

EVALUASI KINERJA *RANDOM FOREST* DAN *GEOGRAPHICALLY WEIGHTED RANDOM FOREST* PADA DATA SPASIO-TEMPORAL

NABIL NAUFAL



**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 "Evaluasi Kinerja *Random Forest* dan *Geographically Weighted Random Forest* Pada Data Spasio-Temporal" 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), 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, 12 Agustus 2026

Nabil Naufal
M0501251063

RINGKASAN

NABIL NAUFAL. Evaluasi Kinerja *Random Forest* dan *Geographically Weighted Random Forest* Pada Data Spasio-Temporal. Dibimbing oleh ANIK DJURAIDAH dan YENNI ANGRAINI.

Data yang terikat pada lokasi pengamatan dapat menunjukkan autokorelasi dan heterogenitas spasial. Untuk mempertimbangkan karakteristik tersebut dalam pemodelan, *Random Forest Spatial* (RFS) memasukkan koordinat lokasi sebagai peubah penjelas dan membangun satu model untuk seluruh wilayah studi. Namun, kepentingan peubah yang dihasilkan menggambarkan pengaruh secara keseluruhan sehingga belum mampu menunjukkan perbedaan pengaruh peubah penjelas antar lokasi. Kondisi tersebut dapat diatasi melalui *Geographically Weighted Random Forest* (GWRF) yang menghasilkan nilai kepentingan peubah yang berbeda antarlokasi. Namun, pembobotan pada GWRF hanya mempertimbangkan kedekatan spasial dan belum mengakomodasi autokorelasi temporal pada data yang diamati berulang. Penambahan peubah *lag* ke dalam ruang fitur model dapat digunakan untuk mengakomodasi keterkaitan waktu tersebut. Perbandingan performa RFS dan GWRF yang sama-sama dilengkapi peubah *lag* belum ditemukan dalam literatur yang telah ditelaah, khususnya pada data yang memiliki autokorelasi spasial sekaligus temporal. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi performa prediktif dan kemampuan menghasilkan pola spasial yang sesuai dari RFS+Lag, GWRF, dan GWRF+Lag, kemudian mengaplikasikan model terbaik pada data konsentrasi nitrogen dioksida (NO_2) troposferik di kawasan ASEAN untuk memetakan faktor dominan emisi di tiap lokasi.

Evaluasi dilakukan melalui dua tahapan. Kajian simulasi membangkitkan data pada grid berukuran 30×30 yang menghasilkan 900 lokasi spasial unik, dengan koefisien regresi dirancang membentuk dua pola spasial berbeda, yaitu pemusatan bergradasi dan gradasi linier diagonal. Peubah respon dibangkitkan mengikuti struktur *Multiplicative Seasonal Autoregressive SAR(1)(12)* pada tiga skenario tingkat autokorelasi musiman, yaitu Φ_{12} sebesar 0,2; 0,5; dan 0,8. Data dibangkitkan sepanjang 240 periode dengan 120 periode pertama dibuang melalui prosedur *burn-in*, kemudian disaring hingga tersisa panel data efektif 24 periode, dan seluruh prosedur direplikasi sebanyak 100 iterasi. Kajian empiris menggunakan data bulanan periode Januari 2022 hingga Desember 2024 di kawasan ASEAN, dengan NO_2 troposferik dari Sentinel-5P TROPOMI sebagai peubah respon, serta intensitas cahaya malam, NDVI, dan kepadatan penduduk sebagai peubah penjelas. Ketiga model dikonfigurasi dengan *hyperparameter* yang sama, yaitu 500 pohon dan lebar jendela adaptif sebesar 150 tetangga terdekat, kemudian dievaluasi melalui skema pelatihan bertahap berbasis *cross section*.

