

Analisis Dampak Aktivitas Konstruksi terhadap Kualitas Udara Ambien Menggunakan Model Dispersi Gaussian di Kawasan Ubud, Bali

**I Wayan Gde Sutasoma^{1*}, I Made Panji Tirta Prakasa², Made Ari Riska Dayanti³,
Ni Wayan Suprianingsih⁴**

^{1,2,3,4}, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Pendidikan Nasional, Bali, Indonesia
E-mail: gdesutasoma@undiknas.ac.id

Abstrak

Aktivitas konstruksi memiliki potensi menghasilkan emisi udara yang bersumber dari pembakaran bahan bakar alat berat dan pergerakan kendaraan proyek. Penelitian ini bertujuan untuk menilai pengaruh aktivitas konstruksi terhadap kualitas udara ambien di kawasan Ubud, Kabupaten Gianyar, Provinsi Bali. Pengukuran dilakukan pada tiga lokasi, yaitu area pintu masuk proyek, area inti pembangunan, serta permukiman warga di sekitarnya. Parameter yang diamati meliputi Sulfur Dioksida (SO_2), Karbon Monoksida (CO), Nitrogen Dioksida (NO_2), dan Partikulat Halus ($\text{PM}_{2.5}$), dengan metode pengujian merujuk pada SNI 19-7119 (seri 2011–2017). Perhitungan beban emisi alat berat menggunakan faktor emisi CORINAIR dan pola dispersi polutan dianalisis dengan model Gaussian Plume. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi maksimum polutan pada jarak 25 meter masih berada jauh di bawah baku mutu udara ambien berdasarkan PP No. 22 Tahun 2021. Dengan demikian, pengaruh aktivitas konstruksi terhadap kualitas udara di lokasi penelitian tergolong sangat kecil dan tidak signifikan, sehingga kualitas udara tetap berada pada kategori sangat baik.

Kata kunci: Dampak konstruksi, emisi alat berat, kualitas udara ambien, model Gaussian.

Abstract

Construction activities have the potential to generate air emissions originating from fuel combustion in heavy equipment and the movement of project vehicles. This study aims to assess the impact of construction activities on ambient air quality in the Ubud area, Gianyar Regency, Bali Province. Measurements were conducted at three locations: the project entrance area, the main construction zone, and nearby residential areas. The observed parameters included Sulfur Dioxide (SO_2), Carbon Monoxide (CO), Nitrogen Dioxide (NO_2), and Fine Particulate Matter ($\text{PM}_{2.5}$), with testing methods referring to SNI 19-7119 (2011–2017 series). Emission loads from heavy machinery were calculated using CORINAIR emission factors, while pollutant dispersion patterns were analyzed using the Gaussian Plume model. The results indicate that the maximum pollutant concentrations at a distance of 25 meters remain well below the ambient air quality standards stipulated in Government Regulation No. 22 of 2021. Thus, the impact of construction activities on air quality at the study site is classified as very small and insignificant, and the ambient air quality remains in the “excellent” category.

Keywords: Construction impacts, heavy equipment emissions, ambient air quality, Gaussian model.

1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan sektor konstruksi di Indonesia menunjukkan tren peningkatan yang sejalan dengan ekspansi pembangunan infrastruktur serta pengembangan destinasi pariwisata. Ubud, yang terletak di Kabupaten Gianyar, Provinsi Bali, merupakan salah satu kawasan wisata unggulan yang mengalami percepatan pembangunan dalam beberapa tahun terakhir. Intensifikasi kegiatan konstruksi di wilayah ini berpotensi menambah beban emisi udara, terutama yang berasal dari pembakaran bahan bakar pada alat berat, mobilitas kendaraan proyek, serta aktivitas pengangkutan material konstruksi (Wieser et al., 2021). Dalam kerangka regulasi lingkungan Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 mengenai Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup menetapkan parameter kualitas udara ambien seperti Sulfur Dioksida (SO_2), Karbon Monoksida (CO), Nitrogen Dioksida (NO_2), dan partikulat halus ($\text{PM}_{2.5}$) sebagai indikator utama dalam penilaian dampak emisi terhadap kesehatan lingkungan. Baku mutu kualitas udara ambien sendiri berfungsi sebagai batas konsentrasi polutan maksimum yang diizinkan agar tidak menimbulkan risiko terhadap kesehatan manusia maupun degradasi kualitas lingkungan (Dayanti and Suprianingsih, 2025). Meskipun aktivitas konstruksi bersifat temporer, peningkatan konsentrasi polutan pada tahap pelaksanaan proyek perlu diantisipasi, terutama pada pekerjaan dengan konsumsi bahan bakar fosil yang tinggi (Sahoo et al., 2021).

