

Spatial Autoregressive Quantile Regression untuk Pemodelan Angka Harapan Hidup di Provinsi Sumatera Utara

Wenni Marlina dan Rina Filia Sari



Volume 13, Issue 2, Pages 211–220, Aug. 2025

Diterima 2 Mei 2025, Direvisi 9 Juli 2025, Disetujui 12 Juli 2025, Diterbitkan 17 Juli 2025

To Cite this Article : W. Marlina dan R. F. Sari, "Spatial Autoregressive Quantile Regression untuk Pemodelan Angka Harapan Hidup di Provinsi Sumatera Utara", *Euler J. Ilm. Mat. Sains dan Teknol.*, vol. 13, no. 2, pp. 211–220, 2025, <https://doi.org/10.37905/euler.v13i2.32367>

© 2025 by author(s)

JOURNAL INFO • EULER : JURNAL ILMIAH MATEMATIKA, SAINS DAN TEKNOLOGI



🏠	Homepage	:	http://ejournal.ung.ac.id/index.php/euler/index
📄	Journal Abbreviation	:	Euler J. Ilm. Mat. Sains dan Teknol.
📅	Frequency	:	Three times a year
🗨️	Publication Language	:	English (preferable), Indonesia
🔗	DOI	:	https://doi.org/10.37905/euler
📖	Online ISSN	:	2776-3706
📄	License	:	Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
🏢	Publisher	:	Department of Mathematics, Universitas Negeri Gorontalo
🇮🇩	Country	:	Indonesia
🌐	OAI Address	:	http://ejournal.ung.ac.id/index.php/euler/oai
🔍	Google Scholar ID	:	QF_r-gAAAAJ
✉️	Email	:	euler@ung.ac.id

JAMBURA JOURNAL • FIND OUR OTHER JOURNALS



Jambura Journal of Biomathematics



Jambura Journal of Mathematics



Jambura Journal of Mathematics Education



Jambura Journal of Probability and Statistics

Spatial Autoregressive Quantile Regression untuk Pemodelan Angka Harapan Hidup di Provinsi Sumatera Utara

Wenni Marlina^{1,*}, Rina Filia Sari¹

¹Jurusan Matematika, Universitas Islam Negeri Sumatera Utara, Medan 20371, Indonesia

ARTICLE HISTORY

Diterima 2 Mei 2025
Direvisi 9 Juli 2025
Disetujui 12 Juli 2025
Diterbitkan 17 Juli 2025

KATA KUNCI

Angka Harapan Hidup
Regresi Kuantil Spasial
Model Spasial Autoregresif

KEYWORDS

Life Expectancy
Spatial Quantile Regression
Spatial Autoregressive Model

ABSTRAK. Angka Harapan Hidup (AHH) adalah indikator utama untuk menilai tingkat kesehatan masyarakat. Provinsi Sumatera Utara masih menghadapi tantangan dalam meningkatkan AHH yang berada di bawah rata-rata nasional. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi model spasial terbaik dalam memodelkan Angka Harapan Hidup di Provinsi Sumatera Utara dengan fokus utama pada penerapan tiga model spasial yaitu Spatial Autoregressive (SAR), Robust Spatial Autoregressive (RSAR) dan Spatial Autoregressive Quantile Regression (SARQR). Data sekunder tahun 2023 dari 33 kabupaten/kota diambil dari BPS Provinsi Sumatera Utara, dengan AHH sebagai variabel dependen dan tujuh variabel independen. Analisis diawali dengan regresi linier berganda dan uji asumsi klasik, dilanjutkan dengan pembentukan matriks spasial queen contiguity, uji efek spasial (Indeks Moran dan Lagrange Multiplier), serta pemodelan dengan ketiga pendekatan regresi spasial dan deteksi pencilan spasial diantara ketiga model. Hasil menunjukkan bahwa SARQR pada kuantil 0,1 merupakan model terbaik dengan nilai AIC terendah (23,7764) dan keunggulan dalam mengatasi pencilan spasial. Dengan demikian, SARQR kuantil 0,1 direkomendasikan sebagai model optimal untuk pemodelan AHH di Sumatera Utara.

ABSTRACT. Life Expectancy (LE) is a key indicator for assessing the level of public health. North Sumatra Province still faces challenges in improving its LE, which remains below the national average. This study aims to compare three spatial models, namely: SAR, RSAR, and SARQR to model HLI in North Sumatra. Secondary data from 2023 for 33 districts/cities were obtained from the North Sumatra Provincial Statistics Agency, with HLI as the dependent variable and seven independent variables. The analysis began with multiple linear regression and classical assumption tests, followed by the formation of a spatial queen contiguity matrix, spatial effect tests (Moran's Index and Lagrange Multiplier), and modeling using the three spatial regression approaches. The results indicate that SARQR at the 0.1 quantile is the best model with the lowest AIC value (23.7764) and superiority in addressing spatial outliers. Therefore, SARQR at the 0.1 quantile is recommended as the optimal model for modeling AHH in North Sumatra.



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License. *Editorial of EULER:* Department of Mathematics, Universitas Negeri Gorontalo, Jln. Prof. Dr. Ing. B. J. Habibie, Bone Bolango 96554, Indonesia.

1. Pendahuluan

Angka Harapan Hidup (AHH) merupakan salah satu indikator fundamental dalam menilai kualitas hidup dan kesejahteraan masyarakat di suatu wilayah. AHH menggambarkan estimasi rata-rata usia yang dapat dicapai oleh individu sejak lahir, dengan mempertimbangkan tingkat kematian yang berlaku pada saat itu [1]. Indikator ini sering digunakan sebagai tolok ukur dalam menilai efektivitas kebijakan pemerintah di bidang kesehatan, pendidikan, dan pembangunan ekonomi secara umum. Tingginya angka harapan hidup biasanya dikaitkan dengan tingginya kualitas hidup masyarakat suatu negara atau daerah. Sebagai contoh, negara-negara maju umumnya memiliki Angka Harapan Hidup (AHH) yang tinggi di negara-negara berkembang dengan penghasilan rendah, mencerminkan adanya ketimpangan global dalam hal akses terhadap pelayanan kesehatan, gizi, sanitasi, serta berbagai faktor sosial ekonomi lainnya yang memengaruhi keberlangsungan hidup masyarakat [2]. Kondisi ini menjadikan pening-

katan AHH sebagai salah satu prioritas utama dalam perencanaan pembangunan baik di tingkat nasional maupun daerah. Di Indonesia, AHH juga berperan sebagai salah satu indikator utama dalam penghitungan Indeks Pembangunan Manusia (IPM), yang digunakan untuk mengukur kualitas hidup secara keseluruhan [3].

Sebagai indikator kesehatan dan pembangunan manusia, AHH sering dijadikan salah satu komponen dalam perhitungan *Human Development Index* (HDI) oleh *United Nations Development Programme* (UNDP) [4]. Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) dalam Yasin [5] menyatakan bahwa negara-negara maju umumnya memiliki AHH yang lebih tinggi dibandingkan dengan negara berkembang atau negara berpenghasilan rendah. Hal ini mencerminkan kesenjangan global dalam akses terhadap layanan kesehatan, nutrisi, sanitasi, dan faktor-faktor sosial ekonomi lainnya yang turut mempengaruhi tingkat kelangsungan hidup masyarakat. Oleh karena itu, peningkatan angka harapan hidup (AHH) menjadi prioritas dalam agenda pembangunan nasional dan daerah. Di Indonesia AHH merupakan salah satu komponen utama

*Penulis Korespondensi.

dalam indeks pembangunan manusia yang mencerminkan kualitas hidup masyarakat secara keseluruhan [6].

Indonesia mengalami peningkatan Angka Harapan Hidup (AHH) yang cukup stabil dalam dua dekade terakhir. Pada tahun 2023, rata-rata AHH nasional tercatat mencapai 73 tahun. Peningkatan ini tidak terlepas dari berbagai kebijakan pemerintah dalam memperbaiki akses dan kualitas layanan kesehatan, memperluas kepesertaan dalam program asuransi kesehatan nasional, serta peningkatan di sektor gizi dan pendidikan [1]. Meskipun demikian, pertumbuhan AHH ini belum merata di seluruh wilayah Indonesia. Masih terdapat ketimpangan antarprovinsi yang cukup mencolok, di mana sejumlah daerah memiliki AHH yang jauh tertinggal dari rata-rata nasional. Sebagai contoh, AHH di Provinsi Papua tercatat jauh lebih rendah dibandingkan dengan DKI Jakarta [7]. Situasi ini mengindikasikan bahwa meskipun ada kemajuan secara agregat, ketimpangan wilayah tetap menjadi hambatan utama dalam mewujudkan pemerataan pembangunan di sektor kesehatan. Oleh karena itu, intervensi khusus diperlukan guna mengurangi disparitas ini dan memastikan peningkatan kualitas hidup yang lebih inklusif di seluruh Indonesia.