Kajian simulasi menunjukkan bahwa RFS + *Lag* menghasilkan galat prediktif terendah pada ketiga skenario autokorelasi musiman, dengan GWRF+Lag berada pada selisih yang tipis. Sebaliknya, GWRF tanpa peubah *lag* menunjukkan RMSE yang meningkat dari 4,42 pada skenario terendah menjadi 12,49 pada skenario tertinggi. Meskipun demikian, nilai R^2 model tersebut justru meningkat dari 0,85 menjadi 0,89 seiring menguatnya autokorelasi musiman. Kondisi ini mengindikasikan *overfitting* spasial karena model tidak memuat informasi temporal, tetapi mampu menjelaskan variasi data yang semakin besar. Perbedaan



kemampuan antarmodel juga terlihat pada rekonstruksi pola spasial. RFS+Lag menghasilkan kepentingan peubah yang seragam antarlokasi sehingga ragam spasial bernilai nol dan koefisien korelasi tidak dapat dihitung. Sebaliknya, GWRF+Lag mampu merekonstruksi kedua pola parameter asli secara konsisten, dengan korelasi di atas 0,95 pada autokorelasi musiman rendah dan tetap berada pada kisaran 0,70-0,95 pada skenario tinggi. GWRF tanpa *lag* mengalami penurunan korelasi yang besar pada kondisi tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa tanpa informasi temporal, keragaman waktu dapat terserap ke dalam dimensi spasial.

Penerapan pada data NO₂ di kawasan ASEAN menunjukkan bahwa RFS + Lag memberikan kinerja secara keseluruhan yang lebih baik, dengan RMSE 6,49; MAE 3,72; dan R² 0,77; dibandingkan GWRF+Lag yang menghasilkan RMSE 7,44; MAE 4,05; dan R² 0,70. Perbedaan MAE antarmodel hanya sebesar 0,33; lebih kecil dibandingkan selisih RMSE sebesar 0,95; yang menunjukkan bahwa kedua model memiliki kinerja yang relatif berdekatan. Namun, evaluasi berdasarkan lokasi menunjukkan pola yang berbeda. RFS + Lag memberikan hasil terbaik pada 54,1% lokasi yang terutama berada di kawasan daratan luas dengan karakteristik lanskap yang relatif homogen, sedangkan GWRF + Lag memberikan hasil terbaik pada 26,0% lokasi yang tersebar di kawasan pesisir, kepulauan, dan zona transisi darat-laut. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa kinerja model tidak hanya ditentukan oleh akurasi secara keseluruhan, tetapi juga oleh karakteristik spasial wilayah. Perbedaan tersebut juga terlihat pada *Local Variable Importance* GWRF+Lag menunjukkan dua kelompok faktor dominan. Peubah lag-12 mendominasi daratan Indochina, pesisir timur Sumatra, Semenanjung Malaya, serta bagian barat dan utara Kalimantan yang berkaitan dengan pembakaran biomassa musiman. Sementara itu, lag-1 dominan di Pulau Jawa, Kepulauan Filipina, dan kawasan timur Indonesia yang memiliki aktivitas demografi dan ekonomi dengan sumber emisi yang lebih konsisten.

Hasil penelitian juga menunjukkan beberapa keterbatasan yang menjadi dasar pengembangan pada penelitian selanjutnya. Kajian simulasi masih menggunakan pola parameter spasial yang berstruktur geometris, sehingga pengujian perlu diperluas pada pola yang lebih kompleks dan tidak beraturan, termasuk kombinasi wilayah dengan tingkat pengelompokan yang berbeda. Keragaman galat pada periode Maret-April menunjukkan bahwa penambahan peubah meteorologis, seperti kecepatan angin dan curah hujan, dapat dipertimbangkan untuk meningkatkan kemampuan model dalam menjelaskan variasi konsentrasi NO₂. Selain itu, pembobotan GWRF yang hanya mempertimbangkan jarak spasial dapat dikembangkan dengan memasukkan jarak temporal melalui pendekatan *Geographically and Temporally Weighted Random Forest* untuk menangkap ketergantungan spasio-temporal secara lebih baik. Hasil GWRF+Lag dalam mengidentifikasi faktor dominan di setiap lokasi juga memberikan dasar bagi pengembangan strategi pengendalian polusi udara ASEAN yang lebih spesifik secara spasial.

Kata kunci: emisi NO₂, *geographically weighted random forest*, heterogenitas spasial, spasio-temporal, *variable importance*.

SUMMARY

NABIL NAUFAL. Performance Evaluation of Random Forest and Geographically Weighted Random Forest Models on Spatio-Temporal Data. Supervised by ANIK DJURAIDAH and YENNI ANGRAINI.

