

ANALISIS TINGKAT BAHAYA LINGKUNGAN PADA PEMBONGKARAN GEDUNG BERTINGKAT BERBASIS FUZZY INFERENCE SYSTEM: STUDI KASUS PEMBONGKARAN GEDUNG A JAKARTA

Muhammad Dirga Setiawan¹, Tri Joko Wahyu Adi²

^{1, 2}Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Jl. Raya ITS, Surabaya, Jawa Timur, Indonesia
Email: muhdirga88@gmail.com

Article History

Received: 17-07-2026

Revision: 16-08-2026

Accepted: 23-08-2026

Published: 29-08-2026

Abstract. The demolition of high-rise buildings in dense urban areas may generate dust, noise, and vibration that adversely affect environmental quality and activities in surrounding buildings. Assessing each pollution parameter separately does not provide a comprehensive picture of the overall environmental hazard level. This study analyzes environmental hazards in an integrated manner and determines mitigation priorities for the demolition of Building A, Jakarta, using a Fuzzy Inference System (FIS). An applied quantitative case-study approach was used. Data on PM_{2.5} concentration, noise, and vibration were obtained from the project area and two surrounding receptor buildings (Building B and Building C) and integrated using a Mamdani FIS with membership functions based on environmental quality standards. Mitigation priorities were determined from the hazard category, the dominant parameter, and a focus group discussion with demolition practitioners. All monitoring points fell into the high hazard category, with FIS scores of 8.4240 (Building A), 8.3868 (Building B), and 8.4315 (Building C). PM_{2.5} was the most dominant parameter, exceeding the standard at every point, followed by noise; vibration was recorded at 0.00 mm/s and requires continued monitoring during impulsive demolition phases. Mitigation should therefore prioritize dust control, followed by noise control, with continuous vibration monitoring. The findings are a preliminary, context-specific assessment and cannot yet be generalized to all high-rise demolition projects.

Keywords: Building Demolition, PM_{2.5} Dust, Noise, Vibration, Fuzzy Inference System

Abstrak. Pembongkaran gedung bertingkat di kawasan perkotaan padat berpotensi menimbulkan debu, kebisingan, dan getaran yang dapat mengganggu kualitas lingkungan serta aktivitas bangunan di sekitarnya. Penilaian setiap parameter secara terpisah belum memberikan gambaran menyeluruh mengenai tingkat bahaya lingkungan. Penelitian ini bertujuan menganalisis tingkat bahaya lingkungan secara terpadu dan menentukan prioritas mitigasi pada pembongkaran Gedung A Jakarta menggunakan *Fuzzy Inference System (FIS)*. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif terapan dengan desain studi kasus. Data konsentrasi PM_{2.5}, kebisingan, dan getaran diperoleh dari area proyek serta dua bangunan penerima dampak (Gedung B dan Gedung C), lalu diintegrasikan menggunakan FIS Mamdani dengan fungsi keanggotaan yang mengacu pada baku mutu lingkungan. Prioritas mitigasi ditentukan berdasarkan kategori bahaya, parameter dominan, dan hasil diskusi kelompok terarah bersama praktisi demolisi. Hasil analisis menunjukkan seluruh titik pemantauan berada pada kategori bahaya tinggi, dengan skor FIS 8,4240 (Gedung A), 8,3868 (Gedung B), dan 8,4315 (Gedung C). Debu PM_{2.5} menjadi parameter paling dominan karena melampaui baku mutu di seluruh titik, diikuti kebisingan; getaran tercatat 0,00 mm/s namun tetap memerlukan pemantauan pada fase demolisi yang bersifat impulsif. Prioritas mitigasi diarahkan pada pengendalian debu, kemudian kebisingan, disertai pemantauan getaran berkelanjutan. Hasil penelitian bersifat kontekstual dan belum dapat digeneralisasikan pada seluruh proyek demolisi gedung bertingkat.

Kata Kunci: Demolisi Gedung, Debu PM_{2.5}, Kebisingan, Getaran, Fuzzy Inference System

How to Cite: Setiawan, M. D., & Adi, T J. W. (2026). Analisis Tingkat Bahaya Lingkungan pada Pembongkaran Gedung Bertingkat Berbasis Fuzzy Inference System: Studi Kasus Pembongkaran Gedung A Jakarta. *HORIZON: Indonesian Journal of Multidisciplinary*, 4 (4), 5686-5697. <http://doi.org/10.54373/hijm.v4i4.7126>

PENDAHULUAN

Pertumbuhan penduduk perkotaan, ekspansi aktivitas ekonomi, dan keterbatasan lahan mendorong pembangunan gedung bertingkat serta regenerasi kawasan di berbagai kota besar. Ketika perluasan wilayah secara horizontal semakin terbatas, pembongkaran atau demolisi bangunan lama menjadi bagian penting dari siklus pembangunan perkotaan (Zuo & Zhao, 2014). Demolisi tidak hanya merupakan kegiatan teknis untuk menghilangkan struktur yang sudah tidak digunakan, tetapi juga aktivitas yang berpotensi menimbulkan gangguan terhadap kualitas lingkungan, khususnya ketika dilaksanakan di kawasan perkotaan dengan kepadatan bangunan dan aktivitas masyarakat yang tinggi.

