



Analisis Spasio-Temporal Kualitas Udara Ambien (NO₂ dan SO₂) Serta Pengaruh Faktor Meteorologi di Kawasan Mega Mas Kota Manado

Mega Melati Putri Kansil^{1*}, Oksfriani Jufri Sumampouw², Fima L. F. G. Langi³

Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas Sam Ratulangi, Manado

*Corresponding Author: kansilmega@gmail.com

ABSTRACT: Background: Commercial areas with dense motorized vehicle activity, such as Mega Mas in Manado City, are sources of ambient air pollutant emissions, especially Nitrogen Dioxide (NO₂) and Sulfur Dioxide (SO₂). Exposure to these pollutants has the potential to cause negative impacts on public health and the environment. This study aims to analyze ambient air quality based on NO₂ and SO₂ parameters and meteorological factors (temperature, humidity, wind speed) at the exit portal of the Mega Mas Area. Research Methods: This study is observational with a cross-sectional approach. Sampling was carried out purposively at two points (Point 1 MTC and Point 2 in front of IT) in the morning and afternoon, with two replications per point. The concentrations of NO₂ and SO₂ were measured using a High Volume Air Sampler (HVAS) with the Griess-Saltzman and Pararosanilin methods, then analyzed spectrophotometrically. The data were analyzed descriptively for univariate (variable characteristics), bivariate (meteorological parameters and pollutant relationships), and spatial-temporal analysis. Research Results: The measurement results showed that NO₂ concentrations ranged from 2-22 µg/Nm³, while SO₂ between 4-14 µg/Nm³. All of these values are still far below the Threshold Limit Value (NAB) according to the Indonesian Minister of Health Regulation No. 2 of 2023. The analysis showed a high variation in concentration, especially NO₂ at Point 1 in the afternoon (22 µg/Nm³). Wind speed was shown to have a significant effect on pollutant dispersion, where the highest concentration was recorded at low wind speeds (2.5-2.7 m/s). Vehicle activity patterns and microlocation conditions that inhibit dispersion are suspected to be the main causes of the observed variations. Conclusion: It was concluded that the ambient air quality at the exit portal of the Mega Mas Area based on NO₂ and SO₂ parameters still meets quality standards. However, significant fluctuations in concentrations, particularly during calm wind conditions, indicate the potential for local accumulation of pollutants. Routine monitoring and proper traffic management are required to minimize pollutant exposure, especially for workers working in the area for long periods.

Keywords: Ambient Air, NO₂, SO₂, Air Quality, Mega Mas

ABSTRAK: Latar Belakang: Kawasan komersial yang padat aktivitas kendaraan bermotor, seperti Mega Mas di Kota Manado, merupakan sumber emisi polutan udara ambien, khususnya Nitrogen Dioksida (NO₂) dan Sulfur Dioksida (SO₂). Paparan terhadap polutan ini berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap kesehatan masyarakat dan lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kualitas udara ambien berdasarkan parameter NO₂ dan SO₂ serta faktor meteorologi (suhu, kelembaban, kecepatan angin) di portal keluar Kawasan Mega Mas. **Metode Penelitian:** Penelitian ini bersifat observasional dengan pendekatan *cross-sectional*. Pengambilan sampel dilakukan secara *purposive* pada dua titik (Titik 1 MTC dan Titik 2 Depan IT) pada pagi dan sore hari, dengan dua kali replikasi per titik. Konsentrasi NO₂ dan SO₂ diukur menggunakan *High Volume Air Sampler* (HVAS) dengan metode Griess-Saltzman dan Pararosanilin, kemudian dianalisis secara spektrofotometri. Data dianalisis secara deskriptif untuk analisis univariat (karakteristik variabel), bivariat (hubungan parameter meteorologi dan polutan), serta spasial-temporal. **Hasil Penelitian:** Hasil pengukuran menunjukkan konsentrasi NO₂ berkisar antara 2-22 µg/Nm³, sedangkan SO₂ antara 4-14 µg/Nm³. Seluruh nilai ini masih jauh di bawah Nilai Ambang Batas (NAB) menurut Permenkes RI No. 2 Tahun 2023. Analisis menunjukkan adanya variasi konsentrasi yang tinggi, khususnya NO₂ di Titik 1 pada sore hari (22 µg/Nm³). Kecepatan angin terbukti berpengaruh signifikan terhadap dispersi polutan, di mana konsentrasi tertinggi tercatat pada saat kecepatan angin rendah (2.5-2.7 m/s). Pola aktivitas kendaraan dan kondisi mikrolokasi yang menghambat dispersi diduga menjadi penyebab utama variasi yang diamati. **Kesimpulan:** Disimpulkan bahwa kualitas udara ambien di portal keluar Kawasan Mega Mas berdasarkan parameter NO₂ dan SO₂ masih memenuhi baku mutu. Namun, fluktuasi konsentrasi yang signifikan, terutama pada kondisi angin tenang, mengindikasikan potensi akumulasi polutan lokal. Diperlukan pemantauan rutin dan manajemen lalu lintas yang baik untuk meminimalkan paparan polutan, khususnya bagi pekerja yang beraktivitas di area tersebut dalam jangka panjang.

