

BAB I. PENDAHULUAN

1.1. Latar belakang

Energi listrik menghadapi tantangan untuk memenuhi permintaan listrik yang semakin meningkat sekaligus menurunkan emisi karbon, ini sejalan dengan target bauran energi nasional Indonesia sebesar 31% pada tahun 2030 [1]. Di antara berbagai teknologi energi baru terbarukan (EBT), *Photovoltaic* (PV) menjadi komponen utama dalam transisi energi karena penurunan biaya investasi yang signifikan dan kemudahan perluasan infrastruktur instalasinya. Integrasi PV yang masif ini merupakan langkah krusial untuk menekan emisi karbon dan mencapai target keberlanjutan energi nasional[2], [3]. Namun, integrasi PV berskala besar ke dalam jaringan listrik menghadirkan tantangan teknis yang kompleks bagi operator sistem, seperti PLN.

Karakteristik sumber energi intermiten atau tidak terus menerus ada pada PV dan bersifat fluktuatif akibat kondisi cuaca, menciptakan perilaku stokastik atau ketidakpastian dalam profil daya yang dihasilkan.[4], [5]. Oleh karena ketidakpastian ini, muncul potensi mengganggu stabilitas tegangan, keamanan operasional, dan keandalan sistem tenaga listrik yang selama ini dirancang untuk pembangkitan konvensional yang berfungsi sebagai penyedia listrik utama yang stabil dan dapat diprediksi untuk memenuhi beban listrik dasar. Berbeda dengan pembangkit tersebut, EBT sangat bergantung pada kondisi cuaca. Hal ini menjadi tantangan baru karena sistem kelistrikan harus menyesuaikan diri agar tetap stabil saat menerima pasokan listrik yang tidak menentu dari EBT[6], [7].

Dalam menjaga keandalan, *Optimal Power Flow* (OPF) menjadi instrumen krusial untuk menentukan pengaturan variabel kontrol sistem yang paling efisien [8], [9]. OPF berperan sebagai alat untuk menentukan pengaturan variabel kontrol optimal guna meningkatkan efisiensi operasional sistem[10]. Namun, formulasi OPF tradisional yang bersifat statis atau dalam satu waktu menjadi kurang relevan untuk sistem modern.[11], [12]. OPF statis gagal menangkap keterkaitan antar waktu serta

dinamika perubahan beban dan pembangkitan[13]. Akibatnya, metode ini tidak mampu memitigasi risiko kegagalan sistem yang disebabkan oleh fluktuasi pembangkitan PV yang terjadi sepanjang waktu.

Dalam beberapa dekade terakhir, berbagai pendekatan OPF telah dikembangkan untuk mengakomodasi kompleksitas sistem tenaga modern. Setiap metode optimasi memiliki karakteristik matematis dan kebutuhan komputasi yang berbeda [14]. Peningkatan penetrasi EBT seperti energi angin dan PV ke dalam sistem telah menambah kompleksitas OPF akibat sifat stokastik dan ketidakpastian daya yang dihasilkan [15], [16]. Untuk mencapai integrasi EBT yang dapat diandalkan dan efisien ke dalam jaringan listrik, sifat stokastik dan ketidakpastian dari sumber energi PV surya dan angin harus dipertimbangkan [17].

Untuk menjawab tantangan tersebut, diperlukan optimasi berbasis MI-OPF. Berbeda dengan OPF objektif tunggal, MI-OPF memperhitungkan dinamika interdependensi antar-interval waktu secara simultan, sehingga mampu menangani fluktuasi daya PV dan perubahan beban secara lebih terintegrasi[18], [19]. Dengan MI-OPF, operator sistem dapat melakukan penjadwalan operasi secara satu hari ke depan yang lebih realistis dan adaptif terhadap variasi daya PV.