Sumatera Utara sebagai salah satu provinsi dengan jumlah penduduk yang cukup besar di Indonesia, menghadapi berbagai tantangan dalam meningkatkan Angka Harapan Hidup (AHH) penduduknya [8]. Menurut data Badan Pusat Statistik Republik Indonesia (BPS RI) tahun 2023, AHH di provinsi ini mencapai 73 tahun [9]. Meskipun nilai tersebut mendekati rata-rata nasional, pencapaian tersebut belum sepenuhnya mencerminkan keberhasilan jika dibandingkan dengan target pembangunan nasional maupun kinerja provinsi lain. Hal ini menunjukkan bahwa Sumatera Utara masih membutuhkan strategi dan intervensi yang lebih intensif untuk meningkatkan kualitas hidup warganya. Beberapa faktor yang turut berkontribusi terhadap belum optimalnya AHH di daerah ini mencakup keterbatasan dalam akses pelayanan kesehatan yang memadai, rendahnya tingkat pendidikan, kondisi ekonomi masyarakat yang belum merata, serta permasalahan lingkungan yang berdampak pada kesehatan [6]. Selain itu, faktor geografis dan infrastruktur yang belum merata juga menjadi kendala dalam distribusi layanan kesehatan yang efektif. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang komprehensif dan berbasis data untuk menganalisis faktor-faktor yang mempengaruhi AHH di Sumatera Utara. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan memodelkan faktor-faktor yang mempengaruhi AHH guna memberikan rekomendasi kebijakan yang tepat sasaran dalam upaya peningkatan AHH di provinsi Sumatera Utara.

Berbagai faktor diketahui berkontribusi terhadap pencapaian angka harapan hidup yang relatif stagnan di Sumatera Utara. Di antaranya adalah ketimpangan dalam akses layanan kesehatan, perbedaan tingkat pendidikan antar daerah, kondisi ekonomi masyarakat yang bervariasi, serta permasalahan lingkungan seperti pencemaran dan kurangnya sanitasi yang memadai [10]. Faktor-faktor ini tidak hanya memengaruhi angka harapan hidup secara individu, tetapi juga membentuk pola ketimpangan spasial di antara wilayah kabupaten dan kota dalam provinsi tersebut [11]. Sebagai contoh, wilayah perkotaan umumnya memiliki kemudahan akses terhadap fasilitas kesehatan dan pendidikan yang lebih baik dibandingkan dengan wilayah pedesaan. Selain itu, aspek sosial dan budaya turut memengaruhi pola perilaku masyarakat dalam menjalani hidup sehat, yang pada akhirnya berdampak terhadap

Angka Harapan Hidup (AHH). Dengan demikian, diperlukan pendekatan analitis yang memperhitungkan aspek spasial guna memahami persebaran serta faktor-faktor penentu AHH di Sumatera Utara. Pendekatan semacam ini diharapkan dapat mendukung perumusan kebijakan yang lebih tepat sasaran dan efisien dalam rangka meningkatkan kualitas hidup penduduk [12]. Untuk itu, penelitian ini menerapkan metode statistik spasial guna mengeksplorasi berbagai faktor tersebut secara lebih komprehensif.

Untuk mengidentifikasi pola dan faktor-faktor yang mempengaruhi AHH di Sumatera Utara, diperlukan pendekatan analitis yang mempertimbangkan dimensi spasial atau keruangan. Salah satu metode statistik yang relevan dalam konteks ini adalah model regresi spasial, yang mampu menangkap hubungan dan ketergantungan antar wilayah [13]. Hal ini penting karena kondisi suatu wilayah sering kali dipengaruhi oleh kondisi wilayah sekitarnya, terutama dalam hal penyebaran penyakit, fasilitas layanan kesehatan, dan mobilitas penduduk. Model regresi spasial seperti *Spatial Autoregressive Model* (SAR) telah banyak digunakan dalam berbagai studi untuk menganalisis data spasial [14]. Model ini menggabungkan unsur lag spasial ke dalam model regresi tradisional, sehingga mampu menangkap efek ketergantungan antarwilayah [15]. Namun, model SAR memiliki kelemahan dalam mendeteksi pencilan atau *outlier*, terutama yang bersifat spasial. Untuk mengatasi hal ini, digunakan model *Robust Spatial Autoregressive* (RSAR) yang dirancang untuk mengakomodasi data dengan pencilan, sehingga hasil estimasi menjadi lebih stabil dan dapat diandalkan [16]. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih akurat mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi AHH di Sumatera Utara.

Menurut Tribhuwaneswari [17] studi spasial, sering ditemukan dua konsep penting yaitu ketergantungan spasial (*spatial dependence*) dan keberagaman spasial (*spatial heterogeneity*). Ketergantungan spasial mengacu pada kenyataan bahwa nilai suatu variabel pada suatu wilayah dipengaruhi oleh nilai di wilayah sekitarnya. Sebagai contoh, jika suatu daerah memiliki angka harapan hidup rendah karena minimnya fasilitas kesehatan, kemungkinan besar wilayah sekitarnya juga akan terdampak secara serupa. Di sisi lain, keberagaman spasial mencerminkan adanya perbedaan karakteristik antarwilayah, yang menyebabkan hubungan antarvariabel tidak selalu seragam [18]. Mengabaikan efek spasial ini dalam analisis dapat menyebabkan bias dalam estimasi parameter dan kesalahan dalam penarikan kesimpulan [19]. Oleh karena itu, model yang mempertimbangkan kedua aspek ini, seperti SAR (*Spatial Autoregressive*), menjadi sangat penting [20]. Namun demikian, model SAR memiliki keterbatasan dalam mengidentifikasi dan menangani pencilan (*outliers*) yang sering muncul dalam data spasial. Karena itu, untuk memperoleh hasil yang lebih robust, diperlukan pendekatan lain seperti RSAR (Robust SAR) atau SARQR yang mampu mengakomodasi anomali tersebut dalam analisis.

Model *Robust Spatial Autoregressive* (RSAR) merupakan pengembangan dari model SAR yang ditujukan untuk menangani pencilan pada data spasial [17]. Pencilan dapat berasal dari kesalahan pencatatan, variabel yang tidak terobservasi, atau karakteristik unik suatu wilayah yang tidak dapat dijelaskan oleh model umum. Dalam konteks angka harapan hidup, misalnya, daerah tertentu mungkin memiliki AHH yang sangat rendah karena bencana alam, konflik sosial, atau epidemi lokal, yang menyebabkan

nilai tersebut menyimpang dari tren wilayah sekitarnya. RSAR menggunakan pendekatan robust dalam estimasi parameter, sehingga dapat memberikan hasil yang lebih stabil meskipun terdapat data pencilan. Dengan demikian, model ini cocok digunakan pada data yang memiliki distribusi tidak normal atau mengandung nilai ekstrem. Namun demikian, meskipun RSAR mengatasi masalah pencilan, model ini belum mampu menangkap variasi hubungan antarwilayah pada kuantil distribusi yang berbeda [21]. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan lanjutan yang lebih fleksibel dalam menganalisis distribusi data spasial secara menyeluruh. Salah satu pendekatan tersebut adalah regresi kuantil spasial, atau SAR *Quantile Regression* (SARQR), yang memungkinkan analisis hubungan pada berbagai tingkatan kuantil [22].

