

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) masih menjadi tulang punggung utama dalam sistem kelistrikan nasional Indonesia, berperan penting dalam menjamin keandalan pasokan listrik untuk memenuhi permintaan energi yang terus meningkat sesuai dengan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PLN 2025–2033 (PT PLN (Persero), 2025). Sejalan dengan target peningkatan porsi energi baru terbarukan dan penurunan emisi, pemerintah mendorong pemanfaatan biomassa sebagai salah satu sumber energi terbarukan yang melimpah di Indonesia, antara lain melalui penerapan program *co-firing* biomassa pada PLTU eksisting untuk menggantikan sebagian batubara (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2025).

Ketergantungan PLTU pada bahan bakar fosil, khususnya batubara, menimbulkan tantangan signifikan akibat tingginya emisi gas rumah kaca yang berdampak negatif terhadap lingkungan (International Energy Agency, 2022). Oleh karena itu, peningkatan efisiensi operasional PLTU menjadi langkah strategis yang tidak hanya dapat mengurangi dampak negatif lingkungan dan menekan biaya, tetapi juga mendukung transisi menuju sistem energi nasional yang lebih berkelanjutan.

Efisiensi operasional PLTU umumnya diukur dengan parameter *heat rate*, yang menunjukkan jumlah energi panas dari bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu satuan listrik bersih (Sarkar, 2015). Pembangkit listrik dengan nilai *heat rate* yang lebih rendah menunjukkan efisiensi yang lebih tinggi karena menggunakan lebih sedikit bahan bakar untuk setiap kilowatt-jam listrik yang dihasilkan (Burnett & Kiestling, 2019). Dalam praktik operasi PLTU, indikator yang umum digunakan adalah *Net Plant Heat Rate* (NPHR), yaitu *heat rate* bersih pada level pembangkit yang sudah mempertimbangkan rugi-rugi internal dan keluaran listrik bersih ke jaringan, sehingga lebih representatif untuk menilai kinerja keseluruhan unit.

Secara konvensional, perhitungan NPHR dilakukan melalui pendekatan neraca energi (*heat balance*) berbasis data pengukuran periodik dan uji performa (*performance*

test), yang umumnya bersifat evaluatif dan tidak dirancang untuk estimasi prediktif secara berkelanjutan. Pendekatan ini menghadapi keterbatasan dalam menangkap dinamika operasi harian yang kompleks dan perubahan parameter secara cepat. NPHR sendiri dipengaruhi oleh berbagai parameter operasional seperti kualitas bahan bakar, tekanan dan temperatur uap, kondisi peralatan, serta fluktuasi beban, sehingga bersifat dinamis dan non-linear. Keterbatasan pendekatan konvensional dalam memantau perubahan ini menyebabkan deteksi penurunan efisiensi sering terlambat dilakukan (Martelli et al., 2021).

Kemampuan mengestimasi NPHR secara cepat dan akurat menjadi sangat penting dalam membantu operator PLTU memantau efisiensi secara berkelanjutan, mengurangi ketergantungan pada intuisi, serta meningkatkan konsistensi dalam pengambilan keputusan (Liu & Shen, 2022). Seiring dengan pesatnya kemajuan teknologi digital, penerapan pembelajaran mesin (*machine learning*) telah berkembang pesat di berbagai sektor industri sebagai alat untuk meningkatkan efisiensi energi dan keandalan operasi. Di sektor pembangkit listrik termal, pembelajaran mesin telah diimplementasikan dalam pemodelan kinerja pembangkit, prediksi heat rate, optimasi proses boiler, dan peningkatan efisiensi turbin listrik (Ashraf et al., 2023; Biswas et al., 2024; Lianzhai et al., 2024).

Studi oleh (Bisset et al., 2023) mengkaji beragam algoritma machine learning pada PLTU batubara, termasuk neural networks seperti Multi-Layer Perceptron (MLP), hingga ensemble methods seperti random forest dan Gradient Boosting Regressor (GBR), yang menunjukkan potensi signifikan dalam pemanfaatan data operasi real-time untuk prediksi NPHR dan efisiensi pembangkit.