Sejalan dengan hal tersebut, berbagai metode metaheuristik telah diterapkan untuk menyelesaikan permasalahan OPF terintegrasi EBT seperti algoritma *fitness distance balance-based teaching-learning-based artificial bee colony* (FDB-TLABC) [20] yang merupakan metode yang unik dan menarik yang menggabungkan konsep pendidikan dan perilaku koloni lebah, *hybrid particle swarm gray wolf optimizer* (HPS-GWO)[17] yang merupakan gabungan dari dua algoritma populer, yakni *particle swarm* dan *gray wolf optimizer*. Namun, ketika ditransformasikan ke dalam domain multi-interval, metode-metode tersebut mengalami degradasi performa akibat dari pembengkakan dimensi variabel keputusan serta tingginya kompleksitas penalaan parameter. Kondisi ini menyebabkan tingginya risiko terjebak pada optimum lokal, konvergensi yang prematur dan inefisiensi komputasi yang signifikan.

Penelitian ini mengatasi keterbatasan tersebut dengan mengusulkan kerangka kerja MI-OPF dengan algoritma *teaching-learning-based optimization* (TLBO) yang

diadaptasi secara khusus untuk menangani struktur ruang pencarian berdimensi tinggi pada ruang-waktu 24 jam. Kebaruan utama dari penelitian ini terletak pada formulasi matematis MI-OPF dengan modifikasi fase pengajaran TLBO pada ruang pencarian yang merepresentasikan dimensi ruang dan waktu yang terintegrasi dengan hasil peramalan SARIMA. TLBO dipilih karena sifatnya yang tanpa parameter, sehingga mampu memberikan efisiensi komputasi yang lebih baik dan keseimbangan yang superior antara eksplorasi dan eksploitasi[21]. Kerangka yang diusulkan tidak hanya memberikan kontribusi teoretis dalam pengembangan pemodelan MI-OPF, tetapi juga menghasilkan pendekatan yang andal dan dapat diterapkan pada berbagai skala untuk mendukung perencanaan operasi sistem tenaga listrik dengan penetrasi PV skala besar, serta meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan sistem tenaga listrik Indonesia.

1.2. Rumusan Masalah

1. Bagaimana memformulasikan model MI-OPF yang efektif dalam memitigasi dampak ketidakpastian dari penetrasi *photovoltaic* dan fluktuasi beban, guna meminimalkan biaya operasional dan rugi-rugi daya sistem tanpa melanggar batasan teknis?
2. Bagaimana mengimplementasikan algoritma TLBO sebagai metode penyelesaian MI-OPF yang mampu menangani keterkaitan antar waktu dalam penjadwalan pembangkit agar diperoleh solusi yang optimal, efisien secara komputasi, dan stabil terhadap perubahan kondisi sistem secara satu hari ke depan?

1.3. Tujuan Penelitian

1. Membangun model peramalan daya PV berbasis SARIMA yang disesuaikan dengan karakteristik data cuaca untuk memperoleh profil daya PV sebagai masukan pada perencanaan operasi satu hari ke depan.
2. Mengintegrasikan hasil peramalan tersebut ke dalam kerangka kerja MI-OPF serta memformulasikan model menggunakan fungsi objektif berupa minimalkan biaya operasional dan rugi-rugi daya secara simultan.

3. Menerapkan metode *Pareto*-TLBO untuk menyelesaikan model MI-OPF multi-objektif dalam rangka memperoleh solusi kompromi yang optimal.
4. Mengevaluasi performa model yang diusulkan melalui pengujian pada sistem IEEE 30-bus dan sistem kelistrikan Sumatera Barat.

1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah untuk memberikan kerangka analisis OPF yang lebih representatif terhadap kondisi operasi sistem tenaga listrik dengan penetrasi energi terbarukan. Menjadi referensi akademik dalam pengembangan metode perencanaan operasi sistem tenaga listrik berbasis penjadwalan hari berikutnya. Selain itu, penelitian ini dapat menjadi upaya peningkatan efisiensi operasional dan pengurangan emisi karbon dalam pengelolaan sistem tenaga listrik.