Bahaya lingkungan dari kegiatan demolisi berasal dari sumber pencemar berupa penghancuran struktur, pemotongan elemen bangunan, penanganan puing, dan pergerakan alat berat, yang menghasilkan debu, kebisingan, dan getaran. Debu, khususnya partikel halus PM_{2.5}, dapat terbawa angin dan menyebar melampaui batas tapak proyek sehingga memengaruhi kualitas udara kawasan hunian, perkantoran, dan fasilitas komersial di sekitarnya (Lu et al., 2019; Wang et al., 2018; Fang et al., 2024). Pengoperasian *excavator*, *hydraulic breaker*, dan alat berat lain menghasilkan kebisingan yang berpotensi mengganggu komunikasi, konsentrasi, dan kenyamanan masyarakat sekitar (Mir et al., 2022), sementara getaran yang merambat melalui tanah dan struktur berpotensi menimbulkan gangguan kenyamanan serta kerusakan elemen nonstruktural pada bangunan penerima dampak.

Ketiga parameter tersebut memiliki satuan, karakteristik penyebaran, dan baku mutu yang berbeda, sehingga penilaian yang hanya membandingkan setiap parameter secara terpisah terhadap ambang batasnya belum menghasilkan gambaran terpadu mengenai tingkat bahaya lingkungan suatu proyek. Suatu lokasi dapat mengalami konsentrasi debu tinggi, kebisingan sedang, dan getaran rendah secara bersamaan, sehingga sulit ditentukan tingkat bahaya keseluruhan maupun tindakan mitigasi yang perlu diprioritaskan. Batas antar-kategori rendah, sedang, dan tinggi juga tidak selalu tegas karena nilai pengukuran dapat berada pada daerah transisi.

Berbagai penelitian telah mengembangkan sistem pemantauan untuk mengatasi persoalan tersebut. Kang et al. (2021) mengembangkan sistem pemantauan waktu nyata untuk kebisingan, getaran, dan debu pada lokasi konstruksi, sedangkan Hong et al. (2020) menyusun indeks pemantauan empiris berbasis data lapangan. Patel et al. (2024) secara spesifik membahas pemantauan debu dan kebisingan pada lokasi demolisi dan mengusulkan indeks berbasis waktu nyata. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian tersebut masih menempatkan debu, kebisingan, dan getaran sebagai indikator yang berdiri sendiri, sehingga

keluarannya belum sepenuhnya menghasilkan tingkat bahaya lingkungan komposit yang dapat langsung digunakan untuk menentukan prioritas mitigasi.

Fuzzy Inference System (FIS) dapat digunakan untuk menjawab kebutuhan tersebut karena mampu mengolah data numerik melalui kategori linguistik dan derajat keanggotaan (Zadeh, 1965). Dalam FIS, suatu nilai pengukuran dapat memiliki keanggotaan pada lebih dari satu kategori secara bersamaan, sehingga kondisi transisi antar-kategori dapat direpresentasikan secara lebih realistis dibandingkan pendekatan ambang batas konvensional. Nilai debu, kebisingan, dan getaran kemudian diolah menggunakan aturan if-then untuk menghasilkan tingkat bahaya lingkungan komposit, tanpa menggantikan peran baku mutu lingkungan sebagai dasar penyusunan fungsi keanggotaan dan aturan penilaian.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini mengembangkan model awal penilaian tingkat bahaya lingkungan yang mengintegrasikan tiga parameter utama debu PM2.5, kebisingan, dan getaran menggunakan FIS metode Mamdani, dan menerapkannya pada studi kasus pembongkaran Gedung A di Jakarta dengan Gedung B dan Gedung C sebagai bangunan penerima dampak (*receptor*). Secara spesifik, penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis tingkat bahaya lingkungan secara terpadu melalui integrasi debu, kebisingan, dan getaran menggunakan FIS; dan (2) menentukan parameter lingkungan yang dominan serta menyusun prioritas mitigasi berdasarkan tingkat bahaya yang dihasilkan model. Mengingat penelitian hanya menggunakan satu proyek dengan tiga titik pemantauan, hasil yang diperoleh diposisikan sebagai analisis awal berbasis studi kasus dan tidak dimaksudkan untuk digeneralisasikan pada seluruh proyek pembongkaran gedung bertingkat, namun diharapkan memberi kontribusi awal bagi pengembangan penilaian terpadu bahaya lingkungan demolisi serta masukan praktis bagi kontraktor dan pengelola proyek.

