

Konsentrasi Total Suspended Partikulat dan Timbal pada Udara Ambien

Concentration of Total Suspended Particulates and Lead in Ambient Air

Juslan¹⁾, Cicilia Selry Tanri²⁾, Abdul Munim Thariq³⁾, Mohamad Ikbil Riski A. Danial^{4)*}, Andi Khairunnisa Salsabila Putri⁵⁾

^{1, 2, 3, 5)} Departemen Teknik Lingkungan, Sekolah Tinggi Nusantara Indonesia, Makassar

⁴⁾ Jurusan Teknologi Pertanian, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Makassar, Indonesia

Abstrak

Pencemaran udara merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang vital, terutama di wilayah yang berdekatan dengan aktivitas industri dan transportasi padat. Desa Biring Ere yang terletak di Kabupaten Pangkep memiliki karakteristik wilayah yang rentan terhadap penurunan kualitas udara akibat mobilitas kendaraan dan aktivitas sektoral lainnya. Penelitian bertujuan untuk menganalisis konsentrasi Total Suspended Particulate (TSP) dan logam berat Timbal (Pb) pada udara ambien di Desa Biring Ere serta membandingkannya dengan standar baku mutu berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 22 Tahun 2021 dan SNI 7119-3:2017. Metode penelitian yang digunakan adalah observasi lapangan dengan pengambilan sampel udara menggunakan alat *High Volume Air Sampler* (HVAS) yang kemudian dianalisis di laboratorium. Hasil uji laboratorium menunjukkan bahwa lokasi kawasan pemukiman, konsentrasi TSP sebesar 121 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan Timbal (Pb) sebesar 0,01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, pada lokasi kawasan industri, konsentrasi TSP sebesar 216 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan konsentrasi Timbal (Pb) sebesar 1,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Berdasarkan hasil perbandingan dengan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 22 Tahun 2021 dan SNI 7119-3:2017, hasil menunjukkan kedua parameter masih berada di bawah baku mutu yang ditetapkan (TSP < 230 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan Pb < 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Kualitas udara ambien di Desa Biring Ere dikategorikan dalam kondisi aman, namun demikian, nilai konsentrasi Total Suspended Particulate (TSP) dan konsentrasi Timbal (Pb) yang mendekati ambang batas, memerlukan perhatian khusus dalam upaya pengendalian pencemaran udara, agar tetap terjaga di bawah standar baku mutu.

Kata kunci: Pencemaran udara; Udara Ambien; HVAS; Total Suspended Particulate; Timbal

Abstract

Air pollution is a vital environmental issue, especially in areas close to industrial activities and heavy transportation. Biring Ere Village, located in Pangkep Regency, is vulnerable to air quality degradation due to vehicle mobility and other sectoral activities. The study aims to analyze the concentration of Total Suspended Particulate (TSP) and heavy metal Lead (Pb) in ambient air in Biring Ere Village and compare it with quality standards based on Government Regulation of the Republic of Indonesia No. 22 of 2021 and SNI 7119-3:2017. The research method used was field observation with air sampling using a High-Volume Air Sampler (HVAS), which was then analyzed in the laboratory. Laboratory test results showed that in residential areas, the concentration of TSP was 121 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and lead (Pb) was 0.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, while in industrial areas, the concentration of TSP was 216 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and the concentration of lead (Pb) was 1.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Based on a comparison with Government Regulation No. 22 of 2021 and SNI 7119-3:2017, the results show that both parameters are still below the established quality standards (TSP < 230 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and Pb < 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). The ambient air quality in Biring Ere Village is categorized as safe. However, the concentration levels of Total Suspended Particulate (TSP) and Lead (Pb) are close to the threshold, requiring special attention in air pollution control efforts to ensure that they remain below the quality standards.

Keywords: Air pollution; Ambient air; HVAS; Total Suspended Particulate; Lead

1. Pendahuluan

Kualitas lingkungan yang baik menjadi syarat penting untuk keberlangsungan kehidupan makhluk hidup. Lingkungan tidak sekadar menjadi tempat tinggal, melainkan bertindak sebagai sistem pendukung kehidupan yang menyediakan sumber daya esensial bagi makhluk hidup. Udara bebas polutan, air jernih serta tanah subur merupakan variabel penting dalam menentukan Kesehatan organisme. Udara sebagai salah satu komponen lingkungan dalam mendukung kehidupan, perlu dilakukan pemantauan dan pemeliharaan kualitas udara agar dapat memberikan dampak positif. Penurunan kualitas udara terjadi karena adanya emisi antropogenik yang mengubah komposisi udara ambien dan berdampak buruk pada Kesehatan manusia melalui kontak kulit serta paparan inhalasi ¹.