Kata Kunci: Udara Ambien, NO₂, SO₂, Kualitas Udara, Mega Mas

1. LATAR BELAKANG

Pencemaran udara telah menjadi krisis global yang mengancam kesehatan masyarakat dan stabilitas iklim. Temuan terbaru dari IQAir (2021) mengungkapkan skala krisis yang mengkhawatirkan, di mana hanya tiga persen kota dan tidak ada satu pun negara di dunia yang memenuhi pedoman kualitas udara tahunan WHO untuk PM_{2.5} yang diperbarui, yaitu 5 µg/m³. Laporan yang menganalisis data dari 6.475 kota di 117 negara ini menegaskan bahwa polusi partikel halus (PM_{2.5}) telah mencapai tingkat yang membahayakan secara universal. Di tingkat nasional, Indonesia menghadapi tantangan serius, dengan Jakarta seringkali menduduki peringkat sebagai ibu kota dengan polusi udara terburuk di Asia Tenggara dalam laporan yang sama. Sumber pencemaran utama di Indonesia tidak hanya berasal dari sektor transportasi, tetapi juga dari pembangkit listrik berbahan bakar batu bara, kebakaran hutan dan lahan, serta emisi industri. Data Bank Dunia (2022) mengungkapkan bahwa biaya ekonomi akibat dampak kesehatan dari polusi udara ambien di Indonesia mencapai miliaran dolar AS setiap tahun, yang merefleksikan besarnya beban yang ditanggung akibat masalah ini.

Kawasan dengan aktivitas kendaraan bermotor tinggi, seperti portal keluar mal, merupakan titik panas (*hotspot*) pencemaran udara perkotaan yang berkontribusi pada buruknya kualitas udara global. Berdasarkan penelitian Salam (2018) di kawasan parkir Mall Panakkukang Square Makassar, konsentrasi sulfur dioksida (SO₂) mencapai 3.152 µg/Nm³, jauh melampaui baku mutu. Temuan serupa dilaporkan Hikmiyah (2018) di Jawa Timur, di mana kadar NO₂ mencapai 165,93 µg/Nm³, melebihi ambang batas. Penting untuk dicatat bahwa selain gas berbahaya seperti NO₂ dan SO₂, kendaraan juga menghasilkan polutan partikulat (PM_{2.5}) yang sangat mematikan. Sebagai polutan yang paling berbahaya dan paling banyak dipantau, PM_{2.5} merupakan faktor utama pemicu asma, stroke, serta penyakit jantung dan paru-paru, yang secara global menyebabkan jutaan kematian prematur setiap tahun (IQAir, 2021). Karakteristik polutan di area ini pun menjadi kompleks, mencakup campuran antara gas dan partikel berbahaya.

Dampak paparan polutan di area publik bersifat multifaset, mencakup aspek kesehatan manusia dan kerusakan lingkungan. Secara kesehatan, paparan jangka pendek NO₂ dan SO₂ dapat menyebabkan iritasi saluran pernapasan, batuk, dan mengi, sementara paparan jangka panjang dikaitkan dengan peningkatan risiko infeksi pernapasan dan penurunan fungsi paru (Kemenkes, 2022). Namun, risiko terbesar justru berasal dari PM_{2.5}, yang karena ukurannya yang sangat kecil, dapat menembus jauh ke dalam paru-paru dan aliran darah, menyebabkan dampak sistemik yang mematikan, termasuk penyakit kardiovaskular dan kematian dini (IQAir, 2021). Bagi pekerja yang terpapar kronis seperti penjaga parkir dan pedagang, risiko

ini menjadi sangat signifikan (Masito, 2018). Secara lingkungan, SO_2 merupakan penyebab utama hujan asam. Ketika SO_2 bereaksi dengan uap air di atmosfer membentuk asam sulfat (H_2SO_4), presipitasi yang jatuh dapat mengasamkan tanah dan perairan, merusak ekosistem, serta menyebabkan korosi pada material bangunan (Male dkk., 2021).

