

# Pemodelan Spasial Sebaran Debu PM<sub>10</sub> pada Aktivitas Pembongkaran Bangunan Menggunakan Interpolasi Kriging

Dinar Nurina Atpriyanti<sup>1\*</sup>, Tri Joko Wahyu Adi<sup>2</sup>, Nofalia Andriyani<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia

<sup>3</sup>Pusat Riset Sistem Industri dan Manufaktur Berkelanjutan BRIN (Badan Riset Inovasi dan Nasional), Tangerang Selatan, Indonesia

Corresponding Author's e-mail : [trijoko@its.ac.id](mailto:trijoko@its.ac.id)

**ARMADA**  
JURNAL PENELITIAN MULTIDISIPLIN

e-ISSN: 2964-2981

ARMADA : Jurnal Penelitian Multidisiplin

<https://ejournal.45mataram.ac.id/index.php/armada>

Vol. 04, No. 05 Mei, 2026

Page: 873-880

DOI:

<https://doi.org/10.55681/armada.v4i5.2247>

#### Article History:

Received: April 21, 2026

Revised: Mei 01, 2026

Accepted: Mei 17, 2026

**Abstract** : Demolition activities in densely populated urban areas can elevate PM<sub>10</sub> concentrations and degrade ambient air quality. Limited monitoring points often hinder a continuous spatial representation of dust dispersion. This study developed a simulation-based demolition scenario adapted from a university building demolition layout in Surakarta City, with dust sensor points arranged radially around the emission source. Simulated PM<sub>10</sub> concentrations ranged from 100–320  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (median 210  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; SD 63.51  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Spatial prediction was conducted using Ordinary Kriging, supported by experimental semivariogram analysis and theoretical model fitting. Model performance was evaluated using leave-one-out cross-validation metrics (ME, RMSE, MSE, RMSSE, and ASE). The Gaussian semivariogram with logarithmic transformation produced the most stable fit. The fitted semivariogram parameters were nugget = 0.01819, sill = 0.2292, and nugget/sill = 0.0794, indicating strong spatial dependence. Cross-validation results showed ME = 3.41, RMSE = 41.588  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , MSE = 0.0656, RMSSE = 0.8157, and ASE = 53.827  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . The kriging prediction map indicates that higher PM<sub>10</sub> concentrations are localized near the demolition center and decrease with increasing distance from the source. Ordinary Kriging provides a practical preliminary framework for mapping PM<sub>10</sub> dispersion and supporting the identification of priority zones for dust mitigation in urban demolition settings; however, the framework should be further validated using field monitoring data.

**Keywords** : PM<sub>10</sub> Dust, Demolition, Kriging Interpolation, Spatial Modeling, Urban Environment

**Abstrak** : Aktivitas pembongkaran bangunan (demolisi) di kawasan perkotaan padat dapat meningkatkan konsentrasi PM<sub>10</sub> dan menurunkan kualitas udara ambien, sementara keterbatasan jumlah titik pemantauan sering menghambat representasi sebaran debu secara kontinu. Penelitian ini menyusun skenario simulasi yang mengadaptasi tata letak pembongkaran gedung perkuliahan di Kota Surakarta, dengan titik sensor debu disusun radial dari pusat aktivitas. Data PM<sub>10</sub> simulatif berada pada rentang 100–320  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (median 210  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; SD 63.51  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Pemodelan spasial dilakukan menggunakan Ordinary Kriging melalui analisis semivariogram eksperimental, pemilihan model semivariogram teoretis, dan evaluasi kinerja menggunakan cross-validation (ME, RMSE, MSE, RMSSE,

dan ASE). Model semivariogram Gaussian dengan transformasi logaritmik menunjukkan kinerja paling stabil, dengan parameter nugget = 0.01819, sill = 0.2292, dan nugget/sill = 0.0794 yang mengindikasikan ketergantungan spasial yang kuat. Hasil cross-validation menunjukkan ME = 3.41, RMSE = 41.588  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , MSE = 0.0656, RMSSE = 0.8157, dan ASE = 53.827  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Peta interpolasi memperlihatkan konsentrasi PM<sub>10</sub> yang lebih tinggi terlokalisasi di sekitar pusat demolisi dan cenderung menurun seiring bertambahnya jarak dari sumber. Pendekatan Ordinary Kriging berpotensi menjadi kerangka awal yang berguna untuk pemetaan sebaran PM<sub>10</sub> dan penentuan zona prioritas mitigasi pada proyek demolisi perkotaan, meskipun masih memerlukan validasi lanjutan menggunakan data pengukuran lapangan.

