

PENGEMBANGAN MODEL *HIERARCHICAL GEOGRAPHICALLY WEIGHTED REGRESSION* DENGAN REGULARISASI *ELASTIC NET* PADA DATA SPASIAL-HIERARKIS

FITRI MUDIA SARI



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



@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.



PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI, SUMBER INFORMASI, PENGGUNAAN AI, DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi dengan judul “Pengembangan Model *Hierarchical Geographically Weighted Regression* dengan Regularisasi *Elastic Net* pada Data Spasial-Hierarkis” 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 disertasi ini.

Dalam penyusunan karya ini, penulis menggunakan bantuan ChatGPT (OpenAI), Scite, dan Elicit untuk membantu diskusi konseptual, penelusuran literatur, penyusunan dan penyuntingan naskah, serta penyusunan syntax R untuk simulasi dan analisis. 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

Fitri Mudia Sari
G1601201002



@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.

RINGKASAN

FITRI MUDIA SARI. Pengembangan Model *Hierarchical Geographically Weighted Regression* dengan Regularisasi *Elastic Net* pada Data Spasial-Hierarkis. Dibimbing oleh MUHAMMAD NUR AIDI, AGUS MOHAMAD SOLEH, dan FARIT MOCHAMAD AFENDI.

Data yang memiliki heterogenitas spasial dan struktur hierarkis memerlukan pendekatan pemodelan yang mampu mengakomodasi kedua karakteristik tersebut secara simultan. *Geographically Weighted Regression* (GWR) dikembangkan untuk memodelkan heterogenitas spasial melalui parameter lokal, sedangkan *Hierarchical Linear Model* (HLM) digunakan untuk memodelkan struktur data bertingkat. Integrasi kedua pendekatan tersebut menghasilkan *Hierarchical Geographically Weighted Regression* (HGWR), yang mampu mengakomodasi heterogenitas spasial dan struktur hierarkis dalam satu kerangka pemodelan. Meskipun demikian, pengembangan metodologi HGWR masih menyisakan ruang, khususnya dalam evaluasi reliabilitas parameter lokal dan penyempurnaan proses pendugaan parameter lokal. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengembangkan metodologi HGWR melalui penyusunan kerangka evaluasi reliabilitas parameter lokal menggunakan pendekatan *cluster bootstrap* dan *sign consistency*, serta pengembangan metode pendugaan parameter lokal melalui integrasi mekanisme regularisasi *Elastic Net*.

Pengembangan metodologi dilakukan melalui tiga kajian yang saling berkaitan. Kajian pertama membandingkan kinerja GWR, HLM, dan HGWR untuk mengevaluasi kesesuaian HGWR sebagai model dasar pada data yang memiliki heterogenitas spasial dan struktur hierarkis. Kajian kedua mengembangkan kerangka evaluasi reliabilitas parameter lokal HGWR menggunakan pendekatan *cluster bootstrap* dan *sign consistency*. Kajian ketiga mengembangkan model *Hierarchical Geographically Weighted Elastic Net* (HGWEN) melalui integrasi mekanisme regularisasi *Elastic Net* pada proses pendugaan parameter lokal level-2 dalam kerangka HGWR. Metodologi yang dikembangkan dievaluasi melalui studi simulasi dan diterapkan pada data prevalensi stunting tahun 2022 yang terdiri atas 514 kabupaten/kota yang tersarang dalam 34 provinsi di Indonesia.

Hasil kajian pertama menunjukkan bahwa HGWR memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan GWR dan HLM dalam memodelkan data yang memiliki heterogenitas spasial dan struktur hierarkis. HGWR menghasilkan nilai *Akaike Information Criterion* (AIC) sebesar 2106,054, lebih rendah dibandingkan GWR (3196,563) dan HLM (3332,512), serta menghasilkan *Root Mean Squared Error* (RMSE) terendah sebesar 4,768 dan koefisien determinasi tertinggi ($R^2 = 0,681$). Hasil tersebut menunjukkan bahwa HGWR mampu merepresentasikan karakteristik data spasial-hierarkis dengan lebih baik dibandingkan model yang hanya mengakomodasi salah satu karakteristik tersebut. Hasil kajian kedua menunjukkan bahwa evaluasi reliabilitas parameter lokal tidak dapat didasarkan hanya pada signifikansi statistik. Berdasarkan selang kepercayaan *bootstrap*, parameter Indeks Pembangunan Manusia (G_1) dan Prevalensi Gizi Buruk (G_3) signifikan pada 13 dari 34 provinsi, sedangkan parameter Anggaran Kesehatan per Kapita (G_2) hanya signifikan pada satu provinsi. Sebaliknya, berdasarkan ukuran *sign consistency*, sebanyak 21 provinsi memiliki nilai $SC \geq 0,80$ untuk parameter

