

Analisis Emisi dan Dispersi Polutan Udara pada Tahap Konstruksi Pembangunan Hotel di Pecatu, Kabupaten Badung

Sang Kompiang Rizki Putra Atmaja¹, I Wayan Gde Sutasoma^{2*}, I Made Panji Tirta Prakasa³, Made Ari Riska Dayanti⁴

¹Fakultas Teknik, Universitas Udayana, Denpasar, Indonesia

^{2,3,4}Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Pendidikan Nasional, Denpasar, Indonesia

*gdesutasoma@undiknas.ac.id

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 11 April 2026

Revised: 13 Juni 2026

Accepted: 15 Juli 2026

Available online: 20 Juli 2026

ABSTRAK

Kegiatan konstruksi hotel berpotensi menurunkan kualitas udara ambien melalui emisi pembakaran bahan bakar diesel dan debu fugitif yang dihasilkan oleh pergerakan kendaraan serta aktivitas mekanis. Penelitian ini bertujuan menganalisis laju emisi, pola dispersi, dan perubahan kualitas udara akibat tiga kelompok kegiatan konstruksi, yaitu mobilisasi peralatan dan material, penyiapan lahan dan penggalian pondasi, serta pembangunan bangunan utama dan fasilitas pendukung di Pecatu, Kabupaten Badung. Penelitian menggunakan data sekunder dari dokumen analisis dampak lingkungan yang diolah secara kuantitatif untuk parameter SO₂, NO₂, CO, TSP, PM₁₀, dan PM_{2.5}. Laju emisi dihitung menggunakan pendekatan faktor emisi, emisi debu fugitif dihitung dengan metode AP-42, sedangkan konsentrasi tambahan diperkirakan melalui model dispersi sumber garis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rona awal kualitas udara pada tiga titik pengamatan tergolong baik. Mobilisasi menjadi sumber dominan dengan kontribusi relatif sebesar 97,1–99,9% terhadap konsentrasi tambahan pada jarak evaluasi. Skenario ini menyebabkan konsentrasi NO₂ dan TSP melampaui baku mutu, dengan nilai ISPU NO₂ sebesar 154,47 yang termasuk kategori tidak sehat. Sementara itu, penyiapan lahan dan pembangunan bangunan tidak mengubah kategori kualitas udara dari kondisi baik. Oleh karena itu, pengendalian emisi kendaraan, resuspensi debu jalan, dan pemantauan kualitas udara di sekitar jalur mobilisasi perlu menjadi prioritas selama tahap konstruksi.

KATA KUNCI: emisi konstruksi; dispersi polutan; kualitas udara; debu fugitif; ISPU

ABSTRACT

Hotel construction activities may deteriorate ambient air quality through diesel-fuel combustion emissions and fugitive dust generated by vehicle movement and mechanical operations. This study aims to analyze emission rates, dispersion patterns, and changes in air quality resulting from three groups of construction activities: equipment and material mobilization, land preparation and foundation excavation, and construction of the main building and supporting facilities in Pecatu, Badung Regency. Secondary data from an environmental impact assessment document were quantitatively analyzed for SO₂, NO₂, CO, TSP, PM₁₀, and PM_{2.5}. Emission rates were estimated using an emission-factor approach, fugitive dust emissions were calculated using the AP-42 method, and incremental pollutant concentrations were predicted using a line-source dispersion model. The results indicate that baseline air quality at the three monitoring points was classified as good. Mobilization was the dominant source, contributing 97.1–99.9% of the modeled concentration increments at the evaluation distance. This scenario caused NO₂ and TSP concentrations to exceed the applicable ambient air quality standards, with an NO₂ air quality index value of 154.47, classified as unhealthy. In contrast, land preparation and building construction did not alter the good air quality category. Therefore, vehicle-emission control, road-dust suppression, and air-quality monitoring along mobilization routes should be prioritized during the construction phase.

KEYWORDS: construction emissions; pollutant dispersion; air quality; fugitive dust; air quality index

1. PENDAHULUAN

Pembangunan fasilitas akomodasi merupakan salah satu bentuk perkembangan kawasan pariwisata yang dapat menimbulkan tekanan sementara terhadap lingkungan selama tahap konstruksi. Mobilisasi kendaraan, pengoperasian alat berat, penyiapan lahan, penggalian, pemindahan material, serta pekerjaan struktur menghasilkan emisi gas buang dan partikulat. Polutan tersebut dapat menyebar hingga ke luar batas tapak kegiatan. Dampak terhadap kualitas udara perlu diperhatikan karena berhubungan dengan kesehatan manusia, kenyamanan masyarakat, serta keselamatan dan kesehatan pekerja. Organisasi Kesehatan Dunia menetapkan partikulat halus, nitrogen dioksida, sulfur dioksida, karbon monoksida, dan ozon sebagai polutan utama dalam pengelolaan risiko kesehatan akibat pencemaran udara [1]. Di Indonesia, penilaian kualitas udara ambien mengacu pada baku mutu yang ditetapkan dalam Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 [2]. Data penelitian berasal dari dokumen AMDAL yang pengukuran rona awalnya dilakukan pada tahun 2025, sedangkan proses penilaian dan pengujian dokumen baru dilaksanakan pada tahun 2026. Dengan demikian, data dalam dokumen tersebut baru digunakan sebagai sumber kajian setelah melalui proses evaluasi AMDAL pada tahun 2026.

Pencemar udara pada lokasi konstruksi dihasilkan melalui dua mekanisme utama. Mekanisme pertama adalah pembakaran bahan bakar pada kendaraan pengangkut dan alat berat yang menghasilkan SO_2 , NO_2 , CO , serta partikulat. Mekanisme kedua adalah pelepasan debu fugitif akibat pergerakan kendaraan dan aktivitas mekanis. Aktivitas tersebut menyebabkan material yang telah mengendap di permukaan jalan kembali tersuspensi ke udara. Konsentrasi partikulat pada proyek konstruksi dipengaruhi oleh jenis pekerjaan, karakteristik material, intensitas pergerakan kendaraan, kondisi permukaan jalan, dan penerapan tindakan pengendalian [3]. Paparan debu konstruksi dalam konsentrasi dan durasi tertentu dapat meningkatkan risiko iritasi saluran pernapasan, inflamasi, penurunan fungsi paru, serta gangguan kesehatan kerja [4]. Kajian pada tahap pekerjaan tanah dan pondasi juga menunjukkan adanya perbedaan konsentrasi partikulat antara sisi datang angin dan sisi bawah angin dari lokasi konstruksi [5].