**Kata Kunci** : Debu PM<sub>10</sub>, Interpolasi kriging, Pembongkaran, Pemodelan Spasial, Lingkungan Perkotaan

## PENDAHULUAN

Aktivitas pembongkaran bangunan (demolisi) merupakan bagian yang tak terpisahkan dari proses pembangunan dan penataan kembali kawasan perkotaan. Seiring meningkatnya kebutuhan ruang dan modernisasi infrastruktur, kegiatan demolisi di area padat penduduk semakin sering dilakukan (Liu *et al.*, 2019). Namun, proses pembongkaran dapat menghasilkan emisi debu (Normohammadi *et al.*, 2016) dan partikulat yang berpotensi menurunkan kualitas udara serta menimbulkan gangguan bagi lingkungan sekitar (Andriyani *et al.*, 2024). Debu yang dihasilkan dari proses pembongkaran dan penghancuran material bangunan, seperti beton, semen, dan bata, umumnya berbentuk particulate matter (PM) berukuran halus, terutama PM<sub>10</sub> dan PM<sub>2.5</sub>, yang mudah terdispersi melalui udara. Partikel debu tersebut berpotensi mengandung silika kristalin, khususnya pada tahapan pembongkaran yang melibatkan perlakuan mekanis terhadap material bangunan (Chen *et al.*, 2021; Normohammadi *et al.*, 2016). Pemilihan metode pembongkaran, baik secara manual, mekanis, maupun kimia/eksplosif, turut memengaruhi besarnya dampak lingkungan yang ditimbulkan, khususnya terkait dengan tingkat produksi debu dan polusi udara (Adi *et al.*, 2025). Polusi udara lainnya juga dapat bersumber dari asap mesin berbahan bakar fosil yang dihasilkan dari pembongkaran mekanis yang menggunakan alat berat seperti excavator, breaker, dan bulldozer (Adi & Andriyani, 2023).

Keberadaan debu di udara tidak hanya menurunkan kenyamanan lingkungan dan kualitas visual, tetapi juga menimbulkan dampak serius terhadap kesehatan Masyarakat karena dapat menyebar ke area sekitar, terutama pada kawasan padat penduduk. Paparan partikulat yang tersebar di atmosfer diketahui dapat meningkatkan risiko penyakit jantung dan paru-paru, seperti asma, penyakit paru obstruktif kronis (PPOK), infark miokard, dan penyakit jantung coroner (Guo *et al.*, 2022). Risiko kesehatan tersebut menjadi semakin signifikan pada kawasan dengan kepadatan penduduk tinggi, khususnya ketika lokasi aktivitas demolisi berada dekat dengan area permukiman, karena jarak yang relatif pendek meningkatkan peluang paparan langsung bagi masyarakat sekitar. Selain itu, debu yang berasal dari material konstruksi sering kali mengandung logam berat, silika kristalin, atau senyawa berbahaya lainnya, yang berpotensi menimbulkan efek toksik dan karsinogenik dalam jangka panjang (Yan *et al.*, 2023).

Mengingat besarnya potensi dampak lingkungan dan kesehatan tersebut, pemantauan konsentrasi debu selama aktivitas demolisi menjadi aspek yang sangat penting dalam pengelolaan kinerja lingkungan. Pengukuran langsung konsentrasi debu umumnya dilakukan menggunakan sensor kualitas udara atau alat pemantau partikulat (Miftahul Ihsan *et al.*, 2025). Namun, pendekatan ini masih memiliki sejumlah keterbatasan, antara lain jumlah titik pengamatan yang terbatas, biaya instalasi dan pemeliharaan yang relatif tinggi, serta distribusi sensor yang tidak

