

PEMODELAN MIXED GEOGRAPHICALLY WEIGHTED REGRESSION DENGAN KERNEL ADAPTIVE BISQUARE PADA ANGKA KEMATIAN BALITA DI INDONESIA**Laura Christin Wunarso**Program Studi Statistika, FMIPA, Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia
email: laurachristin24@gmail.com**Sitti Sahrman**Program Studi Statistika, FMIPA, Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia
email: sittisahrman@gmail.com***Nasrah Sirajang**Program Studi Statistika, FMIPA, Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia
email: nas.sirajang@gmail.com**Zhulmuhsith Busrah**Program Studi Statistika, FMIPA, Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia
email: busrahzhulmuhsith@gmail.com**Girbsan Ananta Patabang**Program Studi Statistika, FMIPA, Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia
email: gribanananta@gmail.com**Abstrak**

Angka Kematian Balita (AKB) merupakan indikator utama yang mencerminkan kualitas sistem kesehatan serta tingkat kesejahteraan masyarakat. Variasi kondisi demografis, sosial, dan lingkungan menyebabkan pola AKB berbeda antarwilayah sehingga analisis yang mempertimbangkan aspek spasial menjadi penting. Penelitian ini bertujuan menganalisis faktor-faktor yang memengaruhi AKB dengan menggunakan *Mixed Geographically Weighted Regression* (MGWR). Data yang digunakan mencakup 34 provinsi di Indonesia pada tahun 2020. Variabel dependen dalam penelitian ini adalah AKB, sedangkan variabel independen terdiri atas rata-rata lama sekolah, persentase perempuan pernah kawin usia 15–49 tahun yang melahirkan anak pertama sebelum usia 20 tahun, persentase rumah tangga yang menggunakan bahan bakar utama arang atau kayu untuk memasak, serta persentase penduduk miskin. Pemilihan *bandwidth* optimum menghasilkan kernel *adaptive bisquare* yang digunakan dalam pembentukan model MGWR. Hasil analisis menunjukkan bahwa rata-rata lama sekolah dan penggunaan bahan bakar kayu atau arang berperan sebagai parameter global yang berpengaruh signifikan terhadap AKB. Sementara itu, persentase perempuan yang melahirkan sebelum usia 20 tahun dan persentase penduduk miskin bertindak sebagai parameter lokal dengan tingkat pengaruh berbeda antarprovinsi. Perbandingan nilai AICc dan R-Squared mengindikasikan MGWR memiliki performa terbaik (AICc = 191.82; R-Squared = 0.91), dibandingkan dengan Regresi Linear Berganda (AICc = 212.80; R-Squared = 0.76) dan GWR (AICc = 197.90; R-Squared = 0.91). Temuan ini menegaskan bahwa pendekatan spasial memberikan pemahaman lebih komprehensif mengenai determinan AKB dan dapat menjadi dasar dalam merumuskan intervensi kesehatan yang lebih tepat sasaran sesuai karakteristik wilayah.

Kata Kunci: Angka Kematian Bayi, Kernel *Adaptive Bisquare*, *Mixed Geographically Weighted Regression*, Heterogenitas Spasial

Abstract

Under-Five Mortality Rate (U5MR) is a key indicator reflecting the quality of a health system and the level of community well-being. Variations in demographic, social, and environmental conditions cause U5MR patterns to differ across regions, making spatial analysis essential. This study aims to analyze the factors influencing U5MR using Mixed Geographically Weighted Regression (MGWR). The data used covers 34 provinces in Indonesia in 2020. The dependent variable is U5MR, while the independent variables include average length of schooling, percentage of ever-married women aged 15–49 who gave birth to their first child before age 20, percentage of households using charcoal or wood as primary fuel for cooking, and poverty rate. Optimal bandwidth selection resulted in the adaptive bisquare kernel, which was used in the MGWR model formation. The analysis shows that average length of schooling and the use of charcoal or

wood fuel act as global parameters that significantly affect U5MR. Meanwhile, the percentage of women giving birth before age 20 and the poverty rate act as local parameters, with varying levels of influence across provinces. A comparison of AICc and R-Squared values indicates that MGWR has the best performance (AICc = 191.82; R-Squared = 0.91), compared to Multiple Linear Regression (AICc = 212.80; R-Squared = 0.76) and GWR (AICc = 197.90; R-Squared = 0.91). This finding affirms that the spatial approach provides a more comprehensive understanding of U5MR determinants and can serve as a basis for formulating more targeted health interventions tailored to regional characteristics.

Keywords: Adaptive Bisquare Kernel, Mixed Geographically Weighted, Spatial Heterogeneity, The Under-Five Mortality Rate

PENDAHULUAN

Fenomena sosial dan kesehatan masyarakat di Indonesia sering kali menunjukkan adanya *spatial dependence* dan *spatial heterogeneity*, yaitu kondisi di mana hubungan antara variabel tidak bersifat seragam antarwilayah. Model regresi global seperti Regresi Linier Berganda (RLB), yang mengasumsikan parameter konstan di seluruh wilayah pengamatan, menjadi kurang memadai dalam menjelaskan fenomena yang sangat dipengaruhi konteks geografis. Untuk menjembatani keterbatasan tersebut, *Geographically Weighted Regression* (GWR) dikembangkan dengan memungkinkan parameter regresi bervariasi menurut lokasi, sehingga lebih sensitif terhadap perbedaan karakteristik wilayah. Meskipun demikian, GWR mengasumsikan bahwa seluruh variabel memiliki efek spasial yang bervariasi, padahal dalam banyak kasus beberapa variabel memiliki pengaruh yang stabil secara global. Hal inilah yang mendasari pengembangan *Mixed Geographically Weighted Regression* (MGWR), yaitu model multiskala yang memberikan bandwidth berbeda untuk setiap variabel sehingga mampu membedakan variabel global dan variabel lokal secara lebih tepat. MGWR memiliki fleksibilitas metodologis yang lebih tinggi dan sering kali memberikan representasi yang lebih akurat terhadap fenomena keruangan yang kompleks.

