konvensional dapat menghadapi keterbatasan dalam memperoleh solusi optimal untuk sistem tenaga berukuran besar. Oleh karena itu, metode *metaheuristic optimization* menjadi salah satu pendekatan yang potensial.

Salah satu algoritma yang dapat digunakan adalah *Flower Pollination Algorithm* (FPA), yang memiliki mekanisme eksplorasi ruang pencarian melalui proses penyerbukan global dan lokal. Namun, ketika diterapkan pada permasalahan OPP yang bersifat binary, diperlukan modifikasi sehingga mekanisme pencarian dapat bekerja pada ruang solusi diskrit. Di sisi lain, *Binary Particle Swarm Optimization* (BPSO) secara khusus dapat digunakan untuk permasalahan binary dan memiliki kemampuan eksploitasi solusi yang baik melalui pembaruan posisi berdasarkan pengalaman individu dan populasi.

Karakteristik tersebut memberikan peluang untuk mengembangkan pendekatan hibrid antara **Binary Flower Pollination Algorithm (BFPA)** dan **Binary Particle Swarm Optimization (BPSO)**. BFPA dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan kemampuan eksplorasi ruang solusi, sedangkan BPSO dapat dimanfaatkan untuk memperkuat eksploitasi terhadap solusi-solusi yang menjanjikan. Integrasi keduanya diharapkan dapat mengurangi kemungkinan terjebak pada optimum lokal sekaligus meningkatkan kecepatan konvergensi. Namun, sekadar menggabungkan dua algoritma belum cukup untuk menghasilkan kontribusi ilmiah yang kuat. Oleh karena itu, penelitian ini diarahkan untuk mengembangkan **mekanisme hibrid BFPA-BPSO dalam kerangka multi-objective optimization**.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, permasalahan utama dalam penelitian ini adalah bagaimana mengembangkan metode multi-objective optimization untuk menentukan lokasi PMU yang mampu memberikan keseimbangan optimal antara jumlah PMU, redundancy, observability, dan communication cost. Permasalahan tersebut dijabarkan menjadi beberapa pertanyaan penelitian sebagai berikut:

- a. Bagaimana memformulasikan permasalahan *Optimal PMU Placement* sebagai permasalahan multi-objective dengan mempertimbangkan jumlah PMU, redundancy, observability, dan communication cost secara simultan?
- b. Bagaimana mengembangkan algoritma **Hybrid Binary Flower Pollination Algorithm–Binary Particle Swarm Optimization (BFPA-BPSO)** yang mampu melakukan eksplorasi dan eksploitasi secara efektif pada ruang solusi binary?
- c. Bagaimana kinerja Hybrid BFPA-BPSO dibandingkan dengan BFPA, BPSO, dan algoritma metaheuristik pembanding dalam menghasilkan solusi Pareto-optimal?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan umum penelitian ini adalah mengembangkan metode multi-objective optimal PMU placement berbasis Hybrid BFPA-BPSO untuk memperoleh konfigurasi PMU yang optimal dengan mempertimbangkan jumlah PMU, redundancy, observability, dan communication cost secara simultan.

#### 1.4 Kebaruan Penelitian

Kebaruan penelitian ini tidak hanya diletakkan pada penggunaan algoritma hybrid BFPA-BPSO, tetapi pada integrasi **model permasalahan dan mekanisme optimisasi**.

- a. Formulasi multi-objective OPP yang secara simultan mengoptimalkan jumlah PMU, Redundancy, Observability, dan Communication Cost. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi konfigurasi PMU tidak hanya berdasarkan jumlah perangkat dan observability, tetapi juga mempertimbangkan kualitas redundansi pengukuran dan aspek komunikasi.
- b. Integrasi redundancy dalam evaluasi konfigurasi PMU dimana observability tidak diperlakukan hanya sebagai kondisi *observable/non-observable*. Penelitian mempertimbangkan tingkat redundancy sebagai ukuran tambahan untuk mengevaluasi kualitas konfigurasi PMU.
- c. Communication cost dimasukkan langsung ke dalam proses optimisasi, bukan hanya digunakan sebagai evaluasi setelah lokasi PMU diperoleh. Dengan demikian, lokasi PMU dipilih berdasarkan interaksi antara topologi sistem tenaga dan topologi komunikasi.
- d. Mekanisme hybrid yang tidak sekadar menjalankan BFPA dan BPSO secara berurutan. BFPA digunakan untuk memperluas eksplorasi, sedangkan BPSO digunakan untuk memperkuat eksploitasi.

#### 1.5 Kontribusi Penelitian

Penelitian memberikan kontribusi secara teoritis, metodologis, dan praktis dalam penyelesaian permasalahan optimisasi PMU pada sistem tenaga antara lain adalah sebagaimana berikut ini:

- a. Secara teoritis, penelitian ini mengembangkan model *Optimal PMU Placement* dengan memperluas perspektif OPP dari permasalahan minimasi jumlah PMU menjadi permasalahan multi-objective yang mempertimbangkan aspek jumlah perangkat, kualitas observability, measurement redundancy, dan komunikasi. Model tersebut memberikan kerangka yang lebih komprehensif untuk mengevaluasi kualitas konfigurasi PMU.
- b. Secara metodologis, penelitian ini memiliki kontribusi dalam bentuk pengembangan **Hybrid BFPA-BPSO** untuk permasalahan binary multi-objective OPP. Algoritma tersebut dirancang agar BFPA memperkuat exploration dan BPSO memperkuat exploitation,
- c. Dari perspektif sistem tenaga, penelitian menghasilkan metode untuk menentukan konfigurasi PMU yang memenuhi observability, memiliki redundancy yang lebih baik, menggunakan jumlah PMU secara efisien, dan mempertimbangkan kebutuhan komunikasi.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Phasor Measurement Unit dan Wide Area Measurement System**

Perkembangan sistem tenaga listrik modern membutuhkan sistem monitoring yang mampu menyediakan informasi kondisi sistem secara cepat, akurat, dan tersinkronisasi. *Phasor Measurement Unit* (PMU) merupakan salah satu perangkat utama dalam *Wide Area Measurement System* (WAMS) karena mampu menyediakan pengukuran fasor tegangan dan arus yang tersinkronisasi terhadap referensi waktu yang sama. Informasi tersebut dapat digunakan untuk *state estimation*, pemantauan stabilitas, deteksi gangguan, analisis kontingensi, dan peningkatan *situational awareness* sistem tenaga.

Permasalahan utama penerapan PMU adalah biaya perangkat, instalasi, infrastruktur komunikasi, dan pengelolaan data. Oleh karena itu, pemasangan PMU pada seluruh bus tidak selalu ekonomis. Permasalahan penentuan lokasi PMU yang memberikan observabilitas sistem dengan jumlah perangkat yang efisien dikenal sebagai *Optimal PMU Placement* (OPP). Kajian komprehensif mengenai OPP menunjukkan bahwa penelitian telah berkembang dari metode konvensional seperti integer programming menuju berbagai metode metaheuristik dan formulasi yang mempertimbangkan redundancy, contingency, komunikasi, serta aspek praktis WAMS. Dengan demikian, OPP pada sistem tenaga dapat dipandang sebagai permasalahan optimisasi kombinatorial dengan variabel keputusan biner. Karakteristik binary dan kombinatorial tersebut menjadi salah satu alasan penggunaan algoritma metaheuristik dalam penelitian OPP.

