

Pemodelan Curah Hujan dan Identifikasi Kluster Spasial Banjir Menggunakan Metode Kriging

Aulia Putri Br Manurung¹, Clara Jocelyn Harefa², Elisabeth Putri Dayanti³, Fitria Rosy⁴,
Kesya Oktariana Br Surbakti⁵, Risa Rozzaqi Rambe⁶

Program Studi Statistika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Medan

Article Info

Article history:

Received: March 2026

Revised: May 2026

Accepted: June 2026

Keywords:

Autokorelasi Spasial

Curah Hujan

Kriging

LISA

Moran's I

Risiko Banjir

Statistical Process Control

ABSTRACT

Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan curah hujan serta mengidentifikasi kluster spasial risiko banjir di wilayah Sumatera Utara menggunakan pendekatan geostatistik. Data yang digunakan meliputi koordinat geografis, curah hujan tahunan, dan indeks risiko banjir. Analisis diawali dengan pengujian autokorelasi spasial menggunakan Moran's I yang menunjukkan adanya pola pengelompokan secara signifikan. Selanjutnya, analisis Local Indicators of Spatial Association (LISA) digunakan untuk mengidentifikasi kluster lokal berupa hotspot dan coldspot. Struktur spasial data dianalisis melalui variogram yang menunjukkan adanya ketergantungan spasial, sehingga memungkinkan penerapan metode kriging untuk interpolasi. Hasil kriging menghasilkan peta kontinu distribusi risiko banjir yang konsisten dengan pola kluster yang teridentifikasi. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan spasial dan geostatistik efektif dalam memahami pola serta memprediksi distribusi risiko banjir, sehingga dapat mendukung perencanaan mitigasi bencana yang lebih tepat sasaran.

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



Corresponding Author:

Clara Jocelyn Harefa

Program Studi Statistika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Negeri Medan

20221 Deli Serdang, Medan, Indonesia

Email: claraharefa.4243260033@mhs.unimed.ac.id

1. PENDAHULUAN

Banjir merupakan salah satu bencana alam yang sering terjadi di berbagai wilayah, baik di perkotaan maupun pedesaan. Fenomena ini tidak hanya disebabkan oleh faktor alam, tetapi juga oleh aktivitas manusia yang turut memperburuk kondisi lingkungan. Di beberapa daerah, medan banjirseringkalimenjadi tantangan yang sulit sekali untuk ditangani. Medan banjir merujuk pada kondisi lingkungan yang terkena dampak banjir, termasuk area yang tergenang air, medan yang terhambat, serta berbagai infrastruktur yang terganggu. Seperti yang terjadi di daerah perkotaan dengan sistem drainase yang tidak memadai, permasalahan medan banjir akan menjadi lebih kompleks, karena dapat menyebabkan kerugian material bahkan berpotensi menimbulkan jatuhnya korban jiwa (1).

Curah hujan merupakan variabel iklim yang bersifat acak namun tetap menunjukkan pola musiman yang berulang, terutama di wilayah tropis seperti Indonesia. Keterlambatan dalam mengantisipasi lonjakan curah hujan sering kali menjadi penyebab utama kegagalan mitigasi banjir. Oleh karena itu, analisis data historis menggunakan pendekatan deret waktu (*time series*) merupakan metode yang sangat relevan. Melalui proses telaah pola curah hujan pada periode sebelumnya, potensi kejadian ekstrem yang dapat memicu banjir dapat diidentifikasi dan diproyeksikan ke masa depan, sehingga memberikan dasar yang kuat bagi pembuat kebijakan dalam menyusun langkah mitigasi yang lebih efektif (2). Beberapa faktor utama mempengaruhi timbulnya banjir, antara lain faktor alamiah dan antropogenik. Faktor alamiah meliputi curah hujan tinggi, topografi yang datar atau cekung, dan pasang surut air laut. Sementara faktor antropogenik mencakup alih fungsi lahan, urbanisasi tanpa perencanaan drainase memadai, dan kerusakan daerah aliran Sungai. Perubahan tata guna lahan yang tidak terkendali, seperti konversi hutan menjadi permukiman atau lahan pertanian, menyebabkan berkurangnya area resapan air, sehingga meningkatkan risiko banjir. Selain itu, sistem drainase yang buruk di wilayah perkotaan mengakibatkan air hujan tidak dapat mengalir dengan lancar, memperpanjang durasi genangan dan memperparah dampak banjir (3).

