

Evaluating Local Parameter Reliability in Hierarchical Geographically Weighted Regression: A Bootstrap and Sign Consistency Approach

Fitri Mudia Sari^{1,2*}, Muhammad Nur Aidi¹, Agus Mohamad Soleh¹ dan Farit Mochamad Afendi¹

¹Departemen Statistika, Institut Pertanian Bogor, Bogor, Indonesia

²Departemen Statistika, Universitas Negeri Padang, Padang, Indonesia

*Corresponding author: fitrimudiasari@fmipa.unp.ac.id

Submitted : 19 April 2026

Revised : 28 Mei 2026

Accepted : 29 Mei 2026

ABSTRACT

The Hierarchical Geographically Weighted Regression (HGWR) model is widely used to capture spatial heterogeneity and hierarchical data structures simultaneously. However, the reliability of its local parameter estimates remains a critical issue due to potential variability across locations. This study aims to evaluate the reliability of local parameters in the HGWR model using a bootstrap-based approach combined with sign consistency analysis, using an empirical stunting prevalence dataset in Indonesia. A cluster bootstrap procedure at the provincial level was implemented with 500 replications to generate empirical distributions of parameter estimates, enabling the assessment of statistical significance through confidence intervals. In addition, sign consistency was employed to examine the stability of the direction of local effects across bootstrap replications. The results show that while some local parameters are statistically significant, they do not always exhibit consistent directional effects, indicating potential instability. Conversely, several parameters demonstrate both statistical significance and high sign consistency, suggesting robust local relationships. These findings highlight that relying solely on statistical significance may lead to misleading interpretations of local effects in HGWR models. The combination of bootstrap and sign consistency provides a more comprehensive framework for assessing parameter reliability. This approach contributes to improving the interpretability and robustness of spatial multilevel modeling, particularly in applications involving complex hierarchical and spatial data.

Keywords: Bootstrap, Hierarchical Geographically Weighted Regression, Parameter Reliability, Sign Consistency, Spatial Heterogeneity.



This is an open access article under the Creative Commons 4.0 Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. ©2022 by author and Universitas Negeri Padang.

I. PENDAHULUAN

Heterogenitas spasial dan struktur hierarkis merupakan karakteristik yang sering muncul secara simultan dalam data empiris, sehingga memerlukan pendekatan pemodelan yang mampu mengakomodasi keduanya secara terpadu. *Geographically Weighted Regression* (GWR) digunakan untuk menangkap variasi spasial melalui parameter yang bervariasi antar lokasi (Fotheringham et al., 2002), sedangkan *Hierarchical Linear Model* (HLM) digunakan untuk mengakomodasi struktur data bertingkat dengan mempertimbangkan variasi antar kelompok (Raudenbush & Bryk, 2002). Kedua pendekatan tersebut memiliki keterbatasan karena hanya mampu menangani salah satu karakteristik tersebut secara terpisah.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, *Hierarchical Geographically Weighted Regression* (HGWR) dikembangkan dengan mengintegrasikan variasi spasial dan struktur hierarkis dalam satu kerangka pemodelan (Hu et al., 2023; Hu et al., 2024). Model ini memungkinkan estimasi parameter yang bersifat lokal sekaligus mempertimbangkan dependensi antar level, sehingga lebih fleksibel dalam merepresentasikan fenomena kompleks. Berbagai penelitian empiris menunjukkan bahwa HGWR memberikan kinerja model yang lebih baik dibandingkan GWR dan HLM pada data dengan struktur spasial dan hierarkis (Septemberini et al., 2024; Sari et al., 2025).

Meskipun demikian, penerapan HGWR pada penelitian sebelumnya umumnya berfokus pada evaluasi kinerja model berdasarkan ukuran ketepatan prediksi, seperti *Akaike Information Criterion* (AIC), *Root Mean Square Error* (RMSE), dan koefisien determinasi. Pendekatan ini digunakan baik pada pengembangan metode maupun pada berbagai

aplikasi empiris dengan karakteristik data yang berbeda (Hu et al., 2022; Septemberini et al., 2024; Sari et al., 2025). Namun, evaluasi tersebut lebih menekankan pada aspek *goodness-of-fit* dan belum secara eksplisit mengkaji keandalan parameter lokal yang dihasilkan oleh model.

Pada model dengan estimasi parameter yang bersifat lokal, seperti GWR dan HGWR, signifikansi statistik tidak selalu diikuti oleh kestabilan parameter antar sampel (Brunsdon et al., 1999; Fotheringham et al., 2002). Parameter yang signifikan pada suatu sampel dapat mengalami perubahan arah atau besaran pada sampel lain, sehingga berpotensi menghasilkan interpretasi yang kurang konsisten. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan evaluasi tambahan yang tidak hanya mempertimbangkan signifikansi statistik, tetapi juga mampu mengukur konsistensi arah pengaruh parameter sebagai indikator keandalan.

Pendekatan berbasis resampling, seperti *bootstrap*, dapat digunakan untuk mengevaluasi variabilitas parameter melalui distribusi empiris tanpa bergantung pada asumsi distribusi tertentu (Efron & Tibshirani, 1993). Melalui pendekatan ini, interval kepercayaan parameter dapat dibangun untuk menilai signifikansi secara lebih fleksibel. Namun demikian, pendekatan tersebut belum sepenuhnya menggambarkan kestabilan arah parameter. Oleh karena itu, dalam penelitian ini digunakan ukuran tambahan berupa *sign consistency* untuk mengevaluasi konsistensi arah parameter pada berbagai hasil resampling.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi keandalan parameter lokal pada model *Hierarchical Geographically Weighted Regression* (HGWR) dengan mengombinasikan pendekatan *bootstrap* dan *sign consistency*. Pendekatan *bootstrap* digunakan untuk menilai signifikansi parameter berdasarkan interval kepercayaan, sedangkan *sign consistency* digunakan untuk mengevaluasi kestabilan arah pengaruh parameter pada hasil resampling. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam meningkatkan interpretabilitas dan keandalan model spasial multilevel.

