

KAJIAN PERBANDINGAN METODE DETEKSI DAN PENANGANAN ANOMALI PADA DATA DERET WAKTU MENGUNAKAN HWES DAN DONUT

MARDATUNNISA ISNAINI



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



PERNYATAAN MENGENAI TESIS DAN SUMBER INFORMASI, PENGUNAAN AI, DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis dengan judul "Kajian Perbandingan Metode Deteksi dan Penanganan Anomali pada Data Deret Waktu Menggunakan HWES dan Donut" merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Statistika dan Sains Data. Karya ini merupakan karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal dari atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka pada bagian akhir tesis ini.

Dalam penyusunan karya ini, penulis menggunakan bantuan kecerdasan buatan *Claude* (Anthropic), *NotebookLM*, dan *Gemini* (Google) untuk membantu penulisan, pemahaman konsep, penyusunan struktur teks, serta pengecekan tata bahasa dan logika dalam penulisan ilmiah. Setelah menggunakan alat/layanan tersebut, penulis meninjau dan menyunting konten sesuai kebutuhan serta bertanggung jawab penuh atas isi karya tugas akhir ini.

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

Bogor, Agustus 2026

Mardatunnisa Isnaini
M0501241065



@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 milik IPB, tahun 2026
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.



RINGKASAN

MARDATUNNISA ISNAINI. Kajian Perbandingan Metode Deteksi dan Penanganan Anomali pada Data Deret Waktu Menggunakan HWES dan Metode Donut. Dibimbing oleh YENNI ANGRAINI dan KUSMAN SADIK.

Anomali suhu udara pada data deret waktu musiman merupakan penyimpangan dari pola periodik normal yang dapat berdampak lintas sektor, mulai dari pertanian, kesehatan, hingga lingkungan. Di Provinsi Nusa Tenggara Barat (NTB), anomali suhu yang terjadi pada 2019/2020 menyebabkan penurunan luas panen padi, lonjakan kasus ISPA, serta kebakaran hutan seluas ± 6.000 hektar di kawasan Gunung Rinjani. Kondisi ini menegaskan bahwa deteksi dini anomali suhu yang akurat dan penanganannya yang tepat menjadi kebutuhan mendesak untuk mitigasi risiko iklim.

Penelitian ini bertujuan membandingkan dua pipeline metode deteksi dan penanganan anomali pada data deret waktu musiman, yaitu *Holt-Winters exponential smoothing* (HWES) yang dikombinasikan dengan *winsorizing*, serta Donut berbasis *variational autoencoder* (VAE) yang diperluas dengan integrasi *long short-term memory* (LSTM). Data yang digunakan adalah data reanalisis ERA5 suhu udara maksimum bulanan NTB dari *climate change knowledge portal world bank*, mencakup periode Januari 1950 hingga Desember 2022 dengan total 876 observasi. Evaluasi kinerja dilakukan melalui dua pendekatan: kajian empiris pada data aktual menggunakan skema *expanding window 5-fold*, dan kajian simulasi dengan 24 kombinasi skenario faktorial yang memvariasikan tipe anomali (*random* dan *seasonal*), persentase anomali (3%, 6%, 9%), serta persentase *missing value* (0%, 10%, 20%, 30%), masing-masing diulang sebanyak 10 kali replikasi sehingga menghasilkan 480 dataset simulasi.