1.5. Batasan Masalah

1. Sumber energi terbarukan yang dibahas pada penelitian ini hanya difokuskan pada pembangkit *photovoltaic*.
2. Karakteristik ketidakpastian dan fluktuasi daya keluaran PV dimodelkan dan diramalkan menggunakan pendekatan *Seasonal ARIMA* (SARIMA) berdasarkan data cuaca historis untuk kebutuhan penjadwalan satu hari ke depan.
3. Model Multi Interval-OPF menggunakan dua fungsi objektif, yaitu meminimalkan biaya operasi pembangkitan dan meminimalkan rugi-rugi daya aktif pada saluran transmisi. Untuk fungsi multi-objektif diselesaikan menggunakan pendekatan TLBO-*Pareto* untuk memperoleh solusi kompromi antara kedua fungsi objektif tersebut.
4. Perhitungan aliran daya pada setiap dilakukan menggunakan MATPOWER dalam perangkat lunak MATLAB, sedangkan TLBO digunakan sebagai metode optimasi untuk menghasilkan dan memperbarui solusi Multi Interval-OPF.
5. Validasi model dilakukan menggunakan sistem uji IEEE 30-bus yang dimodifikasi serta data sistem kelistrikan Sumatera Barat.

1.6. Kebaruan penelitian

Kebaruan utama dari penelitian ini terletak pada formulasi dan pengintegrasian kerangka MI-OPF yang memperhitungkan dinamika operasional sistem secara simultan dalam horizon penjadwalan satu hari ke depan (24 jam). Berbeda dengan pendekatan OPF objektif tunggal atau pemodelan deterministik konvensional, penelitian ini memanfaatkan metode *Seasonal* ARIMA (SARIMA) untuk merepresentasikan karakteristik intermiten PV secara lebih adaptif dalam skala waktu per-jam, sehingga fluktuasi pasokan energi terbarukan dapat diakomodasi secara langsung ke dalam persamaan kesetimbangan daya sistem. Formulasi MI-OPF digunakan memperhitungkan batasan keterikatan waktu seperti laju perubahan daya generator serta dinamika daya reaktif guna menjaga kestabilan dan kelayakan operasional sistem di setiap perubahan interval jam. Algoritma *TLBO* berkonsep *Pareto* (*Pareto*-TLBO) juga digunakan dalam menyelesaikan permasalahan optimasi multi-objektif secara efisien, tanpa membutuhkan proses penalaan parameter awal yang rumit.

Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi pada pengembangan metodologi OPF berbasis energi terbarukan sekaligus mendukung kajian implementasi yang lebih aplikatif pada sistem tenaga listrik, khususnya dalam pengembangan *smart grid* di Indonesia.

1.7. Sistematika Penulisan

Untuk memberikan gambaran yang jelas dan terstruktur mengenai alur pembahasan, penulisan disertasi ini dibagi menjadi enam bab yang saling berkaitan. Adapun sistematika penyusunannya diuraikan sebagai berikut:

- a) **Bab I Pendahuluan**. Bab ini berisi tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah dan kebaruan penelitian
- b) **Bab II Tinjauan Pustaka**. Bab ini berisi tentang dasar teori OPF dan SARIMA, tinjauan pustaka dari penelitian terdahulu, *state of art* untuk mempertegas posisi kebaruan penelitian.

- c) **Bab III Metodologi Penelitian.** Bab ini berisi tentang tahapan penelitian, data awal sistem kelisrikan yang digunakan, langkah-langkah model peramalan dan kerangka kerja dari multi-interval OPF yang digunakan pada penelitian ini.
- d) **Bab IV Multi Interval *Optimal Power Flow* Satu Hari Ke depan Dengan Penetrasi *Photovoltaic*.** Bab ini menyajikan hasil dan analisa dari MI-OPF pada sistem kelistrikan IEEE-30 bus dengan 3 skenario yang digunakan yaitu fungsi objektif meminimalkan biaya pembangkitan, meminimalkan rugi-rugi daya dan fungsi objektif gabungan keduanya. Bab ini juga disajikan validasi hasil dengan metode yang lain.
- e) **Bab V Multi-Interval *Optimal Power Flow Day-Ahead* Dengan Penetrasi *Photovoltaic* Pada Sistem Kelistrikan Sumatera Barat.** Bab ini menyajikan hasil dan analisa dari MI-OPF pada sistem kelistrikan Sumatera Barat dengan 3 skenario yang digunakan yaitu fungsi objektif meminimalkan biaya pembangkitan, meminimalkan rugi-rugi daya dan fungsi objektif gabungan keduanya.
- f) **Bab VI Simpulan Dan Saran.** Bab ini berisi rangkuman temuan yang menjawab tujuan penelitian dan saran pengembangan penelitian di masa depan