#### **2.2 Perkembangan Penelitian Optimal PMU Placement**

Penelitian OPP dalam lima tahun terakhir menunjukkan setidaknya lima arah perkembangan utama, yaitu: (1) minimasi jumlah PMU dan peningkatan observability, (2) peningkatan measurement redundancy, (3) multi-objective optimization, (4) integrasi biaya dan infrastruktur komunikasi, dan (5) peningkatan robustness terhadap contingency, kegagalan PMU, perubahan topologi, dan ketidakpastian state estimation. Perkembangan tersebut menunjukkan bahwa ukuran keberhasilan OPP tidak lagi cukup dinilai hanya berdasarkan jumlah PMU. Konfigurasi PMU yang memiliki jumlah perangkat minimum dapat memiliki kualitas yang berbeda dalam hal redundancy, robustness, biaya komunikasi, dan kualitas estimasi keadaan.

#### **2.3 Penelitian OPP Berbasis Jumlah PMU dan Redundancy**

Salah satu penelitian yang relevan pada periode awal tinjauan adalah Okendo, Wekesa, dan Saulo (2021), yang melakukan OPP pada jaringan transmisi Kenya dengan membandingkan metode *Depth-First*, MILP, dan Artificial Bee Colony (ABC). Penelitian tersebut secara eksplisit menggunakan *System Observability Redundancy Index* (SORI) sebagai ukuran redundancy. Hasilnya menunjukkan bahwa ABC dapat memberikan solusi dengan SORI yang lebih tinggi dibandingkan metode pembandingan pada kasus yang diteliti. Penelitian tersebut juga mempertimbangkan *Zero Injection Bus* (ZIB) dan menunjukkan bahwa inclusion ZIB dapat memengaruhi kebutuhan PMU. Penelitian tersebut mempertegas bahwa jumlah PMU minimum tidak cukup untuk menggambarkan kualitas suatu konfigurasi. SORI memberikan informasi tambahan mengenai berapa kali suatu bus dapat diamati oleh konfigurasi PMU.

Pada tahun yang sama, pendekatan *closed neighbourhood search* dikembangkan untuk memperoleh konfigurasi PMU dengan jumlah minimum sekaligus meningkatkan measurement redundancy. Metode tersebut menggunakan konsep graf seperti degree of vertex, degree of neighboring vertices, dan Bus Observability Index (BOI), kemudian mengevaluasi solusi menggunakan BOI dan SORI pada beberapa sistem IEEE. Penelitian tersebut memperkuat argumentasi bahwa OPP sebaiknya tidak hanya berorientasi pada jumlah PMU. Namun, pendekatan tersebut masih lebih berfokus pada hubungan topologi jaringan listrik dan belum menjadikan komunikasi sebagai objective yang terintegrasi.

## 2.4 Penelitian Multi-Objective Optimal PMU Placement

Perkembangan berikutnya adalah formulasi OPP sebagai permasalahan multi-objective. Penelitian mengenai multi-objective  $\mu$ PMU placement pada sistem distribusi menggunakan NSGA-II dan PROMETHEE-II untuk meminimalkan biaya instalasi dan memaksimalkan measurement redundancy. Penelitian tersebut menghasilkan Pareto-optimal solutions dan melakukan pemilihan solusi menggunakan metode multi-kriteria. Pendekatan ini penting karena menunjukkan bahwa konflik antara biaya dan redundancy lebih tepat direpresentasikan sebagai multi-objective optimization daripada digabungkan secara sederhana menjadi satu weighted objective.

Pada sisi lain, penelitian Cruz et al. (2022) merupakan salah satu penelitian yang sangat dekat dengan tema disertasi yang diusulkan. Penelitian tersebut mengembangkan multi-objective OPP dengan mempertimbangkan biaya PMU/komunikasi dan numerical observability. Selain itu, redundancy pada PMU placement maupun infrastruktur komunikasi juga diperhatikan. Solusi diperoleh dalam bentuk Pareto front dan diuji pada sistem besar, termasuk IEEE 300-bus, Polish 2383-bus, dan Brazilian 5771-bus.

## 2.5 Penelitian OPP dengan Pertimbangan State Estimation

Penelitian Chen et al. (2023) memperluas OPP dengan memasukkan berbagai constraint praktis, antara lain conventional measurements, keterbatasan channel PMU, ZIB, single-PMU-loss contingency, *state estimation error* (SEE), dan *maximum SEE variance*. Penelitian tersebut menggunakan robust (t)-distribution maximum likelihood estimator untuk menangani kemungkinan distribusi noise non-Gaussian. Selain itu, A-optimal dan G-optimal experimental criteria digunakan dalam formulasi state estimation. Pengujian dilakukan pada IEEE 14-, 30-, dan 118-bus serta sistem distribusi praktis di China. Penelitian tersebut menunjukkan perkembangan OPP dari sekadar *topological observability* menuju **quality of observability**, yaitu bagaimana konfigurasi PMU memengaruhi kualitas estimasi keadaan.

## 2.6 Penelitian OPP dengan Communication Cost

Aspek komunikasi semakin penting karena PMU merupakan bagian dari WAMS dan data PMU harus dikirim melalui jaringan komunikasi menuju PDC atau pusat kendali. Cruz et al. (2022) mengembangkan formulasi multi-objective yang memasukkan communication infrastructure ke dalam biaya total WAMS. Penelitian tersebut menggunakan graph theory untuk memodelkan biaya dan robustness jaringan komunikasi, serta numerical observability untuk mengevaluasi kualitas sistem pengukuran.

Penelitian tahun 2023 mengenai optimal PMU placement berbasis biaya dan risiko state estimation juga memasukkan biaya PMU, biaya infrastruktur, biaya komunikasi, serta PDC

ke dalam fungsi biaya. Model tersebut kemudian dikombinasikan dengan objective terkait critical measurement elements dan critical measurement sets dan diselesaikan menggunakan NSGA-II. Hasil penelitian tersebut memperlihatkan bahwa communication cost telah berkembang menjadi bagian dari formulasi OPP, bukan lagi sekadar biaya tambahan setelah penentuan lokasi PMU.

## **2.7 Penelitian OPP Berbasis Metaheuristic**

OPP merupakan permasalahan kombinatorial sehingga berbagai metode metaheuristik telah digunakan. Review state-of-the-art tahun 2022 mengelompokkan metode OPP ke dalam metode konvensional dan non-konvensional, termasuk genetic algorithm, particle swarm optimization, evolutionary algorithm, simulated annealing, dan berbagai algoritma pencarian lainnya. Review tersebut juga menekankan bahwa PMU placement dipengaruhi oleh biaya PMU, instalasi, PDC, komunikasi, dan kebutuhan observability.

Pada tahun 2023, Tshenyego et al. mengembangkan *Binary Firefly Algorithm* untuk OPP berbasis graph theory. Metode tersebut menggunakan node degree centrality dan mempertimbangkan ZIB serta single PMU outage. Penelitian menunjukkan kemampuan BFA dalam mendapatkan jumlah PMU yang kompetitif sekaligus mempertimbangkan robustness terhadap kehilangan PMU. Penelitian tersebut relevan dengan penelitian yang diusulkan karena menunjukkan bahwa representasi binary dan informasi topologi dapat digunakan untuk meningkatkan kemampuan metaheuristic dalam menyelesaikan OPP.

## **2.8 Perkembangan BPSO dan BFPA dalam OPP**

BPSO memiliki relevansi khusus terhadap OPP karena variabel keputusan berupa pemasangan atau tidak pemasangan PMU secara alami dapat direpresentasikan dalam bentuk binary. Literatur OPP telah lama menggunakan BPSO, dan pendekatan binary swarm tetap digunakan dalam penelitian-penelitian yang lebih baru. Sebagai contoh, studi  $\mu$ PMU pada sistem distribusi yang dipublikasikan pada 2025 membandingkan BPSO dan BGWO untuk penempatan  $\mu$ PMU serta mengevaluasi redundancy yang dihasilkan.