II. METODE PENELITIAN

Bagian metode penelitian dalam studi ini disusun untuk menjelaskan secara sistematis tahapan analisis yang dilakukan, mulai dari penyusunan struktur data, spesifikasi model, hingga evaluasi keandalan parameter. Pendekatan yang digunakan mengintegrasikan model *Hierarchical Geographically Weighted Regression* (HGWR) dengan prosedur *bootstrap* dan ukuran *sign consistency* untuk menangkap heterogenitas spasial serta menilai stabilitas estimasi parameter. Secara umum, tahapan penelitian meliputi pengumpulan dan pengolahan data, eksplorasi awal untuk mengidentifikasi pola spasial, estimasi model HGWR, serta evaluasi parameter berdasarkan signifikansi statistik dan kestabilan arah pengaruh.

A. Sumber dan Struktur Data

Penelitian ini menggunakan data sekunder yang bersumber dari publikasi resmi Badan Pusat Statistik (BPS) dan Survei Status Gizi Indonesia (SSGI) yang dipublikasikan pada tahun 2023, dengan data yang digunakan merujuk pada kondisi tahun 2022. Pemilihan tahun data ini didasarkan pada pertimbangan ketersediaan dan kelengkapan data, di mana setelah adanya pemekaran wilayah administrasi pada tahun 2023, sebagian data pada provinsi baru belum tersedia secara lengkap. Oleh karena itu, penggunaan data tahun 2022 memberikan cakupan wilayah yang lebih konsisten untuk seluruh unit analisis.

Unit analisis dalam penelitian ini adalah kabupaten/kota yang berjumlah 514 dan terkelompok dalam 34 provinsi, sehingga membentuk struktur data hierarkis dua level. Variabel respon yang digunakan adalah prevalensi stunting (%), sedangkan variabel penjelas pada level kabupaten/kota meliputi tingkat kemiskinan, rata-rata lama sekolah, cakupan imunisasi dasar lengkap, akses sanitasi layak, dan akses air minum layak. Pada level provinsi digunakan variabel Indeks Pembangunan Manusia (IPM), pengeluaran kesehatan per kapita, dan prevalensi malnutrisi. Pemilihan variabel dilakukan berdasarkan relevansi terhadap faktor-faktor yang memengaruhi stunting serta ketersediaan data yang konsisten pada seluruh wilayah pengamatan.

Informasi spasial dalam penelitian ini direpresentasikan melalui koordinat geografis pada level provinsi yang digunakan sebagai dasar dalam pemodelan variasi spasial. Dengan demikian, seluruh kabupaten/kota dalam satu provinsi berbagi informasi lokasi yang sama dalam proses estimasi parameter lokal. Dalam kerangka model HGWR yang digunakan, komponen spasial dimodelkan berdasarkan koordinat tersebut, sehingga variasi spasial yang dihasilkan mencerminkan perbedaan antar provinsi, sementara struktur hierarkis tetap mempertahankan hubungan antar kabupaten/kota dalam masing-masing provinsi.

B. Model Hierarchical Geographically Weighted Regression (HGWR)

Model yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Hierarchical Geographically Weighted Regression* (HGWR), yaitu model yang mengintegrasikan heterogenitas spasial dan struktur hierarkis dalam satu kerangka pemodelan. Berbeda dengan GWR yang hanya mengakomodasi variasi spasial, dan HLM yang hanya mempertimbangkan struktur data bertingkat, HGWR memungkinkan pengaruh kovariat bervariasi menurut lokasi sekaligus mempertimbangkan variasi antar kelompok. Dalam model ini, koefisien regresi dipisahkan menjadi tiga komponen, yaitu efek tetap (*fixed effects*), efek acak (*random effects*), dan efek spasial (*spatially varying effects*) (Hu et al., 2022, 2023, 2024).

Secara formal, model HGWR dalam penelitian ini dinyatakan sebagai berikut.

Model Level 1:

$$y_{ij} = \beta_{0j} + \sum_{p=1}^P \beta_{pj} x_{pij} + e_{ij} \quad (1)$$

Model Level 2:

$$\beta_{0j} = \gamma_{00}(u_j, v_j) + \sum_{q=1}^Q \gamma_{0q}(u_j, v_j) g_{qj} + u_{0j}; \quad \beta_{pj} = \gamma_{p0} + u_{pj} \quad (2)$$

dengan y_{ij} menyatakan nilai respon untuk unit ke- i pada kelompok ke- j , x_{pij} adalah kovariat level-1, g_{qj} adalah kovariat level-2, (u_j, v_j) adalah koordinat geografis, e_{ij} adalah galat level-1, sedangkan u_{0j} dan u_{pj} adalah efek acak pada level kelompok. Spesifikasi model ini mengikuti formulasi formulasi HGWR yang dikembangkan oleh (2022, 2023, 2024), yang menempatkan variasi spasial pada komponen intersep level-2 untuk menjaga parsimoni model. Pemberian variasi spasial pada seluruh koefisien akan meningkatkan jumlah parameter secara besar dan berpotensi menyebabkan model menjadi terlalu kompleks. Spesifikasi tersebut sesuai dengan struktur data penelitian ini, yaitu kabupaten/kota sebagai unit level-1 yang terkelompok dalam provinsi sebagai level-2, dengan koordinat geografis direpresentasikan pada level provinsi.

