

BAYESIAN MODEL AVERAGING DAN WEIGHTED AVERAGING BERBASIS MODEL LSTM DAN GRU UNTUK PERAMALAN HARGA NIKEL

IRDAYANTI



**PROGRAM STUDI MAGISTER STATISTIKA DAN SAINS DATA
SEKOLAH SAINS DATA, MATEMATIKA, DAN INFORMATIKA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**

@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University

PERNYATAAN MENGENAI TESIS DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis dengan judul “*Bayesian Model Averaging* dan *Weighted Averaging* Berbasis Model LSTM dan GRU untuk Peramalan Harga Nikel” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir tesis ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Januari 2026

Irdyanti
G1501231009



RINGKASAN

IRDAYANTI. *Bayesian Model Averaging* dan *Weighted Averaging* Berbasis Model LSTM dan GRU untuk Peramalan Harga Nikel. Dibimbing oleh KHAIRIL ANWAR NOTODIPUTRO dan SACHNAZ DESTA OKTARINA.

Peramalan merupakan upaya memprediksi nilai di masa depan berdasarkan pola historis data. Kemampuan menghasilkan prediksi yang akurat penting untuk mengurangi ketidakpastian dan mendukung pengambilan keputusan. Kompleksitas data modern menuntut metode yang semakin adaptif sehingga mendorong pemanfaatan model *deep learning* untuk menghasilkan prediksi yang lebih andal. Dalam konteks ini, *Long Short-Term Memory* (LSTM) dan *Gated Recurrent Unit* (GRU) menjadi dua arsitektur yang paling banyak digunakan karena mampu menangkap ketergantungan temporal dan pola *nonlinear* secara efektif. Berbagai studi menunjukkan bahwa kedua metode ini memiliki kinerja yang baik dalam memodelkan deret waktu yang kompleks. Namun, hasil yang diperoleh seringkali berbeda tergantung pada karakteristik data. Perbedaan hasil ini mengindikasikan bahwa tidak ada satu model yang selalu superior untuk semua jenis data sehingga menarik untuk mengevaluasi bagaimana potensi penggabungan hasil prediksi keduanya. Pendekatan *ensemble* dipandang berpotensi meningkatkan stabilitas dan akurasi hasil prediksi dengan memanfaatkan kekuatan masing-masing model sekaligus mengurangi bias dari model tunggal. Penelitian ini menggunakan teknik penggabungan hasil prediksi berbasis rata-rata, yaitu *Bayesian Model Averaging* (BMA) serta *Weighted Averaging* (WA) untuk menghasilkan prediksi yang lebih stabil, *robust*, dan akurat.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja SARIMA, LSTM, GRU serta menilai potensi penggabungan prediksi LSTM-GRU melalui pendekatan BMA dan WA. Analisis dilakukan melalui dua pendekatan, yaitu kajian simulasi dan kajian empiris. Pada kajian simulasi, data dibangkitkan menggunakan model ARIMA(1,1,1)(1,0,1)₁₂ dengan ε_t yang mengikuti GARCH(1,1) serta tambahan komponen interaksi *lag* ($Y_{t-1} \times Y_{t-2}$). Empat skenario disusun berdasarkan kombinasi tingkat volatilitas (tinggi dan rendah) serta keberadaan interaksi *lag* (ada dan tanpa interaksi). Setiap skenario direplikasi sebanyak 50 kali sehingga total diperoleh 200 dataset simulasi. Kajian empiris menggunakan data harga nikel global frekuensi bulanan periode Januari 1990–Mei 2025 yang bersumber dari *World Bank – Pink Sheet*. Model dengan kinerja terbaik selanjutnya digunakan untuk meramalkan harga nikel 12 periode ke depan.

Evaluasi kinerja untuk data simulasi dan empiris dilakukan menggunakan dua metrik utama, yaitu RMSE dan MAPE. Analisis nonparametrik faktorial (ANOVA ART) digunakan untuk menilai pengaruh model, volatilitas, dan interaksi *lag* secara simultan pada studi simulasi. Selain itu, pengujian signifikansi perbedaan kinerja dilakukan menggunakan uji parametrik dan nonparametrik, yaitu *paired t-test* dan *wilcoxon signed-rank test* untuk model yang berpasangan serta *independent t-test* dan *mann-whitney* untuk perbandingan antar metode *ensemble*.

