

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) menyumbang sekitar 60% kapasitas listrik nasional Indonesia pada tahun 2024 [2], menjadikannya infrastruktur kunci dalam penyediaan energi. Namun, operasi PLTU menghadapi tantangan teknis dalam menjaga efisiensi termal, khususnya pada sistem reheater yang mengatur Total Spray Reheat (ton/jam) untuk mempertahankan suhu uap optimal sekitar 580°C. Pengaturan yang tidak akurat dapat menurunkan efisiensi boiler hingga 5%, menyebabkan overheating pipa, meningkatkan konsumsi batu bara, dan memperbesar emisi gas rumah kaca (CO₂, SO₂, NO_x). Oleh karena itu, pengendalian Total Spray Reheat yang presisi menjadi penting untuk meningkatkan efisiensi energi dan mendukung keberlanjutan lingkungan.

Pengendalian Total Spray Reheat secara manual atau dengan sistem kontrol sederhana sering kali tidak efektif karena ketidakmampuan menangkap hubungan non-linear antarvariabel operasional, seperti Generator Load (MW), Temp 1st Stage Superheat (°C), Slagging Index, dan suhu reheater (TEMP RHTR TE0-TE9). Pendekatan ini bergantung pada pengalaman operator, yang dapat menghasilkan prediksi kurang akurat dan meningkatkan risiko inefisiensi operasional. Penelitian sebelumnya [16] menunjukkan bahwa model machine learning, seperti XGBoost, dapat memprediksi Total Spray Reheat dengan akurasi R² hingga 0.80. Namun, penelitian tersebut terbatas pada penggunaan variabel operasional yang lebih sedikit dan belum memanfaatkan teknik optimasi model secara mendalam, sehingga kurang menangkap dinamika operasional PLTU secara menyeluruh.

Penelitian ini mengusulkan pendekatan machine learning berbasis model regresi untuk memprediksi Total Spray Reheat menggunakan dataset operasional PLTU sebanyak 354 baris, yang mencakup variabel seperti Generator Load, Temp 1st Stage Superheat, Slagging Index, dan suhu reheater. Data diolah melalui praproses, termasuk pengkodean variabel kategorikal (MAX REHEAT TEMP), penskalaan fitur dengan StandardScaler, dan pembagian data menjadi 80% data latih dan 20% data uji. Berbagai model regresi, seperti Linear Regression,

Random Forest, dan XGBoost, diuji dan dioptimalkan menggunakan hyperparameter tuning dengan validasi silang 5-lipat. Performa model dievaluasi dengan metrik Mean Squared Error (MSE), R^2 , dan Mean Absolute Error (MAE), dengan analisis kepentingan fitur untuk mengidentifikasi variabel utama, seperti Temp 1st Stage Superheat, yang paling memengaruhi prediksi.

Penelitian ini bertujuan menghasilkan model prediksi Total Spray Reheat yang lebih akurat untuk mendukung pengendalian reheater yang efisien, mengurangi konsumsi bahan bakar, dan meminimalkan emisi gas rumah kaca. Secara teknis, penelitian ini mengisi celah dengan memanfaatkan variabel operasional tambahan dan optimasi model yang lebih mendalam dibandingkan penelitian sebelumnya. Secara praktis, hasil penelitian ini diharapkan memungkinkan pengendalian reheater yang lebih presisi, meningkatkan efisiensi termal PLTU, dan mendukung operasi yang lebih ramah lingkungan. Penelitian ini juga memberikan kontribusi akademik dengan memperkuat penerapan machine learning dalam optimasi sistem reheater di PLTU Indonesia.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan Latar Belakang diatas, perumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana performa model regresi machine learning dalam memprediksi Total Spray Reheat pada sistem reheater PLTU menggunakan data operasional seperti beban generator, suhu uap, dan indeks pembentukan kerak, untuk mendukung efisiensi termal dan keberlanjutan lingkungan?
2. Bagaimana pengaruh optimasi parameter model terhadap akurasi prediksi Total Spray Reheat berdasarkan metrik evaluasi seperti Mean Squared Error (MSE), R-squared (R^2), dan Mean Absolute Error (MAE)?
3. Model regresi machine learning manakah yang memberikan performa terbaik dalam memprediksi Total Spray Reheat berdasarkan metrik evaluasi tersebut?
4. Bagaimana analisis keuangan dapat mengevaluasi biaya pengembangan dan potensi penghematan operasional akibat implementasi model prediksi ini?