Kualitas udara adalah kondisi udara luar ruangan yang memengaruhi kesehatan manusia, ekosistem, dan materi. Menurut, World Health Organization ² mendefinisikan udara bersih didefinisikan sebagai udara ambien yang memenuhi pedoman kualitas udara dan menjadi hak asasi manusia yang fundamental. Polutan udara yang berdampak negatif terhadap kesehatan pernapasan dan penyakit manusia yaitu partikulat materi (PM_{10} dan $PM_{2,5}$), nitrogen dioksida (NO_2), karbon monoksida (CO), sulfur dioksida (SO_2), dan ozon (O_3) ³.

Pencemaran udara telah ditetapkan sebagai salah satu isu lingkungan paling krusial dalam lingkup global Pamungkas, dan menjadi penyebab utama kematian dan penyakit ¹. Salah satu polutan udara utama yang mempengaruhi kesehatan manusia adalah partikulat ⁵; ⁶. Partikulat di udara secara operasional dapat diklasifikasikan menjadi beberapa fraksi berdasarkan diameter aerodinamis: misalnya, *Total Suspended Particulate* (TSP): diameter aerodinamis $\leq 100 \mu m$, PM_{10} ($\leq 10 \mu m$), $PM_{2,5}$ ($\leq 2.5 \mu m$), dan PM_{10} ($\leq 1.0 \mu m$) ⁷. *Total Suspended Particulate* (TSP) merupakan komponen sangat penting dari parameter kualitas udara ambien dimana nilai baku mutu udara ambien parameter partikulat debu $< 100 \mu m$ (TSP) dengan waktu pengukuran selama 24 jam adalah $230 \mu g/m^3$ berdasarkan Peraturan Pemerintah No 22 Tahun 2021 ⁸. Peningkatan konsentrasi *Total Suspended Particulate* (TSP) di udara sekitar dapat membahayakan makhluk hidup yang disebabkan oleh berbagai kegiatan seperti transportasi ⁹, maupun aktivitas industri yang mempengaruhi kualitas udara dan pencemaran udara.

Aktivitas industri berpotensi mencemari lingkungan, seperti polusi udara akibat asap dan debu, yang dapat menurunkan kualitas lingkungan, berupa kualitas hidup bagi penduduk yang tinggal di sekitar kawasan industri ¹⁰. Udara sebagai media lingkungan yang dapat memengaruhi kehidupan seluruh makhluk hidup perlu mendapatkan perhatian yang serius. Tingginya kadar polutan di udara dapat menyebabkan terjadinya pencemaran udara. Pencemaran udara adalah masuknya atau dimasukkannya zat, energi, dan/atau komponen lain ke dalam udara ambien oleh kegiatan manusia, sehingga mutu udara ambien turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan udara ambien tidak dapat memenuhi fungsinya ¹¹. Kualitas udara dapat memburuk seiring dengan berubahnya sifat fisik dan susunan kimiawi pada lapisan udara. Parameter fisik udara dapat dikatakan berubah apabila terjadi variasi pada suhu, tingkat kelembapan dan tekanan udara, yang sering kali disertai dengan pergeseran kecepatan dan arah angin, serta perubahan sifat sensoris seperti warna dan bau. Perubahan sifat kimiawi pada udara ditandai dengan adanya ketidakseimbangan proporsi zat penyusun alami atmosfer, yang dipicu oleh kontaminasi material asing atau zat pencemar ¹².

Pencemaran udara dapat terjadi karena adanya aktivitas manusia berupa transportasi dan perindustrian. Pihak pemilik perusahaan atau industri beranggapan bahwa pencemaran udara yang diakibatkan aktivitas perusahaan adalah hal yang sepele dan tidak berdampak signifikan pada lingkungan, tetapi pada dasarnya pencemaran udara tersebut mengakibatkan dampak yang buruk bagi kelestarian lingkungan ¹³. *Total Suspended Particulate* (TSP) merupakan partikel debu kasar yang menjadi polutan udara yang dapat menyebabkan gangguan kesehatan. *Total Suspended Particulate* merupakan komponen penting dari parameter kualitas udara ambien. Hal ini dikarenakan partikel debu melayang ini mengandung berbagai senyawa dengan komposisi dan ukuran yang berbeda-beda seperti sulfat, nitrat, ammonia, sodium klorida, karbon, debu mineral, dan air. Tidak semua ukuran partikel dapat masuk ketenggorokan dan paru-paru, namun pada *Total Suspended Particulate* (TSP) sebagian dari partikelnya dapat masuk sampai ke paru-paru melalui jalur inhalasi ⁷.