METODE

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif terapan dengan desain studi kasus tunggal. Data pengukuran debu PM2.5, kebisingan, dan getaran pada proyek pembongkaran Gedung A dianalisis secara deskriptif dan diintegrasikan menggunakan *Fuzzy Inference System* (FIS) metode Mamdani untuk menghasilkan tingkat bahaya lingkungan serta menentukan prioritas mitigasi. Karena penelitian hanya menggunakan satu objek studi dengan data pengukuran terbatas, hasilnya bersifat kontekstual dan tidak dimaksudkan untuk digeneralisasikan. Objek penelitian adalah proyek pembongkaran Gedung A, bangunan berstruktur beton bertulang 21 lantai di kawasan Medan Merdeka Selatan, Jakarta Pusat, yang dibongkar menggunakan metode mekanis *top-down* dengan excavator ber-*hydraulic breaker*. Gedung B (hotel bintang

empat, 6 lantai, berjarak sekitar 800 meter) dan Gedung C (gedung perkantoran pemerintah, 11 lantai, berjarak sekitar 30-50 meter) ditetapkan sebagai bangunan penerima dampak (*receptor*). Data konsentrasi PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), tingkat kebisingan (dB), dan tingkat getaran/*peak particle velocity* (mm/s) dikumpulkan pada 1 September 2023 melalui sensor yang ditempatkan pada area proyek dan kedua bangunan penerima dampak.

Variabel penelitian diidentifikasi melalui triangulasi studi literatur, analisis dokumen proyek, dan *expert judgment*, mengacu antara lain pada Tam et al. (2009), Wulandari et al. (2020), dan Liu et al. (2013). Tiga variabel *input* (*Dust Level*, *Vibration Level*, *Noise Level*) dan satu variabel *output* (Tingkat Bahaya Lingkungan) ditetapkan dengan tiga himpunan linguistik masing-masing: Rendah, Sedang, dan Tinggi, sebagaimana dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Variabel dan klasifikasi linguistik model FIS

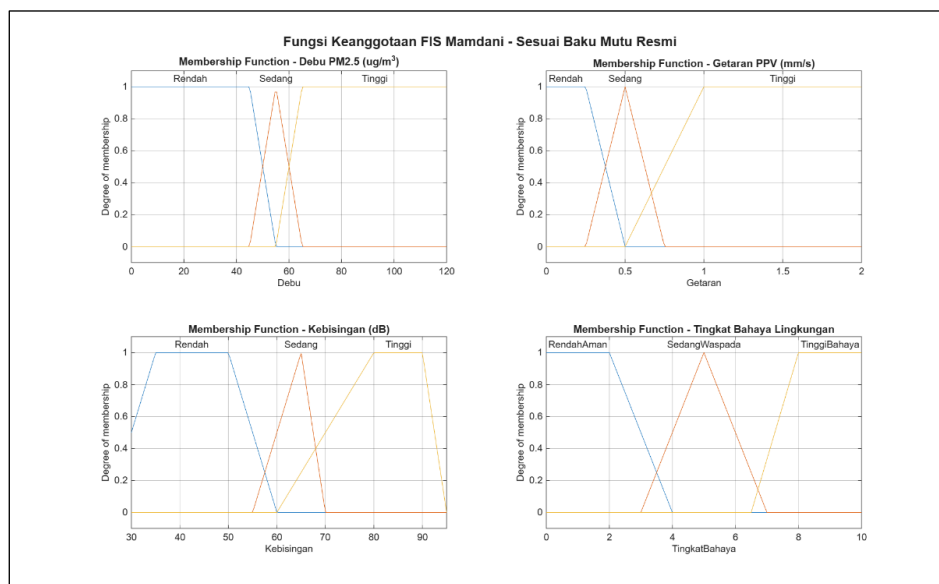
Variabel	Deskripsi	Klasifikasi Linguistik
<i>Dust Level</i>	Konsentrasi partikel debu (PM2.5) akibat penghancuran struktur, pemotongan material, dan pergerakan puing.	Rendah, Sedang, Tinggi
<i>Vibration Level</i>	Getaran dari <i>hydraulic breaker</i> , alat berat, pemotongan struktur, atau runtuh material.	Rendah, Sedang, Tinggi
<i>Noise Level</i>	Intensitas kebisingan dari alat berat, pemecahan beton, dan mobilisasi kendaraan proyek.	Rendah, Sedang, Tinggi
Tingkat Bahaya Lingkungan	Variabel <i>output</i> FIS yang mengintegrasikan ketiga parameter di atas.	Rendah, Sedang, Tinggi