Kelompok masyarakat yang beraktivitas di area portal keluar mal merupakan populasi rentan yang terpapar koktail polutan berbahaya secara terus-menerus. Fakta bahwa tidak ada negara yang memenuhi standar baru WHO (IQAir, 2021) mengindikasikan bahwa paparan yang terjadi di area seperti ini hampir dapat dipastikan berada pada level yang tidak aman bagi kesehatan. Para pekerja yang menghabiskan waktu 8-10 jam per hari di lokasi tersebut menerima dampak kumulatif yang jauh lebih berat. Korelasi positif antara volume kendaraan dan tingkat pencemaran, khususnya untuk $\text{PM}_{2.5}$, NO_2 , dan SO_2 , telah terbukti secara ilmiah. Setiap peningkatan jumlah kendaraan akan meningkatkan emisi gas buang secara linear, menyebabkan akumulasi polutan di area tertutup atau semi-tertutup, membentuk konsentrasi berbahaya yang jauh melampaui ambang batas aman berdasarkan pedoman WHO terbaru.

Berdasarkan temuan mengenai tingginya tingkat pencemaran secara global yang tidak memenuhi standar WHO, serta dampak kesehatan dan lingkungan yang ditimbulkannya, diperlukan langkah strategis yang lebih agresif. Rekomendasi kebijakan yang dapat dipertimbangkan antara lain optimalisasi sistem ventilasi dengan pembersih udara partikel efisiensi tinggi (*High-Efficiency Particulate Air/ HEPA*) di area parkir tertutup, penerapan kebijakan "anti-idling" yang ketat, serta pemasangan alat pemantau kualitas udara yang mencakup parameter $\text{PM}_{2.5}$ secara real-time. Pedoman WHO yang diperketat harus menjadi acuan dalam menetapkan standar operasional untuk melindungi kesehatan publik, mengingat standar nasional seringkali lebih longgar. Edukasi kepada masyarakat dan promosi penggunaan masker pelindung (seperti N95) bagi pekerja rentan menjadi semakin krusial. Implementasi kebijakan ini diharapkan tidak hanya meminimalisir dampak kesehatan langsung, tetapi juga berkontribusi pada upaya global dalam menciptakan lingkungan perkotaan yang lebih sehat dan berkelanjutan. Tujuan penelitian ini yaitu untuk mengukur kadar Nitrogen Dioksida (NO_2) dan Sulfur Dioksida (SO_2) di Kawasan Megamas Manado.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian observasional dengan pendekatan *cross-sectional*. Penelitian dilaksanakan pada 2024 di dua titik sampling yang ditentukan secara *purposive* yaitu di portal keluar Kawasan Mega Mas, Kota Manado. Titik 1 berlokasi di area MTC (*Mega Trade*

Center) yang merepresentasikan zona dengan aktivitas keluar-masuk kendaraan yang bersifat sporadis dari area parkir, sementara Titik 2 berada di depan IT untuk memantau paparan polutan dari arus lalu lintas jalan raya utama yang lebih konstan. Pengambilan sampel udara dilakukan pada dua periode waktu berbeda, yaitu pagi hari (diperkirakan pukul 07.00-10.00 WITA) dan sore hari (diperkirakan pukul 16.00-18.00 WITA), guna menangkap variasi konsentrasi polutan selama jam sibuk. Pada setiap titik dan waktu pengukuran, dilakukan dua kali replikasi (pengukuran I dan II) untuk memastikan reliabilitas data. Variabel yang diukur meliputi parameter polutan utama, yaitu Nitrogen Dioksida (NO₂) dan Sulfur Dioksida (SO₂), serta parameter meteorologi pendukung yang terdiri dari suhu, kelembaban udara, dan kecepatan angin. Pengukuran konsentrasi NO₂ dan SO₂ dalam satuan mikrogram per meter kubik normal (µg/Nm³) dilakukan secara *real-time* di lapangan menggunakan *portable gas analyzer*, di mana sampel NO₂ dianalisis dengan metode Griess-Saltzman dan sampel SO₂ dengan metode Pararosanilin secara spektrofotometri di laboratorium. Parameter meteorologi diukur secara bersamaan pada setiap sesi sampling menggunakan *thermohygrometer* dan *anemometer* digital. Data yang terkumpul kemudian dianalisis secara deskriptif kuantitatif dan kualitatif. Analisis univariat, bivariat dan spasial. Analisis bivariat digunakan untuk mengeksplorasi hubungan dinamis antara parameter meteorologi (sebagai faktor dispersi) dengan fluktuasi konsentrasi polutan. Analisis spasial dengan membandingkan konsentrasi polutan antara kedua titik sampling, dan analisis temporal dengan membandingkan hasil pengukuran pagi dan sore hari. Seluruh hasil pengukuran akhirnya dikonfrontir dengan Baku Mutu Udara Ambien Nasional dalam Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.