merata di lapangan (Li & Heap, 2014). Akibatnya, pengukuran langsung sering kali belum mampu merepresentasikan variasi spasial konsentrasi debu secara menyeluruh, khususnya di kawasan perkotaan padat.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, berbagai penelitian telah mengembangkan pendekatan pemantauan dan prediksi konsentrasi polutan melalui pemanfaatan informasi statistik, pendapat ahli, serta pengembangan persamaan dan model simulasi. Namun, sebagian besar studi tersebut masih berfokus pada proyek konstruksi dan belum secara eksplisit memasukkan aktivitas demolisi sebagai proses, tugas, atau operasi tersendiri dalam tahap pemantauan kinerja lingkungan (environmental performance/EP). Model-model yang tersedia juga belum dapat diterapkan secara langsung pada proyek demolisi, mengingat karakteristik aktivitas pembongkaran yang bersifat tidak pasti, acak, kompleks, dan dinamis (Patel *et al.*, 2024). Selain itu, kajian yang ada umumnya masih mengandalkan pengukuran berbasis titik dan belum mampu menangkap pola sebaran spasial debu secara kontinu, sehingga aspek ketergantungan spasial dan heterogenitas distribusi debu di area demolisi belum terkuantifikasi dengan baik (Wang *et al.*, 2022). Kondisi ini sejalan dengan temuan dalam literatur yang menunjukkan bahwa, meskipun isu keselamatan dan risiko pada aktivitas demolisi memiliki tingkat kepentingan yang tinggi, penelitian yang secara khusus membahas aspek tersebut masih relatif terbatas dibandingkan dengan fase konstruksi lainnya (Alipour-Bashary *et al.*, 2022). Oleh karena itu, diperlukan pendekatan pemodelan spasial berbasis geostatistik yang mampu mengestimasi konsentrasi  $PM_{10}$  pada lokasi yang tidak terukur secara langsung serta merepresentasikan ketergantungan spasial antar titik pengamatan.

Salah satu metode interpolasi yang banyak digunakan dalam bidang lingkungan adalah kriging, yang memiliki keunggulan karena mempertimbangkan autokorelasi spasial antar titik pengamatan melalui model variogram. Berbeda dengan metode deterministik seperti Inverse Distance Weighting (IDW) atau Spline, kriging dapat memberikan estimasi yang lebih baik serta informasi mengenai ketidakpastian hasil interpolasi. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa metode ini efektif untuk memprediksi distribusi polutan udara dan partikulat di lingkungan perkotaan (Wang *et al.*, 2022). Namun, hingga saat ini masih terdapat keterbatasan dalam penerapan kriging untuk konteks aktivitas demolisi, khususnya di area yang berdekatan dengan permukiman. Sebagian besar studi yang ada berfokus pada polusi dari lalu lintas atau industri, sedangkan fenomena penyebaran debu akibat demolisi memiliki karakteristik yang berbeda, baik dari segi sumber, intensitas, maupun durasi emisi (Chen *et al.*, 2021). Tujuan penelitian ini adalah mengusulkan dan mengevaluasi pemodelan spasial konsentrasi  $PM_{10}$  akibat aktivitas demolisi di kawasan perkotaan padat menggunakan Ordinary Kriging, melalui (1) pemilihan model semivariogram terbaik berbasis *cross-validation* dan (2) penyusunan peta prediksi konsentrasi serta zonasi paparan sebagai dasar penentuan area prioritas mitigasi.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan kerangka kerja pemodelan spasial berbasis simulasi untuk menganalisis distribusi konsentrasi debu  $PM_{10}$  pada aktivitas pembongkaran bangunan di kawasan perkotaan. Desain penelitian diawali dengan penyusunan skenario simulasi penempatan titik pengamatan (sensor) yang merepresentasikan sebaran spasial konsentrasi debu di sekitar area pembongkaran. Titik pengamatan tersebut bersifat simulatif dan dikonstruksi berdasarkan parameter jarak antar titik, kedekatan terhadap sumber emisi, serta karakteristik spasial kawasan studi untuk menggambarkan kondisi paparan debu secara representatif. Data konsentrasi  $PM_{10}$  pada titik-titik pengamatan selanjutnya dianalisis menggunakan pendekatan geostatistik melalui semivariogram eksperimental untuk mengidentifikasi struktur ketergantungan spasial. Parameter utama semivariogram, yaitu nugget, sill, dan range, diestimasi dengan mencocokkan beberapa model teoritis (spherical, Gaussian, dan exponential) melalui proses iteratif berbasis trial and error hingga diperoleh model dengan tingkat kesesuaian terbaik antara semivariogram empiris dan teoretis.