Pendugaan parameter dilakukan menggunakan metode *Backfitting Maximum Likelihood Estimator* (BFML) yang dikembangkan oleh Hu et al. (2023, 2024). Metode ini menyusun proses estimasi secara iteratif dengan memisahkan pembaruan komponen efek acak dan efek spasial sampai tercapai kondisi konvergen. Hasil estimasi berupa parameter global dan parameter lokal yang selanjutnya dievaluasi keandalannya menggunakan pendekatan *bootstrap* dan *sign consistency*.

C. Prosedur Bootstrap

Pendekatan bootstrap digunakan untuk memperoleh distribusi empiris parameter regresi yang dihasilkan oleh model HGWR. Metode ini dipilih karena tidak bergantung pada asumsi distribusi tertentu dan lebih sesuai untuk model dengan kompleksitas tinggi serta parameter yang bersifat lokal (Efron & Tibshirani, 1993; Davison & Hinkley, 1997). Selain itu, penggunaan bootstrap memungkinkan evaluasi variabilitas parameter secara langsung dari data, sehingga memberikan dasar yang lebih kuat dalam penilaian keandalan parameter lokal.

Dalam penelitian ini, bootstrap dilakukan menggunakan pendekatan *cluster bootstrap* pada level provinsi untuk mempertahankan struktur hierarkis data serta ketergantungan antar unit dalam kelompok. Pada setiap iterasi ke- b , sejumlah provinsi dipilih secara acak dengan pengembalian sebanyak jumlah provinsi pada data asli. Seluruh kabupaten/kota yang berada dalam provinsi terpilih kemudian dimasukkan ke dalam sampel bootstrap, sehingga struktur hubungan antar unit dalam provinsi tetap terjaga. Mekanisme ini juga memungkinkan suatu provinsi terpilih lebih dari satu kali dalam satu iterasi, atau tidak terpilih sama sekali, sehingga mencerminkan variasi sampel yang dihasilkan dari proses resampling.

Model HGWR selanjutnya diestimasi ulang pada setiap sampel bootstrap untuk memperoleh parameter hasil estimasi pada iterasi ke- b , yang dinyatakan sebagai $\hat{\beta}_{jp}^{(b)}$ untuk setiap lokasi i dan variabel p . Dalam hal suatu provinsi terpilih lebih dari satu kali dalam satu iterasi, parameter lokal yang dihasilkan diselaraskan dengan menghitung rata-rata nilai parameter pada lokasi yang bersesuaian, sehingga setiap lokasi tetap memiliki satu nilai parameter pada setiap iterasi bootstrap. Dengan demikian, hasil estimasi tetap konsisten untuk keperluan analisis lanjutan.

Proses bootstrap dilakukan sebanyak $B = 500$ replikasi. Pemilihan jumlah replikasi ini didasarkan pada pertimbangan keseimbangan antara stabilitas estimasi dan efisiensi komputasi, serta didukung oleh studi sebelumnya yang menunjukkan bahwa jumlah bootstrap antara 200 hingga 1000 umumnya telah memadai untuk memperoleh estimasi yang stabil (Efron & Tibshirani, 1993; Davison & Hinkley, 1997). Prosedur bootstrap dalam penelitian ini

dilakukan secara berulang melalui tahapan resampling, estimasi model, dan penyimpanan parameter hasil estimasi pada setiap iterasi. Melalui proses ini diperoleh distribusi empiris parameter dalam bentuk:

$$\{\hat{\beta}_{jp}^{(1)}, \hat{\beta}_{jp}^{(2)}, \dots, \hat{\beta}_{jp}^{(B)}\}$$

Distribusi empiris tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam melakukan inferensi statistik terhadap parameter lokal, termasuk dalam pembentukan interval kepercayaan serta evaluasi kestabilan parameter pada setiap lokasi.

D. Evaluasi Parameter

Evaluasi parameter dalam penelitian ini dilakukan berdasarkan distribusi empiris parameter yang diperoleh melalui prosedur bootstrap. Distribusi tersebut mencerminkan variasi estimasi parameter akibat perubahan sampel, sehingga memungkinkan penilaian parameter secara lebih komprehensif tanpa bergantung pada asumsi distribusi tertentu, erta memberikan gambaran mengenai ketidakpastian estimasi pada model dengan kompleksitas tinggi (Efron & Tibshirani, 1993; Davison & Hinkley, 1997; Efron, 2014). Dengan menggunakan distribusi empiris ini, ketidakpastian parameter dapat dianalisis secara langsung, terutama pada model dengan kompleksitas tinggi seperti HGWR yang menghasilkan parameter yang bervariasi secara spasial.

Evaluasi parameter dilakukan terhadap dua aspek utama, yaitu signifikansi statistik dan kestabilan parameter, yang digunakan secara komplementer dalam menilai keandalan parameter lokal. Signifikansi parameter dievaluasi menggunakan interval kepercayaan dan nilai-p berbasis bootstrap. Interval kepercayaan dihitung menggunakan metode persentil (Efron & Tibshirani, 1993), yaitu:

$$CI_{95\%} = (\hat{\beta}_{2,5\%}^*, \hat{\beta}_{97,5\%}^*) \quad (3)$$

Parameter dinyatakan signifikan apabila interval kepercayaan tidak memuat nol. Selain itu, nilai-p dihitung secara empiris dengan membandingkan distribusi parameter hasil bootstrap terhadap estimasi parameter pada data asli (Davison & Hinkley, 1997), yaitu:

$$p = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B I(|\hat{\beta}^{*(b)}| \geq |\hat{\beta}|) \quad (4)$$

Pendekatan ini memungkinkan pengujian signifikansi tanpa bergantung pada asumsi distribusi tertentu, serta memberikan ukuran inferensi yang lebih fleksibel dibandingkan pendekatan parametrik.