Kajian mengenai model spasial untuk fenomena kesehatan dan demografi menunjukkan perkembangan yang signifikan. Berbagai penelitian terdahulu menegaskan bahwa ketidakstasioneran spasial merupakan karakteristik umum pada data mortalitas, kesehatan ibu dan anak, serta indikator kesejahteraan wilayah. Penelitian Nisa dkk. (2022) menemukan bahwa regresi global tidak mampu menangkap variasi spasial pada Angka Harapan Hidup di Jawa Tengah. Hasil serupa dilaporkan oleh Primasari dkk., (2023) yang menunjukkan bahwa MGWR memberikan kinerja model yang lebih baik daripada GWR dalam pemodelan kematian bayi neonatal. Sementara itu, menekankan bahwa ketimpangan distribusi AKB antarprovinsi di Indonesia merefleksikan pengaruh spasial yang kuat

sehingga analisis non-spasial berpotensi menghasilkan estimasi yang bias. Di sisi lain, Mujiarti dkk. (2024) menegaskan pentingnya pemilihan fungsi pembobot adaptif dalam GWR karena distribusi data kesehatan di Indonesia cenderung tidak merata dan memerlukan penanganan spasial yang tepat.

Temuan-temuan tersebut selaras dengan penelitian terdahulu berbasis MGWR. Alya dkk. (2024) menunjukkan bahwa MGWR memberikan estimasi lebih akurat dan stabil dibandingkan GWR pada kasus kemiskinan di Jawa Tengah karena mampu menangkap variasi multiskala antarvariabel. Monalisa (2023) juga menemukan bahwa MGWR menghasilkan nilai AICc lebih rendah dalam pemodelan Angka Kematian Bayi (AKB) di Indonesia, yang berarti memiliki tingkat kesesuaian model lebih tinggi dibandingkan regresi global maupun GWR. Mendukung hal tersebut, Mumtaz dkk. (2025) menegaskan adanya ketergantungan spasial yang kuat pada indikator kesejahteraan sosial di Kalimantan sehingga penggunaan model global tidak mampu menggambarkan struktur variabilitas regional secara tepat. Selain itu, Ulfie Safitri & Amaliana (2021) menunjukkan bahwa penggunaan kernel adaptif meningkatkan akurasi GWR pada kasus kematian ibu di Jawa Timur, terutama pada wilayah dengan kepadatan observasi tidak merata. Berdasarkan perkembangan tersebut, MGWR menempati posisi sebagai pendekatan paling relevan dan unggul untuk menganalisis fenomena demografi dan kesehatan yang memiliki dinamika spasial kuat, termasuk AKB.

Di Indonesia, Angka Kematian Balita (AKB) merupakan salah satu indikator utama dalam menilai derajat kesehatan masyarakat dan kualitas pembangunan manusia. Perbedaan AKB yang cukup besar antarprovinsi menunjukkan bahwa ketimpangan dalam akses layanan kesehatan, kondisi sosial ekonomi, tingkat pendidikan, dan kualitas lingkungan masih menjadi masalah struktural yang belum terselesaikan. Provinsi-provinsi di Indonesia bagian timur cenderung memiliki AKB lebih tinggi dibandingkan wilayah barat, yang mencerminkan ketidakmerataan

pembangunan dan kesenjangan infrastruktur kesehatan. Meskipun berbagai kebijakan intervensi telah diterapkan, kesenjangan ini tetap persisten dan menandakan perlunya pendekatan analitis yang mampu mengungkap variasi spasial dari faktor-faktor determinan AKB secara lebih mendalam.

Melihat kecenderungan tersebut, penggunaan model regresi global dalam analisis AKB berpotensi menghasilkan kesimpulan yang kurang tepat karena mengabaikan dinamika lokal yang berpengaruh antarwilayah. Pendekatan berbasis Lokasi, seperti GWR memang mampu menangkap variasi lokal, tetapi tidak memberikan fleksibilitas untuk mengidentifikasi variabel mana yang perilakunya stabil dan mana yang dipengaruhi oleh kondisi keruangan. MGWR hadir sebagai pendekatan yang lebih komprehensif melalui kemampuan pemodelan multiskala sehingga memungkinkan analisis yang lebih presisi terhadap perbedaan pengaruh variabel antarwilayah. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis faktor-faktor yang memengaruhi AKB menggunakan metode MGWR. Hasil penelitian ini diharapkan mampu memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai disparitas AKB di Indonesia.

