UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Analisis Model Hybrid ARIMAX-CNN-LSTM dalam Peramalan Harga Komoditas Nikel Pasca Pandemi COVID-19
Razi Ghifari Alfarizi, Prof. Dr. Gunardi, M.Si.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL . . . . . **i**
HALAMAN PENGESAHAN . . . . . **iii**
HALAMAN PERNYATAAN . . . . . **iii**
HALAMAN PERSEMBAHAN . . . . . **iv**
HALAMAN MOTTO . . . . . **v**
PRAKATA . . . . . **vi**
DAFTAR ISI . . . . . **vii**
DAFTAR TABEL . . . . . **xi**
DAFTAR GAMBAR . . . . . **xiii**
DAFTAR LAMBANG . . . . . **xiv**
INTISARI . . . . . **xv**
ABSTRACT . . . . . **xvi**
I PENDAHULUAN **1**
1.1 Latar Belakang Masalah 1
1.2 Perumusan Masalah 4
1.3 Tujuan Penelitian 4
1.4 Manfaat Penelitian 4
1.5 Batasan Masalah 5
1.6 Tinjauan Pustaka 6
1.7 Metode Penelitian 10
1.8 Sistematika Penulisan 10
II DASAR TEORI **13**
2.1 Teori *Time Series* 13
2.1.1 Stasioneritas 14
2.1.2 Fungsi Autokorelasi 16
2.1.3 White Noise 18
2.2 Penanganan Pencilan: Metode Winsorisasi 20
2.2.1 Deteksi Pencilan dengan Metode IQR 20
2.2.2 Prosedur Winsorisasi 20
2.3 Model ARIMA 22
2.3.1 Komponen *Autoregressive* (AR) 22
2.3.2 Komponen *Moving Average* (MA) 23
2.3.3 Komponen *Integrated* (I) 24

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Analisis Model Hybrid ARIMAX-CNN-LSTM dalam Peramalan Harga Komoditas Nikel Pasca Pandemi COVID-19
Razi Ghifari Alfarizi, Prof. Dr. Gunardi, M.Si.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

2.4 Maximum Likelihood Estimation (MLE) 24
2.5 Model ARIMAX 27
2.5.1 Definisi Model ARIMAX 27
2.5.2 Estimasi Parameter ARIMAX 28
2.6 Seleksi Variabel Eksogen 29
2.6.1 Fungsi Korelasi Silang (*Cross-Correlation Function*, CCF) . 29
2.6.2 Uji *Variance Inflation Factor* (VIF) 30
2.7 Uji Diagnostik Residual Model ARIMAX 30
2.7.1 Uji Autokorelasi: Ljung-Box 30
2.7.2 Uji Normalitas: Jarque-Bera 31
2.7.3 Uji Homoskedastisitas: Breusch-Pagan 32
2.8 Uji Linearitas dan Nonlinearitas Deret Waktu 33
2.8.1 Uji Ramsey RESET 33
2.8.2 Uji BDS 34
2.9 Jaringan Saraf Tiruan (Artificial Neural Network) 35
2.9.1 Struktur dan Komponen Jaringan Saraf Tiruan 35
2.9.2 Multilayer Perceptron (MLP) 36
2.9.3 Backpropagation 37
2.10 Neural Networks untuk *Time Series* 38
2.10.1 Istilah teknis yang digunakan 39
2.10.2 *Convolutional Neural Networks* (CNN) 40
2.10.3 *Long Short-Term Memory* (LSTM) 41
2.10.4 Arsitektur Gabungan CNN-LSTM untuk Deret Waktu . . . 45
2.10.5 Adam (*Adaptive Moment Estimation*) 46
2.10.6 Konvergensi Optimizer 47
2.11 Evaluasi Performa Model 48
2.12 Kerangka Matematis Model *Hybrid* Berbasis Dekomposisi Residual 49
III MODEL HYBRID ARIMAX-CNN-LSTM UNTUK PERAMALAN HARGA KOMODITAS NIKEL 53
3.1 Data dan Variabel Penelitian 53
3.2 Prasyarat Analisis dan Asumsi Model 54
3.2.1 Formulasi statistik uji Jarque-Bera 55
3.3 Hipotesis Penelitian 55
3.4 Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous Variables (ARIMAX) 57
3.4.1 Peran ARIMAX dalam *pipeline* penelitian 57