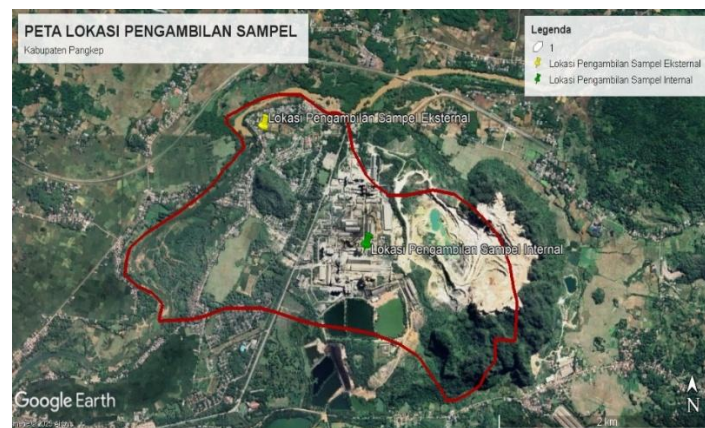
Gangguan *Total Suspended Particulate* (TSP) terhadap kesehatan diantaranya dapat mengendap dalam sel paru-paru sehingga dapat menimbulkan plek hitam pada paru-paru dan mengganggu fungsinya. Sementara itu, kontaminasi timbal (Pb) yang terhirup secara kronis dapat merusak sistem saraf pusat, mengakibatkan gangguan kognitif pada anak dan janin, serta berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan jangka panjang berupa peningkatan tekanan darah ¹¹. Pengaruh zat pencemar pertama masuk pada sistem pernapasan dan kulit serta selaput lendir, selanjutnya apabila zat pencemar dapat memasuki peredaran darah, maka efek sistemik tidak dapat dihindari ⁴.

Studi mengenai kadar total suspended particulat dan plumbum di udara ambien penting dilakukan untuk memahami sejauh mana paparan polutan ini terjadi dan dampaknya terhadap kesehatan masyarakat. Berbagai regulasi telah diterapkan untuk membatasi kadar polutan di udara, baik di tingkat nasional maupun internasional. Namun, pemantauan dan analisis yang mendalam tetap diperlukan untuk memastikan kepatuhan terhadap standar kualitas udara dan melindungi kesehatan masyarakat.

Lokasi penelitian berada di Desa Biring Ere, Kecamatan Bungoro, Kabupaten Pangkep, karena adanya aktivitas industri pembuatan semen di desa tersebut diduga dapat mempengaruhi kualitas udara. Gambaran umum Desa Biring Ere mencakup letak geografis yang strategis, populasi yang beragam, serta adanya berbagai sumber potensial polusi udara. Kegiatan dengan mengidentifikasi dan menganalisis kadar total suspended particulat dan Timbal di desa ini, diharapkan penelitian dapat memberikan informasi yang relevan dan bermanfaat bagi masyarakat setempat, serta menjadi dasar bagi pengambilan kebijakan yang lebih baik dalam pengelolaan kualitas udara.

2. Metode

Pengambilan data dilakukan dengan cara sampling lapangan dan uji analisis laboratorium. Lokasi yang dilakukan sampling berada di Desa Biring Ere, Kecamatan Bungoro, Kabupaten Pangkep, Sulawesi Selatan pada dua titik lokasi yaitu; Kawasan indsutri dan pemukiman yang tertuang pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi Penelitian, Desa Biring Ere, Kecamatan Bungoro, Kabupaten Pangkep

Penelitian menerapkan metode pengambilan sampel jangka panjang (*long-term sampling*) untuk mendapatkan representasi data yang akurat. Long-term sampling adalah metode pengambilan sampel yang dilakukan dalam jangka waktu yang panjang untuk memantau dan menganalisis konsentrasi zat tertentu di lingkungan. Sampling dilakukan dalam jangka waktu 24 jam kerja menggunakan High Volume Air Sampler (HVAS) di lokasi yang telah ditentukan sebelumnya. Saat memantau udara sekitar, pengambilan sampel jangka panjang dapat digunakan untuk menentukan konsentrasi partikel dan juga untuk menyelidiki komposisi partikel yang ada di udara.

