

| | |
|---|------|
| HALAMAN JUDUL | i |
| HALAMAN PENGESAHAN PEMBIMBING | ii |
| HALAMAN PENGESAHAN TIM PENGUJI..... | iii |
| PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI | iv |
| KATA PENGANTAR | v |
| DAFTAR ISI..... | vii |
| DAFTAR GAMBAR..... | x |
| DAFTAR TABEL..... | xii |
| INTISARI | xiii |
| <i>ABSTRACT</i> | xiv |
| BAB I PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1. Latar Belakang..... | 1 |
| 1.2. Rumusan Masalah..... | 3 |
| 1.3. Batasan Masalah | 3 |
| 1.4. Tujuan Penelitian | 4 |
| 1.5. Manfaat Penelitian | 4 |
| 1.6. Keaslian/Kebaruan Penelitian..... | 5 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA | 8 |
| 2.1. Penerapan ANN untuk Prediksi Daya Turbin..... | 8 |
| 2.2. Implementasi <i>Deep Learning</i> dalam Prediksi Daya Listrik..... | 11 |
| 2.3. Perbandingan Algoritma <i>Training</i> dalam Model ANN | 16 |
| 2.4. Pemilihan Fungsi Aktivasi dalam Jaringan Saraf Tiruan | 18 |
| 2.5. Optimasi Arsitektur ANN melalui <i>Hyperparameter</i> dan <i>Preprocessing Data</i> .. | 19 |
| 2.6. Penentuan Jumlah <i>Cluster</i> dalam <i>Preprocessing Data</i> | 22 |
| 2.7. Penggunaan PCA sebagai Alat Bantu Seleksi Fitur | 23 |
| 2.8. ANN untuk <i>Maintenance</i> dan <i>Fault Diagnosis</i> | 25 |
| 2.9. Gap Penelitian dan Relevansi terhadap Studi Ini..... | 28 |
| BAB III LANDASAN TEORI | 29 |
| 3.1. Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap | 29 |
| 3.2. Komponen-Komponen Utama Siklus Tenaga Uap | 30 |
| 3.3. Termodinamika Turbin Uap | 33 |

| | |
|---|-----------|
| 3.4. PLTU Banjarsari | 38 |
| 3.5. Jaringan Saraf Tiruan | 39 |
| 3.6. Fungsi Aktivasi | 41 |
| 3.7. <i>Neural Network Backpropagation</i> | 44 |
| 3.8. <i>K-Means Clustering</i> | 47 |
| 3.9. <i>Principal Component Analysis</i> | 49 |
| 3.10. MATLAB | 51 |
| BAB IV METODOLOGI PENELITIAN | 54 |
| 4.1. Lokasi Penelitian | 54 |
| 4.2. Alat dan Bahan Penelitian | 54 |
| 4.2.1. Alat Penelitian | 54 |
| 4.2.2. Bahan Penelitian | 55 |
| 4.3. Tata Laksana Penelitian | 55 |
| 4.3.1. <i>Data Acquisition</i> | 58 |
| 4.3.2. <i>Data Preprocessing</i> | 61 |
| 4.3.2.1. <i>Data Clustering</i> | 61 |
| 4.3.2.2. <i>Data Cleaning</i> | 62 |
| 4.3.2.3. <i>Data Separation</i> | 63 |
| 4.3.2.4. <i>Data Standardization</i> | 64 |
| 4.3.2.5. <i>Feature Selection</i> | 66 |
| 4.3.3. Pengembangan Program dengan <i>Gridsearch Hyperparameter</i> | 67 |
| 4.3.4. Metrik Evaluasi Model | 71 |
| BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN | 73 |
| 5.1. <i>Data Preprocessing</i> | 73 |
| 5.1.1. Analisis Data yang Hilang | 73 |
| 5.1.2. Hasil <i>Data Clustering</i> | 75 |
| 5.1.3. Deteksi <i>Outlier</i> | 79 |
| 5.1.4. <i>Feature Selection</i> | 80 |
| 5.2. Ringkasan Hasil Simulasi ANN | 84 |
| 5.3. Evaluasi Performansi Model | 85 |
| 5.3.1. Interpretasi Kombinasi <i>Hyperparameter</i> berdasarkan Skenario Fitur | 85 |
| 5.3.2. Evaluasi Statistik Pengaruh <i>Hyperparameter</i> | 90 |
| 5.3.3. Evaluasi Dampak Strategi <i>Feature Selection</i> | 93 |
| 5.4. Analisis Model Terbaik | 95 |