G₂. Temuan tersebut menunjukkan bahwa signifikansi statistik dan *sign consistency* merepresentasikan aspek yang berbeda dalam mengevaluasi parameter lokal sehingga kedua ukuran tersebut perlu dipertimbangkan secara bersamaan untuk memperoleh interpretasi parameter yang lebih andal.

Berdasarkan hasil evaluasi tersebut, kajian ketiga mengembangkan model HGWEN melalui integrasi mekanisme regularisasi *Elastic Net* ke dalam proses pendugaan parameter lokal HGWR. Hasil studi simulasi menunjukkan bahwa HGWEN menghasilkan RMSE yang lebih rendah dibandingkan HGWR, misalnya pada parameter γ_{01} dari 0,392 menjadi 0,297. Kemampuan model dalam mengidentifikasi parameter yang tidak relevan juga meningkat, yang ditunjukkan oleh peningkatan nilai *True Negative Rate* (TNR) dari 0,112 pada HGWR menjadi 0,351 pada HGWEN dengan aturan $\lambda_{\min}$, meskipun diikuti oleh penurunan *True Positive Rate* (TPR) sebagai konsekuensi proses *shrinkage*. Pada data prevalensi stunting, penerapan HGWEN menghasilkan distribusi parameter lokal yang lebih terpusat dibandingkan HGWR. Sebagai contoh, rentang antarkuartil parameter G_1 menurun dari 1,360 pada HGWR menjadi 0,526 pada HGWEN dengan aturan λ_{1se} . Selain itu, jumlah parameter G_1 yang signifikan dan memiliki arah pengaruh dominan negatif meningkat dari 13 provinsi pada HGWR menjadi 18 provinsi pada HGWEN dengan aturan $\lambda_{\min}$. Hasil tersebut menunjukkan bahwa integrasi *Elastic Net* mampu menghasilkan parameter lokal yang lebih sederhana, lebih stabil, dan tetap mempertahankan kemampuan HGWR dalam merepresentasikan heterogenitas spasial dan struktur hierarkis.

Penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan metodologi HGWR melalui tiga aspek utama. Pertama, penelitian ini menunjukkan bahwa HGWR merupakan kerangka pemodelan yang sesuai sebagai dasar pengembangan metodologi pada data yang memiliki heterogenitas spasial dan struktur hierarkis. Kedua, penelitian ini mengembangkan kerangka evaluasi reliabilitas parameter lokal menggunakan pendekatan *cluster bootstrap* dan *sign consistency* sehingga evaluasi parameter lokal tidak hanya didasarkan pada signifikansi statistik, tetapi juga pada konsistensi arah pengaruh parameter terhadap variasi data. Ketiga, penelitian ini mengembangkan model HGWEN melalui integrasi mekanisme regularisasi *Elastic Net* ke dalam proses pendugaan parameter lokal level-2 sehingga menghasilkan parameter lokal yang lebih sederhana, lebih stabil, dan tetap mampu mempertahankan karakteristik spasial dan hierarkis model. Secara keseluruhan, penelitian ini memperluas metodologi HGWR melalui pengembangan kerangka evaluasi reliabilitas parameter lokal dan penyempurnaan proses pendugaan parameter lokal sehingga memberikan alternatif pengembangan model regresi spasial-hierarkis yang lebih andal untuk analisis data dengan heterogenitas spasial dan struktur hierarkis.

Kata kunci: *Elastic Net*, HGWEN, pemodelan spasial-hierarkis, regularisasi, stunting

SUMMARY

FITRI MUDIA SARI. An Elastic Net Regularized Extension of Hierarchical Geographically Weighted Regression for Spatial-Hierarchical Data. Supervised by MUHAMMAD NUR AIDI, AGUS MOHAMAD SOLEH, and FARIT MOCHAMAD AFENDI.