Setelah dilepaskan dari sumber, polutan mengalami proses transportasi dan dispersi di atmosfer. Angin mengangkut polutan secara horizontal melalui proses adveksi, sedangkan turbulensi atmosfer menyebabkan pencampuran secara lateral dan vertikal. Pencampuran dengan massa udara di sekitarnya selanjutnya menurunkan konsentrasi polutan. Partikel berukuran besar cenderung lebih cepat mengendap akibat gravitasi, sedangkan PM_{10} dan $\text{PM}_{2.5}$ dapat bertahan lebih lama di atmosfer dan terbawa menuju reseptor yang lebih jauh. Proses tersebut dipengaruhi oleh stabilitas atmosfer, tinggi lapisan pencampuran, suhu udara, kecepatan dan arah angin, kekasaran permukaan, serta kondisi topografi [6].

Pada kondisi atmosfer tidak stabil, gerakan vertikal dan turbulensi berlangsung lebih kuat sehingga polutan lebih cepat tercampur dan terencerkan. Sebaliknya, atmosfer stabil membatasi pencampuran vertikal dan dapat mempertahankan polutan di dekat permukaan. Kelas stabilitas atmosfer dalam pemodelan dispersi umumnya ditentukan berdasarkan kombinasi kecepatan angin, intensitas penyinaran matahari pada siang hari, serta tutupan awan pada malam hari [7]. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa konsentrasi pada reseptor tidak hanya ditentukan oleh besarnya emisi, tetapi juga oleh kemampuan atmosfer dalam mengangkut dan mencampurkan polutan.

Kecepatan angin memiliki pengaruh ganda terhadap konsentrasi polutan. Angin yang lebih kuat dapat mempercepat pengangkutan dan pengenceran emisi gas. Namun, pada permukaan yang kering dan tidak tertutup, peningkatan kecepatan angin juga dapat memperbesar pelepasan dan resuspensi debu. Arah angin menentukan reseptor yang berada pada jalur penyebaran utama, sedangkan perubahan arah angin dapat menggeser zona konsentrasi maksimum. Pada kawasan pesisir seperti Pecatu, perbedaan pemanasan antara daratan dan perairan dapat membentuk sirkulasi angin lokal yang memengaruhi arah penyebaran polutan selama periode tertentu.

Sejumlah penelitian telah mengembangkan pendekatan untuk mengevaluasi dampak pencemaran udara akibat kegiatan konstruksi. Yan dkk. mengusulkan kerangka evaluasi yang menghubungkan sumber emisi, kondisi meteorologi, jarak reseptor, dan dampak terhadap lingkungan sekitar [8]. Kajian sistematis lainnya menunjukkan bahwa pemantauan lapangan, inventarisasi aktivitas, penggunaan faktor emisi, dan pemodelan dispersi merupakan pendekatan yang saling melengkapi [9]. Kondisi meteorologi, khususnya kecepatan dan arah angin, berperan dalam menentukan arah penyebaran serta tingkat pengenceran polutan. Oleh karena itu, perubahan kondisi angin dapat menyebabkan perbedaan konsentrasi polutan pada batas tapak maupun lokasi reseptor [10].

Pemantauan gravimetrik dapat menghasilkan data partikulat yang dapat ditelusuri, tetapi pelaksanaannya membutuhkan penentuan titik sampling, durasi pengukuran, serta pengendalian mutu yang memadai [11]. Sensor waktu nyata dapat digunakan untuk mengidentifikasi perubahan konsentrasi secara cepat

dan mengevaluasi hubungan antara aktivitas konstruksi dengan peningkatan partikulat [12], [13]. Namun, kedua pendekatan tersebut terutama menggambarkan kondisi pada saat pengukuran. Pada tahap perencanaan, inventarisasi emisi dan pemodelan dispersi diperlukan untuk memprakirakan dampak sebelum kegiatan dilaksanakan.

Faktor emisi dan persamaan AP-42 dapat digunakan untuk menghitung emisi dari kendaraan, alat berat, dan debu jalan. Emisi debu jalan dipengaruhi antara lain oleh kandungan debu halus pada permukaan, berat kendaraan, jumlah lintasan, panjang ruas, serta kondisi permukaan jalan [14], [15]. Model dispersi kemudian digunakan untuk memperkirakan perubahan konsentrasi pada berbagai jarak dari sumber. Hasil pemodelan dapat membantu mengidentifikasi area penerima yang berpotensi mengalami konsentrasi tertinggi, menentukan lokasi pemantauan, dan merumuskan tindakan pengendalian. Hasilnya selanjutnya dibandingkan dengan baku mutu udara ambien dan diklasifikasikan berdasarkan Indeks Standar Pencemar Udara sesuai Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 14 Tahun 2020 [16].

Jenis alat, material, dan tahapan pekerjaan konstruksi menghasilkan karakter emisi yang berbeda. Peralatan diesel cenderung menghasilkan polutan gas dan partikulat halus dari pembakaran, sedangkan pekerjaan tanah, pemindahan material, dan pergerakan kendaraan lebih dominan menghasilkan debu fugitif. Penataan jalur kendaraan dan lokasi penumpukan material dapat mengurangi penyebaran debu ke luar tapak [17]. Dari sisi kesehatan, pekerja konstruksi merupakan kelompok yang berpotensi menerima paparan lebih tinggi karena kedekatannya dengan sumber dan lamanya durasi paparan [18], [19].

Penelitian terdahulu umumnya berfokus pada satu parameter partikulat, satu jenis pekerjaan konstruksi, atau hasil pemantauan dalam periode tertentu. Pendekatan tersebut belum sepenuhnya menunjukkan perbedaan kontribusi antaraktivitas konstruksi terhadap berbagai jenis polutan. Kajian yang membandingkan emisi gas dan partikulat dari mobilisasi kendaraan, pekerjaan tanah, serta pekerjaan bangunan dalam satu kerangka analisis juga masih terbatas. Keterbatasan tersebut semakin terlihat pada pembangunan hotel di kawasan pariwisata pesisir yang memiliki kondisi meteorologi khas, aktivitas pariwisata yang relatif tinggi, dan reseptor sensitif di sekitar lokasi kegiatan.