KAJIAN TEORI

Fenomena variasi Angka Kematian Balita (AKB) antarwilayah di Indonesia mencerminkan perbedaan mendasar dalam kondisi sosial ekonomi serta karakteristik demografis dan geografis yang menyebabkan hubungan antarvariabel tidak bersifat seragam. Pada konteks demikian, penerapan regresi linier klasik yang mengasumsikan parameter konstan secara global sering kali tidak memadai. Temuan (Alya dkk., 2024) menunjukkan bahwa fenomena kemiskinan di Jawa Tengah memiliki ketidakstasioneran spasial yang signifikan, sehingga regresi global tidak mampu menggambarkan variasi hubungan antarwilayah secara akurat. Fenomena ini sesuai dengan konsep *spatial heterogeneity*, yaitu kondisi di mana struktur hubungan antarvariabel berubah mengikuti lokasi, sehingga parameter yang sama tidak dapat mewakili seluruh wilayah observasi. Secara matematis, regresi linier berganda dinyatakan pada Persamaan (1) dan Persamaan (2).

$$y_i = \beta_0 + \sum_{k=1}^p \beta_k X_{ik} + \varepsilon_i \quad (1)$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (2)$$

dengan y_i menyatakan AKB pada provinsi ke- i , β_0 merupakan intercept, β_k adalah koefisien variabel

independen ke- k , X_{ik} adalah nilai variabel independen, dan ε_i adalah residual. Parameter model diestimasi melalui metode *Ordinary Least Squares* (OLS) yang ditunjukkan pada Persamaan (3).

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \quad (3)$$

Model ini mensyaratkan asumsi residual bersifat homoskedastis, tidak berkorelasi satu sama lain, serta tidak menunjukkan pola spasial. Namun, penelitian Mumtaz dkk. (2025) memperlihatkan bahwa pada kasus kemiskinan di Kalimantan, residual regresi global membentuk pola spasial yang signifikan sehingga menandakan adanya ketergantungan antarwilayah yang harus diperhitungkan dalam pemodelan. Untuk mengakomodasi ketidakstasioneran spasial, dikembangkan model *Geographically Weighted Regression* (GWR). Model ini memungkinkan setiap wilayah memiliki parameter regresi berbeda sehingga lebih sesuai untuk fenomena yang dipengaruhi oleh konteks lokal. Secara umum, model GWR dituliskan pada Persamaan (4).

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i) X_{ki} + \varepsilon_i \quad (4)$$

dengan estimasi parameter berdasarkan *Weighted Least Squares* (WLS) yang ditunjukkan pada Persamaan (5).

$$\hat{\boldsymbol{\beta}}(u_i, v_i) = (\mathbf{X}^T \mathbf{W}_i \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{W}_i \mathbf{Y} \quad (5)$$

Nilai matriks bobot \mathbf{W}_i merepresentasikan tingkat kedekatan spasial antarwilayah.

Bobot yang semakin kecil untuk wilayah yang lebih jauh didasarkan pada konsep *distance decay*, yaitu penurunan pengaruh antarwilayah seiring meningkatnya jarak. Penelitian oleh Ulfie Safitri & Amaliana, (2021) menunjukkan bahwa *adaptive bisquare kernel* memberikan hasil yang lebih akurat pada kasus kematian ibu di Jawa Timur, terutama pada wilayah dengan kepadatan data tidak seragam. Bobot adaptif didefinisikan pada Persamaan (6).

$$w_{ij} = \left(1 - \left(\frac{d_{ij}}{b_i} \right)^2 \right)^2, d_{ij} < b_i \quad (6)$$

Bandwidth b_i berperan penting dalam menentukan luas cakupan pengaruh wilayah sekitar. *Bandwidth* kecil menghasilkan model yang sangat lokal, sedangkan *bandwidth* besar mendekati regresi global. Seleksi *bandwidth* dilakukan melalui prosedur *Cross-Validation* (CV) yang ditunjukkan pada Persamaan (7).

$$CV(b) = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_{-i}(b))^2 \quad (7)$$

Walaupun GWR efektif untuk menangkap variasi lokal, model ini mengasumsikan seluruh variabel memiliki efek yang berbeda pada tiap wilayah. Dalam praktiknya, beberapa variabel dapat berpengaruh secara global, sedangkan variabel lainnya dipengaruhi oleh konteks lokal. Untuk mengatasi hal tersebut, dikembangkan *Mixed Geographically Weighted Regression* (MGWR) yang memberikan *bandwidth* berbeda pada tiap variabel sehingga dapat membedakan variabel global dan lokal. Model MGWR dapat dirumuskan pada Persamaan (8).

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k \in L} \beta_k(u_i, v_i) X_{ik} + \sum_{m \in G} \gamma_m X_{im} + \varepsilon_i \quad (8)$$

dengan γ_m adalah koefisien global untuk variabel independen ke- m yang termasuk dalam himpunan variabel global G . Estimator parameter ditunjukkan pada Persamaan (9).

$$\hat{\beta}_k(u_i, v_i; b_k) = (\mathbf{X}_k^T \mathbf{W}_{k,i} \mathbf{X}_k)^{-1} \mathbf{X}_k^T \mathbf{W}_{k,i} \mathbf{Y} \quad (9)$$

Penelitian Monalisa, 2023 menemukan bahwa pada pemodelan AKB, MGWR menghasilkan Akaike Information Criterion corrected (AICc) yang paling rendah dibandingkan regresi global maupun GWR sehingga menunjukkan kemampuan model dalam menangkap variasi spasial multiskala secara lebih akurat. Rumus AICc ditunjukkan pada Persamaan (10).

$$AICc = 2k - 2 \ln(L) + \frac{2k(k+1)}{n-k-1} \quad (10)$$

Keunggulan MGWR terutama berasal dari kemampuannya mengestimasi parameter dengan tingkat kelokalan yang berbeda untuk tiap variabel, sehingga model menjadi lebih fleksibel dan representatif dibandingkan model satu-skala seperti GWR. Secara keseluruhan, literatur dari keempat penelitian tersebut menunjukkan bahwa fenomena kesehatan masyarakat seperti AKB memiliki ketergantungan spasial dan heterogenitas antarwilayah yang signifikan. GWR mampu memberikan gambaran variasi lokal, sedangkan MGWR menawarkan fleksibilitas lebih besar melalui pemodelan multiskala sehingga memberikan hasil yang lebih representatif. Oleh karena itu, MGWR menjadi pendekatan yang paling sesuai untuk menganalisis fenomena AKB lintas provinsi di Indonesia.

