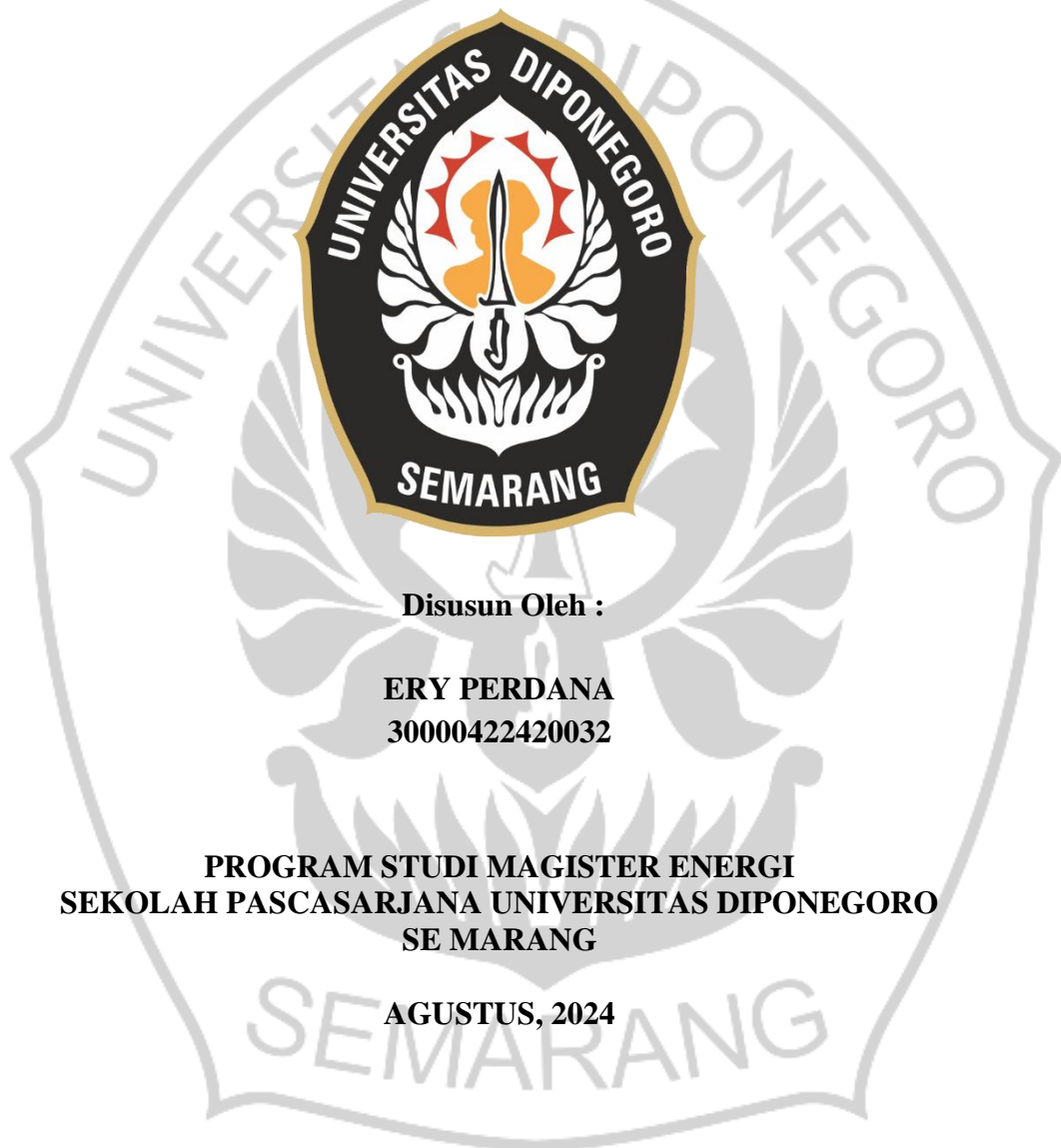


**PEMODELAN PREDIKSI *CAPACITY FACTOR* PLTU REMBANG BERBASIS
MACHINE LEARNING UNTUK MENINGKATKAN AKURASI
PERENCANAAN ENERGI PRIMER**

Tesis

Untuk memenuhi salah satu syarat mencapai derajat Pendidikan Strata Dua (S-2)
sebagai Magister Energi pada Program Studi Magister Energi