Kesenjangan penelitian dalam kajian ini terletak pada belum tersedianya analisis yang secara kuantitatif membandingkan kontribusi tiga kelompok kegiatan konstruksi terhadap emisi dan konsentrasi beberapa polutan sekaligus dalam konteks kawasan pariwisata pesisir Bali. Penelitian sebelumnya lebih banyak menilai konsentrasi partikulat berdasarkan hasil pemantauan langsung atau membahas risiko kesehatan secara umum. Sementara itu, hubungan antara laju emisi setiap kelompok kegiatan, mekanisme dispersi, jarak reseptor, baku mutu udara ambien, dan kategori ISPU masih belum banyak diintegrasikan dalam satu kerangka evaluasi.

Penelitian ini bertujuan menganalisis laju emisi dan pola dispersi SO_2 , NO_2 , CO, TSP, PM_{10} , dan $\text{PM}_{2.5}$ pada tahap konstruksi pembangunan hotel di Pecatu, Kabupaten Badung. Analisis dilakukan terhadap tiga kelompok kegiatan, yaitu mobilisasi peralatan dan material, penyiapan lahan dan penggalian pondasi, serta pembangunan bangunan utama dan fasilitas pendukung. Setiap kelompok kegiatan dibandingkan berdasarkan besarnya laju emisi, konsentrasi tambahan pada jarak reseptor, dan perubahan kategori kualitas udara.

Kebaruan penelitian ini terletak pada pengintegrasian inventarisasi emisi multipolutan dan pemodelan dispersi untuk membandingkan kontribusi tiga kelompok kegiatan konstruksi dalam satu kerangka evaluasi. Penelitian tidak hanya menilai besarnya emisi total, tetapi juga mengidentifikasi kegiatan yang memberikan kontribusi dominan terhadap konsentrasi SO_2 , NO_2 , CO, TSP, PM_{10} , dan $\text{PM}_{2.5}$. Hasil pemodelan dievaluasi menggunakan baku mutu udara ambien dan kategori ISPU. Pendekatan tersebut menghasilkan dasar yang lebih spesifik untuk menentukan sumber prioritas, lokasi reseptor yang perlu diperhatikan, dan bentuk pengendalian emisi yang sesuai pada pembangunan hotel di kawasan pariwisata pesisir.

2. METODE

Penelitian menggunakan rancangan deskriptif-kuantitatif melalui analisis data sekunder. Objek kajian adalah rencana pembangunan hotel berkapasitas 70 kamar dengan luas bangunan 33.784 m^2 di wilayah Pecatu, Kecamatan Kuta Selatan, Kabupaten Badung. Nama usaha dan pemrakarsa tidak dicantumkan untuk menjaga anonimitas objek. Data utama berasal dari dokumen analisis dampak lingkungan tahun 2026 yang memuat rona awal kualitas udara, karakteristik kegiatan konstruksi, faktor emisi, perhitungan laju emisi, dan hasil pemodelan dispersi [20].

Rona awal kualitas udara diperoleh dari pengukuran pada 22 Oktober 2025 di tiga titik penerima yang mewakili area kegiatan dan lingkungan di sekitarnya. Parameter yang digunakan dalam analisis adalah SO_2 , NO_2 , CO, TSP, PM_{10} , dan $\text{PM}_{2.5}$. Data rona awal dibandingkan dengan baku mutu udara ambien nasional [2] dan digunakan sebagai kondisi tanpa proyek. Hasil perhitungan ISPU digunakan untuk menetapkan kategori kualitas

lingkungan awal berdasarkan rentang indeks 1–50 sebagai baik, 51–100 sebagai sedang, 101–200 sebagai tidak sehat, 201–300 sebagai sangat tidak sehat, dan lebih dari 300 sebagai berbahaya [16].

Analisis sumber emisi dibagi menjadi tiga skenario kegiatan. Skenario pertama adalah mobilisasi peralatan dan material dengan intensitas rata-rata 36,67 pergerakan kendaraan per hari, kecepatan 20 km/jam, panjang ruas kajian 1 km, dan konsumsi bahan bakar 0,56 liter per kendaraan-km. Skenario kedua adalah penyiapan lahan dan penggalian pondasi dengan 13 unit alat berat aktif, konsumsi bahan bakar 17 liter/jam, dan waktu operasi 8 jam/hari. Skenario ketiga adalah pembangunan bangunan utama dan fasilitas pendukung dengan 14 unit alat berat, konsumsi bahan bakar 17 liter/jam, dan waktu operasi 8 jam/hari. Faktor emisi yang digunakan untuk bahan bakar solar adalah 5,02 g/liter untuk SO₂, 39,53 g/liter untuk NO₂, dan 35,57 g/liter untuk CO. Faktor partikulat adalah 39 g/km-unit untuk TSP, 2,12 g/km-unit untuk PM₁₀, dan 0,33 g/km-unit untuk PM_{2.5}.

Laju emisi setiap parameter dihitung berdasarkan faktor emisi, intensitas kegiatan, dan efisiensi pengurangan polutan. Karena perhitungan merepresentasikan kondisi tanpa pengendalian, efisiensi pengurangan ditetapkan 0%. Persamaan laju emisi dinyatakan sebagai berikut:

$$Q_i = EF_i \times A \times (1 - ER/100) \quad (1)$$

dengan Q_i adalah laju emisi polutan i , EF_i adalah faktor emisi, A adalah intensitas kegiatan per satuan waktu, dan ER adalah efisiensi pengurangan emisi. Emisi debu fugitif akibat kendaraan pada jalan beraspal dihitung menggunakan pendekatan AP-42 dengan mempertimbangkan faktor pengali ukuran partikel, kandungan debu permukaan, berat kendaraan, jumlah perjalanan, dan panjang ruas [14].

Konsentrasi tambahan dihitung dengan model dispersi sumber garis. Model menggunakan kelas stabilitas atmosfer B, kecepatan angin 1,5 m/detik, tinggi penerima 1,5 m, dan koefisien dispersi vertikal yang berubah terhadap jarak. Bentuk umum persamaan yang digunakan adalah:

$$C_j(x, z) = [2Q_i / (\sqrt{(2\pi) U \sigma_z})] \exp[-z^2 / (2\sigma_z^2)] \quad (2)$$

dengan $C_j(x, z)$ adalah konsentrasi polutan pada posisi penerima, Q_i adalah laju emisi, U adalah kecepatan angin, σ_z adalah koefisien dispersi vertikal, dan z adalah tinggi penerima. Pemodelan dilakukan pada jarak 10–200 m untuk sumber mobilisasi serta 25–200 m untuk pekerjaan tanah dan pekerjaan bangunan. Konsentrasi dengan proyek diperoleh dengan menjumlahkan rona awal dan konsentrasi tambahan hasil model.