METODE

Data dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh melalui *website* resmi Badan Pusat Statistik (<https://www.bps.go.id/id>) mencakup 34 provinsi di Indonesia pada tahun 2020. Variabel dependen yang digunakan adalah Angka Kematian Balita (Y). Sementara itu, variabel independen meliputi Rata-rata Lama Sekolah (X_1), Persentase Perempuan Pernah Kawin Usia 15–49 Tahun yang Melahirkan Anak Pertama sebelum Usia 20 Tahun (X_2), Persentase Rumah Tangga yang Menggunakan Bahan Bakar Utama Arang atau Kayu untuk Memasak (X_3), dan Persentase Penduduk Miskin (X_4). Seluruh data diselaraskan dalam satuan provinsi dan dipadukan dengan informasi koordinat geografis untuk kebutuhan pemodelan berbasis spasial. Metode penelitian mencakup beberapa tahap analisis sebagai berikut.

1. Melakukan analisis deskriptif untuk melihat karakteristik masing-masing variabel penelitian pada tingkat provinsi.
2. Melakukan pemodelan regresi linear berganda (RLB) seperti pada Persamaan (1).
3. Melakukan pengujian asumsi klasik pada model RLB meliputi uji normalitas residual menggunakan *Shapiro-Wilk*, uji multikolinearitas dengan nilai *Variance Inflation Factor* (VIF), dan uji homoskedastisitas melalui *Breusch-Pagan*. Apabila ditemukan pelanggaran asumsi homoskedastisitas atau indikasi adanya heterogenitas spasial, analisis akan dilanjutkan ke pemodelan *Geographically Weighted Regression* (GWR).
4. Melakukan pemodelan GWR yang ditunjukkan pada Persamaan (4) dengan *bandwidth* optimum ditentukan menggunakan kriteria *Akaike Information Criterion Corrected* (AICc) yang ditunjukkan Persamaan (10).

dengan $\beta_0(u_i, v_i)$ merupakan intercept pada wilayah ke- i dan $\beta_k(u_i, v_i)$ merupakan parameter variabel independen pada wilayah ke- i . Dalam hal ini, estimasi parameter dilakukan dengan metode *Weighted Least Square* menggunakan matriks bobot spasial $W(u_i, v_i)$. Penggunaan bobot tersebut membuat setiap koefisien regresi bergantung pada koordinat geografis masing-masing provinsi sehingga nilai parameter dapat berbeda di setiap lokasi.

5. Melakukan uji variasi koefisien lokal menggunakan statistik uji F_3 untuk menentukan pengaruh dari setiap variabel bersifat global atau lokal. Jika terdapat variabel yang bersifat global, maka model berlanjut ke metode *Mixed Geographically Weighted Regression* (MGWR).
6. Melakukan pemodelan MGWR yang ditunjukkan pada Persamaan (8).
7. Melakukan pengujian signifikansi koefisien global maupun lokal pada model MGWR, kemudian menginterpretasi hasil untuk memahami pengaruh AKB di setiap provinsi.
8. Melakukan validasi model terbaik dengan membandingkan nilai AICc dan *R-Squared* pada ketiga model yang telah dibentuk)

HASIL DAN PEMBAHASAN

ANALISIS DESKRIPTIF

Hasil penelitian diawali dengan analisis deskriptif yang memberikan gambaran awal mengenai karakteristik setiap variabel penelitian pada tingkat provinsi. Tahap ini membantu mengidentifikasi sebaran nilai, kecenderungan pusat data, serta potensi adanya variasi antarwilayah yang dapat berpengaruh terhadap hubungan spasial dalam model. Hasil analisis deskriptif selengkapnya ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Analisis Deskriptif Variabel Penelitian

Variabel	Mean	Sd	Min	Q1	Q3	Max
Y	23.58	9.29	12.0	18.1	29.0	49.0
X_1	9.082	0.83	6.96	8.50	9.65	11.2
X_2	27.15	6.61	12.7	23.5	32.5	38.2
X_3	16.29	16.2	0.03	8.05	17.7	70.9
X_4	10.81	5.41	4.45	6.72	13.0	26.8

Tabel 1 menunjukkan angka kematian balita (AKB) memiliki rata-rata 23.58 dengan variasi yang besar antarprovinsi, menunjukkan adanya ketimpangan kondisi kesehatan anak di Indonesia.

Variabel X_1 memiliki sebaran yang relatif sempit, menandakan tingkat pendidikan yang lebih homogen di sebagian besar provinsi. Berbeda dengan variabel X_2 menunjukkan penyebaran yang cukup besar sehingga perbedaan kelahiran pertama pada usia muda antarprovinsi mencolok. Variabel X_3 juga memiliki variasi yang besar, mencerminkan adanya provinsi dengan akses energi bersih yang baik dan provinsi lain yang masih sangat tertinggal. Selain itu, variabel X_4 turut menunjukkan adanya kesenjangan tingkat kesejahteraan ekonomi antarprovinsi yang masih belum merata. Adapun, persebaran spasial AKB dapat divisualisasikan melalui peta tematik pada Gambar 1.