SARQR (*Spatial Autoregressive Quantile Regression*) merupakan kombinasi antara regresi kuantil dan model SAR yang bertujuan untuk menangani baik ketergantungan spasial maupun pencilan spasial [23]. Regresi kuantil memungkinkan peneliti untuk memeriksa hubungan antara variabel pada berbagai kuantil, tidak hanya pada rata-rata. Dalam konteks AHH, hal ini sangat berguna karena hubungan antara variabel ekonomi, sosial, dan kesehatan mungkin berbeda pada wilayah dengan AHH rendah dibandingkan wilayah dengan AHH tinggi. SARQR juga memiliki keunggulan dalam memberikan hasil yang tidak terlalu dipengaruhi oleh outlier, serta mampu menggambarkan dinamika spasial yang lebih kompleks dan realistis [24]. Model ini memberikan estimasi parameter yang lebih fleksibel dan dapat mencerminkan ketidakhomogenan efek antarwilayah. Dengan kemampuan ini, SARQR menjadi alat yang efektif dalam pemodelan fenomena spasial yang kompleks seperti angka harapan hidup. Penelitian ini akan menerapkan ketiga model SAR, RSAR, dan SARQR untuk menentukan model terbaik dalam menganalisis AHH di Provinsi Sumatera Utara. Evaluasi dilakukan berdasarkan *Akaike Information Criterion* (AIC) yang mengukur keseimbangan antara kecocokan model dan kompleksitasnya.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menentukan model terbaik dalam memodelkan angka harapan hidup di Provinsi Sumatera Utara. Disparitas Angka Harapan Hidup (AHH) antar kabupaten/kota di Provinsi Sumatera Utara menunjukkan perlunya pendekatan analisis yang tidak hanya melihat hubungan linier antarvariabel, tetapi juga mempertimbangkan aspek spasial dan pencilan data. Model regresi klasik sering gagal menangkap ketergantungan antarwilayah dan dinamika pada wilayah ekstrem. Dalam konteks ini, *Spatial Autoregressive Quantile Regression* (SARQR) menawarkan keunggulan karena mampu memodelkan distribusi AHH pada berbagai kuantil serta mengatasi pencilan spasial secara lebih efektif dibandingkan SAR dan RSAR. Oleh karena itu, penerapan SARQR menjadi penting untuk menghasilkan pemodelan AHH yang lebih akurat dan aplikatif dalam mendukung kebijakan pembangunan kesehatan yang tepat sasaran. Dengan menerapkan ketiga model spasial, yaitu SAR, RSAR, dan SARQR, diperoleh pemodelan yang tidak hanya akurat tetapi juga tahan terhadap pencilan dan memperhitungkan efek spasial. Model terbaik ditentukan berdasarkan nilai AIC model dengan nilai AIC terkecil dianggap paling optimal. Hasil penelitian ini memberikan gambaran empiris mengenai sebaran spasial AHH di Sumatera Utara serta faktor-faktor yang memengaruhinya secara signifikan.

2. Metode

2.1. Data dan Variabel Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan membandingkan metode SAR, RSAR, dan SARQR [24]. Data sekunder diperoleh dari BPS Sumatera Utara, mencakup AHH dan tujuh variabel yang memengaruhinya di 33 kabupaten/kota pada tahun 2023. Variabel yang digunakan dalam analisis disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Variabel-variabel penelitian

Variabel	Notasi
Persentase Angka Harapan Hidup di Provinsi Sumatera Utara	Y
Persentase BPJS Kesehatan	X_1
Persentase Penduduk Miskin	X_2
Rata-rata Lama Sekolah	X_3
Persentase Tingkat Partisipasi Angkatan Kerja	X_4
Persentase Tingkat Pengangguran Terbuka	X_5
Harapan Lama Sekolah	X_6
Rumah Tangga yang memiliki akses terhadap sumber air minum	X_7

2.2. Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan sistematis guna mencapai hasil yang valid dan dapat dipertanggungjawabkan. Adapun tahapan-tahapan tersebut dijelaskan sebagai berikut:

1. Melakukan analisis data secara deskriptif
Tahap awal dalam penelitian ini dimulai dengan analisis deskriptif terhadap seluruh variabel yang digunakan [25]. Tujuan dari analisis ini adalah untuk memperoleh pemahaman awal mengenai karakteristik data, seperti distribusi, nilai rata-rata, simpangan baku, serta potensi keberadaan data tidak normal atau pencilan. Pemahaman ini penting sebagai dasar dalam menentukan strategi analisis lanjutan secara lebih akurat.
2. Melakukan estimasi model regresi linear dengan metode OLS
Setelah analisis deskriptif, penelitian dilanjutkan dengan pemodelan regresi linear berganda untuk mengkaji hubungan antara variabel dependen dan beberapa variabel independen [1]. Metode ini digunakan karena efektif dalam menjelaskan keterkaitan multivariat. Adapun bentuk umum model regresi linear berganda seperti pada pers. (1).

$$y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

dengan $i = 1, 2, \dots, n$, misalkan y_i adalah nilai variabel tak bebas untuk observasi ke- i , x_{ij} adalah nilai variabel bebas ke- j untuk pengamatan ke- i dan ε_i adalah sisaan pengamatan ke- i . Estimasi parameter regresi (β) diperoleh menggunakan metode *Ordinary Least Squares* (OLS), yang bertujuan meminimalkan selisih kuadrat antara nilai observasi dan prediksi model. Rumus estimasi OLS dituliskan pada pers. (2).

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y. \quad (2)$$

Metode OLS ini banyak digunakan dalam analisis regresi karena kesederhanaannya serta sifat estimasinya yang bersifat *blue* (*best linear unbiased estimator*) di bawah asumsi klasik regresi linear.

3. Melakukan Uji Asumsi Klasik

(a) Melakukan Uji Normalitas

Uji *Jarque Bera* adalah salah satu uji secara statistika yang digunakan untuk mengetahui apakah galat berdistribusi normal atau tidak [2]. Uji statistik *Jarque Bera* dinyatakan pada pers. (3).

$$JB = n \left[\frac{S^2}{6} + \frac{(K - 3)^2}{24} \right], \quad (3)$$

dimana n adalah banyak sampel, S adalah *Skewness* atau ukuran kemiringan dengan rumus

$$S = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)^{\frac{3}{2}}},$$

dan K adalah *Kurtosis* atau ukuran keruncingan dengan rumus

$$K = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)^2}.$$

Misalkan untuk pengambilan keputusan tidak tolak H_0 jika $JB < \chi_{\alpha(2)}^2$ atau $p\text{-value} > \alpha$ dan keputusan tolak H_0 jika $JB \geq \chi_{\alpha(2)}^2$ atau $p\text{-value} \leq \alpha$.

(b) Melakukan Uji Homoskedastisitas

Uji homoskedastisitas bertujuan untuk menguji terjadinya kesamaan ragam dari galat suatu observasi ke observasi lain. Jika ragam dari galat suatu observasi sama maka disebut homoskedastisitas dan jika ragam dari galatnya berbeda maka disebut heteroskedastisitas. Homoskedastisitas dapat diuji menggunakan metode Breusch-Pagan, dengan statistik uji dirumuskan pada pers. (4) [3].

$$BP = N \times R^2, \quad (4)$$

dengan N adalah jumlah pengamatan dan R^2 adalah koefisien determinasi dari regresi kuadrat residual terhadap variabel independen. Jika $p\text{-value} < \alpha$, maka H_0 ditolak, yang mengindikasikan adanya heteroskedastisitas pada tingkat signifikansi α . Jika variansi dari residual pada model regresi tetap (konstan) untuk seluruh nilai variabel bebas, maka model memenuhi asumsi homoskedastisitas, yang menunjukkan bahwa galat tidak bergantung pada nilai prediktor dan tidak terjadi heteroskedastisitas.

(c) Melakukan Uji Autokorelasi

Uji autokorelasi menunjukkan adanya korelasi antar galat model regresi linier. Autokorelasi pada galat dapat diuji menggunakan uji Durbin-Watson dengan statistik uji seperti pada pers. (5) [4].

$$d = \frac{\sum_{i=2}^n (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})^2}{\sum_{i=2}^n (\varepsilon_i^2)}. \quad (5)$$

Jika nilai statistik Durbin-Watson berada mendekati 2, maka dapat disimpulkan bahwa tidak terdapat autokorelasi di antara residual, yang berarti galat-galat regresi bersifat saling bebas secara temporal (khususnya pada data runtun waktu).

(d) Melakukan Uji Multikolinearitas

Multikolinearitas memberikan dampak dalam kegunaan model regresi yaitu dapat mempengaruhi ketepatan dari koefisien regresi. Uji multikolinearitas pada variabel bebas dilakukan dengan menghitung Variance Inflation Factor (VIF); nilai VIF < 10 menunjukkan tidak adanya multikolinearitas pada model regresi [8]:

$$VIF = \frac{1}{1 - R_j^2}, \quad (6)$$

dimana R_j^2 adalah koefisien determinasi yang menunjukkan ragam dari variabel bebas ke- j yang dapat diterangkan oleh variabel bebas lainnya. Jika seluruh variabel bebas dalam model memiliki nilai VIF < 10 dan $Tolerance > 0,1$, maka tidak terdapat multikolinearitas, yang berarti tidak ada hubungan linier yang kuat di antara variabel-variabel independen dalam sistem persamaan regresi.