Sejumlah penelitian terdahulu menunjukkan bahwa konsentrasi dan pola penyebaran polutan dari aktivitas konstruksi tidak hanya dipengaruhi oleh besaran emisi sumber, tetapi juga dipengaruhi oleh kondisi meteorologis dan karakteristik topografi kawasan (Wang et al., 2019). Namun demikian, kajian terkait hubungan aktivitas konstruksi dengan kualitas udara ambien di Indonesia masih relatif terbatas, khususnya pada wilayah beriklim tropis dengan intensitas aktivitas pariwisata yang tinggi seperti Ubud. Penggunaan Gaussian Plume Model menjadi pendekatan yang relevan untuk mengestimasi pola dispersi polutan karena model ini mengintegrasikan faktor laju emisi, dinamika angin, serta stabilitas atmosfer dalam satu kerangka perhitungan (Arya, 1999; CORINAIR). Pendekatan tersebut memungkinkan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai pergerakan polutan dari sumber menuju lingkungan sekitar.

Dengan mempertimbangkan kondisi tersebut, penelitian ini difokuskan untuk mengkaji dampak aktivitas konstruksi terhadap kualitas udara ambien di kawasan Ubud melalui kombinasi pengukuran lapangan dan pemodelan dispersi. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah bagi evaluasi kualitas udara pada proyek konstruksi, serta mendorong penerapan strategi mitigasi emisi yang berkelanjutan dalam pengembangan kawasan pariwisata.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini berlokasi di kawasan Ubud, Kabupaten Gianyar, Provinsi Bali, yang merupakan daerah dengan intensitas kegiatan pariwisata serta pembangunan akomodasi yang tinggi. Pemilihan lokasi didasarkan pada karakteristik morfologi Ubud yang cenderung berbukit dan didominasi tutupan vegetasi, sehingga pola penyebaran polutan udara di wilayah ini memiliki dinamika yang berbeda dibandingkan kawasan perkotaan datar. Penelitian oleh Putra et al. (2020) menegaskan bahwa kombinasi topografi berbukit dan tutupan vegetasi yang luas dapat menciptakan pola dispersi polutan yang bersifat spasial-heterogen, di mana konsentrasi polutan dapat menurun secara signifikan pada jarak relatif dekat dari sumber emisi akibat meningkatnya

turbulensi mekanik dan konveksi termal. Kondisi tersebut menjadikan Ubud relevan sebagai wilayah studi untuk memahami dispersi polutan udara pada lingkungan tropis terbuka.

Penelitian lokal oleh Sari dan Nugroho (2019) menunjukkan bahwa aktivitas konstruksi menghasilkan fluktuasi konsentrasi polutan yang signifikan secara spasial, sehingga penggunaan satu titik pengukuran tidak cukup untuk merepresentasikan kondisi kualitas udara di sekitar proyek. Untuk memperoleh gambaran kondisi kualitas udara yang representatif, pengukuran dilakukan pada tiga titik pengamatan dengan tingkat kedekatan dan aktivitas konstruksi yang berbeda. Titik-titik tersebut dipilih guna mencerminkan variasi intensitas sumber emisi dan arah pengaruhnya terhadap area sekitar. Rincian lokasi pengamatan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Titik lokasi pengamatan kualitas udara

Titik	Lokasi Pengamatan	Koordinat (Lintang, Bujur)	Karakteristik Lokasi
1	Area Rencana Proyek 1	(-8.3837039, 115.2514922)	Lokasi awal aktivitas kendaraan proyek dan alat berat
2	Area Rencana Proyek 2	(-8.3827356, 115.2501567)	Titik dengan aktivitas alat berat dan material tertinggi
3	Area pemukiman warga	(-8.3906422, 115.2502900)	Titik kontrol untuk menilai dampak pada permukiman sekitar

Pemilihan ketiga titik tersebut mengikuti prinsip gradient concentration sampling, yaitu mengambil sampel pada area sumber, area aktivitas maksimum, dan area penerima (receptor) (Zhou, Y., et al. 2003). Pengukuran dilakukan selama tahap pekerjaan struktur, yaitu fase dengan konsumsi bahan bakar tertinggi. Kondisi meteorologi pada saat pengambilan sampel tercatat cerah dengan suhu udara 30–32 °C, kelembaban 60–70 %, dan kecepatan angin rata-rata 1,5–2,0 m/s.