Spatially heterogeneous data with a hierarchical structure require a modeling framework capable of accommodating both characteristics simultaneously. *Geographically Weighted Regression* (GWR) was developed to capture spatial heterogeneity through location-specific parameter estimates, whereas the *Hierarchical Linear Model* (HLM) was designed to account for hierarchical data structures. Integrating these two approaches led to the development of *Hierarchical Geographically Weighted Regression* (HGWR), which combines spatial heterogeneity and hierarchical structure within a unified modeling framework. Despite its flexibility, the HGWR methodology still offers opportunities for further development, particularly in evaluating the reliability of local parameter estimates and improving the estimation procedure. To address these methodological issues, this study extends the HGWR framework by developing a reliability assessment for local parameter estimates and incorporating *Elastic Net* regularization into the estimation procedure.

The proposed methodological development consists of three interconnected studies. The first study compares the performance of GWR, HLM, and HGWR to evaluate the suitability of HGWR as the underlying modeling framework for hierarchical spatial data. The second study develops a framework for assessing the reliability of local parameter estimates using *cluster bootstrap* and *sign consistency*. The third study introduces the *Hierarchical Geographically Weighted Elastic Net* (HGWEN) model by integrating *Elastic Net* regularization into the estimation of level-2 local parameters within the HGWR framework. The proposed methodology was evaluated through simulation studies and subsequently applied to district/city-level stunting prevalence data in Indonesia in 2022, comprising 514 districts/cities nested within 34 provinces.

The first study demonstrated that HGWR outperformed both GWR and HLM in modeling data characterized by spatial heterogeneity and hierarchical structure. HGWR achieved the lowest Akaike Information Criterion (AIC) of 2106.054, substantially lower than those of GWR (3196.563) and HLM (3332.512), while also producing the lowest Root Mean Squared Error (RMSE) of 4.768 and the highest coefficient of determination ($R^2 = 0.681$). These results confirm that integrating spatial heterogeneity and hierarchical structure provides a more appropriate representation of hierarchical spatial data than modeling either characteristic separately. The second study further revealed that the reliability of local parameter estimates cannot be adequately assessed using statistical significance alone. Based on bootstrap confidence intervals, the Human Development Index (G_1) and Poor Nutrition Prevalence (G_3) were statistically significant in 13 of the 34 provinces, whereas Health Expenditure per Capita (G_2) was significant in only one province. In contrast, the *sign consistency* measure indicated that 21 provinces had SC values of at least 0.80 for G_2 . These findings demonstrate that statistical significance and

sign consistency provide complementary information and should therefore be considered jointly when evaluating the reliability of local parameter estimates.

Building upon these findings, the third study developed the HGWEN model by incorporating *Elastic Net* regularization into the HGWR estimation procedure. Simulation results showed that HGWEN achieved lower estimation errors than HGWR; for example, the RMSE of parameter γ_{01} decreased from 0.392 to 0.297. The proposed model also improved the identification of irrelevant parameters, as reflected by an increase in the True Negative Rate (TNR) from 0.112 for HGWR to 0.351 for HGWEN using the $\lambda_{\min}$ rule, although this improvement was accompanied by a reduction in the True Positive Rate (TPR) as a consequence of the shrinkage process. In the empirical application to stunting prevalence data, HGWEN produced a more concentrated distribution of local parameter estimates than HGWR. For example, the interquartile range of parameter G_1 decreased from 1.360 under HGWR to 0.526 under HGWEN with the λ_{ise} rule. In addition, the number of provinces with statistically significant and consistently negative estimates for G_1 increased from 13 under HGWR to 18 under HGWEN using the $\lambda_{\min}$ rule. These findings indicate that *Elastic Net* regularization effectively controls the complexity of local parameter estimates while preserving the spatial and hierarchical characteristics of the HGWR model.

This study contributes to the methodological development of HGWR in three main aspects. First, it demonstrates that HGWR provides an appropriate modeling framework for hierarchical spatial data characterized by spatial heterogeneity. Second, it introduces a framework for evaluating the reliability of local parameter estimates using *cluster bootstrap* and *sign consistency*, allowing parameter reliability to be assessed not only through statistical significance but also through the consistency of the estimated effects across resampled datasets. Third, it develops the HGWEN model by integrating *Elastic Net* regularization into the estimation of level-2 local parameters, resulting in estimates that are simpler, more stable, and capable of preserving the fundamental spatial and hierarchical characteristics of the model. Overall, this study extends the HGWR methodology through the development of a local parameter reliability assessment framework and an improved estimation procedure, providing a more robust methodological alternative for hierarchical spatial regression.