Dalam proses menentukan risiko banjir dengan menggunakan Algoritma K-Means, masalah utama yang muncul adalah kompleksitas pola curah hujan ekstrem, yang sulit diprediksi dengan metode konvensional. Ada kemungkinan bahwa kejadian banjir di disebabkan oleh variasi curah hujan yang sering terjadi. Ketidamampuan sistem konvensional untuk secara akurat dan cepat mengidentifikasi pola, yang disebabkan oleh variasi yang signifikan secara spasial dan temporal, merupakan masalah utama yang muncul. Selain itu, upaya untuk mengidentifikasi risiko banjir secara efektif menjadi lebih sulit karena masalah seperti keterbatasan data historis dan kompleksitas analisis spasial. Perubahan iklim global memperumit kondisi ini, dan ketidakpastian dalam model prediksi cuaca meningkat. Akibatnya, metode yang lebih canggih diperlukan, seperti Algoritma K-Means, yang akan memungkinkan kita untuk membagi pola cuaca yang kompleks menjadi kategori yang lebih mudah diinterpretasikan. Kebutuhan mendesak untuk meningkatkan sistem peringatan dini dan pengendalian banjir adalah alasan mengapa masalah ini muncul kembali. Dengan menggunakan algoritma k-means, kami berharap dapat menghasilkan solusi yang lebih akurat dan responsive (4).

Kriging adalah metode interpolasi geostatistik yang dalam teknik perhitungannya mengandalkan pada fungsi matematik dan statistik untuk mendapatkan hasil prediksi yang kredibel. Metode kriging terdiri dari beberapa jenis varian diantaranya adalah ordinary kriging (OK), simple kriging, indikator kriging (IK) dan co-kriging, dengan metode ordinary kriging sebagai varian yang paling sering digunakan dalam interpolasi. Ordinary kriging (OK) adalah salah satu varian metode kriging yang paling dasar. OK memberikan estimasi pada lokasi yang tidak terobservasi, berdasarkan rata-rata tertimbang dari data disekitarnya pada suatu area tertentu. Saat ini metode OK secara luas telah digunakan di industri pertambangan terutama pada bidang estimasi sumberdaya dan cadangan, serta grade control (5). Pada Ordinary Kriging penduga suatu nilai variabel pada titik tertentu dilakukan dengan cara mengamati data yang sejenis pada daerah lain. Bobot dalam metode ordinary kriging ini dipengaruhi oleh model variogram, sehingga ketepatan pada pemilihan model variogram akan memberikan pendugaan yang baik pada metode kriging (Isaaks dan Srivastava, 1989). Variogram merupakan grafik variansi terhadap jarak (*lag*), dan setengah dari kuantitas variogram disebut semivariogram. Semivariogram dapat digunakan untuk mengukur korelasi spasial berupa variansi beda pengamatan pada lokasi. Terdapat beberapa model semivariogram, semivariogram yang sering digunakan yaitu model semivariogram spherical, exponential, dan Gaussian (6). Mengingat keadaan tersebut, prediksi spasial yang akurat tentang intensitas curah hujan sangat penting untuk mendukung perencanaan regional, alokasi sumber daya air, dan strategi mitigasi bencana. Namun, pengukuran curah hujan biasanya diperoleh dari sejumlah stasiun yang terbatas, sehingga mengakibatkan kesenjangan spasial dalam cakupan data. Dalam konteks ini, Ordinary Kriging berfungsi sebagai teknik interpolasi geostatistik yang ampuh untuk memperkirakan curah hujan di lokasi yang tidak tersampel menggunakan model autokorelasi spasial dan variogram. Kriging, sebagai estimator linear tak bias terbaik, memperhitungkan ketergantungan spasial di antara titik data yang diamati untuk menghasilkan prediksi optimal. Beberapa varian teknik ini telah dikembangkan, termasuk Indicator

Kriging, Simple Kriging, Ordinary Kriging, dan Co-Kriging, masing-masing menawarkan keunggulan spesifik tergantung pada struktur data dan tujuan pemodelan (7).