Di sisi lain, BFPA merupakan versi binary dari Flower Pollination Algorithm yang dapat digunakan pada permasalahan binary optimization. Penelusuran literatur menunjukkan bahwa BFPA telah digunakan dalam berbagai permasalahan optimisasi binary dan juga telah diterapkan pada OPP, antara lain melalui penelitian tahun 2021 mengenai *Improved Binary Flower Pollination Algorithm* untuk optimal PMU placement dan state estimation.

Baba et al. (2021) mengembangkan hybrid algorithm untuk OPP dengan menggabungkan Graph-Theoretic Procedure dan Recursive Algorithm untuk mengurangi jumlah PMU pada beberapa sistem IEEE.

## **2.9 Perkembangan Penelitian Tahun 2025**

Penelitian tahun 2025 menunjukkan kecenderungan kuat menuju multi-objective dan reliability-oriented PMU placement. Mahmoudi et al. mengembangkan pendekatan dua tahap berbasis Pareto multi-objective genetic algorithm untuk mendapatkan trade-off antara jumlah PMU dan redundancy menggunakan SORI. Pendekatan tersebut kemudian menggunakan mekanisme pengambilan keputusan untuk memilih konfigurasi akhir. Pada tahun yang sama, penelitian mengenai  $\mu$ PMU placement dan voltage estimation menggunakan BPSO dan BGWO serta mengevaluasi redundancy pada IEEE 69-bus system.

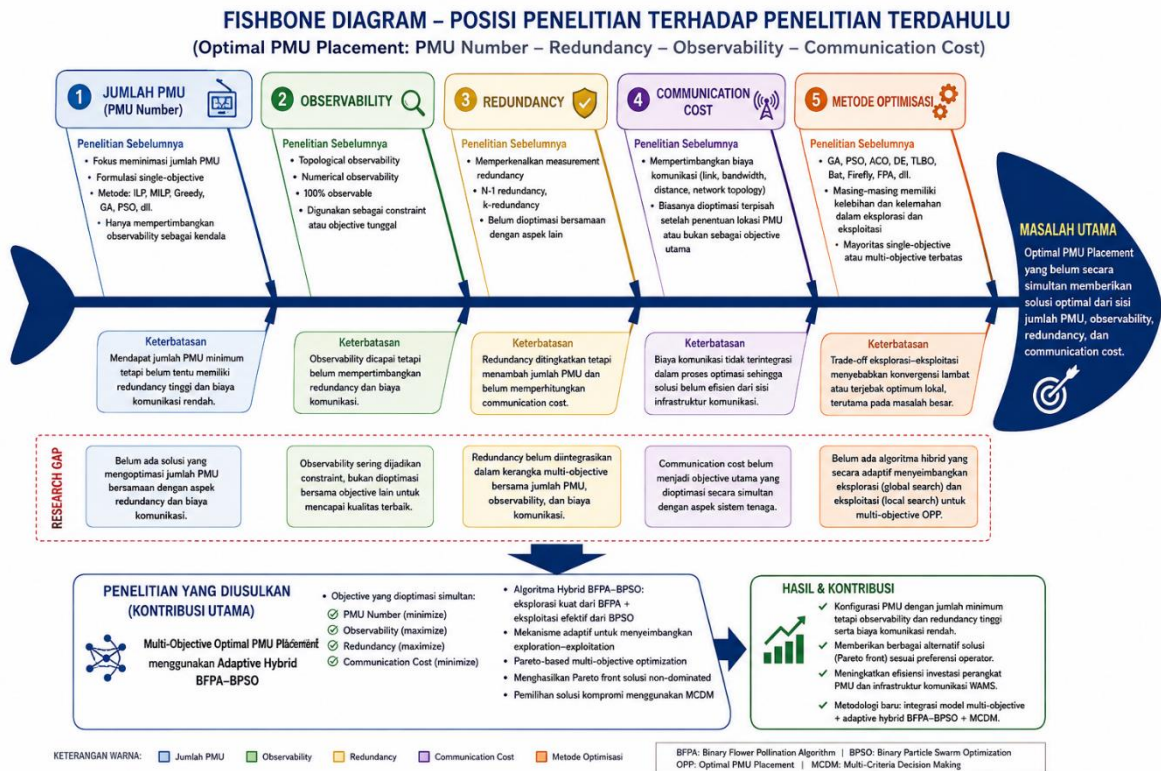
Hasilnya menunjukkan bahwa binary metaheuristic masih relevan untuk masalah placement, terutama pada sistem distribusi.

Selain itu, penelitian tahun 2025 mengenai *multi-objective optimal PMU placement using Binary Arithmetic Optimization Algorithm* mempertimbangkan minimasi installation cost dan maksimasi observability dengan constraint full-system observability dan budget. Perkembangan ini memperlihatkan bahwa penelitian OPP bergerak menuju formulasi multi-objective dengan algoritma binary metaheuristic.

## 2.12 State-of-the-Art

Berdasarkan penelitian 2021–2026, perkembangan OPP dapat dirangkum sebagai berikut.

| Penelitian                         | N <sub>PMU</sub> | Obs | Red | Cost <sub>Comm</sub> | Multiobyektif | Metode                           |
|------------------------------------|------------------|-----|-----|----------------------|---------------|----------------------------------|
| Okendo et al. (2021)               | ✓                | ✓   | ✓   | –                    | Terbatas      | ABC, MILP, Depth-First           |
| Closed Neighbourhood Search (2021) | ✓                | ✓   | ✓   | –                    | Terbatas      | Graph-based                      |
| Abdolahi et al. (2021)             | ✓                | ✓   | ✓   | ✓                    | ✓             | Reliability-based                |
| Cruz et al. (2022)                 | ✓                | ✓   | ✓   | ✓                    | ✓             | MOVNS / graph theory             |
| μPMU NSGA-II/PROMETHEE-II (2022)   | ✓                | ✓   | ✓   | ✓                    | ✓             | NSGA-II                          |
| Chen et al. (2023)                 | ✓                | ✓   | –   | ✓                    | Terbatas      | Mathematical optimization        |
| Energy Reports (2023)              | ✓                | ✓   | ✓   | ✓                    | ✓             | NSGA-II                          |
| Binary Firefly (2023)              | ✓                | ✓   | ✓   | –                    | Terbatas      | BFA                              |
| Ahmed et al. (2024)                | ✓                | ✓   | ✓   | –                    | Terbatas      | ILP + centrality                 |
| Wan et al. (2024)                  | ✓                | ✓   | ✓   | –                    | ✓             | μPMU placement                   |
| Mahmoudi et al. (2025)             | ✓                | ✓   | ✓   | –                    | ✓             | MOGA                             |
| BPSO/BGWO (2025)                   | ✓                | ✓   | ✓   | –                    | Terbatas      | BPSO/BGWO                        |
| BAOA (2025)                        | ✓                | ✓   | –   | –                    | ✓             | Binary AOA                       |
| <b>Penelitian yang diusulkan</b>   | ✓                | ✓   | ✓   | ✓                    | ✓             | <b>Adaptive Hybrid BFPA-BPSO</b> |