Observational data bound to specific locations can exhibit spatial autocorrelation and heterogeneity. To account for these characteristics in modeling, Random Forest Spatial (RFS) incorporates location coordinates as explanatory variables and constructs a single model for the entire study area. However, the resulting variable importance reflects the overall global effect, thus failing to capture the varying impacts of explanatory variables across different locations. This limitation can be addressed using Geographically Weighted Random Forest (GWRF), which generates distinct variable importance values across locations. Nevertheless, the weighting scheme in GWRF solely considers spatial proximity and does not yet accommodate temporal autocorrelation in repeatedly observed data. The inclusion of lag variables into the model's feature space can be utilized to accommodate this temporal dependence. A performance comparison between RFS and GWRF, both equipped with lag variables, has not been found in the reviewed literature, particularly for data exhibiting both spatial and temporal autocorrelation. This study aims to evaluate the predictive performance and the ability to generate appropriate spatial patterns of RFS+Lag, GWRF, and GWRF+Lag, and subsequently apply the best-performing model to tropospheric nitrogen dioxide (NO₂) concentration data in the ASEAN region to map the dominant emission factors at each location.

The evaluation was conducted in two stages. The simulation study generated data on a 30×30 grid, resulting in 900 unique spatial locations, with regression coefficients designed to form two distinct spatial patterns: centralized gradation and diagonal linear gradation. The response variable was generated following a Multiplicative Seasonal Autoregressive SAR(1)(12) structure under three scenarios of seasonal autocorrelation intensity, namely Φ_{12} of 0.2, 0.5, and 0.8. The data were generated over 240 periods, with the first 120 periods discarded through a burn-in procedure, and then filtered to yield an effective data panel of 24 periods. The entire procedure was replicated for 100 iterations. The empirical study utilized monthly data from January 2022 to December 2024 in the ASEAN region, setting tropospheric NO₂ from Sentinel-5P TROPOMI as the response variable, alongside nighttime light intensity, NDVI, and population density as explanatory variables. All three models were configured with uniform hyperparameters, specifically 500 trees and an adaptive bandwidth of 150 nearest neighbors, and were subsequently evaluated using a stepwise cross-sectional training scheme.

The simulation study demonstrated that RFS+Lag produced the lowest predictive error across all three seasonal autocorrelation scenarios, with GWRF+Lag trailing by a narrow margin. Conversely, GWRF without lag variables exhibited an increase in RMSE from 4.42 in the lowest scenario to 12.49 in the highest scenario. Despite this, the R² value of the model actually increased from 0.85 to 0.89 as the seasonal autocorrelation strengthened. This condition indicates spatial overfitting; because the model lacks temporal information, it inappropriately absorbs the increasingly larger data variation. Differences in model capabilities



were also evident in the reconstruction of spatial patterns. RFS+Lag produced uniform variable importance across locations, resulting in zero spatial variance and an incomputable correlation coefficient. In contrast, GWRF+Lag was able to consistently reconstruct both original parameter patterns, maintaining a correlation above 0.95 under low seasonal autocorrelation and remaining within the 0.70 to 0.95 range under the high scenario. GWRF without lag experienced a substantial drop in correlation under these conditions. This demonstrates that without temporal information, temporal variability can be erroneously absorbed into the spatial dimension.

Application to the NO₂ data in the ASEAN region demonstrated that RFS+Lag delivered better overall performance, with an RMSE of 6.49, MAE of 3.72, and R² of 0.77, compared to GWRF+Lag, which yielded an RMSE of 7.44, MAE of 4.05, and R² of 0.70. The MAE difference between the models was only 0.33, smaller than the RMSE difference of 0.95, indicating that both models performed relatively closely. However, location-based evaluation revealed a different pattern. RFS+Lag provided the best results in 54.1% of the locations, primarily situated in expansive mainland areas with relatively homogeneous landscape characteristics. Meanwhile, GWRF+Lag performed best in 26.0% of the locations, which were distributed across coastal areas, archipelagos, and land-sea transition zones. This discrepancy highlights that model performance is determined not only by overall accuracy but also by the spatial characteristics of the region. This difference is also reflected in the Local Variable Importance of GWRF+Lag, which indicated two dominant factor groups. The lag-12 variable dominated mainland Indochina, the eastern coast of Sumatra, the Malay Peninsula, as well as the western and northern parts of Kalimantan, which are associated with seasonal biomass burning. Meanwhile, lag-1 was dominant in Java Island, the Philippine Archipelago, and eastern Indonesia, regions characterized by demographic and economic activities with more consistent emission sources.