Keywords: Elastic Net, HGWEN, regularization, spatial-hierarchical modeling, stunting



@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.

© 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.

PENGEMBANGAN MODEL *HIERARCHICAL GEOGRAPHICALLY WEIGHTED REGRESSION* DENGAN REGULARISASI *ELASTIC NET* PADA DATA SPASIAL-HIERARKIS

FITRI MUDIA SARI

Disertasi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Doktor pada
Program Studi Statistika dan Sains Data

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



@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 Tertutup Disertasi:

- 1 Dr. Anwar Fitrianto S.Si., M.Sc.
- 2 Prof. Dr. Ir. I Made Sumertajaya M.Si.



Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:

- 1 Dr. Anwar Fitrianto S.Si., M.Sc.
- 2 Prof. Dr. Yulkifli, S.Pd, M.Si





Judul Disertasi : Pengembangan Model *Hierarchical Geographically Weighted Regression* dengan Regularisasi *Elastic Net* pada Data Spasial-Hierarkis

Nama : Fitri Mudia Sari
NIM : G1601201002

Disetujui oleh

Pembimbing 1:

Prof. Dr. Ir. Muhammad Nur Aidi, M.S.



Pembimbing 2:

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



Pembimbing 3:

Dr. Farit Mochamad Afendi, S.Si., M.Si.



Diketahui oleh

Ketua Program Studi:

Dr. Kusman Sadik, S.Si., M.Si.
NIP. 196909121997021000



Dekan Sekolah Sains Data, Matematika, dan Informatika:

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



Tanggal Ujian: 14 Juli 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 ucapkan kepada Allah subhanahu wa ta'ala atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga disertasi yang berjudul “Pengembangan Model *Hierarchical Geographically Weighted Regression* dengan Regularisasi *Elastic Net* pada Data Spasial-Hierarkis” dapat diselesaikan. Disertasi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Doktor pada Program Studi Statistika dan Sains Data, Sekolah Sains Data, Matematika, dan Informatika, Institut Pertanian Bogor.

Terima kasih penulis sampaikan kepada Prof. Dr. Ir. Muhammad Nur Aidi, M.S., Dr. Agus Mohamad Soleh, M.S., dan Dr. Farit Mochamad Afendi, M.Si. selaku komisi pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan, masukan, dan dukungan selama proses penyusunan disertasi ini. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Prof. Dr. Ir. Anik Djuraidah, M.S., Prof. Dr. Ir. I Made Sumertajaya, M.Si., dan Dr. Ir. Budi Susetyo, M.S. selaku penguji luar komisi pada ujian kualifikasi lisan atas saran, arahan, dan masukan yang sangat berharga bagi penyempurnaan rancangan penelitian disertasi ini. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan penguji luar komisi pada ujian tertutup, Dr. Anwar Fitrianto S.Si., M.Sc. dan Prof. Dr. Ir. I Made Sumertajaya M.Si., perwakilan fakultas Prof. Dr. Anang Kurnia, S.Si, M.Si., perwakilan program studi Dr. Kusman Sadik, S.Si., M.Si. yang telah memberikan saran dan masukan. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada penguji luar komisi pembimbing Dr. Anwar Fitrianto S.Si., M.Sc. dan Prof. Dr. Yulkifli, S.Pd, M.Si, perwakilan fakultas Prof. Dr. Ir. Agus Bueno, M.Si, M.Kom., Perwakilan Program Studi Prof. Dr. Ir. Hari Wijayanto, M.Si, yang telah memberikan saran dan masukan pada sidang promosi program doktor.