Di antara berbagai algoritma pembelajaran mesin, MLP dikenal efektif dalam memodelkan hubungan non-linear pada data numerik kontinu melalui struktur jaringan saraf berlapis. Sementara itu, GBR merupakan metode ensemble berbasis boosting yang menggabungkan sejumlah model lemah secara bertahap untuk meningkatkan akurasi dan ketahanan terhadap noise data. Perbedaan karakteristik kedua algoritma ini menjadikannya menarik untuk dibandingkan dalam konteks data operasi PLTU yang dinamis.

Selaras dengan itu, penelitian pada pembangkit siklus gabungan oleh (Arferiandi et al., 2021a) menggunakan metode *Artificial Neural Network* (ANN) untuk memprediksi

heat rate dengan tingkat akurasi tinggi, yang menguatkan peran jaringan saraf dalam optimasi operasi pembangkit listrik. Selain itu, penelitian (Setyawan & Sudiarto, 2024) mengadopsi pendekatan *machine learning* yang luas, mencakup model *neural network* dan algoritma *ensemble*, untuk memodelkan *heat rate* dan emisi gas rumah kaca pada PLTU batubara di Indonesia.

Namun demikian, penelitian mengenai prediksi NPHR pada PLTU Indonesia masih memiliki sejumlah keterbatasan. Studi yang ada umumnya berfokus pada satu pendekatan algoritma tertentu dan belum memberikan evaluasi komparatif yang memadai antar model machine learning berbasis data operasi aktual PLTU Indonesia. Selain itu, perbedaan karakteristik batubara domestik, pola operasi unit, serta variasi kualitas bahan bakar menyebabkan model yang dikembangkan pada studi luar negeri tidak dapat langsung diadopsi. Di sisi lain, kajian yang secara eksplisit memasukkan pengaruh co-firing biomassa dalam pemodelan NPHR masih terbatas, padahal implementasinya telah berlangsung di berbagai PLTU sebagai bagian dari strategi dekarbonisasi nasional (Kementerian ESDM, 2025). Oleh karena itu, diperlukan penelitian komparatif yang mengembangkan dan membandingkan kinerja algoritma dengan karakteristik berbeda, seperti Multi-Layer Perceptron (MLP) dan Gradient Boosting Regressor (GBR), menggunakan data operasi aktual PLTU Indonesia, dengan mempertimbangkan variabel biomassa serta evaluasi kemampuan generalisasi model terhadap periode operasi berbeda.

Berdasarkan celah tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan model prediksi NPHR berbasis machine learning dan melakukan evaluasi komparatif terhadap algoritma MLP dan GBR menggunakan data historis operasi PLTU Indonesia, dengan memasukkan variabel biomassa sebagai salah satu faktor relevan. Kinerja model dievaluasi menggunakan metrik *Root Mean Squared Error* (RMSE), *Mean Absolute Error* (MAE), dan koefisien determinasi (R^2). Target kinerja $R^2 \geq 0,85$ ditetapkan sebagai ambang batas kelayakan model mengacu pada praktik umum dalam studi prediksi performa pembangkit dan sistem energi berbasis machine learning (Arferiandi et al., 2021b; Bisset et al., 2023), sehingga model yang dihasilkan dapat digunakan sebagai alat bantu pemantauan efisiensi pembangkit secara lebih objektif, cepat, dan konsisten.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, penelitian ini difokuskan pada pengembangan dan evaluasi model machine learning untuk memprediksi *Net Plant Heat Rate* (NPHR) pada PLTU berbasis data operasi historis, termasuk variabel biomassa sebagai salah satu parameter operasional. Sehubungan dengan hal tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana kinerja algoritma Multi-Layer Perceptron (MLP) dalam memprediksi NPHR pada data operasi PLTU?
2. Bagaimana kinerja algoritma Gradient Boosting Regressor (GBR) dalam memprediksi NPHR pada data operasi PLTU?
3. Algoritma mana yang memberikan performa prediksi lebih baik berdasarkan metrik RMSE, MAE, dan R^2 ?