2.2 Parameter dan Standar Pengukuran

Empat parameter utama kualitas udara ambien diukur untuk mencerminkan polutan hasil pembakaran dan debu konstruksi, yakni Sulfur Dioksida (SO₂), Karbon Monoksida (CO), Nitrogen Dioksida (NO₂), serta Partikulat Halus (PM_{2.5}). Pemilihan parameter ini sesuai Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 karena merupakan indikator paling sensitif terhadap emisi mesin diesel dan aktivitas mekanis di area proyek. Metode pengukuran mengikuti Standar Nasional Indonesia (SNI) sebagaimana tercantum pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter dan metode pengukuran udara ambien

Parameter	Satuan	Metode Acuan (SNI)	Baku Mutu (PP No. 22 Tahun 2021)
SO ₂	µg/m ³	SNI 19-7119.7:2017	150
CO	µg/m ³	SNI 19-7119.10:2011	10.000
NO ₂	µg/m ³	SNI 19-7119.2:2017	200
PM _{2.5}	µg/m ³	SNI 19-7119.3:2017	55

Sampel udara diambil menggunakan High Volume Air Sampler (HVAS) untuk partikulat dan Gas Analyzer portabel untuk gas-gas polutan. Setiap titik dilakukan pengambilan selama 24 jam agar memperoleh nilai harian representatif. Alat dikalibrasi sebelum pengukuran

menggunakan standar KAN untuk memastikan ketepatan hasil. Data hasil pengukuran kemudian dibandingkan dengan baku mutu udara ambien nasional guna menentukan tingkat pencemaran di masing-masing titik.

2.3 Estimasi Beban Emisi Alat Berat

Selain pengukuran langsung, dilakukan perhitungan beban emisi teoritis dari alat berat yang beroperasi di lapangan. Pendekatan ini bertujuan menilai seberapa besar kontribusi potensial setiap polutan yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar solar (Rashid., et al. 2020). Perhitungan beban emisi mengikuti persamaan (1):

$$Q = E_f \times F_c \times \rho \quad (1)$$

Dengan keterangan:

Q = beban emisi (g/jam)

E_f = factor emisi (g/kg)

F_c = Konsumsi bahan bakar (L/jam)

ρ = densitas bahan bakar solar (0,8 kg/L)

Nilai Q dihitung untuk setiap jenis polutan dan dijadikan dasar untuk simulasi sebaran menggunakan model Gaussian.

2.4 Pemodelan Dispersi Polutan

Untuk memperkirakan penyebaran polutan di udara dari sumber titik (alat berat), digunakan model matematis Gaussian Plume, yang umum digunakan dalam kajian ambient air dispersion (Arya, 1999). Model ini mempertimbangkan pengaruh kecepatan angin, turbulensi atmosfer, serta tinggi sumber emisi terhadap konsentrasi polutan di suatu titik pengamatan. Persamaan umum model Gaussian diberikan pada (2):

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_zU} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (2)$$

Keterangan :

$C(x, y, z)$ = konsentrasi polutan ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Q = laju emisi (g/s)

U = Kecepatan angin (m/s)

σ_y, σ_z = koefisien disperse horizontal dan vertical (m)

H = Ketinggian efektif sumber emisi (m)

Pemodelan dilakukan untuk jarak 25–150 m dari sumber, dengan kecepatan angin rata-rata 1,5 m/s dan tinggi sumber emisi 1 m (knalpot alat berat). Nilai koefisien dispersi (σ_y, σ_z) diperoleh dari pendekatan Pasquill–Gifford untuk kondisi stabilitas atmosfer kelas C (kondisi agak labil pada siang hari tropis). Hasil pemodelan digunakan untuk menentukan penurunan konsentrasi polutan terhadap jarak, yang kemudian dibandingkan dengan hasil pengukuran lapangan guna mengevaluasi kesesuaian antara model dan kondisi aktual.

2.5 Analisis Data

Analisis dilakukan melalui tiga tahap, yaitu:

- Deskriptif kuantitatif – membandingkan hasil pengukuran lapangan dengan baku mutu udara ambien nasional.
- Analisis pemodelan – menghitung konsentrasi polutan pada berbagai jarak menggunakan persamaan Gaussian.

- Evaluasi dampak – menentukan tingkat signifikansi dampak berdasarkan skala lingkungan dari Matriks Penilaian Dampak Lingkungan (mengacu pada PP No. 22 Tahun 2021 dan pedoman KLHK).

Hasil analisis ini menjadi dasar dalam penentuan apakah aktivitas konstruksi memberikan pengaruh signifikan terhadap kualitas udara ambien di kawasan penelitian.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Pengukuran Kualitas Udara Ambien

Pengukuran kualitas udara ambien dilakukan pada tiga titik pengamatan yang mewakili variasi aktivitas dan jarak terhadap sumber polutan. Parameter yang diukur meliputi Sulfur Dioksida (SO_2), Karbon Monoksida (CO), Nitrogen Dioksida (NO_2), dan Partikulat Halus ($\text{PM}_{2.5}$). Data hasil pengukuran dibandingkan dengan baku mutu udara ambien nasional berdasarkan PP No. 22 Tahun 2021, sebagaimana disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil pengukuran kualitas udara ambien di sekitar lokasi proyek konstruksi

Parameter	Titik 1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Titik 2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Titik 3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Baku Mutu ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Acuan SNI
SO_2	< 20	< 20	< 20	150	SNI 19-7119.7-2017
CO	< 185	< 185	< 185	10.000	SNI 19-7119.10-2011
NO_2	< 13	< 13	< 13	200	SNI 19-7119.2-2017
$\text{PM}_{2.5}$	12	10	8	55	SNI 19-7119.3-2017

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa seluruh parameter berada jauh di bawah baku mutu nasional, dengan nilai tertinggi pada $\text{PM}_{2.5}$ sebesar $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ di titik 1 (Rencana lokasi proyek 1). Hal ini logis karena titik tersebut menjadi area utama lalu lintas kendaraan proyek dan alat berat yang menghasilkan emisi partikulat serta debu resuspensi dari permukaan tanah.