Model semivariogram terpilih kemudian divalidasi menggunakan metode *cross-validation* leave-one-out dengan indikator kinerja berupa mean error (ME), root mean square error (RMSE), dan root mean square standardized error (RMSSE) untuk menilai tingkat akurasi dan bias prediksi. Model terbaik dipilih berdasarkan nilai kesalahan terendah dan RMSSE yang mendekati satu.

Selanjutnya, model semivariogram optimal digunakan sebagai dasar interpolasi spasial menggunakan metode Ordinary Kriging untuk mengestimasi distribusi konsentrasi PM10 pada lokasi yang tidak terukur. Secara matematis, model Ordinary Kriging dinyatakan sebagai  $Z(s)=\mu+\varepsilon(s)$ . Semivariogram eksperimental dihitung menggunakan  $\gamma(h)=1/2N(h)\sum[z(x_i)-z(x_i+h)]^2$ . Hasil interpolasi kemudian menghasilkan peta sebaran spasial konsentrasi debu PM10 yang digunakan untuk mengidentifikasi pola distribusi dan zona dengan tingkat paparan tertinggi di area pembongkaran bangunan perkotaan.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Distribusi Statistik**

Berdasarkan hasil statistik deskriptif pada Tabel 1, konsentrasi debu PM10 dalam simulasi berada pada rentang 100 – 320  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Aktivitas demolisi menunjukkan variasi yang cukup tinggi, dengan nilai minimum sebesar 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  dan nilai maksimum mencapai 320  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Nilai median sebesar 210  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  mengindikasikan bahwa sebagian besar pengukuran berada pada tingkat konsentrasi menengah hingga tinggi. Sementara itu, nilai standar deviasi sebesar 63.51  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  mencerminkan adanya heterogenitas yang signifikan dalam sebaran konsentrasi debu di area studi.

**Tabel 1.** Statistik Deskriptif Parameter Debu (PM10)

No	Parameter	Statistik Deskriptif			
		Min.	Max.	Median	SD
1	Debu (PM10) ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	100	320	210	63.51

Sumber: Olahan peneliti

**Semivariogram**

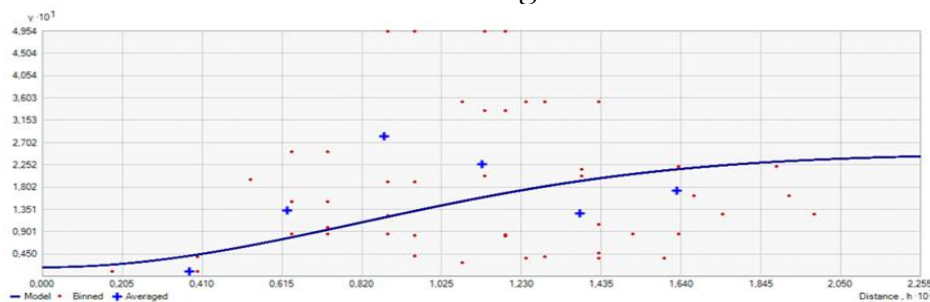
Pemodelan semivariogram untuk parameter debu PM10 disajikan pada Tabel 2. dan gambar 2. Data debu ditransformasi secara logaritmik untuk memperbaiki distribusi data dan menstabilkan varians, sementara trend removal tidak diterapkan, yang mengindikasikan bahwa tidak terdapat tren global yang signifikan pada data spasial. Selain itu, penerapan anisotropy menunjukkan adanya perbedaan struktur spasial debu berdasarkan arah tertentu, yang kemungkinan dipengaruhi oleh pola aktivitas demolisi dan konfigurasi lingkungan sekitar. Model semivariogram Gaussian dipilih sebagai model yang stabil karena mampu merepresentasikan kontinuitas spasial debu PM10 secara halus pada jarak pendek hingga menengah. Kurva Gaussian pada saat pemodelan semivariogram juga menunjukkan adanya korelasi spasial yang kuat antar titik pengamatan pada jarak tertentu sebelum mencapai sill.