2. METHOD

2.1 Desain dan Sumber data

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis geostatistik dan analisis spasial untuk mempelajari pola sebaran serta memprediksi risiko banjir di 20 wilayah administratif Sumatera Utara. Data yang digunakan meliputi koordinat geografis (longitude dan latitude), rata-rata curah hujan tahunan (mm), serta indeks risiko banjir (skala 0-100) yang bersumber dari dataset sekunder. Rentang curah hujan bervariasi antara 2000 hingga 2800 mm, sementara indeks risiko banjir bergerak dari 55 hingga 85, sehingga menyediakan variasi spasial yang memadai untuk dianalisis.

2.2 Analisis Autokorelasi Spasial dan Identifikasi Kluster Lokal

Sebelum melakukan interpolasi, penelitian terlebih dahulu menguji keberadaan ketergantungan spasial antar wilayah menggunakan indeks Moran's I. Rumus yang digunakan adalah :

$$I = \frac{n}{\sum_i \sum_j w_{ij}} \cdot \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}$$

Keterangan :

n = jumlah wilayah

x_i = nilai di lokasi i

$\bar{x}$ = rata-rata

w_{ij} = bobot spasial

Nilai I yang positif mengindikasikan pola mengelompok, negatif berarti menyebar, dan mendekati nol menunjukkan pola acak. Untuk menangkap pola lokal yang mungkin tidak terdeteksi oleh Moran's I global, penelitian ini melanjutkan dengan LISA (Local Indicators of Spatial Association) menggunakan rumus Local Moran's I :

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{S^2} \sum_j w_{ij} (x_j - \bar{x})$$

Keterangan :

I_i = nilai LISA di lokasi ke- i

x_i = nilai di lokasi i

$\bar{x}$ = rata-rata

w_{ij} = bobot spasial antara lokasi i dan j

S^2 = varians

Hasil LISA mengklasifikasikan setiap wilayah ke dalam empat kategori : High-High (klaster risiko tinggi), Low-Low (klaster risiko rendah), High-Low (outlier), atau Low-High (outlier). Kedua analisis ini dibangun di atas matriks bobot spasial berbasis jarak invers antar titik koordinat.

2.3 Pemodelan Variogram dan Interpolasi Kriging

Secara matematis, semivariogram didefinisikan sebagai setengah nilai harapan kuadrat selisih antara dua nilai variabel yang dipisahkan oleh vektor jarak h , yang dinyatakan dengan persamaan (Matheron, 1963):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

Keterangan :

$\gamma(h)$ = nilai semivariogram pada jarak h

$N(h)$ = jumlah pasangan titik pada jarak h

$Z(x_i)$ = nilai pada lokasi x_i

$Z(x_i + h)$ = nilai pada lokasi yang berjarak h

Parameter utama variogram terdiri atas nugget, sill, dan range, yang masing-masing merepresentasikan variabilitas mikro atau kesalahan pengukuran, varians total data, serta jarak maksimum pengaruh spasial antar sampel(8).

Parameter nugget, sill, dan range yang diperoleh dari fitting model teoritis (spherical, eksponensial, atau gaussian) kemudian menjadi dasar perhitungan bobot dalam metode kriging. Interpolasi kriging dilakukan menggunakan rumus umum :

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$$

Keterangan :

$\hat{Z}(x_0)$ = nilai prediksi di lokasi x_0

$Z(x_i)$ = nilai pada lokasi pengamatan ke i

λ_i = bobot kriging

n = jumlah titik pengamatan

Bobot λ_i dihitung dengan meminimalkan varians prediksi melalui sistem persamaan kriging, sehingga menghasilkan prediksi yang tidak bias dan optimal. Proses ini menghasilkan peta kontinu sebaran risiko banjir pada grid beraturan di seluruh wilayah studi. Validasi model dilakukan dengan metode validasi silang (cross-validation) menggunakan metrik RMSE dan MAE untuk menilai akurasi prediksi.

