

PERBANDINGAN PERFORMA MSGARCH, LSTM, DAN *HYBRID* MSGARCH-LSTM PADA PERAMALAN DATA DERET WAKTU YANG MENGANDUNG HETEROSKEDASTISITAS

WA ODE RONA FREYA



PROGRAM STUDI MAGISTER STATISTIKA DAN SAINS DATA
SEKOLAH SAINS DATA, MATEMATIKA, DAN INFORMATIKA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2025

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.



@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.



PERNYATAAN MENGENAI TESIS DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis dengan judul “Perbandingan Performa MSGARCH, LSTM, dan *Hybrid* MSGARCH-LSTM pada Peramalan Data Deret Waktu yang Mengandung Heteroskedastisitas” 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, Agustus 2025

Wa Ode Rona Freya
G1501211068

- 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.



RINGKASAN

WA ODE RONA FREYA. Perbandingan Performa MSGARCH, LSTM, Dan *Hybrid* MSGARCH-LSTM pada Peramalan Data Deret Waktu yang Mengandung Heteroskedastisitas. Dibimbing oleh Dr. KUSMAN SADIK, S.Si., M.Si. dan Dr. BUDI SUSETYO, M.S.

Volatilitas menggambarkan besar fluktuasi komponen acak dalam suatu deret waktu. Volatilitas memiliki peran penting dalam manajemen risiko. Volatilitas deret waktu keuangan umumnya menunjukkan pola khas, yaitu *volatility clustering*. *Volatility clustering* mendeskripsikan kecenderungan perubahan besar volatilitas diikuti oleh perubahan besar juga. Sebaliknya, perubahan kecil akan diikuti oleh perubahan kecil juga. Pola ini sekaligus menunjukkan data mengandung heteroskedastisitas karena volatilitas tidak konstan sepanjang waktu. Pola tersebut mendukung penggunaan model *Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedasticity* (GARCH). Namun, model GARCH dapat menghasilkan prediksi yang kurang akurat ketika terdapat perubahan *regime* pada data sehingga diperlukan model yang dapat menangani perubahan *regime*, yaitu model *Markov Switching* GARCH (MSGARCH). Sementara itu, untuk data yang lebih kompleks dan nonlinier, model GARCH dan pengembangannya saja sering kali kesulitan untuk menangkap pola tersebut. Model *Long Short-Term Memory* (LSTM) yang dapat menangani data dengan pola kompleks dan nonlinier kemudian banyak dikombinasikan dengan model GARCH atau pengembangannya untuk menggabungkan kekuatan kedua pendekatan.

Penelitian ini menggunakan model MSGARCH yang dikombinasikan dengan model LSTM dengan cara menggunakan hasil prediksi volatilitas model MSGARCH sebagai fitur prediktor tambahan pada model LSTM dalam memprediksi volatilitas aktual. Model tersebut selanjutnya disebut model *hybrid* MSGARCH-LSTM. Data yang digunakan ada dua macam, yaitu data simulasi dan data empiris (data *Bitcoin*). Data simulasi dibangun menggunakan model MSGARCH dengan 2 *regime* dan sebaran galat *skew generalized error distribution* (sged) dengan tambahan *noise* untuk meniru data empiris. Analisis pada data simulasi dilakukan menggunakan ANOVA dan uji lanjut *Tukey* dengan metrik evaluasi *Heteroscedasticity-Adjusted Mean Absolut Error* (HMAE). ANOVA dilakukan dua kali, yang pertama untuk menguji pengaruh jumlah *regime* (1 atau 2), jenis sebaran galat (*skew normal distribution*/snorm atau sged), dan jenis model (MSGARCH atau *hybrid* MSGARCH-LSTM) terhadap hasil prediksi volatilitas pada data simulasi. Model terbaik berdasarkan hasil ANOVA tersebut kemudian dibandingkan dengan model LSTM tunggal pada ANOVA kedua dengan faktor jenis model. Hasil analisis pada data simulasi menunjukkan bahwa model *hybrid* MSGARCH (1 *regime* dan sebaran galat snorm)-LSTM, *hybrid* MSGARCH (2 *regime* dan sebaran galat snorm)-LSTM, *hybrid* MSGARCH (1 *regime* dan sebaran galat sged)-LSTM, dan *hybrid* MSGARCH (2 *regime* dan sebaran galat sged)-LSTM adalah model dengan hasil prediksi volatilitas terbaik.