1.3 Tujuan Penelitian

Dari latar belakang dan rumusan masalah diatas, maka penulis dapat memberitahukan tujuan penelitian sebagai Berikut :

1. Mengembangkan dan membandingkan performa model regresi machine learning untuk memprediksi Total Spray Reheat pada sistem reheater PLTU berdasarkan data operasional seperti beban generator, suhu uap, dan indeks pembentukan kerak, guna meningkatkan efisiensi termal dan mengurangi emisi gas rumah kaca.
2. Mengoptimalkan akurasi prediksi Total Spray Reheat melalui teknik optimasi parameter model untuk menghasilkan model yang robust dan akurat berdasarkan metrik Mean Squared Error (MSE), R-squared (R^2), dan Mean Absolute Error (MAE).
3. Menganalisis variabel operasional yang paling berpengaruh terhadap prediksi Total Spray Reheat melalui analisis kepentingan fitur untuk memberikan wawasan teknis bagi pengendalian reheater yang efisien.
4. Melakukan analisis keuangan untuk mengevaluasi biaya pengembangan dan potensi penghematan operasional dari integrasi model machine learning ke dalam sistem pengendalian PLTU, sehingga mendukung pengaturan Total Spray Reheat yang akurat, mengurangi konsumsi energi, dan meminimalkan dampak lingkungan.

1.4 Batasan Masalah

Untuk memastikan fokus dan keterjangkauan penelitian, penelitian ini dibatasi pada beberapa aspek berikut:

1. Penelitian menggunakan dataset historis PLTU yang mencakup fitur seperti *Generator Load*, *Temp 1st Stage Superheat*, *Slagging Index*, suhu reheater (*TEMP RHTR TE0-TE9*), dan *MAX REHEAT TEMP*, dengan *Total Spray Reheat* sebagai target. Data *real-time* atau sumber lain tidak digunakan.
2. Penelitian hanya membandingkan 12 model regresi: *Linear Regression*, *Ridge*, *Lasso*, *ElasticNet*, *Decision Tree*, *Random Forest*, *Gradient Boosting*, *AdaBoost*, *SVR*, *KNN*, *XGBoost*, dan *LightGBM*. Model lain seperti *neural networks* tidak termasuk.

3. Optimasi *hyperparameter* dilakukan dengan *GridSearchCV* menggunakan rentang parameter terbatas untuk efisiensi komputasi. Metode lain seperti *RandomizedSearchCV* atau *Bayesian Optimization* tidak dipertimbangkan.
4. Performa model dievaluasi menggunakan *Mean Squared Error (MSE)*, *R-squared*, dan *Mean Absolute Error (MAE)*. Metrik lain seperti MAPE tidak digunakan.
5. Analisis kepentingan fitur atau koefisien hanya dilakukan untuk model yang mendukung (misalnya, model berbasis pohon atau linier). Analisis korelasi atau seleksi fitur tambahan tidak dilakukan.
6. Penelitian berfokus pada prediksi *Total Spray Reheat* untuk sistem *reheater* PLTU, tanpa membahas aspek lain seperti efisiensi boiler atau implementasi model dalam
7. Penelitian dilakukan di Google Colab dengan sumber daya komputasi standar, yang dapat membatasi skala eksperimen.

1.5 State of The Art

Penelitian ini memiliki referensi dari penelitian terdahulu sebagai acuan maupun contoh dalam menyelesaikan penelitian. State Of The Art dijelaskan pada tabel berikut:

Tabel 1. 1 State Of The Art

N0.	Penelitian (Tahun)	Judul	Hasil
1.	Mega Bagus Herlambang,	<i>DATA ANALYTICS FOR SUSTAINABILITY</i>	Mengembangkan model machine learning berbasis regresi (XGBoost) untuk memprediksi Total Spray Reheat pada sistem reheater PLTU menggunakan data operasional seperti beban generator dan suhu uap. Hasil menunjukkan akurasi prediksi dengan