Angka Kematian Bayi di Indonesia



Gambar 1. Peta Tematik AKB

Gambar 1 menunjukkan adanya pola persebaran spasial yang cukup kontras antarwilayah di Indonesia. Provinsi dengan AKB tertinggi berada di kawasan Indonesia Timur, khususnya Papua, Papua Barat, dan Maluku, yang menunjukkan masih besarnya tantangan dalam akses layanan kesehatan dan kondisi sosial ekonomi. Sebaliknya, AKB terendah tampak terkonsentrasi di Pulau Jawa, yaitu Jawa Tengah, Daerah Istimewa Yogyakarta, dan DKI Jakarta, yang umumnya memiliki fasilitas kesehatan lebih memadai serta kondisi sosial ekonomi yang lebih baik. Perbedaan ini menegaskan adanya ketimpangan spasial dalam kesehatan anak yang perlu diperhatikan. Namun, perbedaan yang ada tidak hanya bersifat geografis, tetapi juga berpotensi dipengaruhi oleh faktor sosial, ekonomi, dan lingkungan yang berbeda. Oleh karena itu, diperlukan analisis lebih lanjut untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang berperan signifikan dalam menjelaskan tinggi-rendahnya AKB di setiap provinsi.

REGRESI LINEAR BERGANDA

Pemodelan Regresi Linear Berganda (RLB) digunakan sebagai langkah awal untuk

mengidentifikasi pengaruh variabel-variabel independen terhadap AKB secara keseluruhan tanpa mempertimbangkan perbedaan lokasi. Model ini berfungsi sebagai pendekatan global yang mengasumsikan bahwa hubungan antara setiap variabel prediktor dan AKB adalah sama di seluruh provinsi. Melalui model RLB, diperoleh estimasi parameter awal yang menjadi acuan sebelum dilakukan evaluasi lebih lanjut terkait kemungkinan adanya variasi spasial. Hasil pemodelan RLB ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Estimasi Parameter RLB

Variabel	Koefisien	<i>p-value</i>
<i>Intercept</i>	-35.95	0.025
X_1	3.117	0.024
X_2	0.623	0.000
X_3	0.243	0.002
X_4	0.959	0.000

Tabel 2 menunjukkan bahwa seluruh variabel independen berpengaruh signifikan terhadap AKB pada taraf signifikansi 5%. Variabel yang memiliki pengaruh terbesar adalah persentase penduduk miskin dan persentase perempuan yang melahirkan sebelum usia 20 tahun. Selain itu, rata-rata lama sekolah dan penggunaan bahan bakar kayu atau arang berkontribusi dalam pembentukan model meskipun dengan pengaruh yang lebih kecil dibandingkan dua variabel lainnya. Setelah memperoleh model RLB, langkah selanjutnya adalah melakukan pengujian asumsi klasik untuk memastikan kelayakan model.

UJI ASUMSI KLASIK

Pengujian pertama dilakukan terhadap asumsi normalitas residual menggunakan uji *Shapiro-Wilk*. Hasil pengujian menunjukkan nilai $W = 0.948$ dengan *p-value* sebesar 0.888 sehingga residual dinyatakan berdistribusi normal. Selanjutnya, dilakukan pengecekan multikolinearitas guna memastikan bahwa antarvariabel prediktor tidak memiliki hubungan linear yang terlalu kuat. Nilai *Variance Inflation Factor* (VIF) untuk seluruh variabel independen ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Uji Multikolinearitas

Pengujian	X_1	X_2	X_3	X_4
VIF	1.657	1.369	1.894	1.792

Tabel 3 menunjukkan seluruh variabel independen memiliki VIF yang berada jauh di bawah

nilai ambang 10. Hal ini mengindikasikan bahwa tidak terdapat multikolinearitas serius dalam model sehingga masing-masing variabel memberikan informasi yang relevan. Hasil pengujian berikutnya, yakni *Breusch-Pagan* menunjukkan bahwa asumsi homoskedastisitas tidak terpenuhi, dengan nilai $BP = 15.03$ dan *p-value* = 0.00464. Temuan ini menandakan terjadi heteroskedastisitas, yang berarti varians residual tidak konstan antarprovinsi sehingga pendekatan global RLB tidak mampu sepenuhnya menangkap variasi yang terjadi pada data. Maka dari itu, dilakukan pemodelan *Geographically Weighted Regression* GWR yang mampu mengakomodasi heterogenitas spasial dalam hubungan antara variabel-variabel prediktor dan AKB.

PENENTUAN BANDWIDTH OPTIMUM

Langkah pertama dalam GWR adalah menentukan *bandwidth* optimum yang berfungsi mengatur tingkat kedekatan spasial antarprovinsi dalam proses pengestimasi parameter lokal. Pemilihan *bandwidth* dilakukan dengan membandingkan nilai *Akaike Information Criterion Corrected* (AICc). Hasil penentuan *bandwidth* optimum ditunjukkan pada Tabel 4, yang menjadi dasar pembentukan matriks bobot spasial dalam model GWR.