Untuk mengidentifikasi sumber dominan, kontribusi relatif dihitung dari konsentrasi tambahan pada jarak evaluasi 100 m. Nilai ini merupakan perbandingan antarskenario dan tidak dimaksudkan sebagai penjumlahan paparan simultan karena pelaksanaan kegiatan dapat berlangsung pada fase yang berbeda. Persamaan kontribusi relatif dinyatakan sebagai berikut:

$$D_i = [\Delta C_{i, mob} / (\Delta C_{i, mob} + \Delta C_{i, tanah} + \Delta C_{i, bangunan})] \times 100\% \quad (3)$$

dengan D_i adalah kontribusi relatif mobilisasi untuk parameter i dan ΔC adalah konsentrasi tambahan hasil pemodelan. Interpretasi dilakukan melalui perbandingan laju emisi, peluruhan konsentrasi terhadap jarak, pemenuhan baku mutu, perubahan kategori ISPU, dan dominasi relatif sumber.

2.1 Sumber Faktor Emisi

Faktor emisi kendaraan dan alat berat ditentukan berdasarkan jenis bahan bakar, kapasitas mesin, jumlah unit, serta durasi pengoperasian masing-masing peralatan. Nilai faktor emisi gas pencemar dan partikulat mengacu pada pedoman inventarisasi emisi yang relevan serta basis data Compilation of Air Pollutant Emissions Factors AP-42 yang diterbitkan oleh United States Environmental Protection Agency. Faktor emisi debu fugitif dari jalan tidak beraspal dan aktivitas pemindahan material dihitung dengan mempertimbangkan kandungan debu halus pada permukaan, berat rata-rata kendaraan, intensitas pergerakan, serta efektivitas pengendalian debu. Pemilihan faktor emisi dilakukan dengan menyesuaikan karakteristik sumber dan aktivitas konstruksi yang dikaji agar hasil perhitungan mewakili kondisi rencana kegiatan.

2.2 Dasar Pemilihan Parameter Meteorologi

Parameter meteorologi yang digunakan dalam pemodelan meliputi kecepatan angin, arah angin, suhu udara, dan stabilitas atmosfer. Kecepatan angin digunakan untuk menentukan tingkat pengenceran dan jarak pengangkutan polutan. Arah angin digunakan untuk menentukan jalur penyebaran polutan dari sumber menuju reseptor. Suhu udara digunakan karena memengaruhi perbedaan densitas udara dan proses pencampuran vertikal di atmosfer. Parameter tersebut dipilih karena memiliki pengaruh langsung terhadap proses adveksi, difusi turbulen, dan pengenceran polutan. Data meteorologi yang digunakan merupakan data yang mewakili

kondisi wilayah Pecatu dan periode kajian, sehingga dapat menggambarkan pola penyebaran polutan pada lokasi penelitian.

2.3 Penentuan Kelas Stabilitas Atmosfer

Kelas stabilitas atmosfer ditentukan menggunakan klasifikasi Pasquill–Gifford yang membagi kondisi atmosfer menjadi kelas A sampai F. Kelas A menggambarkan kondisi atmosfer sangat tidak stabil, sedangkan kelas F menggambarkan kondisi sangat stabil. Penentuan kelas dilakukan berdasarkan kombinasi kecepatan angin, intensitas penyinaran matahari pada siang hari, serta kondisi tutupan awan pada malam hari. Kondisi tidak stabil menunjukkan pencampuran vertikal yang lebih kuat sehingga polutan lebih cepat terdispersi. Sebaliknya, kondisi stabil membatasi pencampuran vertikal dan dapat meningkatkan konsentrasi polutan di sekitar permukaan. Kelas stabilitas yang digunakan dalam pemodelan dipilih berdasarkan kondisi meteorologi yang paling mewakili periode dan lokasi penelitian.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Kondisi Awal Kualitas Udara

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa seluruh parameter pada tiga titik masih berada di bawah baku mutu udara ambien. Variasi antartitik terutama terlihat pada partikulat, sedangkan konsentrasi gas menunjukkan nilai yang sama karena beberapa hasil berada pada batas deteksi metode. PM_{10} meningkat dari 15,70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pada Titik 1 menjadi 20,20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pada Titik 3, sedangkan $PM_{2.5}$ meningkat dari 11,50 menjadi 14,80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Meskipun demikian, nilai ISPU seluruh titik tetap berada pada kategori baik. Kondisi ini menunjukkan bahwa sebelum konstruksi dimulai, kapasitas lingkungan udara di sekitar tapak belum mengalami tekanan pencemaran yang berarti.

Tabel 1. Kondisi awal kualitas udara ambien pada tiga titik pengamatan

Parameter	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Baku mutu	Status
SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	33,60	33,60	33,60	150	Memenuhi
NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	9,70	9,70	9,70	200	Memenuhi
CO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1.143,00	1.143,00	1.143,00	10.000	Memenuhi
TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	48,20	52,80	62,00	230	Memenuhi
PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	15,70	17,20	20,20	75	Memenuhi
$PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	11,50	12,60	14,80	55	Memenuhi

Sumber: data sekunder dokumen ANDAL, diolah (2026).

Nilai awal tersebut penting karena konsentrasi tambahan dari proyek tidak berdiri sendiri, tetapi terakumulasi dengan kondisi ambien yang telah ada. Parameter dengan rona awal lebih tinggi memiliki ruang yang lebih sempit sebelum mencapai baku mutu. Pada Titik 3, misalnya, TSP telah mencapai 62,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan $PM_{2.5}$ mencapai 14,80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Oleh karena itu, evaluasi dampak tidak cukup hanya membandingkan laju emisi, tetapi harus memperhitungkan konsentrasi latar dan lokasi penerima.

3.2 Laju Emisi Berdasarkan Sumber Kegiatan

Laju emisi memperlihatkan perbedaan yang jelas antarkegiatan. Mobilisasi menghasilkan laju emisi tertinggi untuk seluruh parameter, terutama TSP sebesar 7.944,44 $\mu\text{g}/\text{detik}$, NO_2 sebesar 4.509,35 $\mu\text{g}/\text{detik}$, dan CO sebesar 4.057,62 $\mu\text{g}/\text{detik}$. Tingginya TSP berasal dari kombinasi emisi kendaraan dan resuspensi debu pada permukaan jalan. Penyiapan lahan menghasilkan emisi gas yang lebih rendah dibanding mobilisasi, tetapi tetap lebih tinggi daripada pekerjaan bangunan untuk TSP, PM_{10} , dan $PM_{2.5}$ karena lintasan kerja alat berat lebih panjang. Pekerjaan bangunan memiliki laju emisi terendah untuk partikulat karena pergerakan alat berlangsung dalam area kerja yang lebih terbatas.