Pemodelan Fuzzy Inference System (FIS) Mamdani

Model FIS dirancang dengan tiga variabel *input* (*Dust Level*, *Vibration Level*, *Noise Level*) dan satu variabel *output* (Tingkat Bahaya Lingkungan, skala 0-10). Setiap variabel direpresentasikan oleh tiga himpunan fuzzy menggunakan kombinasi fungsi bahu (*shoulder*) pada tepi domain dan fungsi segitiga pada domain tengah, sehingga kondisi ekstrem tetap memperoleh keanggotaan penuh ($\mu = 1,0$) sementara area transisi direpresentasikan secara gradual. Titik puncak setiap fungsi keanggotaan diikat pada nilai ambang baku mutu lingkungan yang berlaku, yaitu PP No. 22 Tahun 2021 untuk PM2.5, Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 48 Tahun 1996 untuk kebisingan kawasan kantor pemerintah/fasilitas umum, dan SNI 7570:2010 untuk getaran mekanis pada bangunan gedung.

Tabel 2. Parameter fungsi keanggotaan variabel input dan output FIS

Variabel	Himpunan	Tipe Fungsi	Parameter
Debu PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Rendah	Shoulder kiri	[0; 45; 55]
	Sedang	Segitiga	[45; 55; 65]
	Tinggi	Shoulder kanan	[55; 65; 120]
Getaran PPV (mm/s)	Rendah	Shoulder kiri	[0; 0,25; 0,50]
	Sedang	Segitiga	[0,25; 0,50; 0,75]
	Tinggi	Shoulder kanan	[0,50; 1,00; 2,00]
Kebisingan (dB)	Rendah	Shoulder kiri	[35; 50; 63]
	Sedang	Segitiga	[55; 65; 75]
	Tinggi	Shoulder kanan	[63; 80; 90]
Tingkat Bahaya Lingkungan (0-10)	Rendah	Shoulder kiri	[0; 2; 4]
	Sedang	Segitiga	[3; 5; 7]

**Gambar 1.** Fungsi Keanggotaan Variabel Input dan Output FIS Mamdani

Aturan fuzzy disusun dalam bentuk logika IF-THEN yang menghubungkan ketiga variabel input dengan tingkat bahaya lingkungan, mengikuti kerangka gabungan studi literatur dan *expert judgment* sebagaimana digunakan Ahmad Shukri dan Isa (2021) dalam pengembangan Mamdani-type decision system untuk penilaian risiko konstruksi. Sistem menggunakan 27 aturan (3^3) yang mencakup seluruh kombinasi ketiga variabel input dengan operator AND (minimum) untuk menghubungkan anteseden, sehingga tidak terdapat kombinasi input yang tidak terdefinisi.

Tabel 3. Basis aturan fuzzy (*fuzzy rule base*) metode Mamdani

Aturan	Debu	Getaran	Kebisingan	Tingkat Bahaya
R1	Rendah	Rendah	Rendah	Rendah
R2	Rendah	Rendah	Sedang	Sedang
R3	Rendah	Rendah	Tinggi	Sedang
R4	Rendah	Sedang	Rendah	Sedang

Aturan	Debu	Getaran	Kebisingan	Tingkat Bahaya
R5	Rendah	Sedang	Sedang	Sedang
R6	Rendah	Sedang	Tinggi	Sedang
R7	Rendah	Tinggi	Rendah	Sedang
R8	Rendah	Tinggi	Sedang	Sedang
R9	Rendah	Tinggi	Tinggi	Tinggi
R10	Sedang	Rendah	Rendah	Sedang
R11	Sedang	Rendah	Sedang	Sedang
R12	Sedang	Rendah	Tinggi	Tinggi
R13	Sedang	Sedang	Rendah	Sedang
R14	Sedang	Sedang	Sedang	Sedang
R15	Sedang	Sedang	Tinggi	Tinggi
R16	Sedang	Tinggi	Rendah	Sedang
R17	Sedang	Tinggi	Sedang	Tinggi
R18	Sedang	Tinggi	Tinggi	Tinggi
R19	Tinggi	Rendah	Rendah	Sedang
R20	Tinggi	Rendah	Sedang	Tinggi
R21	Tinggi	Rendah	Tinggi	Tinggi
R22	Tinggi	Sedang	Rendah	Tinggi
R23	Tinggi	Sedang	Sedang	Tinggi
R24	Tinggi	Sedang	Tinggi	Tinggi
R25	Tinggi	Tinggi	Rendah	Tinggi
R26	Tinggi	Tinggi	Sedang	Tinggi
R27	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Tinggi

