

Bab I Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Pasokan listrik yang andal merupakan landasan stabilitas ekonomi modern dan pembangunan sosial[1]. Jaringan transmisi tegangan tinggi, komponen penting dari infrastruktur ini, menghadapi tantangan yang semakin kompleks, termasuk fluktuasi permintaan yang signifikan, integrasi sumber daya terbarukan yang bersifat intermiten, dan risiko operasional yang ditimbulkan oleh aset yang menua [2], [3]. Peramalan beban listrik jangka menengah merupakan instrumen krusial dalam perencanaan operasional dan manajemen aset pada sistem transmisi tenaga listrik. Akurasi dalam memprediksi beban mingguan sangat diperlukan oleh operator sistem untuk memastikan keseimbangan antara pasokan dan permintaan energi. Prediksi yang tepat memungkinkan penjadwalan pemeliharaan yang lebih baik dan pengalokasian sumber daya yang efisien guna menjaga stabilitas jaringan [4], [5], [6].

Dalam konteks manajemen aset, beban berlebih (*overload*) pada transformator daya merupakan ancaman serius yang dapat mempercepat penuaan isolasi dan memicu kerusakan permanen. Kegagalan dalam mengantisipasi lonjakan beban tidak hanya berdampak pada kerugian finansial akibat kerusakan alat, tetapi juga mengancam keandalan pasokan listrik ke konsumen. Oleh karena itu, pemantauan beban melalui sistem *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) menjadi basis data yang sangat penting untuk diolah menjadi informasi prediktif [7]. Integritas operasional sistem transmisi daya pada dasarnya bergantung pada kesehatan aset gardu induk kritis, khususnya transformator daya, yang kegagalannya dapat memiliki konsekuensi bencana bagi stabilitas jaringan [8]. Namun, dalam praktiknya, terdapat kesenjangan yang signifikan antara persyaratan keandalan ini dan praktik utilitas umum. Banyak operator sistem termasuk yang berada di lokasi studi kasus sering mengandalkan tindakan manual dan reaktif untuk penyeimbangan beban. Berdasarkan data historis pembebanan transformator di GI 150 kV Pekalongan, kondisi pembebanan tinggi telah terjadi beberapa kali pada periode pengamatan. Dengan batas evaluasi pembebanan sebesar 80% sesuai dengan panduan PLN **SPLN 50/1982** dan **SPLN D3.002-1:2007**. Transformator 1 menunjukkan rata-rata pembebanan tahunan yang secara konsisten berada di atas batas tersebut, yaitu 82,45% pada 2021, 84,12% pada 2023, dan 82,50% pada 2024. Transformator 3 memiliki rata-rata tahunan yang lebih rendah, tetapi pernah mengalami lonjakan beban maksimum hingga 99,96% pada Oktober 2024. Pendekatan ini secara inheren meningkatkan risiko kelebihan beban transformator yang tidak terduga, mempercepat penuaan aset, dan

menggarisbawahi kebutuhan mendesak akan alat peramalan antisipatif yang kuat untuk memungkinkan perlindungan aset proaktif [9].

Bersamaan dengan itu, keadaan terkini dalam penelitian akademis sebagian besar berorientasi pada pengembangan model "kotak hitam" yang semakin kompleks, seperti jaringan Long Short-Term Memory (LSTM), yang sering memprioritaskan peningkatan marginal dalam akurasi prediksi [10]. Seiring dengan berkembangnya ilmu data, berbagai metodologi peramalan telah diusulkan, mulai dari model statistik deterministik yang sederhana hingga model stokastik yang kompleks. Namun, terdapat perdebatan akademik yang berkelanjutan mengenai efektivitas tingkat kompleksitas model tersebut. Banyak peneliti cenderung memilih model yang sangat rumit dengan asumsi akan menghasilkan akurasi yang lebih tinggi, meskipun sering kali model tersebut sulit untuk diimplementasikan secara praktis di lapangan [11]. Fokus peramalan beban telah berevolusi secara progresif dari prediksi agregat sistem secara keseluruhan menuju peramalan yang lebih granular [12], spesifik aset [13], [14], khususnya untuk transformator daya [15]. Sebagai aset bernilai tinggi dan penting dalam gardu induk, transformator rentan terhadap kelebihan beban yang tidak terduga, yang dapat menyebabkan gangguan layanan yang meluas dan kerugian finansial yang besar [16]. Akibatnya, peramalan beban jangka menengah—khususnya, peramalan mingguan pada tingkat transformator—telah menjadi vital untuk mendukung strategi pemeliharaan prediktif dan manajemen kesehatan aset yang proaktif [17].

