

PENCEMARAN UDARA



**Dr. Yessy Dessy Arna, M.Kep.,Sp.Kom | Renny Septiani Mokodongan, M.Si
Wa Rina, S.KM., M.KL | Pratiwi Soni Redha, SKM.,M.K.M
Jessy Novita Sari, S.Pd., M.Si | Rusdin Wally, SKM,M.Kes
Yauwan Tobing Lukiyono S.S.T, M.T | I. G.A. Kusuma Astuti N.P, drg., M.Kes
Dr.Drs Agus Rokot, S.Pd., M.Kes | Marlyn M. Pandean, S.Pd., SKM., MPH
Bongakaraeng, SKM, M.Kes | Yozua Toar Kawatu, S.Pd, M.K.M
Jon W. Tangka, M.Kep.,Ns.Sp.Kep.M.B | Djoni Ransun, S.Pd., M.Kes
Dr. Umi Budi Rahayu, Ftr., M.Kes | Sailent Rizki Sari Simaremare, S.K.M., Ph.D**

PENCEMARAN UDARA

Dr. Yessy Dessy Arna, M.Kep.,Sp.Kom
Renny Septiani Mokodongan, M.Si
Wa Rina, S.KM., M.KL
Pratiwi Soni Redha, SKM.,M.K.M
Jessy Novita Sari, S.Pd., M.Si
Rusdin Wally, SKM,M.Kes
Yauwan Tobing Lukiyono S.S.T, M.T
I. G.A. Kusuma Astuti N.P, drg., M.Kes
Dr.Drs Agus Rokot, S.Pd., M.Kes
Marlyn M. Pandean, S.Pd., SKM., MPH
Bongakaraeng, SKM, M.Kes
Yozua Toar Kawatu, S.Pd, M.K.M
Jon W. Tangka, M.Kep.,Ns.Sp.Kep.M.B
Djoni Ransun, S.Pd., M.Kes
Dr. Umi Budi Rahayu, Ftr., M.Kes
Sailent Rizki Sari Simaremare, S.K.M., Ph.D

Editor :

La Ode Alifariki, S.Kep., Ns., M.Kes



PENCEMARAN UDARA

Penulis:

Dr. Yessy Dessy Arna, M.Kep.,Sp.Kom
Renny Septiani Mokodongan, M.Si
Wa Rina, S.KM., M.KL
Pratiwi Soni Redha, SKM.,M.K.M
Jessy Novita Sari, S.Pd., M.Si
Rusdin Wally, SKM,M.Kes
Yauwan Tobing Lukiyono S.S.T, M.T
I. G.A. Kusuma Astuti N.P, drg., M.Kes
Dr.Drs Agus Rokot, S.Pd., M.Kes
Marlyn M. Pandean, S.Pd., SKM., MPH
Bongakaraeng, SKM, M.Kes
Yozua Toar Kawatu, S.Pd, M.K.M
Jon W. Tangka, M.Kep.,Ns.Sp.Kep.M.B
Djoni Ransun, S.Pd., M.Kes
Dr. Umi Budi Rahayu, Ftr., M.Kes
Sailent Rizki Sari Simaremare, S.K.M., Ph.D

ISBN : 978-634-7003-60-7

Editor Buku:

La Ode Alifariki, S.Kep., Ns., M.Kes

Cetakan Pertama : 2025

Diterbitkan Oleh :

PT MEDIA PUSTAKA INDO

Jl. Merdeka RT4/RW2 Binangun, Kab. Cilacap, Jawa Tengah

Website: www.mediapustakaindo.com

E-mail: mediapustakaindo@gmail.com

Anggota IKAPI: 263/JTE/2023

Hak Cipta dilindungi oleh undang-undang. Dilarang memperbanyak sebagian karya tulis ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam, atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, Kami panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya kepada saya sehingga buku ini dapat tersusun. Buku ini diperuntukkan bagi Dosen, Praktisi, dan Mahasiswa Kesehatan sebagai bahan bacaan dan tambahan referensi.

Buku ini berjudul Pencemaran Udara mencoba menyuguhkan dan mengemas beberapa hal penting konsep Pencemaran Udara. Buku ini berisi tentang segala hal yang berkaitan dengan konsep Pencemaran Udara serta konsep lainnya yang disusun oleh beberapa Dosen dari berbagai Perguruan Tinggi.

Buku ini dikemas secara praktis, tidak berbelit-belit dan langsung tepat pada sasaran. Selamat membaca.

Kendari, 12 Januari 2025

Penulis

DAFTAR ISI

BAB 1_Konsep Umum Pencemaran Udara	1
A. Pendahuluan.....	1
B. Konsep Pencemaran Udara	3
BAB 2_Sumber-Sumber Pencemar.....	10
A. Pendahuluan.....	10
B. Sumber-Sumber Pencemar Udara	11
BAB 3_Perilaku Udara.....	25
A. Pendahuluan.....	25
B. Perilaku Udara	26
BAB 4_Efek Dari Zat Pencemar terhadap Lingkungan	36
A. Pendahuluan.....	36
B. Dampak dari Zat Pencemar terhadap Lingkungan	36
BAB 5_Pengaruh Meteorologi Terhadap Penyebaran Polutan.....	47
A. Pendahuluan.....	47
B. Pengertian	48
C. Pengaruh Meteorologi Terhadap Penyebaran Polutan	50
BAB 6_Cara pengambilan sampel kualitas udara	59
A. Pendahuluan.....	59
B. Konsep Cara pengambilan sampel kualitas udara.....	60
BAB 7_Monitoring Kualitas Udara.....	68
A. Konsep kualitas udara.....	68
B. Monitoring kualitas udara dengan Internet of Things (IoT) 71	
BAB 8_Pencemaran Udara: Ozon	80
A. Pendahuluan.....	80
B. Pencemaran Udara: Ozon	81

BAB 9_Oksida Nitrogen Dan Sulfur.....	89
A. Pendahuluan.....	89
B. Konsep Oksida Nitrogen dan Sulfur.....	90
BAB 10_Partikulat Tersuspensi	100
A. Pendahuluan.....	100
B. Konsep Partikulat Tersuspensi	101
BAB 11_Pencemaran Udara: Karbon Monoksida, Timbal, dan Zat Toksik Lainnya	111
A. Pendahuluan.....	111
B. Pencemaran Udara: Karbon Monoksida, Timbal, dan Zat Toksik Lainnya	112
BAB 12_Efek Pencemaran Udara Terhadap Kesehatan Saluran Pernafasan.....	121
A. Pendahuluan.....	121
B. Tinjauan Pencemaran Udara dan Efek terhadap Saluran Pernafasan.....	123
BAB 13_Efek Polusi Udara terhadap Kanker Kulit	139
A. Pendahuluan.....	139
B. Konsep Polusi Udara dan Kanker Kulit	140
BAB 14_Efek Polusi Udara terhadap Kesehatan Mata.....	148
A. Pendahuluan.....	148
B. Efek Polusi Udara terhadap Kesehatan Mata	149
C. Pencegahan dan Penatalaksanaan	150
BAB 15_Pengaruh Polusi Udara terhadap Fungsi Otak dan Kognitif	155
A. Pendahuluan.....	155
B. Otak sebagai target dari polusi udara.....	156
C. Neurodegeneratif dan gangguan fungsi otak karena polusi udara	158
D. Perubahan fungsi kognitif karena polusi udara	160

BAB 16 Polusi Udara dan Kesehatan Mental	167
A. Pendahuluan.....	167
B. Polusi Udara dan Kesehatan Mental.....	168

BAB 1

Konsep Umum Pencemaran Udara

Dr. Yessy Dessy Arna, M.Kep.,Sp.Kom

A. Pendahuluan

Pencemaran udara merupakan salah satu isu lingkungan yang paling signifikan di abad ke-21. Fenomena ini merujuk pada kehadiran zat atau bahan kimia di atmosfer yang dapat membahayakan kesehatan manusia, makhluk hidup lain, dan lingkungan secara keseluruhan. Menurut World Health Organization (WHO, 2018), sekitar 91% populasi dunia tinggal di daerah dengan tingkat polusi udara yang melebihi ambang batas yang direkomendasikan. Hal ini menunjukkan betapa seriusnya dampak pencemaran udara terhadap kualitas hidup manusia.

Pencemaran udara tidak hanya berasal dari aktivitas manusia seperti industri, transportasi, dan pembakaran bahan bakar fosil, tetapi juga dari sumber alami seperti letusan gunung berapi dan kebakaran hutan. Menurut Seinfeld dan Pandis (2016), polusi udara dapat dibagi menjadi dua kategori utama, yaitu polutan primer yang langsung dilepaskan ke atmosfer, seperti karbon monoksida dan sulfur dioksida, serta polutan sekunder yang terbentuk dari reaksi kimia di udara, seperti ozon troposferik.

Dampak pencemaran udara meliputi gangguan kesehatan, perubahan iklim, dan kerusakan ekosistem. Beberapa studi, seperti yang dilakukan oleh Lelieveld et al. (2019), menunjukkan bahwa paparan jangka panjang terhadap polusi udara dapat meningkatkan risiko penyakit

kardiovaskular dan pernapasan. Di sisi lain, polusi udara juga memperburuk pemanasan global melalui pelepasan gas rumah kaca seperti karbon dioksida dan metana.

penanganan pencemaran udara, diperlukan pendekatan multidisiplin yang melibatkan ilmu pengetahuan, teknologi, kebijakan, dan partisipasi masyarakat. Dengan memahami konsep-konsep dasar pencemaran udara, pembaca diharapkan dapat lebih menyadari pentingnya tindakan kolektif dalam menjaga kualitas udara.

Pencemaran udara telah menjadi tantangan global yang signifikan dalam beberapa dekade terakhir. Kondisi ini terjadi ketika atmosfer, yang merupakan lapisan pelindung bumi, tercemar oleh zat-zat berbahaya baik yang bersifat kimiawi, fisik, maupun biologis. Zat-zat tersebut dapat berasal dari berbagai sumber, baik yang bersifat alami maupun akibat aktivitas manusia. Menurut laporan United Nations Environment Programme (UNEP, 2020), polusi udara merupakan ancaman terbesar bagi kesehatan lingkungan dan menyumbang lebih dari tujuh juta kematian prematur setiap tahunnya.

Polusi udara secara fundamental memengaruhi tiga aspek utama kehidupan, yaitu kesehatan manusia, keseimbangan ekosistem, dan stabilitas iklim global. Seinfeld dan Pandis (2016) menjelaskan bahwa polutan udara seperti partikel halus (PM_{2.5}), nitrogen dioksida (NO₂), dan sulfur dioksida (SO₂) dapat menyebabkan berbagai penyakit, termasuk kanker paru-paru, gangguan kardiovaskular, dan penyakit paru obstruktif kronis. Selain itu, dampak terhadap lingkungan juga tidak kalah serius. Pencemaran udara dapat menyebabkan hujan asam, menurunkan produktivitas pertanian, serta merusak hutan dan sumber daya air.

Sumber pencemar udara sangat beragam. Aktivitas manusia seperti pembakaran bahan bakar fosil untuk energi dan transportasi, proses industri, serta pembukaan lahan untuk pertanian menjadi kontributor utama. Di sisi lain, sumber alami seperti letusan gunung berapi, kebakaran hutan, dan badai

debu juga memiliki peran meskipun lebih jarang terjadi. Menurut Miller dan Spoolman (2018), pencemaran udara primer seperti karbon monoksida (CO) dilepaskan langsung dari sumbernya, sementara pencemaran udara sekunder seperti ozon (O₃) terbentuk dari reaksi kimia di atmosfer.

Dampak pencemaran udara juga meluas ke ranah sosial dan ekonomi. Menurut Bank Dunia (2016), biaya ekonomi global akibat polusi udara mencapai lebih dari 5 triliun dolar AS setiap tahun, yang mencakup biaya kesehatan, penurunan produktivitas kerja, dan degradasi lingkungan. Fenomena ini memaksa negara-negara di dunia untuk mengambil langkah strategis dalam mengurangi dampak pencemaran udara melalui kebijakan lingkungan yang ketat, inovasi teknologi, dan pendidikan masyarakat.

Pentingnya memahami konsep dasar pencemaran udara tidak hanya untuk mengenali dampak negatifnya tetapi juga untuk mendorong tindakan mitigasi dan adaptasi. Buku ini bertujuan untuk menjelaskan berbagai aspek pencemaran udara, termasuk definisi, sumber, jenis polutan, mekanisme penyebaran, serta solusi yang dapat diterapkan untuk mengurangi dampaknya. Dengan menyajikan informasi berbasis ilmiah dan pandangan pakar, pembaca diharapkan dapat memahami urgensi isu ini dan berkontribusi dalam upaya pelestarian lingkungan.

B. Konsep Pencemaran Udara

1. Pengertian Pencemaran Udara

Pencemaran udara adalah kondisi di mana udara di atmosfer tercemar oleh zat-zat berbahaya yang dapat membahayakan kesehatan manusia, makhluk hidup lain, dan lingkungan. Menurut Seinfeld dan Pandis (2016), pencemaran udara mencakup keberadaan partikel atau gas di atmosfer dalam konsentrasi yang cukup tinggi untuk menimbulkan efek negatif terhadap kehidupan dan ekosistem. WHO (2018) juga mendefinisikan pencemaran udara sebagai paparan terhadap partikel dan gas berbahaya yang dapat berasal dari berbagai aktivitas manusia maupun sumber alami.

2. Sumber Pencemaran Udara

Sumber pencemaran udara dapat dibagi menjadi dua kategori utama:

a. Sumber Alami

Letusan gunung berapi yang menghasilkan gas sulfur dioksida (SO_2) dan partikel abu vulkanik, yang dapat menyebar ke atmosfer global.

Kebakaran hutan yang menghasilkan karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO_2), dan partikel halus ($\text{PM}_{2.5}$), sering kali dipicu oleh perubahan iklim dan aktivitas manusia. Badai debu yang membawa partikel halus ke atmosfer, terutama di daerah kering dan gersang.

b. Sumber Buatan (Antropogenik)

Pembakaran bahan bakar fosil di sektor transportasi yang menghasilkan karbon monoksida (CO) dan nitrogen oksida (NO_x).

Aktivitas industri yang menghasilkan sulfur dioksida (SO_2), logam berat, dan senyawa organik volatil (VOC).

Pembukaan lahan dan pembakaran sampah yang menghasilkan berbagai polutan primer dan sekunder.

3. Jenis Polutan Udara

Polutan udara dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok:

a. Polutan Primer : Zat yang langsung dilepaskan ke atmosfer, seperti karbon monoksida (CO), sulfur dioksida (SO_2), nitrogen oksida (NO_x), dan partikel halus (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$).

b. Polutan Sekunder: Zat yang terbentuk melalui reaksi kimia di atmosfer, seperti ozon troposferik (O_3), asam nitrat (HNO_3), dan partikel sekunder yang berasal dari VOC dan NO_x .

4. Dampak Pencemaran Udara

a. Dampak terhadap Kesehatan Manusia:

Pencemaran udara dapat menyebabkan berbagai penyakit, seperti:

- 1) Gangguan pernapasan kronis, termasuk asma dan bronkitis.
- 2) Penyakit kardiovaskular seperti hipertensi dan serangan jantung.
- 3) Kanker paru-paru akibat paparan jangka panjang terhadap polutan seperti PM_{2.5} dan benzo[a]pyrene (BaP).
- 4) Penurunan fungsi paru-paru pada anak-anak dan lansia.

b. Dampak terhadap Lingkungan:

1) **Kerusakan Ekosistem:**

Hujan asam yang dihasilkan dari sulfur dioksida (SO₂) dan nitrogen oksida (NO_x) dapat menurunkan pH tanah dan air, merusak vegetasi, serta mengancam kehidupan akuatik.

2) **Penurunan Produktivitas Pertanian:**

Polutan seperti ozon troposferik dapat mengganggu proses fotosintesis dan pertumbuhan tanaman.

c. Dampak terhadap Iklim:

Gas rumah kaca seperti karbon dioksida (CO₂) dan metana (CH₄) meningkatkan efek rumah kaca, menyebabkan pemanasan global.

Partikel aerosol dapat memengaruhi pola cuaca dengan mengubah albedo atmosfer.

5. Mekanisme Penyebaran Polutan Udara

Polutan udara dapat menyebar melalui proses-proses berikut:

a. **Difusi:**

Penyebaran polutan secara acak di atmosfer, dipengaruhi oleh perbedaan konsentrasi.

b. **Transportasi oleh Angin:**

Angin membawa polutan ke lokasi yang jauh dari sumbernya, termasuk lintas batas negara.

c. **Reaksi Kimia:**

Polutan dapat bereaksi dengan senyawa lain di atmosfer untuk membentuk polutan baru, seperti pembentukan ozon troposferik dari NO_x dan VOC di bawah sinar matahari.

6. **Upaya Pengendalian Pencemaran Udara**

a. **Teknologi:**

Penggunaan filter udara seperti scrubber pada cerobong pabrik untuk mengurangi emisi gas berbahaya.

Pengembangan kendaraan listrik untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil.

Pemanfaatan energi terbarukan seperti tenaga surya, angin, dan hidro.

b. **Kebijakan Pemerintah:**

Penetapan standar kualitas udara seperti Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU).

Pengendalian emisi melalui regulasi pada sektor industri dan transportasi.

Insentif pajak untuk teknologi ramah lingkungan dan energi terbarukan.

c. **Partisipasi Masyarakat:**

Mengurangi penggunaan kendaraan pribadi dengan beralih ke transportasi umum atau berbagi kendaraan.

Menanam pohon untuk meningkatkan kualitas udara dan menyerap karbon dioksida.

Meningkatkan kesadaran melalui kampanye edukasi tentang dampak pencemaran udara.

7. **Pentingnya Edukasi dan Kesadaran Publik**

Pemahaman tentang pencemaran udara penting untuk mendorong tindakan kolektif. Edukasi melalui media massa, kurikulum pendidikan, dan kampanye lingkungan dapat meningkatkan kesadaran masyarakat tentang pentingnya menjaga kualitas udara. Kolaborasi

antara pemerintah, swasta, dan masyarakat diperlukan untuk menciptakan solusi yang berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Lelieveld, J., Evans, J. S., Fnais, M., Giannadaki, D., & Pozzer, A. (2019). *The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale*. *Nature*, 525(7569), 367–371.
- Miller, G. T., & Spoolman, S. (2018). *Living in the Environment* (20th ed.). Cengage Learning.
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change* (3rd ed.). Wiley.
- United Nations Environment Programme. (2020). *Air Pollution: A Global Threat*. United Nations.
- World Health Organization. (2018). *Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease*. Retrieved from <https://www.who.int>

BIODATA PENULIS



Dr. Yessy Dessy Arna, M.Kep., Sp.Kom lahir di Denpasar, pada 4 Desember 1976. Ia tercatat sebagai lulusan Fakultas Ilmu Keperawatan UI dan Program Doktorat Ilmu Kesehatan FKM-Unair. Wanita yang kerap disapa Yessy ini adalah anak dari pasangan Sudarso (ayah) dan Alm. Sri Hartini (ibu). **Yessy Dessy Arna** merupakan Dosen Bidang Ilmu Keperawatan di **Poltekkes Kemenkes Surabaya** dan Praktisi *Wound Care*. Beberapa hasil penelitian dan pengabdian masyarakat telah terpublikasi pada Jurnal Nasional terakreditasi dan jurnal Internasional. Bertugas sebagai Assesor LAM-PTKes dan Penyuluh Anti Korupsi LSP-KPK.

BAB 2

Sumber-Sumber Pencemar

Renny Septiani Mokodongan, M.Si.

A. Pendahuluan

Pencemaran udara adalah masalah global yang tidak hanya memengaruhi kualitas hidup manusia, tetapi juga keseimbangan ekosistem dan stabilitas iklim bumi. 70% dari kematian penyakit tidak menular diakibatkan oleh penyakit akibat pencemaran udara (Landrigan, 2017). Sumber-sumber pencemaran udara sangat beragam, berasal dari aktivitas manusia maupun alam, dengan dampak yang berbeda terhadap kesehatan manusia, flora dan fauna serta atmosfer bumi (Yasir, 2021).



Gambar 1. Ilustrasi Pencemaran Udara (Yasir, 2021)

Seiring dengan pesatnya perkembangan industri, transportasi serta kegiatan pertanian dan perkotaan, intensitas pencemaran udara semakin meningkat. Berbagai gas berbahaya seperti karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO_x), sulfur dioksida (SO_2), serta partikulat halus ($\text{PM}_{2.5}$), menjadi

penyebab utama penurunan kualitas udara di banyak wilayah (Sarie et al., 2024). Tak hanya itu, gas rumah kaca yang dihasilkan dari aktivitas manusia seperti metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2) juga memperburuk pemanasan global dan perubahan iklim (Seftiani et al., 2024).

Selain itu, sumber-sumber pencemar udara juga dapat berasal dari kegiatan yang sering terabaikan, seperti pembakaran sampah, proses-proses industri tertentu, serta praktik pertanian yang tidak ramah lingkungan. Meskipun upaya untuk mengurangi pencemaran udara sudah banyak dilakukan, masalah ini masih terus berkembang dan semakin kompleks, seiring dengan bertambahnya jumlah populasi manusia dan urbanisasi yang pesat (Prihatin, 2020).

Pencemaran udara disebabkan oleh dua faktor, yaitu faktor alami dan faktor manusia. Faktor alami yang dapat menyebabkan pencemaran udara antara lain kebakaran hutan, letusan gunung berapi dan aktivitas mikroorganisme (Dwangga, 2018). Letusan gunung berapi menghasilkan abu dan gas vulkanik, kebakaran hutan menghasilkan asap yang berbahaya bagi kesehatan sedangkan proses dekomposisi tumbuhan atau hewan yang mati di tanah menghasilkan bau tidak sedap (Handayani et al., 2023). Namun, faktor alam ini jauh lebih kecil pengaruhnya dibandingkan dengan faktor manusia. Bahkan kebakaran hutan pun bisa disebabkan oleh aktivitas manusia. Karena itu, sangat penting untuk menjaga alam tempat yang memberi kita kehidupan, agar tetap lestari.

B. Sumber-Sumber Pencemar Udara

Pencemaran udara dapat disebabkan oleh tiga faktor utama, yaitu dari perkotaan dan industri, pedesaan/pertanian, serta sumber alami (Cahyono, 2011). Pencemaran yang berasal dari perkotaan dan industri disebabkan oleh perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, yang mendorong munculnya banyak pabrik, pembangkit listrik, dan kendaraan bermotor. Sumber pencemaran dari pedesaan atau pertanian umumnya berasal dari penggunaan pestisida, virus, dan bahan kimia lainnya yang digunakan untuk melindungi tanaman atau

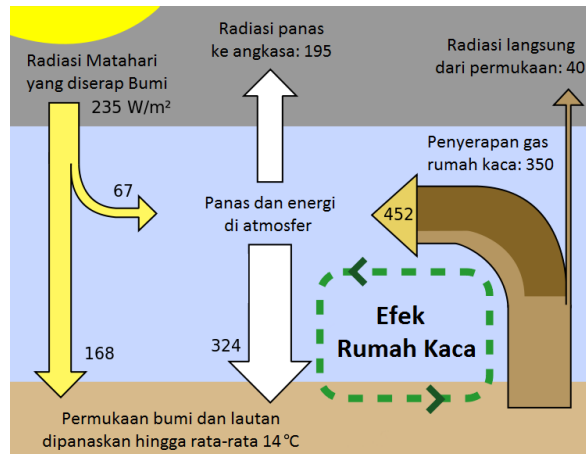
bagian tanaman. Sementara itu, pencemaran yang berasal dari sumber alami dapat berupa abu vulkanik yang dihasilkan oleh letusan gunung berapi, gas vulkanik, debu yang tersebar, bau tidak sedap akibat proses pembusukan sampah, dan lain-lain.

1. Pencemaran Udara dari Aktivitas Industri

Industri adalah penyumbang terbesar pencemaran udara di banyak negara industri dan negara berkembang (Asututi et al., 2014). Proses-proses industri yang intensif energi, terutama yang melibatkan pembakaran bahan bakar fosil, memancarkan berbagai jenis gas dan partikel berbahaya ke atmosfer (Bismo, 2006). Tidak hanya gas beracun, tetapi juga partikel halus yang dapat tersebar jauh di luar area industri.

- a. Emisi Gas Rumah Kaca

Pembakaran bahan bakar fosil, seperti batu bara, minyak, dan gas alam, digunakan dalam berbagai industri, mulai dari pembangkit listrik hingga pabrik semen. Proses ini menghasilkan gas rumah kaca yang berkontribusi pada pemanasan global. **Karbon Dioksida (CO_2)**, sebagai salah satu gas rumah kaca utama, meningkatkan efek rumah kaca yang menyebabkan suhu rata-rata global meningkat (Cahyono, 2010). Dalam jangka panjang, ini menyebabkan perubahan iklim yang serius, dengan peningkatan suhu yang ekstrim, perubahan pola cuaca, dan bencana alam yang lebih sering.



Gambar 2. Ilustrasi terjadinya efek rumah kaca (*Efek Rumah Kaca, 2024*)

b. Sulfur Dioksida (SO_2) dan Hujan Asam

Pabrik-pabrik yang menggunakan bahan bakar fosil yang mengandung sulfur, seperti batu bara, menghasilkan **sulfur dioksida (SO_2)** yang dilepaskan ke udara. Gas ini bereaksi dengan uap air di atmosfer dan membentuk **asam sulfat**, yang kemudian turun ke bumi sebagai hujan asam (Ardiyansyah & Abdullah, 2022). Hujan asam merusak tanaman, memperburuk kualitas air, dan dapat merusak bangunan serta infrastruktur. Selain itu, hujan asam juga mengasamkan tanah yang dapat menurunkan produktivitas pertanian (Handayanto et al., 2017).

c. Nitrogen Oksida (NO_x) dan Pembentukan Ozon

Proses pembakaran dalam industri juga menghasilkan **nitrogen oksida (NO_x)**, yang berperan dalam pembentukan ozon di permukaan tanah (Ikhtiar et al., 2024). **Ozon troposferik** adalah polutan yang sangat berbahaya bagi kesehatan manusia, karena dapat menyebabkan iritasi saluran pernapasan, asma, dan bahkan kerusakan paru-paru jangka panjang (Aryanta & Maharani, 2023). Ozon juga merusak tanaman,

mengurangi hasil pertanian, dan mengganggu ekosistem alami.

d. Partikulat

Partikulat (PM), terutama **partikel halus PM_{2.5}**, adalah partikel mikroskopis yang dapat terhirup ke dalam saluran pernapasan manusia (Ramadhany, 2023). Partikel ini dapat berasal dari proses-proses industri seperti pembakaran bahan bakar, pemrosesan logam, dan penggilingan bahan baku. Partikulat halus ini dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan serius, termasuk penyakit jantung, stroke, dan kanker paru-paru. PM_{2.5} juga berperan dalam perubahan iklim, karena dapat menyerap atau memantulkan cahaya matahari, mengubah pola albedo bumi, dan memperburuk pemanasan global.

2. Pencemaran Udara dari Transportasi

Transportasi adalah sumber besar polusi udara, terutama di kota-kota besar dengan kepadatan kendaraan yang tinggi. Penggunaan kendaraan bermotor yang mengandalkan bahan bakar fosil menjadi salah satu penyebab utama pencemaran udara yang menghasilkan emisi gas berbahaya.

a. Karbon Monoksida (CO)

Karbon monoksida adalah gas yang dihasilkan oleh pembakaran tidak sempurna dalam mesin kendaraan. Meskipun tidak berwarna dan tidak berbau, karbon monoksida sangat berbahaya karena dapat mengikat hemoglobin dalam darah lebih kuat daripada oksigen, yang mengurangi kemampuan darah untuk membawa oksigen ke seluruh tubuh (Dengo et al., 2018). Akibatnya, keracunan karbon monoksida dapat menyebabkan pusing, kebingungan, kehilangan kesadaran, dan bahkan kematian dalam kasus yang parah.

b. Nitrogen Oksida (NO_x)

Pembakaran bahan bakar dalam kendaraan bermotor menghasilkan nitrogen oksida yang sangat berbahaya. Di atmosfer, nitrogen oksida berinteraksi dengan senyawa kimia lainnya untuk membentuk **ozon troposferik** yang berkontribusi pada pembentukan kabut asap dan polusi udara yang berbahaya (Citra & Purwanto, 2021). Ozon juga merupakan salah satu gas rumah kaca yang memperburuk pemanasan global.

c. Hidrokarbon dan PM_{2.5}

Emisi dari kendaraan bermotor juga mengandung **hidrokarbon** dan **partikel halus (PM_{2.5})** yang berkontribusi pada polusi udara. Hidrokarbon yang tidak terbakar dapat membentuk senyawa yang berbahaya di atmosfer, sementara partikulat halus dapat terhirup ke dalam paru-paru, menyebabkan gangguan pernapasan dan penyakit jantung (Suhadi & Febrina, 2013).

3. Pencemaran Udara dari Pembakaran Sampah dan Lahan

Di banyak negara, terutama di negara berkembang, pembakaran sampah secara terbuka dan pembukaan lahan dengan cara dibakar menjadi praktik yang cukup umum (Putri, 2017). Praktik ini menghasilkan sejumlah besar polutan udara yang berbahaya bagi kesehatan manusia dan lingkungan.

a. Dioxin dan Furans

Sampah yang terbakar, terutama plastik dan bahan kimia berbahaya lainnya, menghasilkan senyawa **dioxin** dan **furan**, yang sangat beracun dan dapat bertahan lama di lingkungan (Marliani, 2015). Dioxin diketahui dapat mengganggu sistem kekebalan tubuh, menyebabkan kanker, dan mengganggu perkembangan anak. Dioxin juga dapat menumpuk dalam rantai makanan, mengancam kesehatan manusia dan hewan (Efrizal, 2022).



Gambar 3. Pembakaran Sampah Menghasilkan Asap yang Berbahaya untuk Kesehatan (CNN, 2023)

b. Karbon Dioksida dan Metana

Pembakaran sampah dan pembukaan lahan dengan cara dibakar menghasilkan **karbon dioksida** dan **metana (CH_4)**. Metana adalah gas rumah kaca yang jauh lebih kuat daripada karbon dioksida dalam memperburuk pemanasan global, meskipun lebih cepat terurai dalam atmosfer (Gusty et al., 2023). Pembakaran sampah dan pembukaan lahan secara terbuka adalah salah satu penyebab utama pelepasan metana, yang memperburuk krisis perubahan iklim.

4. Pencemaran Udara dari Pertanian

Aktivitas pertanian memiliki dampak yang signifikan terhadap kualitas udara, baik secara langsung maupun tidak langsung. Selain emisi dari mesin pertanian, pengelolaan tanah dan penggunaan pupuk serta pestisida dapat melepaskan sejumlah polutan ke atmosfer (Lista et al., 2024).

a. Amonia (NH_3)

Amonia adalah gas yang dilepaskan dalam jumlah besar dari pupuk nitrogen dan kotoran ternak. Gas ini dapat bereaksi dengan senyawa lain di atmosfer untuk membentuk **partikulat amonia**, yang dapat merusak paru-paru dan meningkatkan keasaman tanah (Hamonangan & Yuniarto, 2022). Amonia juga dapat

memperburuk kualitas udara di daerah sekitar pertanian dan peternakan besar.

b. Metana

Metana adalah gas yang dihasilkan oleh proses fermentasi di dalam sistem pencernaan ternak ruminansia seperti sapi. Selain itu, metana juga dilepaskan oleh lahan basah yang digenangi, serta pengolahan pupuk organik. Gas metana memiliki potensi pemanasan global yang sangat tinggi, jauh lebih besar daripada karbon dioksida, meskipun lebih cepat terurai di atmosfer (Sarwono, 2016).

c. Partikulat dari Debu Tanah

Erosi tanah dan pengolahan tanah secara intensif dapat menghasilkan debu yang terbang ke udara, terutama di daerah yang kurang vegetasi. Partikulat ini, terutama dalam ukuran PM10 dan PM2.5, dapat menyebabkan gangguan pernapasan, serta meningkatkan beban polusi udara di daerah sekitar pertanian (Rahim & Camin, 2018).

5. Pencemaran Udara Alamiah

Selain sumber pencemaran dari aktivitas manusia, ada pula sumber pencemaran alami yang dapat berkontribusi terhadap kualitas udara. Meskipun seringkali tidak dapat dikendalikan, pencemaran alamiah juga memberikan dampak yang signifikan terhadap lingkungan.

a. Letusan Vulkanik

Letusan gunung berapi melepaskan sejumlah besar **gas berbahaya**, termasuk sulfur dioksida (SO_2), karbon dioksida (CO_2), dan partikel abu vulkanik (Wijayanti et al., n.d.). Gas sulfur dioksida berkontribusi pada pembentukan hujan asam dan polusi udara yang dapat meluas ke area yang jauh. Abu vulkanik juga dapat menyebabkan gangguan kesehatan, merusak tanaman, dan mengurangi kualitas udara di wilayah yang terdampak.

b. Kebakaran Hutan Alam

Kebakaran hutan yang disebabkan oleh petir atau kondisi cuaca ekstrem lainnya dapat menghasilkan asap yang kaya akan karbon monoksida, karbon dioksida, dan metana. Kebakaran hutan alami ini juga berkontribusi pada emisi gas rumah kaca, memperburuk perubahan iklim dan polusi udara.



Gambar 4. Ilustrasi Kebakaran Hutan (Albarsyah, 2019)

c. Debu dari Gurun

Angin kencang yang membawa debu dari gurun juga dapat mencemari udara, terutama di daerah yang berdekatan dengan gurun besar, seperti Gurun Sahara. Partikel debu ini dapat membawa mikroorganisme berbahaya dan dapat memperburuk kualitas udara di wilayah yang terpapar.

Pencemaran udara berasal dari berbagai sumber yang saling terkait, baik yang disebabkan oleh aktivitas manusia maupun proses alami. Tantangan utama adalah mengurangi dampak negatif dari sumber-sumber pencemaran ini, terutama yang dihasilkan oleh kegiatan industri, transportasi, dan pertanian. Untuk itu, diperlukan langkah-langkah sistematis dan berkelanjutan:

1. Peningkatan Teknologi Hijau

Penggunaan teknologi yang ramah lingkungan, seperti energi terbarukan (matahari, angin, bioenergi), serta kendaraan listrik dapat mengurangi emisi gas rumah kaca dan polusi udara.