Selain signifikansi statistik, kestabilan parameter dievaluasi menggunakan ukuran *sign consistency* (SC), yang digunakan sebagai indikator tambahan dalam menilai keandalan parameter lokal. Ukuran ini didasarkan pada hasil bootstrap dan mencerminkan konsistensi arah pengaruh parameter terhadap variasi sampel. Pendekatan ini sejalan dengan pandangan bahwa evaluasi parameter tidak hanya didasarkan pada signifikansi statistik, tetapi juga pada kestabilan estimasi terhadap variasi data, yang menjadi indikator penting dalam menilai keandalan hasil inferensi (Efron & Tibshirani, 1993; Meinshausen & Bühlmann, 2010; Leamer, 1985).

Secara matematis, SC didefinisikan sebagai proporsi kemunculan tanda parameter yang konsisten pada seluruh replikasi bootstrap, yaitu:

$$C = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B I(\hat{\beta}^{*(b)} > 0) \quad (5)$$

atau secara analog untuk tanda negatif. Nilai SC berada pada rentang 0 hingga 1, di mana nilai yang mendekati 1 atau 0 menunjukkan arah pengaruh yang stabil, sedangkan nilai mendekati 0,5 menunjukkan ketidakstabilan arah parameter. Dengan demikian, ukuran ini memberikan informasi tambahan mengenai kestabilan arah parameter yang tidak tercakup dalam pengujian signifikansi berbasis interval kepercayaan.

Dalam penelitian ini, parameter dikategorikan memiliki kestabilan arah yang kuat apabila nilai $SC \geq 0,8$. Ambang batas ini tidak diperlakukan sebagai aturan baku universal, tetapi sebagai kriteria operasional untuk menunjukkan bahwa arah pengaruh parameter muncul secara dominan pada sebagian besar replikasi bootstrap. Penetapan kriteria tersebut mengacu pada prinsip stabilitas berbasis probabilitas tinggi dalam analisis resampling dan *stability selection*, yang menilai keandalan hasil berdasarkan konsistensi kemunculan pola pada subsampel atau replikasi data (Meinshausen & Bühlmann, 2010). Dengan mengombinasikan ukuran ini dan evaluasi signifikansi statistik, keandalan parameter lokal dapat dinilai secara lebih komprehensif.

E. Tahapan Analisis Data

Tahapan analisis data dalam penelitian ini dilakukan secara sistematis untuk mengestimasi model HGWR serta mengevaluasi keandalan parameter lokal yang dihasilkan. Adapun tahapan analisis yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Melakukan eksplorasi data awal untuk memahami karakteristik variabel serta mengidentifikasi adanya pola spasial menggunakan indeks Moran's I dan analisis *Local Indicators of Spatial Association* (LISA) (Moran, 1950; Anselin, 1995).
2. Mengestimasi model HGWR menggunakan data asli untuk memperoleh penduga parameter awal.
3. Melakukan prosedur bootstrap dengan pengambilan sampel ulang sebanyak B replikasi untuk memperoleh distribusi empiris parameter pada setiap lokasi.
4. Mengestimasi ulang model HGWR pada setiap sampel bootstrap untuk memperoleh distribusi empiris parameter.
5. Menghitung interval kepercayaan dan nilai- p berbasis bootstrap untuk mengevaluasi signifikansi parameter lokal.
6. Menghitung nilai *sign consistency* (SC) untuk menilai kestabilan arah parameter berdasarkan hasil bootstrap.
7. Menginterpretasikan hasil estimasi parameter dengan mempertimbangkan signifikansi statistik dan kestabilan parameter secara simultan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian hasil dan pembahasan ini menyajikan temuan penelitian secara bertahap untuk memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai karakteristik data dan hasil pemodelan. Pembahasan diawali dengan analisis eksplorasi spasial untuk mengidentifikasi pola awal dalam data, kemudian dilanjutkan dengan hasil estimasi model HGWR, serta evaluasi parameter berdasarkan pendekatan bootstrap dan sign consistency. Penyajian ini bertujuan untuk mengaitkan temuan empiris dengan kerangka metodologis yang digunakan, sehingga interpretasi hasil dapat dilakukan secara lebih sistematis dan mendalam.

A. Eksplorasi Awal

Analisis eksplorasi awal dilakukan untuk mengidentifikasi pola spasial pada prevalensi stunting antar provinsi di Indonesia sebelum dilakukan pemodelan menggunakan HGWR. Tahap ini tidak hanya bertujuan untuk mendeteksi keberadaan autokorelasi spasial, tetapi juga untuk memahami karakteristik distribusi data secara geografis serta potensi pengelompokan wilayah dengan kondisi yang serupa. Informasi ini menjadi penting dalam menentukan relevansi penggunaan pendekatan berbasis spasial, khususnya dalam model yang memungkinkan variasi parameter antar wilayah. Selain itu, hasil eksplorasi ini memberikan gambaran awal mengenai heterogenitas spasial yang dapat memengaruhi stabilitas dan interpretasi parameter lokal dalam model yang digunakan.

Hasil pengujian menggunakan indeks Moran's I menunjukkan adanya autokorelasi spasial positif yang signifikan ($I = 0,394$; $p - value < 0,001$), yang mengindikasikan bahwa provinsi dengan tingkat prevalensi stunting yang serupa cenderung berlokasi berdekatan secara geografis. Temuan ini diperkuat melalui uji permutasi *Monte Carlo* dengan 999 replikasi yang menghasilkan nilai signifikansi yang konsisten, sehingga memperkuat bukti bahwa pola yang terbentuk tidak terjadi secara acak. Dengan demikian, distribusi prevalensi stunting di Indonesia menunjukkan adanya ketergantungan spasial yang perlu diperhitungkan dalam pemodelan.