| | |
|--|-----|
| 5.4.1. Evaluasi Kinerja Model | 95 |
| 5.4.2. <i>Training State</i> Model | 96 |
| 5.4.3. Analisis Regresi | 98 |
| 5.4.4. Analisis <i>Error Residual</i> | 99 |
| 5.5. Visualisasi Model Terbaik dan Prediksi Daya Listrik | 101 |
| 5.5.1. Visualisasi Arsitektur <i>Neural Network</i> | 101 |
| 5.5.2. Visualisasi Prediksi Pembangkitan Daya Listrik <i>Steam Turbine</i> | 102 |
| BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN | 104 |
| 6.1. Kesimpulan | 104 |
| 6.2. Saran | 105 |
| DAFTAR PUSTAKA | 106 |
| LAMPIRAN..... | 111 |

| | |
|---|----|
| Gambar 2.1. Diagram Alir Model NARMA..... | 8 |
| Gambar 2.2. Perbandingan ANN dan SVM | 9 |
| Gambar 2.3. Peralatan untuk Memprediksi Parameter Operasional DWT..... | 9 |
| Gambar 2.4. Struktur ANN untuk Jaringan MLP (a) dan RBP (b) untuk Memprediksi Daya Listrik DWT | 11 |
| Gambar 2.5. Jumlah Neuron Optimal, Menggunakan Metode MLP dan RBF untuk Memprediksi Daya Angin pada DWT | 11 |
| Gambar 2.6. Tinjauan Umum Proses yang Terkait dengan Produksi Listrik..... | 12 |
| Gambar 2.7. Matriks Korelasi Parameter yang Diteliti | 12 |
| Gambar 2.8. Diagram Sederhana yang Menunjukkan Parameter Fitur Daya Listrik yang Paling Berkorelasi..... | 13 |
| Gambar 2.9. Hasil Prediksi Model LSTM (a), CNN (b), dan Hibrid CNN-LSTM (c) terhadap Hasil Aktual | 14 |
| Gambar 2.10. Arsitektur Model Prediksi Daya Turbin Uap..... | 15 |
| Gambar 2.11. Matriks Korelasi Data Input dari Turbin Uap..... | 15 |
| Gambar 2.12. <i>Error</i> untuk setiap Model..... | 16 |
| Gambar 2.13. <i>Best Validation Performance</i> untuk Algoritma <i>Lavenberg-Marquardant</i> (a), <i>Bayesian Regularization</i> (b), dan <i>Scaled Conjugate Gradient</i> (c) dengan Arsitektur 150 Neuron | 17 |
| Gambar 2.14. Ilustrasi Keseluruhan Kerangka Kerja dari <i>Targeted</i> PCA dan Model Regresi LASSO. | 24 |
| Gambar 2.15. Grafik Performa Model ANN yang Dilatih Menggunakan Fitur Input yang Dipilih Melalui Regresi LASSO dan PCA..... | 25 |
| Gambar 2.16. Skenario pembuatan FDD Turbin Uap Muara Karang | 27 |
| Gambar 3.1. Siklus PLTU Sederhana | 29 |
| Gambar 3.2. Ilustrasi Penampang Turbin Uap | 30 |
| Gambar 3.3. Ilustrasi Kondensor | 31 |
| Gambar 3.4. Diagram Skematik <i>Boiler</i> pada Generator Uap Modern..... | 32 |
| Gambar 3.5. Kurva Temperatur dan Entropi pada Siklus <i>Rankine</i> Sederhana..... | 34 |
| Gambar 3. 6. Siklus Kombinasi <i>Reheat</i> dan <i>Regeneratif</i> pada <i>Steam Turbine</i> | 36 |
| Gambar 3.7. Diagram Kesetimbangan Kalor dan Massa Turbin Uap PLTU Banjarsari | 39 |