2. Pengaturan Ketat Emisi

Pemerintah harus menegakkan regulasi yang lebih ketat untuk industri dan transportasi dalam hal pengendalian emisi dan pembuangan polutan udara.

3. Reboisasi dan Pengelolaan Lahan Berkelanjutan

Upaya untuk mengurangi konversi lahan, serta melakukan reboisasi dan penghijauan, dapat mengurangi emisi karbon dan membantu menyaring polutan udara.

4. Edukasi dan Kesadaran Masyarakat

Pendidikan tentang pentingnya kualitas udara dan penerapan perilaku ramah lingkungan, seperti penggunaan transportasi umum, akan berkontribusi besar terhadap pengurangan pencemaran udara.

DAFTAR PUSTAKA

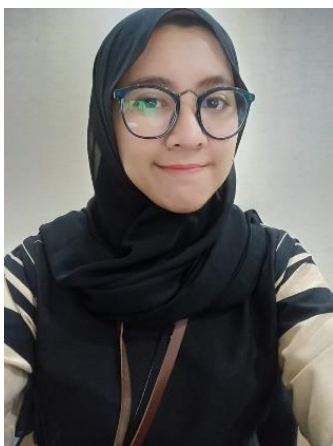
- Albarsyah. (2019). *Penanganan Kebakaran Hutan Dinilai Belum Optimal*.
<https://www.topbusiness.id/23424/penanganan-kebakaran-hutan-dinilai-belum-optimal.html>
- Ardiyansyah, R., & Abdullah, S. (2022). Perancangan Sistem Pendeteksi Ph Air Hujan Berbasis Iot (Studi Kasus: Desa Gedepangrango Kabupaten Sukabumi). *JUTEKIN (Jurnal Teknik Informatika)*, 10(1).
<https://doi.org/10.51530/jutekin.v10i1.562>
- Aryanta, I. W. R., & Maharani, S. E. (2023). Dampak Buruk Polusi Udara Bagi Kesehatan Dan Cara Meminimalkan Risikonya. *Jurnal Ecocentrism*, 3(2), 47–58.
<https://doi.org/10.36733/jeco.v3i2.7035>
- Asututi, T., Parenta, T., & Paddu, H. (2014). Peranan Kegiatan Industri Pengolahan Terhadap Pencemaran Lingkungan Di Sulawesi Selatan. *Journal of Economics and Behavioral Studies*, 3(2(J)), 49–56.
- Bismo, S. (2006). Teknologi Radiasi Sinar Ultra-Ungu (UV) dalam Rancang Bangun Proses Oksidasi Lanjut untuk Pencegahan Pencemaran Air dan Fasa Gas. In *Pencegahan Pencemaran* (Issue September).
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3043.6560>
- Cahyono, W. E. (2010). Pengaruh Pemanasan Global Terhadap Lingkungan Bumi. *Lapan*, 1990, 1–4.
- Cahyono, W. E. (2011). Kajian Tingkat Pencemaran Sulfur Dioksida Dari Industri Di Beberapa Daerah Di Indonesia. *Berita Dirgantara*, 12(4), 132–137.
http://jurnal.lapan.go.id/index.php/berita_dirgantara/article/view/1661
- Citra, A. D. P., & Purwanto. (2021). *Pengelolaan Limbah Cat Industri Kemasan* (Issue January). Sekolah Pascasarjana Universitas Diponegoro Semarang.
<https://www.researchgate.net/publication/350582338>
- CNN, I. (2023). *Kalau Tetangga Bakar Sampah, Lakukan Ini Biar Asap Tak Bikin Sesak*. <https://www.cnnindonesia.com/gaya->

- hidup/20230804170849-277-982108/kalau-tetangga-bakar-sampah-lakukan-ini-biar-asap-tak-bikin-sesak
- Dengo, M. R., Suwondo, A., & Suroto. (2018). Hubungan Paparan CO terhadap Saturasi Oksigen dan Kelelahan Kerja pada Petugas Parkir. *Coronalia Journal of Public Health*, 1(2), 78. <https://doi.org/10.32662/gjph.v1i2.347>
- Dwangga, M. (2018). Intensitas Polusi Udara Untuk Penunjang Penataan Ruang Kota Pelaihari Kabupaten Tanah Laut. *Metode Jurnal Teknik Industri*, 4(2), 69-77.
- Efek Rumah Kaca. (2024). https://id.wikipedia.org/wiki/Efek_rumah_kaca
- Efrizal, W. (2022). Dampak Cemarkan Dioksin Bagi Keadaan Gizi Dan Kesehatan: Literature Review. *JURNAL KESEHATAN LINGKUNGAN: Jurnal Dan Aplikasi Teknik Kesehatan Lingkungan*, 19(1), 23-30. <https://doi.org/10.31964/jkl.v19i1.400>
- Gusty, S., Jamal, M., Muliawan, I. W., Johra, Indrayani, P., Yunus, A. Y., & Susanto, H. A. (2023). *Ilmu Lingkungan* (P. R. Rangan, M. Chaerul, & Muzaki (Eds.); Vol. 01). CV Tohar Media.
- Hamonangan, M. C., & Yuniarto, A. (2022). Kajian Penyisihan Amonia dalam Pengolahan Air Minum Konvensional. *Jurnal Teknik ITS*, 11(2). <https://doi.org/10.12962/j23373539.v11i2.85611>
- Handayani, L., Hakim, A. L., Yusuf, M., & Anwar, S. R. (2023). Analisis Konten Berita Pencemaran Udara Di Jakarta Melalui Media Sosial Instagram Mengingat Kesadaran Masyarakat Jakarta. *Prosiding Seminar Nasional*, 1215-1226.
- Handayanto, E., Nuraini, Y., Muddarisna, N., Syam, N., & Fiqri, A. (2017). Fitoremediasi dan Phytomining Logam Berat Pencemar Tanah. In *Universitas Brawijaya Press*. https://books.google.co.id/books?id=t3zPqTnRjX0C&dq=wrong+diet+pills&source=gbs_navlinks_s
- Ikhtiar, M., Syam, N., & Puspitasari, A. (2024). *Mikroorganisme di Udara dan Gangguan Kesehatan dalam Ruang* (M. Sididi

- (Ed.)). Eureka Media Aksara.
- Landrigan, P. J. (2017). Air pollution and health. *The Lancet Public Health*, 2(1), e4–e5. [https://doi.org/10.1016/S2468-2667\(16\)30023-8](https://doi.org/10.1016/S2468-2667(16)30023-8)
- Lista, L. S., Asfar, A. M. I. T., Asfar, A. M. I. A., Nurannisa, A., Asdar, M., & Sofiyani. (2024). *Eco-Enzyme Hand Sanitizer Dari Limbah Wortel dan Bunga Melati* (M. H. Muarapey (Ed.)). Karya Bakti Makmur (KBM) Indonesia.
- Marliani, N. (2015). Pemanfaatan Limbah Rumah Tangga (Sampah Anorganik) Sebagai Bentuk Implementasi dari Pendidikan Lingkungan Hidup. *Formatif: Jurnal Ilmiah Pendidikan MIPA*, 4(2), 124–132. <https://doi.org/10.30998/formatif.v4i2.146>
- Prihatin, R. B. (2020). Pengelolaan Sampah di Kota Bertipe Sedang: Studi Kasus di Kota Cirebon dan Kota Surakarta. *Aspirasi: Jurnal Masalah-Masalah Sosial*, 11(1), 1–16. <https://doi.org/10.46807/aspirasi.v11i1.1505>
- Putri, T. T. A. (2017). Pengelolaan sumberdaya lahan gambut di Kubu Raya Kalimantan Barat menuju lahan tanpa bakar. *Jurnal Penelitian Agrosamudra*, 4(2), 92–109.
- Rahim, F., & Camin, Y. R. (2018). Kondisi Kualitas Udara (SO₂, NO₂, Pm₁₀ Dan Pm_{2,5}) Di Dalam Rumah Di Sekitar Cilegon Dan Gangguan Pernapasan Yang Diakibatkannya. *Al-Kauniah: Jurnal Biologi*, 11(2), 82–90. <https://doi.org/10.15408/kauniah.v11i2.5710>
- Ramadhany, A. R. (2023). *Analisis Konsentrasi Particulate Matter (PM_{2,5}) dan Keluhan Pernapasan Masyarakat di Kawasan Jl. Trunojoyo Kabupaten Jember*. Universtias Jember.
- Sarie, F., Suharta, B., Priana, S. E., Jasman, Marlina, L., Sari, M. W., Moniaga, F., Haksami, A. M. T., Taufik, M., & Utomo, B. (2024). *Pengantar Teknik Lingkungan*. CV Gita Lentera.
- Sarwono, R. (2016). Biochar Sebagai Penyimpan Karbon, Perbaikan Sifat Tanah, dan Mencegah Pemanasan Global : Tinjauan. *Jurnal Kimia Terapan Indonesia*, 18(01), 79–90. <https://doi.org/10.14203/jkti.v18i01.44>
- Seftiani, M. A., Sudarti, S., & Yushardi, Y. (2024). Mekanisme

- Dampak Pemanasan Global Oleh Gas Rumah Kaca. *Jurnal Pendidikan, Sains Dan Teknologi*, 3(2), 328–333.
<https://doi.org/10.47233/jpst.v3i2.1708>
- Suhadi, D. R., & Febrina, A. S. (2013). *Pedoman Teknis Penyusunan Inventarisasi Emisi Pencemar Udara di Perkotaan*. Kementerian Lingkungan Hidup.
[https://ppkl.menlhk.go.id/website/filebox/609/190710181542PEDOMAN TEKNIS PENYUSUNAN INVENTARISASI EMISI.pdf](https://ppkl.menlhk.go.id/website/filebox/609/190710181542PEDOMAN%20TEKNIS%20PENYUSUNAN%20INVENTARISASI%20EMISI.pdf)
- Wijayanti, A., Al Hakim, H. H., & Yulinawati, H. (n.d.). Pemodelan pencemaran udara di industri petrokimia. *Karya Ilmiah Trisakti*, 2, 1–10.
- Yasir, M. (2021). Pencemaran Udara Di Perkotaan Berdampak Bahaya Bagi Manusia, Hewan, Tumbuhan dan Bangunan. *Jurnal OSF.Oi*, 1–10.
<https://doi.org/10.31219/osf.io/nc5rg>

BIODATA PENULIS



Renny Septiani Mokodongan lahir di Jakarta, pada 30 September 2024. Menyelesaikan pendidikan S1 di Fakultas Matematika dan Pengetahuan Alam Universitas Negeri Jakarta jurusan Kimia dan S2 di Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam jurusan Ilmu Kimia dengan peminatan Kimia Hayati Universitas Indonesia. Sampai saat ini penulis berprofesi sebagai Dosen di Program Studi Diploma III Farmasi Politeknik Kesehatan Genesis Medicare, Depok.

BAB 3

Perilaku Udara

Wa Rina, S.KM., M.KL

A. Pendahuluan

Berbicara tentang udara tidak terlepas dari ilmu meteorologi. Ilmu meteorologi mempelajari keadaan lapisan udara yang menyelimuti planet bumi. Lapisan-lapisan tersebut dikenal dengan istilah atmosfera. Atmosfera ini terbagi atas beberapa lapisan, yaitu troposfera, tropopause, stratosfera, ionosfera, dan eksosfera. Dengan adanya lapisan-lapisan tersebut maka dapat mempengaruhi temperatur udara di suatu tempat yang dinyatakan dengan satuan derajat-celcius atau fahrenheit atau reamur atau kelvin (Saputra, 2013).

Udara merupakan gas, uap air, dan partikel debu membentuk campuran rumit. Terutama sebagai akibat dari pembakaran bahan bakar padat dan fosil, udara terus mengandung konsentrasi yang lebih tinggi dari berbagai polutan gas, logam berat, partikel halus, senyawa organik volatil, dan polutan lainnya. Komposisi kimia, waktu respons, dan cara kerja masing-masing kontaminan ini sangat bervariasi. Polutan udara dapat memiliki berbagai efek toksikologi pada kesehatan manusia, termasuk gangguan neurologis, kardiovaskular, dan pernapasan termasuk kanker, tergantung pada durasi dan konsentrasi paparan. Kelahiran prematur, penyakit, kematian, dan harapan hidup yang lebih pendek semuanya telah dikaitkan dengan polusi udara (Sitorus, et al., 2022). 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 ketinggian tertentu yang menyebabkan udara ambien tidak dapat memenuhi fungsinya (PP No. 41, 1999).

B. Perilaku Udara

1. Atmosfder udara

Selubung gas yang menyelimuti permukaan padat dan cair bumi dikenal sebagai atmosfer. Selubung ini, yang dapat dianggap sebagai perpanjangan dari korona matahari, membentang ke atas (secara vertikal) sejauh ratusan kilometer sebelum bertemu dengan medium antarbintang berkecepatan rendah dari sistem tata surya. Proses penciptaan dan modifikasi cuaca serta iklim terjadi di atmosfer, yang terdiri dari beberapa komponen gas. Kehidupan di bumi bergantung pada atmosfer karena tanpa atmosfer, manusia, hewan, dan tumbuhan tidak akan ada. Selain itu, atmosfer melindungi kehidupan di bumi dari radiasi matahari yang intens pada siang hari dan menghentikan kehilangan panas ke luar angkasa pada malam hari.

Tarikan gravitasi bumi menahan atmosfer, yang merupakan lapisan gas atau campuran gas, ke planet. Udara adalah nama yang diberikan untuk campuran gas ini. Hingga 80 kilometer (km) di atas permukaan bumi, 99,99% udara berada, dengan sekitar setengahnya berada antara 3 sampai dengan 5 km di atas tanah. Makhluk hidup dapat menggunakan udara hingga lima kilometer di atas permukaan tanah (Wijaya, 2020).

2. Komposisi udara

Udara kering, uap air, dan aerosol adalah tiga jenis partikel halus dan ringan yang membentuk atmosfer. Tabel 1 menunjukkan komposisi udara kering dan bersih di permukaan laut. Sekitar 99,03% udara bersih terdiri dari nitrogen dan oksigen, yang merupakan komponen utama dari udara kering. Komponen lainnya, seperti karbon dioksida dan ozon, hanya merupakan sebagian kecil,

namun tetap penting bagi kehidupan seperti yang kita kenal.

Kandungan uap air di udara bervariasi dari 0,1% hingga 5%, dengan rata-rata sekitar 3,1%. Evaporasi dari danau, sungai, laut, dan badan air lainnya adalah sumber uap air di atmosfer. Garam, karbon, sulfat, nitrat, kalium, kalsium, dan partikel vulkanik adalah contoh partikel kecil yang dikenal sebagai aerosol. Aerosol di atmosfer biasanya mengandung 20% debu dari daerah kering, 40% kristal garam dari serpihan gelombang laut, 0,5% asap dari pembakaran dan cerobong pabrik, serta 25% bahan-bahan lainnya (microorganism) (Wijaya, 2020).

Tabel 1. Komposisi Udara Bersih

No.	Gas	% Volume
1	Nitrogen (N ₂)	78.09
2	Oksigen (O ₂)	20.94
3	Argon (Ar)	0.93
4	Karbon dioksida (CO ₂)	0.00332
5	Neon (Ne)	0.0018
6	Helium (He)	0.00052
7	Kripton (Kr)	0.0001
8	Hidrogen (H)	0.00005
9	Xenon (Xe)	0.000008

3. Sifat-sifat udara

Sifat-sifat udara secara umum dapat dijelaskan sebagai berikut (Samosir, 2024) dan (Basmatulhana, 2022):

- Campuran gas: Berbagai gas, termasuk nitrogen, oksigen, karbon dioksida, dan uap air, membentuk udara.
- Tanpa rasa, tanpa warna, dan tanpa bau: Udara tidak berwarna, tidak berasa, dan tidak berbau.
- Memiliki massa: Udara memiliki massa yang menghasilkan tekanan atmosfer.

- d. Tekanan atmosfer di permukaan bumi adalah sekitar 101,3 kilopascal (kPa), atau 1 atm. Udara memiliki tekanan.
 - e. Ruang yang ditempati: Udara mendiami ruang.
 - f. Pemanasan menyebabkan udara mengembang, dan pendinginan menyebabkan udara menyusut.
 - g. Bentuk menyesuaikan dengan ruang: Udara akan menyesuaikan bentuknya dengan ruang.
 - h. Tekanan udara dan volume dapat diubah: Tekanan udara dan volume dapat diubah (boleh diperkecil atau diperbesar).
 - i. Suhu mempengaruhi densitas; pada suhu tinggi, udara memiliki densitas yang lebih rendah, sementara pada suhu rendah, densitasnya lebih tinggi.
 - j. Refleksi dan memancarkan cahaya: Cahaya dapat dipantulkan dan memancarkan oleh udara.
 - k. Konduktivitas termal yang lebih rendah: Jika dibandingkan dengan logam, udara memiliki konduktivitas termal yang lebih rendah.
 - l. Mengandung uap air: Kelembapan udara dapat berubah, dan dapat mengandung uap air.
4. Kontaminasi udara dalam ruangan

Hasil penelitian dengan judul perbedaan polutan penyebab polusi udara dalam ruang pada negara maju dan berkembang (literature review) menunjukkan di negara-negara maju, jamur, asap rokok, dan bahan kimia seperti formaldehid adalah contoh polutan udara dalam ruangan. Asap api dari memasak adalah salah satu polutan udara dalam ruangan yang paling umum di negara-negara miskin. Sehingga dapat disimpulkan bahwa karena kondisi perumahan dan aktivitas penghuni bervariasi di antara negara maju dan negara berkembang, begitu pula dengan kontaminan dan sumber polutan udara dalam ruangan (Zettira & Yudhastuti, 2022).

Beberapa faktor yang menyebabkan kontaminasi udara dalam ruang antara lain (Cahyadi, 2021):

a. Asap rokok

Salah satu faktor yang berkontribusi terhadap polusi udara dalam ruangan adalah asap rokok. Selain itu, banyak ruang TTU di Indonesia tidak memiliki larangan merokok.

Situasi ini tidak menguntungkan. Namun, menurut laporan Statistik Kesehatan SEAMIC Maret 2001, asma, emfisema, dan bronkitis menempati urutan ketujuh sebagai penyebab kematian yang paling umum di Indonesia (3,6%). Sementara itu, di antara 10 penyebab kematian teratas, kematian akibat emfisema, bronkitis kronis, dan asma menempati urutan keenam, menurut statistik dari Survei Kesehatan Rumah Tangga Kementerian Kesehatan Indonesia tahun 1992.

Meskipun penyebab pasti penyakit ini masih belum diketahui, sejumlah variabel diketahui bertanggung jawab atas peningkatannya, termasuk tingginya tingkat merokok yang terus berlanjut (terutama di negara-negara berkembang), rata-rata usia penduduk yang semakin meningkat menjadi 63 tahun, dan udara yang terkontaminasi.

b. Asap pembakaran

Polusi udara dalam ruangan disebabkan oleh asap ini, yang berasal dari berbagai bahan bakar yang kita gunakan di rumah. Selain itu, jika dibandingkan dengan bahan bakar lainnya, bahan bakar kayu adalah sumber utama polusi.

c. Partikel dari alat rumah

Cat, semen, dan kayu adalah beberapa komponen di ruang tersebut yang memiliki potensi menjadi polutan. Sementara itu, mesin fotokopi, penyedot debu, dan kasur kapuk adalah peralatan rumah tangga yang mencemari udara.

d. Manusia dan hewan

Faktanya, partikel-partikel tertentu (termasuk bakteri, virus, protozoa, dan cacing) dapat diproduksi oleh

manusia sendiri dan berkontribusi terhadap pencemaran udara. Sementara itu, debu dari bulu anjing dan kucing, di antara partikel lainnya, dapat dihasilkan oleh hewan peliharaan yang tidak terawat dengan baik dan berkontribusi terhadap polusi udara dalam ruangan.

5. Kontaminasi udara luar ruangan

Faktor yang menyebabkan kontaminasi udara luar ruangan adalah sebagai berikut (Hernawati, 2022):

a. Asap/gas buangan kendaraan bermotor

Menurut data terbaru, sektor transportasi Indonesia secara signifikan berkontribusi terhadap pencemaran udara. Salah satu ukuran dari meningkatnya jumlah mobil dari waktu ke waktu adalah kenaikan kepemilikan kendaraan bermotor, yang pada tahun 2021 mencapai lebih dari 138 juta unit, dengan lebih dari 33 juta kendaraan tersebut terdaftar di wilayah DKI Jakarta, Bandung, dan Palembang.

Kendaraan bermotor yang menggunakan mesin pembakaran internal yang berjalan dengan bensin dan diesel mengeluarkan sejumlah polutan berbahaya, termasuk sulfur dioksida (SO_2), karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO_2), serta partikel $\text{PM}_{2.5}$ dan PM_{10} . Kesehatan manusia sangat dipengaruhi oleh tingkat partikel $\text{PM}_{2.5}$ dan PM_{10} yang dihasilkan oleh kendaraan bermotor (Syahputri, Suarga, Rahman, Zahri, & Ramdani, 2023).

Dibandingkan dengan tahun 2022, Indonesia mengalami peningkatan tingkat $\text{PM}_{2.5}$ sebesar 20%, menjadikannya negara yang paling cepat berkembang di Asia-Pasifik. (ranked 14th globally) (IQAir, 2023). Jumlah orang di Indonesia yang menggunakan kendaraan pribadi adalah bukti bahwa aktivitas transportasi darat di negara ini masih berkembang. Selama sepuluh tahun terakhir, jumlah kendaraan pribadi—mobil penumpang dan sepeda motor—hampir dua kali lipat, menurut data dari Badan Pusat Statistik. (BPS). Kenaikan rasio kendaraan terhadap populasi, yang menunjukkan tingkat pertumbuhan

mobil yang lebih besar dibandingkan dengan pertumbuhan populasi, membuat ketergantungan pada kendaraan pribadi menjadi jelas. Rasio kepemilikan mobil meningkat secara signifikan dari 300 mobil per 1.000 orang pada tahun 2010 menjadi 500 kendaraan per 1.000 orang pada tahun 2021. Ini menunjukkan bahwa satu dari dua warga negara Indonesia memiliki mobil pribadi (Syahputri, Suarga, Rahman, Zahri, & Ramdani, 2023).

b. Asap/gas industri

Sekitar 32,49% polusi udara disebabkan oleh industri. Melalui proses pembakaran dan produksi, pabrik dan fasilitas industri lainnya menghasilkan berbagai polutan (One-Health, 2024).

Meskipun pola musiman memiliki pengaruh kuat terhadap penyebaran polusi, ada bukti kuat mengenai masalah polusi lintas batas yang sedang berlangsung. Sumber utama emisi terletak di dalam dan sekitar wilayah Jakarta, Banten, dan Jawa Barat, termasuk 136 fasilitas industri, termasuk pembangkit listrik di sektor emisi tinggi, yang beroperasi dalam radius 100 km dari batas kota. Analisis CREA menggambarkan bahwa ruang udara gabungan atau '*airshed*' yang mencakup ibu kota Jakarta dan kawasan industri di Banten dan Jawa Barat sering kali melampaui batas wilayahnya, berdampak signifikan pada area dalam radius beberapa ratus kilometer, bahkan mencapai Lampung, Sumatra Selatan, dan Jawa Tengah.

Kompleks pembangkit listrik Banten-Suralaya, salah satu kompleks pembangkit listrik tenaga uap berbahan bakar batu bara terbesar di Indonesia, terletak di ujung barat laut Pulau Jawa, dekat kota Serang dan Cilegon, sekitar 150 kilometer barat Jakarta. Pada tahun 2023, CREA melakukan penilaian dampak kesehatan untuk kompleks tersebut. Menurut studi ini, konsentrasi rata-rata PM_{2.5} tahunan di Jakarta adalah antara 0,2 dan 0,4 µg/m³, yang disebabkan oleh kompleks dengan kapasitas 6 GW.

Ini tidak boleh diabaikan, terutama pada hari-hari ketika tingkat polusi tinggi (Hasan, 2024).

c. Sampah

Menurut data dari Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) 2023, per 24 Juli 2024, input dari 290 kabupaten/kota di seluruh Indonesia, penumpukan sampah di negara ini telah mencapai 31,9 juta ton. 20,5 juta ton, atau 63,3%, dari total produksi sampah nasional dapat dikelola, sedangkan sisanya sebesar 35,67%, atau 11,3 juta ton, tidak dapat dikelola (Humas BRIN, 2024). Pembakaran limbah dan penggunaan bahan bakar fosil di rumah tangga juga berkontribusi terhadap pencemaran udara. Pembakaran rumah tangga menyumbang 0,43% (One-Health, 2024).

Membakar sampah bukanlah solusi untuk masalah sampah. Sebaliknya, membakar sampah dapat memperburuk tingkat pencemaran udara dan menimbulkan risiko penyakit pernapasan. Polutan yang dihasilkan dari pembakaran, dalam bentuk apa pun, bersifat toksik jika masuk ke dalam kantung paru-paru, menyebabkan efek ringan hingga berat. Dalam jangka pendek, hal ini dapat menimbulkan risiko penyakit paru-paru akut, tetapi dalam jangka panjang, hal ini meningkatkan risiko kanker akibat paparan senyawa karsinogenik (Grehenson, 2023).

DAFTAR PUSTAKA

- Basmatulhana, H. (2022, Agustus 20). *Sifat-Sifat Udara dan Manfaatnya*. Retrieved from detikedu: <https://www.detik.com/edu/detikpedia/d-6261491/sifat-sifat-udara-dan-manfaatnya>
- Cahyadi, D. A. (2021, Mei 19). *Manajemen Pengendalian Pencemaran Udara Ruangan*. Retrieved from Kemenkes Labkesmas Pangandaran: <https://labkesmaspangandaran.id/manajemen-pengendalian-pencemaran-udara-ruangan/>
- Grehenson, G. (2023, Agustus 22). *Pakar UGM Imbau Warga Tidak Membiasakan Bakar Sampah*. Retrieved from Liputan/Berita: <https://ugm.ac.id/id/berita/pakar-ugm-himbau-warga-tidak-membiasakan-bakar-sampah/>
- Hasan, K. (2024). *Kualitas Udara Indonesia: Memburuk Pada Tahun 2023 Tanpa Intervensi Efektif dan Terpicu El Nino. Bagaimana Pada Tahun 2024?* Jakarta: Centre for Research on Energy and Clean Air (CREA).
- Hernawati, N. (2022). *Pencemaran Udara dan Implikasinya Pada Anak Jalanan*. Bandung: PT. Indonesia Emas Group.
- Humas BRIN. (2024, Juli 26). *11,3 Juta Ton Sampah di Indonesia Tidak Terkelola dengan Baik*. Retrieved from Kabar : <https://brin.go.id/drid/posts/kabar/113-juta-ton-sampah-di-indonesia-tidak-terkelola-dengan-baik>
- IQAir. (2023). *World Air Quality Report: Region and City PM2.5 Ranking*.
- One-Health. (2024, Agustus 28). *Polusi Jakarta Peringkat 1 di Dunia, Bagaimana Dampaknya pada Kesehatan?* Retrieved from One Health Center Of Excellence Universitas Gadjah Mada: <https://ohce.wg.ugm.ac.id/polusi-jakarta-peringkat-1-di-dunia-bagaimana-dampaknya-pada-kesehatan/>
- PP No. 41. (1999). *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Tentang Pengendalian Pencemaran Udara*. Jakarta: Kepala Biro Peraturan Perundang-undangan I.

- Samosir, C. (2024, Januari 17). *Materi IPA: Mengenal Sifat-Sifat Udara Apa Saja?* Retrieved from Grid Kids: <https://kids.grid.id/read/473994284/materi-ipa-mengenal-sifat-sifat-udara-apa-saja?page=all>
- Saputra, D. P. (2013). *Bahan Ajar Meteorologi*. Yogyakarta: Deepublish.
- Sitorus, E., Herawati, J., Simarmata, M. M., Munthe, S. A., Faried, A. I., Syahrir, M., . . . Amruddin. (2022). *Pengantar Pengetahuan Lingkungan*. Medan: Yayasan Kita Menulis.
- Syahputri, J., Suarga, E. B., Rahman, I., Zahri, T. N., & Ramdani, D. A. (2023). *Dampak Polusi Udara dari Sektor Transportasi terhadap Kesehatan di Indonesia*. Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional/Badan Perencanaan Pembangunan Nasional, Bappenas: Jakarta.
- Wijaya, M. (2020). *Kimia Lingkungan*. Makassar: Badan Penerbit Universitas Negeri Makassar.
- Zettira, T., & Yudhastuti, R. (2022). Perbedaan Polutan Penyebab Polusi Udara Dalam Ruangan Pada Negara Maju dan Berkembang: Literature Review. *Media Gizi Kemas Vol. 11 No. 02*, 625-632.

BIODATA PENULIS



Wa Rina, S.KM., M.KL. Penulis dilahirkan di Ambon pada tanggal 02 Desember 1977. Ketertarikan penulis terhadap ilmu Kesehatan Lingkungan dimulai pada tahun 1996 silam. Hal tersebut membuat penulis memilih untuk masuk ke Multy Stream Academic (MSA) dengan memilih Jurusan Kesehatan Lingkungan dan berhasil lulus pada tahun 1999. Penulis kemudian melanjutkan pendidikan ke Perguruan Tinggi dan berhasil menyelesaikan studi S1 di Universitas Hasanuddin pada Prodi Kesehatan Masyarakat tahun 2009. Kemudian, penulis menyelesaikan studi S2 tahun 2015 di Universitas Airlangga pada Prodi Kesehatan Lingkungan. Saat ini penulis bekerja sebagai dosen tetap di Jurusan Sanitasi Poltekkes Maluku. Selain itu penulis juga aktif dalam menulis jurnal serta aktif menulis book chapter.

BAB 4

Efek Dari Zat Pencemar terhadap Lingkungan

Pratiwi Soni Redha, SKM.,M.K.M

A. Pendahuluan

Salah satu pencemaran yang paling sering disebut sebagai perusak lingkungan adalah pencemaran udara (Pramestiasia, 2023). Pencemar udara tidak hanya menimbulkan kabut yang menghalangi pandangan, tetapi juga mengandung zat kimia berbahaya yang tidak kasat mata yang lebih berbahaya bagi kesehatan, serta menyebabkan penurunan kualitas udara karena masuknya zat berbahaya ke atmosfer atau udara bumi (Nilam, P, 2024).

Sumber pencemar udara berasal dari proses alami dan aktivitas manusia (Dinas Lingkungan Hidup Mamuju, 2023). Dimana kerusakan lingkungan sering dikaitkan dengan manusia itu sendiri (Dinas Lingkungan Hidup Buleleng, 2019).

B. Dampak dari Zat Pencemar terhadap Lingkungan

1. Zat Pencemar terhadap Lingkungan

Zat pencemar terhadap lingkungan berupa bentuk atau wujud kimia di atmosfer atau bisa disebut dengan polutan sekunder. Adapun polutan sekunder yang sering ada udara dan dapat membawa pengaruh akan kesehatan serta lingkungan adalah; partikulat di udara (PM), ozon (O₃), dan Nitrogen dioksida (NO₂), sulfur dioksida (SO₂), ammonia (NH₃), Hidrokarbon, timbal, serta karbonmonoksida (CO) (Dinas Lingkungan Hidup Mamuju, 2023).

a. Partikulat di Udara (PM)

Kebakaran hutan, pembangkit listrik, fasilitas industri, dan pembakaran sisa panen merupakan sumber partikulat terbesar. PM10 memiliki ukuran 10 mikron, PM2,5 memiliki ukuran 2,5 mikron, dan partikulat ultra halus memiliki ukuran 0,1 mikron. Di sisi lain, diameter partikel PM10 hanya 1/7 diameter rambut manusia normal (Nilam, P, 2024).

Bahan partikulat, juga dikenal sebagai aerosol, adalah partikel yang terdiri dari tetesan cair atau padat di udara. Mereka juga dikenal sebagai bahan partikulat atau PM. Ia berasal dari sumber yang dibuat oleh manusia dan alam, seperti ladang, kebakaran, jalan tanah, dan tempat konstruksi. Bahan kimia yang ada di atmosfer dari sumber seperti pembangkit listrik, pabrik, dan kendaraan bermotor menghasilkan banyak partikel tersebut dalam reaksi kompleks (Nafas Indonesia, 2020).

b. Ozon (O₃)

Gas Rumah Kaca yang kuat adalah komponen ozon juga. Ozon di stratosfer bumi, yang berfungsi sebagai pelindung ultraviolet dari matahari, berbeda dengan ozon di lapisan troposfer (Dinas Lingkungan Hidup Mamuju, 2023). Ozon troposferik adalah ozon yang berada antara 8 dan 15 kilometer di atas permukaan tanah (Nilam, P, 2024).

c. Nitrogen dioksida (NO₂)

Sekelompok senyawa kimia yang merusak udara adalah nitrogen oksida (NO_x), yang terdiri dari nitrogen dioksida (NO₂) dan nitrogen monoksida (NO), dan nitrogen dioksida adalah yang paling berbahaya bagi kesehatan manusia karena banyak dihasilkan dari aktivitas manusia (Dinas Lingkungan Hidup Mamuju, 2023). Nitrogen dioksida ini visualnya seperti kabut coklat kemerahan (Nilam, P, 2024).

d. Sulfur dioksida (SO₂)

Sulfur dioksida berasal dari peleburan bijih mineral (seperti besi, timbal, tembaga, aluminium, seng, dan tembaga) yang mengandung belerang dan pembakaran bahan bakar fosil yang mengandung sulfur. Namun, gas ini tidak berwarna dan berbau (Nilam, P, 2024).

e. Ammonia (NH₃)

Amonia biasanya adalah gas dengan bau tajam yang khas dan memiliki rumus NH₃. Dalam banyak kasus, NH₃ digunakan sebagai obat, campuran pupuk urea (CO(NH₂)₂) dan ZA (Zwvelamonia) ((NH₄)₂SO₄), bahan pendingin, asam nitrat (HNO₃), bahan bakar roket, bahan peledak, kertas pelastik, dan detergen. Jika dilarutkan ke dalam air, zat ini juga dapat digunakan sebagai pembersih alat rumah tangga (Eshandriana, 2020).

f. Hidrokarbon (HC)

Selain itu, kebakaran hutan menghasilkan polutan berbahaya hidrokarbon, yang juga dikenal sebagai HC atau hidrokarbon. Hidrokarbon adalah senyawa karbon yang hanya terdiri dari atom hidrogen dan karbon. Minyak tanah, bensin, gas alam, plastik, dan lain-lain banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari. Dalam bentuk cair, hidrokarbon akan membentuk kabut minyak, dan dalam bentuk padatan akan membentuk asap pekat. Setelah dikumpulkan, asap pekat ini akan berubah menjadi debu. Transportasi, pembakaran gas, minyak, arang, kayu, proses industri, pembuangan sampah, dan kebakaran hutan dan ladang adalah sumber hidrokarbon utama yang dihasilkan oleh manusia (Iqbal, 2022).

g. Karbonmonoksida (CO)

Karbonmonoksida adalah gas yang tidak berbau dan tidak berasa yang berasal dari pembakaran tidak sempurna bahan bakar fosil (Nilam, P, 2024). Gas

Karbonmonoksida biasanya dihirup bersamaan dengan gas lainnya karena tidak berbau. Gas Karbonmonoksida dapat berbentuk cair pada suhu di bawah -192°C , dan kota-kota dengan lalu lintas yang padat menghasilkan tingkat gas karbon dioksida (Aini, M, 2024).

h. Timbal (Pb)

Salah satu polutan berbahaya yang biasanya dilepaskan oleh kendaraan bermotor adalah timah hitam atau timbal (Pb). Pb biasanya digunakan dalam industri kimia, baterai, keramik, cat, dan industri lainnya. Selain itu, timah hitam juga dapat berasal dari pembakaran bahan bakar bensin dalam berbagai senyawa Pb, yang ditambahkan dengan tujuan meningkatkan tingkat oktan bahan bakar sehingga lebih hemat biaya. Selama pembakaran bensin, senyawa ini dilepaskan ke udara dalam bentuk partikel melalui gas buang kendaraan bermotor (Iqbal, 2022).