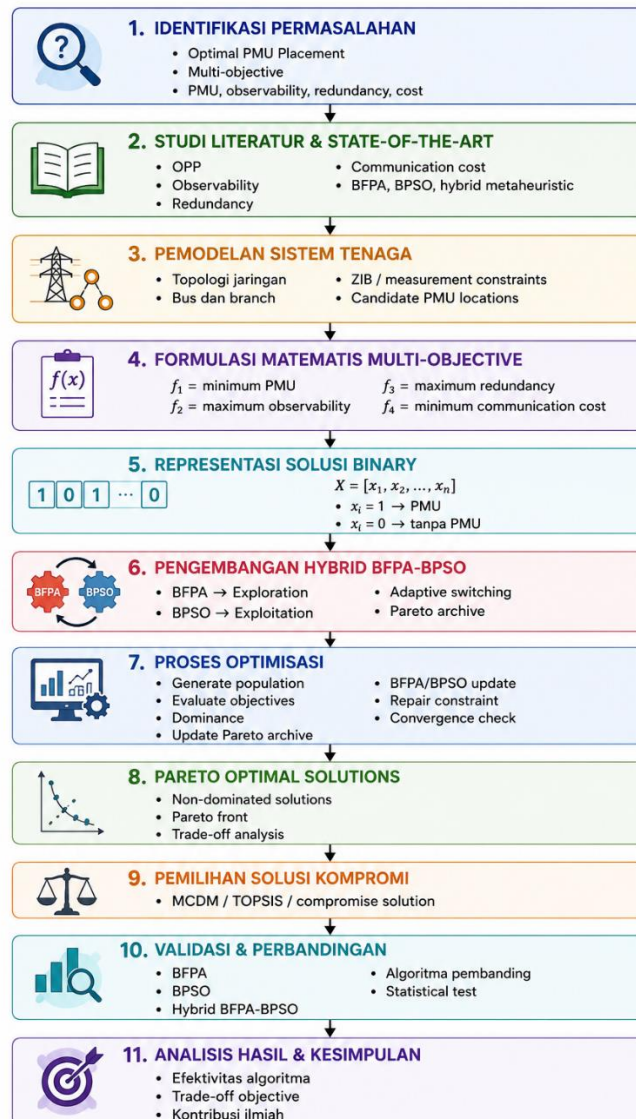


Gambar 2.1 Fishboke diagram

### BAB III

## METODE PELAKSANAAN PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan mengembangkan metode optimisasi penempatan PMU secara optimal dengan mempertimbangkan beberapa tujuan untuk meminimalkan jumlah PMU, memaksimalkan system observability, memaksimalkan measurement redundancy, dan meminimalkan communication cost. Permasalahan tersebut diformulasikan sebagai **multi-objective binary optimization problem** karena keputusan pada setiap bus bersifat biner, yaitu dipasang PMU atau tidak dipasang PMU. Metode penyelesaian yang dikembangkan adalah **Adaptive Hybrid Binary Flower Pollination Algorithm–Binary Particle Swarm Optimization (BFPA-BPSO)**. BFPA digunakan untuk memperkuat kemampuan *exploration*, sedangkan BPSO digunakan untuk memperkuat *exploitation*. Mekanisme adaptif digunakan untuk mengatur keseimbangan kedua mekanisme tersebut selama proses pencarian solusi. Secara umum, tahapan penelitian yang digunakan adalah sebagaimana disajikan pada gambar 3.1.



Gambar 3.1. Tahapan penelitian

### 3.1 Identifikasi dan Perumusan Permasalahan

Tahap pertama dilakukan untuk mendefinisikan permasalahan OPP yang akan diselesaikan. Permasalahan dasarnya adalah bagaimana menentukan lokasi dan jumlah PMU yang menghasilkan konfigurasi sistem pengukuran yang optimal dengan mempertimbangkan jumlah PMU, observability, redundancy, dan communication cost secara simultan. Permasalahan tersebut merupakan permasalahan kombinatorial karena setiap bus mempunyai dua kemungkinan keputusan:

$$x_i \in \{0,1\}$$

dengan:

$$x_i = 1$$

menunjukkan bahwa PMU dipasang pada bus (i), sedangkan:

$$x_i = 0$$

menunjukkan bahwa PMU tidak dipasang pada bus tersebut.

### 3.2 Formulasi Matematis Multi-Objective

Ini merupakan salah satu tahap terpenting dalam penelitian dimana empat objective optimisasi harus dirumuskan dalam bentuk persamaan matematis yang nantinya akan digunakan dalam menyusun multi obyektif dalam optimisasi.

#### 3.2.1 Objective 1 — Minimasi Jumlah PMU

Jumlah PMU dinyatakan dalam bentuk:

$$N_{PMU} = \sum_{i=1}^{N_{bus}} x_i$$

Dimana:

$N_{PMU}$  : jumlah PMU

$N_{bus}$  : jumlah bus dalam jaringan sistem tenaga

$x_i$  : status PMU pada bus i, (0 jika tidak terpasang PMU dan 1 jika terpasang PMU)

Obyektif 1 adalah untuk meminimalkan jumlah PMU sehingga bisa dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$f_{obj1} = \min \left\{ \sum_{i=1}^{N_{bus}} x_i \right\}$$

Semakin kecil  $f_{obj1}$ , semakin ekonomis jumlah perangkat PMU yang digunakan.

#### 3.2.2 Objective 2 — Maksimasi Observability

Untuk setiap bus (i), dapat didefinisikan variabel observability mengikuti persamaan berikut:

$$O_i(X) = \begin{cases} 1, & \text{bus } i \text{ dapat terobservasi} \\ 0, & \text{lainnya} \end{cases}$$

Total jumlah bus terobservasi dapat dinyatakan sebagai akumulasi dari  $O_i(X)$  dan dinyatakan sebagai persamaan berikut:

$$O(X) = \sum_{i=1}^{N_{bus}} O_i(X)$$

Obyektif 2 adalah memaksimalkan observabilitas bus yang ada dalam jaringan sistem tenaga sehingga dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan berikut:

$$f_{obj2} = \max \left\{ \sum_{i=1}^{N_{bus}} O_i(X) \right\}$$

Bentuk tersebut dapat dinyatakan sebagai permasalahan minimisasi sebagai berikut:

$$f_{obj2} = \min \left\{ N_{bus} - \sum_{i=1}^{N_{bus}} O_i(X) \right\}$$

Jika suatu sistem terobservasi secara penuh dimana seluruh bus dalam sistem tenaga dapat terobservasi:

$$N_{bus} = \sum_{i=1}^{N_{bus}} O_i(X)$$

### 3.2.3 Objective 3 — Maksimasi Redundancy

Redundancy dapat dihitung berdasarkan jumlah alternatif pengukuran yang tersedia pada setiap bus. Jika jumlah pengukuran yang tersedia pada tiap bus dalam jaringan sistem tenaga dinyatakan sebagai  $r_i(X)$ , maka indeks redundancy total dapat dinyatakan sebagai persamaan berikut:

$$R(X) = \sum_{i=1}^{N_{bus}} r_i(X)$$

Obyektif 3 adalah memaksimalkan indeks redundancy, sehingga dapat dinyatakan sebagai persamaan berikut:

$$f_{obj3} = \max \left\{ \sum_{i=1}^{N_{bus}} r_i(X) \right\}$$

Jika dinyatakan sebagai permasalahan minimisasi, obyektif 3 menjadi sebagai berikut:

$$f_{obj3} = \min \left\{ - \left( \sum_{i=1}^{N_{bus}} r_i(X) \right) \right\}$$

### 3.2.4 Objective 4 — Minimasi Communication Cost

Jaringan komunikasi yang digunakan dalam akuisisi data hasil pengukuran PMU dapat dimodelkan sebagai graph:

$$G_c = \{V_c, E_c\}$$

dengan:

$V_c$  = node komunikasi;

$E_c$  = link komunikasi.