Perbedaan laju emisi tersebut sesuai dengan karakteristik kegiatan konstruksi yang dilaporkan dalam literatur. Pergerakan kendaraan pada jalur proyek dapat menghasilkan partikel melalui emisi knalpot dan resuspensi debu, sedangkan pekerjaan tanah sangat dipengaruhi kadar air material, frekuensi gangguan permukaan, serta kecepatan angin [8], [19]. Temuan ini juga menegaskan bahwa faktor emisi berbasis aktivitas lebih informatif daripada penggunaan satu nilai emisi rata-rata untuk seluruh tahap konstruksi [12].

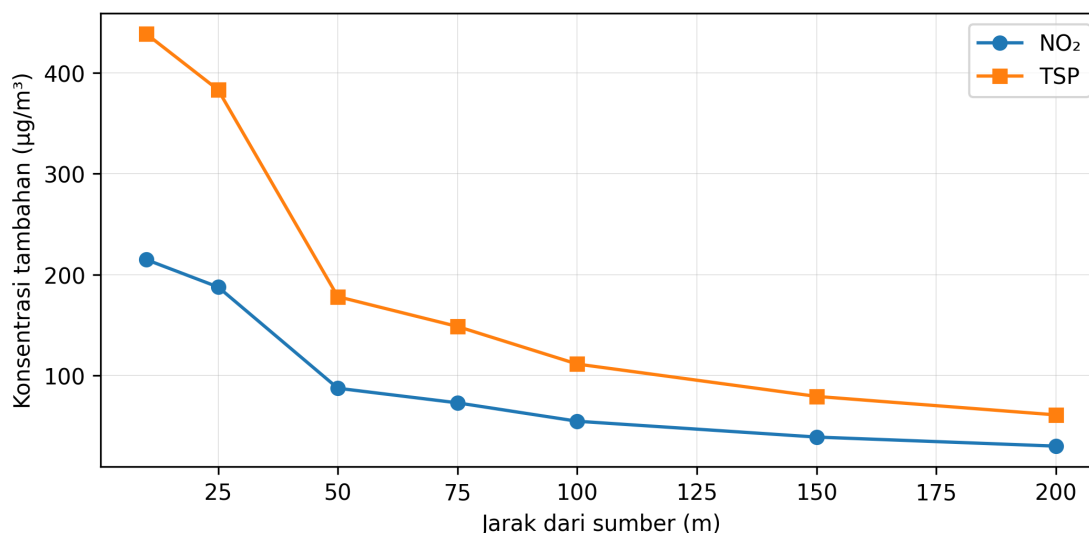
Tabel 2. Laju emisi polutan menurut kelompok kegiatan konstruksi

Parameter	Mobilisasi	Penyiapan lahan dan penggalian	Pembangunan bangunan
SO ₂ (µg/detik)	572,65	308,17	331,88
NO ₂ (µg/detik)	4.509,35	2.426,70	2.613,37
CO (µg/detik)	4.057,62	2.183,60	2.351,57
TSP (µg/detik)	7.944,44	501,61	121,73
PM ₁₀ (µg/detik)	431,85	27,27	6,61
PM _{2.5} (µg/detik)	67,22	4,24	1,03

Sumber: data sekunder dokumen ANDAL, diolah (2026).

3.3 Pola Dispersi dan Peluruhan Konsentrasi

Pemodelan menunjukkan konsentrasi tambahan menurun seiring bertambahnya jarak dari sumber. Pada skenario mobilisasi, konsentrasi tambahan TSP turun dari 438,85 µg/m³ pada jarak 10 m menjadi 60,69 µg/m³ pada jarak 200 m. NO₂ turun dari 214,80 menjadi 29,70 µg/m³ pada rentang jarak yang sama. Penurunan terbesar terjadi pada 25–50 m, kemudian laju peluruhan menjadi lebih landai. Pola tersebut menunjukkan bahwa penerima yang berada dekat jalur mobilisasi memiliki risiko dampak paling tinggi, khususnya ketika kondisi jalan kering dan kendaraan bergerak berulang kali.

**Gambar 1.** Peluruhan konsentrasi tambahan NO₂ dan TSP dari sumber mobilisasi terhadap jarak

Sumber: data sekunder dokumen ANDAL, diolah (2026).

Bentuk kurva pada Gambar 1 memperlihatkan bahwa jarak merupakan faktor penting dalam pengendalian paparan, tetapi jarak tidak dapat menjadi satu-satunya tindakan mitigasi. Arah dan kecepatan angin, stabilitas atmosfer, kelembapan permukaan, serta keberadaan penghalang fisik dapat mengubah pola sebaran aktual [10]. Oleh sebab itu, hasil model harus diperlakukan sebagai prakiraan skenario yang mendukung penentuan prioritas pemantauan, bukan sebagai pengganti pengukuran lapangan selama konstruksi.

3.4 Perubahan Konsentrasi, Baku Mutu, dan ISPU

Penambahan konsentrasi akibat mobilisasi menyebabkan NO₂ dan TSP melampaui baku mutu pada seluruh titik penerima. Konsentrasi NO₂ meningkat menjadi 228,26 µg/m³, melebihi baku mutu 200 µg/m³. TSP meningkat menjadi 494,74–508,54 µg/m³ atau lebih dari dua kali baku mutu 230 µg/m³. SO₂, CO, PM₁₀, dan PM_{2.5} masih berada di bawah baku mutu, tetapi mengalami peningkatan yang nyata dibanding rona awal. Kondisi ini memperlihatkan bahwa kepatuhan setiap parameter harus dinilai secara terpisah karena kategori kualitas udara keseluruhan dapat ditentukan oleh parameter dengan indeks tertinggi.

Berdasarkan konversi ISPU, NO₂ menghasilkan indeks 154,47 dan termasuk kategori tidak sehat. SO₂ berada pada kategori sedang dengan indeks 87,46, sedangkan PM₁₀ dan PM_{2.5} berada pada kategori sedang pada ketiga titik. CO tetap dalam kategori baik. Dengan menggunakan parameter terburuk sebagai dasar penilaian, kualitas lingkungan berubah dari skala 5 atau baik menjadi skala 3 atau tidak sehat sehingga besaran dampak

dinilai negatif sedang. Perubahan ini terutama dipicu emisi kendaraan diesel dan debu yang terangkat kembali selama mobilisasi.