2. Dampak dari Zat Pencemar terhadap Lingkungan

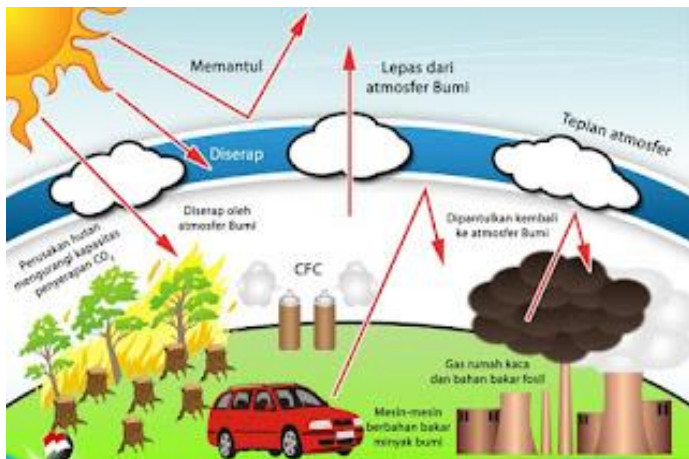
Adapun zat pencemar yang ada dapat menimbulkan berbagai dampak yang dapat dirasakan oleh makhluk hidup dan lingkungan. Dimana dampak-dampak yang ditimbulkan oleh zat pencemar ini dijelaskan dibawah ini.

a. Konsentrasi Karbonmonoksida (CO) yang tinggi

Dengan adanya kadar Karbonmonoksida tinggi maka mengurangi jumlah oksigen yang dapat dibawa ke organ penting seperti jantung dan otak melalui aliran darah CO dapat menyebabkan pusing, kehilangan kesadaran, dan bahkan kematian pada tingkat yang sangat tinggi. Keracunan gas CO menyebabkan pusing, sakit kepala, dan mual. Menurunnya kemampuan gerak tubuh, masalah kardiovaskuler, serangan jantung, atau kematian adalah hasil dari kondisi yang lebih berat. Untuk membantu penderita kategori ringan, berikan mereka

kesempatan untuk menghirup udara segar (Iqbal, 2022).

Terjadinya pemanasan global, Suhu dunia meningkat karena emisi gas rumah kaca seperti karbon dioksida (CO_2) yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar fosil dan deforestasi. Perubahan iklim dan fenomena cuaca ekstrem adalah akibatnya (Laila, F, 2024). Kemudian dapat meningkatkan aktivitas badai dan perubahan akan ekosistem (Aini, M, 2024). Adapun mekanisme terjadinya efek rumah kaca seperti dibawah ini;



Gambar 1. Terjadinya efek rumah kaca (SMA Negeri 1 Sumpiuh, 2020)

b. Konsentrasi Partikulat di Udara (PM) yang tinggi

Konsentrasi Partikulat di Udara (PM) yang tinggi dimana partikulat yang sangat halus dapat masuk ke saluran peredaran darah dan meningkatkan berbagai risiko kesehatan, terutama penyakit kardiovaskular, dengan membawa alergen ke paru-paru dan menyebabkan respons berlebihan saluran napas (Nilam, P, 2024).

c. Konsentrasi Ozon (O_3) yang tinggi

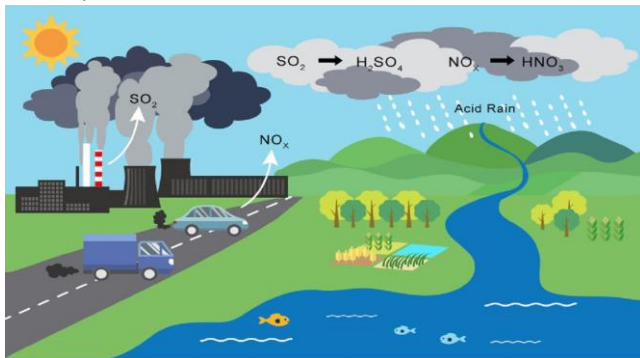
Ozon, oksidan yang kuat, merusak sel dan cairan pelapis saluran napas, menyebabkan saluran napas

menyempit, memerangkap udara di alveoli. Salah satu efek buruk yang dirasakan adalah kesulitan bernapas hingga penurunan kemampuan paru-paru untuk berfungsi. Diperkirakan peningkatan suhu akan meningkatkan konsentrasi ozon di Eropa, Asia, dan Amerika Utara, terutama di daerah yang terpapar polusi. (Nilam, P, 2024).

d. Konsentrasi **Sulfur dioksida (SO₂) yang tinggi**

Paparan SO₂ jangka pendek ke tingkat tinggi dapat membahayakan fungsi pernapasan, terutama bagi orang yang menderita asma. Sementara itu, paparan SO₂ hasil pembakaran jangka panjang dapat mengganggu fungsi paru-paru, penyakit pernapasan, dan, dalam tingkat tertentu, menyebabkan iritasi tenggorokan.

Kemudian dampaknya bagi lingkungan, sulfur dioksida adalah polutan yang mendorong deposisi asam, yang dapat mencemari air dan air tanah. Endapan asam dapat menyebabkan kerusakan pada ekosistem air seperti sungai dan danau, serta kerusakan pada hutan, tanaman, dan tumbuhan lainnya (Iqbal, 2022). Adapun mekanisme terjadinya hujan asam adalah;



Gambar 2. Proses terjadinya hujan asam (Cakrawala, 2024)

e. Ammonia (NH₃)

Salah satu sumber ammonia didapatkan dari penggunaan Insektisida, pestisida dan pupuk kimia dalam jumlah yang besar dan berkelanjutan sehingga hal ini dapat membawa dampak pencemaran bagi udara, air dan tanah (Dinas Lingkungan Hidup Kota Semarang, 2020). Ammonia dapat juga membawa dampak bagi kesehatan seperti ada mata berair dan gatal, hidung berair, gatal dan sesak, iritasi tenggorokan, kerongkongan, dan rasa panas, kering, dan batuk-batuk di jalan pernapasan (Iqbal, 2022).

f. Hidrokarbon (HC)

Dalam konsentrasi tertentu, hidrokarbon benar-benar berbahaya bagi makhluk hidup. Mereka dapat menyebabkan rasa sakit, kelelahan, pusing, dan berkunang-kunang serta dapat membuat penambahan akibat pencemaran udara (Iqbal, 2022)

g. Konsentrasi Timbal (Pb) yang tinggi

Namun, timah (Pb) mudah terakumulasi dalam organ manusia dan dapat menyebabkan anemia, gangguan fungsi ginjal, masalah sistem saraf, otak, dan kulit. Akibatnya, perlu dilakukan upaya untuk mengurangi keterpaparan udara yang mengandung konsentrasi tinggi timah (Iqbal, 2022).

h. Konsentrasi Nitrogen dioksida (NO₂) yang tinggi

Konsentrasi Nitrogen dioksida (NO₂) yang tinggi dapat mengganggu saluran pernapasan pada sistem pernapasan manusia. Paparan jangka pendek seperti ini dapat memperparah penyakit pernapasan, terutama asma, yang ditandai dengan gejala batuk dan kesulitan bernapas (Iqbal, 2022). Nitrogen dioksida juga dapat mengakibatkan sistem imun menurun dan rentan infeksi (Nilam, P, 2024).

Adapun pengaruh yang ditimbulkan oleh timbal, Nitrogen dioksida, hidrokarbon, ammonia, sulfur dioksida, Partikulat di Udara, ozon dalam jumlah yang melebihi nilai

ambang batas adalah meningkatkan jumlah pencemaran di udara sehingga dapat mengganggu keseimbangan lingkungan.

3. Hal-hal yang dapat dilakukan untuk memperbaiki dampak yang ditimbulkan oleh zat-zat pencemar

- a. Pengurangan dan memperkuat aturan serta pengawasan akan emisi industri
- b. Menyediakan transportasi ramah lingkungan.
- c. Melakukan penghijauan.
- d. Melakukan daur ulang sampah serta mengurangi penggunaan kemasan yang tidak ramah lingkungan.
- e. Memberlakukan peraturan hukum bagi yang melanggar oleh pihak yang berwenang seperti pemerintah.

Pemerintah harus membuat undang-undang dan peraturan yang mengontrol pencemaran udara dan menindak orang yang melanggarnya.

- f. Penerapan akan teknologi yang bersih
Sangat penting untuk mengembangkan dan menerapkan teknologi bersih yang menghasilkan emisi lebih sedikit atau nol. Teknologi seperti energi terbarukan, pengolahan limbah yang efektif, dan teknologi transportasi ramah lingkungan adalah contoh teknologi ini.
- g. Peningkatan kesadaran pribadi akan pencemaran lingkungan.
Meningkatkan kesadaran masyarakat tentang efek buruk pencemaran udara dan cara menguranginya dapat memotivasi orang untuk bertindak.
- h. Melakukan monitoring kualitas udara oleh pihak yang berwenang.
- i. Adanya kerjasama antar lintas sektor untuk mengatasi pencemaran lingkungan (Pramestiasia, 2023)

DAFTAR PUSTAKA

- Aini, M, R. (2024). *Karbon Monoksida : Penyebab hingga Dampak bagi Kesehatan dan Lingkungan*. Lindungi Hutan. <https://lindungihutan.com/blog/mengenal-karbon-monoksida/>
- Cakrawala. (2024). *Proses Terjadinya Hujan Asam dan Cara Mengatasinya* - Gesainstech. Gesainstech. <https://www.gesainstech.com/2024/02/hujan-asam-adalah.html>
- Dinas Lingkungan Hidup Buleleng. (2019). *Sumber Penyebab dan Pencemaran Udara*. Dinas Lingkungan Hidup Buleleng. [https://dlh.bulelengkab.go.id/informasi/detail/artikel/sumber-penyebab-dan-pencemaran-udara-48#:~:text=Unsur-unsur berbahaya yang masuk,dan Carbon Diaoksida \(CO2\).](https://dlh.bulelengkab.go.id/informasi/detail/artikel/sumber-penyebab-dan-pencemaran-udara-48#:~:text=Unsur-unsur%20berbahaya%20yang%20masuk,dan%20Carbon%20Dioksida%20(CO2).)
- Dinas Lingkungan Hidup Kota Semarang. (2020). *Penyebab Terjadinya Pencemaran Udara*. Dinas Lingkungan Hidup Kota Semarang. <https://dlh.semarangkota.go.id/>
- Dinas Lingkungan Hidup Mamuju. (2023). *Apa itu Polusi Udara dan Darimana Sumber Polusi Udara*. <https://dlhk.mamujukab.go.id/berita-5227-apa-itu-polusi-udara-dan-darimana-sumber-polusi-udara.html>
- Eshandriana. (2020). *Bahaya Amonia (NH3) Bagi Tubuh*. <https://lab.id/bahaya-amonia-bagi-tubuh/>
- Iqbal, M. (2022). *8 Jenis Polutan Berbahaya bagi Kesehatan Manusia, Debu juga Termasuk Loh!* Lindungi Hutan. [https://lindungihutan.com/blog/jenis-polutan-berbahaya/#:~:text=7. Hidrokarbon \(HC\)&text=Polutan berbahaya selanjutnya adalah HC,plastik%2C dan lain-lain.](https://lindungihutan.com/blog/jenis-polutan-berbahaya/#:~:text=7.%20Hidrokarbon%20(HC)&text=Polutan%20berbahaya%20selanjutnya%20adalah%20HC,plastik%20dan%20lain-lain.)
- Laila,F, Z. (2024). *Mengenal Pencemaran Udara_ Pengertian, Jenis, Penyebab, Dampak, dan Contohnya*. Indonesia Environment & Energy Center. <https://environment-indonesia.com/mengenal-pencemaran-udara-pengertian-jenis-penyebab-dampak-dan-contohnya/>
- Nafas Indonesia. (2020). *Apa itu PM2.5 dan mengapa itu penting?*

- Nafas Indonesia. [https://nafas.co.id/article/Apa-itu-PM2-5-dan-mengapa-itu-penting#:~:text=Partikulat \(PM\) berasal dari sumber,mudah terhirup%2C dan sulit disaring.](https://nafas.co.id/article/Apa-itu-PM2-5-dan-mengapa-itu-penting#:~:text=Partikulat (PM) berasal dari sumber,mudah terhirup%2C dan sulit disaring.)
- Nilam, P, S. (2024). *Zat-zat Pencemar di Udara yang Berbahaya Bagi Kesehatan – LPPM Universitas Andalas*. LPPM Universitas Andalas. <https://lppm.unand.ac.id/zat-zat-pencemar-di-udara-yang-berbahaya-bagi-kesehatan/>
- Pramestiasia, B. (2023). *Pencemaran Udara :Pengertian, Penyebab, Jenis, dan Dampak bagi Kesehatan*. Advanced Analytical Asia. <https://lab.id/pencemaran-udara/>
- SMA Negeri 1 Sumpiuh. (2020). *Efek Rumah Kaca (Green House Effect)*. Geomedia. <https://geomedia.blogspot.com/2015/08/efek-rumah-kaca-green-house-effect.html>

BIODATA PENULIS



Pratiwi Soni Redha, SKM., M.K.M lahir di Pasaman, pada 10 Juli 1988. Menyelesaikan pendidikan S1 di Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Andalas dan S2 di Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Indonesia. Sampai saat ini penulis sebagai Dosen di Program Studi DIII Administrasi Rumah Sakit Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat.

BAB 5

Pengaruh Meteorologi Terhadap Penyebaran Polutan

Jessy Novita Sari, S.Pd., M.Si

A. Pendahuluan

Udara yang sehat merupakan kebutuhan yang sangat penting bagi makhluk hidup. Kondisi lingkungan akan mempengaruhi kondisi kualitas udara. Kualitas udara merupakan salah satu indikator penting dalam menjaga kesehatan lingkungan dan manusia. Peningkatan aktivitas industri, transportasi, serta pembakaran bahan bakar fosil telah menghasilkan emisi polutan yang mencemari atmosfer.

Penyebaran dan konsentrasi polutan di udara dipengaruhi oleh berbagai faktor, salah satunya adalah kondisi meteorologi. Faktor-faktor meteorologi seperti kecepatan dan arah angin, suhu udara, kelembapan, tekanan atmosfer, serta curah hujan memiliki peran penting dalam menentukan distribusi polutan di suatu wilayah.

Kondisi meteorologis yang terjadi di alam dapat berperan sebagai penghambat bahkan menjadi pemicu terbentuknya polutan yang menyebabkan terjadi pencemaran udara (J. He et al, 2017). Pencemaran udara yang dapat terjadi pada lokasi yang sebelumnya memiliki kualitas udara yang baik tetapi dengan peranan meteorologis sumber polutan akan masuk ke media lingkungan seperti udara.

B. Pengertian

Meteorologi adalah Meteorologi berasal dari bahasa Yunani “meteorologia” yang berarti mempelajari benda-benda angkasa. Meteorologi adalah ilmu yang mempelajari fenomena di atmosfer, seperti pergerakan angin, awan, dan uap air yang sangat berpengaruh terhadap pola cuaca (Kadek and Nadya, 2022).

Didalam Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 31 Tahun 2009 tentang Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika dijelaskan bahwa yang dimaksud dengan meteorologi adalah gejala alam yang berkaitan dengan cuaca. Dalam kamus besar bahasa Indonesia (KKBI) meteorologi didefinisikan sebagai cabang ilmu geografi yang mempelajari tentang ciri-ciri fisik dan kimia atmosfer untuk meramalkan keadaan cuaca di suatu tempat secara khusus dan diseluruh dunia secara umum. Pengertian meteorologi yang lain adalah bahwa meteorologi adalah ilmu yang mempelajari proses fisis dan gejala cuaca yang terjadi didalam atmosfer terutama pada lapisan bawah yaitu troposfer.

Meteorologi umumnya menggunakan 4 skala yaitu (Jonker and Krantz, 2024):

1. Meteorologi Skala Mikro

Fenomena skala mikro berkisar dalam ukuran dari beberapa sentimeter hingga beberapa kilometer. Fenomena ini memiliki skala waktu yang pendek, biasanya kurang dari satu hari. Fenomena ini memengaruhi wilayah geografis yang kecil dan memengaruhi suhu dan medan wilayah tersebut. Contoh meteorologi skala mikro meliputi perpindahan panas antara tanah dan vegetasi, pergerakan polutan udara, dan kualitas udara.

2. Meteorologi Skala Meso

Fenomena skala meso berkisar dari beberapa kilometer hingga hampir 1.000 kilometer dan dapat berlangsung kurang dari satu hari hingga beberapa minggu. Fenomena ini terdiri dari dua: mesoscale convective complexes (MCC) dan mesoscale convective systems (MCS). Uap air

berubah menjadi curah hujan dan bermanifestasi sebagai sistem awan tunggal yang menghasilkan curah hujan lebat, diklasifikasikan sebagai MCC, atau sekelompok badai petir yang lebih kecil, diklasifikasikan sebagai MCS.

3. Meteorologi Skala Sinoptik

Fenomena berskala sinoptik mencakup area seluas beberapa ratus hingga ribuan kilometer dan dapat bertahan hingga 28 hari. Fenomena seperti ini terdiri dari sistem tekanan tinggi dan rendah. Dalam sistem tekanan rendah, angin dan uap air tersedot ke dalam sistem tekanan tinggi, yang mempercepat konveksi dan menghasilkan kondisi cuaca yang lebih parah. Sistem tekanan tinggi memiliki gerakan vertikal ke bawah dan biasanya menghasilkan cuaca yang lebih kering dan tidak terlalu buruk.

4. Meteorologi Skala Global

Fenomena skala global mengacu pada aliran angin, panas, dan kelembaban dari daerah tropis ke kutub. Sirkulasi atmosfer global (GAC) adalah pola skala besar yang mendistribusikan panas di seluruh permukaan bumi. Setiap belahan bumi memiliki tiga jenis arus konveksi, atau sel: sel Hadley, sel Ferrell, dan sel polar. Para ahli meteorologi sering kali berfokus pada sel Hadley karena sel ini memiliki dampak terbesar pada GAC dan dapat menentukan aliran angin pasat yang digunakan oleh kapal-kapal.

Polutan adalah benda atau zat yang membuat pencemaran lingkungan. Sedangkan pencemaran adalah masuknya ke dalam lingkungan atau wilayah tertentu dan menyebabkan menurunnya kualitas lingkungan di wilayah tersebut. Suatu zat dikatakan sebagai polutan ketika zat tersebut menyebabkan kerugian terhadap makhluk hidup di sekitarnya. Kriteria zat disebut polutan ketika keberadaannya melebihi batas normal yang telah ditetapkan (Eshandriana, 2023). Polutan yang dapat merusak lingkungan memiliki 2 sifat yaitu polutan bersifat merusak sementara, bahkan konsentrasi rendah, polutan tersebut jika berada dalam lingkungan tidak akan merusak. Sifat kedua Polutan bisa merusak dalam jangka

waktu lama. Sifat polutan ini jika dalam jumlah sedikit tidak dapat merusak tetapi jika mengalami akumulasi sedikit demi sedikit dalam waktu yang lama dan sampai batas kadar tertentu dapat merusak lingkungan,

C. Pengaruh Meteorologi Terhadap Penyebaran Polutan

Meteorologi merupakan kondisi lingkungan yang berkaitan dengan cuaca. Cuaca merupakan keadaan udara pada saat tertentu dan diwilayah tertentu yang relatif sempit pada jangka waktu yang singkat. Cuaca pada saat pagi hari, siang, sore atau malam hari keadaannya bisa berbeda-beda untuk setiap tempat serta setiap jamnya. Cuaca terbentuk dari gabungan unsur cuaca yaitu suhu udara, kelembaban udara, tekanan udara, angin dan curah hujan.

Aspek-aspek meteorologi ini memiliki pengaruh yang signifikan terhadap penyebaran polutan di atmosfer. Faktor-faktor meteorologi seperti angin, suhu, kelembapan, tekanan udara, angin serta fenomena cuaca lainnya menentukan bagaimana polutan berpindah, terdispersi, atau terkonsentrasi di suatu wilayah.

Berbagai faktor meteorologi memiliki peran yang penting dalam penikatan peningkatan jumlah partikulat. Adanya perubahan yang terjadi terhadap parameter meteorologi dapat mengakibatkan pengaruh yang besar terhadap penyebaran polutan dan difusi pencemaran udara baik yang bersumber dari wilayah itu sendiri maupun yang terbawa dari wilayah lain disekitarnya (Minerva, 2012).

Faktor-faktor meteorologi yang memengaruhi penyebaran polutan diantaranya adalah :

1. Kecepatan angin

Angin berperan sebagai "pengangkut" utama polutan di atmosfer. Semakin cepat dan kuat angin bertiup, semakin cepat polutan tersebar ke area yang lebih luas. Sebaliknya, saat angin lemah atau stagnan, polutan cenderung terkonsentrasi di satu tempat, meningkatkan polusi udara.

Menurut Neigburger dan Morris dalam Nuryanto, dkk (2021) adanya pengaruh kecepatan angin terhadap

penyebaran dan kandungan polutan di suatu daerah. Angin yang kencang akan menyebabkan polutan yang ada di lingkungan dan aktivitas manusia akan terbawa angin. Saat angin kecepatan rendah maka polutan akan terakumulasi di sekitar daerah tersebut.

2. Arah angin

Arah angin menentukan ke mana polutan akan bergerak. Misalnya, jika sebuah kawasan industri terletak di sebelah barat suatu kota dan angin bertiup dari barat ke timur, maka polutan akan bergerak menuju wilayah pemukiman di timur. Penyebaran dan pergerakannya sangat mudah dipengaruhi oleh angin. Angin merupakan parameter meteorologi utama yang memiliki dampak besar terhadap transportasi horizontal dan distribusi polutan udara serta vertikal pencampuran dan penyebaran di suatu wilayah (Seaman and Michelson, 2000). . Jika arah angin relatif tetap dan secara terus menerus menuju pada area yang sama, konsentrasi polutan di daerah tersebut akan tinggi. Jika arah angin berubah secara konstan, polutan akan didispersikan ke daerah yang lebih besar, dan konsentrasi di sekitar daerah tujuan akan menjadi lebih rendah

3. Suhu Udara dan Gradien Suhu (Inversi Suhu)

Suhu memengaruhi kerapatan udara dan ketinggian lapisan atmosfer tempat polutan terkonsentrasi. Udara yang lebih panas cenderung bersifat "labil," memungkinkan polutan naik dan menyebar ke ketinggian lebih tinggi, mengurangi konsentrasi di permukaan tanah.

Biasanya, suhu udara menurun seiring dengan bertambahnya ketinggian. Namun, pada kondisi inversi suhu, lapisan udara dingin di dekat permukaan tanah "terperangkap" oleh lapisan udara hangat di atasnya. Polutan tidak bisa naik karena lapisan udara hangat ini bertindak seperti "penutup," menyebabkan polutan terkonsentrasi di dekat permukaan tanah. Inversi suhu sering terjadi di pagi hari atau saat cuaca cerah di musim

dingin dan meningkatkan tingkat pencemaran udara, seperti yang sering terjadi di kota-kota berlembah.

Pada siang hari suhu udara pada lapisan yang dekat permukaan bumi akan lebih tinggi dibandingkan lapisan udara yang lebih tinggi. Sebaliknya pada malam hari terutama saat menjelang pagi suhu udara dekat permukaan akan menjadi lebih rendah dibandingkan dengan suhu udara pada lapisan udara yang lebih tinggi. Pada siang hari dengan kondisi cuaca cerah suhu udara akan tinggi akibat sinar matahari yang diterima sehingga akan mengakibatkan pemanasan udara. Pemanasan udara mengakibatkan pengenceran konsentrasi gas pencemar. Perubahan temperatur

4. Tekanan Udara

Tekanan udara yang rendah umumnya berkaitan dengan kondisi udara labil (udara naik), yang memicu pembentukan awan dan hujan. Kondisi ini bisa membantu "membersihkan" udara dengan membawa polutan turun bersama hujan (proses deposisi basah).

Tekanan udara tinggi biasanya dikaitkan dengan cuaca cerah dan stabil. Polutan lebih mudah terakumulasi di permukaan tanah karena tidak ada "mekanisme pembersihan" alami, seperti hujan atau angin. Tekanan udara dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya adalah suhu. Saat suhu udara dalam kondisi tinggi, volume dan molekul udaranya ikut mengembang. Akibatnya tekanan udara menjadi rendah. Begitupun sebaliknya, ketika suhu udara rendah, tekanan udaranya meningkat.

Faktor lain yang mempengaruhi tekanan udara adalah faktor ketinggian. Tempat di ketinggian tertentu, seperti gunung atau pegunungan, lapisan udara di sekitar puncaknya memiliki persediaan yang sangat sedikit, tipis serta renggang. Akibatnya tekanan udara di tempat tersebut menjadi sangat rendah. Hal ini berbeda saat berada di dataran rendah, seperti di pesisir. Tekanan udara di daerah ini cukup tinggi, sehingga merasa lebih nyaman

untuk bernapas saat berada di dataran rendah dibanding di dataran tinggi.

5. Kelembaban Udara

Kelembaban udara dapat memengaruhi konsentrasi pencemar, pada saat kondisi kelembapan tinggi maka kadar uap air di udara dapat bereaksi dengan pencemar udara, sehingga akan menjadi zat lain yang berbahaya atau menjadi pencemar sekunder (Pramono, 2002).

Kelembapan tinggi menyebabkan partikel polutan, seperti debu dan asap, menyerap uap air. Ini bisa meningkatkan ukuran partikel (hygroscopic growth) sehingga memperburuk efek kesehatan dan mengurangi jarak pandang.

Di lingkungan dengan kelembapan tinggi dan polutan partikulat yang tinggi, kabut bisa terbentuk lebih pekat (smog basah). Smog ini sangat berbahaya bagi pernapasan manusia.

6. Curah Hujan

Curah hujan adalah elemen cuaca yang diukur menggunakan alat penakar hujan untuk menentukan jumlahnya dalam satuan millimeter (mm). Curah hujan 1 mm menunjukkan jumlah air hujan yang jatuh dipermukaan persatuan luas (m) dengan catatan tidak ada yang menguap, meresap atau mengalir. Dengan kata lain, curah hujan 1 mm setara dengan 1 liter/m² (Sujalu et al., 2020). BMKG membagi level curah hujan menjadi beberapa kategori yaitu:

- Rendah : 0 – 100 mm
- Menengah : 100 – 300 mm
- Tinggi : 400 – 500 mm
- Sangat Tinggi : > 500 mm

Hujan memiliki peran penting dalam membersihkan polutan dari atmosfer melalui: Deposisi Basah: Polutan di atmosfer "dibersihkan" dengan air hujan dan dibawa turun ke permukaan tanah. Efek Pencucian: Hujan mencuci

polutan yang menempel di permukaan tanah dan bangunan.

Hujan dapat menimbulkan dampak negative terhadap masuknya bahan polutan ke lingkungan yaitu beberapa polutan dapat larut dalam air hujan, menyebabkan hujan asam yang merusak lingkungan.

Hujan asam terjadi saat sulfur dioksida (SO_2) dan nitrogen oksida (NO_x) naik ke atmosfer dibantu oleh angin. SO_2 dan NO_x bereaksi dengan air (H_2O), oksigen (O_2) dan senyawa kimia lain hingga membentuk asam sulfat dan nitrat. Sebelum jatuh ke tanah, senyawa tersebut bercampur dengan material lain.

Sebagian kecil SO_2 dan NO_x yang menyebabkan hujan asam berasal dari sumber alam seperti gunung api, namun penyumbang terbesar berasal dari pembakaran bahan bakar fosil. Sekitar dua pertiga SO_2 dan seperempat NO_x berasal dari pembangkit listrik, kendaraan, pabrik, kilang minyak dan industri lainnya,

7. Radiasi Matahari dan Fotokimia

Radiasi matahari berperan dalam reaksi fotokimia yang menghasilkan polutan sekunder, seperti ozon troposfer dan kabut asap fotokimia.

Contohnya: Dalam kondisi cuaca cerah dan panas, polutan primer seperti nitrogen oksida (NO_x) dan senyawa organik volatil (VOC) bereaksi dengan sinar matahari, membentuk ozon dan partikel halus.

8. Stabilitas Atmosfer

Stabilitas atmosfer mengacu pada kecenderungan udara untuk naik atau turun. Atmosfer yang Labil merupakan udara cenderung naik, membantu menyebarkan polutan ke atmosfer yang lebih tinggi.

Atmosfer yang Stabil cenderung menyebabkan udara tetap diam di satu tempat, sehingga polutan terperangkap dekat permukaan tanah.

Stabilitas atmosfer memiliki pengaruh juga terhadap kondisi curah hujan yang terjadi pada suatu wilayah.

Terjadinya pertumbuhan awan dan terjadinya hujan disebabkan kondisi atmosfer yang tidak stabil. Langit yang cerah atau sedikit berawan disebabkan karena kondisi atmosfer yang stabil (Arafat dkk, 2024).

DAFTAR PUSTAKA

- Arafat K. N., Harisuseno D., Fidari J. S. 2024. Kajian Stabilitas Atmosfer Menggunakan Terhadap Kejadian Hujan yang Mempengaruhi Bencana Banjir Bandangidqi. *urnal Teknologi dan Rekayasa Sumber Daya Air* Vol. 04 No. 02 (2024) 1578-1591 Departemen Teknik Pengairan, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya.
- Budi, Pramono. 2002. Analisis Kualitas Udara Ambien dan Faktor Meteorologi terhadap Kejadian Penyakit ISPA di Puskesmas Kecamatan Kembangan Jakarta Barat September 2001 – Mei 2002. Tesis FKM UI.
- Eshandriana. 2023. Definisi Polutan Udara : Parameter & Fakta Penting. <https://lab.id/polutan-udara/>
- J. He *et al.*, "Air pollution characteristics and their relation to meteorological conditions during 2014–2015 in major Chinese cities," *Environ. Pollut.*, 2017, doi: 10.1016/j.envpol.2017.01.050.
- Jonker A., Krantz T. 2024. Apa itu meteorologi? . IBM. <https://www.ibm.com/id-id/think/topics/meteorology>
- Kadek K dan Nadya S (2022). Sekilas Tentang Meteorologi. BMKG Kalimantan Tengah. [https://kalteng.bmkg.go.id/tampil/? judul=Sekilas-Tentang-Meteorologi](https://kalteng.bmkg.go.id/tampil/?judul=Sekilas-Tentang-Meteorologi)
- Minerva N., P., A., T. 2012. Hubungan Konsentrasi SO₂ dan Suspended Particulate Matter (SPM) dengan Jumlah Kejadian ISPA Penduduk Kecamatan Pademangan Tahun 2006 – 2010. Skripsi FKM UI.
- Nuryanto. Gulto H. M., Melinda S. 2021. Pengaruh Angin Permukaan dan Kelembapan Udara Terhadap Suspended Particulate Matter (SPM) di Sorong Periode Januari – Juli 2019. *Buletin GAW Bariri (BGB) Volume 2 | Nomor 2 | Desember 2021 : 71 – 78*
- Seaman, N.L., Michelson, S.A. 2000. Mesoscale meteorological structure of a high – ozone episode during the 1995 NARSTON ortheast study. *Journal of Applied Meteorology* 39, in press

Sujalu, A. P., Pulihasih, A. Y., & Biantary, M. P. (2020). Instrumentasi Klimatologi Dan Meteorologi. In Zahir Publishing (Cetakan I). Zahir Publishing. <https://books.google.co.id/books?id=7dd8EAAQBAJ&lpq=PP1&pg=PP1#v=onepage&q&f=false>

BIODATA PENULIS



Jessy Novita Sari, SPd, MSI lahir di Jambi, pada 15 November 1973. Menyelesaikan pendidikan S1 di Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Jurusan PMIPA Biologi Universitas Jambi dan S2 di Fakultas Pasca Sarja Prodi Ilmi Lingkungan Universitas Jambi. Sampai saat ini penulis sebagai Dosen di Jurusan Kesehatan Lingkungan Poltekkes Kemenkes Jambi.