Literatur menyajikan beragam teknik peramalan [17], mulai dari model stokastik canggih seperti ETS (Error, Trend, Seasonality) hingga algoritma pembelajaran mesin dan Deep Learning tingkat lanjut [18], [19], [20]. Asumsi yang umum dalam banyak penelitian ini adalah bahwa peningkatan kompleksitas model secara inheren mengarah pada kinerja prediksi yang lebih unggul. Namun, kesenjangan metodologis yang signifikan masih ada. Sebagian besar studi perbandingan hanya mengandalkan metrik akurasi deskriptif, seperti MAPE [21], MAE [22], dan RMSE [18], untuk menyatakan keunggulan suatu model. Klaim ini seringkali kurang memiliki validasi statistik yang kuat melalui pengujian signifikansi, sehingga tidak pasti apakah perbedaan kinerja yang diamati benar-benar nyata atau hanya artefak dari kebetulan acak.

Selain itu, terdapat kelangkaan perbandingan langsung yang ketat antara model stokastik adaptif dan model tren deterministik yang lebih sederhana dan lebih mudah diinterpretasikan, seperti regresi polinomial. Meskipun yang pertama sering diprioritaskan karena akurasinya yang diklaim, masih menjadi pertanyaan terbuka apakah kompleksitas tambahannya

menghasilkan keunggulan kinerja yang signifikan secara statistik dibandingkan alternatif yang lebih sederhana, terutama ketika diterapkan pada data operasional dunia nyata yang volatil [23].

Prinsip Parsimony dalam statistika menekankan bahwa model yang lebih sederhana sering kali memberikan hasil yang lebih stabil dan kuat dibandingkan model kompleks yang rentan terhadap overfitting. Dalam peramalan beban, penggunaan model tren sederhana seperti regresi linear atau polinomial sering kali dianggap memadai jika data memiliki tren yang jelas. Validasi terhadap prinsip ini menjadi penting untuk memastikan efisiensi sumber daya komputasi dalam operasional gardu induk [24].

Di sisi lain, model stokastik seperti ETS (*Error Trend Seasonality*) menawarkan pendekatan yang lebih dinamis dengan mempertimbangkan komponen musiman dan fluktuasi data. Model ini mampu menangkap variabilitas yang mungkin terlewatkan oleh model tren linear biasa. Keunggulan model ETS dalam menangani pola deret waktu menjadikannya salah satu standar industri dalam peramalan jangka menengah yang perlu diuji ketangguhannya [25].

Namun, tantangan terbesar muncul ketika sistem menghadapi volatilitas beban yang ekstrem atau lonjakan mendadak (*load spikes*). Fenomena ini sering kali disebabkan oleh faktor eksternal yang tidak terduga atau perubahan perilaku beban yang drastis. Sebagian besar model peramalan standar dibangun berdasarkan asumsi data yang mengikuti pola historis yang stabil, sehingga kinerjanya cenderung menurun drastis saat terjadi anomali [26].

Selama ini, evaluasi performa model peramalan sering kali hanya mengandalkan metrik akurasi titik (*point accuracy*) seperti MAPE, MAE, dan RMSE [27]. Meskipun metrik ini memberikan gambaran rata-rata kesalahan, mereka tidak mampu menunjukkan tingkat ketidakpastian dari ramalan tersebut. Bagi operator sistem, mengetahui margin kesalahan melalui Interval Prediksi (*Prediction Intervals*) jauh lebih berharga untuk manajemen risiko daripada sekadar angka prediksi tunggal [28].

Penelitian yang dilakukan di Gardu Induk 150 kV Pekalongan menunjukkan adanya variasi karakteristik beban pada setiap transformator daya. Beberapa transformator menunjukkan tren yang stabil, sementara yang lain mengalami lonjakan yang tidak terduga dan beban berlebih. Perbedaan profil beban ini menuntut pengujian terhadap berbagai model untuk melihat model mana yang tetap tangguh (*robust*) dalam berbagai kondisi pembebanan yang berbeda.