Struktur *rule base* mencerminkan logika eskalasi bahaya yang konsisten: kondisi rendah pada seluruh variabel menghasilkan bahaya rendah (R1), kondisi tinggi pada satu variabel umumnya menghasilkan bahaya sedang, sedangkan kondisi tinggi pada dua atau lebih variabel secara konsisten menghasilkan bahaya tinggi. Proses inferensi berlangsung melalui tiga tahap: fuzzifikasi input (konversi nilai crisp menjadi derajat keanggotaan), evaluasi dan agregasi aturan (*firing strength* dihitung dengan operator *minimum*, *output* aturan aktif digabungkan melalui operasi maksimum), dan defuzzifikasi menggunakan metode *Centroid of Area* (COA): $z^* = \Sigma[\mu(z) \cdot z] / \Sigma\mu(z)$, dengan klasifikasi akhir Rendah ($z^* \leq 3,5$), Sedang ($3,5 < z^* \leq 6,5$), dan Tinggi ($z^* > 6,5$).

Validasi model dilakukan melalui expert judgment untuk menilai kelayakan FIS dalam merepresentasikan tingkat bahaya lingkungan pada studi kasus. Responden terdiri atas *Project Manager*, Manajer HSE, dan Konsultan Supervisi yang memiliki pengalaman langsung dalam pelaksanaan, pengendalian lingkungan, dan pengawasan demolisi. Penilaian menggunakan skala Likert 1-5 terhadap dua kriteria: kesesuaian struktur model dan variabel, serta keterterapan model untuk penentuan prioritas mitigasi. Validasi tidak membandingkan luaran FIS secara langsung terhadap data input yang sama guna menghindari validasi sirkular; model

dinilai layak apabila struktur dan variabelnya diterima responden, menghasilkan keluaran yang logis, serta dapat digunakan sebagai dasar prioritas mitigasi.

HASIL

Pengumpulan data dilakukan pada 1 September 2023 di tiga lokasi: area proyek Gedung A, Gedung B (*receptor* komersial/perhotelan), dan Gedung C (*receptor* perkantoran pemerintah). Hasil pengukuran ketiga parameter lingkungan dirangkum pada Tabel 4.

Tabel 4. Data pengukuran parameter lingkungan per lokasi

Lokasi Pengukuran	Debu PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Getaran (mm/s)	Kebisingan (dB)
Area Proyek Gedung A	89,64	0,00	67,60
Gedung B	91,11	0,00	70,60
Gedung C	72,40	0,00	60,02

Konsentrasi debu PM2.5 pada ketiga lokasi (72,40-91,11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) secara konsisten melampaui ambang batas nasional 24 jam sebesar 55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (PP No. 22 Tahun 2021 Lampiran VII). Tingkat kebisingan bervariasi dari 60,02 dB (Gedung C) hingga 70,60 dB (Gedung B), sedangkan getaran tercatat 0,00 mm/s di seluruh lokasi pada saat pengukuran hal ini dibahas lebih lanjut dari perspektif metodologis pada bagian Diskusi. Hasil fuzzifikasi menunjukkan bahwa nilai debu di ketiga lokasi sepenuhnya berada pada himpunan Tinggi ($\mu = 1,0$) karena melampaui ambang koreksi 55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sedangkan getaran sepenuhnya berada pada himpunan Rendah ($\mu = 1,0$). Kebisingan menjadi satu-satunya variabel dengan derajat keanggotaan campuran antar-lokasi: Gedung A dan Gedung C menghasilkan keanggotaan Sedang yang dominan, sedangkan Gedung B menghasilkan keanggotaan Tinggi. Kondisi ini menjadikan kebisingan sebagai satu-satunya variabel pembeda *firing strength* antarlokasi. Pada Gedung A, dua aturan aktif (R20 dengan $\alpha = 0,4800$ dan R21 dengan $\alpha = 0,1733$); pada Gedung B, hanya R21 aktif ($\alpha = 0,3733$); dan pada Gedung C, hanya R20 aktif dengan *firing strength* tertinggi ($\alpha = 0,5020$). Hasil defuzzifikasi menggunakan metode *Centroid of Area* menghasilkan skor crisp dan klasifikasi akhir sebagaimana disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Rekapitulasi hasil inferensi FIS mamdani - tingkat bahaya lingkungan

Lokasi Pengukuran	Debu ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Getaran (mm/s)	Kebisingan (dB)	Skor FIS	Klasifikasi
Area Proyek Gedung A	89,64	0,0	67,6	8,4240	TINGGI
Gedung B	91,11	0,0	70,6	8,3868	TINGGI
Gedung C	72,40	0,0	60,02	8,4315	TINGGI

Ketiga lokasi Area Proyek Gedung A (8,4240), Gedung B (8,3868), dan Gedung C (8,4315) secara konsisten memperoleh klasifikasi Tinggi dengan skor yang sangat berdekatan (selisih kurang dari 0,05 poin), mencerminkan kondisi lapangan yang seragam kritis di seluruh lokasi pengukuran.