2.4 Sintesis dan Visualisasi Spasial

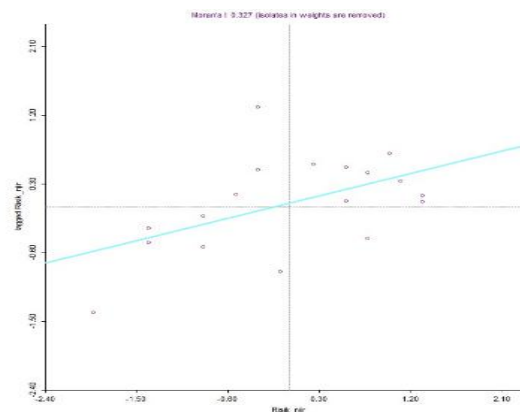
Seluruh hasil analisis-mulai dari autokorelasi global, kluster lokal LISA, hingga peta risiko hasil kriging-diintegrasikan ke dalam peta-peta tematik yang saling terkait. Integrasi ini memungkinkan identifikasi wilayah prioritas mitigasi bencana secara spasial sekaligus menyediakan dasar ilmiah bagi pengambilan keputusan dalam penanggulangan risiko banjir di Sumatera Utara.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Data dan Pola Awal Spasial

Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi curah hujan tahunan dan indeks risiko banjir pada wilayah Sumatera Utara. Nilai curah hujan berkisar antara 2000 hingga 2800 mm, sedangkan risiko banjir berada pada rentang 55 hingga 85. Secara umum, terdapat variasi spasial yang menunjukkan adanya perbedaan karakteristik antar wilayah.

3.2 Autokorelasi Spasial Global (Moran's I)

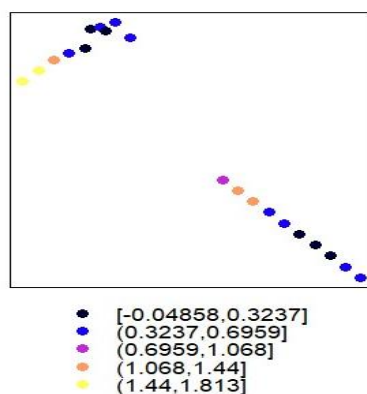


Gambar 1. Moran's Scatterplot

Berdasarkan hasil analisis Moran Scatterplot menggunakan GeoDa, terlihat bahwa data yang dianalisis menunjukkan adanya pola hubungan spasial antar wilayah. Moran Scatterplot digunakan untuk menggambarkan hubungan antara nilai suatu variabel pada suatu wilayah dengan nilai rata-rata variabel tersebut pada wilayah tetangganya (spatial lag). Grafik tersebut terbagi ke dalam empat kuadran utama, yaitu kuadran High-High (HH), Low-Low (LL), High-Low (HL), dan Low-High (LH). Kuadran High-High menunjukkan wilayah dengan nilai tinggi yang dikelilingi oleh wilayah bernilai tinggi, sedangkan kuadran Low-Low menunjukkan wilayah dengan nilai rendah yang berada di sekitar wilayah bernilai rendah. Sementara itu, kuadran High-Low dan Low-High menunjukkan adanya outlier spasial, yaitu wilayah dengan karakteristik yang berbeda dibandingkan dengan wilayah di sekitarnya. Dari hasil visualisasi yang diperoleh, terlihat bahwa sebagian besar titik cenderung berada pada kuadran High-High dan Low-Low. Hal ini menunjukkan bahwa wilayah dengan nilai yang tinggi cenderung berdekatan dengan wilayah yang juga

memiliki nilai tinggi, dan demikian pula untuk wilayah dengan nilai rendah. Pola ini mengindikasikan adanya kecenderungan pengelompokan spasial (spatial clustering). Selain itu, terdapat beberapa titik yang berada pada kuadran High-Low dan Low-High, yang menunjukkan adanya wilayah-wilayah yang berperan sebagai outlier spasial. Wilayah ini memiliki nilai yang tidak sejalan dengan lingkungan sekitarnya, sehingga dapat menjadi perhatian khusus dalam analisis lebih lanjut. Secara keseluruhan, pola sebaran titik pada Moran Scatterplot menunjukkan adanya hubungan linear positif antara nilai variabel dengan nilai spasial lag-nya. Hal ini mengindikasikan bahwa nilai variabel tidak tersebar secara acak, melainkan memiliki kecenderungan mengikuti pola spasial tertentu