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Rektor IPB University beserta jajaran pimpinan, Dekan Sekolah Sains Data, Matematika, dan Informatika beserta jajaran pimpinan, Ketua Program Studi Statistika dan Sains Data, serta Bapak/Ibu dosen dan tenaga kependidikan di lingkungan Program Studi Statistika dan Sains Data IPB University atas fasilitas, ilmu, dan dukungan selama penulis menempuh pendidikan doktor. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada pimpinan Universitas Negeri Padang, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, serta Departemen Statistika yang telah memberikan izin, dukungan, dan kesempatan kepada penulis untuk menempuh pendidikan doktor. Terima kasih penulis sampaikan kepada Universitas Negeri Padang atas bantuan studi yang diberikan selama masa pendidikan doktor, sehingga penulis dapat menjalani proses studi dan penyusunan disertasi dengan lebih baik. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada Badan Pusat Statistik dan Kementerian Kesehatan Republik Indonesia yang telah menyediakan data melalui publikasi resmi sehingga penelitian ini dapat dilaksanakan.

Ungkapan terima kasih yang tulus penulis sampaikan kepada orang tua tercinta, Papa Mudatsir dan Mama Armianti, serta mertua tercinta, Papa Musa Nasution dan Mama Masdelina Lubis, atas doa, kasih sayang, dan dukungan yang senantiasa mengiringi penulis. Terima kasih yang mendalam penulis sampaikan kepada suami tercinta, Hendry Frananda, serta anak-anak tersayang, Ayunindya Alesha, Putri Alya Hanifa, dan Khaira Fazila, atas cinta, kesabaran, pengertian, dan kekuatan yang diberikan selama penulis menempuh pendidikan doktor. Terima

kasih juga penulis sampaikan kepada adik-adik tercinta, Ikhsanul Fikri, M. Akhsanul Farhan, dan Fadlan Aziz, serta keluarga besar atas doa dan dukungan yang diberikan.

Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada teman-teman seperjuangan angkatan 2020, Mba Dian, Mba Rita, Mba Widya, Mas Dimas, Pak Rahmat, Bu Din, Bang Domu, Mba Marta, dan Teh Rohmah, serta seluruh mahasiswa S3 Program Studi Statistika dan Sains Data IPB University atas kebersamaan, bantuan, semangat, serta kesediaan menjadi tempat diskusi dan berbagi pengetahuan selama penulis menempuh pendidikan doktor.

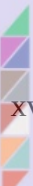
Penulis berharap disertasi ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu statistika, khususnya dalam pemodelan data spasial-hierarkis, serta menjadi rujukan bagi penelitian lanjutan yang berkaitan dengan pengembangan model spasial-hierarkis teregularisasi.

Bogor, Agustus 2026

Fitri Mudia Sari

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xix
DAFTAR GAMBAR	xx
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Ruang Lingkup Penelitian	4
1.6 Kebaruan (<i>novelty</i>)	5
1.7 Sistematika Disertasi	5
II TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Karakteristik Data Spasial	8
2.2 <i>Geographically Weighted Regression</i> (GWR)	8
2.3 <i>Hierarchical Linear Model</i> (HLM)	11
2.4 <i>Hierarchical Geographically Weighted Regression</i> (HGWR)	13
2.5 <i>Bootstrap</i>	17
2.6 <i>Sign Consistency</i>	18
2.7 <i>Elastic Net</i>	19
2.8 Kesenjangan Metodologis dan Justifikasi Pengembangan Metodologi	20
III PERBANDINGAN KINERJA MODEL GWR, HLM, DAN HGWR DALAM PEMODELAN PREVALENSI STUNTING	23
3.1 Pendahuluan	23
3.2 Metodologi Penelitian	24
3.3 Hasil dan Pembahasan	30
3.4 Kesimpulan	39
IV EVALUASI KEANDALAN PARAMETER LOKAL PADA MODEL HGWR MENGGUNAKAN PENDEKATAN <i>BOOTSTRAP</i> DAN <i>SIGN CONSISTENCY</i>	40
4.1 Pendahuluan	40
4.2 Metodologi Penelitian	41
4.3 Hasil dan Pembahasan	45
4.4 Kesimpulan	52
V PENGEMBANGAN MODEL <i>HIERARCHICAL GEOGRAPHICALLY WEIGHTED ELASTIC NET</i> UNTUK REGULARISASI PARAMETER LOKAL	53
5.1 Pendahuluan	53
5.2 Pengembangan Model <i>Hierarchical Geographically Weighted Elastic Net</i> (HGWEN)	54
5.3 Metodologi Penelitian	61
5.4 Hasil dan Pembahasan	66
5.5 Kesimpulan	81
VI PEMBAHASAN UMUM	82
VII SIMPULAN DAN SARAN	86
7.1 Simpulan	86
7.2 Saran	86



DAFTAR PUSTAKA	88
LAMPIRAN	93
RIWAYAT HIDUP	121

@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.