Pada kajian empiris, eksplorasi data menunjukkan bahwa suhu udara NTB memiliki pola musiman tahunan yang kuat dengan ketergantungan signifikan pada lag kelipatan 12. Kedua metode secara konsisten mengidentifikasi satu anomali yang valid secara statistik maupun klimatologis, yaitu pada Desember 2019 dengan nilai suhu $32,35^{\circ}\text{C}$, yang dikonfirmasi oleh laporan resmi BMKG sebagai dampak El Niño aktif yang memperlambat onset musim hujan. Di luar anomali utama tersebut, Donut menunjukkan sensitivitas yang lebih tinggi dibandingkan HWES dalam menangkap anomali dengan deviasi yang lebih halus yang berkaitan dengan dinamika *El Niño–Southern Oscillation (ENSO)* pada 2014, 2016, 2020, dan 2022, kejadian yang secara klimatologis relevan namun luput dari deteksi HWES karena deviasinya berada di bawah ambang batas statistik 3σ yang bersifat kaku. Hal ini mengonfirmasi keunggulan pendekatan berbasis rekonstruksi Donut dalam mengidentifikasi penyimpangan pola temporal yang lebih halus, yang tidak selalu tertangkap oleh metode berbasis ambang batas seperti HWES. Penanganan anomali dengan *winsorizing* terbukti menurunkan MAPE peramalan HWES dari 7,16% menjadi 5,00% pada konfigurasi musiman $m = 6$ dan dari 3,27% menjadi 2,97% pada $m = 12$, pada fold yang terdampak kejadian ekstrem. Pada pipeline Donut-LSTM, penggunaan *anomaly flag* hasil deteksi Donut sebagai fitur tambahan pada peramalan LSTM terbukti meningkatkan stabilitas dan akurasi prediksi secara nyata, dengan nilai korelasi tertinggi sebesar 0,76 pada konfigurasi terbaik dengan $\text{window} = 6$. Hal ini menegaskan bahwa informasi anomali dari Donut memberikan

nilai tambah yang konkret bagi kualitas peramalan, meskipun performa deteksi mentahnya berada di bawah HWES.

Pada kajian simulasi, hasil *Aligned Rank Transform* ANOVA (ART-ANOVA) menunjukkan bahwa tipe anomali dan metode deteksi merupakan faktor paling berpengaruh terhadap performa deteksi, baik pada metrik *Balanced Accuracy* (BACC) maupun *Average Precision* (AP), diikuti oleh persentase anomali dan persentase *missing value*. Interaksi tiga arah antara tipe anomali, persentase anomali, dan metode deteksi juga signifikan pada kedua metrik. Secara agregat, HWES unggul secara konsisten dibandingkan Donut baik pada BACC (0,7699 vs 0,6401) maupun AP (0,373 vs 0,145), dengan AP menegaskan kesenjangan performa yang lebih tajam karena sifatnya yang lebih sensitif terhadap kondisi data tidak seimbang (*imbalanced*). Uji lanjut ART-C mengonfirmasi bahwa keunggulan HWES signifikan secara statistik pada seluruh level persentase anomali (3%, 6%, 9%), baik untuk tipe *random* maupun *seasonal*. Pada anomali *random*, selisih performa BACC menyempit seiring meningkatnya persentase anomali, mengindikasikan Donut semakin mampu merekonstruksi batas anomali mendekati akurasi HWES (rata-rata BACC Donut 0,695 vs HWES 0,787); pada anomali *seasonal*, keunggulan HWES tetap konsisten dan selisihnya relatif stabil pada seluruh level persentase (0,752 vs 0,584). Ditinjau dari aspek *missing value*, performa kedua metode relatif stabil sepanjang rentang 0%–30%, dengan HWES tetap unggul secara konsisten pada seluruh level (BACC 0,784–0,758; AP 0,406–0,337) dibandingkan Donut (BACC 0,652–0,632; AP hanya 0,137–0,152). Belum munculnya keunggulan struktural Donut pada kondisi *missing value* yang diuji dijelaskan oleh dua keterbatasan kajian ini: volume data yang relatif terbatas (876 observasi, tergolong *small data regime*, jauh di bawah skala data pada studi asli Donut) sehingga model belum dapat membentuk representasi laten yang optimal, serta tingkat kontaminasi *missing value* yang diuji (hingga 30%) yang belum mencapai ambang ekstrem untuk memunculkan keunggulan mekanisme penanganan data hilang milik Donut (M-ELBO dan MCMC *Imputation*).

Pada aspek peramalan, ART-ANOVA menunjukkan bahwa metode peramalan merupakan faktor paling dominan, dengan interaksi tiga arah yang signifikan. HWES+*Winsorizing* menghasilkan MAPE yang signifikan lebih rendah dibandingkan Donut-LSTM pada seluruh level persentase anomali *random*, didukung oleh komponen musiman yang dimodelkan secara eksplisit serta mekanisme *winsorizing* yang membatasi nilai ekstrem. Pada anomali *seasonal*, perbedaan performa antara kedua metode umumnya tidak signifikan pada persentase 3% dan 9%, kecuali pada persentase 6% di mana HWES+*Winsorizing* unggul signifikan ($p = 0,037$), mengindikasikan adanya titik ambang kritis pada level anomali tersebut. Secara keseluruhan, selisih performa pada tipe *seasonal* jauh lebih kecil dibandingkan tipe *random*, sehingga Donut-LSTM tetap kompetitif. Secara keseluruhan, HWES+*Winsorizing* direkomendasikan untuk data musiman yang relatif lengkap dengan anomali berbasis simpangan ekstrem, khususnya anomali *random*, sedangkan Donut-LSTM menjadi alternatif kompetitif untuk anomali dengan simpangan yang tidak terlalu ekstrem terhadap pola musiman, terutama jika didukung oleh volume data yang lebih besar dan tingkat kontaminasi *missing value* yang lebih ekstrem pada kajian mendatang.