Analisis LISA selanjutnya mengidentifikasi adanya kluster spasial lokal yang signifikan pada tingkat provinsi. Kluster *High-High* (HH) ditemukan terutama di wilayah Indonesia bagian timur, seperti Nusa Tenggara dan Papua, yang menunjukkan wilayah dengan prevalensi stunting tinggi yang dikelilingi oleh wilayah dengan kondisi serupa. Sebaliknya, kluster *Low-Low* (LL) banyak ditemukan di Pulau Jawa dan sebagian Sumatera, yang mencerminkan wilayah dengan prevalensi stunting rendah dan kondisi yang relatif lebih baik. Selain itu, kluster *High-Low* (HL) dan *Low-High* (LH) sebagai *outlier* spasial juga teridentifikasi pada wilayah transisi seperti Kalimantan dan Sulawesi, yang menunjukkan adanya ketidaksesuaian pola dengan wilayah sekitarnya.



Gambar 1. Peta kluster LISA prevalensi stunting antar provinsi di Indonesia

Pola pengelompokan spasial yang ditunjukkan pada Gambar 1 mengonfirmasi bahwa prevalensi stunting di Indonesia memiliki ketergantungan spasial yang kuat pada tingkat provinsi. Temuan ini memberikan dasar empiris yang kuat untuk penggunaan model HGWR, yang mampu mengakomodasi variasi spasial sekaligus mempertimbangkan struktur hierarkis dalam data. Selain itu, keberadaan kluster spasial ini menunjukkan bahwa interpretasi parameter lokal menjadi penting untuk memahami perbedaan pengaruh faktor-faktor penentu stunting antar wilayah secara lebih mendalam.

B. Hasil Estimasi Model HGWR

Estimasi model HGWR dilakukan untuk menganalisis pengaruh variabel penjelas terhadap prevalensi stunting di Indonesia dengan mempertimbangkan struktur hierarkis dan variasi spasial antar wilayah. Model ini menghasilkan parameter global yang merepresentasikan pengaruh umum variabel penjelas, serta parameter lokal yang memungkinkan adanya variasi pengaruh antar provinsi. Hasil estimasi ini memberikan gambaran awal mengenai arah hubungan antar variabel serta indikasi heterogenitas spasial dalam data.

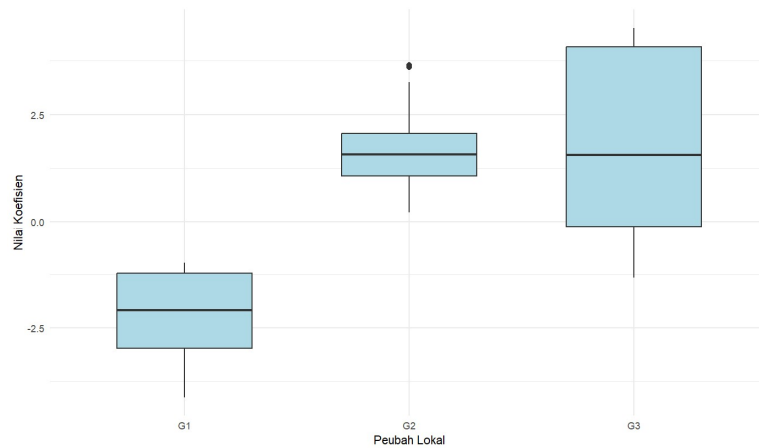
Ringkasan hasil estimasi parameter global disajikan pada Tabel 1. Secara umum, variabel X_1 menunjukkan arah pengaruh positif terhadap prevalensi stunting, sedangkan variabel X_2, X_3, X_4 dan X_5 menunjukkan arah pengaruh negatif. Nilai koefisien yang diperoleh mencerminkan kecenderungan hubungan antar variabel dalam model, namun interpretasi inferensial tidak didasarkan pada hasil estimasi ini, melainkan pada pendekatan bootstrap yang dibahas pada bagian selanjutnya.

Tabel 1. Hasil Estimasi Parameter Global Model HGWR

Parameter	Koefisien
Intercept	23.466
X1 (Penduduk Miskin)	0.41
X2 (Rata-rata Lama Sekolah)	-1.347
X3 (Imunisasi Dasar)	-0.389
X4 (Sanitasi Layak)	-1.306
X5 (Air Minum Layak)	-0.328

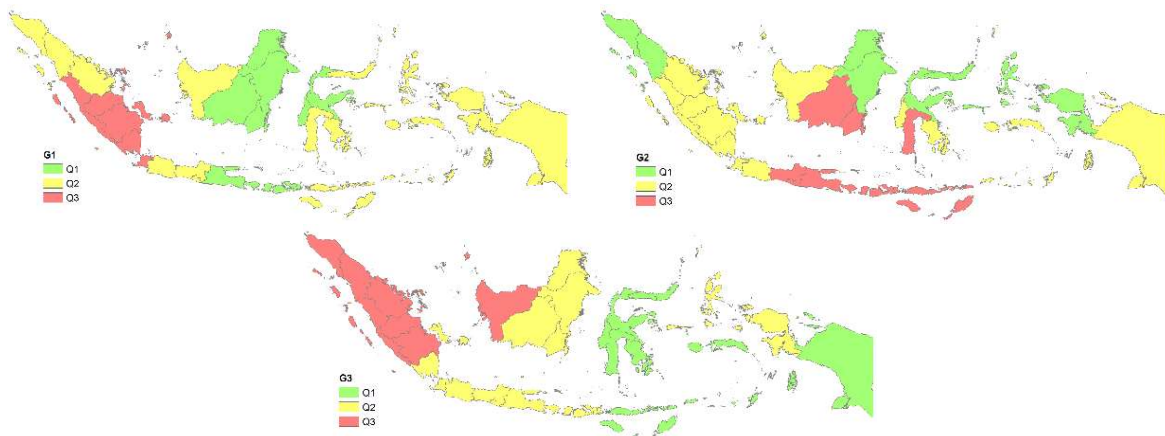
Selain parameter global, model HGWR menghasilkan parameter lokal yang bervariasi antar wilayah. Variasi tersebut divisualisasikan melalui boxplot koefisien lokal untuk variabel G_1, G_2 dan G_3 sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2, serta peta distribusi koefisien lokal pada masing-masing provinsi. Visualisasi ini menunjukkan bahwa distribusi parameter tidak homogen, dengan tingkat penyebaran yang berbeda antar variabel.