Tabel 3. Konsentrasi kualitas udara pada skenario mobilisasi peralatan dan material

Parameter	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Baku mutu	Evaluasi
SO ₂ (µg/m ³)	61,36	61,36	61,36	150	Memenuhi
NO ₂ (µg/m ³)	228,26	228,26	228,26	200	Tidak memenuhi
CO (µg/m ³)	1.339,67	1.339,67	1.339,67	10.000	Memenuhi
TSP (µg/m ³)	494,74	499,34	508,54	230	Tidak memenuhi
PM ₁₀ (µg/m ³)	48,43	49,93	52,93	75	Memenuhi
PM _{2.5} (µg/m ³)	17,61	18,71	20,91	55	Memenuhi

Sumber: data sekunder dokumen ANDAL, diolah (2026).

Berbeda dengan mobilisasi, penyiapan lahan dan penggalian hanya menambah konsentrasi pada jarak 100 m sebesar 0,40 µg/m³ untuk SO₂, 3,15 µg/m³ untuk NO₂, 2,83 µg/m³ untuk CO, 0,67 µg/m³ untuk TSP, 0,04 µg/m³ untuk PM₁₀, dan 0,01 µg/m³ untuk PM_{2.5}. Pekerjaan bangunan menghasilkan penambahan yang sebanding atau lebih kecil. Seluruh parameter pada kedua skenario tetap memenuhi baku mutu dan mempertahankan kategori ISPU baik. Dengan demikian, dampaknya diklasifikasikan negatif sangat kecil pada asumsi pemodelan yang digunakan.

3.5 Dominasi Sumber dan Implikasi Pengelolaan

Perbandingan konsentrasi tambahan pada jarak 100 m menunjukkan bahwa mobilisasi merupakan sumber paling dominan. Kontribusi relatif mobilisasi mencapai 97,1% untuk SO₂, NO₂, dan CO, serta 99,8% untuk TSP dan PM_{2.5}. Dominasi partikulat yang sangat tinggi mengindikasikan bahwa pengendalian pada jalur kendaraan akan memberikan manfaat lebih besar daripada tindakan yang hanya berfokus pada area pekerjaan bangunan. Hasil ini tidak berarti pekerjaan tanah dan bangunan dapat diabaikan, tetapi menunjukkan urutan prioritas pengelolaan berdasarkan besaran dampak yang diperkirakan.

Tabel 4. Konsentrasi tambahan pada jarak 100 m dan kontribusi relatif mobilisasi

Parameter	Mobilisasi	Penyiapan lahan	Pekerjaan bangunan	Kontribusi mobilisasi
SO ₂ (µg/m ³)	27,76	0,40	0,43	97,1%
NO ₂ (µg/m ³)	218,56	3,15	3,39	97,1%
CO (µg/m ³)	196,67	2,83	3,05	97,1%
TSP (µg/m ³)	446,54	0,67	0,16	99,8%
PM ₁₀ (µg/m ³)	32,73	0,04	0,009	99,9%
PM _{2.5} (µg/m ³)	6,11	0,01	0,001	99,8%

Sumber: data sekunder dokumen ANDAL, diolah (2026).

Strategi pengelolaan perlu diarahkan pada pencegahan emisi di sumber. Muatan material halus harus ditutup selama pengangkutan, kendaraan wajib melalui fasilitas pencucian roda sebelum keluar proyek, dan ceceran material harus segera dibersihkan. Penyiraman jalan perlu disesuaikan dengan kondisi cuaca agar efektif tanpa menimbulkan limpasan atau permukaan licin. Kecepatan kendaraan di dalam area proyek perlu dibatasi paling tinggi 20 km/jam, sedangkan jadwal mobilisasi perlu diatur untuk menghindari antrean dan operasi mesin dalam kondisi diam yang berkepanjangan. Penataan jalur, lokasi penumpukan, dan penghalang dapat mengurangi penyebaran debu ke luar tapak [17].

Pengelolaan teknis harus dilengkapi dengan pemantauan. Pemeriksaan berkala kondisi mesin, uji emisi kendaraan, pencatatan jumlah perjalanan, dan inspeksi visual debu pada jalur akses dapat digunakan sebagai indikator kinerja. Pemantauan TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, dan NO₂ perlu diprioritaskan pada batas tapak yang berada di bawah arah angin dan dekat jalur mobilisasi. Sensor berbiaya rendah dapat membantu memberikan peringatan cepat apabila dikalibrasi dan digunakan bersama metode rujukan [13]. Perlindungan pekerja juga penting karena paparan debu yang berulang selama pekerjaan tanah dan mobilisasi dapat meningkatkan risiko kesehatan kerja [18], [19].

Hasil penelitian memiliki keterbatasan karena menggunakan faktor emisi dan parameter meteorologi skenario, bukan data emisi kontinu selama konstruksi berlangsung. Model juga belum memerinci variasi jam operasi, perubahan arah angin harian, efektivitas tindakan pengendalian, serta kontribusi kendaraan umum di luar proyek. Oleh karena itu, validasi melalui pemantauan lapangan diperlukan saat konstruksi dimulai.

Meskipun demikian, analisis komparatif ini memberikan dasar yang kuat untuk menempatkan mobilisasi sebagai area pengendalian utama dan menentukan parameter yang perlu dipantau secara lebih intensif.

3.6 Interpretasi Ilmiah Hasil Pemodelan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa aktivitas konstruksi menyebabkan peningkatan konsentrasi SO_2 , NO_2 , CO, TSP, PM_{10} , dan $\text{PM}_{2.5}$ pada seluruh titik evaluasi. Meskipun demikian, besarnya peningkatan tidak sama untuk setiap parameter dan kelompok kegiatan. Perbedaan tersebut mencerminkan variasi karakteristik sumber emisi, intensitas aktivitas, sifat fisik polutan, serta proses transportasi dan pengenceran di atmosfer.

Emisi SO_2 , NO_2 , dan CO terutama berkaitan dengan pembakaran bahan bakar pada kendaraan pengangkut dan alat berat. Besarnya emisi dipengaruhi oleh jumlah unit, kapasitas mesin, waktu operasi, konsumsi bahan bakar, kondisi pembakaran, dan umur peralatan. NO_2 dan CO menunjukkan penambahan konsentrasi yang lebih nyata dibandingkan SO_2 . Kondisi tersebut dapat dijelaskan oleh penggunaan bahan bakar solar dengan kandungan sulfur yang relatif terkendali, sedangkan pembentukan NO_2 dan CO lebih dipengaruhi oleh suhu pembakaran dan kesempurnaan proses pembakaran. CO cenderung meningkat ketika proses pembakaran berlangsung tidak sempurna, sementara nitrogen oksida terbentuk pada suhu pembakaran yang tinggi.