DAFTAR TABEL

1	Klasifikasi Komponen Model HGWR	14
2	Struktur Hierarki Spasial Dua Level pada Penelitian	25
3	Deskripsi Peubah Penelitian	25
4	Matriks Korelasi Antarpeubah Penjelasa	31
5	Nilai VIF Peubah Penjelasa	31
6	Perbandingan Kinerja Model	38
7	Ringkasan Sebaran Simpangan Baku <i>Bootstrap</i> untuk <i>GLSW Effects</i>	46
8	Jumlah Provinsi Berdasarkan Signifikansi Statistik Parameter Lokal	47
9	Ringkasan SC Parameter Lokal pada Model HGWR	49
10	Jumlah Provinsi Berdasarkan Dominansi Arah Dugaan Parameter Lokal	49
11	Klasifikasi Parameter Lokal Berdasarkan Signifikansi Statistik dan Konsistensi Arah Dugaan	51
12	Skenario simulasi model HGWEN	63
13	Rata-rata Bias Absolut dan RMSE Parameter Lokal	66
14	Rata-rata TPR dan TNR	69
15	Ringkasan parameter regularisasi yang terpilih pada model HGWEN	75
16	Ringkasan simpangan baku <i>bootstrap</i> parameter lokal pada HGWR dan HGWEN	76
17	Jumlah parameter lokal yang signifikan berdasarkan interval kepercayaan <i>bootstrap</i>	77
18	Klasifikasi parameter lokal berdasarkan <i>sign consistency</i>	77
19	Klasifikasi parameter lokal HGWR dan HGWEN berdasarkan signifikansi dan <i>sign consistency</i>	78

@Hak cipta milik IPB University

IPB University



DAFTAR GAMBAR

1	Kerangka kebaruan penelitian	7
2	Diagram alir pendugaan parameter HGWR menggunakan prosedur BFML yang diadaptasi dari Hu <i>et al.</i> (2023).	16
3	Peta Sebaran Prevalensi Stunting di Tingkat Kabupaten/Kota di Indonesia, Tahun 2022	32
4	Boxplot Prevalensi Stunting Menurut Provinsi di Indonesia, Tahun 2022	33
5	Peta klaster LISA prevalensi stunting antarprovinsi di Indonesia	34
6	Boxplot sebaran nilai penduga koefisien GWR	35
7	Visualisasi Hasil Model HLM: (a) Koefisien Tetap; (b) Intersep Acak per Provinsi	37
8	Komponen Parameter Model HGWR: (a) Sebaran Koefisien Lokal (GLSW <i>Effects</i>) untuk Peubah Level-2; (b) Sebaran Efek Acak (SLR <i>Effects</i>) untuk Intersep dan Peubah Level-1	38
9	Sebaran Simpangan Baku <i>Bootstrap</i> Parameter Lokal (G_1 , G_2 , dan G_3) pada Model HGWR	46
10	Selang Kepercayaan 95% Berbasis <i>Bootstrap</i> untuk Parameter Lokal (G_1 , G_2 , dan G_3) pada Model HGWR	48
11	Peta Signifikansi Parameter Lokal Berdasarkan Selang Kepercayaan <i>Bootstrap</i> 95% pada Model HGWR	49
12	Sebaran Nilai SC Parameter Lokal (G_1 , G_2 , dan G_3) pada Model HGWR	50
13	Boxplot Sebaran Rata-rata RMSE	68
14	Boxplot TPR	71
15	Boxplot TNR (skenario <i>null</i>)	72
16	Contoh kurva <i>K-fold cross-validation</i> untuk pemilihan parameter regularisasi pada model HGWR di Provinsi NAD Aceh.	74
17	Sebaran parameter lokal pada HGWR, HGWRN (λ_{min}), dan HGWRN (λ_{1se})	74
18	Klasifikasi parameter lokal G_1 , G_2 , dan G_3 berdasarkan kombinasi signifikansi statistik dan <i>sign consistency</i> pada model HGWR, HGWRN λ_{min} , dan HGWRN λ_{1se}	80