Model terbaik yang diperoleh dari analisis pada data simulasi kemudian digunakan salah satunya untuk prediksi volatilitas data *Bitcoin*, yaitu model *hybrid* MSGARCH (2 *regime* dan sebaran galat sged)-LSTM. Pemilihan model dilakukan dengan mempertimbangkan karakteristik data *Bitcoin* yang asimetris dengan kurtosis tinggi dan mempertimbangkan adanya kemungkinan pergantian *regime*



berdasarkan hasil uji *Zivot-Andrews* yang signifikan. Metrik evaluasi yang digunakan untuk hasil prediksi volatilitas data *Bitcoin* adalah HMAE dan *Heteroscedasticity-Adjusted Mean Squared Error* (HMSE) sebagai metrik evaluasi pendukung. Hasil penerapan model *hybrid* MSGARCH (2 *regime* dan sebaran galat sged)-LSTM menunjukkan bahwa model *hybrid* MSGARCH-LSTM mampu menghasilkan prediksi volatilitas yang mendekati volatilitas aktual untuk data *Bitcoin* yang memiliki volatilitas ekstrem.

Kata kunci: MSGARCH, LSTM, *Bitcoin*, Volatilitas

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

WA ODE RONA FREYA. Performance Comparison of MSGARCH, LSTM, and Hybrid MSGARCH-LSTM Models in Forecasting Heteroscedastic Time Series. Supervised by Dr. KUSMAN SADIK, S.Si., M.Si. dan Dr. BUDI SUSETYO, M.S.

Volatility describes the magnitude of fluctuations in the random component of a time series. Volatility plays an important role in risk management. Financial time series volatility generally exhibits a characteristic pattern known as volatility clustering. Volatility clustering describes the tendency for large volatility changes to be followed by large changes as well. Otherwise, small changes will be followed by small changes. This pattern simultaneously indicates that the data contains heteroscedasticity because volatility is not constant over time. This pattern supports the use of Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedasticity (GARCH) models. However, GARCH models can produce less accurate predictions when there are regime changes in the data, require models that can handle regime changes, namely Markov Switching GARCH (MSGARCH) models. Meanwhile, for more complex and nonlinear data, GARCH family models alone often struggle to capture such patterns. Long Short-Term Memory (LSTM) models, which can handle data with complex and nonlinear patterns, have subsequently been widely combined with GARCH family models to integrate the strengths of both approaches.

This study employs MSGARCH models combined with LSTM models by using the volatility prediction results from MSGARCH models as additional predictor features in LSTM models for predicting actual volatility. This model is named the hybrid MSGARCH-LSTM model. Two types of data are used: simulation data and empirical data (Bitcoin data). The simulation data is generated using MSGARCH models with 2 regimes and skew generalized error distribution (sged) error distributions with additional noise to mimic empirical data. Analysis of the simulation data is conducted using ANOVA and Tukey's post-hoc test with Heteroscedasticity-Adjusted Mean Absolute Error (HMAE) as the evaluation metric. ANOVA is performed twice: first to test the effect of the number of regimes (1 or 2), type of error distribution (skew normal distribution/snorm or sged), and model type (MSGARCH or hybrid MSGARCH-LSTM) on volatility prediction results for simulation data. The best model based on the ANOVA results is then compared with a single LSTM model in the second ANOVA with model type as the factor. The analysis results on simulation data show that the hybrid MSGARCH (1 regime and snorm error distribution)-LSTM, hybrid MSGARCH (2 regimes and snorm error distribution)-LSTM, hybrid MSGARCH (1 regime and sged error distribution)-LSTM, and hybrid MSGARCH (2 regimes and sged error distribution)-LSTM models are the models with the best volatility prediction results.