Penerapan uji statistik formal, seperti Uji Friedman, menjadi langkah krusial untuk membuktikan apakah perbedaan performa antar model benar-benar nyata secara ilmiah [29]. Tanpa uji statistik, selisih akurasi yang kecil antar model bisa saja hanya merupakan faktor

kebetulan. Validasi ini memberikan landasan yang kuat bagi pengelola energi dalam menentukan kebijakan pemilihan model peramalan yang akan digunakan sebagai standar operasional. Kedua, bidang ini sebagian besar mengabaikan Prinsip Parsimoni, gagal untuk secara sistematis menyelidiki apakah model yang lebih sederhana dan lebih mudah diinterpretasikan (misalnya, regresi polinomial) tidak hanya memadai tetapi juga secara statistik tidak kalah untuk memenuhi persyaratan inti perencanaan operasional dan manajemen aset[30].

Melalui perbandingan antara model stokastik dan deterministik, penelitian ini berupaya mengisi celah literatur mengenai batasan kemampuan peramalan deret waktu. Dengan memahami batasan ini, penelitian ini memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan strategi mitigasi risiko bagi infrastruktur energi. Diharapkan, hasil penelitian ini dapat menjadi referensi bagi pengembangan model peramalan yang lebih adaptif dan reliabel di masa depan untuk mendukung ketahanan sistem tenaga listrik.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana tingkat akurasi model stokastik (*Error Trend Seasonality* - ETS) dan enam model tren deterministik (Linear, Eksponensial, Logaritmik, dan Polinomial Orde 2 hingga 4) dalam memprediksi beban listrik pada transformator berdasarkan data historis yang tersedia ?
2. Metode manakah yang memberikan nilai galat (kesalahan peramalan) terkecil berdasarkan metrik RMSE (*Root Mean Square Error*), MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) dan MAE (*Mean Absolute Error*), sehingga paling efektif digunakan untuk perencanaan pembebanan transformator di masa depan ?
3. Apakah terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik antara hasil proyeksi beban yang dihasilkan oleh ketujuh metode statistik tersebut (diuji melalui Friedman Test) ?
4. Bagaimana reliabilitas masing-masing model forecasting dalam menghasilkan prediction interval yang mampu mencerminkan ketidakpastian beban transformator?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini antara lain :

1. Mengevaluasi dan membandingkan tingkat akurasi tujuh model peramalan beban listrik, yang terdiri dari satu model stokastik (*Error Trend Seasonality* - ETS) dan enam model tren deterministik (Linear, Eksponensial, Logaritmik, dan Polinomial Orde 2 hingga 4).

2. Menganalisis dan membandingkan kinerja beberapa metode peramalan beban transformator berdasarkan nilai RMSE, MAPE, dan MAE, guna menentukan metode dengan tingkat kesalahan peramalan paling rendah serta paling sesuai untuk mendukung perencanaan pembebanan transformator.
3. Menganalisis signifikansi perbedaan hasil proyeksi beban transformator yang diperoleh dari tujuh metode peramalan statistik melalui Friedman Test, sehingga dapat diketahui apakah perbedaan kinerja antar metode tersebut bersifat signifikan secara statistik
4. Menganalisis reliabilitas model ETS, Linear, Exponential, Logarithmic, Polynomial orde 2, Polynomial orde 3, dan Polynomial orde 4 dalam menghasilkan prediction interval berdasarkan indikator PICP dan PINAW, guna menilai kemampuan masing-masing model dalam merepresentasikan ketidakpastian beban transformator.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa manfaat antara lain :

1. Manfaat Praktis (Bagi Praktisi dan Instansi)
 - a. Optimalisasi Manajemen Aset: Memberikan panduan bagi operator Gardu Induk 150 kV Pekalongan atau PT PLN (Persero) dalam memilih model peramalan yang paling reliabel untuk memantau kondisi beban transformator, sehingga dapat mencegah penuaan dini aset akibat beban berlebih (*overload*)
 - b. Melalui penggunaan Interval Prediksi (PI), penelitian ini membantu pengelola energi untuk mengidentifikasi margin ketidakpastian, sehingga pengambilan keputusan terkait cadangan daya dan pemeliharaan dapat dilakukan secara lebih preventif.
 - c. Dengan membuktikan prinsip parsimoni, penelitian ini memberikan dasar bagi instansi untuk menggunakan model yang lebih sederhana dan efisien tanpa mengorbankan akurasi statistik pada kondisi beban yang stabil.
2. Manfaat Teoritis (Bagi Akademisi dan Pengembangan Ilmu)
 - a. Memberikan kontribusi ilmiah dalam membuktikan bahwa kompleksitas model tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan akurasi peramalan, khususnya pada data beban listrik yang memiliki tren kuat.
 - b. Menjadi referensi akademik mengenai keterbatasan model deret waktu (*time series*) konvensional (baik deterministik maupun stokastik) dalam menghadapi fenomena volatilitas ekstrem atau lonjakan beban mendadak.