**Tabel 2.** Pemodelan Semivariogram Parameter Debu PM10

No	Parameter	Pemodelan Semivariogram			Model Semivariogram
		Transformasi	Tren Removal	Anisotrophy	
1	Debu (PM10) ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Logaritmik	None	True	Gaussian

Sumber: olahan peneliti

Gambar 2. Semivariogram Debu PM10



Sumber : Olahan Peneliti

Setelah pemodelan semivariogram, dilakukan cross-validation untuk mengevaluasi kecocokan model terhadap data debu PM<sub>10</sub>. Hasil cross-validation ditampilkan pada Tabel 3, yang digunakan untuk menilai akurasi dan keandalan model semivariogram.

**Tabel 3.** Hasil *Cross-Validation* untuk Model Semivariogram Terpilih

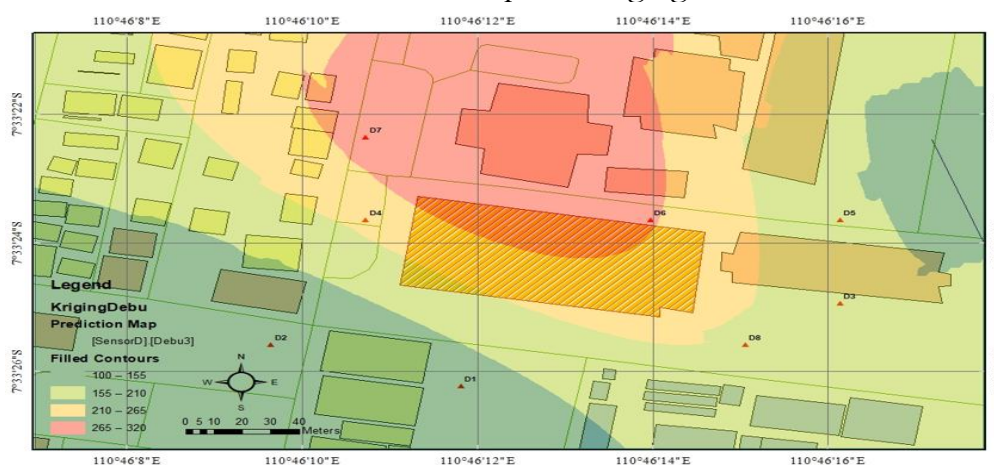
Parameter	Nugget	Sill	Nugget/Sill	Lag Size	ME	RMSE	MSE	ASE
Debu (PM <sub>10</sub> ) ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0.01819	0.2292	0.0794	0.00025	3.41	41.588	0.0656	53.827

Sumber: Olahan peneliti

Berdasarkan hasil evaluasi kriging, ME sebesar 3.41 menunjukkan bahwa estimasi model memiliki bias yang rendah, karena idealnya mendekati 0. Nilai RMSE sebesar 41.588 mengindikasikan bahwa kesalahan prediksi relatif kecil dibandingkan rentang nilai PM<sub>10</sub> yang teramati, sehingga model cukup baik dalam merepresentasikan variasi spasial konsentrasi debu. Kemudian, MSE sebesar 0.0656, yang merupakan kuadrat rata-rata kesalahan prediksi, juga menegaskan bahwa tingkat kesalahan model masih berada dalam batas yang dapat diterima untuk pemodelan lingkungan yang bersifat dinamis. Nilai RMSSE sebesar 0.8157, yang mendekati 1, menunjukkan bahwa estimasi ketidakpastian dari model Kriging konsisten dengan variabilitas data observasi. Selain itu, ASE sebesar 53,827 yang mendekati RMSE menunjukkan bahwa ketidakpastian prediksi model secara umum sejalan dengan kesalahan prediksi aktual, menandakan bahwa model dapat dipercaya untuk memetakan zonasi paparan PM<sub>10</sub>. Secara praktis, hal ini berarti peta prediksi dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam menentukan radius pengendalian debu di sekitar pusat kegiatan demolisi, dengan tingkat kepercayaan yang memadai.