Tabel 4. Hasil Penentuan *Bandwidth* Optimum

<i>Bandwidth</i> Optimum	AICc
<i>Fixed Gaussian</i>	211.14
<i>Adaptive Gaussian</i>	201.15
<i>Fixed Tricube</i>	198.46
<i>Adaptive Tricube</i>	264.60
<i>Fixed Bisquare</i>	198.74
<i>Adaptive Bisquare</i>	197.90

Nilai AICc lebih rendah menunjukkan model yang lebih baik karena mampu memberikan keseimbangan antara ketepatan model dan kompleksitasnya. Tabel 4 menunjukkan kernel *Adaptive Bisquare* menghasilkan nilai AICc terendah, yaitu 197.896 sehingga ditetapkan sebagai *bandwidth* optimum dalam penelitian ini. Pemilihan kernel adaptif juga sesuai dengan karakteristik data spasial antarprovinsi di Indonesia yang lokasinya tidak berjarak seragam. Dengan demikian, pembobotannya dapat menyesuaikan kepadatan titik secara lebih fleksibel.

GEOGRAPHICALLY WEIGHTED REGRESSION

Model GWR kemudian menghasilkan 34 persamaan lokal, masing-masing mewakili provinsi dengan koefisien yang berbeda sesuai kondisi spasialnya. Untuk mengetahui apakah variasi koefisien lokal tersebut signifikan secara statistik, dilakukan uji F_3 , yang bertujuan menguji pengaruh suatu variabel berbeda antarwilayah atau bersifat global. Hasil uji F_3 yang menjadi dasar penentuan variabel lokal dan global ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Uji Variasi Parameter Lokal dan Global

Pengujian	X_1	X_2	X_3	X_4
F_3	0.707	8.789	1.477	11.66
P -value	0.770	< 0.001	0.194	< 0.001
Variasi	Global	Lokal	Global	Lokal

Hasil uji F_3 menunjukkan bahwa tidak semua variabel memiliki variasi spasial yang signifikan. Variabel X_1 dan X_3 mengindikasikan tidak terdapat perbedaan pengaruh antarprovinsi sehingga kedua variabel ini bersifat global. Sebaliknya, X_2 dan X_4 menunjukkan terdapat variasi spasial yang signifikan sehingga keduanya bersifat lokal. Dengan demikian, terdapat kombinasi variabel global dan lokal yang memungkinkan pemodelan *Mixed Geographically Weighted Regression* (MGWR) digunakan untuk menangkap struktur data secara lebih tepat.

MIXED GEOGRAPHICALLY WEIGHTED REGRESSION

Pemodelan MGWR dibangun dengan menetapkan X_1 dan X_3 sebagai parameter global yang nilainya dianggap sama di seluruh provinsi. Sementara itu, X_2 dan X_4 diperlakukan sebagai parameter lokal sehingga pengaruhnya dapat berbeda untuk setiap lokasi. Pengujian kesesuaian dan signifikansi serentak model MGWR dilakukan menggunakan Uji F, yang ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Uji Serentak Model MGWR

Pengujian	Keterangan	F-hitung	p -value
F_1	Uji Kesesuaian Model	9.037	< 0.01
F_2	Uji Signifikansi Parameter Global	16.96	< 0.001
F_3	Uji Signifikansi Parameter Lokal	5.276	< 0.001

Hasil uji F_1 pada Tabel 6 menunjukkan bahwa model MGWR secara statistik signifikan lebih baik dan lebih sesuai (fit) dalam menjelaskan data dibandingkan model RLB global. Selanjutnya, uji F_2 mengindikasikan bahwa variabel global X_1 dan

X_3 berpengaruh signifikan terhadap model. Hal yang sama untuk uji F_3 , terbukti bahwa variabel lokal X_2 dan X_4 secara simultan berpengaruh signifikan terhadap model dan bersifat heterogen.

Setelah pengujian serentak, tahapan berikutnya adalah melakukan uji parsial parameter dalam model. Uji parsial atau uji-t dilakukan untuk mengetahui signifikansi masing-masing variabel independen global dan lokal terhadap variabel dependen. Hasil uji parsial parameter global ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Uji Parsial Parameter Global MGWR

Variabel	Koefisien	p -value
X_1	2.058	0.0139
X_3	0.165	0.0014

Tabel 7 menunjukkan bahwa rata-rata lama sekolah (X_1) dan persentase rumah tangga yang menggunakan bahan bakar utama arang atau kayu untuk memasak (X_3) memiliki pengaruh signifikan terhadap AKB. Koefisien positif pada X_3 sejalan dengan temuan Rahman dkk. (2024) dan Alam dkk. (2022) yang menunjukkan bahwa penggunaan bahan bakar padat meningkatkan risiko kematian bayi. Selanjutnya, X_1 berpengaruh signifikan terhadap AKB sejalan dengan penelitian Kavit & Sugiharti (2025). Namun, perubahan struktural, seperti akses kesehatan dan sistem pelaporan dapat membuat peningkatan pendidikan tidak selalu langsung menurunkan AKB (Schellekens, 2021)

Setelah menguji parameter global, analisis dilanjutkan dengan menguji parameter lokal untuk mengetahui pengaruh setiap variabel independen bervariasi antarprovinsi. Uji parsial lokal penting dilakukan karena MGWR memungkinkan setiap variabel memiliki *bandwidth* berbeda sehingga sensitivitas pengaruhnya dapat berubah mengikuti karakteristik spasial masing-masing wilayah. Melalui uji ini, dapat diidentifikasi provinsi-provinsi yang menunjukkan pengaruh signifikan maupun tidak signifikan pada variabel lokal dalam model. Hasil uji parsial parameter lokal secara lengkap ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Uji Parsial Parameter Lokal MGWR

No	Provinsi	Koef. X_2	p -value X_2	Koef. X_4	p -value X_4
1	Aceh	0.373	0.001	0.368	0.048