Variabel G_3 menunjukkan tingkat variasi yang relatif lebih tinggi dibandingkan variabel lainnya, yang mengindikasikan bahwa pengaruhnya terhadap prevalensi stunting sangat bergantung pada karakteristik wilayah. Sebaliknya, variabel G_1 dan G_2 menunjukkan variasi yang lebih terkendali, meskipun tetap mencerminkan adanya heterogenitas antar provinsi. Perbedaan tingkat variasi ini menunjukkan bahwa tidak semua variabel memiliki tingkat sensitivitas yang sama terhadap perubahan kondisi spasial.



Gambar 2. Boxplot Koefisien Lokal G_1 , G_2 dan G_3

Distribusi spasial parameter lokal selanjutnya disajikan dalam bentuk peta untuk masing-masing variabel. Peta ini menggambarkan sebaran nilai koefisien lokal berdasarkan klasifikasi kuartil, sehingga memungkinkan identifikasi wilayah dengan pengaruh relatif rendah hingga tinggi. Pola yang dihasilkan menunjukkan bahwa variasi parameter tidak hanya terjadi antar provinsi, tetapi juga membentuk pola spasial tertentu yang mencerminkan perbedaan karakteristik wilayah sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Peta Koefisien Lokal Model HGWR

C. Evaluasi Parameter Berdasarkan Bootstrap dan *Sign Consistency*

Evaluasi parameter dalam model HGWR dilakukan dengan menggabungkan dua pendekatan, yaitu signifikansi statistik berbasis bootstrap dan kestabilan arah pengaruh menggunakan ukuran *sign consistency* (SC). Pendekatan ini digunakan untuk memberikan penilaian yang lebih komprehensif terhadap keandalan parameter, mengingat signifikansi statistik saja belum cukup untuk menggambarkan konsistensi estimasi pada model yang bersifat spasial dan hierarkis. Dengan demikian, interpretasi parameter dalam penelitian ini didasarkan pada kombinasi kedua aspek tersebut secara simultan.

Prosedur bootstrap dilakukan menggunakan teknik cluster bootstrap pada level provinsi dengan jumlah replikasi sebanyak $B = 500$. Pada setiap iterasi, sampel bootstrap digunakan untuk mengestimasi ulang model HGWR sehingga diperoleh distribusi empiris parameter global dan lokal. Distribusi ini selanjutnya digunakan untuk menghitung interval kepercayaan sebagai dasar evaluasi signifikansi parameter.

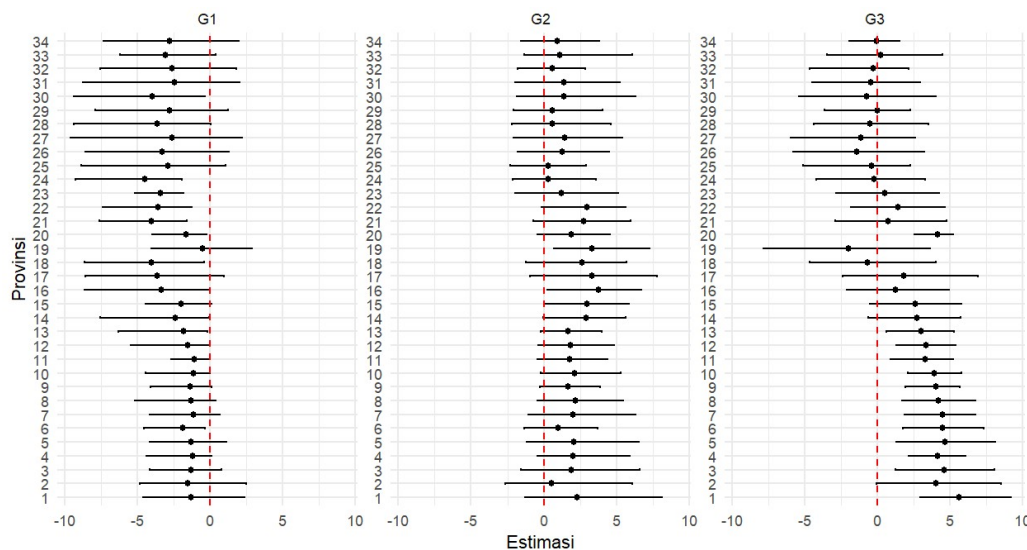
Hasil interval kepercayaan bootstrap untuk parameter global disajikan pada Tabel 2. Berdasarkan tabel tersebut, variabel X_2 dan X_4 menunjukkan interval kepercayaan yang tidak memuat nol, sehingga dapat dinyatakan signifikan

secara statistik dengan arah pengaruh negatif. Sementara itu, variabel X_1, X_3 dan X_5 memiliki interval kepercayaan yang mencakup nol, yang menunjukkan bahwa pengaruhnya tidak signifikan pada tingkat global. Hasil ini menunjukkan bahwa tidak semua variabel memiliki pengaruh yang konsisten, meskipun arah koefisien pada estimasi awal menunjukkan kecenderungan tertentu.