4. Menentukan matriks pembobot spasial dengan tipe matriks *queen contiguity*

5. Melakukan uji efek spasial

Pengujian ketergantungan spasial antar daerah dilakukan dengan Indeks Moran dan uji Lagrange Multiplier, di mana nilai positif Indeks Moran menunjukkan pola kluster, nilai negatif menunjukkan penyebaran, dan nilai nol menandakan tidak adanya ketergantungan spasial [6], sementara uji *Lagrange Multiplier* mendeteksi ketergantungan spasial lag pada variabel dependen yang jika signifikan memerlukan model Spatial Autoregressive (SAR) [26]. Selanjutnya, uji Breusch-Pagan digunakan untuk mengidentifikasi keragaman spasial antar pengamatan dengan kriteria nilai tertentu [11]. Penelitian ini kemudian menerapkan model SAR, Robust SAR (RSAR) estimasi-M, dan SAR Quantile Regression (SARQR) estimasi IVQR untuk data angka harapan hidup di Sumatera Utara, sekaligus mendeteksi pencilaan spasial. Pemilihan model terbaik dilakukan berdasarkan perhitungan Akaike Information Criterion (AIC), dan kesimpulan ditarik dari hasil analisis tersebut.

2.3. Model Regresi Spasial

2.3.1. Pemodelan Spatial Autoregressive

Spatial autoregressive (spatial lag) adalah regresi spasial yang memasukkan efek spasial pada variabel respon, di mana nilai variabel pada lokasi i bergantung pada lokasi j [12]. Model ini mengakomodasi korelasi spasial pada peubah respon [14] dan terbentuk saat nilai, sehingga persamaan modelnya disajikan pada pers. (7) [13].

$$y = W_y + X\beta + u, \quad (7)$$

$$u \sim N(0, \sigma^2 I),$$

dimana y adalah vektor variabel depende $n \times 1$, X matriks variabel independen $n \times (k + 1)$, koefisien spasial autoregresif yang

Tabel 2. Statistik deskriptif data

Variabel	N	Min	Mean	Maks	S.D
Persentase Angka Harapan Hidup di Provinsi Sumatera Utara (Y)	33	71,52	73,24	74,76	1,07
Persentase BPJS Kesehatan (X ₁)	33	23,54	41,98	78,32	15,38
Persentase Penduduk Miskin (X ₂)	33	3,44	9,92	22,81	4,19
Rata-rata Lama Sekolah (X ₃)	33	6,14	9,38	11,62	1,34
Persentase Tingkat Partisipasi Angkatan Kerja (X ₄)	33	62,79	74,19	86,89	7,44
Persentase Tingkat Pengangguran Terbuka (X ₅)	33	0,45	4,55	8,67	2,55
Harapan Lama Sekolah (X ₆)	33	12,64	13,48	14,78	0,51
Rumah Tangga yang memiliki Akses terhadap sumber Air Minum Layak (X ₇)	33	51,33	85,15	100	14,01

menggambarkan tingkat ketergantungan spasial antar wilayah, W matriks pembobot spasial $n \times n$, β adalah vektor koefisien berukuran $(k + 1) \times 1$, dan U vektor residual $n \times 1$ [15].

2.3.2. Pemodelan Robust Spatial Autoregressive

Regresi robust digunakan untuk menganalisis data yang mengandung pencilan dengan beberapa estimator seperti M, MM, LTS, dan S. Penelitian ini memilih estimasi-M karena efisiensinya mencapai 95% [16]. Metode ini memberikan bobot pada proses estimasi parameter sehingga galat menjadi berdistribusi normal. Kombinasi regresi SAR dengan robust membentuk model RSAR [17]. Estimasi-M dipilih karena sederhana secara komputasi dan teori serta mampu menangani pencilan dalam regresi spasial [18].

2.3.3. Pemodelan Spatial Autoregressive Quantile Regression

Model Spatial Autoregressive Quantile Regression (SARQR) menggabungkan model SAR dan regresi kuantil, di mana setiap kuantil dipengaruhi efek spasial dan variabel yang berbeda. Parameter model SARQR diestimasi menggunakan Instrumental Variable Quantile Regression (IVQR) [19]. Beberapa metode estimasi sebelumnya meliputi Generalized Method of Moment oleh Rizki & Ammar [20], Two Stage Quantile Method Regression (2SQR) oleh Zebua [27] dan IVQR yang diperkenalkan oleh Tribhuwaneswari [17] serta diadaptasi oleh Abrari dkk. [21]. SARQR unggul dalam mengatasi heteroskedastisitas dan tahan terhadap outlier. Penelitian Arum [1] menunjukkan bahwa model SAR dan RSAR kurang sensitif terhadap outlier sehingga tidak sepenuhnya mencerminkan distribusi data. Koefisien autoregresif spasial dan vektor regresi pada SARQR bergantung pada kuantil tertentu, menunjukkan tingkat ketergantungan spasial antar wilayah [3]. Estimasi parameter pada model SARQR dilakukan menggunakan metode IVQR [4]. Pengembangan model SAR pada kuantil tertentu yang didefinisikan pada pers. (8) [2].

$$\begin{aligned}
 y &= W_y + X\beta + u, \\
 u &\sim N(0, \sigma^2 I).
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

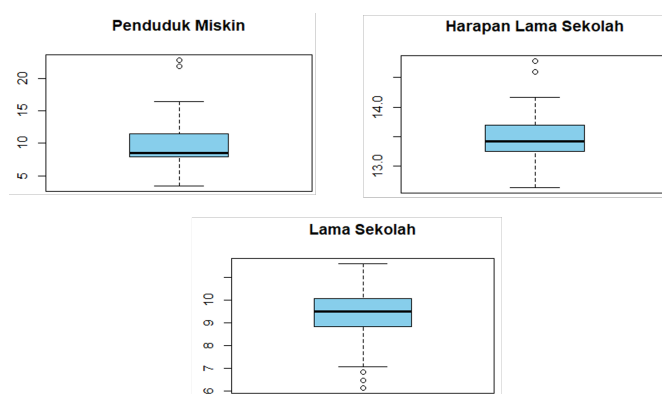
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Analisis Deskriptif

Data BPS Sumatera Utara 2023 menunjukkan bahwa Kota Medan memiliki AHH tertinggi sebesar 74,76, sementara Padang Lawas terendah dengan 71,52. Statistik deskriptif AHH dan variabel bebas yang diduga memengaruhi disajikan pada Tabel 2.

Pencilan dilihat melalui data yang berada diluar garis lurus vertikal (whiskers). Berdasarkan diagram kotak garis masing-masing variabel menunjukkan terdapat pencilan pada variabel

penduduk miskin (X₂) di Kabupaten Nias Barat dan Nias Utara yang memiliki persentase tertinggi. Rata-rata lama sekolah (X₃) terendah ditemukan di Kabupaten Nias, Nias Selatan, dan Nias Utara, sedangkan harapan lama sekolah (X₆) tertinggi tercatat di Kota Medan, Padangsidimpuan, dan Pematangsiantar. Diagram kotak garis pada masing-masing variabel yang terdapat pencilan ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram kotak garis

Tabel 3. Multikolinieritas

Variabel	VIF
X ₁	2,208549
X ₂	4,418766
X ₃	6,222457
X ₄	2,871334
X ₅	3,269556
X ₆	2,691526
X ₇	2,656412

3.2. Model Regresi Linear Berganda

Penelitian ini menggunakan regresi linear berganda untuk mengukur pengaruh variabel independen terhadap variabel dependen [8] dengan estimasi parameter menggunakan metode Ordinary Least Squares (OLS) yang efisien dan tidak bias. Berdasarkan pers. (1) dan pers. (2), diperoleh model regresi hasil estimasi OLS berikut:

$$\begin{aligned}
 \hat{y} &= 69,21263 - 0,00066X_1 + 0,09539X_2 + 0,73258X_3 \\
 &\quad - 0,02693X_4 - 0,125601X_5 - 0,19181X_6 + 0,01637X_7.
 \end{aligned}$$

Model regresi linear berganda diuji dengan asumsi klasik, meliputi uji normalitas, homoskedastisitas, autokorelasi, dan multikolinieritas [24].