Partikulat memiliki pola pembentukan yang berbeda dari polutan gas. TSP, PM_{10} , dan $\text{PM}_{2.5}$ tidak hanya berasal dari gas buang, tetapi juga dari debu fugitif akibat pergerakan kendaraan, penggalian, pemindahan tanah, penumpukan material, dan pekerjaan bangunan. TSP merepresentasikan fraksi partikulat dengan ukuran lebih luas sehingga peningkatan konsentrasinya cenderung lebih besar. Sebaliknya, PM_{10} dan $\text{PM}_{2.5}$ merupakan fraksi yang lebih halus. Kedua fraksi tersebut dapat bertahan lebih lama di atmosfer dan berpindah lebih jauh dibandingkan partikel kasar. Oleh karena itu, walaupun penambahan konsentrasinya lebih kecil, PM_{10} dan terutama $\text{PM}_{2.5}$ tetap penting dari sisi kesehatan lingkungan.

Pola penurunan konsentrasi seiring bertambahnya jarak dari sumber menunjukkan terjadinya proses dispersi atmosfer. Setelah dilepaskan, polutan mengalami pengangkutan horizontal oleh angin, pencampuran vertikal akibat turbulensi atmosfer, dan pengenceran oleh massa udara di sekitarnya. Partikel berukuran besar juga mengalami deposisi gravitasi lebih cepat, sedangkan partikel halus cenderung tetap tersuspensi. Dengan demikian, konsentrasi polutan pada suatu reseptor tidak hanya ditentukan oleh besar emisi, tetapi juga oleh kecepatan dan arah angin, stabilitas atmosfer, kondisi topografi, serta jarak antara sumber dan reseptor.

Kondisi atmosfer yang tidak stabil mendukung pencampuran vertikal yang lebih kuat sehingga polutan lebih cepat terencerkan. Sebaliknya, atmosfer yang stabil membatasi gerakan vertikal udara dan dapat mempertahankan polutan di dekat permukaan. Kecepatan angin yang rendah juga berpotensi meningkatkan konsentrasi lokal karena proses pengenceran berlangsung lebih lambat. Pada wilayah Pecatu yang memiliki karakter kawasan pesisir dan topografi bervariasi, sirkulasi angin lokal serta bentuk permukaan lahan dapat memengaruhi arah penyebaran polutan. Oleh karena itu, hasil pemodelan perlu dipahami sebagai representasi kondisi meteorologi dan skenario aktivitas yang digunakan dalam penelitian.

Perbandingan antarkegiatan menunjukkan bahwa pekerjaan penyiapan lahan dan penggalian pondasi berpotensi menjadi sumber dominan partikulat karena melibatkan gangguan langsung terhadap permukaan tanah. Mobilisasi peralatan dan material memberikan kontribusi dari dua sumber sekaligus, yaitu emisi gas buang dan resuspensi debu jalan. Sementara itu, pembangunan bangunan utama dan fasilitas pendukung menghasilkan emisi dari pengoperasian alat, pengangkutan material, pencampuran bahan, serta aktivitas struktur. Temuan ini menunjukkan bahwa jenis aktivitas konstruksi memengaruhi komposisi polutan yang dominan. Pengelolaan kualitas udara karena itu perlu disesuaikan dengan karakter sumber pada setiap tahapan, bukan diterapkan secara seragam.

Hasil evaluasi memperlihatkan bahwa dampak berbeda menurut kelompok kegiatan. Pada skenario mobilisasi, konsentrasi NO_2 dan TSP melampaui baku mutu serta nilai ISPU NO_2 berada pada kategori tidak sehat. Sebaliknya, pada skenario penyiapan lahan dan pembangunan bangunan, seluruh parameter tetap berada di bawah baku mutu dan kategori ISPU masih baik. Temuan tersebut menunjukkan bahwa kepatuhan terhadap baku mutu harus dinilai untuk setiap sumber dan parameter secara terpisah. Konsentrasi tambahan tetap dapat menimbulkan dampak lokal dan sementara, terutama pada pekerja, pengguna jalan, serta masyarakat yang berada dekat jalur mobilisasi.

Paparan PM_{10} dapat mengiritasi saluran pernapasan dan memperburuk keluhan batuk, sesak napas, serta penyakit pernapasan yang telah ada. $\text{PM}_{2.5}$ memiliki ukuran lebih kecil sehingga dapat mencapai bagian paru-paru yang lebih dalam. Paparan NO_2 dapat meningkatkan iritasi dan respons inflamasi pada saluran pernapasan,

sedangkan CO dapat mengurangi kemampuan darah dalam membawa oksigen pada konsentrasi paparan yang tinggi. SO₂ dapat menimbulkan iritasi pada individu yang sensitif. Dampak aktual tetap ditentukan oleh besarnya konsentrasi, lama paparan, frekuensi kegiatan, penggunaan alat pelindung diri, dan kondisi kesehatan individu. Dampak kesehatan tersebut didukung oleh kajian paparan debu konstruksi dan penilaian risiko kesehatan kerja yang menunjukkan bahwa kedekatan terhadap sumber dan durasi paparan merupakan faktor penting [4], [18], [19].

Secara ilmiah, temuan penelitian menegaskan bahwa risiko kualitas udara pada tahap konstruksi lebih tepat dipahami sebagai kombinasi antara besar emisi, pola dispersi, kedekatan reseptor, dan durasi paparan. Nilai konsentrasi yang masih memenuhi baku mutu menggambarkan bahwa daya dukung udara ambien belum terlampaui dalam skenario yang dimodelkan. Akan tetapi, peningkatan konsentrasi pada seluruh parameter menunjukkan adanya perubahan kondisi lingkungan yang tetap memerlukan pengendalian. Hal ini juga memperkuat pentingnya pengelolaan berbasis sumber, terutama melalui penyiraman jalur mobilisasi, pembatasan kecepatan kendaraan, penutupan muatan, pembersihan roda kendaraan, pemeliharaan alat berat, dan penghentian sementara pekerjaan berdebu ketika kondisi angin berpotensi membawa debu menuju reseptor.