Metode yang dipakai untuk memperoleh data dalam penelitian ini melalui tahap beberapa tahapan diantaranya yaitu Proses pengamatan menjadi pusat dari penelitian ini. Pada tahap ini, pengumpulan data yang diperlukan dilakukan secara langsung di lokasi yang diteliti. Dilanjutkan dengan kajian pustaka dilakukan untuk membandingkan teori pendukung dengan data yang akan diolah. Hasil kajian pustaka juga dapat menjadi panduan dan dasar dalam melakukan analisis.

Metode pengambilan sampel yang digunakan dalam penelitian ini adalah pengambilan sampel jangka panjang dengan memakai alat High Volume Air Sampler (HVAS). Hasil pengambilan sampel dilakukan pengujian laboratorium dilakukan untuk mengecek kualitas udara ambien di sekitar pabrik semen serta dampak terhadap lingkungan di Desa Biring Ere, Kecamatan Bungoro, Kabupaten Pangkep. Parameter yang diuji meliputi Total Suspended Particulate (TSP) dan Timbal (Pb).

Data penelitian didapat dari pengambilan sampel udara ambien di kawasan Desa Biring Ere, Kecamatan Bungoro, Kabupaten Pangkep. Sampel udara tersebut kemudian diuji di laboratorium dan dianalisis secara deskriptif kualitatif serta dijabarkan dan dibandingkan dengan standar baku mutu udara ambien sesuai Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 22 Tahun 2021.⁸

3. Hasil dan Pembahasan

Pengambilan sampel *Total Suspended Particulate* (TSP) dan Pb dilakukan selama 24 jam pada titik koordinat S:04°46' 43.8" dan E:119°36'49.8" dengan jarak antar titik pengambilan sampel lokasi 1 1333 meter dari industri. Sedangkan, pengambilan sampel *Total Suspended Particulate* (TSP) dan Timbal (Pb) dilakukan selama 24 jam pada titik koordinat S:4°47'01.0" E: 119°37'03.5" pada lokasi 2 Area Industri.

Tabel 1. Data Hasil Uji Laboratorium Lokasi 1 (Kawasan Pemukiman)

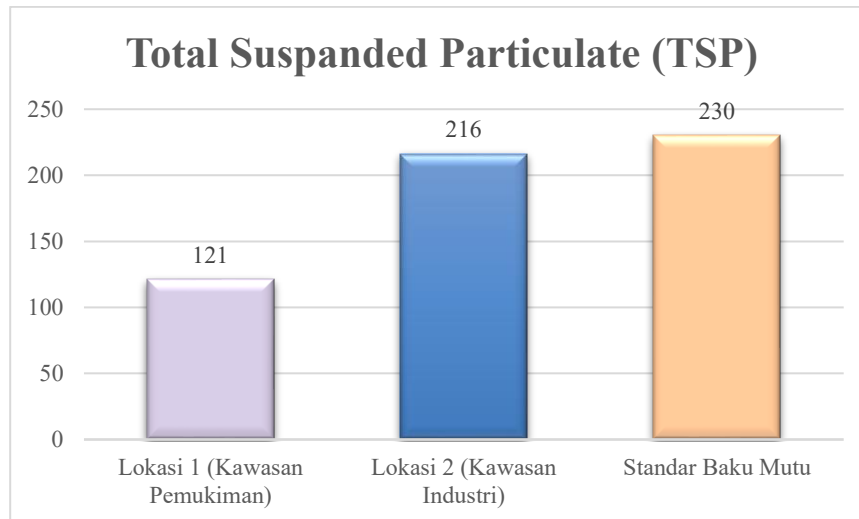
Parameter	Hasil	Periode Sampling	Baku Mutu	Satuan	Metode
<i>Total Suspended Particulate</i> (TSP)	121	24 Jam	230/24 H	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	SNI 7119-3:2017
Timbal (Pb)	< 0,01	24 Jam	2/24 H	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	SNI 7119-3:2017