Kata Kunci: Anomali Deret Waktu, Donut, Holt-Winters, Suhu Udara, *Winsorizing*.



SUMMARY

MARDATUNNISA ISNAINI. Comparative Study of Anomaly Detection and Handling Methods in Time Series Data Using Holt-Winters Exponential Smoothing and Donut. Supervised by YENNI ANGRAINI and KUSMAN SADIK.

Seasonal time-series anomalies are deviations from normal periodic patterns with wide-ranging sectoral impacts. In West Nusa Tenggara (NTB) Province, the 2019/2020 temperature anomaly caused a decline in rice harvest area, a substantial surge in acute respiratory infection (ARI) cases, and approximately 6,000 hectares of forest fires in the Mount Rinjani area. These impacts underscore the urgency of accurate temperature anomaly detection as a basis for climate risk mitigation and adaptive resource management.

This study aims to compare two anomaly detection and handling pipelines for seasonal time-series data: Holt-Winters Exponential Smoothing (HWES) combined with winsorizing, and Donut, a Variational Autoencoder (VAE)-based method extended with Long Short-Term Memory (LSTM) integration for forecasting. The data used were ERA5 monthly maximum air temperature reanalysis data for NTB obtained from the World Bank Climate Change Knowledge Portal, covering the period January 1950 to December 2022, with a total of 876 observations. Performance evaluation was conducted through two complementary approaches: an empirical study on actual data using a five-fold Expanding Window cross-validation scheme, and a simulation study comprising 24 factorial scenario combinations varying anomaly type (random and seasonal), anomaly percentage (3%, 6%, 9%), and missing-value percentage (0%, 10%, 20%, 30%), each replicated ten times, yielding a total of 480 simulated datasets.

In the empirical study, data exploration confirmed that NTB air temperature exhibits a strong annual seasonal pattern with significant autocorrelation at multiples of lag 12. Both methods consistently identified one anomaly that was valid both statistically and climatologically, occurring in December 2019 at 32.35°C, triggered by an active El Niño event that delayed monsoon onset, as confirmed by official BMKG reports. Beyond this primary anomaly, Donut demonstrated higher sensitivity than HWES in capturing contextual anomalies associated with El Niño–Southern Oscillation (ENSO) dynamics in 2014, 2016, 2020, and 2022 — events that were climatologically relevant but missed by HWES because their deviations fell below its rigid 3σ statistical threshold. This confirms an advantage of Donut's reconstruction-based approach in identifying subtler temporal deviations that threshold-based methods such as HWES cannot always capture. Anomaly handling through winsorizing reduced HWES forecasting MAPE from 7.16% to 5.00% for the $m = 6$ seasonal configuration, and from 3.27% to 2.97% for $m = 12$, in the fold affected by the extreme event. In the Donut-LSTM pipeline, incorporating anomaly flags derived from Donut's detection results as additional LSTM input features markedly improved prediction stability and accuracy, with the highest correlation of 0.76 observed in the best-performing window = 6 configuration — demonstrating that Donut's anomaly information provides concrete added value to forecasting quality, even though its raw detection performance trailed HWES.