Sebaliknya, nilai $\text{PM}_{2.5}$ di titik 3 (permukiman warga) hanya $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, menandakan bahwa proses difusi dan dispersi alami di udara cukup efektif menurunkan konsentrasi partikulat hingga di bawah 15% dari batas baku mutu. Konsentrasi gas-gas polutan seperti SO_2 , CO, dan NO_2 berada di bawah batas deteksi alat ($< 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk SO_2 , $< 13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk NO_2 , dan $< 185 \mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk CO), sehingga udara di lokasi penelitian masih tergolong dalam kategori kualitas sangat baik (skala 5 menurut Matriks Penilaian Lingkungan).

Secara umum, kondisi ini menunjukkan bahwa meskipun terjadi aktivitas konstruksi dengan alat berat berbahan bakar solar, emisi yang dihasilkan tidak cukup besar untuk menurunkan kualitas udara ambien di sekitar lokasi proyek. Faktor pendukungnya meliputi kondisi atmosfer tropis yang labil, arah angin terbuka di kawasan lembah Ubud, dan tingginya vegetasi sekitar proyek yang berfungsi sebagai penangkap partikulat alami.

3.2 Perhitungan Beban Emisi Alat Berat

Selain pengukuran lapangan, estimasi teoretis beban emisi alat berat dilakukan untuk menilai potensi sumber polutan dari pembakaran bahan bakar solar. Hasil perhitungan menggunakan faktor emisi CORINAIR (2009) dan konsumsi bahan bakar rata-rata 49 L/jam ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil perhitungan beban emisi

Jenis Polutan	Faktor Emisi (g/kg)	Konsumsi Solar (L/jam)	Densitas (kg/L)	Beban Emisi (g/jam)
CO	7,4	49	0,8	290,08
NO ₂	14,91	49	0,8	584,47
PM _{2.5}	8,3	49	0,8	325,36
SO ₂	0,5	49	0,8	19,60

Nilai beban emisi terbesar berasal dari Nitrogen Dioksida (NO₂), yaitu 584,47 g/jam, diikuti oleh Partikulat Halus (PM_{2.5}) sebesar 325,36 g/jam, dan Karbon Monoksida (CO) sebesar 290,08 g/jam. Polutan Sulfur Dioksida (SO₂) memiliki kontribusi terkecil, hanya 19,60 g/jam, karena bahan bakar solar yang digunakan sudah mengikuti regulasi Permen ESDM No. 12 Tahun 2017 tentang bahan bakar rendah sulfur (<500 ppm). Temuan ini memperlihatkan bahwa meskipun NO₂ menjadi polutan dominan dari mesin diesel, nilai total emisinya tetap relatif kecil bila dibandingkan dengan standar emisi alat berat di Eropa (EU Stage IIIA) maupun pedoman World Bank Environmental Guidelines (2019). Dengan demikian, potensi dampak negatif terhadap kualitas udara masih dalam batas wajar dan terkendali.