Berdasarkan data hasil uji laboratorium lokasi 1 menunjukkan bahwa konsentrasi *Total Suspended Particulate* (TSP) $121 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Konsentrasi Timbal (Pb) $< 0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pada udara ambien yang mengindikasikan aman karena di bawah standar baku mutu SNI 7119-3:2017. Hal ini didukung penelitian dari Nugraha¹⁴ apabila konsentrasi *Total Suspended Particulate* (TSP) memiliki nilai $< 230 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dikategorikan baik. Dengan demikian, konsentrasi *Total Suspended Particulate* (TSP) di lokasi ini berada jauh di bawah ambang batas, yang berarti udara di area tersebut masih dalam kategori bersih dan aman bagi kesehatan manusia maupun vegetasi di sekitarnya. Kandungan timbal di udara ambien sangat rendah hingga berada di bawah limit deteksi alat laboratorium, jika dibandingkan dengan baku mutu udara ambien nasional yang menetapkan batas maksimal sebesar $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk pengukuran 24 jam, maka lokasi ini memiliki tingkat risiko paparan logam berat yang sangat minimal.

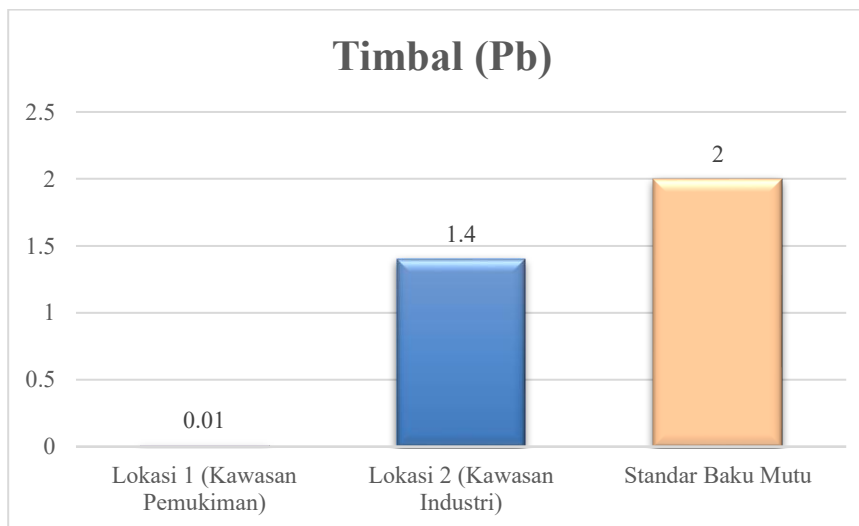
Tabel 2. Data Hasil Uji Laboratorium Lokasi 2 (Kawasan Industri)

Parameter	Hasil	Periode Sampling	Baku Mutu	Satuan	Metode
<i>Total Suspended Particulate</i> (TSP)	216	24 Jam	230/24 H	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	SNI 7119-3:2017
Timbal (Pb)	1,4	24 Jam	2/24 H	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	SNI 7119-3:2017

Berdasarkan data hasil uji laboratorium lokasi 2 menunjukkan bahwa konsentrasi *Total Suspended Particulate* (TSP) $216 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Konsentrasi Timbal (Pb) $1,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pada udara ambien tergolong aman karena di bawah standar baku mutu SNI 7119-3:2017. Hasil *Total Suspended Particulate* (TSP) dinyatakan memenuhi baku mutu, namun angka ini tergolong cukup tinggi karena mendekati nilai ambang batas, hal ini mengindikasikan adanya aktivitas di sekitar lokasi yang menyumbang partikulat debu cukup signifikan, seperti aktivitas transportasi dan industri. Menurut¹⁵, partikel debu *Total Suspended Particulate* (TSP) berasal dari aktivitas pertambangan, aktivitas kendaraan atau transportasi pada lingkungan sekitar. Hal ini dapat berdampak pada gangguan Kesehatan masyarakat jika terpapar debu *Total Suspended Particulate* (TSP) yang tidak memenuhi persyaratan baku mutu¹⁶. Keberadaan timbal di udara perlu diwaspadai karena sifatnya merupakan logam berat berbahaya yang dapat mencemari lingkungan hidup sekitar serta paparan pada manusia¹⁷.