BAB 6

Cara pengambilan sampel kualitas udara

Rusdin Wally, SKM,M.Kes

A. Pendahuluan

Pengambilan sampel kualitas udara merupakan proses penting untuk mengetahui kondisi dan kandungan polutan dalam udara di suatu wilayah. Proses ini diperlukan guna memantau kualitas udara yang berpotensi memengaruhi kesehatan manusia, lingkungan, serta mendukung upaya pengendalian pencemaran udara.

Tujuan utama dari pengambilan sampel ini adalah untuk mengidentifikasi jenis, jumlah, dan distribusi polutan yang ada di atmosfer, seperti karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO₂), sulfur dioksida (SO₂), partikel partikulat (PM₁₀, PM_{2.5}), ozon (O₃), serta senyawa organik volatil (VOC). Pengambilan sampel dilakukan menggunakan metode dan instrumen yang sesuai, dengan mempertimbangkan lokasi, frekuensi pengukuran, dan jenis polutan yang diukur.

Metode pengambilan sampel biasanya dibagi menjadi dua jenis utama:

1. Metode Aktif, di mana udara disedot melalui alat pemantau atau filter menggunakan pompa atau perangkat elektronik lain, seperti alat pemantauan gas portabel atau stasiun pemantau tetap.
2. Metode Pasif, yang menggunakan alat tanpa energi tambahan, seperti tabung difusi yang menangkap polutan selama periode waktu tertentu.

Langkah-langkah umum dalam pengambilan sampel kualitas udara meliputi persiapan alat, kalibrasi instrumen, penempatan alat di titik pengukuran, pengambilan sampel pada waktu yang telah ditentukan, serta analisis laboratorium terhadap sampel yang dikumpulkan. Hasil dari pengambilan sampel ini kemudian dibandingkan dengan ambang batas standar kualitas udara yang ditetapkan oleh badan lingkungan setempat atau internasional untuk menentukan apakah kualitas udara aman atau tidak.

B. Konsep Cara pengambilan sampel kualitas udara

Konsep pengambilan sampel kualitas udara adalah suatu pendekatan sistematis yang digunakan untuk mendapatkan data akurat tentang komposisi udara di suatu lokasi. Proses ini bertujuan untuk mengukur tingkat kontaminan udara atau polutan yang mungkin berdampak pada kesehatan manusia dan lingkungan. Konsep dasar ini melibatkan pemahaman tentang polutan utama, teknik pengambilan sampel, serta faktor-faktor yang mempengaruhi hasil pengukuran, seperti lokasi, waktu, dan kondisi cuaca.

Berikut adalah komponen utama dalam konsep pengambilan sampel kualitas udara:

1. Identifikasi Polutan Udara Setiap wilayah mungkin memiliki polutan udara berbeda tergantung pada sumber pencemaran, seperti kendaraan bermotor, industri, atau aktivitas domestik. Polutan udara yang umum diukur meliputi:
 - a. Karbon Monoksida (CO)
 - b. Nitrogen Dioksida (NO₂)
 - c. Sulfur Dioksida (SO₂)
 - d. Ozon (O₃)
 - e. Partikel Partikulat (PM₁₀, PM_{2.5})
 - f. Senyawa Organik Volatil (VOC)
2. Pemilihan Lokasi dan Waktu Pengambilan Sampel Pemilihan lokasi dan waktu sangat penting karena konsentrasi polutan dapat bervariasi tergantung lokasi (dekat sumber polusi atau tidak) dan waktu (pagi, siang,

malam). Lokasi harus representatif dan mencerminkan variasi kualitas udara, sedangkan waktu pengambilan dapat dilakukan secara berkala (harian, mingguan) atau terus-menerus.

3. Metode Pengambilan Sampel

Metode pengambilan sampel dapat dibagi menjadi dua jenis:

- a. Metode Aktif: Menggunakan alat seperti pompa udara yang menyedot udara melalui filter atau alat sensor, menghasilkan data real-time atau berkelanjutan.
- b. Metode Pasif: Menggunakan alat yang secara alami menyerap polutan tanpa bantuan pompa atau daya listrik, misalnya, tabung difusi.

4. Instrumentasi dan Teknik Analisis

Terdapat berbagai instrumen yang digunakan, mulai dari alat pemantauan portabel, stasiun pemantau tetap, hingga laboratorium analisis. Teknik analisis melibatkan kalibrasi dan validasi alat untuk memastikan keakuratan hasil, serta analisis laboratorium untuk jenis polutan tertentu yang memerlukan pengukuran lebih detail.

5. Pengolahan dan Analisis Data

Data yang diperoleh dari pengambilan sampel kemudian diolah dan dianalisis untuk menentukan konsentrasi setiap polutan. Hasil ini dibandingkan dengan standar kualitas udara yang telah ditetapkan, misalnya oleh WHO atau lembaga lingkungan nasional, untuk mengetahui apakah kualitas udara berada dalam batas aman atau berbahaya.

6. Penggunaan Data

Data yang diperoleh dari pengambilan sampel kualitas udara digunakan untuk berbagai tujuan, termasuk:

- a. Pemantauan dan Pengawasan Kualitas Udara
- b. Penyusunan Kebijakan Pengendalian Pencemaran Udara
- c. Edukasi dan Peningkatan Kesadaran Masyarakat

d. Tindakan Mitigasi dalam Kasus Darurat Kualitas Udara

Tabel 1. Cara pengambilan sampel kualitas udara

Metode	Deskripsi	Contoh Alat	Kelebihan	Kekurangan
Metode Aktif	Udara disedot menggunakan pompa atau alat bertenaga listrik, kemudian dikumpulkan dalam filter atau media lainnya.	Pompa udara, High Volume Sampler	- Hasil cepat dan akurat. - Data berkelanjutan, real-time.	- Membutuhkan daya listrik. - Mahal dan membutuhkan perawatan rutin.
Metode Pasif	Udara diserap secara alami oleh alat tanpa bantuan pompa atau daya, mengumpulkan polutan dalam waktu tertentu.	Tabung difusi, Passive Sampler	- Tidak membutuhkan daya listrik. - Praktis dan mudah digunakan.	- Data tidak real-time. - Pengukuran membutuhkan waktu lebih lama.
Sampling Grab	Sampel udara diambil dalam waktu singkat untuk mewakili kondisi pada saat itu saja.	Botol gas, kantong Tedlar	- Cepat, mudah dilakukan. - Cocok untuk pengukuran sesaat atau insidental.	- Tidak representatif untuk jangka waktu panjang. - Sulit untuk polutan dengan konsentrasi rendah.
Sampling Berkelanjutan	Sampel udara diambil terus-menerus selama periode tertentu untuk memantau perubahan kualitas udara.	Stasiun pemantau tetap, sensor otomatis	- Mendapat data yang lebih lengkap dan representatif. - Dapat mengamati pola harian atau musiman.	- Biaya instalasi dan pemeliharaan tinggi. - Membutuhkan daya listrik yang stabil.
Sampling dengan Filter	Udara dihisap melalui filter yang menangkap partikel, yang kemudian	Filter udara, Filter PM2.5	- Efektif untuk mengukur partikel seperti PM10 dan PM2.5.	- Membutuhkan analisis laboratorium lanjutan.

Metode	Deskripsi	Contoh Alat	Kelebihan	Kekurangan
	dianalisis di laboratorium.		- Akurat dalam identifikasi partikulat.	- Hanya bisa digunakan sekali (sekali pakai).
Sampling dengan Absorber	Udara diserap ke dalam larutan kimia yang bereaksi dengan polutan tertentu untuk diukur kadarnya.	Impinger, absorben gas	- Spesifik untuk polutan tertentu seperti SO ₂ dan NO ₂ . - Akurat dalam konsentrasi rendah.	- Kompleks dan membutuhkan keterampilan laboratorium. - Tidak dapat digunakan untuk semua polutan.



Gambar 1. Pemantauan Kualitas Udara Ambien dengan Metode Grab Sampler



Gambar 2. Pemantauan Mutu Udara Ambien dengan Metode Grab Sampler



Gambar 3. Pemantauan Kualitas Udara Ambien dengan Passive Sampler

DAFTAR PUSTAKA

- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan RI. (2016)
Pedoman Pengambilan dan Pengujian Kualitas Udara. Jakarta:
KLHK.
- World Health Organization (WHO). (2006).
Air Quality Guidelines: Global Update 2005. Geneva: WHO Press.
(Sumber ini membahas standar kualitas udara dan
metode pengukuran untuk berbagai polutan.)
- Budiyono. 2001. Pencemaran Udara: Dampak Pencemaran Udara
pada Lingkungan. BeiKa Ditgantara Vol 2. No I.
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016).
Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to
Climate Change (3rd ed.). Hoboken, NJ: Wiley.
(Buku ini memberikan dasar ilmiah tentang kimia
atmosfer dan metode sampling polusi udara.)
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (1999).
Compendium of Methods for the Determination of Air Pollutants
in Indoor Air. EPA Document EPA/625/R-96/010.
Washington, D.C.: EPA.
(Panduan teknis EPA tentang metode pengambilan
sampel untuk berbagai jenis polutan udara.)
- Herawati, P., Riyanti, A., & Pratiwi, A. (2018). Hubungan
Konsetrasi NO₂ Udara Ambien Terhadap Konsentrasi
NO₂ Udara Dalam Ruang Di Lampu Merah Simpang
Jelutung Kota Jambi. Jurnal Daur Lingkungan, 1(1), 1-4.
- Kumar, A., & Gupta, M. (2020). "Evaluation of Different Air
Sampling Methods for Ambient Air Monitoring in Urban
Environments." Journal of Environmental Monitoring,
22(3), 347-359.
(Artikel jurnal yang mengulas perbandingan metode
sampling aktif dan pasif untuk lingkungan perkotaan.)
- European Environment Agency (EEA). (2018). Air Quality in
Europe - 2018 Report. Copenhagen: EEA.
(Laporan tahunan EEA tentang kualitas udara di Eropa,
metode pengambilan sampel, dan analisis data polutan.)

- Jaya, Z. (2017). Analisis Pengaruh Lalu Lintas Kendaraan Bermotor di Jalan Pelabuhan Terhadap Mutu Udara Ambien. *Jurnal Rekayasa Sipil (JRSUnand)*, 13(1), 55-66.
- Kim, K. H., Kabir, E., & Kabir, S. (2015). "A Review on the Human Health Impact of Airborne Particulate Matter." *Environment International*, 74, 136-143. (Artikel ini mengeksplorasi dampak kesehatan dari partikel udara dan pentingnya pengambilan sampel kualitas udara.)
- Hinds, W. C. (1999). *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles* (2nd ed.). New York: Wiley-Interscience.
(Referensi penting untuk teknik sampling partikulat udara serta alat dan metodologi yang digunakan dalam pengukuran aerosol.)

BIODATA PENULIS



Rusdin Wally, SKM., M.Kes lahir di Ambon, pada 17 Oktober 1973. Menyelesaikan pendidikan S1 di Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Muhammadiyah Maluku Utara dan S2 di Fakultas Ilmu Kesehatan Lingkungan Universitas Diponegoro. Sampai saat ini penulis sebagai Dosen di Jurusan Sanitasi Poltekkes Kemenkes Maluku.

BAB 7

Monitoring Kualitas Udara

Yauwan Tobing Lukiyono S.S.T, M.T

A. Konsep kualitas udara

1. Pencemaran udara

Pencemaran udara ialah kondisi dimana atmosfer bumi mengandung zat-zat pencemar baik secara fisik, biologis, atau kimia dalam jumlah yang merugikan kesehatan manusia dan makhluk hidup lainnya.

Menurut Keputusan Menteri Negara Kependudukan dan Lingkungan Hidup Nomor KEP - 03/MENKLH/II/1991, pencemaran udara diartikan sebagai masuknya zat, makhluk hidup, energi, dan/atau komponen lain ke dalam udara baik melalui alam maupun manusia sehingga mengakibatkan penurunan kualitas udara yang membuat udara tidak mencukupi atau tidak mampu menjalankan fungsi yang dimaksudkan. Selain itu, perubahan atmosfer yang disebabkan oleh masuknya polutan buatan atau alami juga dapat disebut sebagai pencemaran udara.

Polutan yang berasal dari aktivitas manusia (seperti emisi pabrik, asap kendaraan bermotor, dll) atau sumber alam (seperti letusan gunung berapi) dapat menjadi penyebab polusi udara. Iklim, ekosistem, properti, dan kesehatan semuanya dapat terkena dampak dari polusi udara.

2. Udara Bersih

Salah satu kebutuhan bagi seluruh kehidupan di Bumi adalah udara bersih. Kesehatan manusia juga akan dipengaruhi oleh udara bersih. Manusia tidak mampu mencegah berbagai masalah kesehatan, termasuk masalah pernafasan yang disebabkan oleh polusi udara, bakteri, dan virus. Seseorang akan mengalami kondisi udara yang bervariasi ketika mereka baru saja pindah ke lingkungan baru. Tidak semua gas polutan dapat dideteksi oleh indera penciuman manusia, oleh karena itu penduduk di wilayah tersebut mungkin tidak selalu dapat melihat secara langsung keberadaan gas-gas tersebut, sehingga dapat menimbulkan risiko terhadap kesehatan atau keselamatan mereka.

Udara yang bebas dari bahan pencemar dan partikel berbahaya lainnya yang dapat membahayakan kesehatan manusia atau lingkungan disebut udara bersih. Kandungan oksigen dan karbon dioksida di udara bersih seimbang untuk memungkinkan pernapasan yang nyaman dan sehat bagi manusia.

Manusia dan makhluk hidup lainnya sangat bergantung pada udara untuk kelangsungan hidupnya. Udara merupakan sumber daya alam yang harus dilestarikan demi kelangsungan hidup manusia dan makhluk hidup lainnya karena udara sangat penting bagi kemampuan semua makhluk hidup untuk menjalani kehidupan terbaiknya (Manik, K. E. S, n.d.)

Sejumlah polutan, termasuk debu, emisi industri dan mobil, gas berbahaya, dan zat berbahaya lainnya, dapat mencemari udara. Banyak penyakit, termasuk kanker paru-paru, bronkitis, asma, dan masalah pernafasan lainnya, dapat disebabkan oleh polutan udara ini. Selain itu, lingkungan juga terkena dampak negatif dari udara kotor, sehingga membahayakan keanekaragaman hayati.

3. Indeks Standar Pencemar Udara

Salah satu metode untuk menentukan derajat kualitas udara pada suatu wilayah atau wilayah adalah Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU). ISPU memberi masyarakat representasi numerik tingkat polusi udara yang dapat dipahami dengan jelas. Informasi mengenai keadaan udara dan dampaknya terhadap lingkungan dan kesehatan manusia merupakan tujuan utama. Berbagai parameter polusi udara, yang biasanya disebabkan oleh berbagai sumber seperti industri, transportasi, pembakaran bahan bakar fosil, dan aktivitas manusia lainnya, biasanya diukur dengan ISPU.

01-50	Baik	Tingkat mutu udara yang sangat baik, tidak memberikan efek negatif terhadap manusia, hewan dan tumbuhan
51-100	Sedang	Tingkat mutu udara masih dapat diterima pada kesehatan manusia, hewan dan tumbuhan.
101-200	Tidak Sehat	Tingkat mutu udara yang bersifat merugikan pada manusia, hewan dan tumbuhan.
201-300	Sangat Tidak Sehat	Tingkat mutu udara yang dapat meningkatkan resiko kesehatan pada sejumlah segmen populasi yang terpapar.
301+	Berbahaya	Tingkat mutu udara yang dapat merugikan kesehatan serius pada populasi dan perlu penanganan cepat.

Sejumlah karakteristik polutan udara primer biasanya dimasukkan dalam indeks ini, termasuk karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO₂), sulfur dioksida (SO₂), ozon (O₃), PM_{2.5} (partikulat berukuran 2,5 mikrometer), dan PM₁₀ (partikulat berukuran 10 mikrometer). Informasi mengenai risiko kesehatan yang terkait dengan kualitas udara setempat disediakan oleh Indeks Standar Pencemaran Udara. Biasanya dipaparkan dengan angka atau kategori, skala indeks ini berkisar dari tingkat polusi udara rendah hingga tinggi.

Organisasi pemantau lingkungan atau badan lingkungan hidup setempat telah menetapkan ambang batas konsentrasi untuk setiap metrik polusi udara. Nilai ISPU yang semakin besar menunjukkan jumlah pencemaran udara yang semakin tinggi apabila konsentrasi udaranya melampaui ambang batas. Skala ISPU biasanya mencakup sejumlah kategori, termasuk “Baik”, “Sedang”, “Tidak Sehat”, “Sangat Tidak Sehat”, dan “Berbahaya”, yang mencirikan kualitas udara. Ada interpretasi dan peringatan kesehatan masyarakat tertentu yang terkait dengan setiap kategori.

B. Monitoring kualitas udara dengan Internet of Things (IoT)

1. Monitoring

Monitoring adalah praktik mengawasi dan memantau operasi atau prosedur untuk mengumpulkan data tentang keadaan atau fungsi suatu sistem, aktivitas, atau lingkungan. Hal ini bertujuan untuk mengumpulkan informasi yang tepat dan tepat waktu mengenai keadaan dan pengoperasian suatu sistem atau aktivitas sehingga kinerja dapat ditingkatkan (Valsalan & Baomar, 2020).

Kegiatan monitoring biasanya memerlukan pengumpulan data secara rutin atau real-time, kemudian menilai dan menganalisisnya untuk menemukan permasalahan atau bidang yang memerlukan fokus atau perbaikan lebih besar. Alat atau sistem pengukuran

terintegrasi dapat digunakan untuk pemantauan otomatis atau manual

2. Internet of Things (IoT)

Di zaman modern saat ini, pemantauan terhadap udara menjadi sangat penting dikarenakan dampak yang dihasilkan dari udara langsung berhadapan dengan kesehatan masyarakat yang ada di lingkungan tersebut. polutan yang dihasilkan oleh udara telah dikaitkan dengan berbagai masalah kesehatan, seperti penyakit pernapasan dan penyakit kardiovaskular, hal tersebut dikarenakan meningkatnya industrialisasi dan urbanisasi. apabila kualitas udara terpantau hal tersebut dapat membantu pemerintah dan pihak yang terkait untuk membuat kebijakan yang efektif dengan memberikan pencegahan dini dan respon cepat terhadap keadaan yang berbahaya.(Pebralia dkk., 2024)

Interaksi perangkat komputasi yang dapat diidentifikasi secara unik dengan antar muka lain, seperti mesin dan manusia, dan merupakan teknologi baru dikenal sebagai Internet of Things. IoT termasuk dalam jaringan yang dapat menawarkan berbagai fitur baru dan model bisnis digital, untuk mengumpulkan dan menyimpulkan data kontekstual dari lingkungan yang ditandai dapat digunakan jaringan kabel dan nirkabel (Al-Fuqaha dkk., 2015).

Beberapa peneliti telah mengembangkan sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT) salah satunya adalah sistem pemantauan kebisingan dengan menggunakan suara GY-MAX4466, dalam penelitian yang dijalankan, sistem monitoring juga menggunakan aplikasi Blynk yang digunakan untuk menampilkan data visualisasi data pada saat monitoring kebakaran hutan. (Wilani dkk., 2023)

Sistem deteksi dini pencemaran udara menggunakan teknologi Internet Of Things memiliki banyak keuntungan, diantaranya yaitu teknologi ini dapat

mengumpulkan data secara real time dan kontinu dari berbagai lokasi di wilayah tertentu, oleh karena itu, kita dapat memperoleh pemahaman yang lebih baik tentang bagaimana pencemaran udara berkembang dan mendapatkan gambaran yang lebih akurat tentang pola polusi yang akan terjadi. kemudian data yang dikumpulkan oleh sistem Internet of Things ini dapat memudahkan masyarakat untuk mengakses melalui platform online yang dapat meningkatkan kesadaran masyarakat mengenai kualitas udara, kesadaran tersebut sangat penting karena dapat mendorong masyarakat untuk berpartisipasi dalam mengurangi polusi udara (Hasanuddin & Herdianto, 2023).

Sistem deteksi dini pencemaran udara menggunakan teknologi Internet Of Things memiliki banyak keuntungan, diantaranya yaitu teknologi ini dapat mengumpulkan data secara real time dan kontinu dari berbagai lokasi di wilayah tertentu, oleh karena itu, kita dapat memperoleh pemahaman yang lebih baik tentang bagaimana pencemaran udara berkembang dan mendapatkan gambaran yang lebih akurat tentang pola polusi yang akan terjadi. kemudian data yang dikumpulkan oleh sistem Internet of Things ini dapat memudahkan masyarakat untuk mengakses melalui platform online yang dapat meningkatkan kesadaran masyarakat mengenai kualitas udara, kesadaran tersebut sangat penting karena dapat mendorong masyarakat untuk berpartisipasi dalam mengurangi polusi udara (Hasanuddin & Herdianto, 2023).

3. Metode monitoring kualitas udara

Terdapat beberapa metode yang dilakukan untuk monitoring kualitas udara, diantaranya yaitu menggunakan metode pemantauan berbasis satelit (Emir Aulia dkk., 2022). kualitas udara dapat dipantau menggunakan satelit karena dapat memantau udara di seluruh dunia yang dapat memberikan gambaran

bagaimana polutan bergerak dan menyebar di seluruh dunia, meskipun cakupan yang dimiliki satelit luas, dalam hal resolusi, satelit tidak memberikan gambaran yang lebih detail dibandingkan dengan metode darat, akibatnya, satelit tidak cocok digunakan untuk memantau udara di lingkungan atau kota yang kecil, awan dan partikulat menyebabkan pengukuran terganggu dan mengakibatkan data tidak akurat dalam beberapa kondisi. (Fadhli & Salamah, 2023)

Monitoring kualitas udara dapat dilakukan dengan metode stasiun udara tetap (Nakulo dkk., 2020), pemantauan dilakukan di dalam stasiun yang dilengkapi dengan berbagai peralatan canggih atau sensor untuk mengukur tingkat polutan tertentu yang sangat akurat dan ditempatkan di lokasi yang strategis di sekitar wilayah tersebut. kelebihan dari metode ini yaitu menyediakan data dari satu titik selama bertahun-tahun, hal tersebut dapat memudahkan analisis tren, akan tetapi metode ini tidak dapat monitoring udara di wilayah secara luas, hanya dapat memantau di sekitar tempat wilayah, seiring dengan kemajuan teknologi, menggunakan metode ini membutuhkan biaya yang cukup mahal. (Pebralia dkk., 2024)

Metode monitoring udara juga dapat menggunakan sistem drone, drone dapat memantau kualitas udara dikarenakan sistem yang dimiliki drone cukup untuk memantau lokasi yang sulit dijangkau oleh kendaraan ataupun manusia, tempat yang seringkali sulit untuk diakses ialah pegunungan, wilayah terpencil dan lahan yang kecil, kelemahan dari metode ini yaitu baterai yang dimiliki drone mudah habis sehingga waktu terbang drone menjadi terbatas (Lambey & Prasad, 2021)

Saat ini banyak digunakan monitoring kualitas udara menggunakan metode sensor portable yang saat ini sedang dikembangkan, peneliti sebelumnya telah mengerjakan pembuatan komponen sensor yang

sambungkan ke mikrontroller yang bertujuan untuk mendeteksi parameter tertentu, dan para peneliti tersebut mencapai hasil yang baik. berbagai sensor berhasil di integrasikan dengan mikrontroller, termasuk ensor ultrasonik yang dapat mendeteksi benda bergerak (Amri & Pebralia, 2022). sesnsor warna TCS3200 dapat mendeteksi kafein dan sensor flex yang dapat mendeteksi retakan tanah. untuk mendeteksi suhu telah banyak peneliti yang melkaukan penelitian dengan mengembangkan diantaranya ialah sensor MLX90614 yang dapat digunakan untuk mendetksi suhu secara non-kontak dengan sensor yang dimilikinya yaitu DHT-11 untuk mendetksi suhu kompos, selain itu, sensor DHT 11 DAN YL 69 dapat digunakan untuk mengukur tingkat kelembapan. (Kafiar dkk., 2018)

Untuk melakukan pemnataun kulaitas udara secara kontak, maka dapat dilakukan dengan cara megunjungi lokasi secara langsung dan mencatat nilai-nilai yang diamati secara bersamaan, apabila monitoring kualitas udara secara langsung dilakukan dalam waktu yang lama, maka pemnataun menjadi tidak efisien dan juga jika tempat pemantauan sangat ekstrim dan sulit untuk dianalisis. maka dari itu, metode non-kontak dapat digunakan sebagai jalan lain untuk mendapatkan hasil pengawasan yang efektif, saat ini banyak digunakan monitring berbasis teknologi internet of things (IoT). (Pebralia dkk., 2024)

Interaksi perangkat komputasi yang dapat di identifikasi secara unik dengan antar muka lain, seperti mesin dan manusiaa, dan merupakan teknologi baru dikenal sebagai Internet of Things. IoT termasuk dalam jaringan yang dapat menawarkan berbagai fitur baru dan model bisnis digital, untuk mengumpulkan dan menyimpulkan data konstekstual dari lingkungan yang ditandai dapat digunakan jaringan kabel dan nirkabel (Al-Fuqaha dkk., 2015).

Beberapa peneliti telah mengembangkan sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT) salah satunya adalah sistem pemantauan kebisingan dengan menggunakan suara GY-MAX4466, dalam penelitian yang dijalankan, sistem monitoring juga menggunakan aplikasi Blynk yang digunakan untuk menampilkan data visualisasi data pada saat monitoring kebakaran hutan. (Wilani dkk., 2023)

DAFTAR PUSTAKA

- Manik, K. E. S. (n.d.). *Pengelolaan Lingkungan Hidup* (Edisi Pertama, Cetakan ke-1). Kencana.
- Valsalan, P., & Baomar, T. A. B. (2020). IOT BASED HEALTH MONITORING SYSTEM. *Journal of Critical Reviews*, 7(04). <https://doi.org/10.31838/jcr.07.04.137>
- Keputusan Menteri Negara Kependudukan dan Lingkungan Hidup No. KEP-03 / MENKLH/ II/1991 Tentang Pengendalian Pencemaran Udara.
- Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347–2376. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>
- Amri, I., & Pebralia, J. (2022). A SIMPLE OF IOT BASED SOCIAL CONTACT TRACKING FOR INFECTIOUS PATIENT USING ULTRASONIC SENSOR: A PRELIMINARY STUDY. *JOURNAL ONLINE OF PHYSICS*, 7(2), 19–23. <https://doi.org/10.22437/jop.v7i2.18192>
- Emir Aulia, Chadirin, Y., & Pribadi, A. (2022). Analisis Sebaran SO₂ pada Musim Wabah Covid-19 Menggunakan Satelit Aura di Wilayah Jabodetabek: Analysis of SO₂ Distribution in The Covid-19 Outbreak Season Using The Aura Satellite In The Greater Jakarta Area. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 7(2), 113–128. <https://doi.org/10.29244/jsil.7.2.113-128>
- Fadhli, M., & Salamah, I. (2023). Sosialisasi Sistem Monitoring Kualitas Udara Menggunakan Komunikasi Multi-Hop di BMKG Stasiun Klimatologi Kelas I Palembang. 2(1).
- Hasanuddin, M., & Herdianto, H. (2023). Sistem Monitoring dan Deteksi Dini Pencemaran Udara Berbasis Internet Of Things (IOT). *Journal of Computer System and Informatics (JoSYC)*, 4(4), 976–984. <https://doi.org/10.47065/josyc.v4i4.4034>
- Kafiar, E. Z., Allo, E. K., & Mamahit, D. J. (2018). Rancang Bangun Penyiram Tanaman Berbasis Arduino Uno Menggunakan

- Sensor Kelembaban YL-39 Dan YL-69. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, 7(3).
<https://doi.org/10.35793/jtek.v7i3.20773>
- Lambey, V., & Prasad, A. D. (2021). A Review on Air Quality Measurement Using an Unmanned Aerial Vehicle. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232(3), 109.
<https://doi.org/10.1007/s11270-020-04973-5>
- Nakulo, B., Sari, I. D., & Hariyadi, D. (2020). PEMANTAUAN SISTEM KUALITAS UDARA MENGGUNAKAN OPENHAB. *Indonesian Journal of Business Intelligence (IJUBI)*, 3(1), 14. <https://doi.org/10.21927/ijubi.v3i1.1203>
- Pebralia, J., Akhsan, H., & Amri, I. (2024). IMPLEMENTASI INTERNET OF THINGS (IOT) DALAM MONITORING KUALITAS UDARA PADA RUANG TERBUKA. *Jurnal Kumparan Fisika*, 7(1), 1-8.
<https://doi.org/10.33369/jkf.7.1.1-8>
- Wilani, L., Peslinof, M., & Pebralia, J. (2023). Rancang Bangun Sistem Monitoring Kebisingan pada Ruangan dengan Sensor Suara GY-MAX4466 Berbasis Internet of Things (IoT). *STRING (Satuan Tulisan Riset dan Inovasi Teknologi)*, 7(3), 319.
<https://doi.org/10.30998/string.v7i3.15492>

BIODATA PENULIS



Yauwan Tobing Lukiyono, S.S.T.,M.T lahir di Blitar, 10 November 1985. Menyelesaikan Pendidikan dasar dan menengah di Surabaya, kemudian melanjutkan Pendidikan Diploma III Akademi Analis Kesehatan Poltekkes Kemenkes Surabaya, selesai tahun 2007. Pendidikan D4 Analis Kesehatan pada Poltekkes Kemenkes Surabaya selesai tahun 2009. Pada tahun 2018, meneruskan program Magister di Institut Aditama Surabaya pada jurusan Teknik Lingkungan. Sejak tahun 2020 penulis bertugas sebagai dosen tetap pada program studi Analis Kesehatan di Universitas Nahdlatul Ulama Surabaya. Selain sebagai dosen, juga memiliki sertifikat Asesor kompetensi yang dikeluarkan oleh BNSP dalam bidang Plebotomy, Teknik Analisa Laboratorium dan Pemeriksaan Analisa Biomolekuler.

BAB 8

Pencemaran Udara: Ozon

* I. G.A. Kusuma Astuti N.P, drg., M.Kes *

A. Pendahuluan

Pencemaran ozon merupakan salah satu isu lingkungan yang semakin mendapat perhatian global dalam beberapa dekade terakhir. Ozon, yang terdapat di lapisan atmosfer bumi, memiliki dua peran penting. Di lapisan stratosfer, ozon bertindak sebagai pelindung dari radiasi ultraviolet (UV) yang berbahaya, sementara di lapisan troposfer, ozon dapat menjadi polutan yang merusak kualitas udara. Pencemaran ozon terutama terjadi di daerah perkotaan dan industri, di mana aktivitas manusia menghasilkan emisi gas yang memperburuk kualitas udara, sehingga menciptakan lapisan ozon troposferik yang berbahaya.

Penyebab utama pencemaran ozon adalah emisi gas-gas seperti nitrogen oksida (NO_x) dan volatile organic compounds (VOCs) yang berasal dari kendaraan bermotor, pabrik, dan pembangkit listrik. Gas-gas ini bereaksi di atmosfer dengan bantuan sinar matahari, menghasilkan ozon yang berlebih di permukaan tanah. Keberadaan ozon pada ketinggian rendah ini dapat menyebabkan gangguan kesehatan pada manusia, seperti iritasi saluran pernapasan, asma, dan masalah jantung, serta merusak tanaman dan ekosistem.

Fenomena pencemaran ozon ini juga mengancam keseimbangan iklim global. Peningkatan kadar ozon troposferik dapat berkontribusi pada pemanasan global, karena ozon berfungsi sebagai gas rumah kaca. Oleh karena

itu, penting untuk memahami dinamika pembentukan ozon dan upaya-upaya yang dapat dilakukan untuk mengurangi emisi polutan penyebabnya. Kesadaran dan tindakan preventif dari masyarakat, pemerintah, dan sektor industri sangat diperlukan untuk menjaga kualitas udara dan melindungi lingkungan dari dampak negatif pencemaran ozon.

B. Pencemaran Udara: Ozon

1. Pengertian Pencemaran Ozon

Pencemaran ozon merujuk pada peningkatan kadar ozon yang tidak wajar di lapisan troposfer, yang berbahaya bagi kesehatan manusia dan lingkungan. Ozon adalah gas yang terdiri dari tiga atom oksigen (O_3) dan memiliki peran penting di lapisan stratosfer, di mana ia berfungsi melindungi Bumi dari sinar ultraviolet (UV) berbahaya. Namun, ketika ozon terbentuk di lapisan atmosfer yang lebih rendah, yaitu troposfer, ia menjadi polutan yang dapat merusak kualitas udara. Proses pembentukannya melibatkan reaksi kimia antara polutan, seperti nitrogen oksida (NO_x) dan senyawa organik volatil (VOCs), yang dipicu oleh sinar matahari.

Pencemaran ozon lebih sering terjadi di daerah perkotaan dengan tingkat polusi tinggi, di mana banyak kendaraan bermotor dan industri yang menghasilkan gas-gas pencemar. Gas-gas ini berinteraksi dengan sinar matahari dan membentuk ozon troposferik yang berbahaya. Berbeda dengan ozon stratosfer yang melindungi kehidupan di Bumi, ozon di troposfer dapat menyebabkan gangguan kesehatan serius. Paparan ozon yang tinggi dapat mengiritasi saluran pernapasan, memperburuk penyakit paru-paru, dan memengaruhi sistem kardiovaskular.

Selain dampak kesehatan, pencemaran ozon juga berdampak negatif pada lingkungan. Keberadaan ozon berlebih dapat merusak tanaman, mengurangi hasil pertanian, serta mengganggu ekosistem alami. Tanaman

yang terpapar ozon dalam jangka panjang dapat mengalami penurunan kemampuan fotosintesis dan akhirnya mati. Oleh karena itu, pencemaran ozon tidak hanya menjadi ancaman bagi manusia, tetapi juga bagi kehidupan liar dan keberlanjutan alam.