Tabel 4. Kabupaten/Kota yang Bertetangga

No	Kabupaten/Kota	Kabupaten/Kota yang Bertetangga
1	Asahan	Tanjung Balai, Toba Samosir, Labuhanbatu Utara, Simalungun, dan Batubara
2	Batu Bara	Serdang Bedagai, Simalungun, dan Asahan
3	Dairi	Karo, Pakpak Bharat, dan Samosir
4	Deli Serdang	Kota Medan, Kota Binjai, Langkat, Karo, Simalungun, dan Serdang Bedagai
5	Humbang Hasundutan	Pakpak Bharat, Samosir, Tapanuli Utara, dan Tapanuli Tengah
6	Karo	Langkat, Deli Serdang, Simalungun, dan Dairi
7	Kota Binjai	Langkat dan Deli Serdang
8	Kota Gunungsitoli	Nias dan Nias Utara
9	Kota Medan	Deli Serdang
10	Kota Padang Sidempuan	Tapanuli Selatan
11	Kota Pematangsiantar	Simalungun
12	Kota Sibolga	Tapanuli Tengah
13	Kota Tanjung Balai	Asahan
14	Kota Tebing Tinggi	Serdang Bedagai
15	Labuhanbatu	Labuhanbatu Utara, Padang Lawas Utara, dan Labuhanbatu Selatan
16	Labuhanbatu Selatan	Labuhanbatu dan Padang Lawas Utara
17	Labuhanbatu Utara	Asahan, Toba Samosir, Tapanuli Utara, Tapanuli Selatan, Padang Lawas Utara, dan Labuhanbatu
18	Langkat	Kota Binjai, Karo, dan Deli Serdang
19	Mandailing Natal	Padang Lawas dan Tapanuli Selatan
20	Nias	Kota Gunungsitoli, Nias Utara, Nias Barat, dan Nias Selatan
21	Nias Barat	Nias, Nias Utara, dan Nias Selatan
22	Nias Selatan	Nias dan Nias Barat
23	Nias Utara	Kota Gunungsitoli, Nias, dan Nias Barat
24	Padang Lawas	Mandailing Natal dan Tapanuli Selatan
25	Padang Lawas Utara	Padang Lawas, Tapanuli Selatan, Labuhanbatu, Labuhanbatu Utara, dan Labuhanbatu Selatan
26	Pakpak Bharat	Dairi, Samosir, Humbang Hasundutan, dan Tapanuli Tengah
27	Samosir	Dairi, Pakpak Bharat, dan Humbang Hasundutan
28	Serdang Bedagai	Deli Serdang, Simalungun, Batu Bara, dan Kota Tebing Tinggi
29	Simalungun	Karo, Deli Serdang, Serdang Bedagai, Batu Bara, Asahan, Toba Samosir, dan Kota Pematangsiantar
30	Tapanuli Selatan	Mandailing Natal, Padang Lawas, Labuhanbatu Utara, Tapanuli Utara, Kota Padang Sidempuan, Padang Lawas Utara, dan Tapanuli Tengah
31	Tapanuli Tengah	Pakpak Bharat, Humbang Hasundutan, Tapanuli Utara, Tapanuli Selatan, dan Kota Sibolga
32	Tapanuli Utara	Toba Samosir, Labuhanbatu Utara, Tapanuli Selatan, Tapanuli Tengah, dan Humbang Hasundutan
33	Toba Samosir	Asahan, Labuhanbatu Utara, Simalungun, dan Tapanuli Utara

3.2.1. Uji Normalitas

Uji normalitas bertujuan memastikan residual model regresi berdistribusi normal, dilakukan dengan metode Jarque-Bera. Hasil menunjukkan dengan rumus sesuai pers. (3) yaitu didapat nilai statistik 0,56287 dan p-value 0,7547, yang lebih besar dari $\alpha = 0,05$, sehingga hipotesis nol tidak ditolak. Dengan demikian, residual memenuhi asumsi normalitas pada tingkat signifikansi 5%.

3.2.2. Uji Homoskedastisitas

Uji homoskedastisitas dengan Breusch-Pagan dengan rumus yang disajikan pada pers. (4) menunjukkan statistik 4,2686 dan p-value 0,7484, lebih besar dari $\alpha = 0,05$, sehingga hipotesis nol tidak ditolak. Hal ini mengindikasikan varians residual konstan (homogen), memenuhi asumsi homoskedastisitas yang penting bagi validitas estimasi OLS.

3.2.3. Uji Autokorelasi

Uji autokorelasi menggunakan Durbin-Watson pada pers. (5) menghasilkan nilai 1,9256 yang berada antara batas bawah dan atas ($dL < d < dU$), sehingga hasilnya inconclusive dan tidak dapat dipastikan ada tidaknya autokorelasi. Diperlukan uji tambahan untuk konfirmasi lebih lanjut.

3.2.4. Uji Multikolinearitas

Uji multikolinearitas pada variabel bebas dilakukan dengan menghitung *Variance Inflation Factor* (VIF) yang didapatkan dengan menggunakan pers. (6). Nilai VIF < 10 menunjukkan tidak adanya multikolinearitas pada model regresi. Hasil selengkapnya disajikan pada Tabel 3.

Berdasarkan Tabel 3, diperoleh bahwa variabel X_1 , X_2 , X_3 , X_4 , X_5 , X_6 , dan X_7 memiliki nilai VIF < 10 . Hal ini menunjukkan bahwa tidak terdapat masalah multikolinearitas antar variabel bebas pada Angka Harapan Hidup di Sumatera Utara tahun 2023 dalam model regresi linear berganda. Uji asumsi klasik me-

nunjukkan galat berdistribusi normal, ragam homogen, dan tidak ada multikolinieritas antar variabel bebas. Namun, uji autokorelasi menghasilkan hasil yang tidak pasti. Dengan demikian, galat pada model regresi linear berganda OLS belum sepenuhnya memenuhi asumsi klasik untuk data Angka Harapan Hidup Sumatera Utara 2023, sehingga analisis dilanjutkan dengan regresi spasial antar lokasi.

3.3. Matrik Pembobot Spasial

Matriks pembobot spasial yang digunakan adalah tipe peringgungan *queen contiguity*, yaitu berdasarkan sisi dan titik sudut antar wilayah yang saling bertetangga [6]. Matriks ini mencakup 33 kabupaten/kota di Sumatera Utara dengan penentuan wilayah bertetangga yang disajikan pada Tabel 4.

Data angka harapan hidup di 33 kabupaten/kota Sumatera Utara digunakan untuk membangun model AHH. Indeks Moran menunjukkan nilai positif yang mengindikasikan adanya ketergantungan spasial dan pola pengelompokan antar wilayah. Uji Lagrange Multiplier menghasilkan nilai sebesar 7,9696 dengan *p-value* = 0,05. Artinya, *p-value* < α Hal ini menandakan bahwa terjadi ketergantungan spasial pada variabel dependen. Selain itu, hasil uji Breusch-Pagan menunjukkan nilai sebesar 1,0067 dengan *p-value* = 0,316. Hal ini bermakna bahwa tidak ada keragaman spasial antar daerah, sehingga varians AHH dianggap homogen.