1.3. Tujuan

Sejalan dengan rumusan masalah yang telah disampaikan, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan mengevaluasi model machine learning guna memprediksi *Net Plant Heat Rate* (NPHR) pada PLTU berbasis data operasi historis. Secara khusus, tujuan penelitian ini adalah:

1. Mengembangkan model prediksi NPHR menggunakan algoritma Multi-Layer Perceptron (MLP) pada data operasi PLTU.
2. Mengembangkan model prediksi NPHR menggunakan algoritma Gradient Boosting Regressor (GBR) pada data operasi PLTU.
3. Membandingkan performa kedua algoritma tersebut dalam memprediksi NPHR berdasarkan metrik evaluasi RMSE, MAE, dan koefisien determinasi (R^2).

1.4. Manfaat

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat baik secara akademik maupun praktis, khususnya dalam penerapan machine learning untuk prediksi kinerja termal PLTU. Adapun manfaat yang diharapkan antara lain:

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat baik secara akademik maupun praktis, khususnya dalam konteks penerapan machine learning pada prediksi kinerja PLTU. Manfaat yang diharapkan adalah sebagai berikut:

- a. Menghasilkan alat bantu prediksi Net Plant Heat Rate (NPHR) yang cepat, akurat, dan dapat mendukung monitoring efisiensi operasional PLTU secara berkelanjutan.
- b. Memberikan pemahaman mengenai algoritma machine learning yang paling efektif dalam memodelkan dan memprediksi NPHR berdasarkan data operasi PLTU.
- c. Membantu operator dan pengelola PLTU dalam mengidentifikasi dan mengantisipasi penurunan efisiensi pembangkit lebih dini, sehingga dapat dilakukan tindakan korektif untuk menekan konsumsi bahan bakar dan biaya operasional.
- d. Memberikan kontribusi ilmiah melalui analisis komparatif antara algoritma Multi-Layer Perceptron (MLP) dan Gradient Boosting Regressor (GBR) dalam konteks prediksi performa termal pembangkit listrik.
- e. Mendukung pemanfaatan teknologi digital dan machine learning untuk pengelolaan energi yang lebih efisien dan berkelanjutan, sejalan dengan agenda transisi energi nasional.
- f. Menjadi dasar pengembangan dashboard monitoring NPHR secara real-time di PLTU, sebagai bagian dari peningkatan sistem pemantauan efisiensi dan pengambilan keputusan operasional berbasis data.

1.5. Ruang Lingkup Masalah

Agar penelitian ini terfokus dan dapat diselesaikan sesuai dengan batas waktu yang telah ditentukan, ruang lingkup penelitian dibatasi pada aspek-aspek berikut:

- a. Data yang digunakan adalah data historis operasi PLTU, mencakup parameter operasional seperti beban unit, kualitas batubara, tekanan dan suhu uap, variabel pendukung lainnya, serta variabel biomassa apabila terdapat program *co-firing*.
- b. Penelitian difokuskan pada satu unit PLTU yang menjadi objek studi, sehingga hasil model menggambarkan karakteristik operasional unit tersebut.
- c. Cakupan penelitian terbatas pada estimasi *Net Plant Heat Rate* (NPHR) sebagai indikator efisiensi pembangkit, dan tidak mencakup optimasi setpoint operasi maupun penyusunan rekomendasi tindakan operasional.