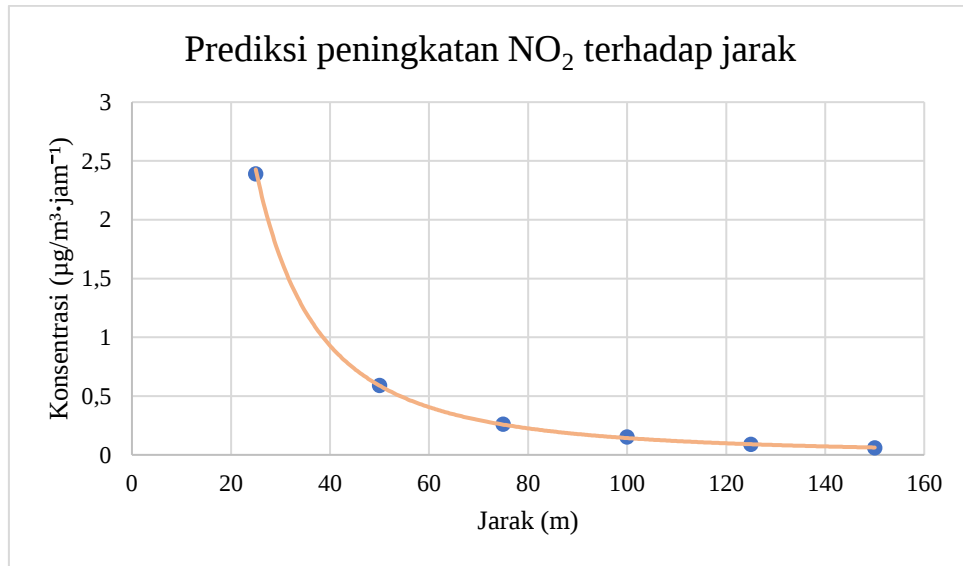
3.3 Pemodelan Dispersi Polutan

Pemodelan dispersi menggunakan pendekatan Gaussian Plume Model bertujuan memperkirakan penyebaran konsentrasi polutan terhadap jarak horizontal dari sumber emisi (knalpot alat berat). Model ini mengasumsikan kondisi atmosfer homogen, kecepatan angin konstan, dan sumber emisi pada ketinggian 1 m dari permukaan tanah (Wang, Y., et al. 2019). Parameter meteorologi yang digunakan adalah kecepatan angin 1,5 m/s dan kondisi stabilitas atmosfer kelas C. Hasil pemodelan ditunjukkan pada Tabel 5 berikut.

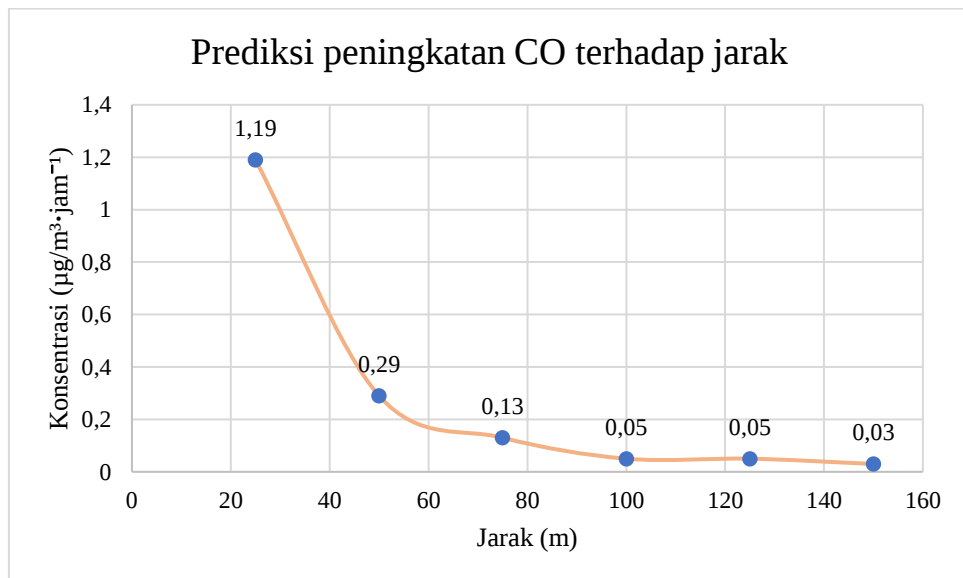
Tabel 5. Hasil pemodelan konsentrasi polutan

Jarak (m)	NO ₂ (µg/m ³ ·jam ⁻¹)	CO (µg/m ³ ·jam ⁻¹)	PM _{2.5} (µg/m ³ ·jam ⁻¹)	SO ₂ (µg/m ³ ·jam ⁻¹)
25	2,39	1,19	2,77	0,17
50	0,59	0,29	0,69	0,04
75	0,26	0,13	0,30	0,02
100	0,15	0,07	0,17	0,01
125	0,09	0,05	0,11	0,01
150	0,06	0,03	0,07	0,00

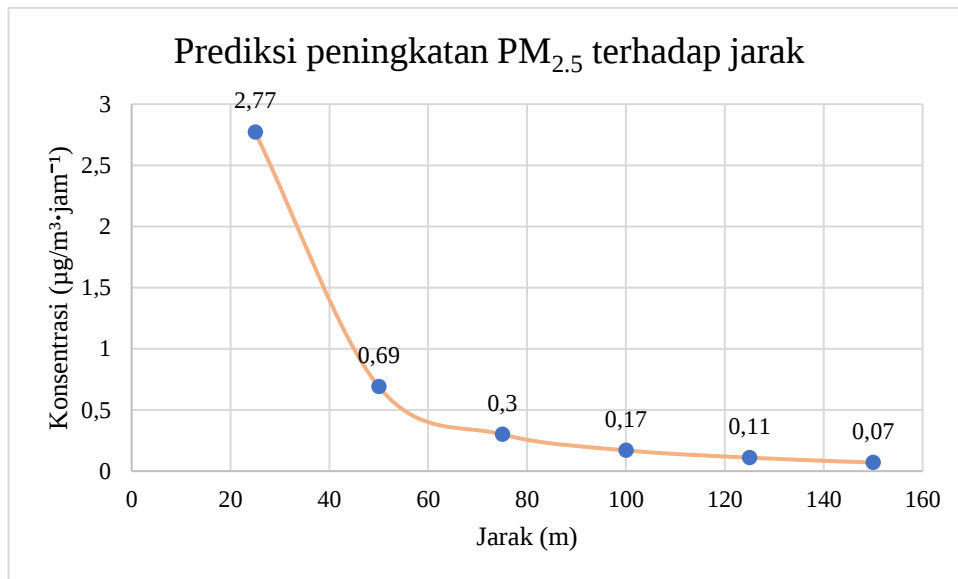
Berikut merupakan grafik hasil pemodelan konsentrasi masing-masing polutan terhadap jarak