3.4. Pemodelan Angka Harapan Hidup di Sumatera Utara dengan Model Spatial Autoregressive (SAR)

Berdasarkan kajian awal, ditemukan ketergantungan spasial pada variabel dependen sehingga model SAR dipilih sebagai pendekatan yang tepat. Hasil estimasi model SAR disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Estimasi parameter model SAR

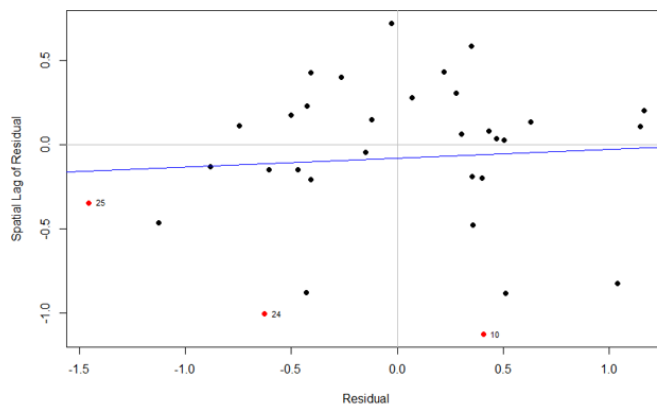
Variabel	Est. Koefisien	Std. Error	Z-hitung	p-value
Konstanta	38,85	12,00	3,23	0,00
X ₁	0,00	0,01	0,23	0,81
X ₂	0,10	0,05	1,82	0,06
X ₃	0,64	0,20	3,13	0,00
X ₄	-0,04	0,02	-1,72	0,08
X ₅	-0,14	0,07	-1,86	0,06
X ₆	-0,02	0,35	-0,06	0,94
X ₇	0,01	0,01	0,94	0,34
Koefisien SAR (λ)	0,41	0,15	2,66	0,00

Model regresi spasial berdasarkan hasil estimasi parameter model SAR sesuai pers. (7), adalah sebagai berikut:

$$\hat{Y} = 0,41605WY + 38,8554739 + 0,0024717X_1 + 0,1053296X_2 + 0,6422856X_3 - 0,0436010X_4 - 0,1451800X_5 - 0,0235660X_6 + 0,0124202X_7.$$

Selanjutnya dilakukan deteksi adanya pencilan spasial pada model SAR dengan menggunakan *Moran's scatterplot*. Hasil deteksi pencilan spasial untuk angka harapan hidup disajikan pada Gambar 2.

Berdasarkan Gambar 2, ditemukan tiga pencilan spasial pada data ke-10, ke-24, dan ke-25 dalam model SAR. Pencilan ini menunjukkan distribusi residual yang tidak homogen, sehingga asumsi homoskedastisitas dilanggar. Kondisi ini mencerminkan



Gambar 2. Moran's Scatterplot untuk residual SAR

ketidakteraturan *error* spasial yang dapat memengaruhi validitas model. Oleh karena itu, model SAR belum sepenuhnya valid karena adanya pencilan spasial signifikan yang dapat memengaruhi estimasi dan interpretasi hasil (referensi).

3.5. Pemodelan Angka Harapan Hidup di Sumatera Utara dengan Model Robust Spatial Autoregressive (RSAR)

Pada model RSAR, iterasi berhenti pada iterasi ke-6 karena selisih mutlak antara $\hat{\beta}_j^5$ dan $\hat{\beta}_j^6$ mendekati nol. Hasil estimasi parameter akhir RSAR estimasi-M disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Estimasi parameter model RSAR

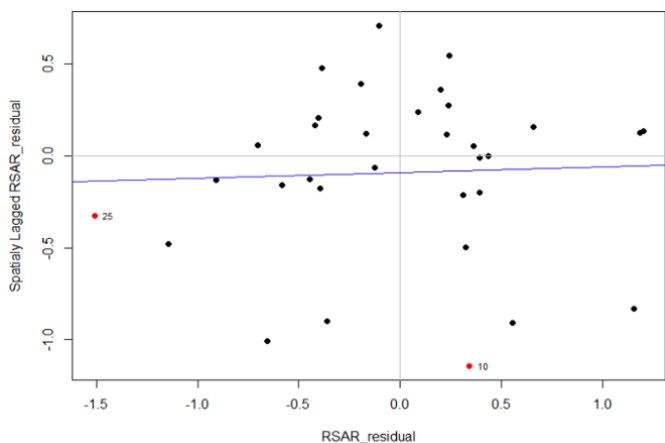
Variabel	Est. Koefisien	Std. Error	Z-hitung	p-value
Konstanta	38,97626962	9,3262520	4,17919	2,925367e-05
X ₁	-0,00087598	0,0076472	-0,11455	9,088023e-01
X ₂	0,11190405	0,0393014	2,84733	4,408753e-03
X ₃	0,70233277	0,1497993	4,68849	2,752257e-06
X ₄	-0,03619291	0,0187023	-1,93521	5,296404e-02
X ₅	-0,13434003	0,0565233	-2,37672	1,746733e-02
X ₆	-0,09222741	0,2530539	-0,36446	7,155164e-01
X ₇	0,00917156	0,0092731	0,98905	3,226373e-01
λ	0,41604978	0,1201532	3,46266	5,348595e-04

Berdasarkan Tabel 6 dan pers. (7), hasil analisis data angka harapan hidup di Sumatera Utara menghasilkan model regresi spasial berdasarkan hasil estimasi parameter model RSAR sebagai berikut:

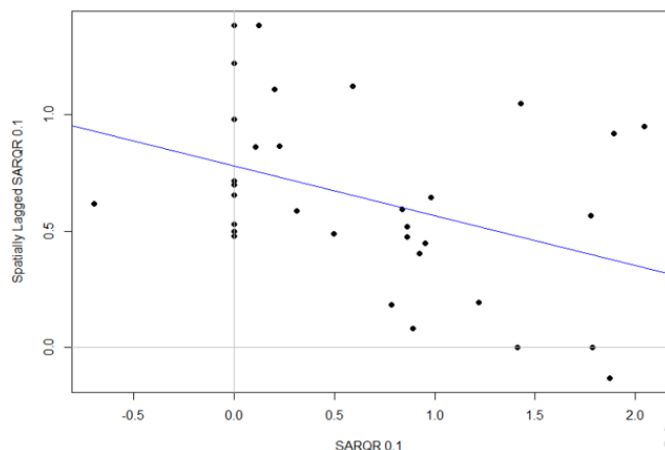
$$\hat{Y} = 0,41605WY + 38,9763 - 0,0008X_1 + 0,1119X_2 + 0,70233X_3 - 0,03619X_4 - 0,13434X_5 - 0,092223X_6 + 0,009172X_7.$$

Adapun hasil deteksi pencilan spasial untuk angka harapan hidup disajikan pada Gambar 3.

Berdasarkan Gambar 3, terlihat bahwa pada model Residual Spatial Autoregressive (RSAR) masih terdapat pencilan spasial, khususnya pada data ke-10 dan ke-25. Kehadiran pencilan ini menandakan bahwa asumsi homogenitas varians atau homoskedastisitas belum sepenuhnya terpenuhi dalam model tersebut. Dengan kata lain, model RSAR belum mampu secara efektif mengatasi pelanggaran terhadap asumsi distribusi sisaan yang homogen. Kondisi ini menunjukkan bahwa struktur spasial yang ditangkap oleh model belum optimal, sehingga pemodelan RSAR



Gambar 3. Moran's Scatterplot untuk residual RSAR



Gambar 4. Moran's Scatterplot untuk residual SARQR

dalam konteks ini masih belum layak untuk diterima atau digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan, karena dapat menghasilkan estimasi yang bias atau tidak reliabel.

3.6. Pemodelan Angka Harapan Hidup di Sumatera Utara dengan Model Spatial Autoregressive Quantile Regression (SARQR)

Model SARQR menganalisis distribusi angka harapan hidup pada berbagai kuantil dengan menghasilkan model berbeda di setiap kuantil. Estimasi parameter variabel independen dan koefisien autoregresif spasial dilakukan menggunakan metode IVQR. Hasil yang diperoleh pada model SARQR untuk setiap kuantil memiliki nilai AIC yang lebih kecil dibandingkan nilai AIC yang dimiliki oleh model SAR dan RSAR. Model SARQR dapat dikatakan sebagai model yang mampu memprediksi AHH yang baik daripada model SAR dan RSAR. Model SARQR untuk kuantil 0,1 dipilih karena memiliki nilai AIC terkecil, menunjukkan akurasi terbaik yang disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Nilai AIC untuk setiap model

Model	Nilai AIC
SAR	84.048
RSAR	93.27388
SARQR kuantil 0.1	23.7764
SARQR kuantil 0.25	29.53373
SARQR kuantil 0.4	32.45415
SARQR kuantil 0.55	32.83183
SARQR kuantil 0.7	30.42145
SARQR kuantil 0.85	25.44836

Berdasarkan Tabel 7, diperoleh model terbaik yaitu model SARQR pada kuantil 0,1 sesuai pers. (8), dengan model sebagai berikut:

$$\hat{Y}_{(0,1)} = 0,8255WY + 4,5282 - 0,00698X_1 + 0,20171X_2 + 0,84993X_3 - 0,06403X_4 - 0,23454X_5 + 0,18285X_6 + 0,01719X_7.$$

Selanjutnya, dilakukan deteksi pencilan spasial dengan menggunakan Moran's scatterplot pada model SARQR kuantil 0,1 yang dapat dilihat pada Gambar 4.