- d. Model yang dikembangkan hanya menggunakan dua algoritma machine learning, yaitu *Multi-Layer Perceptron* (MLP) dan *Gradient Boosting Regressor* (GBR), tanpa membandingkan dengan algoritma lain di luar kedua model tersebut.
- e. Evaluasi performa model dilakukan menggunakan metrik RMSE, MAE, dan koefisien determinasi (R^2) tanpa menganalisis aspek biaya komputasi, waktu inferensi, atau kompleksitas implementasi secara mendalam.
- f. Penelitian ini tidak melakukan integrasi langsung dengan sistem kontrol pembangkit (DCS/SCADA), dan model yang dihasilkan hanya berfungsi sebagai alat bantu pemantauan pada tahap pengujian.
- g. Kualitas hasil prediksi bergantung pada kelengkapan dan kualitas data operasi yang disediakan oleh pihak pembangkit; proses pembersihan dan seleksi data mengikuti prosedur preprocessing pada metodologi CRISP-DM.
- h. Ruang lingkup penelitian mencakup tahapan pengumpulan data, preprocessing, pemodelan, evaluasi, serta dokumentasi hasil, tanpa mencakup tahap deployment seperti implementasi model secara real-time dalam lingkungan produksi PLTU.

1.6. Kebaruan

Dalam penelitian ini, penulis melakukan pembaruan pada pengembangan model prediksi Net Plant Heat Rate (NPHR) berbasis machine learning menggunakan algoritma Multi-Layer Perceptron (MLP) dan Gradient Boosting Regressor (GBR) pada data operasi aktual PLTU di Indonesia. Penelitian sebelumnya umumnya berfokus pada penerapan satu jenis algoritma tertentu tanpa melakukan evaluasi komparatif yang sistematis antar model dengan karakteristik berbeda.

Kebaruan penelitian ini terletak pada pendekatan komparatif antara model berbasis neural network (MLP) dan metode ensemble boosting (GBR), dengan mempertimbangkan karakteristik batubara domestik serta variabel co-firing biomassa sebagai faktor yang memengaruhi nilai NPHR. Selain itu, penelitian ini juga menguji kemampuan generalisasi model terhadap periode operasi berbeda (temporal generalization), sehingga tidak hanya menilai akurasi pada data uji, tetapi juga ketahanan model terhadap dinamika operasi pembangkit.

1.7. Hipotesis

Penulis mengajukan hipotesis sebagai dugaan awal dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Model Multi-Layer Perceptron (MLP) mampu memprediksi nilai NPHR dengan tingkat akurasi yang baik, ditunjukkan oleh nilai koefisien determinasi (R^2) $\geq 0,85$ serta nilai kesalahan (MAE dan RMSE) yang rendah.
2. Gradient Boosting Regressor (GBR) mampu memprediksi nilai NPHR dengan tingkat akurasi yang baik, ditunjukkan oleh nilai koefisien determinasi (R^2) $\geq 0,85$ serta nilai kesalahan (MAE dan RMSE) yang rendah.
3. Terdapat perbedaan kinerja prediksi antara algoritma MLP dan GBR dalam memodelkan NPHR berdasarkan data operasi aktual PLTU Indonesia.

1.8. Sistematika Penulisan

Laporan Tugas Akhir ini disusun dengan sistematika sebagai berikut:

- a. Bab I – Pendahuluan
Menjelaskan latar belakang penelitian prediksi NPHR PLTU, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, ruang lingkup.
- b. Bab II - Tinjauan Pustaka
Membahas teori-teori dasar yang menjadi pegangan dalam menyelesaikan masalah penelitian dan mendukung pengembangan model serta analisis yang dilakukan.
- c. Bab III - Metodologi Penelitian
Menguraikan metode dan pendekatan yang dipilih serta dikembangkan untuk penelitian ini.
- d. Bab IV - Hasil dan Pembahasan
Memaparkan hasil penelitian, termasuk solusi yang diperoleh, evaluasi performa model, serta implementasi penelitian.
- e. Bab V – Penutup
Berisi kesimpulan dari hasil penelitian, sekaligus memberikan rekomendasi dan saran untuk penelitian selanjutnya.