Tabel 6. Hasil validasi model oleh panel pakar

Kriteria Validasi	Project Manager	Manajer HSE	Konsultan Supervisi	Rerata Skor	Keterangan
Kesesuaian struktur model dan variabel	5	4	4	4,33	Valid & dapat diimplementasikan
Keterterapan model untuk prioritas mitigasi	5	5	4	4,67	Valid & dapat diimplementasikan
Rata-rata keseluruhan	4,67	4,67	4,00	4,44	Valid & dapat diimplementasikan

Model memperoleh rata-rata skor 4,44 dari skala 1-5 dan termasuk kategori valid serta dapat diimplementasikan, dengan skor tertinggi pada aspek keterterapan model untuk penentuan prioritas mitigasi.

DISKUSI

Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh titik pemantauan tergolong kategori bahaya lingkungan Tinggi, dengan debu PM2.5 sebagai parameter paling dominan karena melampaui baku mutu secara konsisten di ketiga lokasi, diikuti oleh kebisingan yang bersifat lokasi-spesifik: Gedung B melampaui baku mutu zona hotel/permukiman secara signifikan (70,60 dB terhadap ambang 55 dB), sedangkan Gedung C berada tepat di batas ambang kawasan perkantoran (60,02 dB terhadap ambang 60 dB). Kondisi ini konsisten dengan temuan Fang et al. (2024) dan Kang et al. (2021) bahwa aktivitas penghancuran material dan mobilisasi alat berat pada proyek konstruksi maupun demolisi secara konsisten meningkatkan kadar debu di sekitar tapak proyek, serta dengan Mir et al. (2022) mengenai pentingnya pengendalian kebisingan konstruksi secara sistematis.

Getaran yang tercatat 0,00 mm/s di seluruh lokasi menempatkan variabel ini pada kategori Rendah dengan keanggotaan penuh, namun temuan ini perlu ditafsirkan secara hati-hati. Getaran demolisi bersifat impulsif dan sangat bergantung pada fase pekerjaan yang berlangsung; nilai nol yang tercatat kemungkinan besar dipengaruhi oleh sensitivitas alat, jarak sensor, dan waktu pengukuran yang tidak bertepatan dengan aktivitas kritis seperti

pengoperasian hydraulic breaker. Penelitian oleh Kang et al. (2021) dan Hong et al. (2020) menunjukkan bahwa getaran konstruksi dapat menimbulkan kekhawatiran nyata terhadap keselamatan dan properti, khususnya di kawasan padat. Oleh karena itu, sistem pemantauan getaran tetap perlu dipertahankan sebagai tindakan pencegahan berbasis risiko, meskipun skor FIS saat ini belum mencerminkan ancaman getaran yang signifikan.

Ambang kategori Tinggi pada variabel getaran ditetapkan secara sengaja pada nilai konservatif (0,50 mm/s), lebih ketat dibandingkan ambang kerusakan struktural pada baku mutu umum. Penetapan ini merupakan penerapan prinsip kehati-hatian (*precautionary principle*) mengingat Gedung C berjarak sangat dekat (30-50 meter) dari lokasi pembongkaran dan tetap beroperasi aktif sebagai kantor pemerintah selama demolisi berlangsung, sehingga bukan merupakan kesalahan teknis melainkan representasi yang disengaja untuk melindungi bangunan penerima dampak yang sensitif. Dibandingkan dengan penelitian terdahulu yang umumnya menilai debu, kebisingan, dan getaran secara terpisah terhadap ambang batas masing-masing (Kang et al., 2021; Hong et al., 2020; Patel et al., 2024), penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan FIS mampu mengintegrasikan ketiga parameter dengan satuan dan ambang batas berbeda ke dalam satu indikator komposit yang lebih mudah diinterpretasikan untuk pengambilan keputusan mitigasi, sekaligus mengakomodasi kondisi ketika nilai pengukuran berada pada daerah transisi antar-kategori.