The research findings also identified several limitations that serve as a foundation for future studies. The simulation study still utilized geometrically structured spatial parameter patterns; thus, testing needs to be expanded to more complex and irregular patterns, including combinations of regions with varying degrees of clustering. The error variability observed during the March–April period suggests that the addition of meteorological variables, such as wind speed and precipitation, could be considered to enhance the model's ability to explain NO₂ concentration variations. Furthermore, the GWRF weighting scheme, which currently solely considers spatial distance, could be advanced by incorporating temporal distance through a Geographically and Temporally Weighted Random Forest approach to better capture spatio-temporal dependencies. The success of GWRF+Lag in identifying dominant factors at each location also provides a basis for developing more spatially specific air pollution control strategies in ASEAN.

Keywords: geographically weighted random forest, NO₂ emissions, spatial heterogeneity, spatio-temporal, variable importance.



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.

EVALUASI KINERJA *RANDOM FOREST* DAN *GEOGRAPHICALLY WEIGHTED RANDOM FOREST* PADA DATA SPASIO-TEMPORAL

NABIL NAUFAL

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

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.

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tesis:
Dr. Bagus Sartono, S.Si., M.Si.



Judul Tesis : Evaluasi Kinerja *Random Forest* dan *Geographically Weighted Random Forest* Pada Data Spasio-Temporal

Nama : Nabil Naufal
NIM : M0501251063

@Hak cipta milik IPB University

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Prof. Dr. Ir. Anik Djuraidah, M.S.

Pembimbing 2:
Dr. Yenni Angraini, S.Si., M.Si.

Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Dr. Agus Mohamad Soleh, S.Si., M.T.
NIP 19750315 199903 1 004

Dekan Sekolah Sains Data, Matematika dan Informatika
Prof. Dr. Ir. Agus Buono, M.Si., M.Kom.
NIP 19660702 199302 1 001

Tanggal Ujian:
24 Juli 2026

Tanggal Lulus:



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 Agustus 2026 ini berfokus pada pemodelan spasio-temporal, dengan judul “Evaluasi Kinerja *Random Forest* dan *Geographically Weighted Random Forest* Pada Data Spasio-Temporal”.

Penulis menyadari bahwa proses penulisan tesis ini tidak terlepas dari kontribusi, bimbingan, dan dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua tercinta, atas doa yang tak pernah putus. Terima kasih karena selalu menanamkan nilai kerja keras dan pantang menyerah. Walaupun Bapak dan Mamah tidak berkesempatan mengenyam pendidikan tinggi, namun keringat, dorongan, serta didikan kalianlah yang menjadi alasan utama penulis mampu berdiri di titik ini dan berani menempuh pendidikan setinggi-tingginya.
2. Ibu Prof. Dr. Ir. Anik Djuraidah, M.S. dan Ibu Dr. Yenni Angraini, S.Si., M.Si. selaku dosen pembimbing. Terima kasih atas bimbingan yang sangat luar biasa suportif sejak penulis masih menempuh pendidikan strata satu (S1). Penulis sangat bersyukur atas kesabaran Ibu berdua dalam mengarahkan, berdiskusi, hingga ketabahan Ibu dalam menghadapi selera desain presentasi penulis yang masih perlu banyak perbaikan.
3. Bapak Dr. Bagus Sartono, S.Si., M.Si. selaku dosen penguji sidang, Dr. Agus Mohamad Soleh, S.Si., M.Si., selaku moderator sidang, Ibu Dr. Erfiani, S.Si., M.Si., selaku moderator seminar, dan Bapak Dr. Farit Moh Afendi S.Si., M.Si., selaku moderator kolokium yang telah banyak memberikan saran, dan masukkan sehingga karya ilmiah ini dapat dibuat lebih baik lagi.
4. Dosen dan tenaga pendidik Program Studi Magister Statistika dan Sains Data. Secara khusus, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Mba Ika yang selalu sabar dan bersedia direpotkan dalam membantu mengurus berbagai keperluan administrasi, bahkan tak jarang harus membalas pesan penulis di akhir pekan.
5. IPB University beserta segenap pimpinan Sekolah Sains Data, Matematika, dan Informatika, atas kesempatan berharga yang diberikan kepada penulis untuk mengikuti Program Sinergi (*Fast-Track*), sehingga jenjang magister ini dapat diselesaikan dengan lancar.
6. Kakak-kakak penulis, A Opik dan A Iman, beserta Teh Sari dan Teh Putri, atas segala dukungan, bimbingan, dan kasih sayang yang menjadi penguat langkah penulis. Untuk adikku, Rafi, semoga pencapaian ini dapat menjadi pemacu semangat dalam memulai perjalanan studimu di almamater yang sama.
7. Rekan-rekan yang telah memberikan kontribusi langsung, diskusi kritis, serta motivasi berharga dalam proses pengerjaan karya ilmiah ini. Mbaca sebagai cabing (sahabat bimbingan) yang tidak lelah menjadi ruang berdiskusi dan berkeluh kesah, serta masukan dan bantuan praktisnya dalam persiapan hingga perancangan desain presentasi. Kak Zam yang selalu