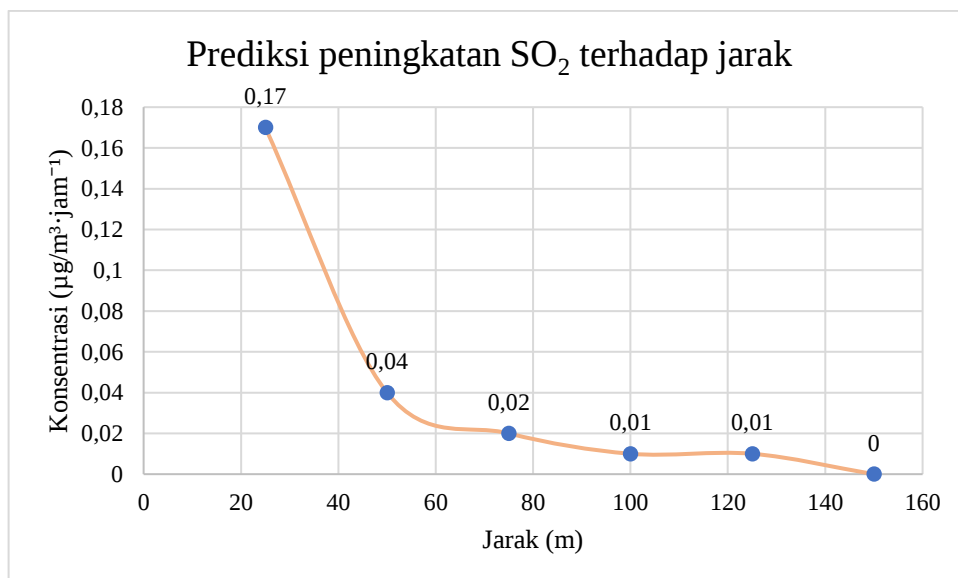
Gambar 1. Grafik Prediksi peningkatan polutan NO₂



Gambar 2. Grafik Prediksi peningkatan polutan NO₂



Gambar 3. Grafik Prediksi peningkatan polutan NO₂



Gambar 4. Grafik Prediksi peningkatan polutan NO₂

Hasil pemodelan menunjukkan pola penurunan eksponensial konsentrasi polutan seiring bertambahnya jarak dari sumber emisi. Pada jarak 25 m, nilai konsentrasi tertinggi untuk NO₂ adalah 2,39 µg/m³·jam⁻¹, sedangkan pada jarak 150 m nilainya menurun hingga 0,06 µg/m³·jam⁻¹. Tren serupa juga terjadi pada CO, PM_{2.5}, dan SO₂.

Fenomena ini dapat dijelaskan secara fisis bahwa pada kondisi atmosfer labil tropis, dispersi vertikal dan horizontal sangat aktif karena adanya konveksi termal, sehingga polutan cepat terencerkan oleh massa udara di sekitarnya. Selain itu, vegetasi padat di area sekitar Ubud juga berperan sebagai sink alami bagi partikel halus melalui proses deposisi dan adsorpsi pada permukaan daun (Beckett et al., 2000).

Dengan demikian, meskipun sumber emisi berada di area terbuka proyek, proses dispersi udara lokal cukup efektif menurunkan konsentrasi polutan ke level aman dalam radius 50–100 m.

3.4 Evaluasi Dampak Terhadap Kualitas Udara Ambien

Untuk menilai besarnya pengaruh aktivitas konstruksi terhadap kualitas udara ambien, hasil pemodelan digabungkan dengan nilai rona awal (baseline) dari pengukuran lapangan. Tabel 6 menampilkan akumulasi total konsentrasi polutan yang menggambarkan kondisi aktual setelah memperhitungkan tambahan emisi dari alat berat.