| | |
|--|-----|
| Gambar 3.8. Model <i>Neuron</i> Biologis..... | 39 |
| Gambar 3.9. Alur Proses Jaringan Syaraf Tiruan | 40 |
| Gambar 3.10. Model <i>Non-Linear</i> pada Suatu <i>Neuron</i> | 40 |
| Gambar 3.11. Struktur <i>Neural Network</i> | 44 |
| Gambar 3.12. <i>Neural Network Toolbox</i> MATLAB | 52 |
| Gambar 3.13. <i>Curve Fitting Editor</i> | 52 |
| Gambar 3.14. <i>Clustering Editor</i> | 52 |
| Gambar 3.15. <i>Dynamic Time Series Editor</i> : (a) <i>Nonlinear Autoregressive</i> dengan <i>External Input</i> , (b) <i>Nonlinear Autoregressive</i> , dan (c) <i>Nonlinear Input-Output</i> | 53 |
| Gambar 3.16. <i>Pattern Recognition dan Classification Editor</i> | 53 |
| Gambar 4.1. Lokasi PLTU Banjarsari | 54 |
| Gambar 4.2. Diagram <i>Input-Process-Output</i> Prediksi Generrasi Daya Turbin..... | 55 |
| Gambar 4.3. Diagram Alir Utama Pelaksanaan Penelitian..... | 56 |
| Gambar 4.4. Detail Sub-Proses <i>Data Clustering</i> (a) dan <i>Data Cleaning</i> (b) | 57 |
| Gambar 4.5. Detail Sub-Proses <i>Feature Selection</i> (a) dan Pemrograman ANN (b) | 58 |
| Gambar 4.6. Titik Pengambilan Data | 59 |
| Gambar 5.1. Jumlah Klaster Optimal berdasarkan <i>Elbow Method</i> | 76 |
| Gambar 5.2. Visualisasi Pengelompokan Data Historis <i>Steam Turbine</i> | 77 |
| Gambar 5.3. <i>Scree Plot Eigenvalue Principal Components</i> | 81 |
| Gambar 5.4. <i>Heatmap RMSE-Testing</i> Berdasarkan Variasi <i>Hyperparameter</i> pada Setiap Skeanrio Jumlah Fitur | 86 |
| Gambar 5.5. Kurva <i>Loss Function</i> Selama Proses Simulasi..... | 95 |
| Gambar 5.6. Training State Selama Proses Simulasi..... | 97 |
| Gambar 5.7. Hasil Regresi Data Prediksi terhadap Data Aktual | 99 |
| Gambar 5.8. Histogram Residual dan <i>Q-Q Plot</i> Model ANN | 100 |
| Gambar 5.9. Visualisasi Arsitektur Model ANN yang Digunakan | 102 |
| Gambar 5.10. Perbandingan Nilai Aktual dengan Nilai Prediksi tiap Subset Data..... | 103 |

| | |
|--|----|
| Tabel 1.1. Rangkuman Penelitian <i>Neural Network</i> untuk Prediksi Daya Turbin..... | 5 |
| Tabel 2.1. Perbandingan Metrik Kinerja Selama Fase Pengujian | 13 |
| Tabel 2.2. Hasil Proses Pembelajaran Pada Arsitektur ANN | 19 |
| Tabel 2.3. Perbandingan Antara Pendekatan yang Diusulkan dan Dua Kebijakan Acuan Menggunakan Data Pemantauan Kondisi Bearing..... | 26 |
| Tabel 2.4. Hasil Perbandingan Skenario FDD..... | 27 |
| Tabel 3.1. Spesifikasi PLTU Banjarsari | 38 |
| Tabel 3.2. Perbandingan Algoritma <i>Training Data Neural Network</i> | 47 |
| Tabel 4.1. Variabel Pengambilan Data | 60 |
| Tabel 4.2. Kombinasi <i>Hyperparameter Artificial Neural Network</i> | 68 |
| Tabel 4.3. Daftar <i>Hyperparameter Default</i> dalam Rancang Bangun Model ANN | 70 |
| Tabel 5.1. Hasil Perhitungan Statistik <i>Feature</i> | 74 |
| Tabel 5.2. Hasil Perhitungan <i>K-Means Clustering</i> | 75 |
| Tabel 5.3. Hasil <i>K-Means Clustering</i> dengan 5 Cluster | 77 |
| Tabel 5.4. Hasil Deteksi <i>Outlier</i> pada Dataset Klasterisasi..... | 79 |
| Tabel 5.5. Nilai <i>Eigenvector Principal Components</i> | 82 |
| Tabel 5.6. Seleksi Fitur Berdasarkan Nilai <i>Eigenvector</i> Terbesar dari Setiap <i>Principal Component</i> | 83 |
| Tabel 5.7. Ringkasan Model ANN Skenario Selected <i>Feature</i> | 84 |
| Tabel 5.8. Hasil Analisis Varians <i>Hyperparameter</i> ANN | 90 |
| Tabel 5.9. Perbandingan Performansi dan Kompleksitas Model ANN untuk Dua Strategi Jumlah Fitur..... | 93 |