Berdasarkan grafik model pada Gambar 4 yang diperoleh pada residual SARQR kuantil 0.1 menunjukkan tidak terdapat

pencilan spasial. Hal ini menunjukkan berarti model SARQR mampu menangani data yang mengandung pencilan spasial dibandingkan model SAR dan RSAR. Model SARQR sudah tidak terlanggarnya asumsi homogenitas varians dibandingkan model SAR dan RSAR. Hasil ini menunjukkan bahwa perlunya menggunakan pendekatan kuantil dalam model spasial autoregresif untuk menangani pencilan spasial dan distribusi data angka harapan hidup yang tidak merata.

Model SAR menunjukkan adanya ketergantungan spasial yang signifikan antarwilayah di Sumatera Utara, ditunjukkan oleh nilai koefisien spasial sebesar 0,4161 (p-value < 0,01). Hal ini mengindikasikan bahwa AHH suatu kabupaten/kota dipengaruhi oleh AHH di wilayah sekitarnya. Namun, hasil deteksi residual melalui Moran's scatterplot mengungkap keberadaan pencilan spasial (data ke-10, 24, dan 25), yang menunjukkan pelanggaran terhadap asumsi homogenitas varian. Oleh karena itu, meskipun secara spasial valid, model SAR belum layak digunakan untuk pengambilan kebijakan karena tidak robust terhadap outlier.

Model RSAR menggunakan estimasi-M merupakan model yang untuk memodelkan data yang mengandung efek spasial dan menangani pencilan spasial. Hasil estimasi menunjukkan koefisien spasial sebesar 0,4160. Namun, hasil scatterplot residual masih menunjukkan dua pencilan spasial yaitu data ke-10 dan ke-25. Ini mengindikasikan bahwa RSAR lebih baik dari SAR, tetapi belum cukup optimal dalam menghilangkan efek outlier spasial secara menyeluruh. Dengan demikian, RSAR memiliki peningkatan akurasi, namun tetap belum memenuhi kriteria model terbaik.

SARQR pada kuantil 0,1 menghasilkan nilai AIC paling kecil (23,7764), menjadikannya model paling efisien secara statistik. Koefisien autoregresif sebesar 0,8255 menunjukkan ketergantungan spasial yang sangat kuat di wilayah dengan AHH rendah. Tidak ditemukan pencilan spasial pada residual, menandakan bahwa SARQR paling robust terhadap outlier dan mampu menangkap distribusi data ekstrem. Selain itu, variabel X₂ dan X₃ signifikan positif, sedangkan X₅ dan X₆ berpengaruh negatif selaras dengan teori dan mendukung validitas substantif model.

Dari ketiga model yang diuji, SARQR pada kuantil 0,1 terbukti paling sesuai dengan karakteristik data AHH di Sumatera Utara. SAR dan RSAR mampu menangkap efek spasial, namun gagal menangani pencilan secara menyeluruh. Sementara itu, SARQR tidak hanya mengatasi pencilan, tetapi juga mampu mengi-

identifikasi dinamika antarwilayah di kuantil bawah, yang sangat penting untuk kebijakan daerah tertinggal. Oleh karena itu, tujuan penelitian tercapai, dan SARQR kuantil 0,1 direkomendasikan sebagai model terbaik dalam pemodelan AHH di wilayah ini. Hasil analisis menunjukkan bahwa model Spatial Autoregressive Quantile Regression (SARQR) pada kuantil 0,1 merupakan model terbaik dalam memodelkan Angka Harapan Hidup (AHH) di Provinsi Sumatera Utara. Hal ini ditunjukkan oleh nilai AIC terendah (23,7764) dibandingkan model SAR dan RSAR, serta ketidakhadiran pencilan spasial dalam residual model. Koefisien autoregresif sebesar 0,8255 bernilai positif mengindikasikan adanya ketergantungan spasial yang kuat, di mana AHH suatu wilayah sangat dipengaruhi oleh AHH wilayah sekitarnya. Variabel persentase penduduk miskin (X_2) dan rata-rata lama sekolah (X_3) memiliki pengaruh positif signifikan terhadap AHH, menunjukkan bahwa wilayah dengan tingkat kemiskinan lebih rendah dan pendidikan lebih tinggi cenderung memiliki AHH yang lebih baik, khususnya pada wilayah dengan AHH rendah. Sebaliknya, variabel tingkat partisipasi angkatan kerja (X_4) dan variabel tingkat pengangguran terbuka (X_5) menunjukkan pengaruh negatif, mencerminkan beban sosial ekonomi terhadap keberlangsungan hidup. Keunggulan SARQR terletak pada kemampuannya menangkap heterogenitas efek variabel pada kuantil bawah, yang tidak ditangkap oleh SAR maupun RSAR.

Dengan demikian, model SARQR tidak hanya unggul secara statistik, tetapi juga secara substantif memberikan gambaran lebih realistis tentang dinamika spasial AHH, terutama pada daerah-daerah tertinggal, sehingga sangat relevan sebagai dasar perumusan kebijakan berbasis data.

4. Kesimpulan

Hasil analisis menunjukkan bahwa model Spatial Autoregressive Quantile Regression (SARQR) pada kuantil 0,1 merupakan model terbaik berdasarkan nilai Akaike Information Criterion (AIC) terendah sebesar 23,7764 dan kemampuan mengatasi pencilan spasial yang tidak berhasil ditangani oleh SAR maupun RSAR. Model SAR menunjukkan adanya ketergantungan spasial yang signifikan, namun gagal memenuhi asumsi homoskedastisitas karena masih terdapat pencilan. Sementara RSAR, meskipun menggunakan pendekatan robust dan mampu menurunkan dampak pencilan, belum sepenuhnya menghilangkan outlier pada residualnya. Model SARQR berhasil menangkap dinamika spasial AHH secara lebih komprehensif, khususnya pada wilayah dengan AHH rendah, serta menghasilkan estimasi yang signifikan secara statistik maupun substantif. Oleh karena itu, SARQR pada kuantil 0,1 direkomendasikan sebagai model optimal dalam memodelkan AHH di Provinsi Sumatera Utara dan relevan untuk digunakan sebagai dasar penyusunan kebijakan kesehatan yang berbasis data dan wilayah. Adapun variabel yang berpengaruh signifikan pada model SARQR terhadap AHH yaitu variabel persentase penduduk miskin (X_2) dan rata-rata lama sekolah (X_3) memiliki pengaruh positif signifikan terhadap AHH, menunjukkan bahwa wilayah dengan tingkat kemiskinan lebih rendah dan pendidikan lebih tinggi cenderung memiliki AHH yang lebih baik. Variabel tingkat partisipasi angkatan kerja (X_4) dan variabel tingkat pengangguran terbuka (X_5) menunjukkan pengaruh negatif, mencerminkan beban

sosial ekonomi terhadap keberlangsungan hidup.

Kontribusi Penulis. Wenni Marlina: Analisis formal, Metodologi, Analisis data, Administrasi, perangkat lunak, kurasi data dan Visualisasi. Rina Filia Sari: Konseptualisasi, Penulisan-peninjauan, penyuntingan, supervisi dan validasi. Semua penulis telah membaca dan menyetujui versi manuskrip yang diterbitkan.

Ucapan Terima Kasih. Para penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penelitian ini dan dalam penyusunan manuskrip. Kami sangat menghargai editor dan reviewer atas masukan serta dukungannya dalam menyempurnakan karya ini.

Pembiayaan. Penelitian ini tidak menerima pendanaan eksternal.

Konflik Kepentingan. Para penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan yang terkait dengan artikel ini.

Ketersediaan Data. Tidak tersedia.