2. Proses Pembentukan Ozon Troposferik

Proses pembentukan ozon di lapisan troposfer terjadi melalui reaksi fotokimia yang melibatkan berbagai gas polutan, seperti nitrogen oksida (NO_x) dan senyawa organik volatil (VOCs). Gas-gas ini banyak dihasilkan oleh kendaraan bermotor, pabrik industri, serta pembangkit listrik yang menggunakan bahan bakar fosil. Ketika sinar matahari menyinari gas-gas ini, mereka terurai dan menghasilkan radikal bebas yang berinteraksi dengan oksigen (O_2) untuk membentuk ozon (O_3). Proses ini disebut sebagai pembentukan ozon fotokimia.

Pada tahap awal, nitrogen oksida (NO) yang dihasilkan oleh sumber-sumber polusi bereaksi dengan sinar ultraviolet, menghasilkan radikal nitrit (NO_2). Radikal ini kemudian bereaksi dengan oksigen (O_2) untuk membentuk ozon (O_3). Senyawa organik volatil (VOCs), yang sebagian besar berasal dari kendaraan dan pembakaran bahan bakar, juga memainkan peran penting dalam reaksi kimia ini dengan menghasilkan radikal bebas yang mempercepat pembentukan ozon.

Pembentukan ozon biasanya paling intens terjadi pada siang hari, saat sinar matahari berada pada puncaknya. Keberadaan ozon di troposfer, meskipun sangat berguna dalam menyaring radiasi ultraviolet, menjadi masalah saat konsentrasi ozon mencapai kadar berbahaya di permukaan tanah. Ketika ozon berlebih terakumulasi, ia dapat merusak kualitas udara dan mengancam kesehatan manusia, terutama di daerah perkotaan yang memiliki tingkat polusi tinggi.

3. Dampak Pencemaran Ozon pada Kesehatan Manusia

Paparan ozon troposferik memiliki berbagai dampak buruk pada kesehatan manusia, terutama bagi individu yang rentan seperti anak-anak, lansia, serta penderita penyakit pernapasan seperti asma dan bronkitis. Ozon yang terhirup dapat mengiritasi saluran pernapasan, menyebabkan peradangan, batuk, dan sesak napas. Dalam kasus yang lebih parah, paparan ozon jangka panjang dapat memperburuk kondisi penyakit paru-paru kronis dan meningkatkan risiko serangan jantung.

Selain masalah pernapasan, ozon juga dapat mengurangi kapasitas paru-paru dan memengaruhi fungsi sistem kardiovaskular. Paparan ozon berlebih dapat mengganggu aliran oksigen dalam darah, yang pada akhirnya dapat menurunkan daya tahan tubuh terhadap infeksi. Penurunan kualitas udara akibat ozon juga berhubungan dengan peningkatan jumlah kunjungan ke rumah sakit untuk perawatan darurat, yang berdampak pada beban sistem kesehatan.

Di banyak daerah dengan tingkat polusi ozon yang tinggi, angka kematian akibat penyakit terkait polusi udara juga meningkat. Oleh karena itu, memahami dampak pencemaran ozon pada kesehatan sangat penting dalam upaya merancang kebijakan dan regulasi yang dapat mengurangi emisi ozon serta melindungi kesehatan masyarakat.

4. Dampak Pencemaran Ozon pada Lingkungan

Pencemaran ozon tidak hanya memengaruhi kesehatan manusia, tetapi juga berdampak buruk pada lingkungan dan ekosistem. Ozon yang berlebih di troposfer dapat merusak tanaman dengan cara mengganggu proses fotosintesis. Tanaman yang terpapar ozon dalam jangka panjang akan mengalami penurunan kualitas pertumbuhan, hasil pertanian yang lebih rendah, serta kematian tanaman. Ozon juga dapat mengurangi

ketahanan tanaman terhadap penyakit dan hama, yang pada akhirnya berimbas pada ketahanan pangan.

Keberadaan ozon yang tinggi juga dapat merusak kualitas tanah dan sumber daya alam lainnya. Tanah yang terpapar ozon berlebih dapat mengalami penurunan kesuburan, yang memengaruhi kemampuan tanah untuk mendukung pertumbuhan tanaman. Selain itu, ozon juga berdampak negatif pada kualitas air, mengurangi kemampuan ekosistem air tawar untuk mendukung kehidupan ikan dan organisme air lainnya.

Kehilangan biodiversitas yang disebabkan oleh pencemaran ozon juga mengancam keseimbangan ekosistem secara keseluruhan. Dengan merusak habitat alami bagi berbagai spesies, pencemaran ozon memperburuk masalah lingkungan lainnya, seperti perubahan iklim dan kerusakan habitat. Oleh karena itu, penting untuk memahami interaksi antara ozon dan lingkungan dalam rangka melindungi keanekaragaman hayati dan keberlanjutan ekosistem.

5. Upaya Pengendalian Pencemaran Ozon

Pengendalian pencemaran ozon memerlukan pendekatan yang holistik, melibatkan kebijakan pemerintah, teknologi ramah lingkungan, serta kesadaran masyarakat. Salah satu langkah utama adalah pengurangan emisi gas pencemar seperti nitrogen oksida (NO_x) dan senyawa organik volatil (VOCs). Untuk itu, kendaraan bermotor harus dilengkapi dengan teknologi yang dapat mengurangi emisi, seperti penggunaan bahan bakar bersih dan teknologi kendaraan listrik. Selain itu, industri harus mengadopsi teknologi yang lebih efisien dalam menggunakan energi dan meminimalkan polusi udara.

Pemerintah juga memainkan peran penting dalam pengendalian pencemaran ozon melalui peraturan dan kebijakan yang ketat terkait emisi gas dari kendaraan dan industri. Penerapan standar kualitas udara yang lebih

tinggi serta pengawasan terhadap kepatuhan emisi dapat membantu mengurangi pembentukan ozon. Beberapa negara telah menerapkan kebijakan seperti pembatasan penggunaan bahan bakar fosil dan mendorong penggunaan energi terbarukan untuk mengurangi emisi pencemar.

Selain itu, edukasi dan kesadaran masyarakat tentang dampak pencemaran ozon dan pentingnya menjaga kualitas udara juga sangat penting. Kampanye untuk mengurangi penggunaan kendaraan pribadi, meningkatkan penggunaan transportasi umum, dan mengurangi pembakaran sampah dapat membantu mengurangi polusi udara. Dengan langkah-langkah tersebut, diharapkan kualitas udara dapat terjaga dan dampak pencemaran ozon dapat diminimalkan.

6. Peran Teknologi dalam Mengurangi Pencemaran Ozon

Teknologi memainkan peran yang sangat penting dalam upaya mengurangi pencemaran ozon. Inovasi teknologi yang ramah lingkungan dapat membantu menurunkan emisi gas-gas yang berperan dalam pembentukan ozon, seperti nitrogen oksida (NO_x) dan senyawa organik volatil (VOCs). Salah satu teknologi yang telah banyak diterapkan adalah sistem pemrosesan emisi pada kendaraan bermotor dan pembangkit listrik yang mengurangi jumlah gas berbahaya yang dilepaskan ke udara. Teknologi kendaraan listrik yang tidak menghasilkan emisi gas buang juga menjadi solusi jangka panjang untuk mengurangi pencemaran ozon.

Selain itu, teknologi energi terbarukan seperti tenaga surya, angin, dan biomassa dapat menggantikan bahan bakar fosil, yang merupakan sumber utama emisi gas pencemar ozon. Pembangkit listrik berbasis energi terbarukan tidak hanya mengurangi pencemaran ozon, tetapi juga membantu mengatasi masalah pemanasan global. Implementasi teknologi hijau ini memerlukan dukungan dari kebijakan pemerintah, investasi, dan

penelitian untuk meningkatkan efisiensinya serta mengurangi biaya produksi energi.

Teknologi juga dapat berperan dalam pemantauan kualitas udara. Sistem pemantauan udara berbasis sensor dan analisis data dapat memberikan informasi yang lebih akurat tentang tingkat ozon dan polutan lainnya di udara. Dengan data yang lebih real-time, pemerintah dan masyarakat dapat mengambil langkah-langkah preventif untuk mengurangi paparan ozon, seperti membatasi aktivitas di luar ruangan pada hari-hari dengan kualitas udara buruk.

DAFTAR PUSTAKA

- Agusnar, H. (2007) *Kimia Lingkungan*. Medan: USU Press.
- Ambarsari, N., Komala, N. and Cahyono, E. (2016) 'Korelasi Ozon Dan Bromin Monoksida Di Indonesia Berbasis Observasi Satelit Aura-MLS' *Sains Dirgantara*, 10(2), pp. 116-125.
- Chandra (2006) *Fundamentals of Natural Gas: An International Perspective*. Oklahoma: Penwell Books.
- Cheng, N., Yunting L.. (2016) 'Characteristics of Ground Ozone Concentration over Beijing from 2004 to 2015: Trends, Transport, and Effects of Reductions', *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 1(x), pp. 1-21. doi:10.5194/acp-2016-508.
- Damar. D. Y., Irawan, Wisnu W., Endro S., (2017) Analisis Dampak Kualitas udara Karbon Monoksida (CO) Di Sekitar Jalan Pemuda Akibat Kegiatann Car Free Day Menggunakan Program Caline dan Surfer (Studi Kasus : Kota Semarang). *Jurnal Teknik Lingkungan*, Vol. 6, No. 1. Pp 1-14.
- Jacobson, M. Z. (2005). *Fundamentals of Atmospheric Modeling* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Kumar, P., & Gupta, S. (2018). "Tropospheric Ozone and its Effects on Human Health and Environment." *Environmental Science & Pollution Research*, 25(4), 3205-3218.
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2006). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change* (2nd ed.). Wiley-Interscience.
- Young, P. J., & Fisher, R. (2017). "The Role of Ozone in Global Warming." *Environmental Research Letters*, 12(6), 064001.

BIODATA PENULIS



I. G.A. Kusuma Astuti N.P, drg., M.Kes, Penulis lahir di Singaraja pada tanggal 27 Agustus 1964. Penulis mengenyam pendidikan S1 di FKG UI Universitas Indonesia, dan S2 di Universitas Airlangga Fakultas Kesehatan Masyarakat. Riwayat bekerja sebagai Dokter Gigi Puskesmas Poso, Sulawesi Tengah tahun 1989-1993. Saat ini bekerja di Poltekkes Surabaya sebagai Dosen di Jurusan Keperawatan Gigi Poltekkes Kemenkes Surabaya.

BAB 9

Oksida Nitrogen Dan Sulfur

Dr.Drs Agus Rokot, S.Pd., M.Kes

A. Pendahuluan

Pencemaran udara merupakan suatu ancaman bagi kehidupan manusia walaupun hal ini juga disebabkan oleh aktivitas alam maupun aktivitas manusia; Manusia tanpa perhitungan yang jelas dan matang serta memikirkan efek Kesehatan dari generasi sekarang ke generasi selanjutnya. Aktivitas manusia pada dasarnya adalah sebuah proses pengubahan zat atau energi dari suatu bentuk ke bentuk lainnya. Setiap proses tersebut tidak dapat sepenuhnya mampu diubah, melainkan selalu ada sisa atau disebut entropy yang kemudian menjadi sampah atau limbah yang masuk atau dimasukkan ke lingkungan, sampah atau limbah ini kemudian akan menurunkan kualitas lingkungan jika tidak dikelola dengan baik (Dermawan, 2018; Maulida, 2017; Hanura dkk 2019).

Udara merupakan komponen penting dan diperlukan dalam lingkungan hidup baik benda mati maupun makhluk hidup, sehingga perlu diingatkan pada manusia agar menjaga dan dilestarikan agar jauh dari cemaran yang berakibat pada manusia/mahluk yang hidup supaya tetap sehat dan Lestari, tidak masuk pada kategori tercemar. Perubahan yang terjadi sebagai akibat dari kemasukan benda asing itu memberikan pengaruh (dampak) buruk terhadap organisme yang sudah ada dan hidup dengan baik dalam tatanan lingkungan tersebut (Fikri 2022). Terjadinya udara yang tidak seimbang atau yang

dapat mempengaruhi Kesehatan adalah ketidak seimbangannya antara yang dibutuhkan makhluk hidup dan lingkungan atau adanya oksida dari unsur yang ada di di alam yang tidak diinginkan. Udara merupakan campuran beberapa macam gas yang tandingannya tidak tetap, tergantung pada keadaan suhu udara, tekanan udara dan lingkungan sekitarnya. Di dalam udara terdapat gas oksigen yang digunakan untuk bernafas, gas karbondioksida untuk proses fotosintesis oleh klorofill daun dan ozon untuk menahan sinar ultraviolet. Gas-gas lain yang juga terdapat dalam udara antara lain gas mulia, nitrogen, hydrogen, methane, belerang dioksida, ammonia dan lain lain (Zaman,Muhammadiyah 2021)

B. Konsep Oksida Nitrogen dan Sulfur

Komponen udara yang ada di alam sesungguhnya sudah tersusun dengan sempurna dengan kondisi yang para ahlinya telah membaginya dengan posisi yang masuk golongan A dan golongan B serta golongan lantanida dan aktinida, logam non logam, gas mulia, juga unsur bagian tengah system periodic dengan kulit D (Diffuse) yang belum penuh, unsur buatan dengan keseluruhan senyawa yang nantinya terbentuk dari reaksi antar unsur, karena mereka mempunyai bilangan oksidasi masing - masing, kation, anion, kulit terluar yang penuh bahkan belum penuh dengan susunan (S) Sharp, (P) Principle (D) Diffuse (F) Fundamental, dapat berpengaruh dalam terbentuknya senyawa yang seimbang dengan kebutuhan makhluk hidup, hal inilah yang menentukan tingkat reaksi dan terikatnya keadaan yang ada di udara dalam keadaan netral menjadi tidak netral yang terbentuknya oksida yang baru seperti Nitrogen oksida dan sulfur (Oksida belerang) serta keadaan ini dipicu oleh alam dan manusia.

1. Oksida Nitrogen

Nitrogen merupakan gas penyusun atmosfer terbesar dimuka bumi, jumlahnya mencapai 80% dari jumlah keseluruhan udara di atmosfer. Selain itu nitrogen merupakan gas berbahaya jika jumlahnya melebihi batas

yang ditetapkan. Pertambahan jumlah nitrogen di udara sangatlah cepat. Hal tersebut dikarenakan pembakaran bahan bakar fosil, sampah, maupun limbah asap hasil industri yang terjadi di muka bumi (Apriliawati, Kuswando 2017). Kondisi terbentuknya oksida nitrogen dapat mempengaruhi muatan udara yang tidak seimbang sehingga kondisi ini dapat berakibat pada keadaan lingkungan yang dapat mempengaruhi, banyak hal dalam lingkungan dan makhluk hidup di dalamnya. Nitrogen oksida dan hidrokarbon adalah uap bensin yang tidak terbakar, dihasilkan dari pembakaran bahan bakar yang tidak sempurna yang dipengaruhi oleh sinar matahari akan membentuk smog yang berupa gas yang sangat pedih jika mengenai mata dan juga penyebab Kanker (Siburian 2020). Gas Nitrogen oksida secara gamblang bahkan seperti terjadi di beberapa daerah dengan. Permasalahan yang kerap terjadi di kota-kota besar adalah pencemaran udara. Nitrogen Dioksida (NO_2) merupakan salah satu polutan berbahaya yang berkontribusi besar terhadap pencemaran udara seperti pengukuran salah satu contoh kota di Indonesia khususnya pulau Jawa. Dalam rangka pemantauan kualitas udara ambien, Dinas Lingkungan Hidup Kota Yogyakarta melakukan pengukuran di beberapa titik lokasi untuk mengetahui konsentrasi dari polutan tersebut. Namun, karena pengukuran memerlukan proses yang panjang dan terhalang dana yang besar, pengukuran tidak dilakukan di semua titik lokasi. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode interpolasi spasial untuk mengestimasi konsentrasi NO_2 di Kota Yogyakarta yang lokasinya tidak dilakukan pengukuran. Metode yang digunakan adalah *Ordinary Kriging* (OK) dan *Inverse Distance Weighted* (IDW). Dari hasil analisis diperoleh bahwa metode yang paling akurat untuk estimasi konsentrasi NO_2 di Kota Yogyakarta adalah OK. Hal ini dikarenakan hasil perhitungan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) pada OK lebih kecil, yaitu

0,4847 dibanding 0,5224 pada IDW (*Inverse Distance Weighted*). (Safira dkk 2022)

2. Oksida Sulfur

Sulfur (belerang) merupakan unsur yang terletak pada golongan VI A Periode 3 dalam sistem periodik dengan beberapa bilangan oksidasinya, Gas SO_2 sulit dideteksi karena merupakan gas tidak berwarna. Gas SO_2 dapat menyebabkan gangguan pernafasan, pencemaran, sakit kepala, sakit dada, dan dapat menyerang saraf manusia. Pada kadar yang melebihi ambang batas dapat menyebabkan kematian (Setiawan dkk 2013, (Yunita, Kuswando 2017). Belerang oksida meliputi belerang dioksida (SO_2) dan belerang trioksida (SO_3). Belerang dioksida merupakan gas yang berbau sangat menyengat. Gas ini dapat bereaksi dengan oksigen, amoniak, dan senyawa lainnya, misalnya uap air, membentuk embun dan larutan asam sulfat serta senyawa sulfat lainnya. Polutan senyawaan belerang yang paling dominan di daerah perkotaan adalah gas SO_2 dan embun asam sulfat. Secara alami belerang dioksida di udara banyak dihasilkan oleh proses letusan gunung berapi dan oksidasi gas H_2S . Sumber lain yang berkaitan dengan kegiatan manusia adalah proses pembakaran batubara dan minyak serta proses pembakaran bahan bakar kendaraan bermotor. Proses-proses tersebut banyak terjadi pada peleburan bijih logam non besi, pembangkit tenaga listrik, penyulingan minyak bumi, pembuatan kertas, semen, tekstil, plastik dan pembuatan karet. (Muariffah 2019) Aktivitas alam dan aktivitas manusia yang disumbangkan yang amat besar tersebut karena unsur ini cenderung mengikat oksigen membentuk senyawa yang kadang kala berada pada komposisi dan reaksi antara kation dan anionnya berada dalam ketidak seimbangannya karena reaksi yang terjadi di alam ditambah dengan aktivitas manusia yang menginginkan hal yang baru tanpa memikirkan efek reaksi dari oksida tersebut sebagai contoh proses

peleburan biji logam non besi yang di dalamnya suatu kebutuhan manusia.

3. Dampak Oksida Nitrogen dan Sulfur Pada Kesehatan

Udara bersih merupakan dambaan bagi setiap makhluk hidup untuk dapat melangsungkan kehidupan dan melanjutkan generasi sehingga diharapkan tidak mengalami pencemaran atau terjadinya oksida seperti Nitrogen oksida. Nitrogen merupakan gas penyusun atmosfer terbesar dimuka bumi, jumlahnya mencapai 80% dari jumlah keseluruhan udara di atmosfer. Selain itu nitrogen merupakan gas berbahaya jika jumlahnya melebihi batas yang ditetapkan. Pertambahan jumlah nitrogen di udara sangatlah cepat. Hal tersebut dikarenakan pembakaran bahan bakar fosil, sampah, maupun limbah asap hasil industri yang terjadi di muka bumi. (Apriliawati, Kuswandono 2017). Hal positif dan negatif dari suatu senyawa seperti nitrogen diantaranya: Gas N_2O mempunyai 2 dampak dalam kehidupan manusia, yaitu dampak positif dan negatif. Dampak positifnya yaitu berguna untuk dunia kedokteran,omotif, peroketan, dan bahan peledak bahkan memberi efek gembira bagi yang menghirupnya. Dampak negatifnya bila berada di stratosfer bisa merusak ozon, di troposfer bertindak sebagai gas rumah kaca. Gas N_2O ini dapat timbul secara alami yaitu dari berbagai sumber biologis di dalam tanah dan air, terutama aktivitas mikroba pada hutan tropis basah dan kebakaran hutan. Sumber dari antropogenik yaitu sektor pertanian, peternakan, proses industri, pengelolaan sampah, pemakaian energi, bahkan bisa diproduksi dengan sengaja untuk berbagai kebutuhan. Emisi gas N_2O di Indonesia cenderung naik. Sumber yang paling besar di Indonesia adalah pertanian dan peternakan. Akibat dari emisi N_2O yang cenderung naik maka konsentrasinya pun di permukaan cenderung naik. Karakteristik gas N_2O ini bila berada di stratosfer maka konsentrasinya makin kecil

dengan bertambahnya ketinggian dan umumnya mengalami maksimum di ekuator. (Samiaji 2012) Dampak oksida nitrogen dan sulfur yang secara umum terbentuk di udara dan tidak diharapkan terbentuk, karena makhluk hidup sebagai bagian yang tidak terpisahkan dari kebutuhan akan kehidupannya sesungguhnya agar terjaga kelestariannya diharapkan mendapatkan udara yang bersih. Senyawa-senyawa di dalam gas buang terbentuk selama energi diproduksi untuk menjalankan kendaraan bermotor. Beberapa senyawa yang dinyatakan dapat membahayakan kesehatan adalah berbagai oksida sulfur, oksida nitrogen, dan oksida karbon, hidrokarbon, logam berat tertentu dan partikulat. Pembentukan gas buang tersebut terjadi selama pembakaran bahan bakar fosil-bensin dan solar di dalam mesin (Zein and Sagaf, 2018). Dibandingkan dengan sumber stasioner seperti industri dan pusat tenaga listrik, jenis proses pembakaran yang terjadi pada mesin kendaraan bermotor tidak sesempurna di dalam industri dan menghasilkan bahan pencemar pada kadar yang lebih tinggi, terutama berbagai senyawa organik dan oksida nitrogen, sulfur dan karbon (Haruna dkk 2019). Oksida nitrogen dapat berakibat penyakit di antaranya: NO_2 mayoritas terbentuk dari kegiatan pembakaran dan terlihat seperti kabut berwarna coklat kemerahan. NO_2 dapat menyebabkan kerusakan jaringan dan peradangan pada saluran pernapasan. Hal ini menyebabkan penurunan kekebalan yang menyebabkan organ pernapasan rentan mengalami infeksi (Sari 2024), Jenis nitrogen oksida yang sering dijumpai di dalam atmosfer adalah NO , NO_2 ataupun N_2O adalah zat yang tidak pernah ada di dalam udara yang bersih. Senyawa ini dapat merusak saluran pernapasan, iritasi paru-paru dan mata, dan juga berkontribusi terhadap kerusakan jantung, paru-paru, hati, dan ginjal (Maherdyta dkk 2022). Berbagai penyakit lainnya yang dapat mempengaruhi berbagai macam Kesehatan dengan timbulnya penyakit;

Nitrogen oksida (NO_x) dapat menyebabkan berbagai penyakit, seperti: Asma, Penyakit paru-paru kronis, Infeksi saluran pernapasan, Penyakit kardiovaskular, Gangguan fungsi paru-paru. Gambaran penyakit ini sesungguhnya dapat mempengaruhi kualitas hidup manusia yang dapat menurunkan berbagai hal yang terkait seperti Kesehatan (sakit) maka daya produktivitas berkurang, ekonomi merosot, menjadi beban negara dan pemerintah maka kemajuan dan kesejahteraan bersama dalam negara menjadi merosot (tidak bisa dicapai) karena orangnya tak berkualitas dan tak berdaya saying karena dilanda berbagai penyakit seperti disebutkan maka ini merupakan siklus atau mata rantai yang tidak diinginkan oleh manusia pemerintah bangsa dan negara untuk mewujudkan Masyarakat adil dan Sejahtera.

4. Dampak Oksida Sulfur

Oksida Sulfur dapat mempengaruhi Kesehatan, tanpa disadari keberadaan ala ini lewat kemajuan teknologi dalam berbagai bidang seperti dalam bidang pengangkutan dan peleburan dengan menggunakan bahan bakar yang reaksinya belum sempurna menghasilkan berbagai bentuk oksida sulfur yang mengalami pengikatan yang dapat mencemari udara yang sesungguhnya udara bersih dapat mendorong makhluk hidup baik hewan maupun manusia berada pada kondisi sehat. Sulfur Oksida (SO_x) terbagi menjadi dua, yaitu sulfur dioksida (SO₂) dan sulfur trioksida (SO₃). SO₂ adalah gas yang mudah terlarut dalam air, memiliki bau, tidak berwarna dan tidak mudah terbakar. Pencemaran sekunder yang terbentuk dari SO₂ seperti partikel sulfat dapat berpindah dan terdisposisi jauh dari sumbernya Kementerian Lingkungan Hidup 2013; Gas SO₂ merupakan gas polutan yang banyak bersumber dari pembakaran bahan bakar fosil yang mengandung unsur belerang seperti minyak, gas, batu bara maupun kokas (Yunita, Kiswandono, 2017). SO_x yang teradsorpsi pada

partikel dapat terhirup dan masuk ke dalam saluran pernapasan. SO_x yang terabsorpsi kemudian terlarut dalam cairan tubuh dan memasuki aliran darah, sistem limfatik atau jaringan paru-paru penghubung (Sodhi, 2009). Efek gas SO_2 dapat menyebabkan gangguan pernapasan, sakit kepala, sakit dada, dan dapat menyerang saraf manusia. Pada kadar 8-12 ppm, dapat menyebabkan batuk dan kesulitan bernapas, iritasi mata yang menyebabkan keluarnya air mata, mata menjadi merah dan perih Mukono, 2011, (Tampa dkk 2020) jurnal publihealt commodity medicine Sulfur dan oksigen yang bereaksi di udara tentunya dipicu oleh adanya reaksi yang tidak sempurna seperti, pembakaran tidak sempurna peleburan berbagai jenis logam atau aktifitas alam. Berbagai akibat dari oksida tersebut seperti oksida sulfur pada pernapasan Dampak gas sulfur dioksida terhadap kesehatan manusia dan hewan adalah terganggunya saluran pernapasan dan iritasi mata. Pada konsentrasi yang sangat tinggi dapat menimbulkan kematian. Konsentrasi SO_2 sampai 38 ppm terjadi i mengakibatkan 60 orang tewas serta ratusan sapi dan ternak lainnya mati (Damri dkk, 2016; Takuloe dkk 2023). Risiko yang lebih berbahaya terjadi jika SO_2 berubah menjadi polutan sekunder yang lebih berbahaya karena dapat menghancurkan jaringan pada organ tubuh vital serta bersifat karsinogenik (penyebab kanker). Angka kematian akibat SO_2 meningkat sebesar 1,4% terutama pada suhu 22,8–29,4°C (Sari 2024).

DAFTAR PUSTAKA

- Apriliawati, E., Kiswandono, A. A. (2017). Kajian Indeks Standar Polusi Udara (ISPU) Nitrogen Dioksida (NO_2) di Tiga Lokasi Kota Bandar Lampung. *Analit: Analytical and Environmental Chemistry*, 2(1), 42-51.
- Fikri, E. (2022). Pencemaran Udara dan Dampaknya Bagi Kesehatan. *Purbalingga: Eureka Media Aksara*.
- Haruna, H., Lahming, L., Amir, F., & Asrib, A. R. (2019). Pencemaran Udara Akibat Gas Buang Kendaraan Bermotor Dan Dampaknya Terhadap Kesehatan. *UNM Environmental Journals*, 2(2), 57-61.
- Maherdyta, N. R., Syafitri, A., Siswantoro, F., Kejora, P. A., Gulo, S. D., & Sulistiyorini, D. (2022). Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan Paparan Gas Nitrogen Dioksida (NO_2) dan Sulfur Dioksida (SO_2) pada Masyarakat di Wilayah Yogyakarta. *Jurnal Sanitasi Lingkungan*, 2(1), 51-59.
- Muarifah, A. (2019). Pengendalian Pencemaran Lingkungan. *Malang: Media Nusa Creative (MNC Publishing)*.
- Safira, M. C., Fauzan, A., & Adiwibawa, M. A. S. (2022). Interpolasi Polutan Nitrogen Dioksida (NO_2) di Kota Yogyakarta dengan Pendekatan Ordinary Kriging dan Inverse Distance Weighted. *Jurnal Aplikasi Statistika & Komputasi Statistik*, 14(2), 55-66.
- Samiaji, T. (2012). Karakteristik gas N_2O (Nitrogen Oksida) di atmosfer indonesia. *Berita Dirgantara*, 13(4).
- Sari, P. N. (2024). Zat-zat Pencemar di Udara yang Berbahaya Bagi Kesehatan. LPPM Unand. <https://lppm.unand.ac.id/zat-zat-pencemar-di-udara-yang-berbahaya-bagi-kesehatan/>
- Siburian, S. (2020). Pencemaran Udara dan Emisi Gas Rumah Kaca. *Kreasi Cendekia Pustaka*.
- Takuloe, S. R. R., Jusuf, H., Nakoe, M. R., & Arsyad, N. (2023). Risiko Paparan Sulfur Dioksida (SO_2) Pada Petugas Stasiun Pengisian Bahan Bakar Umum (SPBU). *Jambura Journal of Epidemiology*, 2(2), 50-58.
- Tampa, G. M., Maddusa, S. S., & Pinontoan, O. R. (2020). Analisis Kadar Sulfur Dioksida (SO_2) Udara di Kawasan Terminal

- Malalayang Kota Manado Tahun 2019. *Indonesian Journal of Public Health and Community Medicine*, 1(3), 87-92.
- Yunita, R. D., & Kiswandono, A. A. (2017). Kajian indeks standar pencemar udara (ISPU) sulfur dioksida (SO₂) sebagai polutan udara pada tiga lokasi di kota Bandar Lampung. *Analit: Analytical and Environmental Chemistry*, 2(1), 1-11.
- Zaman, K., Muhammadiyah, M. (2021). Kesehatan Lingkungan Perspektif Kesehatan Masyarakat. *Surabaya: Global Aksara Pers*.

BIODATA PENULIS



Dr Drs Agus Rokot, SPd., M.Kes lahir di Liwutung, Minahasa, pada 27 Agustus 1963. Menyelesaikan, Guru Ilmu Pengetahuan Alam (PGSMTP) Negeri Manado (1983), S1 Kimia (IKIP) Negeri Manado, (1990) S1 Psikologi (IKIP) Negeri Manado, (1997), S2 Kes. Mas. (UNSRAT) Manado (2004) dan S3 Universitas Negeri Jakarta (2015). Saat ini penulis sebagai Dosen di Poltekkes Kemenkes Manado.

BAB 10

Partikulat Tersuspensi

Marlyn M. Pandean, S.Pd., SKM., MPH

A. Pendahuluan

Partikulat atau partikel tersuspensi (*Suspended Particulate Matter*) merupakan bahan pencemar udara terdiri dari zat padat/cair yang halus, dan tersuspensi di udara, misalnya embun, debu, asap yang bersumber dari debu hembusan angin atau dari gunung berapi, kebakaran hutan, dari emisi cerobong asap proses industri atau pabrik, pembakaran batu bara, minyak bumi, kendaraan bermotor, partikulat jelaga, pabrik semen, pembakaran sampah, industri meubel/pertukangan kayu, pabrik tepung dan lain-lain yang terhambur dan melayang bahkan dapat tetap tinggal di udara. Partikulat mempunyai ukuran yang dapat terlihat oleh mata dan ukuran yang sangat kecil yang hanya bisa dilihat dengan mikroskop electron. Partikulat tersuspensi saat ini menjadi perhatian dunia karena perannya dalam menurunkan kualitas udara yang kita hirup serta meningkatnya angka kematian. Paparan partikulat halus dapat mengiritasi mata, kulit serta saluran pernapasan juga dapat mengurangi efektivitas paru-paru dalam menyerap oksigen ke dalam darah sehingga dapat membuat kita merasa kesulitan bernapas atau kekurangan oksigen. Menurut jurnal *Airborne Particles in Indoor and Outdoor Environments*, bahwa paparan partikulat dapat meningkatkan risiko gangguan pernapasan, kanker paru-paru, penyakit kardiovaskular bahkan terbukti empat juta kematian dini per tahun pada skala global (Singh A & Rastogi N., 2022).

Berdasarkan fenomena dan bahaya penyakit yang disebabkan oleh partikulat tersuspensi ini menjadi penting untuk kita konsentrasi bersama dalam mengupayakan tindakan pengendalian untuk mengantisipasi masalah polutan ini sedini mungkin.

B. Konsep Partikulat Tersuspensi

1. Pengertian

a. Partikulat Tersuspensi

Partikulat adalah pencemar udara yang dapat berada bersama-sama dengan bahan atau bentuk pencemar lainnya. Partikel dapat diartikan secara murni atau sempit sebagai bahan pencemar udara yang berbentuk padatan (Prabowo, K, dkk., 2011). Partikulat juga dikenal sebagai partikel halus dan jelaga yang merupakan subdivisi kecil dari material padat tersuspensi dalam gas atau cair.

Partikel debu melayang (*Suspended Particulate Matter*) adalah suatu kumpulan senyawa dalam bentuk padatan maupun cair yang tersebar di udara dengan diameter yang sangat kecil, kurang dari satu mikron sampai dengan maksimal 500 mikron. Ukuran partikel debu yang membahayakan kesehatan umumnya berkisar antara 0,1 mikron sampai 10 mikron. Partikel debu tersebut akan berada di udara dalam waktu yang relatif lama dalam keadaan yang melayang-layang dan dapat masuk ke dalam tubuh manusia melalui saluran pernafasan. Selain dapat berpengaruh negatif pada kesehatan, partikel debu juga mengganggu daya tembus pandang mata dan juga dapat mengadakan berbagai reaksi kimia di udara (Soedjono, dkk., 1991). Partikulat adalah zat padat/cair yang halus, dan tersuspensi di udara, misalnya embun, debu, asap, fumes dan fog (Sumirat, J., 2011). Partikel tersuspensi menurut *Encyclopedia of Public Health*) adalah bahan padat atau cair yang dapat melayang (2024). Particulate Matter (PM_{2,5})

adalah partikel udara yang berukuran lebih kecil dari atau sama dengan $2,5\ \mu\text{m}$ (mikrometer) (<https://www.bmkg.go.id/kualitas-udara/informasi-partikulat-pm25.bmkg>).

b. Suspensi

Suspensi adalah suatu campuran fluida yang mengandung partikel padat. Atau dengan kata lain campuran heterogen dari zat cair dan zat padat yang dilarutkan dalam zat cair tersebut. Partikel padat dalam sistem suspensi umumnya lebih besar dari 1 mikrometer sehingga cukup besar untuk memungkinkan terjadinya sedimentasi. Padatan pada suspensi akan mengalami pengendapan/sedimentasi walaupun tidak terdapat gangguan. Singkatnya, suspensi merupakan campuran yang masih dapat dibedakan antara pelarut dan zat yang dilarutkan. Suspensi cairan atau padatan (dalam jumlah kecil) di dalam gas disebut sebagai aerosol. Contoh sistem aerosol dalam kehidupan manusia adalah debu di atmosfer.