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Analisis Model Hybrid ARIMAX-CNN-LSTM dalam Peramalan Harga Komoditas Nikel Pasca Pandemi COVID-19
Razi Ghifari Alfarizi, Prof. Dr. Gunardi, M.Si.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

3.4.2 Spesifikasi Model ARIMAX yang Digunakan 57
3.5 Convolutional Neural Network (CNN) 58
3.5.1 Spesifikasi model CNN yang digunakan 58
3.5.2 Formulasi matematika operasional CNN (*sliding window* dan target) 59
3.6 Long Short-Term Memory (LSTM) 59
3.6.1 Spesifikasi model LSTM yang digunakan 59
3.6.2 Formulasi matematika operasional LSTM 60
3.7 Model CNN-LSTM 60
3.7.1 Struktur dan Alur Model CNN-LSTM 60
3.7.2 Peran CNN-LSTM dalam Penelitian 62
3.8 Model Hybrid ARIMAX-CNN-LSTM 62
3.8.1 Prinsip Dekomposisi dan Formulasi Gabungan 63
3.8.2 Alur Empat Tahap Pemodelan Hybrid 63
3.8.3 Pelatihan Berjenjang dan Fungsi *Loss* pada Residual 65
3.8.4 Penalaan Hiperparameter 66
3.8.5 Ringkasan Spesifikasi *Hybrid* dalam Penelitian Ini 66
3.8.6 Rujukan Metrik Evaluasi 67
IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN 68
4.1 Eksplorasi Data 68
4.2 Data *Training* dan Data *Testing* 70
4.3 Pembentukan Model ARIMAX 70
4.3.1 Hasil Analisis Fungsi Korelasi Silang (CCF) 72
4.3.2 Pemeriksaan Stasioneritas Data *Training* terhadap Ragam . 73
4.3.3 Pemeriksaan Stasioneritas Data *Training* terhadap Rata-rata 73
4.3.4 Identifikasi Model 75
4.3.5 Alur Analisis 77
4.4 Pemodelan Runtun Waktu dengan Metode CNN 83
4.4.1 Spesifikasi pelatihan model CNN 83
4.4.2 Model CNN dengan Fungsi Aktivasi ReLU 84
4.4.3 Model CNN Terbaik 85
4.5 Pemodelan Runtun Waktu dengan Metode LSTM 86
4.5.1 Spesifikasi pelatihan model LSTM 87
4.5.2 Model LSTM dengan Fungsi Aktivasi Linear (Tanh) 87
4.5.3 Model LSTM dengan Fungsi Aktivasi Sigmoid 88
4.5.4 Model LSTM Terbaik 88

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Analisis Model Hybrid ARIMAX-CNN-LSTM dalam Peramalan Harga Komoditas Nikel Pasca Pandemi COVID-19
Razi Ghifari Alfarizi, Prof. Dr. Gunardi, M.Si.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

4.6 Pemodelan Runtun Waktu dengan Model Hybrid ARIMAX-CNN-LSTM 89
4.6.1 Alur Analisis Model Hybrid 90
4.6.2 Model Hybrid Terbaik 92
4.7 Perbandingan Performa Model 92
4.7.1 Visualisasi dan Pembahasan Grafik Perbandingan Model . . 93
4.8 Prediksi Data *Out-of-Sample* dengan Model Terbaik 96
V PENUTUP 99
5.1 Kesimpulan 99
5.2 Saran 100
A Lampiran Kode Program 107