Referensi

- [1] P. R. Arum, R. P. Gautama, I. Fitriani, dan F. Naza, "Identifying Factors that Influence Life Expectancy in Central Java Using Spatial Regression Models," *J. Ilm. Teor. dan Apl. Stat.*, vol. 16, no. 2, hal. 606–613, 2023, doi: [10.36456/jstat.vol16.no2.a8375](https://doi.org/10.36456/jstat.vol16.no2.a8375).
- [2] H. I. Zebua dan I. G. N. M. Jaya, "Spatial autoregressive model of tuberculosis cases in Central Java Province 2019," *CAUCHY J. Mat. Murni dan Apl.*, vol. 7, no. 2, hal. 240–248, 2022, doi: [10.18860/ca.v7i2.13451](https://doi.org/10.18860/ca.v7i2.13451).
- [3] M. S. Nur, P. R. Arum, F. A. Adani, C. A. D. Aryani, dan A. Maulana, "Pemodelan Spatial Autoregressive (SAR) untuk Persentase Kemiskinan di Jawa Barat Tahun 2021," *J. MSA (Mat. Stat. dan Apl.)*, vol. 12, no. 1, hal. 8–14, 2024, doi: [10.24252/msa.v12i1.39449](https://doi.org/10.24252/msa.v12i1.39449).
- [4] A. Aswi *et al.*, "Childhood stunting in Indonesia: assessing the performance of Bayesian spatial conditional autoregressive models," *Geospat. Health*, vol. 19, no. 2, hal. 9, 2024, doi: [10.4081/gh.2024.1321](https://doi.org/10.4081/gh.2024.1321).
- [5] M. Kumalasari dan D. Poerwono, "Analisis Pertumbuhan Ekonomi, Angka Harapan Hidup, Angka Melek Huruf, Rata Rata Lama Sekolah, Pengeluaran Perkapita dan Jumlah Penduduk terhadap Tingkat Kemiskinan Di Jawa Tengah," *eprints.undip.ac.id*, 2011.
- [6] H. Musyarofah, H. Yasin, dan T. Tarno, "Robust spatial autoregressive untuk pemodelan angka harapan hidup provinsi jawa timur," *J. Gaussian*, vol. 9, no. 1, hal. 26–40, 2020, doi: [10.14710/j.gauss.9.1.26-40](https://doi.org/10.14710/j.gauss.9.1.26-40).
- [7] Bphn.go.id, "Hasil Penyelarasan Naskah Akademik Rancangan Undang-Undang Tentang Perubahan Kedua Atas Undang-Undang Nomor 21 Tahun 2001 Tentang Otonomi Khusus Bagi Provinsi Papua."
- [8] H. Yasin, A. R. Hakim, dan B. Warsito, "Development life expectancy model in Central Java using robust spatial regression with M-estimators," *Commun. Math. Biol. Neurosci.*, vol. 2020, no. 2, hal. 1–15, 2020.
- [9] BPS, "Angka Harapan Hidup (AHH) Menurut Provinsi dan Jenis Kelamin - Tabel Statistik - Badan Pusat Statistik Indonesia," 2023. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.bps.go.id/id/statistics->
- [10] D. Aryani, *Perkembangan Kota Dan Permasalahan Lingkungan Perkotaan*, 2024.
- [11] F. Yanuar, T. Abrari, dan I. R. HG, "The construction of unemployment rate model using SAR, quantile regression, and SARQR model," *Pakistan J. Stat. Oper. Res.*, vol. 19, no. 3, hal. 447–458, 2023, doi: [10.18187/pjsor.v19i3.4241](https://doi.org/10.18187/pjsor.v19i3.4241).
- [12] F. Yanuar, T. Abrari, I. R. HG, dan A. Zetra, "Spatial autoregressive quantile regression with application on open unemployment data," *Sci. Technol. Indones.*, vol. 8, no. 2, hal. 321–329, 2023, doi: [10.26554/sti.2023.8.2.321-329](https://doi.org/10.26554/sti.2023.8.2.321-329).
- [13] T. A. Taqiyuddin dan M. Irfan, "Faktor Penyebab Kemiskinan di Provinsi Jawa Barat Menggunakan Spatial Autoregressive Quantile Regression," *J. Sains Mat. dan Stat.*, vol. 8, no. 1, hal. 59–69, 2022, doi: [10.24014/jsms.v8i1.13185](https://doi.org/10.24014/jsms.v8i1.13185).
- [14] A. Hapsery, E. M. P. Hermanto, dan Y. U. Aprilia, "Perbandingan SAR dan SARQR Pada Pemodelan Indeks Pembangunan Manusia di Jawa Tengah Tahun 2022," *J. Gaussian*, vol. 12, no. 4, hal. 581–592, 2024, doi: [10.14710/j.gauss.12.4.581-592](https://doi.org/10.14710/j.gauss.12.4.581-592).
- [15] T. Yu, F. Gao, X. Liu, dan J. Tang, "A spatial autoregressive quantile regression to examine quantile effects of regional factors on crash rates," *Sensors*, vol. 22, no. 1, hal. 5, 2021, doi: [10.3390/s22010005](https://doi.org/10.3390/s22010005).

- [16] L. Usman, A. Saefuddin, dan A. Djuraidah, "Analisis Data Produk Domestik Regional Bruto Pulau Jawa Menggunakan Pendekatan Regresi Kuantil Spasial," *Estimasi J. Stat. Its Appl.*, vol. 4, no. 2, hal. 153–164, 2023, doi: [10.20956/ejsa.v4i2.27573](https://doi.org/10.20956/ejsa.v4i2.27573).
- [17] A. B. Tribhuwaneswari, A. Hapsery, dan W. K. Rahayu, "Spatial autoregressive quantile regression as a tool for modelling human development index factors in 2020 East Java," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2668, no. 1, hal. 1–11, 2022, doi: [10.1063/5.0112828](https://doi.org/10.1063/5.0112828).
- [18] M. I. Rizki, H. Q. Sadida, dan A. N. Fauziah, "Pemodelan Spatial Autoregressive Quantile Regression pada Tingkat Kemiskinan di Provinsi Jawa Barat," *E-Pros. Semin. Nas. Stat. Dep. Stat. FMIPA Univ. Padjadjaran*, vol. 10, no. 1, hal. 1–7, 2021.
- [19] E. Oktaviana, P. R. Arum, dan M. Al Haris, "Pemodelan Spatial Autoregressive Quantile Regression (SARQR) Menggunakan Pembobot Queen Contiguity Pada Kasus Stunting Balita di Indonesia," *Pros. Semin. Nas. Unimus*, vol. 6, no. 2, hal. 411–425, 2023.
- [20] M. I. Rizki dan T. Ammar, "Pemodelan Spatial Autoregressive Quantile Regression Pada Faktor Yang Memengaruhi Tingkat Incident Rate Demam Berdarah Dengue di Jawa Barat," *Pros. Semin. Nas. Mat. dan Stat.*, vol. 2, no. 1, hal. 312–321, 2022.
- [21] T. Abrari, F. Yanuar, dan D. Devianto, "Pemodelan Gizi Buruk Balita Di Indonesia Dengan Model Robust Spasial Autoregresif," *J. Sains Mat. dan Stat.*, vol. 9, no. 2, hal. 97–107, 2023, doi: [10.24014/jsms.v6i2.xxxxx](https://doi.org/10.24014/jsms.v6i2.xxxxx).
- [22] H. Yasin, B. Warsito, A. R. Hakim, dan R. N. Azizah, "Life Expectancy Modeling Using Modified Spatial Autoregressive Model," *Media Stat.*, vol. 15, no. 1, hal. 72–82, 2022, doi: [10.14710/medstat.15.1.72-82](https://doi.org/10.14710/medstat.15.1.72-82).
- [23] D. N. Gujarati dan D. C. Porter, *Basic econometrics*. McGraw-Hill, New York, NY, USA, 2009.
- [24] D. C. Montgomery, E. A. Peck, dan G. G. Vining, *Introduction to linear regression analysis*. John Wiley & Sons, 2021.
- [25] Z. Martha, A. N. Muharromah, D. Permana, dan T. O. Mukthi, "Analisis Tingkat Kejahatan di Jabodetabek Menggunakan Model SARQR Pada Data Yang Mengandung Outlier," *d'Cartesian J. Mat. dan Apl.*, vol. 13, no. 2, hal. 69–72, 2024, doi: [10.35799/dc.13.2.2024.57594](https://doi.org/10.35799/dc.13.2.2024.57594).
- [26] A. Febriyanti, A. Djuraidah, dan A. H. Wigena, "Spatial Autoregressive Quantile Regression Modelling for Gross Domestic Regional Product Data (Case: 113 Districts/Cities in Java in 2010)," *Glob. J. Pure Appl. Math.*, vol. 11, no. 4, hal. 2255–2264, 2015.
- [27] H. I. Zebua, "Spatial autoregressive quantile regression pada kasus tuberkulosis di Kota Bandung," *J. Anal. Res. Stat. Comput.*, vol. 2, no. 2, hal. 1–13, 2023, doi: [10.4590/jarsic.v2i2.24](https://doi.org/10.4590/jarsic.v2i2.24).