3. HASIL PENELITIAN

Hasil pengukuran udara ambien berdasarkan parameter NO₂, SO₂ dan parameter meteorologi di portal keluar mobil kawasan Mega Mas dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengukuran Kadar Udara NO₂, SO₂ dan parameter meteorologi

Titik Samplin g	Waktu Ukur	Suhu (°C)		Kelembaba n (% RH)		Kec. Angin (m/s)		NO ₂ (µg/Nm ³)		SO ₂ (µg/Nm ³)	
		I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
Titik 1 MTC	pagi	37. 4	32.8	58.4	67.6	3.5	2.7	13	6	13	8

	sore	32.8	30	67.6	72.8	2.7	2.5	22	2	5	14
Titik 2 Depan IT	pagi	35.7	32.5	62.8	71.7	3.5	2.8	4	15	9	4
	sore	32.5	30	71.7	72.8	2.8	2.5	15	15	6	4

1. Analisis Univariat

Analisis ini dilakukan untuk memahami karakteristik dan variasi dari setiap parameter yang diukur.

a. Suhu ($^{\circ}\text{C}$)

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa suhu pagi hari (32.5°C - 37.4°C) secara konsisten lebih tinggi daripada suhu sore hari (30.0°C - 32.8°C). Ini adalah pola yang tidak biasa, karena biasanya suhu tertinggi terjadi pada siang/sore hari. Fenomena ini bisa disebabkan oleh waktu pengukuran "sore" yang sudah mendekati malam, atau adanya faktor lokal seperti naiknya aktivitas manusia dan kendaraan di pagi hari di kawasan komersial yang mempengaruhi iklim mikro. Suhu berada pada kisaran yang khas untuk daerah tropis seperti Manado. Variasi antara pagi dan sore menunjukkan dinamika harian, meski polanya menarik untuk diteliti lebih lanjut.

b. Kelembaban (% RH)

Hasil penelitian ini menunjukkan hal yang berlawanan dengan suhu, kelembaban pada pagi hari (58.4% - 71.7%) lebih rendah daripada sore hari (67.6% - 72.8%). Ini sesuai dengan prinsip fisika udara di mana kemampuan udara menampung uap air berkaitan terbalik dengan suhu. Ketika suhu turun di sore hari, kelembaban relatif meningkat. Kelembaban udara relatif tinggi, mencerminkan kondisi iklim Indonesia yang lembab. Nilai-nilai ini masih dalam kisaran nyaman untuk lingkungan luar ruangan.

c. Kecepatan Angin (m/s)

Kecepatan angin pagi hari (2.8 m/s - 3.5 m/s) lebih kencang daripada sore hari (2.5 m/s - 2.8 m/s). Angin yang lebih kencang di pagi hari dapat berkontribusi pada dispersi polutan yang lebih baik. Kecepatan angin tergolong tenang hingga sedang. Kondisi ini dapat mempengaruhi akumulasi polutan, di mana angin yang lemah cenderung memungkinkan polutan menumpuk di suatu area.

d. Nitrogen Dioksida (NO_2) ($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)

Hasil pengukuran NO_2 berkisar 2-22 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$. Hal ini menunjukkan adanya variasi nilai yang sangat besar, baik antar waktu maupun antar titik. Contohnya, nilai NO_2 di Titik 1

sore hari memiliki selisih 20 µg/Nm³ antara pengukuran I dan II (22 vs 2). Hal ini mengindikasikan sumber polusi yang sangat fluktuatif dan bersifat lokal, kemungkinan besar dari lalu lintas kendaraan bermotor yang tidak konstan. Meski rata-ratanya mungkin masih di bawah baku mutu (baku mutu harian menurut PP No. 22/2021 sebesar 92 µg/Nm³), fluktuasi yang ekstrem menunjukkan adanya periode dengan konsentrasi NO₂ yang cukup tinggi, terutama di Titik 1 (MTC) pada sore hari (22 µg/Nm³).

e. Sulfur Dioksida (SO₂) (µg/Nm³)

Hasil pengukuran SO₂ berkisar 4-14 µg/Nm³. Hal ini menunjukkan bahwa variasi nilai SO₂ tidak sebesar NO₂, tetapi masih terlihat perbedaan yang signifikan. Sebagai contoh, di Titik 1, nilai SO₂ pagi (13 dan 8) berbeda dengan sore (5 dan 14). Konsentrasi SO₂ relatif rendah dan kemungkinan besar masih sangat jauh di bawah baku mutu (baku mutu harian PP No. 22/2021 adalah 365 µg/Nm³). Sumber SO₂ biasanya dari pembakaran bahan bakar yang mengandung sulfur, seperti diesel (kendaraan berat) atau industri.