2. Partikulat sebagai salah satu pencemar udara yang utama dapat dibagi menjadi tiga, yaitu:
 - a. Partikel dapat hidup (*Viable*), seperti mikroorganisme; bacteria, jamur, spora, serbuk dari tumbuh-tumbuhan. Pengaruhnya pada kesehatan ialah allergie, asma, infeksi jamur.
 - b. Partikel padat tidak dapat hidup (*Nonviable*), seperti debu dan asap (debu dari gunung berapi) dan dari kegiatan manusia (pembakaran batubara, kayu, dan lain-lain); Pengaruhnya pada kesehatan manusia ialah luka pada saluran pernafasan dan dapat juga menyebabkan kanker. Partikel cair adalah kabut.
 - c. Radioaktif (Soedjono, dkk., 1991); terdiri dari partikel-partikel alfa dan partikel-partikel beta; berkenaan dengan materi yang berbentuk partikulat, bahaya yang utama ditimbulkan oleh pengendapan (deposisi)

partikulat radioaktif dalam paru-paru (Cember H, 1983).

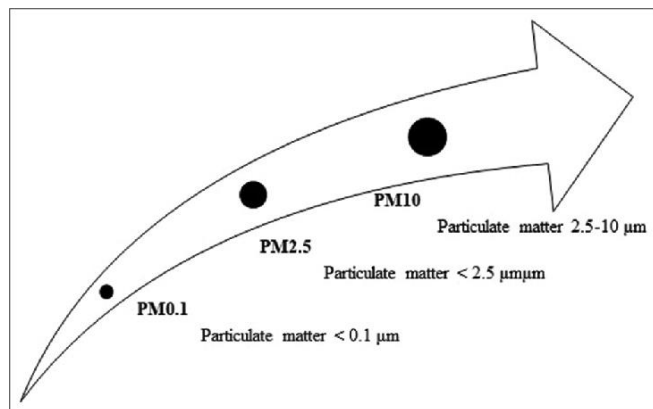
3. Klasifikasi menurut keadaan fisik polutan Partikulat

Polutan partikulat berbentuk padat dan cair, yang dikelompokkan dalam:

- a. *Aerosol* adalah istilah umum yang menyatakan adanya partikel yang terhambur dan melayang di udara; Partikel padat/cair yang dapat tetap tinggal di udara oleh sebab ukurannya yang kecil ($<1\ \mu\text{m}$).
- b. *Fog* atau kabut adalah aerosol yang berupa butiran-butiran air yang berada di udara; *Fog* adalah kondensasi uap air di udara.
- c. *Smoke* atau asap aerosol yang berupa campuran antara butir padatan dan cairan yang terhambur melayang di udara; partikel padat atau cair yang berdiameter $<1\ \mu\text{m}$.
- d. *Dust* atau debu adalah aerosol yang berupa butiran padat yang terhambur dan melayang di udara karena adanya hembusan angin; partikel padat yang berdiameter $0,1\text{-}1000\ \mu\text{m}$.
- e. *Mist* artinya mirip dengan kabut. Penyebabnya adalah butiran-butiran zat cair yang terhambur dan melayang di udara (bukan butiran air); *Mist* adalah partikel cair yang berdiameter $> 100\ \mu\text{m}$.
- f. *Fume* artinya mirip dengan asap hanya saja penyebabnya adalah aerosol yang berasal dari kondensasi uap panas (khususnya uap logam); *Fume* adalah partikel padat berdiameter $0,1 - 1\ \mu\text{m}$. Sebagai akibat dari proses industri pencairan benda padat seperti Pb (Soedjono, dkk., 1991).
- g. *Plume* adalah asap yang keluar dari cerobong asap suatu industri (pabrik).
- h. *Haze* adalah setiap bentuk aerosol yang mengganggu pandangan udara.
- i. *Smog* adalah bentuk campuran antara *smoke* dan *fog*. Istilah ini banyak digunakan di Inggris dan di Amerika, sehingga ada istilah *London smog* dan *Los Angeles smog*.

- j. *Smaze* adalah istilah yang banyak dipakai di Amerika (khususnya di New York) untuk mengartikan campuran antara *smoke* dan *haze* (Wardhana, W.A., 2001).

Jika diameternya cukup kecil untuk menjaga kestabilan di udara atau gas lainnya, maka partikel tersebut membentuk aerosol (fase partikulat aerosol). Partikel tersuspensi di udara dapat berkisar kurang dari $0,005\ \mu\text{m}$ (misalnya molekul kecil) hingga $100\ \mu\text{m}$ diameternya. Partikel debu yang lebih besar dan bahkan terlihat dalam kisaran hingga $1000\ \mu\text{m}$ cenderung mengendap dengan sangat cepat. Partikel yang dapat dihirup adalah partikel dalam kisaran $0,005\text{--}10\ \mu\text{m}$ tetapi hanya partikel dalam kisaran $0,1\text{--}10\ \mu\text{m}$ yang lebih menarik karena partikel yang terhirup kurang dari $0,1\ \mu\text{m}$ dapat dengan mudah dihembuskan.



Gambar 1. Dimensional types of particulate matter: These are ultrafine particulate matter (PM0.1) with an aerodynamic diameter less than $0.1\ \mu\text{m}$, fine particulate matter (PM1) between 0.1 and $2.5\ \mu\text{m}$, and coarse particulate matter (PM10) between 2.5 and $10\ \mu\text{m}$.

Sumber: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-implementation-regulatory-actions>

4. Sumber Pencemar Udara dari Partikulat

Pencemaran Udara dari Partikulat, berasal dari:

- a. Sumber alamiah partikulat atmosferik adalah debu yang memasuki atmosfer karena terbawa oleh angin. Contoh: kebakaran hutan embusan debu oleh angin, bencana gunung berapi dan lain-lain.
- b. Sumber artifisial debu terutama adalah pembakaran apakah itu pembakaran batu bara, minyak bumi, dan lain-lainnya yang dapat menghasilkan jelaga partikulat yang terdiri atas karbon dan lain-lain zat yang melekat padanya. Sumber lain adalah segala proses yang menimbulkan debu seperti pabrik semen, industri metalurgi, industri konstruksi, industri bahan makanan, dan juga kendaraan bermotor (Sumirat, J., 2011).



Gambar 2. Pencemaran Udara

Sumber:

<https://www.istockphoto.com/id/foto/katastrofi-ekologis-gm1141520118-305861595>

5. Klasifikasi menurut susunan kimia bahan pencemar

- a. Inorganik.

Gas atau *particulate* yang tidak mengandung unsur carbon dan umumnya apabila mengandung unsur tersebut, tidak dikombinasikan dengan Hidrogen. Contoh: CO, SO₂, CO₃, NO₂, dan lain-lain.

b. Organik.

Gas, *Vapor* atau *particulate* yang tersusun dari unsur Carbon, yang mempunyai kombinasi dengan hydrogen dan mungkin juga dengan unsur-unsur inorganic yang lain. Contoh: Methane, benzene, ethylene (Soedjono, dkk., 1991).

6. Pengukuran Parameter Kimia dari Partikel Debu

a. Pengukuran konsentrasi $PM_{2.5}$ menggunakan metode penyinaran sinar Beta (*Beta Attenuation Monitoring*) dengan satuan mikrometer per meter kubik ($\mu m/m^3$).

b. Metode Gravimetri

Metode ini merupakan metoda yang telah dianjurkan dalam rancangan Baku Mutu Lingkungan di Indonesia, disamping itu, WHO juga telah menganjurkan pemakaian metoda ini untuk pengukuran partikel debu (Soedjono, dkk., 1991).

7. Apa Standar Kualitas Udara Partikulat (PM)?

Standar Kualitas Udara Ambien Nasional (NAAQS) untuk polusi PM menetapkan jumlah maksimum PM yang ada di udara luar ruangan. Ada beberapa standar untuk PM_{10} dan $PM_{2.5}$ untuk membatasi polusi PM di udara, melindungi kesehatan manusia dan lingkungan. *Clean Air Act* mendorong EPA untuk menetapkan Standar Kualitas Udara Ambien Nasional (NAAQS) untuk enam kriteria polutan; termasuk polusi partikel (partikulat). EPA bekerja sama dengan mitra di lembaga kualitas udara negara bagian, nasional dan daerah untuk memenuhi standar ini.

8. Saran

Disarankan bahwa sangat penting bagi sumber-sumber partikel materi di atmosfer dipahami dengan baik dan diukur untuk menyediakan dasar yang kuat dalam merumuskan kebijakan untuk mengurangi pengaruh antropogenik terhadap iklim. Untuk merumuskan perkiraan awal beban dan dampak partikel materi, penting untuk mengetahui kepentingan relatif dari pembentukan partikel-partikel ini dan jalur yang relevan di atmosfer (Payra, S., dkk., 2022). Dengan mengikuti

standar kualitas udara sekitar, harapan hidup rata-rata dapat ditingkatkan di seluruh dunia (Sonwani S., & Shukla, A., 2022).

Motivasi untuk mitigasi partikel ambien (PM) oleh efeknya yang berbahaya terhadap kesehatan manusia. Strategi pengelolaan yang berhasil perlu mempertimbangkan sumber emisi PM dan gas prekursor (besarnya dan komposisi kimia emisi, dan konfigurasi sumber), transportasi dan dispersi di atmosfer, dan sensitivitas dan kerentanan penerima (kelompok populasi atau lingkungan fisik). Kerangka kerja ini mendukung alat penilaian dampak yang digunakan untuk menginformasikan lokasi dan desain pembangunan baru, serta kebijakan dan peraturan untuk pengelolaan sumber yang ada. Pengendalian emisi dapat diamanatkan melalui pendekatan perintah dan kendali, misalnya standar emisi, atau dapat diberi insentif melalui pendekatan berbasis pasar seperti skema pembatasan dan perdagangan dan biaya kemacetan. Secara teknis, teknologi yang matang tersedia untuk mengurangi emisi PM dan gas prekursor dari sebagian besar sumber titik stasioner dan non-stasioner. Pengendalian emisi dapat dilaksanakan sebelum pembakaran (misalnya dengan mengurangi kadar kotoran dalam bahan bakar atau menggantinya dengan bahan bakar yang lebih bersih), dengan memodifikasi proses pembakaran itu sendiri (seperti yang sering dilakukan untuk menurunkan emisi nitrogen oksida) dan dengan membuang polutan dari aliran gas buang setelah pembakaran dengan scrubber atau converter (Langerman, K,E., Feig, G,T.,&Kerneels Jaars, 2022).

DAFTAR PUSTAKA

- Cember, H. (1983) *Introduction to Health Physics*. Pengantar Fisika Kesehatan, edisi kedua; diterjemahkan oleh: Toekiman A. Semarang: IKIP Semarang Press.
- https://id.wikipedia.org/wiki/partikulat#cite_note-1 diakses pada 4 Desember 2024.
- <https://id.wikipedia.org/wiki/Suspensi>; diakses pada 4 Desember 2024.
- https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-1-4020-5614-7_3417 diakses pada tanggal 1 Desember 2024; *Encyclopedia of Public Health. Suspended Particles*.
- <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-implementation-regulatory-actions>; diakses pada 4 Desember 2024.
- <https://www.bmkg.go.id/kualitas-udara/informasi-partikulat-pm25.bmkg>; diakses pada 10 Desember 2024.
- <https://www.istockphoto.com/id/foto/katastrofi-ekologis-gm1141520118-305861595> diakses pada 4 Desember 2024.
- https://www.researchgate.net/figure/Dimensional-types-of-particulate-matter-These-are-ultrafine-particulate-matter-PM01_fig1_362501142, diakses pada 4 Desember 2024.
- Langerman, K. E., Feig, G.T., & Kerneels, J. (2022) *Mitigation and Management of Ambient Particulate Matter* https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-16-5387-2_11; diakses pada 2 Desember 2024.
- Payra, S., Gunwani, P., & Verma, S. (2022) *Emission Sources of Particulate Matter*. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-16-5387-2_2; diakses 2 Desember 2024.

- Prabowo, K., Budianto, W., Pramono, B. (2011) *Penyehatan Udara*. Serial Buku Ajar Kesehatan Lingkungan, Edisi: 2011. Jakarta: Politeknik Kesehatan Kementerian Kesehatan Jakarta II).
- Saini, M., Joon, M., & Saini, S. K. (2022) *Impacts and Responses of Particulate Matter Pollution on Vegetation*. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-16-5387-2_9; diakses pada 2 Desember 2024.
- Singh, A., & Rastogi, N. (2022) *Airborne Particles in Indoor and Outdoor Environments*. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-16-5387-2_4, diakses pada 1 Desember 2024.
- Soedjono, dkk. (1991) *Buku Pedoman Bidang Studi Pengawasan Pencemaran Lingkungan Fisik Pada Institusi Pendidikan Tenaga Kesehatan Lingkungan*. Jakarta: Pusdiknakes.
- Soemirat, J. (2011) *Kesehatan Lingkungan*. Yogyakarta: Gadjah Mada Press.
- Sonwani, S., & Shukla, A. (2022) *Airborne Particulate Matter*. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-16-5387-2_1, diakses pada 2 Desember 2024.
- Wardhana, W, A.(2011) *Dampak Pencemaran Lingkungan*. Yogyakarta: CV. Andi Offset.

BIODATA PENULIS



Marlyn M. Pandean, S.Pd., SKM., MPH lahir di Tondano, pada 20 Juli 1965. Penulis Menyelesaikan Pendidikan Diploma-III Akademi Kesehatan Lingkungan Jakarta, S1 Fakultas Pendidikan Universitas Negeri Manado, S1 Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Hasanuddin dan S2 Ilmu Kesehatan Masyarakat Fakultas Kedokteran Universitas Gadjah Mada. Saat ini penulis sebagai Dosen di Jurusan Kesehatan Lingkungan Politeknik Kesehatan Kemenkes Manado.

BAB 11

Pencemaran Udara: Karbon Monoksida, Timbal, dan Zat Toksik Lainnya

Bongakaraeng, SKM, M.Kes

A. Pendahuluan

Pencemaran udara telah menjadi salah satu tantangan lingkungan terbesar yang dihadapi oleh masyarakat modern. Pertumbuhan populasi, urbanisasi yang cepat, dan peningkatan aktivitas industri telah menyebabkan peningkatan signifikan dalam emisi polutan udara. Polutan ini tidak hanya membahayakan kesehatan manusia, tetapi juga mengancam ekosistem dan kualitas hidup secara keseluruhan. Oleh karena itu, pemahaman mengenai penyebab, dampak, dan solusi pencemaran udara sangat penting untuk menciptakan lingkungan yang lebih bersih dan sehat.

Karbon monoksida, timbal, dan zat toksik lainnya adalah beberapa polutan utama yang memberikan dampak serius pada kesehatan manusia dan lingkungan. Karbon monoksida, misalnya, adalah gas beracun yang dapat mengganggu suplai oksigen dalam tubuh. Timbal, di sisi lain, adalah logam berat yang dapat merusak sistem saraf, terutama pada anak-anak. Zat toksik lainnya, seperti nitrogen dioksida dan partikulat halus, juga berkontribusi pada berbagai penyakit kronis dan kerusakan lingkungan.

Tantangan yang dihadapi dalam mengurangi pencemaran udara tidak hanya terkait dengan teknologi dan kebijakan, tetapi juga kesadaran masyarakat. Banyak individu yang masih kurang memahami bahaya yang ditimbulkan oleh polusi udara dan langkah-langkah yang dapat diambil untuk

mengurangnya. Oleh karena itu, pendidikan dan kampanye kesadaran menjadi komponen kunci dalam upaya penanggulangan pencemaran udara.

Artikel ini bertujuan untuk memberikan penjelasan mendalam tentang berbagai aspek pencemaran udara, khususnya yang melibatkan karbon monoksida, timbal, dan zat toksik lainnya. Dengan memahami pengertian, klasifikasi, dampak, metode pengurangan, teknik pengukuran, dan kebijakan terkait, diharapkan kita dapat mengambil langkah-langkah konkret untuk melindungi kesehatan dan menjaga kelestarian lingkungan.

B. Pencemaran Udara: Karbon Monoksida, Timbal, dan Zat Toksik Lainnya

1. Pengertian

Pencemaran udara terjadi ketika substansi berbahaya, seperti gas, partikel, atau bahan kimia, hadir di atmosfer dalam konsentrasi yang dapat membahayakan makhluk hidup dan lingkungan. Tiga polutan utama yang sering menjadi perhatian adalah karbon monoksida (CO), timbal (Pb), dan zat toksik lainnya seperti nitrogen dioksida (NO₂), sulfur dioksida (SO₂), dan partikulat (PM_{2.5}, PM₁₀).

a. Karbon Monoksida (CO)

Karbon monoksida adalah gas tidak berwarna, tidak berbau, dan sangat beracun yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil yang tidak sempurna.

b. Timbal (Pb)

Timbal adalah logam berat yang dapat mencemari udara melalui aktivitas manusia, terutama dari penggunaan bahan bakar bertimbal dan proses industri.

c. Zat Toksik Lainnya

Zat toksik lainnya meliputi senyawa kimia seperti NO₂, SO₂, ozon (O₃) troposferik, dan partikulat kecil (PM_{2.5}, PM₁₀) yang dapat berasal dari kendaraan, industri, dan pembakaran biomassa.

2. Klasifikasi Polutan Udara

Polutan udara dapat diklasifikasikan menjadi:

- a. **Polutan Primer:** Langsung dilepaskan ke atmosfer, seperti karbon monoksida, sulfur dioksida, dan timbal.
- b. **Polutan Sekunder:** Terbentuk dari reaksi kimia antara polutan primer di atmosfer, seperti ozon troposferik.

3. Dampak Terhadap Kesehatan

a. **Karbon Monoksida (CO):**

Paparan karbon monoksida yang tinggi dapat menyebabkan keracunan serius karena gas ini menghalangi kemampuan darah untuk mengangkut oksigen ke seluruh tubuh. Ketika CO terhirup, ia akan menggantikan oksigen pada hemoglobin dalam darah, membentuk karboksihemoglobin, yang dapat menyebabkan pusing, sesak napas, lemas, hingga kehilangan kesadaran.

Pada tingkat paparan yang lebih rendah tetapi dalam jangka waktu yang lama, karbon monoksida dapat menyebabkan gangguan kesehatan kronis, seperti kerusakan pada organ vital seperti otak dan jantung. Gejala yang muncul meliputi sakit kepala, kelelahan kronis, gangguan memori, serta penurunan fungsi kognitif. Orang dengan kondisi kesehatan tertentu, seperti penyakit jantung atau pernapasan, ibu hamil, dan bayi, memiliki risiko lebih tinggi terkena dampak negatif dari paparan CO.

Keracunan karbon monoksida juga dapat berdampak fatal jika tidak segera ditangani. Kadar CO yang tinggi di lingkungan tertutup, seperti di rumah yang menggunakan pemanas tanpa ventilasi yang memadai atau mobil yang berjalan di ruang tertutup, dapat menyebabkan kematian mendadak. Oleh karena itu, penting untuk meningkatkan kesadaran akan bahaya karbon monoksida dan memastikan lingkungan memiliki ventilasi yang baik, serta

menggunakan detektor karbon monoksida untuk mencegah insiden yang mengancam jiwa.

b. **Timbal (Pb):**

Timbal (Pb) adalah logam berat yang sangat berbahaya bagi kesehatan manusia, terutama karena sifatnya yang toksik dan kemampuannya untuk terakumulasi di dalam tubuh. Paparan timbal dapat terjadi melalui udara, air, tanah, makanan, atau produk konsumen yang terkontaminasi. Ketika timbal masuk ke dalam tubuh, logam ini diserap dan didistribusikan ke berbagai jaringan, seperti otak, hati, ginjal, dan tulang. Salah satu dampak utama dari paparan timbal adalah kerusakan pada sistem saraf, terutama pada anak-anak, di mana paparan ini dapat menyebabkan gangguan perkembangan kognitif, penurunan IQ, hiperaktivitas, dan masalah perilaku. Pada orang dewasa, paparan timbal dapat menyebabkan hipertensi, gangguan fungsi ginjal, serta masalah reproduksi seperti penurunan kualitas sperma.

Selain itu, paparan timbal juga dapat menyebabkan anemia akibat gangguan pada produksi hemoglobin, karena logam ini menghambat enzim yang penting dalam proses pembentukan darah. Timbal juga berdampak pada sistem kardiovaskular dengan meningkatkan risiko penyakit jantung dan stroke. Dalam jangka panjang, akumulasi timbal di tulang dapat menyebabkan pelepasan kembali logam ini ke dalam darah selama periode stres fisik, seperti kehamilan atau osteoporosis, yang dapat memperburuk dampak kesehatannya. Karena efek toksiknya yang luas dan signifikan, banyak negara telah memberlakukan regulasi untuk mengurangi paparan timbal, seperti pelarangan timbal dalam bahan bakar, cat, dan mainan anak-anak.

c. **Zat Toksik Lainnya:**

- 1) **Nitrogen Dioksida (NO_2):** Menyebabkan iritasi saluran pernapasan dan memperburuk penyakit asma.
- 2) **Sulfur Dioksida (SO_2):** Memicu serangan asma dan menyebabkan hujan asam.
- 3) **Partikulat ($\text{PM}_{2.5}$, PM_{10}):** Menyebabkan penyakit pernapasan kronis dan kardiovaskular.
- 4) **Ozon Troposferik (O_3):** Merusak jaringan paru-paru dan memperburuk kondisi seperti bronkitis dan asma.

4. Teknik Pengukuran Pencemaran

Metode pengukuran pencemaran udara dapat dilakukan melalui berbagai pendekatan yang saling melengkapi. Pengurangan emisi kendaraan dapat dicapai dengan menggunakan kendaraan listrik dan bahan bakar ramah lingkungan, serta menerapkan uji emisi kendaraan secara rutin untuk memastikan kendaraan tidak mengeluarkan polutan berlebih. Pengendalian industri juga menjadi faktor penting, di mana industri perlu memasang alat pengendali emisi seperti scrubber, filter, atau katalis, serta mengadopsi teknologi bersih dalam proses produksinya untuk mengurangi dampak pencemaran. Selain itu, penghijauan dengan menanam lebih banyak pohon sangat efektif dalam menyerap polutan udara, membantu memperbaiki kualitas udara di lingkungan sekitar. Terakhir, kampanye kesadaran juga diperlukan untuk mengedukasi masyarakat tentang bahaya pencemaran udara dan langkah-langkah yang dapat diambil untuk menguranginya, guna menciptakan kesadaran dan partisipasi aktif dalam menjaga kebersihan udara.

5. Kebijakan Pengendalian Pencemaran

a. **Peraturan Pemerintah:**

- 1) Membatasi kadar emisi polutan yang diizinkan dalam aktivitas industri dan transportasi.

2) Memberlakukan standar baku mutu udara ambien.

b. **Penggunaan Energi Terbarukan:**

Penggunaan energi terbarukan merupakan salah satu langkah penting dalam pengendalian pencemaran lingkungan, terutama yang disebabkan oleh pembakaran bahan bakar fosil. Energi terbarukan seperti tenaga surya, angin, biomassa, dan hidroelektrik tidak hanya mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, tetapi juga secara signifikan mengurangi emisi gas rumah kaca yang menjadi penyebab utama pemanasan global dan perubahan iklim. Pembakaran bahan bakar fosil menghasilkan polutan seperti karbon dioksida (CO₂), sulfur dioksida (SO₂), dan nitrogen oksida (NO_x), yang berkontribusi pada pencemaran udara dan dampak kesehatan. Dengan beralih ke energi terbarukan, emisi ini dapat diminimalkan, sehingga kualitas udara dapat diperbaiki.

Selain itu, penggunaan energi terbarukan juga membantu mengurangi pencemaran air dan tanah. Pembangkit listrik yang berbasis fosil seringkali membutuhkan proses ekstraksi dan pemrosesan yang dapat mencemari sumber daya alam seperti air dan tanah, misalnya melalui tumpahan minyak atau limbah industri. Sebaliknya, energi terbarukan seperti tenaga angin dan surya menghasilkan sedikit atau bahkan tidak ada limbah berbahaya, sehingga berdampak lebih rendah terhadap ekosistem lokal. Dengan demikian, energi terbarukan menawarkan solusi yang lebih bersih dan ramah lingkungan dibandingkan dengan sumber energi konvensional.

Namun, meskipun energi terbarukan menawarkan banyak manfaat, transisi menuju penggunaan energi terbarukan secara menyeluruh memerlukan investasi yang signifikan dalam

infrastruktur, teknologi, dan kebijakan yang mendukung. Pemerintah dan sektor swasta perlu bekerja sama untuk menciptakan insentif yang mendorong pengembangan energi terbarukan, seperti subsidi atau insentif pajak bagi perusahaan yang berinvestasi dalam teknologi hijau. Selain itu, perlu ada peningkatan kesadaran masyarakat mengenai pentingnya beralih ke energi terbarukan sebagai langkah strategis dalam upaya global mengurangi pencemaran dan melindungi lingkungan.

c. **Insentif dan Sanksi:**

- 1) Memberikan insentif kepada industri ramah lingkungan.
- 2) Memberlakukan sanksi tegas bagi pelanggar regulasi emisi.

d. **Kerjasama Internasional:**

Kerjasama internasional memainkan peran krusial dalam pengendalian pencemaran lingkungan, mengingat pencemaran tidak mengenal batas negara. Isu-isu seperti perubahan iklim, polusi udara, dan pencemaran laut memerlukan pendekatan lintas negara untuk mencapainya. Melalui kesepakatan internasional seperti Protokol Kyoto dan Perjanjian Paris, negara-negara di dunia berkomitmen untuk mengurangi emisi gas rumah kaca yang berkontribusi besar terhadap pencemaran udara global. Kerjasama semacam ini memungkinkan negara-negara untuk berbagi teknologi, pengetahuan, dan sumber daya guna mencapai tujuan pengendalian pencemaran yang lebih efektif dan berkelanjutan.

Selain itu, kerjasama internasional juga penting dalam mengatasi masalah pencemaran lintas batas, seperti polusi udara yang dipengaruhi oleh emisi dari negara-negara yang berbatasan. Negara-negara yang tergabung dalam organisasi seperti United Nations Environment Programme (UNEP) dan World Health

Organization (WHO) dapat berkolaborasi untuk membangun kebijakan bersama dalam memantau dan mengurangi polusi. Misalnya, melalui pengaturan standar emisi internasional untuk kendaraan atau industri, negara-negara dapat lebih mudah mengimplementasikan peraturan yang konsisten untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat.

Kerjasama internasional juga melibatkan pendanaan untuk proyek-proyek yang berfokus pada teknologi bersih dan pemulihan lingkungan. Negara-negara maju sering memberikan bantuan keuangan dan teknis kepada negara berkembang melalui berbagai mekanisme, seperti Green Climate Fund (GCF) atau Global Environment Facility (GEF), untuk mendukung transisi ke energi terbarukan dan teknologi ramah lingkungan. Hal ini sangat penting untuk negara-negara yang mungkin memiliki keterbatasan sumber daya dalam mengembangkan solusi lingkungan yang berkelanjutan. Dengan kerjasama yang solid, komunitas internasional dapat mempercepat upaya bersama untuk mengatasi pencemaran lingkungan dan mencapai keberlanjutan global.

DAFTAR PUSTAKA

- Canter, L, W. 2016. Environmental Impact Assessment. New York: Mc. Graw Hill.
- Colls, J. 2012. Air Pollution, Second Edition. London : Spon Press
Taylor & Francis Group.
- Darmono. 2016. Lingkungan Hidup dan Pencemaran : Hubungan dengan Toksiologi Senyawa Logam. Jakarta: Universitas Indonesia Press.
- Environmental Protection Agency (EPA). 2011. National Ambient Air Quality Standarts. Diakses di <http://www.epa.gov/air/criteria.html> Pada 22 April 2022.
- Endro, Sutrisno. 2017. Analisis Dampak Kualitas Udara Karbon Monoksida (Co) Di Sekitar Jl. Pemuda Akibat Kegiatan Car Free Day Menggunakan Program Caline dan Surfer (Studi Kasus: Kota Semarang). Jurnal Teknik Lingkungan, Vol. 6, No. 1
- Fardiaz, Srikandi. 2012. Polusi Udara dan Air. Yogyakarta: Penerbit Kanisius.
- Mukono, H.J. 2018. Prinsip Dasar Kesehatan Lingkungan. Jurnal Kesehatan Lingkungan. Jil 2. No 2. Hal 129-142
- Nevers, N. D. 2015. Air Pollution Control Engineering. New York : Mc. Graw Hill
- Setyowidagdo, Soedomo, M. 2020. Pencemaran Udara. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Sujata, R., & Garg, A. (2018).** *Environmental pollutants and their effect on human health.* Journal of Environmental Sciences, 50(4), 50-63.
- World Health Organization (WHO).** (2021). *Air quality and health.* Retrieved from [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

BIODATA PENULIS



Bongakaraeng, SKM, M.Kes lahir di Rantekamiri Sulawesi Barat, pada 1 Juni 1968. Alumni S1 FKM UNHAS Makassar dan S2 UGM Yogyakarta. Pendidikan S1 sampai S2 memilih konsentrasi keilmuan bidang Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3). Sejak Tahun 2000 sampai sekarang, sebagai Pengampu mata kuliah K3, Sanitasi dan K3 Industri, Sanitasi dan K3 Rumah Sakit, Toksikologi Lingkungan, Penyehatan Udara serta mata kuliah Kewirausahaan di Poltekkes Kemenkes Manado.

BAB 12

Efek Pencemaran Udara Terhadap Kesehatan Saluran Pernafasan

Yozua Toar Kawatu, S.Pd, M.K.M

A. Pendahuluan

Udara memiliki peranan yang sangat penting bagi kehidupan manusia dan makhluk hidup lainnya. Udara merupakan sumber daya alam yang harus dilindungi keberlangsungannya hingga masa mendatang. Udara adalah salah satu faktor terpenting dalam kehidupan. Namun, seiring perkembangan zaman dan teknologi, kini kualitas udara di lingkungan mengalami penurunan. Penyebab pencemaran udara biasanya bersumber dari kegiatan manusia, meningkatnya pembangunan kota dan pusat-pusat industri dan lain sebagainya (Ivana dkk, 2017).

Perkembangan pembangunan yang sangat pesat saat ini merupakan faktor dominan penyebab pencemaran udara, khususnya dalam industri dan teknologi. Sementara sumber polusi luar ruangan, antara lain berasal dari transportasi, pembangkit listrik tenaga uap berbasis batubara, aktivitas industri, dan proses alam, seperti erupsi gunung berapi dan kebakaran hutan. Kualitas udara yang buruk di setiap daerah bisa disebabkan oleh sumber polusi yang berbeda.

Perubahan kualitas udara pada dasarnya disebabkan oleh zat-zat pencemar yang masuk ke dalam udara yang biasanya berbentuk gas-gas dan partikel kecil atau *aerosol*. Masuknya zat pencemar ini dapat terjadi secara alamiah seperti kebakaran hutan, debu meteorit, pancaran garam dari laut dan letusan gunung api. Pencemaran udara juga sebagian besar diakibatkan oleh aktivitas manusia, seperti aktivitas transportasi, industri, pembuangan sampah yang *terdekomposisi*

maupun yang dibakar serta kegiatan rumah tangga lainnya (Mallongi 2015).

Pencemaran udara dalam ruang (indoor air pollution) terutama rumah sangat berbahaya bagi kesehatan manusia, karena pada umumnya orang lebih banyak menghabiskan waktu untuk melakukan kegiatan di dalam rumah sehingga rumah menjadi sangat penting sebagai lingkungan mikro yang berkaitan dengan risiko dari pencemaran udara.

Kualitas udara di dalam ruang rumah dipengaruhi oleh berbagai faktor antara lain, bahan bangunan (misal; asbes), struktur bangunan (misal; ventilasi), bahan pelapis untuk furniture serta interior (pada pelarut organiknya), kepadatan hunian, kualitas udara luar rumah (ambient air quality), radiasi dari Radon (Rd), formaldehid, debu, dan kelembaban yang berlebihan. Selain itu, kualitas udara juga dipengaruhi oleh kegiatan dalam rumah seperti dalam hal penggunaan energi tidak ramah lingkungan, penggunaan sumber energi yang relatif murah seperti batubara dan biomasa (kayu, kotoran kering dari hewan ternak, residu pertanian), perilaku merokok dalam rumah, penggunaan pestisida, penggunaan bahan kimia pembersih, dan kosmetika. Bahan-bahan kimia tersebut dapat mengeluarkan polutan yang dapat bertahan dalam rumah untuk jangka waktu yang cukup lama.

Dampak dari adanya pencemar udara dalam ruang rumah terhadap kesehatan dapat terjadi baik secara langsung maupun tidak langsung. Gangguan kesehatan secara langsung dapat terjadi setelah terpajan, antara lain yaitu iritasi mata, iritasi hidung dan tenggorokan, serta sakit kepala, mual dan nyeri otot (fatigue), termasuk asma, hipersensitivitas, pneumonia, flu dan penyakit-penyakit virus lainnya. Sedangkan gangguan kesehatan secara tidak langsung dampaknya dapat terjadi beberapa tahun kemudian setelah terpajan, antara lain penyakit paru, jantung, dan kanker, yang sulit diobati dan berakibat fatal (USEPA, 2007). Selain penyakit tersebut di atas, *Bronkhitis kronis*, Penyakit Paru *Obstruktif Kronik* (PPOK), kanker paru, kematian Berat Bayi Lahir Rendah (BBLR), kematian bayi usia kurang dari satu minggu, otitis media dan ISPA, *tuberculosis* sering dijumpai pada lingkungan dengan kualitas udara dalam ruang yang tidak baik.