- 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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

menjadi rekan diskusi yang memantik pemikiran kritis dan candaannya yang banyak membawa tawa, serta Zahra sebagai cabing yang menjadi panutan dan tempat bertukar informasi di sepanjang fase bimbingan hingga sidang.

8. Rekan-rekan yang senantiasa memberikan dukungan moral, perspektif kehidupan, dan ruang untuk menjaga keseimbangan emosional penulis, khususnya di fase-fase akhir penyelesaian masa studi. Terima kasih kepada Kak Shal atas diskusi-diskusi berharganya; Hijrah dan Kak Mardan selaku rekan seperjuangan di LSI; Wawan dan Bang Logan sebagai teman jalan pagi; Kak Dela atas dukungan moralnya; serta Mba Zizah dan Mas Boy yang telah memberikan banyak sudut pandang kedewasaan dari dunia profesional maupun dukungan penuh pada hari sidang.
9. Seluruh teman-teman Program Magister Statistika dan Sains Data Angkatan 2024 serta pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan namanya satu per satu, namun telah memberikan warna dan bantuan sekecil apa pun dalam perjalanan studi penulis.

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

Bogor, Agustus 2026

Nabil Naufal



DAFTAR ISI

DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan.....	3
II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 <i>Random Forest</i>	4
2.2 <i>Geographical Random Forest - Weighted (GRF-W)</i>	5
III KAJIAN SIMULASI.....	9
3.1 Desain Simulasi.....	9
3.1.1 Batasan dan Fokus Skenario Simulasi.....	9
3.1.2 Pembangkitan Domain Spasial dan Efek Heterogenitas.....	9
3.1.3 Struktur <i>Multiplicative Seasonal Autoregressive (SAR)</i>	9
3.1.4 Prosedur <i>Burn-in</i>	10
3.2 Prosedur Analisis Data.....	10
3.2.1 Spesifikasi Skenario Pemodelan.....	10
3.2.2 Konfigurasi <i>Hyperparameter</i>	11
3.2.3 Skema Validasi Temporal <i>Cross-Sectional Slicing</i>	11
3.2.4 Ekstraksi Nilai.....	11
3.2.5 Evaluasi Kinerja Model.....	12
3.3 Hasil Kajian Simulasi.....	14
3.3.1 Komparasi Kinerja Prediktif.....	14
3.3.2 Pengukuran Kesesuaian Pola Spasial β_1	18
3.3.3 Pengukuran Kesesuaian Pola Spasial β_2	23
IV KAJIAN EMPIRIS.....	28
4.1 Data Empiris.....	28
4.2 Prosedur Analisis.....	29
4.3 Hasil Kajian Empiris.....	35
4.3.1 Pra-Pemrosesan Data.....	35
4.3.2 Eksplorasi Data.....	37
4.3.3 Evaluasi Kinerja Prediktif.....	39
4.3.4 Dekomposisi Galat Temporal.....	40
4.3.5 Model Terbaik di Tiap Lokasi.....	41
4.3.6 Mekanisme Pendorong Emisi.....	43
V SIMPULAN DAN SARAN.....	52
5.1 Simpulan.....	52
5.2 Saran.....	53
DAFTAR PUSTAKA.....	54
LAMPIRAN.....	59
RIWAYAT HIDUP.....	60