@Hak Cipta: IPB University

In the simulation study, Aligned Rank Transform ANOVA (ART-ANOVA) results showed that anomaly type and detection method were the most dominant factors affecting detection performance, on both the Balanced Accuracy (BACC) and Average Precision (AP) metrics, followed by anomaly percentage and missing-value percentage, with a significant three-way interaction among anomaly type, anomaly percentage, and detection method on both metrics. Overall, HWES consistently outperformed Donut on both BACC (0.7699 vs 0.6401) and AP (0.373 vs 0.145), with AP revealing an even sharper performance gap due to its greater sensitivity to imbalanced data conditions. ART-C post-hoc tests confirmed that HWES's advantage was statistically significant across all anomaly-percentage levels (3%, 6%, 9%) for both anomaly types. For random anomalies, the BACC gap narrowed as anomaly percentage increased, indicating that Donut increasingly approximated HWES's reconstruction accuracy (mean BACC of 0.695 for Donut versus 0.787 for HWES); for seasonal anomalies, HWES's advantage remained consistently significant with a relatively stable gap across percentage levels (mean BACC of 0.752 versus 0.584 for Donut). With respect to missing values, both methods' performance remained relatively stable across the 0%–30% range, with HWES consistently outperforming Donut at every level on both BACC (0.784–0.758 vs 0.652–0.632) and AP (0.406–0.337 vs only 0.137–0.152). The absence of a clear structural advantage for Donut under the missing-value conditions tested is attributable to two limitations of this study: the relatively limited data volume (876 observations, placing it in the small-data regime, far below the scale used in Donut's original study), which constrained the model's ability to form an optimal latent representation; and the missing-value contamination levels tested (up to 30%), which had not yet reached the extreme threshold needed to reveal the advantage of Donut's missing-data handling mechanisms (M-ELBO and MCMC Imputation).

For the forecasting task, ART-ANOVA indicated that the forecasting method was the dominant factor, with a significant three-way interaction among anomaly type, anomaly percentage, and forecasting method. HWES+Winsorizing produced significantly lower MAPE than Donut-LSTM across all anomaly-percentage levels under the random anomaly condition ($p < 0.001$), supported by its explicitly modeled seasonal component and by winsorizing's mechanism of bounding extreme values. Conversely, under seasonal anomaly conditions, the performance difference was generally not significant at 3% and 9%, except at 6% where HWES+Winsorizing showed a significant advantage ($p = 0.037$), suggesting a critical threshold at that contamination level. Overall, the performance gap under seasonal conditions was substantially smaller than under random conditions, keeping Donut-LSTM competitive. Overall, HWES+Winsorizing is recommended for relatively complete seasonal data dominated by extreme-deviation anomalies, particularly random anomalies, whereas Donut-LSTM offers a competitive alternative for anomalies that are contextual to seasonal patterns, particularly if supported by larger data volumes and more extreme missing-value contamination levels in future studies.

Keywords: anomaly detection, Donut, Holt-Winters, time series, temperature.

KAJIAN PERBANDINGAN METODE DETEKSI DAN PENANGANAN ANOMALI PADA DATA DERET WAKTU MENGUNAKAN HWES DAN DONUT

MARDATUNNISA ISNAINI

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

Tim Penguji pada Ujian Tesis:
Dr. Utami Dyah Syafitri, S.Si., M.Si.



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.



Judul Tesis : Kajian Perbandingan Metode Deteksi dan Penanganan Anomali
Pada Data Deret Waktu Menggunakan HWES dan Donut
Nama : Mardatunnisa Isnaini
NIM : M0501241065

@Hak cipta milik IPB University

Disetujui oleh

Pembimbing 1:

Dr. Yenni Angraini, S.Si., M.Si.

Pembimbing 2:

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

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 Buono, M.Si., M.Kom.

NIP 196607021993021001

Tanggal Ujian:
3 Agustus 2026

Tanggal Lulus:



@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.



PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanaahu wa ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak bulan Desember 2025 sampai bulan Juli 2026 ini ialah pendeteksian anomali pada data deret waktu, dengan judul "Kajian Perbandingan Metode Deteksi dan Penanganan Anomali Pada Data Deret Waktu Menggunakan HWES dan Donut". Penulis menyadari bahwa proses penulisan tesis ini tidak terlepas dari kontribusi dan dukungan pihak lain. Oleh karena itu, Penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Ibu Dr. Yenni Angraini, S.Si., M.Si. dan Bapak Dr. Kusman Sadik, S.Si., M.Si. selaku dosen pembimbing yang selalu membimbing dengan baik serta menjelaskan dan memberikan arahan selama proses penyusunan karya ilmiah ini.
2. Ibu Dr. Utami Dyah Syafitri, S.Si., M.Si. selaku dosen penguji yang telah memberikan saran, kritik, dan masukan yang sangat berharga demi penyempurnaan tesis ini
3. Karya ini dipersembahkan sebagai wujud rindu terdalam untuk almarhum Ayahanda tercinta, rasa terima kasih atas doa tiada putus dari Ibunda sang pemilik doa yang menuntun penulis, serta kasih sayang adik-adik tercinta yang senantiasa menjadi sumber kekuatan terbesar bagi penulis.
4. Dosen dan tenaga pendidik Program Studi Statistika dan Sains Data yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat serta membantu penulis dalam kebutuhan administrasi selama masa perkuliahan dan penyusunan karya ilmiah ini.
5. Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) yang telah memberikan kesempatan untuk memperoleh beasiswa serta dana dalam menempuh program Magister.
6. Teman-teman Program Magister Statistika dan Sains Data Angkatan 2024, Divisi Sosial Masyarakat Kelurahan LPDP IPB 12.0, serta sahabat-sahabat penulis yang senantiasa memberikan motivasi, dukungan, dan semangat kepada penulis
7. Seluruh pihak yang telah membantu penulis dalam penyusunan karya ilmiah ini yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

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

Bogor, 5 Agustus 2026

Mardatunnisa Isnaini

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Anomali dan <i>Outlier</i> dalam Deret Waktu	4
2.2 Suhu Udara	5
2.3 <i>Holt-Winters Exponential Smoothing</i> (HWES)	5
2.4 Donut	7
2.5 <i>Winsorizing</i>	9
2.6 Donut-LSTM	9
2.7 Metrik Evaluasi	10
2.8 Rancangan Faktorial dalam Acak Lengkap dan <i>Aligned Rank Transform</i> (ART) ANOVA	11
2.9 Uji Lanjut <i>Aligned Rank Transform Contrast</i> (ART-C)	13
2.10 Skema peramalan <i>one-step-ahead</i> dan <i>multi-step-ahead</i>	14
III METODOLOGI	15
3.1 Data	15
3.1.1 Data Simulasi	15
3.1.2 Data Empiris	16
3.2 Prosedur Analisis Data	16
3.2.1 Prosedur Analisis Data Empiris	16
3.2.2 Prosedur Analisis Data Simulasi	18
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	20
4.1 Analisis Data Empiris	20
4.1.1 Eksplorasi Data	20
4.1.2 Pemodelan dengan HWES	21
4.1.3 Pemodelan dengan Donut	30
4.1.4 Karakteristik Anomali yang terdeteksi pada metode HWES dan Donut	35
4.1.5 Perbedaan kinerja metode HWES dan Donut	36
4.2 Analisis Data Simulasi	37
4.2.1 Deskripsi Data Simulasi	38
4.2.2 Evaluasi Kinerja Metode Terhadap Performa Deteksi Anomali	41
4.2.3 Pengaruh Tipe Anomali Terhadap Kinerja Deteksi Anomali	44



4.2.4	Pengaruh <i>missing value</i> terhadap kinerja deteksi anomali	46
4.2.5	Pengaruh persentase anomali terhadap kinerja metode deteksi	47
4.2.6	Evaluasi kinerja metode terhadap performa peramalan	50
V	SIMPULAN DAN SARAN	53
5.1	Simpulan	53
5.2	Saran	53
	DAFTAR PUSTAKA	54
	LAMPIRAN	59
	RIWAYAT HIDUP	66