Secara keseluruhan, kinerja model yang baik ditunjukkan oleh nilai ME dan MSE yang mendekati nol serta nilai RMSSE yang mendekati satu. Pemenuhan kriteria tersebut menegaskan bahwa model kriging mampu menghasilkan prediksi yang andal, relatif tidak bias, dan disertai estimasi ketidakpastian yang reliabel (Esri, 2001; Shawky, 2025). Temuan ini sejalan dengan studi terdahulu yang menunjukkan bahwa metode kriging memiliki kinerja yang baik berdasarkan indikator kesalahan hasil cross-validation, meskipun diterapkan pada objek dan kondisi yang berbeda (Shawky, 2025). Kesamaan hasil tersebut mengindikasikan bahwa pendekatan kriging dan evaluasinya melalui cross-validation dapat diandalkan untuk berbagai jenis data spasial, termasuk pada kondisi yang memiliki tingkat variasi yang tinggi seperti aktivitas pembongkaran bangunan. Dengan demikian, meskipun karakter debu PM<sub>10</sub> bersifat lebih dinamis dibandingkan data statis seperti endapan bijih tambang, metode kriging tetap mampu memberikan hasil estimasi yang stabil dan konsisten.

**Gambar 3.** Hasil Interpolasi Kriging Debu PM<sub>10</sub>



Sumber: Olahan Peneliti

Hasil interpolasi kriging untuk parameter debu PM<sub>10</sub> ditunjukkan pada Gambar 3. Peta interpolasi memperlihatkan adanya zona dengan konsentrasi debu tinggi yang terlokalisasi di sekitar area utama aktivitas demolisi, sementara konsentrasi debu cenderung menurun seiring dengan meningkatnya jarak dari sumber kegiatan. Berdasarkan hasil pemodelan semivariogram Gaussian dengan transformasi logaritmik, struktur ketergantungan spasial konsentrasi PM<sub>10</sub> ditunjukkan oleh rasio nugget/sill yang rendah (0.0794), yang mengindikasikan adanya autokorelasi spasial yang kuat pada sebaran debu di sekitar sumber kegiatan (Tabel 3). Nilai range variogram sebesar [R] meter (jarak korelasi spasial) menunjukkan bahwa kesamaan nilai PM<sub>10</sub> antar lokasi masih signifikan hingga radius tersebut, sebelum variogram mendekati sill dan variasi spasial menjadi relatif tidak berkorelasi. Selanjutnya, peta prediksi *Ordinary Kriging* (Gambar 3.) memperlihatkan zonasi paparan yang jelas, di mana kelas konsentrasi tertinggi 265–320 µg/m<sup>3</sup> membentuk plume di sekitar area pembongkaran; secara ringkas, zona tertinggi ini mencakup sekitar ±24% area studi (estimasi dari proporsi luasan zonasi pada peta prediksi), sedangkan zona menengah (155–210 µg/m<sup>3</sup>) tampak lebih dominan pada area yang lebih jauh dari sumber.

Pola sebaran juga menunjukkan arah sebaran yang tidak sepenuhnya simetris (konsisten dengan anisotropi), sehingga implikasi praktisnya adalah kebutuhan pengendalian debu yang lebih intensif dalam radius ±100 m dari pusat aktivitas demolisi, dengan perhatian khusus pada koridor arah utara–timur laut yang menunjukkan perpanjangan zona konsentrasi tinggi hingga sekitar ±145 m dari sumber (Gambar 3.). Berdasarkan temuan hasil interpolasi tersebut, pendekatan pemodelan spasial mampu mengidentifikasi area dengan potensi paparan debu yang lebih signifikan. Informasi spasial ini berpotensi mendukung penyusunan strategi pengendalian debu yang lebih terarah, khususnya dalam perencanaan metode pembongkaran, pengaturan operasional peralatan, serta pengelolaan material hasil bongkaran pada zona dengan konsentrasi tinggi. Dengan demikian, integrasi analisis spasial pada tahap pra-pelaksanaan dapat menjadi pendekatan awal dalam mendukung upaya mitigasi dampak debu secara lebih sistematis pada proyek demolisi di kawasan perkotaan misalnya pembasahan material bongkaran, pengaturan rute alat angkut bongkaran, pergerakan alat berat, dan pembatasan operasional pada jam tertentu.

## KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengusulkan dan mengevaluasi pemodelan spasial konsentrasi PM<sub>10</sub> akibat aktivitas demolisi di kawasan perkotaan padat menggunakan metode *Ordinary Kriging*. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa semivariogram Gaussian dengan transformasi logaritmik menghasilkan kinerja prediksi terbaik, dengan bias yang relatif kecil (ME = 3.41) dan kesalahan prediksi yang masih berada pada rentang yang dapat diterima untuk konteks pemodelan lingkungan (RMSE = 41.588; MSE = 0.0656; RMSSE = 0.8157; ASE = 53.827). Parameter nugget dan sill (0.01819 dan 0.2292) serta rasio nugget/sill yang rendah (0.0794) menguatkan adanya struktur spasial yang nyata pada sebaran PM<sub>10</sub> di sekitar area pembongkaran (Tabel 3).

Peta prediksi *Ordinary Kriging* menunjukkan bahwa konsentrasi debu PM<sub>10</sub> tertinggi terlokalisasi di sekitar sumber aktivitas demolisi dan menurun seiring bertambahnya jarak, sehingga zonasi paparan dapat diidentifikasi secara lebih operasional untuk kebutuhan mitigasi (Gambar 3). Secara ringkas, zona konsentrasi tertinggi 265–320 µg/m<sup>3</sup> mencakup sekitar ±24% area studi dan terutama berada dekat pusat aktivitas; implikasinya, pengendalian debu perlu diprioritaskan dalam radius ±100 m dari sumber, terutama pada koridor utara–timur laut yang memperlihatkan perpanjangan area konsentrasi tinggi hingga ±145 m. Selain itu, nilai range variogram sebesar [R] meter perlu ditegaskan dalam pelaporan parameter model karena merepresentasikan jarak korelasi spasial utama yang menjadi dasar batas pengaruh spasial PM<sub>10</sub> pada area studi. Meskipun penelitian ini masih menggunakan data simulatif, kerangka pemodelan yang diusulkan dapat dikembangkan lebih lanjut melalui pengukuran lapangan aktual (termasuk informasi meteorologi/ arah angin) untuk meningkatkan validitas, ketelitian zonasi, dan ketepatan rekomendasi mitigasi pada proyek demolisi perkotaan.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan hormat dan terima kasih kepada Bapak Tri Joko Wahyu Adi, S.T., M.T., Ph.D., selaku Pembimbing I, atas gagasan awal dan arahan konseptual yang menjadi dasar