3.3 Identifikasi Kluster Lokal (LISA)

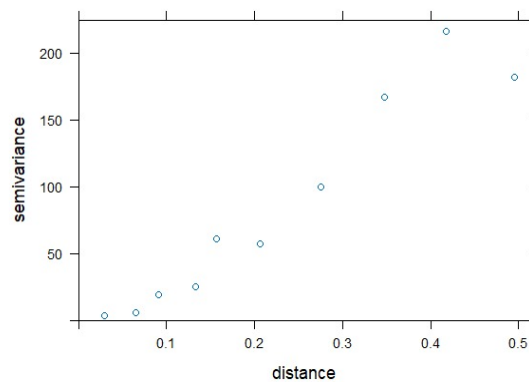


Gambar 2. Peta LISA

Berdasarkan hasil analisis *Local Indicators of Spatial Association* (LISA), diperoleh indikasi adanya pola pengelompokan spasial pada variabel risiko banjir yang dipengaruhi oleh curah hujan di wilayah penelitian. Pola ini terlihat dari perbedaan kategori kluster yang terbentuk, yang menunjukkan bahwa distribusi risiko banjir tidak bersifat acak, melainkan mengikuti struktur spasial tertentu. Secara umum, hasil analisis LISA mengelompokkan wilayah ke dalam empat kategori utama, yaitu *High-High* (HH), *Low-Low* (LL), *High-Low* (HL), dan *Low-High* (LH). Wilayah yang termasuk dalam kategori *High-High* menunjukkan daerah dengan tingkat risiko banjir tinggi yang dikelilingi oleh wilayah lain dengan risiko tinggi pula. Kondisi ini umumnya berkaitan dengan wilayah yang memiliki curah hujan tinggi serta karakteristik lingkungan yang mendukung terjadinya banjir. Sebaliknya, kategori *Low-Low* mencerminkan wilayah dengan tingkat risiko banjir rendah yang berada di antara wilayah lain dengan risiko rendah, yang biasanya memiliki kondisi hidrologi yang lebih stabil. Berdasarkan visualisasi hasil LISA, terlihat adanya kecenderungan pengelompokan wilayah dengan tingkat risiko banjir yang serupa pada beberapa bagian wilayah Sumatera Utara. Area dengan warna yang seragam dan saling berdekatan menunjukkan adanya kluster spasial, baik berupa kluster risiko tinggi maupun kluster risiko rendah. Hal ini mengindikasikan bahwa wilayah yang berdekatan cenderung memiliki karakteristik curah hujan dan risiko banjir yang relatif sama. Selain itu, terdapat pula beberapa wilayah yang termasuk dalam kategori *High-Low* atau *Low-High*. Kategori ini menunjukkan adanya ketidaksesuaian antara nilai suatu wilayah dengan wilayah di sekitarnya, yang dapat diinterpretasikan sebagai *spatial outlier*. Misalnya, suatu daerah dengan risiko banjir tinggi yang dikelilingi oleh wilayah dengan risiko rendah dapat mengindikasikan adanya faktor lokal tertentu, seperti kondisi topografi, drainase, atau penggunaan lahan yang berbeda. Secara keseluruhan, hasil analisis LISA menunjukkan adanya autokorelasi spasial lokal pada data risiko banjir di Sumatera Utara. Wilayah yang berdekatan cenderung memiliki tingkat risiko yang serupa, sehingga dapat disimpulkan bahwa terdapat keterkaitan spasial yang signifikan antara curah hujan dan risiko banjir antar wilayah. Temuan ini memperkuat pentingnya pendekatan spasial dalam analisis kebencanaan, khususnya dalam perencanaan mitigasi banjir berbasis wilayah.

3.4 Struktur Spasial Berdasarkan Variogram

Variogram menunjukkan bahwa nilai semivarians meningkat seiring bertambahnya jarak antar lokasi. Hal ini menandakan adanya struktur spasial yang kuat.