2. Analisis Bivariat

Analisis ini mengeksplorasi hubungan antara parameter meteorologi (suhu, kelembaban, kecepatan angin) dengan konsentrasi polutan (NO₂ dan SO₂).

a. Pengaruh Kecepatan Angin terhadap Polutan (NO₂ & SO₂)

Pengaruh kecemasan angin menunjukkan adanya indikasi kuat hubungan terbalik antara kecepatan angin dan konsentrasi polutan. Hal ini terlihat pada titik 1 Pagi: Angin 3.5 m/s -> NO₂ 13 µg/Nm³; Angin 2.7 m/s -> NO₂ 6 µg/Nm³. Titik 1 Sore: Angin 2.7 m/s -> NO₂ 22 µg/Nm³ (nilai tertinggi); Angin 2.5 m/s -> NO₂ 2 µg/Nm³. (Catatan: Pada kasus ini, faktor lain seperti sumber emisi yang sangat lokal dan sesaat mungkin lebih dominan). Titik 2 Sore: Angin 2.8 m/s -> NO₂ 15 µg/Nm³; Angin 2.5 m/s -> NO₂ 15 µg/Nm³ (stagnan pada angin yang tenang).

Hasil ini menunjukkan bahwa ketika kecepatan angin tinggi, polutan akan lebih mudah terdispersi (tersebar) sehingga konsentrasinya di satu titik pengukuran menjadi rendah. Sebaliknya, saat angin tenang, polutan cenderung terakumulasi di sekitar sumbernya. Pola ini sangat jelas terlihat pada NO₂.

b. Pengaruh Suhu dan Kelembaban terhadap Polutan

Suhu dan kelembaban tidak secara langsung mengontrol emisi polutan, tetapi mempengaruhi kondisi atmosfer untuk dispersi dan reaksi kimia. Suhu pagi yang lebih tinggi (pada data ini) dapat menciptakan kondisi atmosfer yang lebih tidak stabil, memungkinkan polutan untuk naik dan bercampur dengan udara yang lebih tinggi. Namun, data menunjukkan konsentrasi polutan pagi dan sore bervariasi tanpa pola yang

konsisten terhadap suhu. Hal ini memperkuat bahwa sumber emisi (lalu lintas) merupakan faktor penentu utama, bukan suhu secara langsung.

Kelembaban yang tinggi dapat memfasilitasi reaksi kimia di atmosfer yang mengubah polutan primer menjadi polutan sekunder (misalnya, pembentukan aerosol nitrat dari NO_2). Namun, dengan data yang terbatas ini, hubungan langsungnya sulit dibuktikan. Nilai NO_2 tertinggi (22) justru diukur pada kelembaban tinggi (67.6%), yang mungkin lebih berkaitan dengan akumulasi karena angin yang tenang daripada pengaruh kelembaban itu sendiri.

3. Analisis Spasial dan Temporal

a. Perbandingan Antar Titik

Titik 1 (MTC) menunjukkan variasi NO_2 yang sangat ekstrem, terutama pada sore hari. Hal ini mengindikasikan bahwa Titik 1 lebih rentan terhadap dampak langsung dari sumber polusi yang bersifat sporadis, misalnya dari kendaraan yang keluar-masuk mall atau terminal. Titik 2 (Depan IT) menunjukkan Konsentrasi NO_2 lebih stabil, meski tetap tinggi (misalnya, konsisten $15 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ di sore hari). Ini mungkin mencerminkan paparan yang lebih konstan terhadap lalu lintas jalan raya.

b. Perbandingan Waktu. Tidak ada pola peningkatan atau penurunan yang konsisten untuk kedua polutan pada pagi dan sore. Hal ini sekali lagi menegaskan bahwa fluktuasi lalu lintas, dikombinasikan dengan kondisi angin, merupakan faktor kunci yang menentukan konsentrasi polutan pada waktu tertentu.

PEMBAHASAN

Secara keseluruhan, hasil pengukuran kualitas udara ambien di portal keluar Kawasan Mega Mas menunjukkan bahwa konsentrasi Nitrogen Dioksida (NO_2) dan Sulfur Dioksida (SO_2) masih berada jauh di bawah Nilai Ambang Batas (NAB) yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Kesehatan RI Nomor 2 Tahun 2023, yaitu masing-masing $200 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ dan $150 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ untuk pengukuran 1 jam. Meskipun demikian, dinamika konsentrasi yang teramati memberikan wawasan penting mengenai sumber polusi dan faktor-faktor yang mempengaruhinya di kawasan komersial yang padat aktivitas seperti Mega Mas.