Hasil penelitian ini memiliki implikasi praktis dan metodologis dalam pengelolaan lingkungan pada proyek pembongkaran gedung bertingkat. Secara praktis, temuan bahwa seluruh titik pemantauan berada pada kategori bahaya tinggi dengan PM2.5 sebagai parameter paling dominan menunjukkan bahwa pengendalian debu perlu ditempatkan sebagai prioritas utama dalam perencanaan dan pelaksanaan demolisi. Selain itu, integrasi kebisingan dan getaran dalam satu indikator tingkat bahaya dapat membantu kontraktor, pengelola proyek, dan pengawas lingkungan dalam menentukan prioritas pengendalian secara lebih terarah berdasarkan kondisi lapangan.

Secara metodologis, penggunaan Fuzzy Inference System metode Mamdani menunjukkan potensi pendekatan berbasis fuzzy untuk mengintegrasikan parameter lingkungan yang memiliki satuan, karakteristik, dan ambang batas berbeda menjadi satu indikator komposit. Model ini dapat menjadi dasar awal bagi pengembangan sistem penilaian bahaya lingkungan yang lebih adaptif dan mendukung pengambilan keputusan berbasis risiko. Namun, karena model dikembangkan berdasarkan satu studi kasus dan satu periode pengukuran, penerapannya pada proyek lain perlu disertai penyesuaian fungsi keanggotaan, basis aturan, serta validasi menggunakan data lapangan yang lebih luas.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa integrasi parameter debu PM2.5, kebisingan, dan getaran menggunakan *Fuzzy Inference System* (FIS) metode Mamdani menunjukkan bahwa seluruh titik pemantauan pada studi kasus pembongkaran Gedung A Jakarta berada pada kategori bahaya lingkungan Tinggi, dengan skor 8,4240 (Area Proyek Gedung A), 8,3868 (Gedung B), dan 8,4315 (Gedung C). Karena selisih ketiga skor sangat kecil (kurang dari 0,05 poin), tingkat bahaya pada ketiga lokasi dapat dianggap setara, dengan debu PM2.5 sebagai parameter paling dominan, diikuti kebisingan, sementara getaran tercatat rendah pada saat pengukuran.

Berdasarkan parameter dominan tersebut, prioritas mitigasi pertama diarahkan pada pengendalian debu PM2.5 melalui penyiraman, *water mist*, dan pemasangan *dust screen*, diikuti pengendalian kebisingan melalui *noise barrier* dan pengaturan waktu kerja, disertai pemantauan getaran berkelanjutan pada aktivitas yang berpotensi impulsif. Model FIS yang dikembangkan memperoleh validasi *expert judgment* dengan skor rata-rata 4,44 (skala 1-5) dan dinilai valid serta dapat diimplementasikan sebagai dasar penentuan prioritas mitigasi. Hasil penelitian ini berlaku untuk studi kasus pembongkaran Gedung A dengan titik pemantauan di Gedung B dan Gedung C, sehingga belum dapat digeneralisasikan untuk seluruh proyek demolisi gedung bertingkat.

Penelitian ini memiliki sejumlah keterbatasan metodologis. Pertama, nilai getaran nol pada seluruh titik belum dapat langsung diartikan sebagai tidak adanya getaran demolisi, sehingga pengukuran berikutnya perlu dilakukan secara kontinu atau berbasis pemicu kejadian dengan mencatat *peak particle velocity* selama fase kritis. Kedua, keandalan FIS sangat bergantung pada ketersediaan basis regulasi untuk fungsi keanggotaan dan kelengkapan basis aturan; penggunaan 27 aturan yang mencakup seluruh kombinasi input pada penelitian ini menghilangkan ruang aturan yang tidak terdefinisi. Ketiga, penelitian hanya mencakup satu proyek dengan tiga titik pemantauan pada satu waktu pengukuran, sehingga hasilnya bersifat kontekstual dan belum dapat digeneralisasikan pada seluruh proyek pembongkaran gedung bertingkat.

REKOMENDASI

Bagi kontraktor dan pengelola proyek demolisi, prioritas mitigasi tertinggi diarahkan pada pengendalian debu melalui penyiraman air bertekanan (*wet suppression*) secara berkala, pemasangan *dust screen* pada fasad yang menghadap bangunan sensitif, serta penggunaan alat berat dengan *water mist sprayer* terintegrasi. Pengendalian kebisingan dilakukan melalui

pemasangan *acoustic screen*, pembatasan jam operasional alat berat, dan pertimbangan metode demolisi yang lebih senyap pada lokasi berdekatan dengan bangunan penerima dampak sensitif. Pemantauan getaran tetap perlu dipertahankan secara kontinu menggunakan seismograph pada fase pekerjaan kritis, meskipun hasil saat ini menunjukkan kategori rendah.