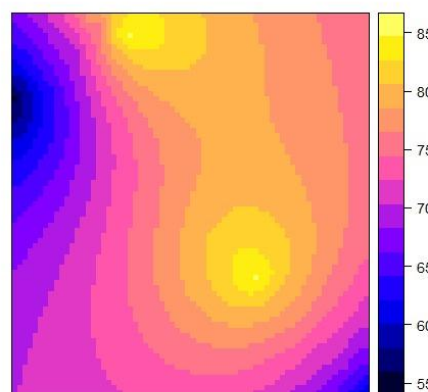


Gambar 3. Variogram

Analisis variogram empiris menunjukkan adanya hubungan yang jelas antara jarak spasial dan tingkat keragaman data. Hal ini ditunjukkan oleh pola peningkatan nilai semivarian seiring dengan bertambahnya jarak antar lokasi pengamatan. Kondisi tersebut mengindikasikan adanya autokorelasi spasial positif, di mana wilayah yang berdekatan cenderung memiliki karakteristik risiko banjir yang lebih mirip dibandingkan dengan wilayah yang berjauhan. Selain itu, kurva variogram belum menunjukkan kecenderungan mencapai nilai sill (titik stabil), sehingga pola keragaman spasial masih terus meningkat pada jarak yang lebih besar. Fenomena ini mengindikasikan bahwa struktur spasial dalam data belum sepenuhnya terjelaskan dalam rentang jarak yang diamati, sehingga model variogram teoritis tidak dapat diperoleh secara optimal melalui pendekatan otomatis. Oleh karena itu, diperlukan penyesuaian parameter model secara manual dalam proses pemodelan. Pada jarak yang relatif dekat, nilai semivarian yang rendah menunjukkan bahwa variasi lokal antar wilayah cukup kecil. Hal ini mencerminkan konsistensi karakteristik risiko banjir pada lokasi yang saling berdekatan. Namun demikian, terdapat fluktuasi nilai semivarian pada beberapa interval jarak, yang mengindikasikan adanya ketidakteraturan dalam distribusi data atau kemungkinan keterbatasan jumlah titik pengamatan. Secara keseluruhan, hasil analisis variogram ini menegaskan adanya ketergantungan spasial yang cukup kuat dalam data risiko banjir. Dengan demikian, metode interpolasi berbasis geostatistik seperti kriging dinilai relevan untuk digunakan dalam mengestimasi nilai pada lokasi yang tidak teramati, meskipun diperlukan perhatian khusus dalam penentuan model variogram agar hasil estimasi lebih akurat.

3.5 Interpolasi Spasial Menggunakan Kriging

Hasil interpolasi kriging menunjukkan pola distribusi risiko banjir yang kontinu. Wilayah dengan risiko tinggi membentuk zona tertentu yang konsisten dengan hasil analisis sebelumnya.



Gambar 4. Peta Kriging

Hasil interpolasi spasial menggunakan metode kriging menghasilkan peta distribusi risiko banjir yang menunjukkan pola variasi nilai secara kontinu pada seluruh wilayah studi. Berdasarkan visualisasi tersebut, terlihat adanya perbedaan intensitas risiko banjir yang cukup signifikan antar lokasi, yang ditunjukkan melalui gradasi warna dari biru ke kuning.

Wilayah dengan warna kuning hingga oranye merepresentasikan nilai risiko banjir yang relatif tinggi, sedangkan wilayah dengan warna biru hingga ungu menunjukkan tingkat risiko yang lebih rendah. Secara spasial, area dengan nilai tinggi tampak terkonsentrasi pada bagian tengah hingga beberapa area di bagian atas peta, yang mengindikasikan adanya klaster wilayah dengan kerentanan banjir yang lebih besar. Sebaliknya, area dengan nilai rendah cenderung berada pada bagian tepi tertentu, yang menunjukkan kondisi yang relatif lebih aman terhadap potensi banjir. Pola transisi warna yang halus antar wilayah mencerminkan kemampuan metode kriging dalam menghasilkan estimasi nilai yang kontinu berdasarkan struktur ketergantungan spasial yang telah diidentifikasi sebelumnya melalui variogram. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan nilai risiko banjir tidak terjadi secara tiba-tiba, melainkan mengikuti pola spasial yang sistematis. Selain itu, keberadaan beberapa titik dengan nilai maksimum yang menonjol mengindikasikan adanya hotspot atau pusat konsentrasi risiko banjir yang perlu mendapat perhatian khusus dalam perencanaan mitigasi. Sebaliknya, wilayah dengan nilai minimum dapat dipertimbangkan sebagai area dengan tingkat kerentanan yang lebih rendah. Secara keseluruhan, hasil interpolasi ini memperkuat temuan sebelumnya bahwa terdapat struktur spasial yang signifikan dalam data risiko banjir. Oleh karena itu, pendekatan geostatistik seperti kriging terbukti efektif dalam memodelkan dan memetakan distribusi risiko banjir, serta memberikan informasi yang lebih komprehensif untuk mendukung pengambilan keputusan berbasis wilayah.