Hasil penelitian yang dilakukan oleh Arsyad dan Priyana di kota Bogor menunjukkan adanya hubungan kausal yang signifikan antara polusi udara dan kejadian penyakit saluran pernapasan. Konsentrasi partikulat PM2.5, SO2, dan NO2 memiliki dampak yang merugikan terhadap kesehatan penduduk. Penelitian ini juga menyoroti perbedaan efek polusi udara terhadap berbagai kelompok penduduk, seperti anak-anak, lansia, dan individu dengan kondisi kesehatan yang sudah melemah. Temuan ini memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang risiko kesehatan yang dihadapi oleh penduduk Kota Bogor akibat polusi udara (Arsyad dan Priyana, 2023)

Pencemaran udara dalam ruang rumah, khususnya di daerah perdesaan pada negara-negara berkembang, antara lain dikarenakan penggunaan bahan bakar padat sebagai energi untuk memasak dengan tungku sederhana/kompor tradisional. Bahan bakar tersebut menghasilkan polutan dalam konsentrasi tinggi dikarenakan terjadi proses pembakaran yang tidak sempurna. Keadaan tersebut akan memperburuk kualitas udara dalam ruang rumah apabila kondisi rumah tidak memenuhi syarat fisik, seperti ventilasi yang kurang memadai, serta tidak adanya cerobong asap di dapur. Gangguan kesehatan akibat pencemaran udara dalam ruang rumah sebagian besar terjadi di perumahan yang cenderung menggunakan energi untuk memasak dengan energi biomasa. .(Permenkes R.I, 2011).

B. Tinjauan Pencemaran Udara dan Efek terhadap Saluran Pernafasan.

1. Definisi Pencemaran Udara.

Pencemaran Udara secara umum, pengertian pencemaran udara merujuk pada suatu keadaan dimana terdapat substansi fisik, biologi, atau kimia di lapisan udara Bumi (atau di atmosfer) yang dapat mengganggu hingga membahayakan bagi manusia serta makhluk hidup lainnya.

Menurut Peraturan Pemerintah No. 41 Tahun 1999, 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. Pernyataan ini dilanjutkan dengan pengertian dimana pencemaran udara yaitu masuknya atau tercampurnya unsur-unsur berbahaya ke dalam atmosfer yang dapat mengakibatkan kerusakan lingkungan, gangguan pada kesehatan manusia serta secara umum menurunkan kualitas lingkungan.

2. Klasifikasi Pencemaran Udara

Menurut Siburian (2020), pencemaran udara dapat diklasifikasikan menjadi dua golongan yaitu pencemaran primer dan pencemaran sekunder.

a. Pencemaran primer

Pencemaran primer adalah zat polutan yang timbul secara langsung dari sumber pencemaran udara.

b. Pencemaran sekunder.

Pencemaran sekunder adalah substansi polutan yang terbentuk atas reaksi polutan primer. Di atmosfer. Contoh: *Sulfur dioksida*, *Sulfur monoksida* dan uap air akan menghasilkan *asam sulfurik*.

Kedua jenis polutan primer dan sekunder dapat bercampur dalam lapisan troposfer bagian bawah dan akan mengakibatkan interaksi di antara keduanya, yang dipengaruhi oleh sinar matahari, sehingga menimbulkan asap yang disebut asap fotokimia (Irianto, 2015).

Ahli lain menyatakan bahwa Polutan berdasarkan kejadiannya dibedakan menjadi dua yaitu bahan pencemar primer dan bahan pencemar sekunder

Menurut Mukono, (2011) Polutan primer adalah bahan yang dikeluarkan langsung dari sumber tertentu yang dapat teridentifikasi. Polutan primer dapat berupa:

a. Gas

Polutan yang berbentuk gas, biasanya terdiri atas senyawa karbon, *sulfur*, *nitrogen* dan *halogen*. Senyawa karbon dapat berupa hidrokarbon, hidrokarbon teroksigenasi, dan *karbon oksida* (CO dan CO₂). Senyawa *sulfur* biasanya berbentuk sulfur oksida. Senyawa *Nitrogen* dapat berupa *Nitrogen Oksida* dan *Nitrogen Amoniak*.

Adapun senyawa halogen dapat berupa *Fluor, Klorin, Hidrogen Klorida, Hidrokarbon terklorinasi dan Bromin*.

b. Partikel

Partikel biasanya mempunyai karakteristik spesifik seperti zat padat maupun suspensi aerosol cair. Bahan partikel biasanya dapat berasal dari proses kondensasi, proses dispersi, maupun proses erosi bahan tertentu. Polutan yang berbentuk partikel berupa asap (*smoke*) yang berasal dari pembakaran tidak sempurna, debu (*particulat matter*) yang berasal dari proses pemecahan suatu bahan, uap (*fumes*) yang merupakan hasil dari proses sublimasi, distilasi atau reaksi kimia lainnya dan kabut (*mist*) yang berasal dari reaksi kimia dan uap air.

Adapun Polutan sekunder biasanya terjadi karena adanya reaksi antara dua atau lebih bahan kimia di udara, misalnya reaksi foto kimia. Polutan ini memiliki sifat fisik dan sifat kimia yang tidak stabil. Polutan yang termasuk polutan sekunder adalah ozon, Peroxy Acyl Nitrat (PAN) dan formaldehid. Proses kecepatan dan arah reaksi dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti:

- 1) Konsentrasi relatif dari bahan reaktan
- 2) Derajat fotoaktivasi
- 3) Kondisi iklim
- 4) Topografi lokal dan adanya embun.

3. Zat Pencemar Udara

a. Sulfur Dioksida (SO₂)

1) Karakteristik SO₂

Sulfur dioksida (SO₂) merupakan polutan klasik, tidak berwarna, jernih, berbau tajam atau menyengat, dan membahayakan manusia. SO₂ merupakan gas buang yang larut dalam air dan dapat terabsorpsi didalam hidung dan sebagian besar saluran ke paru-paru. Gas ini juga bersifat *korosif*, sehingga secara langsung gas ini dapat merusak hewan dan tumbuhan (Mallongi, 2015). SO₂ adalah komponen

pencemar udara dengan jumlah yang paling banyak. Apabila gas ini bereaksi dengan uap air diudara mengakibatkan terjadinya hujan asam dan dapat mengakibatkan kerusakan pada bahan material, benda maupun tanaman (Masito, 2018).

Gas SO₂ stabil pada kondisi udara kering dalam beberapa hari, sedangkan pada kondisi udara yang lembab gas ini terikat pada uap air (Mallongi, 2015). *Sulfur dioksida (SO₂)* juga memiliki ikatan yang tidak stabil dan sangat reaktif terhadap gas lain. Ciri lain yang dimilikinya adalah dapat mengiritasi kulit, tidak mudah terbakar dan tidak mudah meledak. Gas ini juga sangat berbahaya bagi kesehatan terutama bagi penderita penyakit kronis sistem pernapasan dan kardiovaskular (Elmina, 2016).

2) Sumber SO₂

Sumber pencemaran SO₂ di udara 66% dapat berasal dari alam yaitu aktivitas gunung berapi dalam bentuk H₂S dan oksida, sedangkan sisanya berasal dari pembakaran batu arang, minyak bakar, kayu, kilang minyak, industri petroleum, industri asam sulfat, dan industri peleburan baja. SO₂ berasal dari oksidasi logam sulfida misalnya ZnS, PbS, dan CuS. Selain itu, Gas sulfur dioksida (SO₂) juga dapat berasal dari pembakaran bahan bakar fosil, seperti minyak bumi dan batu bara. Pembakaran batu bara pada pembangkit listrik, proses industri pembuatan kertas, peleburan logam-logam adalah aktivitas yang dapat mengemisikan SO₂ dalam konsentrasi yang relatif tinggi (Mallongi, 2015).

Selain itu, SO₂ yang berada di atmosfer juga dapat berasal dari kegiatan manusia. SO₂ secara rutin diproduksi sebagian produk sampingan dalam industri logam. Kegiatan manusia seperti membuang sampah berbahan sulfur (contohnya seperti: aluminium, tembaga, seng, besi dan tembaga) akan

melepaskan gas SO_2 , sehingga di TPA banyak ditemukan gas SO_2 akibat pembakaran benda mentah berbahan sulfur (Elmina, 2016).

b. Nitrogen Dioksida (NO_2)

1) Karakteristik NO_2

Nitrogen dioksida (NO_2) merupakan salah satu jenis polutan yang dapat menurunkan kualitas udara dan berdampak pada kesehatan manusia dan lingkungan. Gas ini merupakan kelompok polutan yang bersifat sangat reaktif dan merupakan bahan atau senyawa utama yang berperan dalam pembentukan ozon (O_3) di atmosfer (Serlina, 2020).

NO_2 merupakan polutan udara ambien bersama unsur nitrogen monoksida (NO) yang biasanya dihasilkan dari aktivitas manusia seperti pembakaran bahan bakar mesin kendaraan, pembakaran sampah, pembakaran batubara dan industri. Gas ini memiliki karakteristik berwarna cokelat dan berbau tajam (Masito, 2018).

2) Sumber NO_2

NO_2 biasanya berasal dari dua sumber yaitu akibat perbuatan manusia dan sumber alamiah. Setiap sumber menghasilkan Nox dengan jumlah yang berbeda-beda. Mobil dan sumber-sumber transportasi lainnya menyumbang sekitar setengah dari NOx yang dihasilkan. Selain itu, sumber NOx akibat perbuatan manusia biasanya berasal dari industri boiler, incinerator, turbin gas, dan mesin diesel di stasioner sumber, besi dan baja pabrik, pembuatan semen, kaca, kilang minyak, dan pembuatan asam nitrat. Sedangkan sumber alamiah nitrogen dioksida adalah termasuk petir, kebakaran hutan, kebakaran rumput pohon, semak-semak, rumput dan ragi (Mallongi, 2015).

c. Hidrogen Sulfida (H₂S)

1) Karakteristik H₂S

Hidrogen sulfida merupakan gas yang mudah terbakar, tidak berwarna, dengan rasa manis dan bau yang khas seperti telur busuk yang dapat beracun pada konsentrasi yang tinggi. Gas ini terbentuk dari dua unsur hidrogen dan satu unsur sulfur. Gas ini biasanya disebut sebagai gas telur busuk, gas asam, gas belerang atau uap bau. Gas hidrogen sulfida memiliki sifat dan karakteristik sebagai berikut (Mallongi, 2015):

- a) Tidak berwarna tetapi mempunyai bau khas seperti telur busuk pada konsentrasi rendah sehingga sering disebut sebagai gas telur busuk.
- b) Merupakan jenis gas beracun.
- c) Mudah terbakar dan meledak pada konsentrasi LEL (*Lower Explosive Limit*) 4,3% (43000 PPM) sampai UEL (*Upper Explosive Limit*) 46% (460000 PPM) dengan warna nyala api biru pada temperatur 500°F (260°C).
- d) Massa jenis gas H₂S lebih berat dari udara sehingga gas H₂S akan cenderung berkumpul di tempat atau daerah yang rendah. Massa jenis gas H₂S sekitar 20% lebih berat dari udara dengan perbandingan massa jenis H₂S sebesar 1,2 atm dan massa jenis udara sebesar 1 atm.
- e) Gas H₂S mudah larut (bercampur) dengan air (daya larut dalam air 437 ml/100ml air pada 0°C; 186 ml/100 ml air pada 40°C).
- f) Hidrogen sulfida bersifat korosif sehingga dapat mengakibatkan karat pada peralatan logam.

2) Sumber H₂S

Hidrogen sulfida terjadi secara alami maupun proses buatan manusia. Secara alami gas hidrogen sulfida berasal dari gunung berapi, belerang, ventilasi bawah, rawa-rawa, dan badan air yang tidak mengalir

serta minyak mentah dan gas alam. Gas ini juga dapat berasal dari saluran pembuangan limbah padat atau cair perkotaan, pabrik pengolahan limbah, pabrik pupuk, dan pabrik pulp atau kertas. Adapun sumber hidrogen sulfida dari industri seperti kilang minyak, pabrik gas alam, pabrik petrokimia, pabrik pengolahan makanan dan penyamakan kulit. Bakteri yang terdapat di mulut dan saluran pencernaan dapat menghasilkan hidrogen sulfida selama pencernaan makanan mengandung protein nabati atau hewani. Senyawa ini merupakan salah satu komponen utama dalam siklus sulfur alami.

4. Faktor yang Memengaruhi Pencemaran Udara

Ada beberapa yang memengaruhi pencemaran udara di atmosfer, diantaranya (Mukono, 2011):

a. Kelembapan

Kelembapan udara yang relatif rendah (<60%) di daerah yang tercemar SO₂ akan mengurangi efek korosif dari bahan kimia tersebut. Apabila kelembapan relatif tinggi di daerah yang tercemar SO₂ (80%) maka akan terjadi peningkatan efek korosi di daerah tersebut.

b. Suhu

Suhu yang rendah dipermukaan bumi dapat menyebabkan peningkatan kelembapan udara sehingga mengakibatkan terjadinya efek korosif bahan pencemar di daerah yang udaranya tercemar. Sedangkan pada suhu tinggi, maka kecepatan reaksi kimia bahan pencemar di udara juga meningkat.

c. Sinar matahari

Sinar matahari dapat memengaruhi bahan oksidan terutama O₃ di atmosfer. Keadaan tersebut dapat menyebabkan kerusakan bahan atau alat bangunan. Sinar matahari dapat meningkatkan rangsangan untuk merusak suatu bahan sehingga bahan tersebut mencemari udara.

d. Pergerakan udara

Pergerakan udara yang cepat dapat meningkatkan abrasi bahan bangunan. Efek pencemaran udara terhadap kesehatan manusia dapat terlihat baik secara cepat maupun lambat:

1). Efek cepat

Hasil studi epidemiologi menunjukkan bahwa peningkatan mendadak kasus pencemaran juga akan meningkatkan angka kasus kesakitan dan kematian akibat penyakit saluran pernapasan.

2). Efek lambat

Pencemaran udara diduga sebagai salah satu penyebab penyakit bronkitis kronis dan kanker paru primer. Penyakit yang disebabkan oleh pencemaran udara, antara lain emfisema paru, *black lung disease*, asbestosis, silikosis, bisinosis, dan pada anak-anak penyakit asma dan eksema. Pada konsentrasi tertentu juga dapat mengakibatkan sakit tenggorokan, batuk, sulit bernapas dan kelumpuhan pernapasan.

5. Tinjauan Umum tentang Keluhan Pernapasan

Udara dapat menjadi media penularan penyakit. Penyakit yang ditularkan melalui udara disebut sebagai penyakit bawaan udara. Penyakit tidak menular yang disebabkan oleh udara biasanya berasal dari kandungan bahan kimia yang terkandung didalamnya. Penyakit-penyakit yang disebabkan oleh pencemaran udara menyerupai penyakit pada umumnya. Misalnya penyakit jantung dan paru-paru akibat pencemaran udara menyerupai penyakit jantung dan paru-paru yang umum.

Secara umum efek pencemaran udara terhadap saluran pernapasan dapat menyebabkan pergerakan silia hidung menjadi lambat dan kaku bahkan dapat berhenti sehingga tidak dapat membersihkan saluran pernapasan akibat iritasi oleh bahan pencemar. Hal ini mengakibatkan produksi lendir akan meningkat sehingga menyebabkan

penyempitan saluran pernapasan dan rusaknya sel pembunuh bakteri di saluran pernapasan (Purnama, 2016).

Berikut gejala-gejala yang mungkin timbul pada sistem pernapasan akibat pencemaran udara (Elmina, 2016):

a. Influenza

Influenza, atau yang lebih dikenal dengan flu merupakan penyakit infeksi menular yang disebabkan oleh virus. Virus ini menyerang saluran pernapasan termasuk hidung, tenggorokan, cabang tenggorokan dan paruparu.

Penularan virus terjadi melalui udara pada saat berbicara, batuk dan bersin, influenza menular selama 1-2 hari sebelum gejalanya muncul sehingga penyebaran virus ini sulit untuk dihentikan. Penularan virus dapat terjadi melalui udara pada saat orang berbicara, batuk dan bersin.

b. Batuk

Batuk adalah suatu bentuk tindakan refleksi pertahanan tubuh yang sangat penting untuk meningkatkan pengeluaran sekresi mucus dan partikel dari jalan pernapasan dan melindungi terjadinya aspirasi terhadap masuknya benda asing, contohnya inhalasi partikel, patogen, akumulasi sekret, dan mediator terkait dengan peradangan. Setiap batuk terjadi melalui stimulasi refleks arkus yang kompleks. Hal ini diprakarsai oleh iritasi reseptor batuk yang berada pada trakea, carina, titik percabangan saluran udara besar, dan saluran udara yang lebih kecil di bagian distal, dan juga di dalam faring.

c. Batuk Berdarah

Batuk berdarah adalah batuk yang disertai darah. Jika darahnya sedikit dan tipis kemungkinan adalah luka lecet dari saluran napas, karena batuk yang terlalu kuat. Batuk berdarah dengan darah yang tipis dan sedikit bisa terjadi pada penderita maag kronis dimana maag penderita mengalami luka akibat asam lambung yang berlebih. Batuk berdarah dengan jumlah darah yang

banyak biasanya terjadi pada penderita TB paru (*tuberculosis* paru) yang sudah lama dan tidak diobati. Batuk berdarah pada penderita TBC merupakan suatu hal gawat darurat (*emergency*) karena dapat menyebabkan kematian dan harus mendapat pertolongan yang cepat.

d. Sesak napas

Sesak napas adalah kesulitan bernapas atau disebut sebagai dispnea. Sesak napas dapat disebabkan oleh kondisi respirasi (saluran napas dan paru-paru) atau sirkulasi (jantung dan pembuluh darah). Sesak napas merupakan gejala klinis dari gangguan pada saluran pernapasan. Sesak napas bukan merupakan penyakit, tetapi merupakan manifestasi dari penyakit yang menyerang saluran pernapasan. Penyakit yang bisa menyebabkan sesak napas sangat banyak sekali mulai dari infeksi, alergi, inflamasi bahkan keganasan.

e. Nyeri Dada

Nyeri dada merupakan suatu gangguan kesehatan yang dapat menimbulkan ketidaknyamanan pada bagian dada. Hal ini biasanya dikenal dengan istilah *asfiksia* yaitu ketidakmampuan seseorang untuk melakukan pernapasan normal, yang pada keadaan parah akan menyebabkan kematian

f. Sakit Tenggorokan

Radang tenggorokan adalah infeksi pada tenggorokan (tekak) dan kadangkala amandel. Penyebab lainnya di antaranya adalah adanya polusi udara, alergi musiman dan merokok.

g. Perih pada Hidung

Terjadinya perih pada hidung atau iritasi yang terjadi pada hidung merupakan salah satu gangguan saluran pernapasan yang disebabkan akibat alergi ataupun infeksi dan peradangan pada hidung akibat alergi.

h. Berkurangnya kemampuan mencium bau.

Berkurangnya kemampuan mencium bau merupakan gangguan kemampuan mencium bau yang

diakibatkan karena lamanya waktu paparan pada indra penciuman (hidung) terhadap zat-zat kimia yang terdapat di suatu tempat sehingga menyebabkan kurangnya kemampuan mencium bau yang dikarenakan penderitanya mengalami kehilangan sensitifitas bau tertentu.

6. Penyakit Saluran Pernapasan dan Faktor Risiko.

Penyakit saluran pernapasan mencakup berbagai kondisi yang mempengaruhi saluran udara, paru-paru, dan sistem pernapasan (Kansen et al., 2020). Penyakit pernapasan yang umum termasuk asma, gangguan peradangan kronis yang ditandai dengan penyempitan saluran napas dan episode batuk, mengi, dan sesak napas yang berulang. Penyakit paru obstruktif kronik (PPOK) adalah penyakit pernapasan lain yang signifikan, terutama disebabkan oleh merokok tetapi juga dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti polusi udara. PPOK ditandai dengan keterbatasan aliran udara yang progresif dan merupakan penyebab utama morbiditas dan mortalitas di seluruh dunia. Penyakit saluran pernapasan lainnya termasuk bronkitis, pneumonia, dan infeksi saluran pernapasan (le Roux et al., 2019).

Faktor risiko penyakit saluran pernapasan termasuk kecenderungan genetik, merokok, paparan pekerjaan, polusi udara dalam ruangan (misalnya, dari penggunaan bahan bakar padat untuk memasak dan memanaskan), dan polusi udara di luar ruangan. Di antara faktor-faktor ini, polusi udara telah muncul sebagai faktor risiko lingkungan yang signifikan untuk pengembangan dan eksaserbasi penyakit pernapasan. Efek merugikan dari polusi udara pada sistem pernapasan dapat bermanifestasi sebagai peningkatan gejala pernapasan, penurunan fungsi paru-paru, dan peningkatan kerentanan terhadap infeksi pernapasan (Chen et al., 2020).

Bukti ilmiah terbaru menunjukkan bahwa terdapat hubungan sebab akibat antara paparan polusi udara dan

infeksi saluran pernapasan bawah akut, penyakit paru obstruktif kronik, asma, dan kanker paru-paru (Maio et al., 2023). Bahkan pada tingkat konsentrasi polutan yang sangat rendah, paparan polusi udara baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang memiliki dampak serius terhadap kesehatan pernapasan, dan tidak ada ambang batas yang dapat dideteksi di bawahnya yang dapat dianggap aman (Maio et al., 2023).

DAFTAR PUSTAKA

- Arsyad, Khalida Akmatul., Priyana, Yana., 2023, “Studi Kausalitas antara Polusi Udara dan Kejadian Penyakit Saluran Pernapasan pada Penduduk Kota Bogor, Jawa Barat, Indonesia”, STIKES Sukabumi; Jurnal Multidisiplin West Science. Vol. 02, No. 06, Juni, pp. 462 ~ 472 **Journal homepage:** <https://wnj.westscience-press.com/index.php/jmws>
- Chen, G., Xu, K., Sun, F., Sun, Y., Kong, Z., & Fang, B. (2020). Risk Factors of Multidrug-Resistant Bacteria in Lower Respiratory Tract Infections: A Systematic Review and Meta-Analysis. *The Canadian Journal of Infectious Diseases & Medical Microbiology = Journal Canadien Des Maladies Infectieuses et de La Microbiologie Medicale*, 2020, 7268519. <https://doi.org/10.1155/2020/7268519>
- Elmina E., 2016. *Analisis kualitas udara dan keluhan kesehatan yang berkaitan dengan saluran pernapasan pada pemulung di Tempat Pembuangan Akhir Sampah (TPA) Terjun Kecamatan Medan Marelan tahun 2016*. Skripsi. Fakultas Kesehatan Masyarakat. Universitas Sumatera Utara, Medan.
- Irianto, 2015, “Memahami Berbagai Macam Penyakit”, Bandung; CV> Alfabeta
- Ivana, S. C., Rachmaniyah, & Nurmayanti, D. (2017). *Kadar Gas Hidrogen Sulfida (H₂S) Dan Keluhan Subyektif Pemulung TPA Benowo Surabaya Tahun 2016*. *Gema Kesehatan Lingkungan*, 15(1), 52-58.
- Kansen, H. M., Lebbink, M. A., Mul, J., van Erp, F. C., van Engelen, M., de Vries, E., Prevaes, S. M. P. J., Le, T. M., van der Ent, C. K., & Verhagen, L. M. (2020). *Risk factors for atopic diseases and recurrent respiratory tract infections in children*. *Pediatric Pulmonology*, 55(11), 3168-3179. <https://doi.org/10.1002/ppul.25042>
- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2023). *Situasi Kesehatan Indonesia Tahun 2022*. Jakarta: Kementerian Kesehatan Republik Indonesia.

- le Roux, D. M., Nicol, M. P., Myer, L., Vanker, A., Stadler, J. A. M., von Delft, E., & Zar, H. J. (2019). *Lower Respiratory Tract Infections in Children in a Well-vaccinated South African Birth Cohort: Spectrum of Disease and Risk Factors*. *Clinical Infectious Diseases : An Official Publication of the Infectious Diseases Society of America*, 69(9), 1588–1596. <https://doi.org/10.1093/cid/ciz017>
- Maio, S., Sarno, G., Tagliaferro, S., Pirona, F., Stanisci, I., Baldacci, S., & Viegi, G. (2023). Outdoor air pollution and respiratory health. *The International Journal of Tuberculosis and Lung Disease : The Official Journal of the International Union against Tuberculosis and Lung Disease*, 27(1), 7–12. <https://doi.org/10.5588/ijtld.22.0249>
- Mallongi, A., 2015. *Bahan pencemar toxic di udara dan upaya pengendaliannya*. Yogyakarta : Penerbit WR.
- Mukono, H. (2011). *Aspek Kesehatan Pencemaran Udara*. Airlangga University Press.
- Masito A., 2018, “Analisis Risiko Kualitas Udara Ambien (NO₂ Dan SO₂) dan Gangguan Pernapasan pada Masyarakat di Wilayah Kalianak Surabaya”. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*. 2018; 10: 394-401.
- Peraturan Pemerintah No.41 Tahun 1999 *Tentang Pengendalian Pencemaran Udara*.
- Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 1077/Menkes/Per/V/2011 *Tentang Pedoman Penyehatan Udara Dalam Ruang Rumah*
- Purnama SG. *Buku Ajar Penyakit Berbasis Lingkungan* [Internet]. GMD ebook; 2016. Available from: https://diglib.mahardika.ac.id/index.php?p=show_detail&id=2543
- Serlina, Y. (2020). *Pengaruh Faktor Meteorologi Terhadap Konsentrasi NO₂ di Udara Ambien (Studi Kasus Bundaran Hotel Indonesia DKI Jakarta)*. *Jurnal Serambi Engineering*, 5(3); 1128-1235.
- Siburian, S. (2020). *Pencemaran Udara dan Emisi Gas Rumah Kaca*. https://www.google.co.id/books/edition/Pencemaran_

Udara_dan_Emisi_Gas_Ruma

h_Kac/FRsMEAAAQBAJ?hl=id&gbpv=0

World Health Organization (WHO). (2021). *Air pollution and health*.

Retrieved

from

[http://repository.unika.ac.id/13294/5/12.60.0248%20Ch
ristina%20Thiveny%20Putrianti%20BAB%20IV.pdf](http://repository.unika.ac.id/13294/5/12.60.0248%20Christina%20Thiveny%20Putrianti%20BAB%20IV.pdf)

BIODATA PENULIS



Yozua Toar Kawatu, S.Pd, M.K.M.

Lahir di Surabaya, 22 Mei 1965. Menyelesaikan pendidikan D-I KesLing SPPH (Sekolah Pembantu Penilik Hygiene) Regional Manado (1986), D-III APK-TS Jakarta (1993), S1 Fakultas Ilmu Pendidikan Universitas Negeri Manado (2006) dan S2 di Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Indonesia (Prodi Ilmu Kesehatan Masyarakat - Peminatan Epidemiologi Kesehatan Lingkungan-2012) Sampai saat ini penulis sebagai Dosen Tetap di Program Studi D-III Sanitasi & Program Studi S1 Terapan Sanitasi Lingkungan Jurusan Kesehatan Lingkungan Poltekkes Kemenkes Manado.

BAB 13

Efek Polusi Udara terhadap Kanker Kulit

Jon W. Tangka, M.Kep.,Ns.Sp.Kep.M.B

A. Pendahuluan

Polusi udara merupakan salah satu masalah lingkungan yang paling mendesak di dunia saat ini. Dampak polusi udara tidak hanya terbatas pada masalah pernapasan, tetapi juga dapat mempengaruhi kesehatan kulit. Buku ini akan menguraikan secara rinci hubungan antara polusi udara dan kanker kulit, serta menjelaskan konsep-konsep dasar yang mendasari hubungan ini.

Polusi udara memiliki dampak yang luas terhadap kesehatan masyarakat, termasuk risiko peningkatan kanker kulit. Polusi udara yang dihasilkan dari berbagai sumber, seperti emisi kendaraan bermotor dan kegiatan industri, mengandung partikel-partikel berbahaya yang dapat menembus lapisan kulit. Partikel ini tidak hanya menyebabkan kerusakan langsung pada sel-sel kulit tetapi juga meningkatkan sensitivitas kulit terhadap sinar ultraviolet (UV) yang berasal dari matahari. Kerusakan ini dapat memicu perubahan pada DNA sel-sel kulit yang akhirnya dapat berkembang menjadi kanker kulit. Oleh karena itu, memahami hubungan antara polusi udara dan kanker kulit sangat penting untuk pencegahan dan mitigasi risiko.

Pada kenyataannya, berbagai penelitian telah menunjukkan adanya korelasi yang signifikan antara polusi udara dan kejadian kanker kulit. Beberapa studi epidemiologi menyebutkan bahwa paparan jangka panjang terhadap polutan

udara, seperti partikulat halus (PM_{2.5}), ozon, dan nitrogen dioksida, berkontribusi terhadap peningkatan insiden kanker kulit. Selain itu, polusi udara juga diketahui memperburuk kondisi kulit yang sudah terpapar sinar UV, sehingga meningkatkan kemungkinan terjadinya mutasi genetik. Penting bagi para peneliti, praktisi kesehatan, dan masyarakat untuk bersama-sama mengambil langkah-langkah preventif dan korektif guna mengurangi paparan polusi udara dan melindungi kesehatan kulit.

B. Konsep Polusi Udara dan Kanker Kulit

1. Polusi Udara

- a. Sumber Polusi Udara: Polusi udara berasal dari berbagai sumber, baik alami maupun buatan manusia. Sumber-sumber ini termasuk emisi kendaraan bermotor, pembakaran bahan bakar fosil, kegiatan industri, dan kebakaran hutan.
- b. Jenis Polutan Udara: Jenis-jenis polutan udara termasuk Particulate Matter (PM), Ozon (O₃), Nitrogen Dioksida (NO₂), Sulfur Dioksida (SO₂), dan Volatile Organic Compounds (VOCs).
- c. Dampak Polusi Udara pada Kesehatan: Polusi udara dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan, termasuk penyakit pernapasan, penyakit kardiovaskular, dan kanker kulit.

2. Kanker Kulit

- a. Jenis Kanker Kulit: Ada beberapa jenis kanker kulit, termasuk karsinoma sel basal, karsinoma sel skuamosa, dan melanoma.
- b. Faktor Risiko Kanker Kulit: Faktor risiko termasuk paparan sinar UV, riwayat keluarga, kulit yang cerah, dan faktor lingkungan seperti polusi udara.
- c. Mekanisme Pengembangan Kanker Kulit: Menjelaskan bagaimana paparan sinar UV dan polutan udara dapat merusak DNA sel-sel kulit dan memicu perkembangan kanker.
- d. Hubungan Antara Polusi Udara dan Kanker Kulit

Sub bab ini akan menguraikan mekanisme bagaimana polusi udara dapat berkontribusi terhadap perkembangan kanker kulit:

1) Peran Particulate Matter (PM):

PM dapat menembus kulit dan menyebabkan stres oksidatif, yang dapat merusak DNA sel-sel kulit.

Particulate Matter (PM), khususnya PM_{2.5}, adalah partikel-partikel kecil yang dapat menembus lapisan kulit dan menyebabkan stres oksidatif. Stres oksidatif terjadi akibat ketidakseimbangan antara radikal bebas dan antioksidan dalam tubuh. Radikal bebas ini dapat merusak sel-sel kulit dengan cara mengikis molekul penting seperti protein, lemak, dan DNA.

Ketika PM_{2.5} menembus kulit, partikel-partikel ini dapat mengganggu fungsi organel subseluler seperti mitokondria, yang berkontribusi pada produksi energi sel. Gangguan ini menyebabkan sel-sel kulit mengalami apoptosis (pembusukan sel yang teratur) dan kerusakan DNA. Kerusakan DNA yang tidak diperbaiki dapat memicu mutasi genetik yang berpotensi berkembang menjadi kanker kulit.

Selain itu, PM_{2.5} juga dapat meningkatkan sensitivitas kulit terhadap sinar ultraviolet (UV), sehingga memperburuk efek merusak dari paparan sinar matahari. Hal ini dapat mempercepat proses penuaan kulit dan meningkatkan risiko kanker kulit.

2) Pengaruh Ozon

a. Pengertian

Ozon (O₃) dapat menyebabkan peradangan dan stres oksidatif pada kulit, yang dapat meningkatkan risiko kanker kulit.

Ozon (O₃) adalah molekul yang sangat reaktif yang terdiri dari tiga atom oksigen. Di atmosfer permukaan bumi (troposfer), ozon terbentuk melalui reaksi kimia yang melibatkan polutan seperti nitrogen oksida (NO_x) dan senyawa organik yang mudah

menguap (VOC). Ozon troposfer dapat menyebabkan peradangan dan stres oksidatif pada kulit, yang pada akhirnya meningkatkan risiko kanker kulit.

b. Patofisiologi

- 1) Peradangan: Ozon dapat merusak membran sel kulit, menyebabkan pelepasan sitokin pro-inflamasi seperti IL-1, IL-6, dan TNF- α . Sitokin-sitokin ini memicu respon inflamasi yang dapat merusak sel-sel kulit dan menyebabkan perubahan genetik.
- 2) Stres Oksidatif: Ozon adalah agen pengoksidasi yang kuat yang dapat menghasilkan radikal bebas. Radikal bebas ini dapat merusak molekul penting seperti protein, lemak, dan DNA dalam sel-sel kulit. Kerusakan ini dapat menyebabkan kerusakan DNA yang tidak diperbaiki dan memicu mutasi genetik yang berpotensi berkembang menjadi kanker kulit.
- 3) Interaksi dengan Sinar UV

a) Pengertian

Polutan udara dapat meningkatkan sensitivitas kulit terhadap sinar UV, sehingga memperburuk efek merusak dari paparan sinar matahari.

b) Patofisiologi Interaksi dengan Sinar UV

- (1) Peningkatan Sensitivitas: Polutan udara seperti PM_{2.5} dan ozon dapat merusak membran sel kulit dan mengurangi kelembaban kulit, sehingga meningkatkan sensitivitas kulit terhadap sinar UV.
- (2) Stres Oksidatif: Polutan udara dapat menghasilkan radikal bebas yang merusak sel-sel kulit, memperburuk efek merusak dari sinar UV.
- (3) Kerusakan DNA: Paparan sinar UV yang diperburuk oleh polutan udara dapat menyebabkan kerusakan DNA yang tidak

terperbaiki, meningkatkan risiko kanker kulit

c. Pencegahan dan Mitigasi Risiko

1) Penggunaan Tabir Surya:

Menggunakan tabir surya yang efektif dalam melindungi kulit dari sinar UV dan polutan udara.