2	Bali	0.751	0.000	0.675	0,000
3	Banten	0.506	0.000	0.335	0.048
4	Bengkulu	0.442	0.000	0.337	0.048
5	Daerah Istimewa Yogyakarta	0.619	0.000	0.435	0.012
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
34	Sumatera Utara	0.390	0.001	0.360	0.047

Hasil uji parsial parameter lokal pada Tabel 8 menunjukkan bahwa di seluruh 34 provinsi, variabel X_2 dan X_4 sama-sama memiliki koefisien positif dan signifikan terhadap AKB. Pengaruh X_2 sejalan dengan temuan Putri dkk. (2024) yang menunjukkan bahwa kelahiran pada usia remaja meningkatkan risiko kematian bayi karena tingginya kerentanan biologis dan keterbatasan kesiapan reproduksi. Sementara itu, pengaruh positif X_4 sejalan dengan Rahmayanti (2022) dan Padatuan dkk. (2021), yang menjelaskan bahwa kemiskinan berkontribusi pada tingginya AKB melalui keterbatasan akses terhadap layanan kesehatan, gizi, sanitasi, serta lingkungan tempat tinggal yang kurang mendukung kesehatan anak. Dengan demikian, kedua variabel lokal ini memberikan pengaruh yang konsisten dan kuat terhadap variasi AKB.

Dari hasil analisis MGWR, terbentuk 34 persamaan yang unik untuk setiap lokasi. Setiap persamaan memuat kombinasi koefisien global dan lokal sesuai hasil klasifikasi variabel sebelumnya sehingga mencerminkan heterogenitas spasial dalam hubungan antara variabel independen dan AKB. Hasil lengkap persamaan MGWR untuk 34 provinsi di Indonesia disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9. Persamaan MGWR

No.	Provinsi	MGWR
1.	Aceh	$-14.168 + 2.058X_1 + 0.373X_2 + 0.165X_3 + 0.368X_4$
2.	Bali	$-27.002 + 2.058X_1 + 0.751X_2 + 0.165X_3 + 0.675X_4$
3.	Banten	$-17.949 + 2.058X_1 + 0.506X_2 + 0.165X_3 + 0.335X_4$
4.	Bengkulu	$-16.025 + 2.058X_1 + 0.442X_2 + 0.165X_3 + 0.337X_4$

5.	Daerah Istimewa Yogyakarta	$-21.960 + 2.058X_1 + 0.619X_2 + 0.165X_3 + 0.435X_4$
⋮	⋮	⋮
34.	Sumatera Utara	$-14.601 + 2.058X_1 + 0.390X_2 + 0.165X_3 + 0.360X_4$

Persamaan MGWR yang terbentuk pada Tabel 8 menunjukkan bahwa setiap provinsi memiliki kombinasi parameter lokal yang berbeda untuk X_2 dan X_4 serta parameter global yang tetap untuk X_1 dan X_3 . Perbedaan nilai koefisien antarlokasi menegaskan adanya heterogenitas spasial dalam faktor-faktor yang memengaruhi AKB.

VALIDASI MODEL TERBAIK

Tahap terakhir adalah melakukan validasi untuk menentukan model terbaik. Validasi dilakukan dengan membandingkan nilai AICc dan *R-Squared* dari ketiga model yang telah dibangun, yaitu RLB, GWR, dan MGWR. Hasil validasi model ditunjukkan pada Tabel 10.

Tabel 10. Validasi Model Terbaik

Model	AICc	<i>R-Squared</i>
RLB	212.80	0.76
GWR	197.90	0.91
MGWR	191.82	0.91

Hasil validasi pada Tabel 10 menunjukkan model MGWR memiliki performa terbaik dibandingkan RLB dan GWR. Hal ini terlihat dari nilai AICc MGWR yang paling rendah, menandakan model tersebut memiliki keseimbangan lebih baik antara tingkat kesesuaian dan kompleksitas model. Sementara itu, nilai *R-Squared* MGWR dan GWR jauh lebih besar daripada RLB, menunjukkan bahwa model berbasis spasial mampu menjelaskan variasi AKB dengan lebih baik. Namun, karena MGWR juga memiliki AICc terendah, model ini dapat disimpulkan sebagai model optimal untuk menggambarkan pola spasial AKB dibandingkan kedua model lainnya.

PENUTUP

SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa variasi Angka Kematian Bayi (AKB) antarprovinsi tidak dapat dijelaskan secara memadai melalui Regresi Linear Berganda (RLB) karena adanya heterogenitas spasial. Pemilihan *bandwidth* optimum mengidentifikasi kernel *adaptive bisquare* sebagai

pembobot terbaik berdasarkan nilai AICc terendah sehingga digunakan dalam proses pemodelan spasial. Uji F_3 melalui model *Geographically Weighted Regression* (GWR) menunjukkan X_1 (rata-rata lama sekolah) dan X_3 (penggunaan bahan bakar kayu/arang) bersifat global, sedangkan X_2 (melahirkan di usia < 21 tahun) dan X_4 (persentase kemiskinan) bersifat lokal. Temuan ini menjadi dasar pembangunan *Mixed Geographically Weighted Regression* (MGWR) untuk menangani parameter global dan lokal secara bersamaan. Hasil MGWR menunjukkan bahwa parameter global X_1 dan X_3 berpengaruh signifikan terhadap AKB, sedangkan variabel lokal X_2 dan X_4 berpengaruh signifikan dengan tingkat pengaruh yang berbeda-beda. Berdasarkan validasi model, MGWR memiliki AICc terendah dan *R-squared* tertinggi sehingga dipilih sebagai model terbaik.