Hasil kajian simulasi menunjukkan bahwa SARIMA memiliki kinerja paling rendah pada seluruh skenario, ditunjukkan oleh nilai RMSE dan MAPE yang relatif tinggi. Kondisi ini menunjukkan keterbatasannya dalam menangkap pola deret waktu yang kompleks. Sebaliknya, model *deep learning* LSTM dan GRU



menghasilkan kesalahan prediksi yang lebih rendah dan stabil dengan GRU sebagai model tunggal paling unggul pada seluruh skenario simulasi. Pada kajian empiris, pola yang sama kembali terlihat, di mana GRU memperoleh kinerja terbaik dengan RMSE sebesar 0,077 dan MAPE 0,55%. Penggabungan prediksi LSTM dan GRU melalui BMA dan WA menunjukkan kemampuannya mempertahankan tingkat akurasi yang baik pada semua skenario simulasi dengan BMA memberikan kinerja lebih baik. Meski demikian, hasil penggabungannya tidak memberikan peningkatan akurasi yang signifikan dibandingkan GRU sebagai model tunggal. Pada analisis empiris, BMA memberikan kesalahan prediksi terendah dengan RMSE 0,076 dan MAPE 0,54%. Peramalan harga nikel untuk 12 periode mendatang (Juni 2025–Mei 2026) kemudian dilakukan menggunakan GRU dan BMA. Keduanya memproyeksikan kecenderungan penurunan harga nikel dengan pergerakan yang relatif stabil tanpa fluktuasi tajam, yang mengindikasikan potensi pelemahan harga nikel di pasar global.

Kata kunci: *Deep learning*, Deret waktu, *Ensemble forecasting*, Harga nikel, Peramalan

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



SUMMARY

IRDAYANTI. *Bayesian Model Averaging and Weighted Averaging Based on LSTM and GRU Models for Forecasting Nickel Prices*. Supervised by KHAIRIL ANWAR NOTODIPUTRO and SACHNAZ DESTA OKTARINA.

Time series forecasting is an effort to predict future values based on historical patterns in the data. The ability to generate accurate forecasts is essential for reducing uncertainty and supporting informed decision-making. The growing complexity of modern data requires increasingly adaptive methods, encouraging the use of deep learning models to produce more reliable predictions. In this context, Long Short-Term Memory (LSTM) and Gated Recurrent Unit (GRU) have become two of the most widely used architectures due to their ability to capture temporal dependencies and nonlinear patterns effectively. Numerous studies have shown that both methods perform well in modeling complex time series. However, their results often vary depending on the characteristics of the data. Such variation indicates that no single model is consistently superior across all conditions, highlighting the need to assess the potential of combining their predictive outputs. Ensemble approaches are considered promising for enhancing the stability and accuracy of predictions by leveraging the strengths of each model while reducing the bias inherent in single-model approaches. This study employs averaging-based ensemble techniques, namely Bayesian Model Averaging (BMA) and Weighted Averaging (WA), to produce predictions that are more stable, robust, and accurate.

This study aims to evaluate the performance of SARIMA, LSTM, and GRU, as well as to assess the potential of combining LSTM–GRU forecasts through BMA and WA. The analysis is conducted using two approaches: a simulation study and an empirical study. In the simulation study, data are generated using an ARIMA(1,1,1)(1,0,1)₁₂ model with ε_t following GARCH(1,1) and additional lag interaction component ($Y_{t-1} \times Y_{t-2}$). Four scenarios are constructed based on combinations of volatility levels (high and low) and the presence or absence of lag interaction. Each scenario is replicated 50 times, resulting in a total of 200 simulated datasets. The empirical study utilizes global nickel price data with monthly frequency for the period January 1990–May 2025 obtained from the World Bank Pink Sheet. The model with the best performance is subsequently used to forecast nickel prices for the next 12 periods.

Performance evaluation for both the simulated and empirical data was carried out using two main metrics, namely RMSE and MAPE. A factorial nonparametric analysis (ANOVA ART) was employed to assess the simultaneous effects of model, volatility, and lag interaction in the simulation study. In addition, the significance of performance differences was examined using both parametric and nonparametric tests: the paired t-test and Wilcoxon signed-rank test for paired models, as well as the independent t-test and Mann–Whitney test for comparisons between ensemble methods.

The simulation results show that SARIMA consistently exhibits the lowest performance across all scenarios, as indicated by its relatively high RMSE and MAPE values. This reflects its limitations in capturing complex time series patterns. In contrast, the deep learning models LSTM and GRU yield lower and more stable prediction errors, with GRU standing out as the best-performing single model in

@Hak Cipta milik IPB University



every simulation scenario. A similar pattern is observed in the empirical analysis, where GRU again achieves the strongest performance, with an RMSE of 0.077 and a MAPE of 0.55%. The combination of LSTM and GRU predictions through BMA and WA demonstrates the ability to maintain good levels of accuracy across all simulation settings, with BMA consistently providing better performance than WA. Nevertheless, the ensemble results do not offer a significant improvement over GRU as an individual model. In the empirical analysis, BMA records the lowest prediction error, with an RMSE of 0.076 and a MAPE of 0.54%. Forecasts for the next 12 periods (June 2025–May 2026) were subsequently generated using GRU and BMA, both of which project a downward trend in nickel prices with relatively stable movements and no sharp fluctuations, indicating the potential weakening of the global nickel market during the forecast horizon.