			R ² sebesar 0.80, mendukung pengendalian reheater yang lebih efisien dan pengurangan emisi gas rumah kaca.
2.	Alhakeem et al. (2022)	<i>Prediction of Ecofriendly Concrete Compressive Strength Using Gradient Boosting Regression Tree Combined with GridSearchCV Hyperparameter-Optimization Techniques</i>	Mengoptimalkan model Gradient Boosting Regression Tree dengan GridSearchCV untuk memprediksi performa sistem ramah lingkungan. Model yang dioptimalkan menghasilkan performa lebih baik dibandingkan model tanpa tuning, dengan peningkatan R ² hingga 15%, memberikan wawasan untuk aplikasi prediksi berbasis data operasional.
3.	Trihardianingsih & Lasatira (2024)	<i>Optimasi Hyperparameter GridSearchCV Klasifikasi Kualitas Udara menggunakan Support Vector Machine</i>	Mengoptimalkan model Support Vector Machine (SVM) dengan GridSearchCV untuk analisis data lingkungan. Hasil menunjukkan model dengan kernel RBF (C=100, gamma=0.1) mencapai akurasi tinggi,

			memberikan dasar untuk penerapan machine learning dalam sistem berbasis data operasional.
4.	Auditya Purwandini Sutarto , Mega Bagus Herlambang , Nailul Izzah1 and Ade Hendi3 (2025)	<i>Optimizing Mental Workload Detection for HCI: Comparative Feature Selection and Interpretable Machine Learning</i>	Menggunakan model machine learning (Random Forest, XGBoost) dengan optimasi hyperparameter melalui GridSearchCV untuk analisis data operasional. Kombinasi seleksi fitur Boruta dan model Random Forest (n_estimators=100, max_depth=5) menghasilkan akurasi prediksi hingga 92.5% dan AUC-ROC 0.94, memberikan wawasan untuk pengendalian sistem yang efisien.

1.6 Manfaat Penelitian

1. Untuk Penulis

Penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan wawasan dan pengetahuan penulis dalam penerapan teknik *machine learning*, khususnya dalam optimasi prediksi menggunakan model regresi dan *hyperparameter tuning*. Penelitian ini juga memberikan pengalaman praktis dalam mengolah data operasional PLTU serta mengasah kemampuan analisis untuk menyelesaikan masalah teknis di bidang energi.

2. Untuk Perusahaan

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi solusi prediktif untuk mengoptimalkan pengendalian *Total Spray Reheat* pada sistem reheater PLTU. Dengan model *machine learning* yang akurat, perusahaan dapat meningkatkan efisiensi operasional, mengurangi konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca, serta meminimalkan biaya pemeliharaan melalui pengaturan *Total Spray Reheat* yang optimal., sehingga mendukung pengambilan keputusan yang lebih tepat dan efektif.

3. Untuk Akademisi

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dan tambahan literatur bagi peneliti lain yang tertarik pada penerapan *machine learning* dalam prediksi parameter operasional PLTU. Hasil penelitian, khususnya perbandingan 12 model regresi dan analisis kepentingan fitur, dapat digunakan sebagai dasar untuk penelitian lanjutan terkait optimasi sistem energi menggunakan pendekatan berbasis data.

4. Untuk Lingkungan:

Penelitian ini diharapkan mendukung keberlanjutan lingkungan dengan mengurangi konsumsi batu bara dan emisi gas rumah kaca melalui optimasi *Total Spray Reheat*, sehingga berkontribusi pada operasi PLTU yang lebih ramah lingkungan.

1.7 Sistematika Penulisan

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menguraikan latar belakang penelitian, rumusan permasalahan, tujuan penelitian, batasan masalah, state of the art, dan sistematika penulisan. Bagian ini memberikan gambaran awal tentang pentingnya prediksi Total Spray Reheat pada sistem reheater PLTU untuk efisiensi energi dan keberlanjutan lingkungan, serta kerangka penelitian yang dilakukan.

BAB II TINJAU PUSTAKA

Bab ini membahas teori-teori yang mendukung penelitian, termasuk prinsip kerja sistem reheater dan parameter Total Spray Reheat dalam konteks efisiensi termal dan pengurangan emisi gas rumah kaca. Selain itu, bab ini mengulas konsep dasar machine learning, dengan fokus pada model regresi, teknik optimasi parameter, metrik evaluasi seperti Mean Squared Error (MSE), R-squared (R^2), dan Mean Absolute Error (MAE), serta metode analisis kepentingan fitur untuk memahami kontribusi variabel operasional seperti beban generator dan indeks pembentukan kerak.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi metode penelitian yang terbagi dalam sub bab jenis penelitian, teknik pengumpulan data, dan analisis data atau langkah-langkah pengolahan data.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini setelah data didapatkan kemudian dilakukan pengolahan data dengan menggunakan metode yang telah diuraikan pada bab sebelumnya.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Setelah data selesai diolah dan dianalisis, kemudian pada bab ini dilakukan penarikan kesimpulan berdasarkan hasil pengolahan dan diberikan saran-saran untuk penelitian dan perusahaan.