Disusun Oleh :

**ERY PERDANA
30000422420032**

**PROGRAM STUDI MAGISTER ENERGI
SEKOLAH PASCASARJANA UNIVERSITAS DIPONEGORO
SE MARANG**

AGUSTUS, 2024

PERSETUJUAN UJIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini. Dosen Pembimbing dari :

Mahasiswa : Ery Perdana
NIM : 30000422420032
Program Studi : Magister Energi
Judul Tesis : PEMODELAN PREDIKSI CAPACITY FACTOR
PLTU REMBANG BERBASIS MACHINE
LEARNING UNTUK MENINGKATKAN AKURASI
PERENCANAAN ENERGI PRIMER

Menyatakan bahwa mahasiswa tersebut telah melaksanakan Ujian Proposal Tesis dan Ujian Seminar Hasil Tesis sehingga menyetujui dan layak untuk melaksanakan Ujian Tesis.

Dosen Pembimbing I

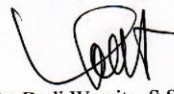
Semarang, 31 Juli 2024

Dosen Pembimbing II



(Dr. Ir. Sulardjaka, S.T., M.T., IPU, ASEAN Eng.)

NIP. 197104201998021001



(Dr. Budi Warsito, S.Si., M.Si.)

NIP. 197508241999031003

PERNYATAAN ORISINALITAS

Dengan ini saya menyatakan bahwa di dalam tesis ini tidak terdapat karya yang pernah ditulis atau diajukan untuk memperoleh gelar akademik di suatu perguruan tinggi dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebut dalam daftar pustaka.

Semarang, 12 Agustus 2024



ERY PERDANA
NIM 30000422420032

HALAMAN PENGESAHAN
TESIS
PEMODELAN PREDIKSI CAPACITY FACTOR PLTU REMBANG
BERBASIS MACHINE LEARNING UNTUK MENINGKATKAN AKURASI
PERENCANAAN ENERGI PRIMER

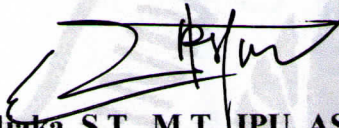
Disusun Oleh:
ERY PERDANA
30000422420032

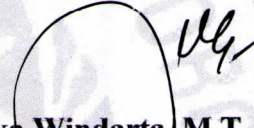
Telah diujikan dan dinyatakan lulus oleh Tim Penguji
Pada tanggal 12 Agustus 2024

Tim Penguji,

Pembimbing Pertama

Penguji Pertama

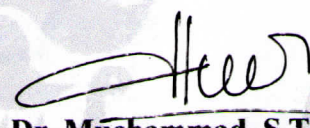

Dr. Ir. Sulardjaka, S.T., M.T., IPU, ASEAN Eng.
NIP. 197104201998021001


Dr. Ir. Jaka Windarta, M.T., IPU, ASEAN Eng.
NIP. 196405261989031002

Pembimbing Kedua

Penguji Kedua

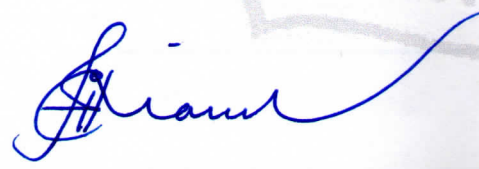

Dr. Budi Warsito, S.Si., M.Si.
NIP. 197508241999031003



Dr. Muchammad, S.T., M.T.
197303051997021001

Tesis ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh gelar Magister Energi
Tanggal 12 Agustus 2024

Ketua Program Studi Magister Energi

Dekan Sekolah Pascasarjana


Prof. Dr.-Ing. Ir. Silviana, S.T., M.T., IPM.,
ASEAN Eng.
NIP. 197412162000122001


Prof. Ir. M. Agung Wibowo, M.M., M.Sc., Ph.D.
NIP. 196702081994031005



**PERNYATAAN PERSETUJUAN
PUBLIKASI TESIS UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Diponegoro, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Ery Perdana
NIM : 30000422420032
Program Studi : Magister Energi
Sekolah : Program Pascasarjana
Jenis Karya : Tesis

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Diponegoro Hak Bebas Royalti Noneksklusif atas karya ilmiah saya yang berjudul:

“PEMODELAN PREDIKSI CAPACITY FACTOR PLTU REMBANG BERBASIS MACHINE LEARNING UNTUK MENINGKATKAN AKURASI PERENCANAAN ENERGI PRIMER”

beserta perangkat yang ada. Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini, Program Studi Magister Energi Sekolah Pascasarjana Universitas Diponegoro berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tesis saya selama mencantumkan nama saya sebagai penulis dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Dibuat di: Semarang
Pada Tanggal: 12 Agustus 2024
Yang menyatakan



Ery Perdana
30000422420032

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kehadirat Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “Pemodelan Prediksi *Capacity Factor* PLTU Rembang Berbasis *Machine Learning* Untuk Meningkatkan Akurasi Perencanaan Energi Primer”. Tesis ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Energi pada Program Studi Magister Energi, Sekolah Pascasarjana Universitas Diponegoro Semarang.

Pada kesempatan ini penulis tidak lupa mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membimbing, memberi bantuan, arahan dan saran dalam penyusunan tesis ini yaitu kepada :

1. Prof. Ir. M. Agung Wibowo, M.M., M.Sc., Ph.D., selaku Dekan Sekolah Pascasarjana, Universitas Diponegoro Semarang.
2. Prof. Dr.-Ing. Ir. Silviana, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng., selaku Ketua Program Studi Magister Energi Universitas Diponegoro Semarang.
3. Dr. Ir. Sulardjaka, S.T., M.T., IPU, ASEAN Eng., selaku Dosen Pembimbing Pertama atas waktu, tenaga, petunjuk, dan keramah-tamahannya dalam membimbing penulis mengerjakan tesis.
4. Dr. Budi Warsito, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Kedua atas waktu, tenaga, petunjuk, dan keramah-tamahannya dalam membimbing penulis mengerjakan tesis ini.
5. Manajemen PT PLN Nusantara Power Unit Pembangkitan Rembang yang telah memberikan izin bagi penulis untuk melanjutkan studi di Magister Energi Universitas Diponegoro dan melakukan penelitian di PLTU Rembang.
6. Bapak dan Ibu Dosen Magister Energi yang telah memberikan pengajaran yang sangat luar biasa kepada penulis.
7. Teman – teman Magister Energi yang selalu mendukung dan memberi semangat kepada penulis.

Akhir kata penulis memohon maaf apabila terdapat banyak kekurangan dalam penyusunan tesis ini. Oleh karena itu, saran dan kritik yang membangun sangat diharapkan guna penyempurnaan dan pengembangan tesis ini ke arah yang lebih

baik. Mudah-mudahan usaha penyusunan tesis ini memperoleh ridha dari Allah SWT. Amin.

Semarang, 31 Juli 2024

Penulis



DAFTAR ISI

PERSETUJUAN UJIAN TESIS	Error! Bookmark not defined.
PERNYATAAN ORISINALITAS	Error! Bookmark not defined.
HALAMAN PENGESAHAN	Error! Bookmark not defined.
PERNYATAAN PERSETUJUAN	Error! Bookmark not defined.
KATA PENGANTAR	5
DAFTAR ISI	8
DAFTAR GAMBAR	10
DAFTAR TABEL	11
NOMENKLATUR	12
INTISARI	13
ABSTRACT	14
BAB I	Error! Bookmark not defined.
PENDAHULUAN	Error! Bookmark not defined.
1.1 Latar Belakang	Error! Bookmark not defined.
1.2 Perumusan Masalah	Error! Bookmark not defined.
1.3 Tujuan Penelitian	Error! Bookmark not defined.
1.4 Manfaat Penelitian	Error! Bookmark not defined.
1.5 Originalitas Penelitian	Error! Bookmark not defined.
BAB II	Error! Bookmark not defined.
LANDASAN TEORI	Error! Bookmark not defined.
2.1 Dasar Teori	Error! Bookmark not defined.
2.1.1 <i>Capacity Factor</i> (Faktor Kapasitas)	Error! Bookmark not defined.
2.1.2 Energi Primer	Error! Bookmark not defined.
2.1.3 Prediksi	Error! Bookmark not defined.
2.1.4 Regresi	Error! Bookmark not defined.
2.1.5 <i>Machine Learning</i>	Error! Bookmark not defined.
2.1.6 <i>Random forest regression</i>	Error! Bookmark not defined.
2.1.7 <i>Support vector regression</i>	Error! Bookmark not defined.
2.1.8 <i>Multiple polynomial regression</i>	Error! Bookmark not defined.
2.1.9 <i>Multiple linear regression</i>	Error! Bookmark not defined.
2.1.10 <i>Root Mean Square Error</i>	Error! Bookmark not defined.
2.1.11 <i>Mean Absolute Percentage Error</i>	Error! Bookmark not defined.