Keywords: Deep learning, Ensemble forecasting, Forecasting, Nickel price, Time series



@Hak cipta milik IPB University

IPB University

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2026¹
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



**BAYESIAN MODEL AVERAGING DAN WEIGHTED AVERAGING
BERBASIS MODEL LSTM DAN GRU UNTUK PERAMALAN
HARGA NIKEL**

IRDAYANTI

Tesis
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister pada
Program Studi Statistika dan Sains Data

**PROGRAM STUDI MAGISTER STATISTIKA DAN SAINS DATA
SEKOLAH SAINS DATA, MATEMATIKA, DAN INFORMATIKA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**

@Hak cipta milik IPB University

IPB University





@Hak cipta milik IPB University

IPB University

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Tim Penguji pada Ujian Tesis:
Prof. Dr. Ir. I Made Sumertajaya, M.Si



Judul Tesis : *Bayesian Model Averaging* dan *Weighted Averaging* Berbasis Model LSTM dan GRU untuk Peramalan Harga Nikel

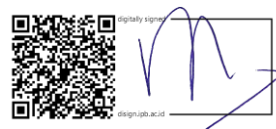
Nama : Irdayanti

NIM : G1501231009

Disetujui oleh

Pembimbing 1:

Prof. Dr. Ir. Khairil Anwar Notodiputro, M.S.



Pembimbing 2:

Sachnaz Desta Oktarina, S.Stat., M.Agr., Ph.D



Diketahui oleh

Ketua Program Studi:

Dr. Agus Mohamad Soleh, S.Si., M.T.

NIP 197503151999031004



Dekan Sekolah Sains Data, Matematika, dan Informatika:

Prof. Dr. Ir. Agus Bueno, M.Si., M.Kom.

NIP 19660702 199302 1 001



Tanggal Ujian:
17 Desember 2025

Tanggal Lulus:



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University

PRAKATA

Puji dan syukur Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah *subhanahu wa ta'ala* atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan karya ilmiah yang berjudul “*Bayesian Model Averaging dan Weighted Averaging* Berbasis Model LSTM dan GRU untuk Peramalan Harga Nikel”. Karya ilmiah ini merupakan persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Sains pada Program Studi Statistika dan Sains Data. Karya ilmiah ini tidak lepas dari bantuan, bimbingan dan dukungan dari berbagai pihak, untuk itu penulis menyampaikan rasa terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Khairil Anwar Notodiputro, M.S. dan Sachnaz Desta Oktarina, S.Stat., M.Agr., Ph.D selaku komisi pembimbing yang telah membimbing, mendukung, mengarahkan serta selalu memotivasi penulis dalam menyelesaikan karya ilmiah ini.
2. Prof. Dr. Ir. I Made Sumertajaya, M.Si selaku penguji luar komisi pembimbing yang telah memberikan saran, masukan serta arahan dalam penulisan karya ilmiah ini.
3. Dosen dan Tenaga Pendidik Program Studi Statistika dan Sains Data IPB University yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat serta staf administrasi yang telah membantu kebutuhan administrasi penulis.
4. Beasiswa Unggulan Kementerian Pendidikan Dasar dan Menengah yang telah memberikan bantuan biaya pendidikan kepada penulis.
5. Orang tua kandung penulis Bapak Mustain dan Ibu Sarni yang telah berjuang mendidik anak-anaknya, mendukung serta senantiasa mendoakan sehingga penulis bisa sampai dititik saat ini, untuk ayah dan ibuku semoga Allah *Subhanahu wata'ala* senantiasa menjagamu, melindungimu, memberikanmu kesehatan dan kebaikan di dunia dan di akhirat kelak.
6. Kakak dan adik serta seluruh keluarga yang senantiasa memberikan doa, dukungan dan semangat.
7. Teman-teman mahasiswa pascasarjana program Magister Statistika dan Sains Data angkatan 2023 atas bantuan, waktu, dan kebersamaannya.
8. Seluruh pihak terkait yang telah membantu penulis dalam menyusun karya ilmiah ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, Januari 2026