Tabel 6. Akumulasi konsentrasi polutan hasil pengukuran dan pemodelan

Jarak (m)	NO ₂ (µg/m ³)	CO (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	SO ₂ (µg/m ³)
25	15,39	186,19	14,77	20,17
50	13,59	185,29	12,69	20,04
75	13,26	185,13	12,30	20,02
100	13,15	185,07	12,17	20,01
125	13,09	185,05	12,11	20,01
150	13,06	185,03	12,07	20,00

Hasil ini menunjukkan bahwa bahkan pada jarak terdekat (25 m), konsentrasi total semua parameter masih jauh di bawah baku mutu nasional (200 µg/m³ untuk NO₂ dan 55 µg/m³ untuk PM_{2.5}). Perbedaan antara rona awal dan kondisi dengan adanya aktivitas proyek yang kurang dari 5% menunjukkan bahwa perubahan kualitas udara bersifat sangat kecil dan tidak signifikan secara lingkungan. Beberapa studi menyatakan bahwa perubahan konsentrasi polutan dengan deviasi kecil (<5–10%) dari kondisi awal, selama masih berada jauh di bawah baku mutu, dapat dikategorikan sebagai dampak sangat rendah atau dapat diabaikan (Wang et al., 2019; Cheng et al., 2019). Oleh karena itu, dampak penurunan kualitas udara pada lokasi penelitian ini diklasifikasikan sebagai dampak sangat kecil (skala 5 – sangat baik).

Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa aktivitas konstruksi di lokasi penelitian tidak memberikan dampak penting terhadap lingkungan. Faktor mitigatif seperti penyiraman area kerja, pembatasan jam operasi alat berat, dan pemeliharaan rutin mesin terbukti efektif menekan emisi harian.

3.5 Pembahasan Umum

Hasil penelitian menunjukkan bahwa aktivitas konstruksi pada lokasi studi di kawasan Ubud tidak memberikan dampak signifikan terhadap kualitas udara ambien. Seluruh parameter yang diukur, yaitu SO₂, CO, NO₂, dan PM_{2.5}, berada jauh di bawah baku mutu udara ambien nasional, baik pada titik yang berdekatan dengan sumber emisi maupun pada area permukiman sebagai receptor. Kondisi ini mengindikasikan bahwa emisi yang dihasilkan dari penggunaan alat berat dan kendaraan proyek relatif kecil serta cepat terdispersi di lingkungan sekitar.

Perhitungan beban emisi menunjukkan bahwa NO₂ merupakan polutan dominan dari pembakaran bahan bakar solar pada alat berat, diikuti oleh PM_{2.5} dan CO. Namun demikian, besaran beban emisi yang dihasilkan masih tergolong rendah apabila dibandingkan dengan standar emisi internasional untuk alat berat dan mesin diesel. Hal ini mengindikasikan bahwa karakteristik peralatan yang digunakan, durasi operasi, serta kualitas bahan bakar berperan penting dalam menekan potensi emisi selama tahap konstruksi.

Hasil pemodelan dispersi menggunakan Gaussian Plume Model memperlihatkan pola penurunan konsentrasi polutan secara eksponensial seiring bertambahnya jarak dari sumber emisi. Konsentrasi maksimum terjadi pada jarak terdekat (25 m), namun nilainya masih sangat kecil dan menurun secara signifikan pada jarak di atas 50 m. Temuan ini konsisten dengan hasil pengukuran

lapangan, yang menunjukkan bahwa proses dispersi atmosfer berlangsung efektif pada kondisi meteorologi tropis yang relatif labil, dengan kecepatan angin moderat dan turbulensi yang cukup tinggi.

Selain faktor meteorologi, kondisi fisik kawasan Ubud yang didominasi topografi berbukit dan tutupan vegetasi yang relatif rapat turut berkontribusi dalam mempercepat pengenceran polutan udara. Vegetasi berperan sebagai media penangkap partikulat melalui proses deposisi, sementara variasi elevasi dan lembah meningkatkan turbulensi mekanik yang memperkuat dispersi polutan. Kombinasi faktor-faktor tersebut menyebabkan konsentrasi polutan cepat menurun sebelum mencapai area permukiman.

Ketika hasil pemodelan digabungkan dengan rona awal kualitas udara, perbedaan konsentrasi yang terjadi akibat aktivitas konstruksi tercatat kurang dari 5%. Perubahan yang sangat kecil ini menunjukkan bahwa aktivitas proyek tidak menimbulkan gangguan berarti terhadap kualitas udara ambien dan dapat dikategorikan sebagai dampak sangat rendah. Dengan demikian, dampak aktivitas konstruksi terhadap kualitas udara di lokasi penelitian diklasifikasikan sebagai sangat kecil (skala 5 – sangat baik).

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa proyek konstruksi berukuran menengah yang dilaksanakan dengan pengelolaan lingkungan yang baik, didukung oleh kondisi alam yang mendukung proses dispersi, tidak selalu berdampak negatif terhadap kualitas udara ambien. Temuan ini memperkuat pentingnya penerapan langkah mitigasi sederhana namun konsisten, seperti pengaturan jam operasi alat berat, pemeliharaan mesin, dan pengendalian debu, sebagai bagian dari Construction Environmental Management Plan (CEMP) pada proyek konstruksi di kawasan tropis berorientasi pariwisata.