3.6 Sintesis Hasil

Secara keseluruhan, hasil analisis global maupun lokal yang telah dilakukan menunjukkan bahwa risiko banjir di wilayah penelitian memiliki pola spasial yang kuat dan tidak bersifat acak. Nilai Moran's I yang diperoleh mengindikasikan adanya autokorelasi spasial global, yang berarti bahwa wilayah dengan tingkat risiko banjir tertentu cenderung berdekatan dengan wilayah yang memiliki karakteristik serupa. Temuan ini diperkuat oleh hasil analisis LISA yang mampu mengidentifikasi pola pengelompokan lokal dalam bentuk klaster *High-High* dan *Low-Low*, serta keberadaan beberapa *spatial outlier* pada kategori *High-Low* dan *Low-High*. Lebih lanjut, analisis variogram menunjukkan adanya hubungan yang jelas antara jarak spasial dan tingkat keragaman data, di mana nilai semivarian meningkat seiring dengan bertambahnya jarak. Hal ini menegaskan adanya ketergantungan spasial dalam data risiko banjir, sehingga pendekatan geostatistik menjadi relevan untuk digunakan. Meskipun variogram empiris belum sepenuhnya mencapai kondisi sill yang stabil, pola yang terbentuk tetap menunjukkan struktur spasial yang cukup kuat untuk mendukung proses interpolasi. Hasil interpolasi menggunakan metode kriging memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai distribusi risiko banjir secara kontinu di seluruh wilayah studi. Peta kriging menunjukkan adanya variasi intensitas risiko banjir yang membentuk pola spasial tertentu, dengan beberapa area teridentifikasi sebagai zona dengan risiko tinggi (*hotspot*) dan area lainnya sebagai zona dengan risiko relatif rendah. Pola ini sejalan dengan hasil LISA, di mana wilayah yang tergolong dalam klaster *High-High* pada analisis lokal juga cenderung muncul sebagai area dengan nilai tinggi pada peta hasil kriging. Keterkaitan antara hasil LISA dan kriging menunjukkan konsistensi dalam identifikasi pola spasial, baik dalam bentuk klaster diskrit maupun permukaan kontinu. Hal ini memperkuat validitas hasil analisis dan menunjukkan bahwa metode yang digunakan saling melengkapi dalam menjelaskan fenomena yang dikaji. Dengan demikian, pendekatan gabungan antara analisis autokorelasi spasial dan interpolasi geostatistik terbukti efektif dalam mengidentifikasi, memodelkan, dan memvisualisasikan distribusi risiko banjir. Secara keseluruhan, sintesis hasil ini menegaskan bahwa risiko banjir di wilayah penelitian dipengaruhi oleh faktor spasial yang signifikan, sehingga penanganannya perlu mempertimbangkan aspek keterkaitan antar wilayah. Informasi yang dihasilkan dari analisis ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam penyusunan strategi mitigasi bencana yang lebih terarah dan berbasis wilayah, khususnya dalam mengidentifikasi area prioritas penanganan dan perencanaan pengelolaan risiko banjir secara berkelanjutan.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa distribusi risiko banjir di wilayah Sumatera Utara tidak bersifat acak, melainkan memiliki pola spasial yang jelas dan terstruktur. Hal ini dibuktikan melalui analisis autokorelasi spasial global menggunakan Moran's I yang menghasilkan nilai positif, yang mengindikasikan adanya kecenderungan pengelompokan wilayah berdasarkan tingkat risiko banjir. Temuan ini diperkuat oleh hasil Moran Scatterplot yang menunjukkan dominasi observasi pada kuadran *High-High* dan *Low-Low*, sehingga mengonfirmasi adanya hubungan spasial positif antar wilayah. Pada tingkat lokal, analisis LISA berhasil mengidentifikasi keberadaan klaster spasial yang lebih spesifik. Wilayah dengan kategori *High-High* menunjukkan konsentrasi daerah berisiko tinggi yang berpotensi menjadi hotspot banjir, sementara kategori *Low-Low* mengindikasikan wilayah dengan risiko rendah yang relatif stabil. Di sisi lain, keberadaan kategori