Irdyanti



DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	ii
DAFTAR GAMBAR	ii
DAFTAR LAMPIRAN	ii
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 <i>Long Short-Term Memory</i>	4
2.2 <i>Gated Recurrent Unit</i>	6
2.3 <i>Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average</i>	8
2.4 <i>Weighted Averaging</i>	8
2.5 <i>Bayesian Model Averaging</i>	8
2.6 Evaluasi Model	10
2.7 <i>Factorial Completely Randomized Design</i>	10
2.8 Uji Dua kelompok Non Independen	11
2.9 Uji Dua kelompok Independen	12
III METODE	15
3.1 Data	15
3.2 Model	16
3.3 Prosedur Analisis Data	19
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	23
4.1 Kajian Simulasi	23
4.2 Hasil Data Empiris	38
V SIMPULAN DAN SARAN	48
5.1 Simpulan	48
5.2 Saran	48
DAFTAR PUSTAKA	49
LAMPIRAN	53
RIWAYAT HIDUP	60

DAFTAR TABEL

1	<i>Hyperparameter</i> LSTM dan GRU	16
2	Pembagian data untuk skema <i>walk forward validation</i>	18
3	Hasil uji ANOVA ART	28
4	Hasil uji lanjut perbandingan model tunggal	28
5	Perbandingan model tunggal dan <i>ensemble</i>	33
6	Rangkuman kinerja model terbaik pada data simulasi	38
7	<i>Hyperparameter</i> terbaik LSTM dan GRU	41
8	Evaluasi model LSTM dan GRU	44
9	Evaluasi seluruh model	45
10	Peramalan harga nikel 12 periode ke depan	47

DAFTAR GAMBAR

1	Arsitektur LSTM	4
2	Fungsi aktivasi (a) sigmoid (b) <i>tanh</i>	6
3	Arsitektur GRU	6
4	Ilustrasi skema <i>sliding window</i>	17
5	Diagram alir prosedur analisis data simulasi	21
6	Diagram alir prosedur analisis data empiris	22
7	Data simulasi hasil bangkitan ARIMA(1,1,1)(1,0,1) ₁₂ – GARCH(1,1) (a) Skenario 1. (b) Skenario 2	23
8	Pola volatilitas tinggi hasil simulasi model GARCH(1,1)	24
9	Data simulasi hasil bangkitan ARIMA(1,1,1)(1,0,1) ₁₂ – GARCH(1,1) (a) Skenario 3. (b) Skenario 4	25
10	Pola volatilitas rendah hasil simulasi model GARCH(1,1)	25
11	Visualisasi <i>boxplot</i> RMSE (a) Skenario 1. (b) Skenario 2. (c) Skenario 3. (d) Skenario 4	26
12	Visualisasi <i>boxplot</i> MAPE (a) Skenario 1. (b) Skenario 2. (c) Skenario 3. (d) Skenario 4	27
13	Visualisasi hasil uji lanjut terhadap perbandingan rata-rata peringkat nilai RMSE antar model (a) Skenario 1. (b) Skenario 2. (c) Skenario 3. dan (d) Skenario 4	30
14	Visualisasi hasil uji lanjut terhadap perbandingan rata-rata peringkat nilai MAPE antar model (a) Skenario 1. (b) Skenario 2. (c) Skenario 3. dan (d) Skenario 4	31
15	Visualisasi perbandingan nilai RMSE antara model tunggal dan ensemble (a) Skenario 1. (b) Skenario 2. (c) Skenario 3. dan (d) Skenario 4	35
16	Visualisasi perbandingan nilai MAPE antara model tunggal dan ensemble (a) Skenario 1. (b) Skenario 2. (c) Skenario 3. dan (d) Skenario 4	36
17	Plot data harga nikel periode Januari 1990-Mei 2025	39
18	Distribusi harga nikel per bulan	39
19	Hasil dekomposisi data harga nikel	40
20	Plot residual pada data latih harga nikel menggunakan model LSTM	41
21	Plot residual pada data latih harga nikel menggunakan model GRU	41

22	Plot residual pada data latih log harga nikel menggunakan model LSTM	42
23	Plot residual pada data latih log harga nikel menggunakan model GRU	42
24	Prediksi data latih dan data uji menggunakan model LSTM	43
25	Prediksi data latih dan data uji menggunakan model GRU	43
26	Prediksi data uji menggunakan BMA	44
27	Prediksi data uji menggunakan WA	45
28	Peramalan harga nikel 12 bulan kedepan	46

DAFTAR LAMPIRAN

1	Dekomposisi data simulasi	54
2	Skema <i>sliding window</i> pada data empiris	55
3	Hasil prediksi pada data uji skala logaritma	56
4	Hasil prediksi pada data uji skala logaritma (Lanjutan)	57
5	Hasil prediksi pada data uji skala asli	58
6	Hasil prediksi pada data uji skala asli (Lanjutan)	59