- c. Memberikan wawasan mengenai pentingnya menyertakan variabel eksternal (seperti faktor cuaca atau ekonomi) untuk pengembangan model peramalan masa depan guna mengatasi kelemahan model-model yang ada saat ini dalam menangani anomali data.

1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terarah dan mendalam, maka diberikan batasan-batasan masalah sebagai berikut:

1. Lokasi Penelitian : Penelitian ini terbatas pada analisis beban listrik pada transformator daya yang berada di Gardu Induk (GI) 150 kV Pekalongan
2. Objek Penelitian : Data yang dianalisis adalah beban dari tiga unit transformator daya spesifik (Transformator 1, 2, dan 3) dengan karakteristik pembebanan yang berbeda.
3. Data Penelitian : Data beban yang digunakan adalah data sekunder hasil rekaman sistem SCADA berupa beban energi mingguan (dalam satuan MWh) dengan rentang waktu dari Januari 2020 hingga Desember 2024
4. Model Peramalan : Model yang diuji dibatasi pada tujuh model deret waktu (*time series*), yaitu satu model stokastik (ETS) dan enam model tren deterministik (Linear, Eksponensial, Logaritmik, serta Polinomial Orde 2, 3, dan 4)
5. Variabel Penelitian : Penelitian ini hanya berfokus pada variabel beban historis (univariat) dan tidak menyertakan variabel eksternal seperti suhu udara (cuaca), kelembaban, atau faktor ekonomi makro
6. Metrik Evaluasi : Evaluasi performa model dibatasi pada pengukuran akurasi titik melalui nilai MAPE, MAE, dan RMSE, serta analisis ketidakpastian menggunakan Interval Prediksi (PI) pada tingkat kepercayaan 95%
7. Uji Statistik: Validasi perbedaan antar model hanya dilakukan dengan menggunakan Uji Friedman untuk membandingkan peringkat performa secara keseluruhan.
8. Tidak membahas analisa dan solusi untuk beban lebih di trafo

1.6 Orisinalitas Penelitian

Orisinalitas dalam penelitian ini terletak pada pendekatan evaluasi yang tidak hanya berfokus pada tingkat akurasi rata-rata, tetapi juga pada aspek-aspek berikut :

1. Pengujian Ketangguhan terhadap Volatilitas Ekstrem: Berbeda dengan banyak penelitian peramalan beban yang berfokus pada kondisi data stabil, penelitian ini secara khusus menguji dan membandingkan performa tujuh model (stokastik dan deterministik) saat

dihadapkan pada lonjakan beban mendadak (*load spikes*) yang ekstrem. Penelitian ini mendokumentasikan kegagalan kolektif model deret waktu dalam menangani anomali beban pada transformator daya

2. Validasi Statistik melalui Uji Friedman : Penelitian ini tidak hanya menyajikan selisih nilai galat (MAPE, RMSE), tetapi juga menerapkan uji statistik non-parametrik (Uji Friedman) untuk membuktikan apakah perbedaan performa antar model memiliki signifikansi statistik yang nyata atau hanya terjadi secara kebetulan
3. Analisis Ketidakpastian Menggunakan Interval Prediksi : Orisinalitas lainnya ditunjukkan melalui penggunaan *Prediction Intervals* (PI) dengan metrik PICP dan PINAW. Hal ini memberikan dimensi baru dalam evaluasi peramalan beban, di mana kualitas model dinilai berdasarkan kemampuannya menyediakan rentang risiko yang reliabel bagi operator gardu induk, melainkan hanya prediksi titik Tunggal
4. Studi Komparatif Berdasarkan Karakteristik Beban : Penelitian ini melakukan analisis komparatif pada tiga unit transformator dengan profil beban yang berbeda (stabil vs. volatil) di lokasi yang sama, sehingga memberikan wawasan mendalam mengenai kapan model sederhana (Prinsip Parsimoni) lebih unggul dibandingkan model yang lebih kompleks secara struktural.