2.1.11	Peramalan Deret Waktu.....	Error! Bookmark not defined.
2.2	Tinjauan Pustaka	Error! Bookmark not defined.
BAB III.....		Error! Bookmark not defined.
METODE PENELITIAN.....		Error! Bookmark not defined.
3.1	Lokasi Penelitian.....	Error! Bookmark not defined.
3.2	Jenis Penelitian.....	Error! Bookmark not defined.
3.3	Kerangka Pikir Penelitian.....	Error! Bookmark not defined.
3.4	Ruang Lingkup Penelitian.....	Error! Bookmark not defined.
3.5	Jenis dan Sumber Data	Error! Bookmark not defined.
3.6	Teknik Pengumpulan Data	Error! Bookmark not defined.
3.7	Teknik Analisa Data.....	Error! Bookmark not defined.
BAB IV.....		Error! Bookmark not defined.
HASIL DAN PEMBAHASAN.....		Error! Bookmark not defined.
4.1	Tahap <i>Data Preprocessing</i>	Error! Bookmark not defined.
4.2	Pemilihan variabel signifikan.....	Error! Bookmark not defined.
4.3	Pengembangan Model dan Validasi	Error! Bookmark not defined.
4.3.1	Pengembangan Model Prediksi	Error! Bookmark not defined.
4.3.2	Validasi Model.....	Error! Bookmark not defined.
4.4	Prediksi CF dengan model terbaik.....	Error! Bookmark not defined.
4.4.1	Prediksi <i>merit order</i>	Error! Bookmark not defined.
4.4.2	Prediksi EFOR	Error! Bookmark not defined.
4.4.3	Rencana SOF.....	Error! Bookmark not defined.
4.4.4	Prediksi Beban Jamali	Error! Bookmark not defined.
4.4.5	Prediksi DMN Jamali	Error! Bookmark not defined.
4.4.6	Prediksi CF PLTU Rembang.....	Error! Bookmark not defined.
4.5	Prediksi CF masing-masing unit.....	Error! Bookmark not defined.
4.6	Evaluasi Akurasi Prediksi CF.....	Error! Bookmark not defined.
4.7	Pemanfaatan Prediksi CF untuk alokasi kebutuhan energi primer.....	Error! Bookmark not defined.
Bookmark not defined.		
BAB V.....		Error! Bookmark not defined.
KESIMPULAN DAN SARAN.....		Error! Bookmark not defined.
5.1	Kesimpulan	Error! Bookmark not defined.
5.2	Saran	Error! Bookmark not defined.
DAFTAR PUSTAKA		Error! Bookmark not defined.

DAFTAR GAMBAR

- Gambar 1. 1** Pareto Biaya Usaha PLTU Rembang 2019-2021 . **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.1** Bauran Energi Primer Indonesia Tahun 2017 dan Tahun 2022 **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.2** Produksi Listrik per Jenis Pembangkit Tahun 2022 **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.3** Diagram Alur *Random forest regression*.....**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.4** Ilustrasi *Support Vector Machine* **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.5** Ilustrasi *Linear Regression* **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3. 1** Kerangka Pikir Penelitian **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3.2** Penerapan uji signifikansi variabel untuk pemilihan variabel independen **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 3. 3** Proses konversi prediksi CF menjadi alokasi kebutuhan tongkang batubara bulanan **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.1** Hasil pengujian F yang bersumber dari output regresi linier ... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.2** Validasi model *random forest regression* **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.3** Validasi model *support vector regression*..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.4** Validasi model *multiple polynomial regression* **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.5** Validasi model *multiple linear regression* **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.6** Prediksi *Merit order* dengan RNN ... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.7** Prediksi EFOR dengan RNN **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 4.8** Prediksi Beban Jamali dengan SARIMA **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.9 Prediksi CF PLTU Rembang Januari 2024 – Desember 2026 . **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.10 Prediksi CF PLTU Rembang Unit 10 Tahun 2024-2026 **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.11 Prediksi CF PLTU Rembang Unit 20 Tahun 2024-2026 **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.12 Perbandingan Prediksi dan Realisasi CF PLTU Rembang Februari 2024..... **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.13 *Dashboard* aplikasi FOR CITY (“Forecasting of Capacity Factor”) **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4. 14 Halaman entry pada aplikasi FOR CITY **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.15 Tren Pola Stock Batubara akhir bulan PLTU Rembang Tahun 2024 **Error! Bookmark not defined.**