DAFTAR TABEL

1	Analisis ragam RAL 4 faktor	11
2	Kombinasi perlakuan data simulasi	11
3	Konfigurasi <i>hyperparameter</i> yang digunakan dalam pemodelan	13
4	Hasil MAPE <i>forecast</i> dengan $m = 6$ bulan	
5	Tahapan <i>winsorizing</i> pada musiman 6 bulan	25
6	Perbandingan MAPE <i>forecasting</i> sebelum dan sesudah <i>winsorizing</i> (musiman 6 bulan)	26
7	Nilai MAPE <i>forecasting</i> HWES dengan $m = 12$ bulan	27
8	Perbandingan nilai MAPE sebelum dan sesudah penanganan	29
9	Ringkasan deteksi anomali Donut (konfigurasi <i>baseline</i>)	31
10	Hasil deteksi anomali dengan konfigurasi parameter	31
11	Hasil deteksi anomali HWES yang beririsan dengan Donut	35
12	Statistika deskriptif data simulasi	38
13	Perbandingan rata-rata nilai metrik evaluasi deteksi	41
14	Uji ART-ANOVA pengaruh persentase, tipe, dan <i>missing value</i> terhadap performa deteksi anomali	42
15	Uji lanjut interaksi tipe anomali, metode, dan persentase anomali	43
16	Uji lanjut interaksi tipe anomali dan metode deteksi	45
17	Rata-rata BACC dan AP kombinasi tipe anomali dan metode deteksi	45
18	Rata-rata BACC dan AP kombinasi persentase <i>missing</i> dengan metode	47
19	Interaksi persentase anomali dan metode	48
20	Rata-rata BACC dan AP kombinasi persentase anomali dan tipe	49
21	Uji ART-ANOVA pengaruh persentase, tipe, metode, dan <i>missing value</i> terhadap performa peramalan	50
22	Hasil uji lanjut ART-C interaksi metode peramalan per kombinasi tipe dan persentase anomali	51



DAFTAR GAMBAR

1	Algoritma <i>Holt-Winters</i> (Aboode 2018)	7
2	Model grafis probabilitas berarah (An dan Cho 2015)	7
3	Arsitektur VAE (Ramdani <i>et al.</i> 2025)	8
4	Arsitektur dari Donut (Xu <i>et al.</i> 2018)	8
5	Adaptasi dari Chen <i>et al.</i> (2021) dengan modifikasi pada blok VAE yang digantikan oleh Donut (Xu <i>et al.</i> 2018)	10
6	Ilustrasi <i>Expanding Windows</i>	16
7	Plot deret waktu suhu udara 1950–2022	19
8	<i>Boxplot</i> suhu udara 1980–2022 per dekade	20
9	Plot <i>Autocorrelation Function</i> (ACF) (a) dan <i>Partial Autocorrelation Function</i> (PACF) (b) pada data suhu udara.	21
10	<i>Forecast</i> HWES dengan musiman 6 bulan	22
11	Residual dan deteksi anomali musiman 6 bulan	23
12	Validasi suhu ekstrem pada keseluruhan data	24
13	<i>Forecasting</i> sebelum dan sesudah <i>winsorizing</i> pada <i>fold</i> 5 (musiman 6 bulan)	25
14	<i>Forecast</i> HWES dengan musiman 12 bulan	26
15	Residual dan deteksi anomali HWES musiman 12 bulan	27
16	<i>Forecasting</i> sebelum dan setelah penanganan dengan <i>winsorizing fold</i> 5 (musiman 12 bulan)	28
17	Deteksi anomali dengan konfigurasi <i>baseline</i> pada <i>windows</i> 6 bulan (a) dan 12 bulan (b)	30
18	MAPE <i>forecasting</i> sebelum dan sesudah penanganan pada $W = 6$ dan $W = 12$	33
19	<i>Forecasting</i> dengan konfigurasi terbaik <i>windows</i> 6 (a) dan 12 (b)	34
20	Perbandingan distribusi suhu antara data kondisi normal dan terinjeksi anomali: (a) <i>tipe random</i> , (b) <i>tipe seasonal</i>	39
21	Visualisasi tipe anomali yang diinjeksikan pada skenario 9%: (a) <i>tipe random</i> , (b) <i>tipe seasonal</i> .	40
22	Interaksi tipe anomali, metode, dan persentase anomali terhadap BACC dan AP	43
23	Perbandingan tipe anomali berdasarkan BACC dan AP	44
24	Perbandingan <i>missing value</i> berdasarkan BACC dan AP	46
25	Perbandingan persentase anomali berdasarkan BACC dan AP	48
26	Interaksi tipe anomali, persentase anomali, dan metode terhadap MAPE peramalan.	51



DAFTAR LAMPIRAN

1	Visualisasi desain simulasi skenario (<i>fold</i> 1)	60
2	Rata-rata performa Donut dan HWES pada deteksi	62
3	Rata-rata performa Donut dan HWES pada peramalan	63
4	<i>Grid search</i> kombinasi parameter pada kajian empiris	64
5	Detail penentuan <i>threshold</i> anomali ($\pm 3\sigma$)	65

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.