Interpretasi tersebut menunjukkan bahwa kontribusi utama penelitian bukan hanya menentukan apakah hasil pemodelan memenuhi baku mutu. Penelitian juga mengidentifikasi mekanisme pembentukan polutan, aktivitas yang memberikan kontribusi dominan, serta kondisi yang dapat meningkatkan paparan pada penerima dampak. Dengan demikian, hasil kajian dapat digunakan sebagai dasar ilmiah untuk menetapkan prioritas pengendalian dan pemantauan kualitas udara selama tahap konstruksi pembangunan hotel di Pecatu. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi bersifat lokal dan menurun terhadap jarak, tetapi skenario mobilisasi tetap memerlukan pengendalian ketat karena NO₂ dan TSP diperkirakan melampaui baku mutu.

4. KESIMPULAN

Rona awal kualitas udara pada tiga titik pengamatan di sekitar rencana pembangunan hotel di Pecatu berada pada kategori baik dan seluruh parameter memenuhi baku mutu. Dari tiga kelompok kegiatan konstruksi yang dianalisis, mobilisasi peralatan dan material menghasilkan laju emisi serta konsentrasi tambahan tertinggi. Pada skenario tersebut, konsentrasi NO₂ mencapai 228,26 µg/m³ dan TSP mencapai 494,74–508,54 µg/m³ sehingga melampaui baku mutu, sedangkan ISPU NO₂ mencapai 154,47 dengan kategori tidak sehat. Penyiapan lahan, penggalian pondasi, dan pekerjaan bangunan mempertahankan kategori udara baik pada asumsi pemodelan. Kontribusi relatif mobilisasi mencapai 97,1–99,8% terhadap konsentrasi tambahan pada jarak evaluasi, yang menegaskan bahwa jalur kendaraan merupakan titik kritis pengelolaan. Pengendalian perlu memprioritaskan penutupan muatan, pencucian roda, pembersihan dan penyiraman jalan, pembatasan kecepatan, pemeliharaan kendaraan, pengaturan jadwal mobilisasi, serta pemantauan TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, dan NO₂ pada batas tapak. Penelitian lanjutan perlu memvalidasi hasil model menggunakan pemantauan waktu nyata dan data meteorologi selama konstruksi agar efektivitas pengendalian dapat dievaluasi secara adaptif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] World Health Organization, WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide. Geneva, Switzerland: WHO, 2021.
- [2] Pemerintah Republik Indonesia, Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Jakarta, Indonesia, 2021.
- [3] D. Cheriyan and J.-H. Choi, "A review of research on particulate matter pollution in the construction industry," *Journal of Cleaner Production*, vol. 254, art. no. 120077, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120077.
- [4] M. Wang, G. Yao, Y. Sun, Y. Yang, and R. Deng, "Exposure to construction dust and health impacts—A review," *Chemosphere*, vol. 311, art. no. 136990, 2023, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.136990.
- [5] H. Yan, J. Ding, Z. Cao, Z. Yang, and Z. Ye, "The characteristics of particulate matter emissions from construction sites during the earthwork and foundation stages," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 20, no. 8, art. no. 5540, 2023.
- [6] U.S. Environmental Protection Agency, AERMOD: Description of Model Formulation. Research Triangle Park, NC, USA: Office of Air Quality Planning and Standards, 2024.
- [7] F. Pasquill, "The estimation of the dispersion of windborne material," *Meteorological Magazine*, vol. 90, no. 1063, pp. 33–49, 1961.
- [8] H. Yan, G. Ding, K. Feng, L. Zhang, H. Li, Y. Wang, and T. Wu, "Systematic evaluation framework and empirical study of the impacts of building construction dust on the surrounding environment," *Journal of Cleaner Production*, vol. 275, art. no. 122767, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122767.
- [9] X. Fang, R. Chang, Y. Zhang, J. Zuo, Y. Zou, and Y. Han, "Monitoring airborne particulate matter from building construction: A systematic review," *Journal of Building Engineering*, vol. 86, art. no. 108708, 2024, doi: 10.1016/j.jobe.2024.108708.
- [10] L. Milivojević, S. Mrazovac Kurilić, Z. Božilović, S. Koprivica, and O. Krčadinac, "Study of particular air quality and meteorological parameters at a construction site," *Atmosphere*, vol. 14, no. 8, art. no. 1267, 2023, doi: 10.3390/atmos14081267.

- [11] I. P. S. Araújo and D. B. Costa, "Measurement and monitoring of particulate matter in construction sites: Guidelines for gravimetric approach," *Sustainability*, vol. 14, no. 1, art. no. 558, 2022, doi: 10.3390/su14010558.
- [12] S. Yoon, D. Won, and S. Chi, "Empirical studies on emission factors for real-time particulate matter 2.5 monitoring at construction sites," *Journal of Cleaner Production*, vol. 384, art. no. 135546, 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.135546.
- [13] D. Cheriyan and J.-H. Choi, "Estimation of particulate matter exposure to construction workers using low-cost dust sensors," *Sustainable Cities and Society*, vol. 59, art. no. 102197, 2020, doi: 10.1016/j.scs.2020.102197.
- [14] U.S. Environmental Protection Agency, AP-42: Compilation of Air Emissions Factors, 5th ed., ch. 13.2.1, "Paved Roads." Research Triangle Park, NC, USA, 2011.
- [15] U.S. Environmental Protection Agency, AP-42: Compilation of Air Emissions Factors, 5th ed., ch. 13.2.2, "Unpaved Roads." Research Triangle Park, NC, USA, 2006.
- [16] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 14 Tahun 2020 tentang Indeks Standar Pencemar Udara. Jakarta, Indonesia, 2020.
- [17] G. Tao, J. Feng, H. Feng, H. Feng, and K. Zhang, "Reducing construction dust pollution by planning construction site layout," *Buildings*, vol. 12, no. 5, art. no. 531, 2022, doi: 10.3390/buildings12050531.
- [18] E. Sekhavati and R. J. Yengejeh, "Particulate matter exposure in construction sites is associated with health effects in workers," *Frontiers in Public Health*, vol. 11, art. no. 1130620, 2023, doi: 10.3389/fpubh.2023.1130620.
- [19] Q. Luo, L. Huang, X. Xue, Z. Chen, F. Zhou, L. Wei, and J. Hua, "Occupational health risk assessment based on dust exposure during earthwork construction," *Journal of Building Engineering*, vol. 44, art. no. 103186, 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2021.103186.
- [20] Dokumen Analisis Dampak Lingkungan Rencana Pembangunan Hotel di Pecatu, Kabupaten Badung, data sekunder tidak dipublikasikan, 2026.