Tabel 2. Interval Kepercayaan Bootstrap Parameter Global

Parameter	Mean	SD	CI 95% Bawah	CI 95% Atas
Intercept	23.466	1.208	20.956	25.571
X1	0.41	0.346	-0.295	1.045
X2	-1.347	0.328	-1.996	-0.683
X3	-0.389	0.277	-0.908	0.149
X4	-1.306	0.249	-1.763	-0.828
X5	-0.328	0.301	-0.883	0.288

Evaluasi signifikansi parameter lokal dilakukan untuk mengidentifikasi variasi antar wilayah, yang divisualisasikan melalui interval kepercayaan bootstrap pada setiap provinsi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4. Visualisasi tersebut menunjukkan bahwa signifikansi parameter tidak bersifat homogen, di mana suatu variabel dapat signifikan pada wilayah tertentu namun tidak pada wilayah lainnya. Pola ini mengindikasikan adanya heterogenitas spasial dalam hubungan antar variabel, yang tidak dapat ditangkap oleh pendekatan global.



Gambar 4. Interval Kepercayaan Parameter Lokal (Bootstrap)

Selain signifikansi statistik, kestabilan parameter dievaluasi menggunakan ukuran SC, yaitu proporsi kemunculan tanda koefisien positif pada seluruh replikasi bootstrap. Ringkasan nilai SC untuk setiap parameter lokal disajikan pada Tabel 3. Ukuran ini digunakan untuk menilai konsistensi arah pengaruh parameter terhadap variasi data, sehingga memberikan informasi tambahan yang tidak tercermin dalam interval kepercayaan.

Tabel 3. Ringkasan Sign Consistency Parameter Lokal

Parameter Lokal	Mean SC	Min SC	Max SC
G1	0,074	0,000	0,401
G2	0,839	0,526	1,000
G3	0,725	0,164	1,000

Berdasarkan Tabel 3, parameter G_2 menunjukkan dominansi arah pengaruh positif yang kuat pada sebagian besar provinsi, sedangkan parameter G_1 menunjukkan dominansi arah negatif yang relatif konsisten. Parameter G_3

menunjukkan variasi yang lebih tinggi antar wilayah, yang mengindikasikan bahwa arah pengaruhnya tidak sepenuhnya stabil secara spasial. Hasil ini menunjukkan bahwa signifikansi statistik dan kestabilan parameter tidak selalu sejalan, sehingga evaluasi parameter dalam model HGWR perlu mempertimbangkan kedua aspek tersebut secara bersamaan.

Temuan ini menunjukkan bahwa pendekatan bootstrap tidak hanya memberikan ukuran signifikansi yang lebih andal, tetapi juga memungkinkan identifikasi variasi signifikansi antar wilayah yang tidak dapat ditangkap melalui pendekatan global. Dengan demikian, hasil evaluasi ini memberikan dasar yang lebih kuat untuk analisis lanjutan terkait kestabilan parameter menggunakan ukuran *sign consistency*.

D. Evaluasi Keandalan Parameter HGWR

Evaluasi keandalan parameter dalam model HGWR dilakukan dengan mengintegrasikan hasil signifikansi statistik berbasis bootstrap dan kestabilan arah pengaruh menggunakan ukuran SC. Pendekatan ini memungkinkan penilaian parameter tidak hanya berdasarkan keberartian statistik, tetapi juga berdasarkan konsistensi estimasi terhadap variasi data. Dengan demikian, parameter yang dihasilkan dapat dievaluasi secara lebih komprehensif dalam konteks model yang bersifat spasial dan hierarkis.

Hasil analisis menunjukkan bahwa parameter dalam model HGWR dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori berdasarkan kombinasi signifikansi statistik dan kestabilan arah pengaruh. Parameter yang signifikan secara statistik dan memiliki nilai SC tinggi menunjukkan pengaruh yang tidak hanya kuat secara empiris, tetapi juga stabil terhadap variasi data. Dalam penelitian ini, parameter X_2, X_4 , serta sebagian parameter lokal seperti G_2 , termasuk dalam kategori ini, sehingga dapat dianggap memiliki keandalan yang tinggi dalam menjelaskan variasi prevalensi stunting.

Sebaliknya, terdapat parameter yang tidak signifikan secara statistik namun menunjukkan kecenderungan arah pengaruh yang relatif konsisten, seperti yang ditunjukkan oleh nilai SC yang tinggi pada beberapa wilayah. Kondisi ini mengindikasikan bahwa meskipun pengaruh parameter tidak cukup kuat untuk dinyatakan signifikan, arah hubungannya tetap stabil terhadap variasi data. Selain itu, terdapat pula parameter yang signifikan secara statistik namun memiliki nilai SC yang bervariasi antar wilayah, yang menunjukkan bahwa arah pengaruhnya tidak sepenuhnya konsisten secara spasial.

Temuan ini menunjukkan bahwa signifikansi statistik dan kestabilan parameter merupakan dua aspek yang saling melengkapi dalam mengevaluasi keandalan parameter model HGWR. Pendekatan yang hanya mengandalkan signifikansi statistik berpotensi mengabaikan ketidakstabilan arah pengaruh, sementara pendekatan yang hanya mempertimbangkan konsistensi arah tidak memberikan informasi mengenai kekuatan pengaruh secara empiris. Oleh karena itu, integrasi kedua ukuran ini memberikan kerangka evaluasi yang lebih komprehensif dalam memahami karakteristik parameter pada model HGWR.