Communication cost dapat dirumuskan berdasarkan jarak, jumlah link, kapasitas, atau bobot biaya masing-masing link. Model sederhana dari communication cost dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$C_{comm}(X) = \sum_{(i,j) \in E_c} c_{ij} y_{ij}$$

dengan:

$c_{ij}$  = biaya link komunikasi  $i - j$

$y_{ij}$  = variabel apakah link digunakan

Obyektif 4 adalah meminimalkan coomunication cost, sehingga dapat dinyatakan ke dalam persamaan berikut:

$$f_{obj4} = \min \left\{ \sum_{(i,j) \in E_c} c_{ij} y_{ij} \right\}$$

### 3.3 Formulasi Multi-Objective

Multiobyektik dari optimisasi didapatkan dengan mengkombinasikan keseluruhan obyektif yang ada dan dijelaskan pada subbab sebelumnya. Dengan demikian, permasalahan penelitian dirumuskan sebagai:

$$F_{obj} = \min\{N_{PMU}, -O(X), -R(X), C_{comm}(X)\}$$

Dengan:

$N_{PMU}$  = jumlah PMU

$O(X)$  = indeks observabilitas bus dalam jaringan sistem tenaga

$R(X)$  = indeks redundancy

$C_{comm}(X)$  = communication cost

dengan constraint:

$$x_i \in \{0,1\}$$

dan:

$$O(X) = N_{bus}$$

untuk kondisi full observability.

### 3.4 Representasi Binary

Setiap kandidat solusi pemasangan PMU direpresentasikan sebagai kromosom/vektor binary seperti berikut:

$$X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_{N_{bus}}]$$

Dimana nilai  $x_i$  adalah mengacu pada persamaan berikut:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{PMU terpasang pada bus } i \\ 0, & \text{PMU tidak terpasang pada bus } i \end{cases}$$

Representasi ini menjadi dasar bagi BFPA maupun BPSO.

### 3.5 Inisialisasi Populasi

Sejumlah  $P$  kandidat solusi dibangkitkan secara random atau *semi-random*.

$$Population = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_P\}$$

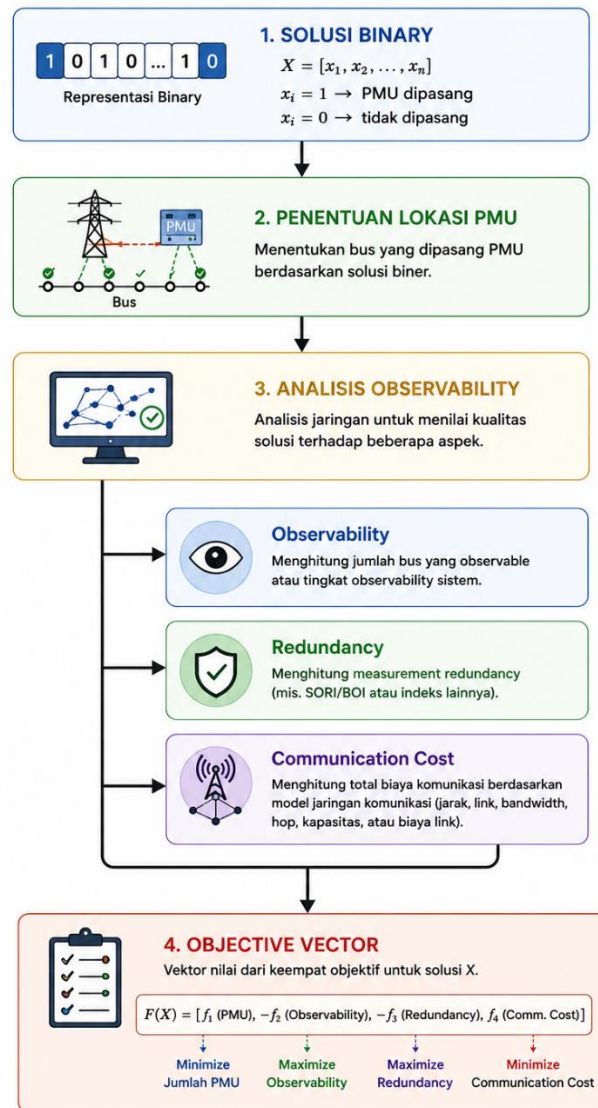
Untuk meningkatkan kualitas populasi awal dapat dilakukan dengan **hybrid initialization** diantaranya random initialization, topology-based initialization, degree-based initialization, atau centrality-based initialization.

### 3.6 Evaluasi Fitness

Setiap individu yang ada dalam populasi dievaluasi terhadap empat objective:

$$F(X) = [f_{obj1}, f_{obj2}, f_{obj3}, f_{obj4}]$$

Tahapan evaluasi fitness dilakukan mengikuti gambar berikut:



Gambar 3.2 Evaluasi Fitness

### 3.7 Pengembangan Hybrid BFPA-BPSO

Binary Flower Pollination Algorithm (BFPA) dan Binary Particles Swarm Optimization Algorithm (BPSO) masing-masing merupakan varian biner dari algoritma metaheuristik dari FPA dan PSO. Algoritma varian biner biasanya digunakan untuk optimisasi yang menghendaki solusi yang bersifat biner (0,1) seperti pada penelitian ini dimana solusi yang diinginkan adalah untuk menentukan apakah pada suatu bus perlu dipasang PMU atau tidak agar mendapatkan kondisi yang paling optimal sesuai obyektiif yang digunakan. Hibridasi BFPA dan BPSO dilakukan untuk mendapatkan kinerja yang lebih baik dalam optimisasi multiobyektif terhadap pemasangan PMU pada jaringan sistem tenaga listrik.

#### 3.7.1 Peran BFPA

BFPA digunakan untuk menghasilkan eksplorasi ruang pencarian solusi optimal. Tujuan eksplorasi tersebut adalah untuk mencari daerah baru dalam ruang solusi. Secara konseptual dapat dinyatakan sebagai:

$$X_i^{t+1} = BFPA(X_i^t, X_{best}^t)$$

BFPA diharapkan mampu untuk meningkatkan diversity, menghindari premature convergence, memperluas eksplorasi, dan menemukan daerah Pareto yang belum dieksplorasi.

### 3.7.2 Peran BPSO

BPSO digunakan untuk memperkuat exploitation terhadap solusi yang sudah baik. Velocity diperbarui menggunakan model matematis sebagai berikut:

$$v_i^{t+1} = wv_i^t + c_1r_1(pbest_i - x_i) + c_2r_2(gbest_i - x_i)$$

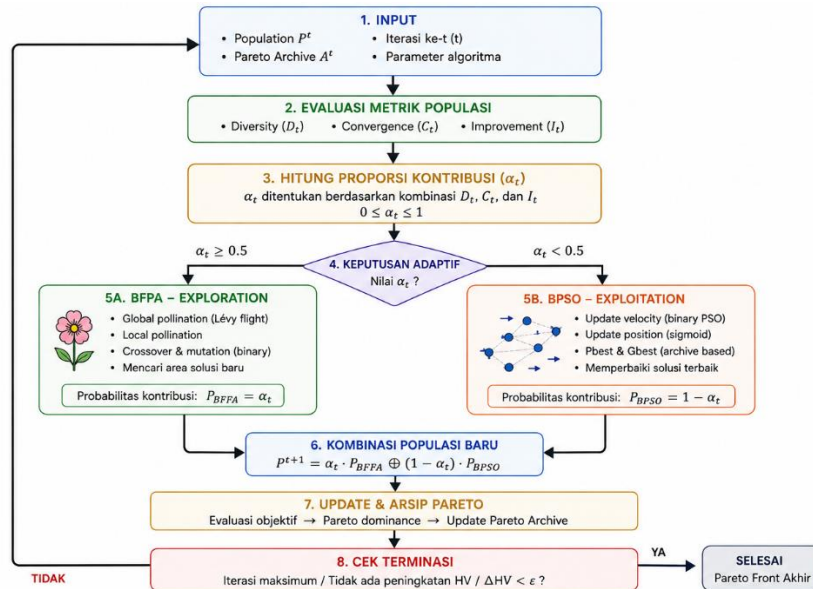
Kemudian velocity ditransformasikan menjadi probabilitas binary dan posisi individu populasi diperbarui mengikuti persamaan berikut:

$$x_i^{t+1} = \begin{cases} 1, & rand < S(v_i^{t+1}) \\ 0, & lainnya \end{cases}$$

dengan  $S(v)$  merupakan fungsi sigmoid.