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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

DAFTAR TABEL

1	Data Empiris	29
2	<i>Missing</i> value per tahun	37
3	Hasil uji autokorelasi dan heterogenitas spasial	38
4	Perbandingan performa Global RF+Lag dan GWRF+Lag pada data uji	40

DAFTAR GAMBAR

1	Boxplot RMSE agregat untuk 3 model pada tiap skenario	15
2	Boxplot MAE agregat untuk 3 model pada tiap skenario	15
3	Boxplot R^2 agregat untuk 3 model pada tiap skenario	16
4	Boxplot RMSE bulanan untuk 3 model pada tiap skenario	17
5	Boxplot MAE bulanan untuk 3 model pada tiap skenario	18
6	Boxplot R^2 bulanan untuk 3 model pada tiap skenario	18
7	Pemetaan komparatif kesesuaian pola spasial β_1 secara agregat pada tingkat autokorelasi musiman: (a) $\rho = 0,2$; (b) $\rho = 0,5$; dan (c) $\rho = 0,8$	19
8	Pemetaan komparatif kesesuaian pola spasial β_1 secara bulanan pada tingkat autokorelasi musiman: (a) $\rho = 0,2$; (b) $\rho = 0,5$; dan (c) $\rho = 0,8$	20
9	Tren konsistensi koefisien korelasi kesesuaian pola spasial β_1 secara bulanan pada: (a) $\rho = 0,2$; (b) $\rho = 0,5$; (c) $\rho = 0,8$	22
10	Pemetaan komparatif kesesuaian pola spasial β_2 secara agregat pada tingkat autokorelasi musiman: (a) $\rho = 0,2$; (b) $\rho = 0,5$; (c) $\rho = 0,8$	23
11	Pemetaan komparatif kesesuaian pola spasial β_2 secara bulanan pada tingkat autokorelasi musiman: (a) $\rho = 0,2$; (b) $\rho = 0,5$; (c) $\rho = 0,8$	24
12	Tren konsistensi koefisien korelasi spasial kesesuaian pola spasial β_2 secara bulanan pada: (a) $\rho = 0,2$; (b) $\rho = 0,5$; (c) $\rho = 0,8$	26
13	Peta cakupan wilayah amatan penelitian di Kawasan Asia Tenggara (peta tidak berskala)	28
14	Lokasi dengan <i>missing values</i> pada data NDVI tahun 2022 (a), 2023 (b), 2024 (c)	36
15	Perbandingan sebaran NDVI sebelum dan setelah penanganan	37
16	Sebaran rata-rata konsentrasi NO_2 troposferik tahunan (agregat 2023) di kawasan ASEAN	38
17	Plot (a) ACF dan (b) PACF pada rata-rata per bulan data NO_2	39
18	Perbandingan AE GWRF+Lag dan RFS+Lag di tiap bulan	41
19	Lokasi dengan RFS+Lag sebagai model terbaik	41
20	Lokasi dengan GWRF RF+Lag sebagai model terbaik	42
21	Lokasi dengan kemampuan prediktif yang sama antara kedua mode	42
22	Model terbaik di masing-masing lokasi amatan	43
23	LVI Nightlights	44



24	LVI NDVI	46
25	LVI Populasi	47
26	LVI Lag 1	48
27	LVI Lag 12	49
28	Kepentingan peubah pada metode GWRF+Lag dan RFS+Lag	50
29	Peubah paling penting di setiap lokasi menurut GWRF+Lag	51

DAFTAR LAMPIRAN

1	Kepentingan peubah GWRF + Lag tiap bulan	59
2	Kepentingan peubah RFS + Lag tiap bulan	59



@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.