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi seluruh parameter udara ambien di kawasan Ubud, Kabupaten Gianyar, Bali, melalui pendekatan pengukuran lapangan dan pemodelan dispersi Gaussian. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa konsentrasi seluruh parameter udara ambien, meliputi Sulfur Dioksida (SO_2), Karbon Monoksida (CO), Nitrogen Dioksida (NO_2), dan Partikulat Halus ($\text{PM}_{2.5}$), berada jauh di bawah baku mutu udara ambien sesuai ketentuan PP No. 22 Tahun 2021, dengan nilai maksimum $\text{PM}_{2.5}$ sebesar $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan gas-gas polutan di bawah batas deteksi alat. Perhitungan beban emisi menunjukkan bahwa NO_2 merupakan polutan dominan sebesar 584,47 g/jam, diikuti $\text{PM}_{2.5}$ dan CO, sedangkan SO_2 relatif kecil karena penggunaan bahan bakar rendah sulfur. Hasil pemodelan menggunakan Gaussian Plume memperlihatkan pola penurunan eksponensial konsentrasi polutan terhadap jarak, di mana nilai tertinggi hanya $2,39 \mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{jam}^{-1}$ pada jarak 25 m dan menurun hingga $0,06 \mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{jam}^{-1}$ pada 150 m dari sumber emisi. Ketika dikombinasikan dengan rona awal, total konsentrasi seluruh polutan tetap jauh di bawah ambang batas nasional, menandakan bahwa aktivitas konstruksi tidak menimbulkan dampak signifikan terhadap penurunan kualitas udara ambien. Dengan demikian, kondisi kualitas udara di sekitar lokasi penelitian dapat dikategorikan sangat baik (skala 5) berdasarkan matriks penilaian lingkungan. Secara praktis, hasil ini menegaskan efektivitas penerapan langkah mitigasi seperti penyiraman area kerja, perawatan alat berat, dan penggunaan bahan bakar bersih dalam menekan emisi proyek. Temuan ini diharapkan menjadi dasar ilmiah bagi penerapan Construction Environmental Management Plan (CEMP) dan kebijakan

pengelolaan kualitas udara pada proyek konstruksi di kawasan tropis berorientasi pariwisata, serta berpotensi menjadi model implementasi untuk kawasan urban lainnya di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Arya, S. P. (1999). *Air pollution meteorology and dispersion*. Oxford University Press.
- Badan Standardisasi Nasional. (2011). SNI 19-7119.10:2011 – Metode pengukuran Karbon Monoksida (CO) udara ambien. BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2017). SNI 19-7119.2:2017 – Metode pengukuran Nitrogen Dioksida (NO₂) udara ambien. BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2017). SNI 19-7119.3:2017 – Metode pengukuran PM_{2.5} udara ambien. BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2017). SNI 19-7119.7:2017 – Metode pengukuran Sulfur Dioksida (SO₂) udara ambien. BSN.
- Beckett, K. P., Freer-Smith, P., & Taylor, G. (2000). *Particulate pollution capture by urban trees: effect of species and windspeed*. *Global Change Biology*, 6(8), 995–1003.
- Cheng, Y., Li, H., & Zhang, L. (2019). *Assessment of air pollution during construction activities based on field monitoring and dispersion modeling*. *Journal of Environmental Management*, 241, 101–109. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.013>
- CORINAIR. (2009). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2009*. European Environment Agency.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2017). Peraturan Menteri ESDM Nomor 12 Tahun 2017 tentang spesifikasi bahan bakar minyak jenis solar. Kementerian ESDM.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2021). Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. KLHK.
- Putra, I. G. N. A., Sudarma, I. M., & Adnyana, I. W. S. (2020). Pengaruh topografi terhadap pola dispersi pencemar udara di wilayah berbukit tropis. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 26(1), 41–50.
- Rashid, M., et. al. (2020). *Environmental and economic analysis of diesel consumption by heavy construction equipment*. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120790. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120790>
- Sahoo, B. B., et. al. (2021). *Assessment of air pollution from fossil fuel consumption and associated health impacts in India*. *Environmental Challenges*, 4, 100134. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100134>
- Sari, D. P., & Nugroho, S. B. (2019). *Variasi spasial kualitas udara akibat aktivitas konstruksi di kawasan perkotaan*. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 25(2), 97–106.
- Wang, Y., et al. (2019). Numerical evaluation of pollutant dispersion from construction activities using Gaussian plume modelling. *Atmospheric Environment*, 201, 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.01.040>
- Wieser, A. A., et. al. (2021). *Challenges of a healthy built environment: Air pollution in the construction industry*. *Sustainability*, 13(18), 10469. <https://doi.org/10.3390/su131810469>
- World Bank. (2019). *Environmental, health and safety guidelines*. The World Bank Group.
- Zhou, Y., et al. (2003). Estimating population exposure to power plant emissions using CALPUFF: A case study in Beijing, China. *Atmospheric Environment*, 37(6), 815–826. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00936-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00936-8)