### 3.7.3 Mekanisme Adaptive Hybrid BFPA dan BPSO

Mekanisme adaptive hybrid dilakukan dengan menerapkan *adaptive switching mechanism* untuk menentukan algoritma mana yang diterapkan antara BFPA untuk meningkatkan exploitasi dan BPSO untuk meningkatkan eksplorasi. Gambar 3.3 menjelaskan mekanisme pertukaran secara adaptive antara BFPA dan BPSO.



Gambar 3.3 Adaptive switching mechanism BFPA (exploration) dan BPSO (exploitation)

### 3.8 Pareto Dominance dan Archive

Pada kasus multi-objective optimization, tidak selalu terdapat satu solusi yang terbaik untuk seluruh objective. Pada tabel 3.1 menyajikan 2 contoh solusi A dan B yang sama-sama non-dominated oleh karena itu digunakan **Pareto dominance**.

Tabel 3.1 Contoh solusi A dan B yang berbeda karakteristiknya

| Parameter          | Solusi A | Solusi B      |
|--------------------|----------|---------------|
| Jumlah PMU         | 8        | 10            |
| Redundancy         | Tinggi   | Sangat tinggi |
| Communication Cost | Tinggi   | Rendah        |

Solusi (A) mendominasi (B) jika:

$$f_k(A) \leq f_k(B)$$

untuk seluruh objective minimasi dan terdapat setidaknya satu objective:

$$f_k(A) < f_k(B)$$

Solusi non-dominated disimpan dalam pareto archive.

### 3.9 Kriteria Terminasi

Algoritma dihentikan apabila memenuhi salah satu kondisi:

Kondisi 1 : Jumlah iterasi maksimum:  $t = t_{max}$

Kondisi 2 : Tidak terjadi peningkatan kualitas solusi dalam populasi selama (K) iterasi.

### 3.10 Validasi Algoritma

Untuk tujuan validasi terhadap hasil dari algoritma hybrid BFPA-BPSO dilakukan melalui perbandingan terhadap hasil dari algoritma dasar BFPA dan BPSO. Selain hal tersebut juga dilakukan validasi secara statistik dengan cara melakukan pengujian secara berulang sebanyak 30 kali terhadap algoritma hybrid BFPA-BPSO. Dari hasil pengulangan tersebut dilakukan perhitungan nilai mean, standard deviation, median, minimum, dan maximum. Dengan demikian, klaim bahwa Hybrid BFPA-BPSO lebih baik tidak hanya berdasarkan satu hasil eksperimen.

Analisis sensitivitas dilakukan terhadap parameter algoritma. Pengujian dilakukan dengan perubahan terhadap parameter algoritma diantaranya adalah population size, maximum iteration, inertia weight, c1, c2, switching parameter, dan Lévy flight parameter BFPA. Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui parameter yang menghasilkan performa terbaik sekaligus menguji robustness algoritma yang diusulkan.

Validasi akhir dilakukan dengan menguji kinerja algoritma untuk jaringan sistem tenaga yang berbeda dan memiliki konfigurasi yang lebih kompleks dengan jumlah bus yang lebih banyak hingga 118 bus. Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui kemampuan algoritma hybrid BFPA-BPSO terhadap kasus optimisasi yang kompleks.

### 3.11 Ringkasan Metode Penelitian

Berdasarkan penjelasan pada sub-bab sebelumnya, metode penelitian yang dilakukan dapat dirangkum dalam tabel 3.2 berikut ini.

Tabel 3.2 Ringkasan metode penelitian

| Tahap | Kegiatan             | Input                 | Proses                   | Output                |
|-------|----------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| 1     | Identifikasi masalah | Permasalahan OPP      | Identifikasi gap         | Rumusan masalah       |
| 2     | Pemodelan sistem     | Data jaringan         | Graph modeling           | Model sistem          |
| 3     | Formulasi objective  | Model sistem          | Mathematical formulation | Multi-objective model |
| 4     | Binary encoding      | Candidate buses       | Binary representation    | Solution vector       |
| 5     | Initialization       | System data           | Population generation    | Initial population    |
| 6     | Fitness evaluation   | Population            | Objective calculation    | Fitness vector        |
| 7     | BFPA                 | Population            | Exploration              | Candidate solutions   |
| 8     | BPSO                 | Population            | Exploitation             | Candidate solutions   |
| 9     | Adaptive hybrid      | BFPA+BPSO             | Adaptive switching       | New population        |
| 10    | Termination          | Iteration/convergence | Stopping criterion       | Final Pareto front    |
| 11    | Validation           | Solution              | Contingency/robustness   | Validated solution    |
| 12    | Comparison           | Multiple algorithms   | Statistical test         | Performance ranking   |
| 13    | Sensitivity          | Parameters            | Parameter analysis       | Robustness            |

## BAB 4 HASIL PENELITIAN

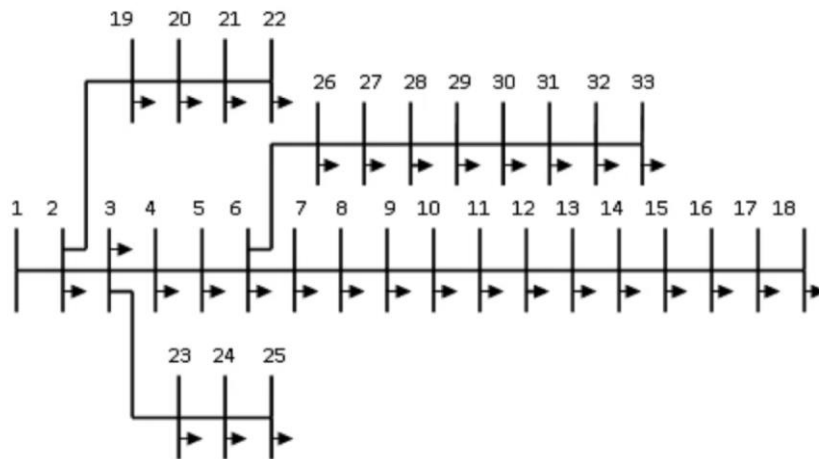
Progres capaian hasil penelitian hingga saat ini adalah telah dilakukan simulasi optimisasi PMU dengan detail sebagaimana disajikan pada tabel 4.1 berikut ini.

Tabel 4.1 Progres capaian hasil penelitian

| No | Item                                  | Progres saat ini                                                                                                         | Target akhir                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|----|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Jaringan sistem tenaga yang digunakan | Radial ditribution system (RDS) 33 bus                                                                                   | Radial ditribution system IEEE 118 bus                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 2  | Obyektif                              | Multi-obyektif:<br>- jumlah PMU ( $N_{PMU}$ )<br>- observabilitas (O)<br>- Redundancy<br><br>dengan Weighted Sum Methode | Multi-obyektif:<br>- jumlah PMU ( $N_{PMU}$ )<br>- observabilitas (O)<br>- redundancy (R)<br>- communication cost ( $Cost_{comm}$ )                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 3  | Algoritma                             | BPSO                                                                                                                     | Hybrid BFPA-BPSO dan Adaptive Hybrid BFPA-BPSO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 4  | Validasi                              | Belum dilakukan                                                                                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Perbandingan algoritma hybrid BFPA-BPSO terhadap algoritma dasar BFPA dan BPSO</li> <li>- Validasi statistik melalui pengulangan uji terhadap algoritma yang diusulkan</li> <li>- Analisa sensitivitas algoritma terhadap perubahan parameter algoritma</li> <li>- Uji kasus untuk optimisasi pada sistem tenaga listrik yang lebih besar.</li> </ul> |

### 4.2 Optimisasi PMU pada Jaringan Distribusi Radial IEEE 33-bus

Progres pelaksanaan penelitian ini adalah simulasi optimisasi penempatan PMU pada jaringan sistem distribusi radial (RDS) 33-bus. Gambar 4.1 menyajikan konfigurasi RDS 33-bus dan tabel 4.2 menyajikan spesifikasi data saluran yang digunakan.