Bagi pengawas lingkungan dan konsultan supervisi, disarankan penetapan ambang tindakan (*action level*) pada 75% nilai ambang batas sebagai peringatan dini, penggunaan alat pemantauan waktu nyata yang terhubung sistem peringatan otomatis, serta protokol penghentian sementara (*stop-work protocol*) apabila baku mutu terlampaui secara berkelanjutan. Bagi pemerintah daerah dan regulator, diperlukan kewajiban penyusunan Rencana Pengelolaan Debu (*Dust Management Plan*) dan penetapan zona penyangga (*buffer zone*) minimum antara area demolisi dan bangunan sensitif di sekitarnya sebagai persyaratan teknis perizinan pembongkaran gedung bertingkat di kawasan perkotaan padat. Untuk penelitian selanjutnya, model FIS dapat dikembangkan dengan menambahkan variabel lingkungan dan karakteristik proyek yang belum dikaji, seperti kecepatan dan arah angin, jarak terhadap bangunan sensitif, metode pembongkaran, durasi pekerjaan, serta volume material yang dibongkar, untuk meningkatkan kemampuan model dalam merepresentasikan kondisi lapangan yang lebih kompleks. Integrasi model FIS dengan sistem pemantauan lingkungan real-time berbasis *Internet of Things* (IoT) juga berpotensi dikembangkan menjadi early warning system dan dashboard pendukung keputusan yang memberikan rekomendasi mitigasi secara otomatis, sehingga pengelolaan bahaya lingkungan pada proyek demolisi dapat dilakukan secara lebih proaktif, terukur, dan responsif. Validasi lanjutan dengan data dari proyek demolisi lain, periode pemantauan yang lebih panjang, dan jumlah titik sensor yang lebih banyak juga diperlukan untuk menguji kemampuan generalisasi model.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Tri Joko Wahyu Adi, ST., MT., Ph.D selaku dosen pembimbing atas arahan dan masukan selama penelitian ini berlangsung, kepada Sekolah Interdisiplin Manajemen Teknologi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, atas dukungan fasilitas akademik, serta kepada *Project Manager*, Manajer HSE, dan Konsultan Supervisi proyek pembongkaran Gedung A yang telah bersedia menyediakan data pemantauan lingkungan dan berpartisipasi dalam proses validasi model.

REFERENSI

- Ahmad Shukri, F. A., & Isa, Z. (2021). Experts' judgment-based Mamdani-type decision system for risk assessment. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2021/6652419>
- Badan Standardisasi Nasional. (2010). SNI 7570:2010 tentang Getaran Mekanis pada Bangunan Gedung.
- Fang, X., Chang, R., Zhang, Y., Zuo, J., Zou, Y., & Han, Y. (2024). Monitoring airborne particulate matter from building construction: A systematic review. *Journal of Building Engineering*, 86, 108708. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108708>
- 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, 106636. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106636>
- Kang, H., Lee, D.-E., Hong, T., Park, H. S., & Jung, S. (2021). Development of a real-time automated monitoring system for managing the hazardous environmental pollutants at the construction site. *Journal of Hazardous Materials*, 402, 123483. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123483>
- Kementerian Negara Lingkungan Hidup Republik Indonesia. (1996). Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 48 Tahun 1996 tentang Baku Tingkat Kebisingan.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia. (2021). Peraturan Menteri PUPR Nomor 18 Tahun 2021 tentang Standar Pembongkaran Bangunan Gedung.
- Liu, Y., Yang, X., & Chen, Y. (2013). Environmental risk assessment using a fuzzy logic and Bayesian network approach. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 27(6), 1375-1384.
- Lu, W., Yuan, H., Li, J., Hao, J. J. L., & Ding, Z. (2019). Quantifying construction and demolition waste impacts: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 146, 786-797.
- Mir, M., Nasirzadeh, F., Lee, S., & Mills, A. (2022). Construction noise management: A systematic review and directions for future research. *Applied Acoustics*, 197, 108936. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.108936>
- 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>
- Pemerintah Republik Indonesia. (2021). Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.
- Tam, V. W. Y., Tam, C. M., & Tsui, W. S. (2009). Green demolition practices in the Australian construction industry. *Journal of Cleaner Production*, 17(14), 1332-1339.
- Wang, J., Liu, Y., & Zhang, R. (2018). Investigation of particulate matter and noise emissions during building demolition. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(3), 158.
- Wulandari, D., Susanti, E., & Arifin, A. (2020). Studi kualitas udara pada aktivitas pembongkaran bangunan di Jakarta. *Jurnal Rekayasa Sipil dan Lingkungan*, 4(2), 150-157.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353.
- Zuo, J., & Zhao, Z. Y. (2014). Green building research-current status and future agenda: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 271-281.