One of the best models obtained from the simulation data analysis is then used for Bitcoin data volatility prediction, namely the hybrid MSGARCH (2 regimes and sged error distribution)-LSTM model. Model selection is performed considering the characteristics of Bitcoin data, which are asymmetric with high kurtosis, and considering the possibility of regime switching based on significant Zivot-Andrews test results. The evaluation metrics used for Bitcoin data volatility

prediction results are HMAE and Heteroscedasticity-Adjusted Mean Squared Error (HMSE) as additional evaluation metrics. The implementation results of the hybrid MSGARCH (2 regimes and sged error distribution)-LSTM model show that the hybrid MSGARCH-LSTM model can produce volatility predictions that closely match actual volatility for Bitcoin data with extreme volatility.

Keywords: MSGARCH, LSTM, *Bitcoin*, Volatility

@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 menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin 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.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2025
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

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 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.

PERBANDINGAN PERFORMA MSGARCH, LSTM, DAN *HYBRID* MSGARCH-LSTM PADA PERAMALAN DATA DERET WAKTU YANG MENGANDUNG HETEROSKEDASTISITAS

WA ODE RONA FREYA

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

**PROGRAM STUDI MAGISTER STATISTIKA DAN SAINS DATA
SEKOLAH SAINS DATA, MATEMATIKA, DAN INFORMATIKA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2025**



@Hak cipta milik 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.



@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.



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.

Judul Tesis : Perbandingan Performa MSGARCH, LSTM, dan *Hybrid*
MSGARCH-LSTM pada Peramalan Data Deret Waktu yang
Mengandung Heteroskedastisitas

Nama : Wa Ode Rona Freya

NIM : G1501211068

Disetujui oleh

Pembimbing 1:

Dr. Kusman Sadik, S.Si., M.Si

Pembimbing 2:

Dr. Ir. Budi Susetyo, M.S

Diketahui oleh

Ketua Program Studi:

Dr. Agus M. Soleh, MT
NIP 197503151999031004

Dekan Sekolah Sains Data, Matematika, dan Informatika

Prof. Dr. Ir. Agus Buono, M.Si., M.Kom.
NIP 196607021993021001

Tanggal Ujian: 13 Agustus 2025

Tanggal Pengesahan:



PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas limpahan karunia-Nya sehingga tesis ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian ini, yaitu peramalan data deret waktu dengan model berbasis statistika dan *deep learning*, dengan judul “Perbandingan Performa MSGARCH, LSTM, dan *Hybrid* MSGARCH-LSTM pada Peramalan Data Deret Waktu yang Mengandung Heteroskedastisitas”.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada para pembimbing, Bapak Dr. Kusman Sadik, S.Si., M.Si dan Bapak Dr. Ir. Budi Susetyo, M.S, yang telah membimbing dan memberikan banyak saran. Terima kasih penulis sampaikan pula kepada kedua orang tua penulis, Ibu Hasmiati M.Pd dan Bapak Suharja M.Pd atas segala dukungan dan doa selama proses penyelesaian tesis ini. Tidak lupa penulis mengucapkan terima kasih kepada teman-teman yang telah memberikan semangat kepada penulis, khususnya Dessy Rotua Natalina Siahaan dan Zein Rizky Santoso.

Penulis mohon maaf atas kesalahan dan kekurangan dalam tesis ini. Semoga tesis ini memberikan manfaat kepada pihak terkait dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, Juli 2025