Gambar 4.1 Jaringan distribusi radial IEEE 33 bus

Tabel 4.2 Data saluran pada jaringan distribusi radial IEEE 33 bus

| Branch | In-bus | Out-bus | R (Ohm) | X (Ohm) |
|--------|--------|---------|---------|---------|
| 1      | 1      | 2       | 0.0922  | 0.0470  |
| 2      | 2      | 3       | 0.4930  | 0.2511  |
| 3      | 3      | 4       | 0.3660  | 0.1864  |
| 4      | 4      | 5       | 0.3811  | 0.1941  |
| 5      | 5      | 6       | 0.8190  | 0.7070  |
| 6      | 6      | 7       | 0.1872  | 0.6188  |
| 7      | 7      | 8       | 0.7114  | 0.2351  |
| 8      | 8      | 9       | 1.0300  | 0.7400  |
| 9      | 9      | 10      | 1.0400  | 0.7400  |
| 10     | 10     | 11      | 0.1966  | 0.0650  |
| 11     | 11     | 12      | 0.3744  | 0.1238  |
| 12     | 12     | 13      | 1.4680  | 1.1550  |
| 13     | 13     | 14      | 0.5416  | 0.7129  |
| 14     | 14     | 15      | 0.5910  | 0.5260  |
| 15     | 15     | 16      | 0.7463  | 0.5450  |
| 16     | 16     | 17      | 1.2890  | 1.7210  |
| 17     | 17     | 18      | 0.7320  | 0.5740  |
| 18     | 2      | 19      | 0.1640  | 0.1565  |
| 19     | 19     | 20      | 1.5042  | 1.3554  |
| 20     | 20     | 21      | 0.4095  | 0.4784  |
| 21     | 21     | 22      | 0.7089  | 0.9373  |
| 22     | 3      | 23      | 0.4512  | 0.3083  |
| 23     | 23     | 24      | 0.8980  | 0.7091  |
| 24     | 24     | 25      | 0.8960  | 0.7011  |
| 25     | 6      | 26      | 0.2030  | 0.1034  |
| 26     | 26     | 27      | 0.2842  | 0.1447  |
| 27     | 27     | 28      | 1.0590  | 0.9337  |
| 28     | 29     | 29      | 0.8042  | 0.7006  |
| 29     | 29     | 30      | 0.5075  | 0.2585  |
| 30     | 30     | 31      | 0.9744  | 0.9630  |
| 31     | 31     | 32      | 0.3105  | 0.3619  |
| 32     | 32     | 33      | 0.3410  | 0.5302  |

Hasil optimisasi PMU pada sistem RDS 33-bus adalah seperti yang disajikan pada tabel 4.3 berikut ini.

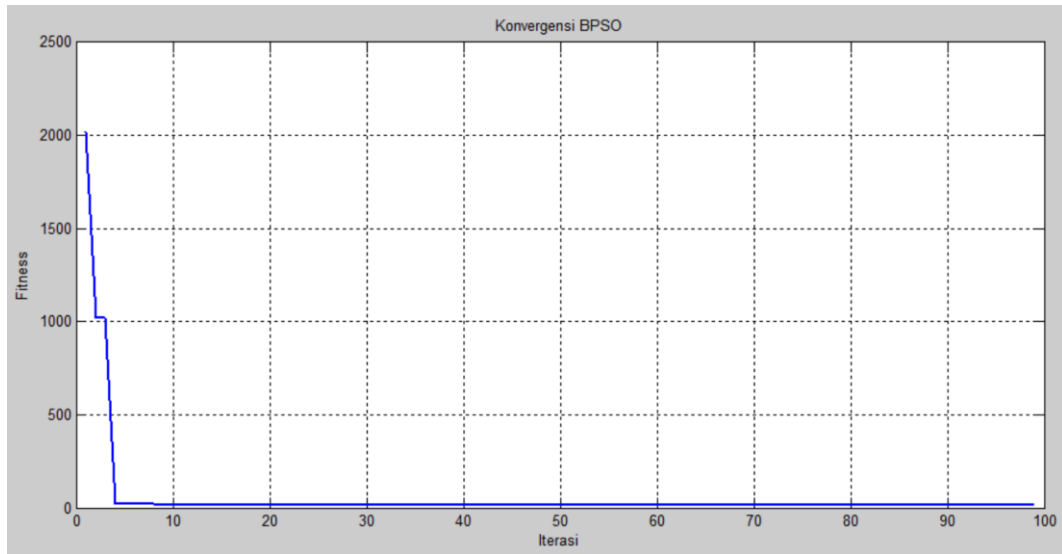
Tabel 4.3 Hasil optimisasi PMU pada RDS 33-bus dengan algoritma BPSO

| Bus | Status PMU | Observabilitas | Redundancy |
|-----|------------|----------------|------------|
| 1   | 1          | 1              | 2          |
| 2   | 1          | 1              | 2          |
| 3   | 0          | 1              | 3          |
| 4   | 1          | 1              | 1          |
| 5   | 0          | 1              | 2          |
| 6   | 1          | 1              | 2          |
| 7   | 0          | 1              | 1          |
| 8   | 0          | 1              | 1          |
| 9   | 1          | 1              | 1          |
| 10  | 0          | 1              | 1          |
| 11  | 0          | 1              | 1          |
| 12  | 1          | 1              | 1          |
| 13  | 0          | 1              | 1          |
| 14  | 0          | 1              | 1          |
| 15  | 1          | 1              | 1          |
| 16  | 0          | 1              | 1          |
| 17  | 0          | 1              | 1          |
| 18  | 1          | 1              | 1          |
| 19  | 0          | 1              | 1          |
| 20  | 0          | 1              | 1          |
| 21  | 1          | 1              | 1          |
| 22  | 0          | 1              | 1          |
| 23  | 1          | 1              | 1          |
| 24  | 0          | 1              | 2          |
| 25  | 1          | 1              | 1          |
| 26  | 1          | 1              | 2          |
| 27  | 0          | 1              | 1          |
| 28  | 0          | 1              | 1          |
| 29  | 1          | 1              | 1          |
| 30  | 0          | 1              | 1          |
| 31  | 0          | 1              | 1          |
| 32  | 1          | 1              | 1          |
| 33  | 0          | 1              | 1          |

Keterangan tabel :

- Status PMU: 0 tidak terpasang dan 1 terpasang
- Observabilitas: 0 tidak terobservasi dan 1 terobservasi
- Redundancy menunjukkan jumlah alternatif observasi yang tersedia

Konvergensi algoritma BPSO adalah sebagaimana ditunjukkan pada gambar 4.2.