High–Low dan Low–High mencerminkan adanya outlier spasial yang menunjukkan perbedaan karakteristik antara suatu wilayah dengan lingkungan sekitarnya. Lebih lanjut, hasil analisis variogram menunjukkan adanya struktur spasial yang kuat, di mana nilai semivarians meningkat seiring bertambahnya jarak antar lokasi. Pola ini mengindikasikan bahwa variabel yang dianalisis, khususnya curah hujan dan risiko banjir, memiliki ketergantungan spasial yang signifikan. Kondisi tersebut menjadi dasar yang kuat untuk penerapan metode kriging dalam memodelkan dan memprediksi distribusi risiko banjir secara spasial. Penerapan metode kriging menghasilkan peta interpolasi yang mampu menggambarkan distribusi risiko banjir secara kontinu di seluruh wilayah penelitian. Hasil interpolasi menunjukkan bahwa wilayah dengan risiko tinggi membentuk zona tertentu yang konsisten dengan hasil analisis autokorelasi dan klaster spasial, sehingga menguatkan validitas pendekatan yang digunakan. Dengan demikian, integrasi antara analisis autokorelasi spasial dan metode kriging terbukti efektif dalam mengidentifikasi pola dan memodelkan distribusi risiko banjir. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa pendekatan geostatistik dan analisis spasial memberikan pemahaman yang komprehensif terhadap fenomena banjir, serta mampu menjadi dasar ilmiah yang kuat dalam mendukung perencanaan mitigasi bencana berbasis wilayah.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Statistika, Universitas Negeri Medan, atas dukungan dan fasilitas yang diberikan selama proses penelitian ini. Penulis juga mengapresiasi semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian penelitian ini.

Pendanaan

Penulis menyatakan bahwa penelitian ini tidak menerima pendanaan khusus dari lembaga mana pun, baik dari sektor publik, komersial, maupun nirlaba..

Kontribusi Penulis

Pernyataan kontribusi penulis disusun berdasarkan Contributor Roles Taxonomy (CRediT) untuk menjelaskan peran masing-masing penulis dalam penelitian ini.

C : Conceptualization	I : Investigation	Vi : Visualization
M : Methodology	R : Resources	Su : Supervision
So : Software	D : Data Curation	P : Project administration
Va : Validation	O : Writing - Original Draft	Fu : Funding acquisition
Fo : Formal analysis	E : Writing - Review & Editing	

Nama Penulis	C	M	So	Va	Fo	I	R	D	O	E	Vi	Su	P	Fu
Aulia Putri Br Manurung	✓			✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	
Clara Jocelyn Harefa	✓		✓		✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓		
Elisabeth Putri Dayanti								✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Fitria Rosy								✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Kesya Oktariana Br Surbakti								✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Risa Rozzaqi Rambe	✓	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓			✓	

Ketersediaan Data

Data yang mendukung hasil penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari platform Kaggle dan tersedia secara publik. Dataset tersebut dapat diakses melalui situs resmi Kaggle pada tautan yang sesuai dengan sumber data yang digunakan dalam penelitian ini..

DAFTAR PUSTAKA

1. Nabila MP, Tanjung MR, Nasution NA, Islam U, Sumatera N, Estate M, et al. WASPADA ! CURAH HUJAN YANG CUKUP TINGGI : SUMATERA. 2024;2(12).
2. Sianipar AH, Fajri K. Penerapan Metode SARIMA untuk Peramalan Frekuensi Curah Hujan Bulanan di Sumatera Utara. 2026;8(2):380–90.
3. Supriyadi S, Malau AG. Clustering dengan Menggunakan K-Means untuk Analisa Dampak Banjir. 2025;4(9):3428–36.
4. Sari DN, Irawan B, Bahtiar A, Mulya KK, Cirebon K, Indonesia JB, et al. MENGHADAPI CURAH HUJAN YANG EKSTREM MENGGUNAKAN ALGORITMA K-MEANS. 2024;8(3):2982–7.

5. Science M, Journal T, Safarudin LO, Kumalasari R, Selatan K, Bombana K, et al. *M i n e t e c h*. 2024;3(109):39–50.
6. Rohma NN. Pendugaan Metode Ordinary Kriging (Studi Kasus Data Curah Hujan di Malang Raya). 2022;21–9.
7. Oktarina CR, Pahlepi R. Statistical Modelling of Rainfall Data Using Robust Kriging with Gaussian Semivariogram in Bengkulu Province. 2025;3(2):26–35.
8. Ladianto HZ. Estimasi Sumberdaya Nikel Laterit Menggunakan Metode Geostatistik di Kecamatan Lasolo Kepulauan , Kabupaten Konawe Utara , Provinsi Sulawesi Tenggara. 2026;4(1):7–14.