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Ringkasan Penelitian Sebelumnya **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 3.1 Kandidat variabel independen **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 3.2 Jenis Data dan Sumber Data Penelitian. **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 3.3 Teknik prediksi variabel independen **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.1 Data awal untuk pemodelan prediksi CF **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.2 Hasil imputasi data awal untuk pemodelan CF. **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.3 Data Pemodelan Prediksi CF PLTU Rembang. **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.4 Hasil proses *backward elimination* variabel independen **Error! Bookmark not defined.**

Table 4.5 Perbandingan MAPE dan *R-squared* empat model prediksi .. **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.6 Distribusi *residual* masing-masing model **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.7 Perbandingan validasi model LSTM dan RNN untuk prediksi *Merit order* **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.8 Perbandingan validasi model LSTM dan RNN untuk prediksi EFOR **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.9 Prediksi nilai SOF PLTU Rembang Januari 2024 - Desember 2026 **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.10 Perbandingan validasi model ARIMA dan SARIMA untuk prediksi beban Jamali.....**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.11 Prediksi Beban Jamali 2024-2028**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.12 Prediksi CF PLTU Rembang Januari 2024 – Desember 2026 **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.13 Prediksi CF Tahunan PLTU Rembang 2024-2026 **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.14 Data untuk pemodelan prediksi CF PLTU Rembang Unit 10..... **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.15 Data untuk pemodelan prediksi CF PLTU Rembang Unit 20..... **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.16 Prediksi CF PLTU Rembang Unit 10**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.17 Prediksi CF PLTU Rembang Unit 20**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.18 Perbandingan Prediksi dan Realisasi CF PLTU Rembang Februari-Juni 2024**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.19 Panduan *period hours* dan setting pola bulanan..... **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.20 Perbandingan Pencapaian HOP Semester I 2023 dan Semester I 2024.. **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.21 Proyeksi Kebutuhan Batubara 2024-2026 Berbasis Prediksi CF **Error! Bookmark not defined.**

NOMENKLATUR

1. PLTU : Pembangkit Listrik Tenaga Uap
2. CF : *Capacity Factor*
3. SOF : *Scheduled Outage Factor*
4. EFOR : *Equivalent Forced Outage Rate*
5. DMN : Daya Mampu Netto
6. IFC : *Incremental Fuel Cost*

7. ROT	: Rencana Operasi Tahunan
8. ROB	: Rencana Operasi Bulanan
9. RAE	: Rapat Alokasi Energi
10. RUPTL	: Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik
11. Jamali	: Jawa Madura Bali
12. Jateng	: Jawa Tengah
13. MAPE	: <i>Mean Absolute Percentage Error</i>
14. RMSE	: <i>Root Mean Square Error</i>
15. RSS	: <i>Residual Sum Squares</i>
16. kWh	: <i>Kilo Watt Hours</i>
17. MWh	: <i>Mega Watt Hours</i>
18. SVR	: <i>Support vector regression</i>
19. SVM	: <i>Support Vector Machine</i>
20. MLR	: <i>Multiple linear regression</i>
21. RFR	: <i>Random forest regression</i>
22. MPR	: <i>Multiple polynomial regression</i>
23. ARIMA	: <i>Auto Regressive Integrated Moving Average</i>
24. SARIMA	: <i>Seasonal Auto Regressive Integrated Moving Average</i>
25. LSTM	: <i>Long Short-Term Memory</i>
26. RNN	: <i>Recurrent Neural Network</i>
27. MLP	: <i>Multi-Layer Perceptron</i>
28. BP	: <i>Back Propagation</i>
29. SFC	: <i>Specific Fuel Consumption</i>
30. PS	: Pemakaian Sendiri
31. HOP	: Hari Operasional Pembangkit
32. RKAP	: Rencana Kerja Anggaran Perusahaan