Gambar 4.2. Konvergensi algoritma BPSO pada optimisasi PMU untuk RDS 33-bus

### 4.3 Rencana Tindak Lanjut Penelitian

Dalam upaya menyelesaikan penelitian, pelaksanaan tahap penelitian selanjutnya adalah sebagaimana dijelaskan pada tabel 4.4.

| No | Tahapan                             | Kegiatan                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|----|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Algoritma BFPA                      | Pembuatan kode program algoritma BFPA untuk optimisasi PMU pada sistem RDS 33-bus.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 2  | Hibridasi Algoritma BFPA-BPSO       | Pembuatan kode program algoritma hybrid BFPA-BPSO untuk optimisasi PMU pada sistem RDS 33-bus.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 3  | Validasi Algoritma hybrid BFPA-BPSO | Uji validasi algoritma hybrid BFPA-BPSO melalui: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Perbandingan dengan algoritma dasar BFPA dan BPSO</li> <li>- Uji statistik dengan melakukan pengulangan dan mengamati konsistensi hasil optimisasi</li> <li>- Uji sensitivitas terhadap perubahan parameter algoritma</li> <li>- Uji ketangguhan dengan menerapkan pada sistem yang lebih besar yaitu RDS 118 bus</li> </ul> |
| 4  | Laporan akhir                       | Penyusunan laporan akhir                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 5  | Publikasi                           | Penyusunan artikel publikasi di Jurnal                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Saravanan, S. Das, S. Sikri, and D. P. Kothari, "A solution to the unit commitment problem-a review," *Front. Energy*, vol. 7, no. 2, pp. 223–236, 2013, doi: 10.1007/s11708-013-0240-3.
- [2] D. Sharma, A. Trivedi, D. Srinivasan, and L. Thillainathan, "Multi-agent modeling for solving profit based unit commitment problem," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 13, no. 8, pp. 3751–3761, 2013, doi: 10.1016/j.asoc.2013.04.001.
- [3] M. Ghosh, S. Kumar, S. Mandal, and K. K. Mandal, "Optimal sizing and placement of DG units in radial distribution system using cuckoo search algorithm," *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 12, no. Special Issue 1, pp. 362–369, 2017, [Online]. Available: <https://www.ijrer.org/ijrer/index.php/ijrer/article/view/6666>
- [4] I. Abdou and M. Tkouat, "Unit commitment problem in electrical power system: A literature review," *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 8, no. 3, pp. 1357–1372, 2018, doi: 10.11591/ijece.v8i3.pp1357-1372.
- [5] S. Y. Abujarad, M. W. Mustafa, and J. J. Jamian, "Recent approaches of unit commitment in the presence of intermittent renewable energy resources: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 70, no. October 2015, pp. 215–223, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.246.
- [6] Allen J. Wood, Bruce F Wollenberg, and Gerald B. Sheble, *Power Generation, Operation, and Control*, Third. John Wiley, 2014.
- [7] R. S. Wibowo, K. R. Firmansyah, N. K. Aryani, and A. Soeprijanto, "Dynamic economic dispatch of hybrid microgrid with energy storage using quadratic programming," *IEEE Reg. 10 Annu. Int. Conf. Proceedings/TENCON*, no. 3, pp. 667–670, 2017, doi: 10.1109/TENCON.2016.7848086.
- [8] B. Banthasit, C. Jamroen, and S. Dechanupaprittha, "Optimal Generation Scheduling of Power System for Maximum Renewable Energy Harvesting and Power Losses Minimization," vol. 8, no. 4, pp. 1954–1966, 2018, doi: 10.11591/ijece.v8i4.pp1954-1966.
- [9] L. Yang, C. Zhang, J. Jian, K. Meng, Y. Xu, and Z. Dong, "A novel projected two-binary-variable formulation for unit commitment in power systems," *Appl. Energy*, vol. 187, pp. 732–745, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.11.096.
- [10] Manabjyoti Daimari and Dr. Barnali Goswami, "Firefly based Unit Commitment," *Int. J. Eng. Res.*, vol. V5, no. 12, pp. 221–225, 2016, doi: 10.17577/ijertv5is120201.
- [11] I. G. Damousis, A. G. Bakirtzis, and P. S. Dokopoulos, "A solution to the unit-commitment problem using integer-coded genetic algorithm," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 2, pp. 1165–1172, 2004, doi: 10.1109/TPWRS.2003.821625.
- [12] K. Selvakumar, T. Venkatesan, and M. Y. Sanavullah, "Price based unit commitment problem solution using shuffled frog leaping algorithm," *IEEE-International Conf. Adv. Eng. Sci. Manag. ICAESM-2012*, vol. 26, no. 2, pp. 794–799, 2012.
- [13] T. Senjyu, K. Shimabukuro, K. Uezato, and T. Funabashi, "A fast technique for unit commitment problem by extended priority list," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 2, pp. 882–888, 2003, doi: 10.1109/TPWRS.2003.811000.

- [14] B. M. Hussein and A. S. Jaber, "Unit commitment based on modified firefly algorithm," *Meas. Control*, vol. 53, no. 3–4, pp. 320–327, 2020, doi: 10.1177/0020294019890630.
- [15] S. Elsaiah, M. Benidris, and J. Mitra, "Analytical approach for placement and sizing of distributed generation on distribution systems," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 8, no. 6, pp. 1039–1049, 2014, doi: 10.1049/iet-gtd.2013.0803.
- [16] R. Syahputra, I. Robandi, and M. Ashari, "Performance improvement of radial distribution network with distributed generation integration using extended Particle Swarm Optimization algorithm," *Int. Rev. Electr. Eng.*, vol. 10, no. 2, pp. 293–304, 2015, doi: 10.15866/iree.v10i2.5410.
- [17] K. Mahesh, P. Al Nallagownden, and I. Al Elamvazuthi, "Optimal placement and sizing of DG in distribution system using accelerated PSO for power loss minimization," in *2015 IEEE Conference on Energy Conversion, CENCON 2015*, IEEE Explore, 2015, pp. 193–198. doi: 10.1109/CENCON.2015.7409538.
- [18] A. El-Fergany, "Study impact of various load models on DG placement and sizing using backtracking search algorithm," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 30, pp. 803–811, 2015, doi: 10.1016/j.asoc.2015.02.028.
- [19] A. S. Hassan, Y. Sun, and Z. Wang, "Multi-objective for optimal placement and sizing DG units in reducing loss of power and enhancing voltage profile using BPSO-SLFA," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 1581–1589, 2020, doi: 10.1016/j.egyr.2020.06.013.
- [20] S. A. ChithraDevi, L. Lakshminarasimman, and R. Balamurugan, "Stud Krill herd Algorithm for multiple DG placement and sizing in a radial distribution system," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 20, no. 2, pp. 748–759, 2017, doi: 10.1016/j.jestch.2016.11.009.
- [21] M. C. V. Suresh and J. B. Edward, "A hybrid algorithm based optimal placement of DG units for loss reduction in the distribution system," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 91, p. 106191, 2020, doi: 10.1016/j.asoc.2020.106191.
- [22] Y. Y. Zakaria, R. A. Swief, N. H. El-Amary, and A. M. Ibrahim, "Optimal Distributed Generation Allocation and Sizing Using Genetic and Ant Colony Algorithms," in *International Conference on Advanced Technology and Applied Sciences (ICaTAS 2019)*, IOP, 2020. doi: 10.1088/1742-6596/1447/1/012023.
- [23] M. H. Moradi and M. Abedini, "A combination of genetic algorithm and particle swarm optimization for optimal DG location and sizing in distribution systems," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 34, no. 1, pp. 66–74, 2012, doi: 10.1016/j.ijepes.2011.08.023.
- [24] I. Hussain and A. K. Roy, "Optimal size and location of distributed generations using Differential Evolution (DE)," *Proc. - 2012 2nd Natl. Conf. Comput. Intell. Signal Process. CISP 2012*, no. 1, pp. 57–61, 2012, doi: 10.1109/NCCISP.2012.6189708.
- [25] M. Rostamzadeh, K. Valipour, S. J. Shenava, M. Khalilpour, and N. Razmjoooy, "Optimal location and capacity of multi-distributed generation for loss reduction and voltage profile improvement using imperialist competitive algorithm," *Artif. Intell. Res.*, vol. 1, no. 2, p. 56, 2012, doi: 10.5430/air.v1n2p56.