Gambar 2. Konsentrasi Total Suspended Particulate (TSP)



Gambar 3. Konsentrasi Timbal (Pb)

Berdasarkan hasil pengamatan faktor lingkungan pada lokasi 1 diperoleh nilai suhu sebesar 33 °C, kelembaban 65%, tekanan udara 756 mmHg, kecepatan angin 0,55 m/s dan kondisi cuaca cerah. Hasil data pada lokasi 2 menunjukkan suhu dengan nilai 35 °C, kelembaban 48%, tekanan udara 756 mmHg, nilai kecepatan angin 1,3 m/s dan kondisi cuaca cerah.

Tabel 3. Faktor Lingkungan

Lokasi	Suhu	Kelembaban	Tekanan Udara	Kecepatan Angin	Cuaca
Lokasi 1 (Kawasan Pemukiman)	33 °C	65 %	756 mmHg	0,55 m/s	Cerah
Lokasi 2 (Kawasan Industri)	35 °C	48 %	756 mmHg	1,3 m/s	Cerah

Kondisi meteorologi berupa suhu, kelembaban, dan tekanan udara berpengaruh terhadap perbedaan konsentrasi *Total Suspended Particulate* (TSP) dan Pb yang terukur. Pada lokasi 1 suhu udara relatif lebih rendah (33°C) dan kelembaban lebih tinggi (65%) dibandingkan dengan lokasi 2. Kelembaban yang lebih

tinggi dapat meningkatkan proses pengendapan partikel di udara karena partikel TSP cenderung menyerap uap air, menjadi lebih berat, dan lebih mudah mengendap ke permukaan. Kondisi ini berkontribusi pada konsentrasi *Total Suspended Particulate* (TSP) yang lebih rendah ($121 \mu\text{g}/\text{m}^3$) serta konsentrasi Pb yang sangat kecil ($<0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Selain itu, suhu yang sedikit lebih rendah menyebabkan energi kinetik partikel di udara berkurang sehingga dispersi polutan menjadi lebih terbatas^{19,20}.

Hasil data faktor lingkungan Lokasi 2 menunjukkan suhu udara yang lebih tinggi (35°C) dan kelembaban yang lebih rendah (48%) cenderung mendukung kondisi udara yang lebih kering sehingga partikel *Total Suspended Particulate* (TSP) dan logam berat Pb lebih mudah tersuspensi dan bertahan lebih lama di atmosfer¹⁸. Suhu yang lebih tinggi meningkatkan turbulensi udara dan pergerakan partikel, sehingga konsentrasi *Total Suspended Particulate* (TSP) ($216 \mu\text{g}/\text{m}^3$) dan Pb ($1,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) menjadi lebih tinggi, terutama karena lokasi ini berdekatan langsung dengan sumber emisi industri. Tekanan udara di kedua lokasi relatif sama (756 mmHg), sehingga pengaruh tekanan terhadap perbedaan konsentrasi *Total Suspended Particulate* (TSP) dan Pb dapat dikatakan minimal.

4. Simpulan dan Saran

Penelitian ini menunjukkan hasil sampling yang di peroleh pada lokasi 1 (Kawasan Pemukiman) dan pada lokasi 2 (Kawasan Industri) konsentrasi *Total Suspended Particulate* berada Kualitas udara ambien di Desa Biring Ere dikategorikan memenuhi standar baku mutu, namun demikian, nilai konsentrasi *Total Suspended Particulate* (TSP) dan konsentrasi Timbal (Pb) yang mendekati ambang batas, memerlukan perhatian khusus dalam upaya pengendalian pencemaran udara, agar tetap terjaga di bawah standar baku mutu.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan pemantauan udara berdasarkan konsentrasi partikulat matter (PM_{10} dan $\text{PM}_{2.5}$), untuk mendukung data analisis kualitas udara di Desa Biring Ere, Kecamatan Bungoro, Kabupaten Pangkep Provinsi Sulawesi Selatan.