Konsentrasi Polutan dan Perbandingan dengan Kawasan Serupa

Konsentrasi NO_2 dalam penelitian ini berkisar antara $2\text{--}22 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$. Hasil ini selaras dengan temuan Kazal (2023) di lingkungan PLTD Baubau ($10,2\text{--}27,1 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$) dan Farikah et al. (2018) di area parkir basement Jumbo Swalayan Manado ($21,10\text{--}134,04 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$),

meskipun konsentrasi di lokasi penelitian ini lebih rendah. Sementara itu, konsentrasi SO₂ yang terukur (4-14 µg/Nm³) juga sangat rendah dan konsisten dengan penelitian-penelitian sebelumnya di Kota Manado. Tiwa et al. (2024) melaporkan kadar SO₂ di Terminal Karombasan berkisar <20-33 µg/Nm³, dan Ponga et al. (2018) menemukan kadar SO₂ di Kecamatan Tuminting antara 14,59-34,31 µg/Nm³. Rendahnya konsentrasi SO₂ diduga kuat karena berkurangnya kandungan sulfur dalam bahan bakar minyak yang dijual di Indonesia, sehingga emisi SO₂ dari kendaraan bermotor menjadi tidak signifikan (Ponga et al., 2018). Namun, temuan ini kontras dengan penelitian Wenas et al. (2020) di Kawasan Shopping Center Manado yang melaporkan konsentrasi NO₂ (130,69-205,10 µg/Nm³) dan SO₂ (110,88-132,12 µg/Nm³) yang jauh lebih tinggi, bahkan mendekati NAB. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa beban polusi udara sangat lokal dan dipengaruhi oleh intensitas serta karakteristik lalu lintas, desain jalan, dan kondisi topografi setempat. Sebagaimana ditekankan oleh Pinontoan et al. (2020), dinamika hubungan antara populasi manusia dengan perubahan komponen lingkungan dapat menimbulkan ancaman kesehatan yang sangat spesifik untuk setiap lokasi.

Pengaruh Faktor Meteorologi terhadap Dispersi Polutan

Analisis bivariat dalam penelitian ini mengungkap peran kunci faktor meteorologi, khususnya kecepatan angin, dalam menentukan konsentrasi polutan. Terdapat indikasi kuat hubungan terbalik antara kecepatan angin dan konsentrasi NO₂. Sebagai contoh, konsentrasi NO₂ tertinggi (22 µg/Nm³) diukur pada saat kecepatan angin relatif rendah, yaitu 2.7 m/s. Fenomena ini sejalan dengan teori dispersi polutan yang menyatakan bahwa kecepatan angin yang tinggi (>2 m/s) menciptakan kondisi atmosfer yang stabil dan mendispersikan polutan ke area yang lebih luas, sehingga menurunkan konsentrasinya di satu titik pengukuran (Mallongi et al., 2019; Ramadhani, 2017). Sebaliknya, kecepatan angin yang rendah (<2 m/s) menyebabkan atmosfer tidak stabil dan memicu akumulasi polutan di sekitar sumber emisi (Anshari & Santoso, 2017; Mallongi et al., 2019). Pola yang sama juga diamati pada SO₂, di mana konsentrasi tertinggi (14 µg/Nm³) terjadi saat kecepatan angin hanya 2.5 m/s. Sementara itu, hubungan dengan suhu dan kelembaban tidak menunjukkan pola yang konsisten. Temuan ini memperkuat argumen bahwa fluktuasi lalu lintas, yang dikombinasikan dengan kondisi angin yang berubah-ubah, merupakan faktor penentu utama variasi konsentrasi polutan pada waktu tertentu, ketimbang parameter meteorologi lainnya (Rahman et al., 2022). Perubahan pola meteorologi ini dalam skala global, seperti yang dijelaskan Sumampouw (2020), juga tidak dapat dipisahkan dari peningkatan emisi gas rumah kaca, termasuk NO₂ dan SO₂, yang memicu perubahan iklim.

Variasi Spasial dan Temporal serta Dampaknya terhadap Kesehatan Masyarakat

Analisis spasial menunjukkan perbedaan karakteristik antara kedua titik sampling. Titik 1 (MTC) menunjukkan variasi NO₂ yang sangat ekstrem, terutama pada sore hari, yang mengindikasikan paparan terhadap sumber polusi yang bersifat sporadis, seperti antrian kendaraan yang keluar-masuk portal. Sementara itu, Titik 2 (Depan IT) menunjukkan konsentrasi yang lebih stabil, mencerminkan paparan yang lebih konstan terhadap lalu lintas jalan raya. Secara temporal, peningkatan konsentrasi NO₂ dan SO₂ cenderung terjadi pada sore hari. Pola ini berkorelasi dengan peningkatan aktivitas manusia dan kendaraan pada waktu tersebut, seperti orang yang pulang bekerja, anak sekolah, dan pengunjung mall (Serlina, 2020). Faktor lain yang berkontribusi adalah jarak titik sampling yang sangat dekat dengan sumber emisi, yaitu kendaraan yang sedang antri atau berhenti di portal tanpa mematikan mesin, yang dikenal sebagai emisi *idling*. Meskipun konsentrasi rata-rata masih rendah, paparan berulang dan jangka panjang terhadap polutan udara, bahkan pada level di bawah baku mutu, tetap berpotensi menimbulkan risiko kesehatan. Penelitian Wenas et al. (2020) memberikan peringatan penting, di mana 56% pedagang kaki lima di Shopping Center Manado memiliki nilai *Risk Quotient* (RQ) lifetime NO₂ di atas 1, yang berarti berisiko mengalami dampak kesehatan kronis. Temuan ini menggarisbawahi pesan dari Sumampouw & Nelwan (2024) bahwa kualitas lingkungan yang optimal mutlak diperlukan untuk status kesehatan masyarakat yang baik. Oleh karena itu, meskipun kondisi udara ambien di Mega Mas secara regulatori dinyatakan baik, upaya promotif dan preventif, seperti pemeriksaan udara berkala dan promosi kesehatan bagi pekerja yang beraktivitas di luar ruangan (seperti petugas keamanan dan pengatur lalu lintas di portal), sangat diperlukan (Wenas et al., 2020; Ponga et al., 2018) sebagai bagian dari upaya pencegahan penyakit berbasis lingkungan (Pinontoan et al., 2020).