Temuan ini melengkapi studi Hu et al. (2022, 2023, 2024) yang lebih menekankan pengembangan dan estimasi model HGWR untuk data spasial-hierarkis, serta memberikan pendalaman terhadap temuan Sari et al. (2025) yang menunjukkan keunggulan HGWR dalam pemodelan prevalensi stunting. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa tidak semua parameter dalam model HGWR memiliki tingkat keandalan yang sama. Parameter global tertentu menunjukkan pengaruh yang signifikan dan stabil, sementara parameter lokal memperlihatkan variasi baik dalam hal signifikansi maupun kestabilan arah pengaruh. Dengan demikian, interpretasi hasil model HGWR perlu dilakukan secara hati-hati dengan mempertimbangkan kedua aspek tersebut, sehingga dapat memberikan pemahaman yang lebih akurat mengenai faktor-faktor yang memengaruhi prevalensi stunting di Indonesia.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa model HGWR mampu mengakomodasi heterogenitas spasial dan struktur hierarkis dalam menganalisis prevalensi stunting di Indonesia, sehingga menghasilkan parameter yang bervariasi antar wilayah. Hasil estimasi awal mengindikasikan bahwa tidak semua variabel memiliki pengaruh yang konsisten, sehingga interpretasi parameter tidak dapat hanya didasarkan pada nilai estimasi tunggal. Hal ini menegaskan bahwa pendekatan global belum cukup untuk menggambarkan kompleksitas hubungan pada data spasial yang bersifat heterogen.

Evaluasi parameter menggunakan pendekatan bootstrap memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai ketidakpastian estimasi, di mana signifikansi parameter bervariasi baik antar variabel maupun antar wilayah. Selain itu, ukuran *sign consistency* (SC) menunjukkan bahwa parameter yang signifikan secara statistik tidak selalu memiliki arah pengaruh yang stabil, sementara beberapa parameter yang tidak signifikan justru menunjukkan konsistensi arah yang relatif tinggi. Temuan ini menegaskan bahwa signifikansi statistik dan kestabilan parameter merupakan dua aspek yang saling melengkapi dalam menilai keandalan parameter model HGWR.

Secara keseluruhan, integrasi pendekatan bootstrap dan sign consistency memberikan kerangka evaluasi yang lebih komprehensif dalam meningkatkan keandalan interpretasi parameter pada model HGWR. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi parameter yang tidak hanya signifikan secara statistik, tetapi juga stabil terhadap variasi data, sehingga lebih relevan dalam analisis berbasis wilayah. Untuk penelitian selanjutnya, pengembangan metode dapat diarahkan pada perluasan model yang mampu menangkap hubungan yang lebih kompleks, termasuk kemungkinan adanya pola nonlinier dan dependensi lintas level, serta pengujian pada berbagai kasus empiris untuk menilai konsistensi dan generalisasi pendekatan yang diusulkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Anselin, L. (1995). Local indicators of spatial association—LISA. *Geographical Analysis*, 27(2), 93–115. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>
- Brunsdon, C., Fotheringham, A. S., & Charlton, M. (1999). Some notes on parametric significance tests for geographically weighted regression. *Journal of Regional Science*, 39(3), 497–524.
- Davison, A. C., & Hinkley, D. V. (1997). *Bootstrap methods and their application*. Cambridge University Press.
- Efron, B., & Tibshirani, R. J. (1993). *An introduction to the bootstrap*. Chapman & Hall.
- Efron, B. (2014). Estimation and accuracy after model selection. *Journal of the American Statistical Association*, 109(507), 991–1007. <https://doi.org/10.1080/01621459.2013.823775>
- Fotheringham, A. S., Brunsdon, C., & Charlton, M. (2002). *Geographically weighted regression: The analysis of spatially varying relationships*. Wiley.
- Hu, Y., Lu, B., Ge, Y., & Dong, G. (2022). Uncovering spatial heterogeneity in real estate prices via combined hierarchical linear model and geographically weighted regression. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 49(6), 1715–1740. <https://doi.org/10.1177/23998083211063885>
- Hu, Y., Harris, R., Timmerman, R., & Lu, B. (2023). A Hierarchical and Geographically Weighted Regression Model and Its Backfitting Maximum Likelihood Estimator. *12th International Conference on Geographic Information Science (GIScience 2023)*, 39: 1-39: 6. Schloss Dagstuhl–Leibniz-Zentrum für Informatik. <https://doi.org/10.4230/LIPIcs.GIScience.2023.39>
- Hu, Y., Harris, R., Timmerman, R., & Lu, B. (2024). A backfitting maximum likelihood estimator for hierarchical and geographically weighted regression modelling. *International Journal of Geographical Information Science*, 38(12), 2458–2491. <https://doi.org/10.1080/13658816.2024.2391412>
- Leamer, E. E. (1985). Sensitivity analyses would help. *The American Economic Review*, 75(3), 308–313.
- Meinshausen, N., & Bühlmann, P. (2010). Stability selection. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*, 72(4), 417–473. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9868.2010.00740.x>
- Moran, P. A. P. (1950). Notes on continuous stochastic phenomena. *Biometrika*, 37(1–2), 17–23. <https://doi.org/10.2307/2332142>
- Sari, F. M., Aidi, M. N., Soleh, A. M., Afendi, F. M. (2025) A comparative study of GWR, HLM, and HGWR for modeling childhood stunting in Indonesia, *Communications in Mathematical Biology and Neuroscience*, 2025 (2025), Article ID 94. <https://doi.org/10.28919/cmbn/9345>
- Septemberini, C., Aidi, M. N., & Kurnia, A. (2024). Modeling poverty data in Indonesia with spatial hierarchy structure using HLM, GWR, and HGWR methods. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*, 11, 260–271. <https://doi.org/10.32628/IJSRSET2411126>