pengembangan penelitian ini, serta atas bimbingan dan diskusi intensif yang sangat membantu dalam penyempurnaan metodologi dan analisis. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Ibu Dr. Nofalia Andriyani, S.T., M.Eng., selaku Pembimbing II, atas kesabaran, ketelitian, serta kontribusi beliau dalam melakukan reviewing dan saran yang membangun dalam keseluruhan proses penyusunan manuskrip penelitian ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Adi, T. J. W., & Andriyani, N. (2023). Model dekonstruksi bangunan berkelanjutan berbasis “reverse 4D BIM.” *PADURAKSA: Jurnal Teknik Sipil Universitas Warmadewa*, *12*(2), 228–234.
- Adi, T. J. W., Devia, Y. P., & Andriyani, N. (2025). Integrating building information modeling and bayesian network for enhanced go/no-go decisions in building demolition projects. *Global Journal of Environmental Science and Management*, *11*(3), 1259–1280. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2025.03.21>
- Alipour-Bashary, M., Ravanshadnia, M., Abbasianjahromi, H., & Asnaashari, E. (2021). A Hybrid Fuzzy Risk Assessment Framework for Determining Building Demolition Safety Index. *KSCF Journal of Civil Engineering*, *25*(4), 1144–1162. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-0812-4>
- Alipour-Bashary, M., Ravanshadnia, M., Abbasianjahromi, H., & Asnaashari, E. (2022). Building demolition risk assessment by applying a hybrid fuzzy FTA and fuzzy CRITIC-TOPSIS framework. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, *40*(1), 134–159. <https://doi.org/10.1108/IJBPA-08-2020-0063>
- Andriyani, N., Suprobo, P., Adi, T. J. W., Aspar, W. A. N., Jatmiko, A. D., & Santoso, A. D. (2024). Integrating urban building information modeling and circular economy framework for green sustainability. *Global Journal of Environmental Science and Management*, *10*(3), 1313–1332. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2024.03.22>
- Azarmi, F., & Kumar, P. (2016). Ambient exposure to coarse and fine particle emissions from building demolition. *Atmospheric Environment*, *137*, 62–79. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.04.029>
- Bhuiyan, M. A. H., Bodrud-Doza, M., Islam, A. R. M. T., Rakib, M. A., Rahman, M. S., & Ramanathan, A. L. (2016). Assessment of groundwater quality of Lakshimpur district of Bangladesh using water quality indices, geostatistical methods, and multivariate analysis. *Environmental Earth Sciences*, *75*(12). <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5823-y>
- Chen, Z., Zhang, T., Chen, Z., Xiang, Y., Xuan, Q., & Dick, R. P. (2021). *HVAQ: A High-Resolution Vision-Based Air Quality Dataset*. <https://doi.org/10.1109/TIM.2021.3104415>
- Esri. (2001). *ArcGIS @ 9 Using ArcGIS @ Geostatistical Analyst*.
- Fallah, B., Richter, A., Ng, K. T. W., & Salama, A. (2019). Effects of groundwater metal contaminant spatial distribution on overlaying kriged maps. *Environmental Science and Pollution Research*, *26*(22), 22945–22957. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05541-z>
- Guo, P., Tian, W., & Li, H. (2022). Dynamic health risk assessment model for construction dust hazards in the reuse of industrial buildings. *Building and Environment*, *210*. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108736>
- Hong, J., Kang, H., Jung, S., Sung, S., Hong, T., Park, H. S., & Lee, D. E. (2020). An empirical analysis of environmental pollutants on building construction sites for determining the real-time monitoring indices. *Building and Environment*, *170*. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106636>
- Li, J., & Heap, A. D. (2014). Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. In *Environmental Modelling and Software* (Vol. 53, pp. 173–189). <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.008>
- Liu, W., Tang, P. T., Li, K., & Jiang, T. (2019). Demolition dust formation, diffusion mechanism and monitoring quantitative research on demolition of existing buildings. *Applied Ecology and Environmental Research*, *17*(6), 14543–14559. [https://doi.org/10.15666/aer/1706\\_1454314559](https://doi.org/10.15666/aer/1706_1454314559)

- Miftahul Ihsan, I., Ma'rufatin, A., Zahroh, N. F., Nurul Ikhsan, I., Suwedi, N., Pratama, R. A., Adhi, R. P., Handika, R., Lusia, A., Nishihashi, M., Terao, Y., Hashimoto, S., Nara, H., & Mukai, H. (2025). Air Quality Assessment Based on Real-Time Continuous Monitoring: Particulate and Nitrogen Dioxide Concentrations in South Tangerang Penilaian Kualitas Udara Berdasarkan Pemantauan Kontinu secara Real-Time: Konsentrasi Partikulat dan Nitrogen Dioksida di Tangerang Selatan. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 26(1).
- Normohammadi, M., Kakooei, H., Omid, L., Yari, S., & Alimi, R. (2016). Risk Assessment of Exposure to Silica Dust in Building Demolition Sites. *Safety and Health at Work*, 7(3), 251–255. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2015.12.006>
- Patel, D. J., Patel, D. A., & Patel, S. (2024). Assessment of the Environmental Pollutants of Demolition Sites for Developing Real-Time Monitoring Indexes: An Empirical Analysis. *Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction*, 16(1). <https://doi.org/10.1061/jladah.ladr-1053>
- Requia, W. J., Coull, B. A., & Koutrakis, P. (2019). Evaluation of predictive capabilities of ordinary geostatistical interpolation, hybrid interpolation, and machine learning methods for estimating PM<sub>2.5</sub> constituents over space. *Environmental Research*, 175, 421–433. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.05.025>
- Shawky, M. M. (2025). A comparative study of interpolation methods for the development of ore distribution maps. *Discover Geoscience*, 3(1). <https://doi.org/10.1007/s44288-025-00108-7>
- Wang, Y., Duan, X., Liang, T., Wang, L., & Wang, L. (2022). Analysis of spatio-temporal distribution characteristics and socioeconomic drivers of urban air quality in China. *Chemosphere*, 291. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132799>
- Yan, H., Li, Q., Feng, K., & Zhang, L. (2023). The characteristics of PM emissions from construction sites during the earthwork and foundation stages: an empirical study evidence. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(22), 62716–62732. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26494-4>