4. KESIMPULAN

Kesimpulan penelitian ini yaitu kandungan NO₂ sebesar 2-22 µg/Nm³ dan SO₂ sebesar 4-14 µg/Nm³. Pada udara ambien di portal keluar di Kawasan Mega Mas Kota Manado. Emisi kendaraan bermotor merupakan sumber dominan penurunan kualitas udara ambien di lokasi tersebut. Kecepatan angin merupakan faktor meteorologi yang paling jelas pengaruhnya terhadap konsentrasi polutan. Hari dengan angin tenang berpotensi menyebabkan akumulasi polutan yang lebih buruk. Secara numerik, tingkat polusi NO₂ dan SO₂ masih relatif rendah dan kemungkinan besar mematuhi baku mutu udara ambien nasional. Namun, variasi dan lonjakan konsentrasi NO₂ yang tajam perlu diwaspadai karena menunjukkan adanya paparan jangka pendek yang bisa berdampak pada kesehatan pejalan kaki dan pekerja di area tersebut. Oleh

karena itu, perlu mengurangi kemacetan di area portal keluar dapat menekan emisi polutan. Misalnya dengan mengoptimalkan jalur keluar-masuk atau memberikan imbauan untuk tidak menunggu dalam keadaan mesin menyala (*anti-idling*). Pemantauan perlu dilakukan dalam jangka waktu yang lebih panjang dan dengan interval pengukuran yang lebih rapat untuk memastikan pola yang ditemukan dan mengidentifikasi waktu-waktu kritis dengan polusi tertinggi. Penanaman vegetasi penghalang (*green barrier*) yang tepat antara sumber lalu lintas dan area pejalan kaki dapat membantu menahan dan menyerap partikel polutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Agungdiningrat, S. A. 2024. Analisis Kualitas Udara Nitrogen Dioksida (NO₂) di Terminal Purabaya dan Tingkat Risiko Kesehatan. *Jurnal Teknik Lingkungan*, Vol. 7, No. 1, 12-16.
- Anshari, M. M. A., Santoso, R. I. B. 2017. Analisis Pengaruh Faktor Meteorologi dan Unsur Ruang Terhadap Nilai Reduksi Sulfur Dioksida Udara Ambien di Kota Surabaya. *Jurnal Teknik ITS*, Vol. 6, No. 2, 394-399.
- Dewi, N. W. S. P., June, T., Yani, M., & Mujito, M. (2018). Estimasi Pola Dispersi Debu, SO₂ dan NO_x dari Industri Semen Menggunakan Model Gauss yang Diintegrasikan dengan Screen3. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam Dan Lingkungan*, Vol. 8, No. 1, 109–119.
- Farikah, T., Maddusa, S. S., & Sumampouw, O. J. (2018). Analisis Kadar Nitrogen Dioksida (NO₂) di Area Parkir Basement Jumbo Swalayan Kota Manado Tahun 2018. *KESMAS: Jurnal Kesehatan Masyarakat Universitas Sam Ratulangi*, 7(5).
- Hikmiah, A.F. 2018. Analisis Kadar Debu dan NO₂ Di Udara Ambien Serta Keluhan Pernapasan Pada Pekerja Penyapu Di Terminal Purabaya Kabupaten Sidoarjo. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, Vol. 10, No. 2, 138-148.
- Instantinova, D. B., Hadiwidodo, M., Handayani, D. S. 2012. Pengaruh Kecepatan Angin, Kelembaban, dan Suhu Udara Terhadap Konsentrasi Gas Pencemar Sulfur Dioksida Dalam Udara Ambien di Sekitar PT INTI General Jaya Steel Semarang. *Jurnal Teknik Lingkungan*. Fakultas Teknik Universitas Diponegoro.
- Kazal, N., Fadilah, K. 2023. Analisis Kualitas Udara Ambien Nitrogen Dioksida, Sulfur Dioksida dan Total Suspended Particulate di Lingkungan PLTD Baubau. *Environmental Engineering Journal ITATS*. Vol. 3, No. 1, 39-45.