5. Daftar Pustaka

1. S. Murniasih, K. Rozana, and D. S. Prabasiwi, "Asesmen logam berat sampel partikulat udara pada TSP di sekitar PLTU Pacitan," *Indones. J. Chem. Anal.*, vol. 3, no. 2, pp. 74–82, 2020.
2. World Health Organization (WHO), *World Health Statistics*. 2018.
3. F. S. Fauzianto and M. Ali, "Analisis Komparatif Pemantauan Kualitas Udara Ambien di Surabaya Pada Tahun 2023," *Ocean Eng. J. Ilmu Tek. dan Teknol. Marit.*, vol. 3, no. 2, pp. 1–13, 2024.
4. E. P. Pamungkas, "Analisis Konsentrasi Polutan TSP, $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , dan PB Bengkel Motor Resmi (Studi Kasus: UD. Utama Motor Sleman)," 2022.
5. F. E. Longoria-Rodríguez *et al.*, "Sequential SEM-EDS, PLM, and MRS microanalysis of individual atmospheric particles: A useful tool for assigning emission sources," *Toxics*, vol. 9, no. 2, p. 37, 2021.
6. S. Mico, E. Tsaousi, A. Deda, and P. Pomonis, "Characterization of airborne particles and source identification using SEM/EDS," *Eur. Chem. Bull.*, vol. 4, pp. 224–229, 2015.
7. H. S. Huboyo and S. Syafrudin, "Analisis Resiko Konsentrasi Debu (Tsp) dan Timbal (Pb) di Pinggir Jalan terhadap Kesehatan Manusia Studi Kasus Kota YOGYAKARTA," *Teknik*, vol. 28, no. 2, pp. 142–148, 2007.
8. P. R. Peraturan Pemerintah, "Peraturan Presiden Republik Indonesia," No. 72 Tahun 2021, 2021.
9. N. A. N. Malik, "Analisis Kualitas Udara Pada Kawasan Sekolah Berdasarkan Parameter Total Suspended Particulate (Tsp)= Analysis Of Air Quality In School Area Based On Total Suspended Particulate (Tsp) Parameter," 2024, *Universitas Hasanuddin*.
10. F. S. Anwar, A. Mallongi, and M. A. Maidin, "Kualitas udara ambien CO dan TSP di permukiman sekitar kawasan industri PT. Semen Tonasa," *J. Kesehat. Masy. Marit.*, vol. 2, no. 2, 2019.
11. G. G. Gunawan, "Tingkat Pencemaran Udara Debu dan Timbal di Lingkungan Gerbang Tol," *J. Jalan Jemb.*, vol. 32, no. 2, pp. 115–124, 2015.
12. D. S. Wijaya, S. Sunarto, and S. Rachmawati, "Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan dengan Total Suspended Particulate Sebagai Risk Agent di Area Produksi Industri Manufaktur (Studi Kasus PT X Sukoharjo Jawa Tengah)," *J. Ilmu Lingkung.*, vol. 22, no. 3, pp. 678–686, 2024.

13. I. Rosyadi and I. P. Wulandari, "Penegakan hukum lingkungan terhadap pencemaran udara akibat aktivitas industri di Kabupaten Gresik," *Al-Qanun J. Pemikir. Dan Pembaharuan Huk. Islam*, vol. 24, no. 2, pp. 279–307, 2021.
14. M. S. Nugraha, A. Saefumillah, and A. Sopaheluwakan, "Perbandingan Karakteristik Kimia dan Morfologi Total Suspended Particulate (TSP) di Area Urban dan Background," *PROSIDING*, p. 1, 2021.
15. A. R. Nurfadillah, "Penilaian Risiko Paparan Total Suspended Particulate Pada Masyarakat," *Jambura Heal. Sport J.*, vol. 5, no. 2, pp. 104–113, 2023.
16. R. Virgia and A. Djamil, "Analisis Kadar Debu Total Suspended Particulate (TSP) di Udara Ambien terhadap Keluhan Kesehatan Saluran Pernapasan," *Bul. Keslingmas*, vol. 42, no. 3, pp. 141–146, 2023.
17. V. T. Siringoringo, D. Pringgenies, and A. Ambariyanto, "Kajian Kandungan Logam Berat Merkuri (Hg), Tembaga (Cu), dan Timbal (Pb) pada Perna viridis di Kota Semarang," *J. Mar. Res.*, vol. 11, no. 3, pp. 539–546, 2022.
18. T. F. Prasetyo, A. Gani, and Z. Mufid, "Pengaruh Suhu, Kelembapan dan Angin terhadap Polusi Udara: Studi Kasus Dataset Air Quality," *INSANtek*, vol. 6, no. 1, pp. 43–51, 2025.
19. United States Environmental Protection Agency. (2020). NAAQS Table. Retrieved from <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>
20. International Journal of Environmental Research and Public Health. (2019). Impact of Air Pollution on Health: A European and North American Approach. Retrieved from <https://www.mdpi.com/journal/ijerph>