Wa Ode Rona Freya

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	ii
DAFTAR GAMBAR	ii
DAFTAR LAMPIRAN	ii
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	2
II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 <i>Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedasticity (GARCH)</i>	3
2.2 <i>Markov-Switching GARCH (MSGARCH)</i>	3
2.3 <i>Long-Short Term Memory (LSTM)</i>	4
2.4 <i>Median Realized Volatility</i>	5
2.5 Pemilihan Model Terbaik	5
III METODOLOGI PENELITIAN	7
3.1 Dataset	7
3.1.1 Data Simulasi	7
3.1.2 Data Empiris	8
3.2 Prosedur Penelitian	8
3.2.1 Prosedur Analisis Data Simulasi	9
3.2.2 Prosedur Analisis Data Empiris	11
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	14
4.1 Data Simulasi	14
4.1.1 Eksplorasi Data Simulasi	14
4.1.2 Perbandingan Model MSGARCH dan <i>Hybrid</i> MSGARCH-LSTM	16
4.1.3 Perbandingan Model LSTM dan <i>Hybrid</i> MSGARCH-LSTM	19
4.2 Data Empiris	21
4.2.1 Eksplorasi Data	21
4.2.2 <i>Markov Switching</i> GARCH (MSGARCH)	25
4.2.3 <i>Hybrid</i> MSGARCH-LSTM	27
4.2.4 Perbandingan performa model MSGARCH dan <i>hybrid</i> MSGARCH-LSTM	28
V KESIMPULAN DAN SARAN	30
5.1 Kesimpulan	30
5.2 Saran	30
DAFTAR PUSTAKA	31
LAMPIRAN	34

DAFTAR TABEL

1	Faktor dan taraf yang diuji	7
2	Parameter data simulasi	8
3	Variabel data harga <i>Bitcoin</i> harian	8
4	Statistik salah satu data simulasi	14
5	Statistik HMAE untuk setiap taraf faktor	17
6	ANOVA ART tiga faktor	17
7	Hasil uji lanjut <i>Tukey</i> menggunakan <i>art.con</i>	18
8	Rata-rata HMAE dan peringkat rata-rata HMAE kombinasi terbaik	19
9	Statistik nilai HMAE model LSTM dan <i>hybrid</i> MSGARCH-LSTM	19
10	ANOVA ART perbandingan LSTM dan <i>hybrid</i> MSGARCH-LSTM	20
11	Hasil uji lanjut perbandingan LSTM dan <i>hybrid</i> MSGARCH-LSTM	20
12	Statistik data log return	21
13	Hasil uji <i>Ljung-box</i> pada sisaan ARMA(2,2)	23
14	Hasil uji ARCH-LM pada sisaan ARMA(2,2)	24
15	Nilai dugaan parameter model MSGARCH	25
16	Hasil uji <i>Ljung-box</i> pada sisaan model MSGARCH	26
17	Nilai metrik evaluasi hasil prediksi model MSGARCH dan <i>hybrid</i> MSGARCH-LSTM	29

DAFTAR GAMBAR

1	Diagram alir pembangkitan data simulasi	9
2	Diagram alir pemodelan hingga ANOVA pada data simulasi	11
3	Diagram alir pemodelan pada data <i>Bitcoin</i>	12
4	Perbandingan <i>log return</i> dan volatilitas salah satu data simulasi	15
5	Perbandingan volatilitas <i>regime</i> 1 dan 2	15
6	Perubahan <i>regime</i> aktif dari waktu ke waktu	16
7	Harga penutupan <i>Bitcoin</i>	21
8	<i>Log return</i> harian <i>Bitcoin</i>	22
9	Grafik ACF dan PACF data <i>log return</i>	22
10	Volatilitas aktual dari 01 Januari 2017 hingga 11 September 2022	24
11	Hasil prediksi volatilitas model MSGARCH	27
12	Hasil prediksi volatilitas model <i>hybrid</i> MSGARCH-LSTM	28
13	Perbandingan prediksi volatilitas model MSGARCH dan <i>hybrid</i> MSGARCH-LSTM	28
14	Perbandingan prediksi volatilitas MSGARCH dan <i>hybrid</i> MSGARCH-LSTM pada volatilitas tertinggi	29

DAFTAR LAMPIRAN

1	Data nilai HMAE 3 faktor hasil prediksi volatilitas data simulasi	35
2	Data nilai HMAE 1 faktor hasil prediksi volatilitas data simulasi	41