SARAN

Berdasarkan hasil penelitian, disarankan agar upaya penurunan AKB dilakukan dengan mempertimbangkan perbedaan kondisi antarwilayah, khususnya terkait variabel lokal, seperti kemiskinan dan melahirkan pada usia muda. Pemerintah daerah dapat memprioritaskan intervensi berbasis wilayah, seperti peningkatan edukasi kesehatan reproduksi, perluasan akses layanan kesehatan ibu dan anak, serta program pengentasan kemiskinan. Selain itu, penelitian selanjutnya dapat mempertimbangkan variabel tambahan, seperti akses sanitasi, cakupan imunisasi, atau ketersediaan fasilitas kesehatan, serta menggunakan unit analisis lebih detail agar pola spasial dapat teridentifikasi secara lebih mendalam.

DAFTAR PUSTAKA

- Alam, M. B., Acharjee, S., Mahmud, S. M. A., Tania, J. A., Ali Khan, M. M., Islam, M. S., & Khan, M. N. (2022). Household Air Pollution from Cooking Fuels and Its Association with Under-five Mortality in Bangladesh. *Clinical Epidemiology and Global Health*, *17*, 101134. <https://doi.org/10.1016/j.cegh.2022.101134>
- Alya, N. A., Almaulidiyah, Q., Farouk, B. R., Rantini, D., Ramadan, A., & Othman, F. (2024). Comparison of Geographically Weighted Regression (GWR) and Mixed Geographically Weighted Regression (MGWR) Models on the Poverty Levels in Central Java in 2023. *International Journal of Applied Mathematics*, *54*(12), 2746–2757.
- Kavit, N. A., & Sugiharti, L. (2025). Analysis of Socio-Economic Determinants on Infant Mortality in East Nusa Tenggara Province. *Jurnal Ilmu Ekonomi Terapan*, *10*(1), 44–56. <https://doi.org/10.20473/jiet.v10i1.66299>
- Monalisa, K. A. (2023). *Estimasi Angka Kematian Bayi (AKB) di Indonesia dengan Geographically Weighted Regression (GWR) dan Mixed Geographically Weighted Regression (MGWR)*. Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau.
- Mujiarti, E. M., Yundari, Y., & Huda, N. M. (2024). Pemodelan Geographically Weighted Regression pada Angka Partisipasi Sekolah di Kalimantan Barat Tahun 2022. *Jurnal Gaussian*, *13*(1), 36–47. <https://doi.org/10.14710/j.gauss.13.1.36-47>
- Mumtaz, G. F., Suyitno, S., & Sifriyani, S. (2025). Geographically Weighted Panel Regression Modeling of Poverty Rates in Tropical Rainforest Areas in Kalimantan. *BAREKENG: Jurnal Ilmu Matematika dan Terapan*, *19*(2), 903–916. <https://doi.org/10.30598/barekengvol19iss2pp903-916>
- Nisa, R. F., Sugito, S., & Hakim, A. R. (2022). Pemodelan Mixed Geographically Weighted Regression dengan Adaptive Bandwidth untuk Angka Harapan Hidup (Studi Kasus: Angka Harapan Hidup di Jawa Tengah). *Jurnal Gaussian*, *11*(1), 67–76. <https://doi.org/10.14710/j.gauss.v11i1.33998>
- Padatuan, A. B., Sifriyani, S., & Prangga, S. (2021). Pemodelan Angka Harapan Hidup dan Angka Kematian Bayi di Kalimantan dengan Regresi Nonparametrik Spline Birespon. *BAREKENG: Jurnal Ilmu Matematika dan Terapan*, *15*(2), 283–296. <https://doi.org/10.30598/barekengvol15iss2pp283-296>
- Primasari, R. B., Rusgiyono, A., & Ispriyanti, D. (2023). Pemodelan Mixed Geographically Weighted Regression (MGWR) dengan Jarak Euclidean dan Jarak Manhattan (Studi Kasus: Kematian Bayi Neonatal di Jawa Tengah Tahun 2018-2020). *Jurnal Gaussian*, *11*(4), 478–487. <https://doi.org/10.14710/j.gauss.11.4.478-487>
- Putri, A. R., Agustina, S., Sagita, F. F., & Kartiasih, F. (2024). Analisis Sosial Ekonomi dan Kesehatan terhadap Angka Kematian Bayi di Jawa Timur 2022. *Seminar Nasional Official Statistics 2024*, 341–351.
- Rahman, M. F., Syafia, H., Ula, S. M., Amini, N. A., & Siagia, A. P. T. H. (2024). Analisis Spasial Angka Kematian Balita di Pulau Papua Menggunakan Mixed Geographically Weighted Regression. *Indonesian Journal of Applied Statistics*, *6*(1), 10. <https://doi.org/10.13057/ijas.v6i1.75064>
- Rahmayanti, N. (2022). IMPACT OF POVERTY ON INFANT MORTALITY. *CONTINUUM: Indonesia Journal Islamic Community Development*, *1*.
- Schellekens, J. (2021). Maternal Education and Infant Mortality Decline: The Evidence from Indonesia, 1980–2015. *Demographic Research*, *45*, 807–824. <https://doi.org/10.4054/DemRes.2021.45.24>
- Ulfie Safitri, & Amaliana, L. (2021). Model Geographically Weighted Regression dengan Fungsi Pembobot Adaptive dan Fixed Kernel pada

Kasus Kematian Ibu di Jawa Timur. *Jurnal Statistika dan Aplikasinya*, 5(2), 208–220.
<https://doi.org/10.21009/JSA.05209>