- Kementerian Kesehatan RI. 2022. Benarkah Polusi Udara dapat Memicu Penyakit Jantung? (online) diakses dari https://keslan.kemkes.go.id/view_artikel/391/benarkah-polusi-udara-dapat-memicu-penyakit-jantung
- Male, Y. T., Bandjar. A., Gaspersz. N., Fretes. Y., Wattimury. J. J. 2021. Analisis Tingkat Pencemaran Gas CO, NO₂, dan SO₂ pada Desa Batu Merah Kota Ambon. *Jurnal Akta Kimia Indonesia*, Vol. 6, No. 1, 58-68.
- Mallongi, A., Pataran, P., Astuti, R. D. P., Rauf, A. U., & Natsir, M. F. (2019). Risk assessment of air pollutants from vehicles at Tallo port, Makassar, Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, 1246(1), 012043.
- Masito, A. 2018. Analisis Risiko Kualitas Udara Ambien (NO₂ Dan SO₂) Dan Gangguan Pernapasan Pada Masyarakat di Wilayah Kalianak Surabaya. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, Vol. 10, No. 4, 394-401.
- Pinontoan, O. R., Sumampouw, O. J., & Nelwan, J. E. (2020). *Epidemiologi kesehatan lingkungan*. Deepublish.
- Ponga, F. C., Akili, R. H., & Sumampouw, O. J. (2018). Gambaran Kualitas Udara Ambien Sulfur Dioksida Di Kecamatan Tuminting Kota Manado Tahun 2018. *KESMAS: Jurnal Kesehatan Masyarakat Universitas Sam Ratulangi*, 7(4).
- QAir. (2021). *World Air Quality Report*. IQAir (online) diakses dari https://www.iqair.com/newsroom/waqr_2021_pr 18 November 2025.
- Rahman, A., Saputra, D., & Sari, M. (2022). Pengaruh kondisi meteorologi terhadap konsentrasi PM_{2.5}, NO₂, dan SO₂ di Kota Jakarta. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 23(1), 45-56.
- Ramadhani, I. S. 2017. *Pemantauan Kualitas Udara Ambien dan Pemodelan Gauss Dispersion Untuk Parameter Nitrogen Dioksida (NO₂) Dari Emisi Industri Kayu Lapis Di Dusun Kalimati, Tirtomartani, Kalasan, Sleman, D.I Yogyakarta*. Universitas Islam Indonesia.
- Salam, A.M. 2018. Analisis Kualitas Udara Pada Kawasan Parkiran di Mall Panakkukang Square Kota Makassar. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, Vol. 4, No. 3, 228-239.
- Serlina, Y. 2020. Pengaruh Faktor Meteorologi Terhadap Konsentrasi NO₂ di Udara Ambien (Studi Kasus Bundaran Hotel Indonesia DKI Jakarta). *Jurnal Serambi Engineering*, Vol. 5, No. 3, 1228-1235.
- Sumampouw, O. J. (2020). *Perubahan Iklim dan kesehatan masyarakat*. Deepublish.

- Sumampouw, O. J., & Nelwan, J. E. (2024). *Dasar Kesehatan Lingkungan Konsep Dasar Dan Pencemaran Lingkungan*. Deepublish.
- Takuloe, S. R. R., Jusuf, H., Nakoe, M. R., Arsyad, N. 2023. Risiko Paparan Sulfur Dioksida (SO₂) Pada Petugas Stasiun Pengisian Bahan Bakar Umum (SPBU). *Jambura Journal of Epidemiologi*, Vol. 2, No. 2, 50-58.
- Tiwa, S. M., Sumampouw, O. J., & Ratag, B. T. (2024). Kualitas Udara Ambien Sulfur Dioksida (SO₂) Terminal Bus di Kota Manado: Studi Ekologi. *Sam Ratulangi Journal of Public Health*, 5(2), 8-15. <https://doi.org/10.35801/srjoph.v5i2.57142>
- Wenas, R. A., Pinontoan, O. R., & Sumampouw, O. J. (2020). Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan Paparan Sulfur Dioksida (SO₂) dan Nitrogen Dioksida (NO₂) di Sekitar Kawasan Shopping Center Manado tahun 2020. *Indonesian Journal of Public Health and Community Medicine*, 1(2), 053-058. <https://doi.org/10.35801/ijphcm.1.2.2020.29431>
- World Bank. (2022). The Global Health Cost of PM_{2.5} Air Pollution: A Case for Action Beyond COVID-19. World Bank Group (online) diakses dari <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/455211643691938459/the-global-health-cost-of-pm-2-5-air-pollution-a-case-for-action-beyond-2021>
- World Health Organization (WHO). (2021). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. Geneva: World Health Organization (online) diakses dari <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>