INTISARI

PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap) Rembang yang berkapasitas 2 x 315 MW merupakan pembangkit listrik berbahan bakar batubara kapasitas yang strategis di area Jawa Tengah. Pengeluaran untuk pembelian bahan bakar menempati pengeluaran terbesar PLTU Rembang. Salah satu upaya untuk menekan pengeluaran bahan bakar ini adalah dengan melakukan perencanaan pembelian bahan bakar yang akurat. Perencanaan pembelian bahan bakar sangat ditentukan

oleh proyeksi penjualan tenaga listrik yang bisa diperoleh dari prediksi CF (*Capacity Factor*) PLTU Rembang. Akan tetapi, PLTU Rembang belum memiliki model prediksi CF yang akurat. Selama ini prediksi CF tahunan PLTU Rembang berbasis data CF ROT (Rencana Operasi Tahunan) dari pengelola operasi sistem Jawa-Madura-Bali yang memiliki selisih yang cukup besar antara CF realisasi dan CF rencana selama 2017-2021, yaitu sebesar rata-rata lebih dari 14% per tahun. Adapun prediksi CF bulanan hanya berdasarkan pada CF bulan sebelumnya.

Penelitian ini mengembangkan dan membandingkan empat model prediksi CF berbasis *machine learning* yaitu *random forest regression*, *support vector regression*, *multiple polynomial regression*, dan *multiple linear regression*. Variabel independen dalam model regresi berasal dari internal dan eksternal yang proses pemilihannya melalui uji F dan uji t. Penelitian ini juga memprediksi CF PLTU Rembang di masa mendatang menggunakan model terbaik dari empat model prediksi yang memiliki MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) terkecil. Dari perbandingan empat model, model *multiple linear regression* memiliki MAPE terkecil, yaitu sebesar 7,83%. Dengan menggunakan model *multiple linear regression*, CF tahun PLTU Rembang pada tahun 2024-2026 diprediksi berada pada rentang 82% - 84% CF bulan Februari-Juni 2024 berada pada rentang 87%-91%. Akurasi prediksi CF bulanan termasuk dalam kategori sangat baik dengan nilai MAPE sebesar 2,35%. Prediksi CF bulanan sangat bermanfaat untuk menentukan alokasi pembelian bahan bakar bulanan dengan mempertimbangkan nilai awal stok bahan bakar dan target umur persediaan bahan bakar pada rentang 17-30 HOP (Hari Operasional Pembangkit).

Kata kunci: *Capacity Factor*, Regresi, *Machine Learning*, *Multiple linear regression*, MAPE.

ABSTRACT

The Rembang Coal-Fired Power Plant (PLTU Rembang), with a capacity of 2 x 315 MW, is a strategically important coal-fired power plant in Central Java. Expenditures on fuel purchases constitute the largest expense for PLTU Rembang. One effort to reduce these fuel costs is through accurate fuel procurement planning. This planning is heavily influenced by the projected electricity sales, which can be derived from the prediction of the Capacity Factor (CF) of PLTU Rembang. However, PLTU Rembang does not yet have an accurate CF prediction model. So

far, the annual CF predictions for PLTU Rembang have been based on CF data from the Annual Operating Plan (Rencana Operasi Tahunan, ROT) provided by the Java-Madura-Bali system operators, which has shown a significant discrepancy between the actual CF and the planned CF during 2017-2021, with an average difference of more than 14% per year. Monthly CF predictions have only been based on the CF of the previous month.

This research develops and compares four machine learning-based CF prediction models: *random forest regression*, *support vector regression*, *multiple polynomial regression*, and *multiple linear regression*. The independent variables in the regression models come from both internal and external sources, selected through F-tests and t-tests. This research also predicts the future CF of PLTU Rembang using the best model among the four prediction models, which has the smallest Mean Absolute Percentage Error (MAPE). Among the four models, the *multiple linear regression* model has the smallest MAPE, at 7.83%. Using the *multiple linear regression* model, the annual CF for PLTU Rembang in 2024-2026 is predicted to be in the range of 82% - 84%, and the CF for February-June 2024 is predicted to be in the range of 87% - 91%. The accuracy of the monthly CF predictions is classified as very good, with a MAPE of 2.35%. Monthly CF predictions are very useful for determining the allocation of monthly fuel purchases, considering the initial fuel stock value and the target fuel inventory age in the range of 17-30 HOP (Days of Plant Operation).

Keywords: Capacity Factor, Regression, Machine Learning, *Multiple linear regression*, MAPE.