Kandungan Tabir Surya

Tabir surya yang efektif mengandung beberapa bahan aktif utama yang melindungi kulit dari sinar UV dan polutan udara. Bahan-bahan ini meliputi:

- a) Penyerap UV: Zat kimia seperti avobenzone, octinoxate, octisalate, dan homosalate yang dapat menyerap sinar UV dan mengubahnya menjadi panas yang rendah.
- b) Reflektor UV: Bahan seperti zinc oxide (seng oksida) dan titanium dioxide (dioksida titanium) yang dapat memantulkan sinar UV.
- c) Bahan Pelindung: Seperti vitamin E dan C yang memiliki sifat antioksidan untuk melindungi kulit dari kerusakan oksidatif.
- d) Emulsi: Bahan yang membantu mencampur bahan aktif dan membuat tabir surya mudah digunakan, seperti minyak, air, dan bahan pengemulsi lainnya.

2) Cara Kerja Tabir Surya

Tabir surya bekerja dengan cara menyerap, memantulkan, dan mengubah sinar UV menjadi panas yang rendah. Bahan aktif dalam tabir surya dapat menyerap sinar Ultraviolet B (UVB memiliki panjang gelombang yang lebih pendek, yaitu 290-320 nm) yang menyebabkan kulit terbakar (*sunburn*) dan sinar Ultraviolet A (UVA memiliki panjang gelombang yang lebih panjang 320-400 nm) yang dapat menembus lebih dalam ke kulit dan menyebabkan penuaan kulit dan meningkatkan risiko kanker kulit. Tabir surya yang memiliki label "*broad spectrum*" menawarkan

perlindungan terbaik karena melindungi dari kedua spektrum tersebut. Ultraviolet (UV) adalah jenis radiasi elektromagnetik dengan panjang gelombang yang lebih pendek dari cahaya tampak tetapi lebih panjang dari sinar-X. UV terbagi menjadi tiga jenis berdasarkan panjang gelombangnya:

a) Bahan-Bahan Tabir Surya

Bahan-bahan utama dalam tabir surya meliputi:

- (1) Penyerap UV: Avobenzon, octinoxate, octisalate, homosalate.
- (2) Reflektor UV: Zinc oxide, titanium dioxide.
- (3) Bahan Pelindung: Vitamin E, vitamin C.
- (4) Emulsi: Minyak, air, bahan pengemulsi lainnya.

b) Jenis Tabir Surya

Ada beberapa jenis tabir surya yang berbeda-beda berdasarkan kandungan bahan aktif dan bentuknya:

- (1) Tabir Surya Kimia:
Menggunakan bahan kimia untuk menyerap sinar UV.
- (2) Tabir Surya Alami:
Menggunakan bahan alami seperti ekstrak tanaman yang mengandung flavonoid, tanin, dan vitamin C.
- (3) Tabir Surya Organik:
Menggunakan bahan-bahan alami yang tidak mengandung bahan kimia sintetis.
- (4) Tabir Surya Non-Kimia:
Menggunakan bahan-bahan alami yang tidak diserap oleh kulit dan tidak menimbulkan iritasi.

- c) Menghindari Paparan Polusi Udara:
 - (1) Mengurangi aktivitas di luar ruangan saat tingkat polusi udara tinggi.
 - (2) Perawatan Kulit yang Tepat:
Menggunakan produk perawatan kulit yang dapat membantu memperbaiki kerusakan kulit akibat polusi udara.

DAFTAR PUSTAKA

- Armstrong, B. K., & Krickler, A. (2001). The epidemiology of UV induced skin cancer. *Journal of photochemistry and photobiology B: Biology*, 63(1-3), 8-18.
- Fernanda, M. D., Sibero, H. T., & Mutiara, H. (2023). Polusi Udara dan Permasalahan terhadap Kulit. *Medical Profession Journal of Lampung*, 13(1), 66-71.
- Kampa, M., & Castanas, E. (2008). Human health effects of air pollution. *Environmental pollution*, 151(2), 362-367.
- Krutmann, J., Liu, W., Li, L., Pan, X., Crawford, M., Sore, G., & Seite, S. (2014). Pollution and skin: from epidemiological and mechanistic studies to clinical implications. *Journal of dermatological science*, 76(3), 163-168.
- Seran, Y. Y. T., Pasangka, B., & Sutaji, H. I. (2018). Karakteristik paparan radiasi sinar ultraviolet A (UV-A) dan cahaya tampak di Kota Kupang. *Jurnal Biotropikal Sains*, 15(3), 49-56.
- Valacchi, G., & Davis, P. A. (2004). Oxidative stress: Role of antioxidants in skin health. *Journal of Investigative Dermatology Symposium Proceedings*, 9(2), 156-160. DOI: 10.1046/j.1087-0024.2003.09308.x.

BIODATA PENULIS



Jon W. Tangka, M.Kep., Ns.Sp.Kep.MB. lahir di Balikpapan, pada 12 Maret 1964. Menyelesaikan pendidikan S1, Ners di PSIK UGM dan S2 dan Spesialis di Fakultas Ilmu Keperawatan Universitas Indonesia. Pengalaman Kerja: King Faisal Hospital, Saudi Arabia sejak 1990-1997, AEA International Site Sangatta, Kaltim Prima Coal 1998, Staf Ukeswil Propinsi Sulawesi Utara dan Bapelkes Manado 1998-2001. Dosen di Jurusan Keperawatan Poltekkes Kemenkes Manado, 2021-sampai saat ini. Tugas tambahan sebagai Kepala Unit Laboratorium Poltekkes Kemenkes Manado 2010-2014. Sebagai Ketua Jurusan Keperawatan 2014-2022.

BAB 14

Efek Polusi Udara terhadap Kesehatan Mata

Djoni Ransun, S.Pd., M.Kes.

A. Pendahuluan

Polusi udara merupakan masalah lingkungan yang serius di seluruh dunia. Sumber-sumber polusi udara termasuk emisi kendaraan bermotor, industri, pembakaran bahan bakar fosil, serta kegiatan rumah tangga. Polusi udara mengandung berbagai partikel berbahaya dan gas seperti partikulat (PM), ozon (O₃), nitrogen dioksida (NO₂), dan sulfur dioksida (SO₂). Selain efeknya yang diketahui terhadap sistem pernapasan dan kardiovaskular, polusi udara juga memiliki dampak signifikan terhadap kesehatan mata. Paparan jangka panjang terhadap polusi udara dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan mata yang mempengaruhi kualitas hidup individu.

Polusi udara dapat mempengaruhi mata dalam berbagai cara. Berikut adalah beberapa efek utama yang dapat ditimbulkan oleh polusi udara terhadap kesehatan mata.

Iritasi dan Kekeringan Mata: Polutan seperti PM, ozon, dan gas beracun lainnya dapat mengiritasi permukaan mata, menyebabkan kemerahan, perih, dan sensasi terbakar. Kekeringan mata adalah kondisi umum yang terkait dengan paparan polusi udara, di mana polutan mengganggu produksi air mata dan stabilitas film air mata.

Konjungtivitis: Polutan udara dapat menyebabkan inflamasi pada konjungtiva mata, yang dikenal sebagai konjungtivitis. Gejalanya termasuk kemerahan, gatal, pembengkakan, dan keluarnya cairan dari mata.

Katarak: Paparan jangka panjang terhadap polusi udara, terutama paparan ozon dan radikal bebas, dapat meningkatkan risiko pembentukan katarak. Katarak adalah kondisi di mana lensa mata menjadi keruh, mengakibatkan gangguan penglihatan.

Degenerasi Makula: Beberapa studi menunjukkan bahwa polusi udara dapat berkontribusi pada perkembangan degenerasi makula terkait usia (AMD). AMD adalah kondisi yang menyebabkan kerusakan pada makula, area kecil di retina yang bertanggung jawab untuk penglihatan sentral.

Glaukoma: Ada bukti bahwa paparan polusi udara jangka panjang dapat meningkatkan tekanan intraokular, yang merupakan faktor risiko utama untuk glaukoma. Glaukoma adalah penyakit mata yang merusak saraf optik dan dapat menyebabkan kehilangan penglihatan.

B. Efek Polusi Udara terhadap Kesehatan Mata

1. Konsep Polusi Udara dan Komposisinya

Polusi udara terdiri dari berbagai komponen kimia dan partikel berbahaya. Komponen utama polusi udara meliputi:

- a. Partikulat (PM): PM10 dan PM2.5 adalah partikel-partikel kecil yang dapat terhirup dan masuk ke dalam sistem pernapasan dan mata. Partikel-partikel ini dapat menyebabkan iritasi pada permukaan mata.
- b. Ozon (O₃): Ozon troposferik terbentuk dari reaksi kimia antara sinar matahari dan polutan seperti NO_x dan VOCs. Ozon dapat menyebabkan iritasi dan kerusakan pada jaringan mata.
- c. Nitrogen Dioksida (NO₂): Gas ini terutama berasal dari emisi kendaraan bermotor dan pembakaran bahan bakar fosil. NO₂ dapat menyebabkan inflamasi dan kerusakan pada mata.
- d. Sulfur Dioksida (SO₂): Gas ini dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil dan kegiatan industri. SO₂ dapat menyebabkan iritasi pada mata dan saluran pernapasan.

2. Mekanisme Efek Polusi Udara pada Mata

Polusi udara mempengaruhi kesehatan mata melalui beberapa mekanisme, termasuk:

- a. Iritasi Langsung: Polutan udara dapat langsung mengiritasi permukaan mata, menyebabkan sensasi terbakar, kemerahan, dan kekeringan.
- b. Inflamasi: Paparan polusi udara dapat memicu respon inflamasi pada konjungtiva dan kornea, yang dapat menyebabkan konjungtivitis dan keratitis.
- c. Stres Oksidatif: Polutan udara seperti ozon dan partikel halus dapat menyebabkan stres oksidatif, yang merusak sel-sel mata dan meningkatkan risiko penyakit mata degeneratif seperti katarak dan AMD.
- d. Disfungsi Film Air Mata: Polusi udara dapat mengganggu stabilitas dan komposisi film air mata, menyebabkan sindrom mata kering.

C. Pencegahan dan Penatalaksanaan

1. Pencegahan

- a. Menghindari Paparan Langsung:
Hindari berada di luar ruangan pada saat kadar polusi udara sedang tinggi, terutama saat pagi dan malam hari ketika polusi biasanya lebih pekat.
- b. Gunakan kacamata pelindung atau kacamata hitam saat berada di luar untuk melindungi mata dari partikel polutan. Juga dapat mencegah masuknya debu dan partikel udara lainnya ke mata, terutama bagi yang bekerja di lingkungan dengan polusi tinggi.
- c. Menjaga Kebersihan Mata:
Rutin membersihkan mata dengan air bersih atau larutan saline untuk menghilangkan partikel yang mungkin menempel pada mata.
- d. Hindari mengucek mata dengan tangan yang kotor karena dapat memperparah iritasi.
- e. Menggunakan Humidifier:

Menggunakan alat pelembab udara di dalam ruangan dapat membantu menjaga kelembaban udara, sehingga mengurangi kekeringan mata.

- f. Menghindari Penggunaan Lensa Kontak Berlebihan:
Batasi penggunaan lensa kontak pada hari-hari dengan polusi tinggi, karena lensa kontak dapat mengiritasi mata dan memperburuk kondisi jika ada partikel polusi yang terperangkap di bawah lensa.
- g. Menjaga Kesehatan Umum:
 - 1) Konsumsi makanan yang kaya antioksidan, seperti buah-buahan dan sayuran, yang dapat membantu melawan efek radikal bebas dari polusi udara.
 - 2) Rutin minum air putih untuk menjaga hidrasi tubuh termasuk mata.

2. Penatalaksanaan

- a. Pengobatan Topikal:
Obat Tetes Mata: Gunakan obat tetes mata yang mengandung air mata buatan untuk mengatasi kekeringan mata. Obat tetes mata yang mengandung bahan antiinflamasi dapat digunakan untuk mengurangi peradangan.
- b. Salep Mata: Pada kasus iritasi berat atau konjungtivitis, salep mata antibiotik atau antiinflamasi mungkin diresepkan oleh dokter.
- c. Perawatan Medis:
Konsultasi Dokter Mata: Rutin berkonsultasi dengan dokter mata untuk pemeriksaan kesehatan mata, terutama jika sering terpapar polusi udara.
- d. Penggunaan Obat Oral: Pada kondisi yang lebih parah, dokter mungkin akan meresepkan obat oral seperti antiinflamasi untuk mengatasi peradangan yang terjadi.
- e. Perawatan di Rumah:
 - 1) Kompres Hangat: Menggunakan kompres hangat pada mata dapat membantu mengurangi iritasi dan meningkatkan sirkulasi darah di area mata.

- 2) Hindari Pemicu: Identifikasi dan hindari pemicu yang dapat memperparah kondisi mata, seperti asap rokok, debu, dan bahan kimia.
- f. Perubahan Gaya Hidup:
 - 1) Mengurangi Konsumsi Kopi dan Alkohol: Kopi dan alkohol dapat menyebabkan dehidrasi yang dapat memperburuk kekeringan mata.
 - 2) Mengadopsi Pola Hidup Sehat: Pola hidup sehat dengan olahraga teratur dan istirahat yang cukup dapat membantu menjaga kesehatan mata dan tubuh secara keseluruhan.

DAFTAR PUSTAKA

- Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H. R., Frostad, J., Estep, K., ... & Feigin, V. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *The Lancet*, 389(10082), 1907-1918.
- Liu, H., Wang, C., Qi, L., Zhu, Y., Li, W., Qian, Z. M., ... & Wang, W. (2019). Short-term effects of ambient air pollution on dry eye disease in urban China. *Environmental Pollution*, 246, 503-509.
- Liu, H., Wang, C., Qi, L., Zhu, Y., Li, W., Qian, Z. M., ... & Wang, W. (2019). Short-term effects of ambient air pollution on dry eye disease in urban China. *Environmental Pollution*, 246, 503-509.
- Wang, T., Li, W., Yang, Z., Jiang, H., & Ren, Y. (2020). Impact of air pollution on eye diseases: a review and perspective. *Public Health Frontiers*, 8, 543-555.
- Wang, T., Li, W., Yang, Z., Jiang, H., & Ren, Y. (2020). Impact of air pollution on eye diseases: a review and perspective. *Public Health Frontiers*, 8, 543-555.
- World Health Organization. (2018). Air pollution and child health: prescribing clean air. Geneva: WHO.
- World Health Organization. (2018). Air pollution and child health: prescribing clean air. Geneva: WHO.
- Xu, H., Liu, X., Zhang, S., Wang, Y., & Xu, B. (2019). Association between air pollution and the risk of uveitis: a time-series analysis in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(35), 35983-35993.
- Xu, H., Liu, X., Zhang, S., Wang, Y., & Xu, B. (2019). Association between air pollution and the risk of uveitis: a time-series analysis in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(35), 35983-35993.

BIODATA PENULIS



Djoni Ransun, S.Pd.,M.Kes. Lahir di Maumbi Minahasa, pada 06 Juni 1965. Menyelesaikan pendidikan Akademi Keperawatan Manado, S1 di Administrasi Pendidikan Universitas Negeri Manado dan S2 di Fakultas Ilmu Masyarakat Universitas Samratulangi Manado. Sampai saat ini penulis sebagai Dosen di Jurusan Keperawatan Poltekkes Kemenkes Manado.

BAB 15

Pengaruh Polusi Udara terhadap Fungsi Otak dan Kognitif

Dr. Umi Budi Rahayu, Ftr., M.Kes

A. Pendahuluan

Salah satu tantangan di era industri adalah resistensi terhadap perubahan lingkungan dan kesadaran terkait dengan isu-isu lingkungan. Era industri yang berhubungan erat dengan aktivitas industri, transportasi, dan pembakaran bahan bakar fosil membawa dampak polusi udara. Polusi udara terdiri dari partikel mikron membawa efek buruk pada berbagai sistem tubuh. Polutan yang terhidup tidak hanya berpengaruh pada sistem pernafasan tetapi juga mempengaruhi sistem lain seperti sistem saraf.

Berbagai mekanisme penting seperti stres oksidatif dan neuroinflamasi sampai dengan terjadinya neurotoksik telah terbukti mempengaruhi sistem saraf pusat karena paparan polusi udara (Costa et al., 2020). Sistem saraf pusat yang identik dengan otak mempunyai peranan besar dalam mempengaruhi terjadinya perubahan fungsi otak. Neurotoksisitas mengakibatkan gangguan perkembangan saraf di otak, yang selanjutnya berkontribusi terjadinya penyakit-penyakit neurodegeneratif.

Beberapa penelitian epidemiologi pada manusia dan hewan menunjukkan bahwa polusi udara berdampak negatif pada otak dan berkontribusi terjadinya penyakit-penyakit pada sistem saraf pusat (Costa et al., 2017; Sram et al., 2017).

B. Otak sebagai target dari polusi udara

1. Stres oksidatif dan neuroinflamasi

Partikel polutan perlu diwaspadai karena partikel ini dapat masuk ke dalam sirkulasi sistemik dan menyebar ke otak dan organ tubuh lainnya (Genc et al., 2012). Polutan ini mendapatkan akses langsung ke otak melalui mukosa penciuman hidung (Garcia et al., 2015), masuk dan mempengaruhi otak melalui saraf olfaktorius. Selanjutnya lapisan endotel menjadi lebih permeabel karena kadar stres oksidatif yang tinggi, terjadi peradangan dan aktivasi makrofag setelah terpapar polusi (Lochhead et al., 2010). Peningkatan peradangan dan aktivasi makrofag juga dapat memperburuk neuroinflamasi yang ada, karena dapat mengakibatkan peningkatan permeabilitas sawar darah-otak yang memungkinkan terjadinya migrasi makrofag dan difusi pasif patogen serta benda asing lainnya ke dalam otak (Elwood et al., 2017; Lochhead et al., 2010) yang selanjutnya akan terjadi kerusakan pada sistem saraf pusat.

Sesungguhnya di dalam sistem saraf pusat terdapat mikroglia yang memainkan peran sangat penting pada neurogenesis, pemangkasan sinaptik, mielinisasi, dan angiogenesis sebagai upaya melakukan regenerasi pada sistem saraf pusat. Namun, aktivasi mikroglia yang berlebihan karena faktor eksternal polutan dapat menyebabkan peradangan parah. Misalnya, sitokin pro-inflamasi yang dihasilkan mikroglia berkaitan dengan terjadinya hipomielinisasi dan ventrikulomegali melalui toksisitas terhadap oligodendrosit (Allen et al., 2017).

Bukti telah menunjukkan bahwa paparan asap diesel selama tiga minggu (250 µg/m³, 6 jam/hari, 5 hari/minggu) meningkatkan peroksidasi lipid dan ekspresi sitokin pro-inflamasi di berbagai area otak tikus dan menyebabkan aktivasi mikroglia, stres oksidatif, neuroinflamasi, dan mengganggu neurogenesis dewasa (Coburn et al., 2018). Penelitian lain menunjukkan bahwa tikus yang terpapar lalu lintas di terowongan jalan raya memiliki kadar sitokin pro-

inflamasi yang lebih tinggi di otak (Bos et al., 2012). Paparan tikus terhadap partikel mikron PM1.0 (16,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dengan jumlah partikel 11.257/ m^3) selama 3 hingga 6 bulan, menyebabkan aktivasi mikroglia di hipokampus (Bai et al., 2019). Paparan akut terkontrol terhadap asap diesel (300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) telah terbukti menyebabkan perubahan EEG (Crüts et al., 2008), serta dilaporkan mengubah aktivitas motorik, pembelajaran dan memori spasial, kemampuan pengenalan objek baru, dan perilaku emosional, serta menyebabkan stres oksidatif, neuroinflamasi, perubahan ekspresi gen di sistem saraf pusat (Ehsanifar et al., 2019).

Perubahan fungsi otak lainnya adalah ditemukan aktifnya mikroglia, gangguan neurogenesis hipokampus, dan perubahan sawar darah-otak, yang diikuti dengan gejala perilaku depresi dan defisit dalam memori kontekstual pada tikus yang terpapar partikel mikron PM0,2 (340 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) selama kehamilan dan hingga usia 25 minggu (Woodward et al., 2018). Perubahan morfologi bulbus olfaktorius dan perubahan neurotransmisi monoaminergik juga terjadi pada kelinci yang terpapar asap diesel (1 mg/m^3) dari hari ke-3 hingga ke-27 kehamilan (Bernal-Melendez et al., 2019). Secara keseluruhan, temuan pada model manusia dan beberapa model hewan menunjukkan bahwa paparan polusi udara dapat merusak perkembangan otak dan berpotensi menyebabkan gangguan perkembangan saraf.

2. Neurotoksisitas

Polusi udara juga dimungkinkan mempengaruhi fungsi otak melalui mekanisme yang mendasari karena adanya neurotoksisitas. Peradangan sistemik merupakan mekanisme utama yang menyebabkan polusi udara menyebabkan toksisitas paru-paru dan kardiovaskular (Fiordelisi et al., 2017), dan aktivasi mikroglia, stres oksidatif, dan neuroinflamasi, yang semuanya disebabkan oleh polusi udara di sistem saraf pusat, diyakini berhubungan secara kausal dengan neurotoksisitas yang disebabkan oleh polusi udara dan relevan dengan penyakit

perkembangan saraf dan neurodegeneratif (Costa et al., 2019). Respons oksidatif dan inflamasi dalam sistem saraf pusat setelah terpapar polusi udara telah ditemukan secara in vivo pada hewan dalam sistem in vitro (Bai et al., 2019), dan pada tingkat yang terbatas pada manusia (Costa et al., 2019). Ada bukti substansial yang menunjukkan peran penting yang dimainkan oleh neuroinflamasi dalam gangguan perkembangan saraf, khususnya Penyakit Autism (D'Angiulli, 2019).

C. Neurodegeneratif dan gangguan fungsi otak karena polusi udara

Penuaan dikaitkan dengan berbagai macam kondisi klinis dan patologi yang secara umum dapat diklasifikasikan sebagai penyakit neurodegeneratif. Ada bukti bahwa otak yang menua mungkin sangat rentan terhadap neurotoksisitas yang disebabkan oleh polusi udara, karena studi epidemiologi telah mengidentifikasi efek perilaku yang signifikan, khususnya efek kognitif, yang terkait dengan paparan polusi udara yang tinggi pada orang tua (Chen et al., 2015). Contoh penyakit neurodegeneratif adalah Penyakit Alzheimer, Penyakit Parkinson, Amiotrofik Lateral Sklerosis, dan Penyakit Huntington. Kejadian yang paling umum adalah Penyakit Alzheimer, Penyakit Parkinson (Musgrove et al., 2015).

Penyakit Alzheimer berhubungan dengan sumber polutan terutama polutan dari asap mobil dan pabrik yang menghasilkan partikulat halus atau asap yang dikenal sebagai partikel mikron PM2.5 yang berukuran lebih kecil dari 2.5 mikrometer. Partikel-partikel mikron ini mendasari terjadinya neurotoksisitas (kerusakan otak atau sistem saraf yang disebabkan oleh paparan zat beracun). Penelitian menunjukkan bahwa wanita yang lebih lama tinggal di lokasi dengan tingkat partikel mikron PM2.5 yang tinggi mengalami kehilangan memori dan penyusutan otak seperti Alzheimer dari pada wanita yang hidup dengan udara yang lebih bersih (Jennifer et al., 2021).

Penyakit Alzheimer adalah jenis demensia utama yang dialami oleh individu berusia di atas 65 tahun, mencakup hampir dua pertiga dari semua kasus demensia. Penyakit Alzheimer menggambarkan gangguan yang dimulai dari gangguan memori episodik, yang diikuti defisit dalam bahasa, perhatian, dan fungsi eksekutif. Jumlah kasus di dunia diperkirakan akan mencapai 115 juta pada tahun 2050. Jenis demensia umum lainnya termasuk demensia vaskular, yang penyebabnya ditemukan dalam patologi kardiovaskular dan yang muncul dengan tanda-tanda klinis yang melibatkan defisit dalam perhatian, pemrosesan informasi, dan fungsi eksekutif (O'Brien & Thomas, 2015), serta demensia dengan badan Lewy, dengan tanda-tanda klinis termasuk halusinasi, parkinsonisme, dan perubahan status kognitif (Walker et al., 2015). Gambaran neuropatologis otak pasien Alzheimer menunjukkan atrofi kortikal, hipokampus yang menyebar, akumulasi beta amiloid ($A\beta$) yang abnormal, dan protein tau dalam plak amiloid dan jalinan neuronal (Khan & Bloom, 2016). Protein prekursor amiloid (APP) dibelah oleh sekretase untuk menghasilkan polipeptida $A\beta$ $A\beta_{42}$ atau $A\beta_{40}$ menjadi bentuk utama yang ditemukan dalam plak amiloid (Pressman & Rabinovici, 2014). Jalinan neurofibrilar tersusun dari protein tau yang mengalami hiperfosforilasi, menyebabkan pembongkaran mikrotubulus. Mutasi langka pada beberapa gen seperti APP, PSEN1 dan PSEN2 (presenilin, subunit katalitik untuk sekretase yang membelah APP) menimbulkan risiko tinggi untuk Penyakit Alzheimer (Scheltens et al., 2016). Namun, faktor risiko genetik utama untuk Penyakit Alzheimer adalah apolipoprotein E (APOE); dari tiga isoformnya, APOE ϵ 4 membuat pembawa rentan terhadap Penyakit Alzheimer. Prevalensi pembawa APOE ϵ 4 dalam kasus Penyakit Alzheimer adalah sekitar 60%, sedangkan homozigot APOE ϵ 4 sekitar 10–15%, terutama di Eropa Utara (Ward et al., 2012).

Kemungkinan hubungan polusi udara dan Penyakit Parkinson telah diselidiki dalam beberapa penelitian. Ada

hubungan positif antara partikel mikron PM_{2.5} dan O₃ dengan Penyakit Parkinson (Kirrane et al., 2015). PM₁₀ dan PM_{2.5} juga di duga berhubungan dengan polutan untuk angka kejadian Penyakit Parkinson pada wanita yang tidak pernah merokok (Liu et al., 2016). Polusi udara dari sumber lalu lintas juga dikaitkan dengan peningkatan risiko Penyakit Parkinson sebesar 9% untuk setiap peningkatan rentang interkuartil NO₂ (2,97 µg/m³), dengan risiko yang lebih tinggi bagi orang yang tinggal di Kopenhagen dibandingkan dengan mereka yang tinggal di daerah pedesaan (Ritz et al., 2016). Ditemukan pula bahwa individu dengan polimorfisme fungsional pada gen untuk sitokin pro-inflamasi interleukin-1β (IL-1β-rs16944) paparan jangka panjang terhadap NO_x meningkatkan risiko Penyakit Parkinson. Mutasi rs16944 berada di wilayah promotor IL-1β dan menyebabkan peningkatan transkripsi, menunjukkan bahwa individu dengan kadar IL-1β yang lebih tinggi mungkin lebih rentan terhadap neurotoksisitas polusi udara. Ada hubungan positif antara polusi udara dan Penyakit Parkinson, khususnya untuk NO_x dan CO, tetapi tidak untuk partikel mikron PM₁₀ (Lee et al., 2016). Penelitian lain menunjukkan bahwa daerah otak yang berhubungan dengan patologi Penyakit Parkinson adalah bulbus olfaktorius, otak tengah, dan medula oblongata, serta ditemukan kadar α-sinuklein yang lebih tinggi. Adanya peradangan perifer karena polusi udara) dapat menyebabkan peningkatan α-sinuklein di bulbus olfaktorius, dan kesalahan pelipatan dan agregasinya dapat menyebar melalui jalur olfaktorius, dari bulbus olfaktorius ke otak tengah melalui area olfaktorius lain dan sistem limbik (Lema-Tomè et al., 2013).

D. Perubahan fungsi kognitif karena polusi udara

Berbagai studi epidemiologi menunjukkan kemungkinan kontribusi polusi udara terhadap fungsi kognitif.

Penurunan fungsi kognitif, gejala depresi, dan efek neuropsikologis merugikan lainnya akibat polusi udara telah dilaporkan terjadi pada manusia (Lee et al., 2019). Adanya

peningkatan kadar penanda neuroinflamasi di otak anak-anak yang terpapar polusi udara tinggi menunjukkan adanya defisit kognitif dan terjadi hiperaktivitas pada anak-anak berusia 7 tahun. Bukti lain menemukan adanya hubungan antara polusi udara (dinilai sebagai tinggal <300 m dari jalan tol) dengan kejadian gangguan hiperaktivitas defisit perhatian (ADHD) (Saez et al., 2018). Meskipun dalam sebuah tinjauan sistematis ada juga yang menyimpulkan bahwa hubungan antara polusi udara dan ADHD lemah (Donzelli et al., 2020).

Paparan polusi udara juga mempengaruhi penurunan fungsi kognitif pada orang tua, yang dimungkinkan berkontribusi potensi terjadinya Penyakit Alzheimer. Beberapa penelitian pada orang lanjut usia (>65 tahun) telah dilakukan dengan pengamatan penilaian gangguan kognitif, yang merupakan aspek penting awal terjadinya Penyakit Alzheimer (Cohen & Gerber, 2017). Orang lanjut usia di atas 65 tahun, paparan partikel mikron PM2.5 dan PM10 dikaitkan dengan peningkatan gangguan kognitif ringan. Peningkatan kadar polusi udara yang mempengaruhi penurunan kemampuan kognitif berhubungan kuat dengan TRAP (Costa, 2017).

Studi lain menunjukkan bahwa populasi yang bermukim di dekat jalan raya utama berhubungan dengan kinerja yang buruk dalam serangkaian tes kognitif pada orang tua berusia di atas 65 tahun. Kadar partikel mikron PM2.5 yang lebih tinggi juga berhubungan dengan penurunan fungsi kognitif yang lebih cepat pada orang dewasa maupun orang lanjut usia berusia 70 hingga 81 tahun. Meningkatnya paparan partikel mikron PM2.5 juga berisiko terjadinya penurunan fungsi kognitif dan demensia (Cacciottolo et al., 2017).

DAFTAR PUSTAKA

- Allen JL, Oberdoerster G, Morris-Schaffer K, Wong C, Klocke C, Sobolewski M, et al. (2017). Developmental neurotoxicity of inhaled ambient ultrafine particle air pollution: Parallels with neuropathological and behavioral features of autism and other neurodevelopmental disorders: *Neurotoxicology* 59.
- Bai KJ, Chang KJ, Chen CL, Jhan MK, Hsiao TC, Chang TJ, et al. (2019). Microglial activation and inflammation caused by traffic-related particulate matter: *Chemico-Biological Interactions* 311.
- Bernal-Melendez E, Lacroix MC, Bouillaud P, Callebort J, Olivier B, Persuy MA, et al. (2019). Repeated gestational exposure to diesel engine exhaust affects the fetal olfactory system and alters olfactory-based behavior in rabbit offspring: *Particle and Fibre Toxicology* 16.
- Bos I, DeBoever P, Emmerechts J, Buekers J, Vanoirbeek J, Meeusen R, et al. (2012). Changed gene expression in brains of mice exposed to traffic in a highway tunnel: *Inhalation Toxicology* 24.
- Cacciottolo M, Wang X, Driscoll I, Woodward N, Saffari A, Reyes J, et al. (2017). Particulate air pollutants, APOE alleles and their contributions to cognitive impairment in older women and to the amyloidogenesis in experimental models: *Translational Psychiatry* 7.
- Chen JC, Wang X, Wellenius GA, Serre ML, Driscoll I, Casanova R, et al. (2015). Ambient air pollution and neurotoxicity on brain structure: Evidence from women's health initiative memory study. *Annals of Neurology* 78.
- Coburn JL, Cole TB, Dao KT, & Costa LG. (2018). Acute exposure to diesel exhaust impairs adult neurogenesis in mice: Prominence in males and protective effect of pioglitazone: *Archives of Toxicology* 92.
- Costa LG (2017). Traffic-related air pollution and neurodegenerative diseases: Epidemiological and experimental evidence and potential underlying

- mechanisms In Aschner M, & Costa LG (Eds.), *Advances in Neurotoxicology*, Vol. 1, environmental factors in neurodegenerative diseases (pp. 1–46). New York: Elsevier.
- Costa LG, Cole TB, Dao K, Chang Y-C, Coburn J, & Garrick J. (2019). Neurotoxicity of air pollution: Role of neuroinflammation In Aschner M, & Costa LG (Eds.): *Advances in Neurotoxicology*, Vol. 3, role of inflammation in environmental neurotoxicity New York: Elsevier.
- Costa LG, Cole TB, Dao K, Chang YC, Coburn J, Garrick JM. (2020). Effects of air pollution on the nervous system and its possible role in neurodevelopmental and neurodegenerative disorders: *Pharmacol Ther.* DOI: 10.1016/j.pharmthera.2020.107523. Epub 2020 Mar 9. PMID: 32165138; PMCID: PMC7245732.
- Crüts B, van Etten L, Tornqvist H, Blomberg A, Sandstrom T, Mills NL, et al. (2008). Exposure to diesel exhaust induces changes in EEG in human volunteers: *Particle and Fibre Toxicology* 5.
- D'Angiulli A. (2019). The role of neuroinflammation in developmental neurotoxicity, tackling complexity in children's exposures and outcomes In Aschner M, & Costa LG (Eds.): *Advances in neurotoxicology*, Vol. 3, role of inflammation in environmental neurotoxicity: Elsevier.
- Donzelli G, Llopis-Gonzalez A, Llopis-Morales A, Cioni L, & Morales-Suarez-Varela M. (2020). Particulate matter exposure and attention-deficit/hyperactivity disorder in children: A systematic review of epidemiological studies: *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17.
- Ehsanifar M, Tameh AA, Farzadkia M, Kalantari RR, Zavareh MS, Nikzaad H, et al. (2019). Exposure to nanoscale diesel exhaust particles: oxidative stress, neuroinflammation,

- anxiety and depression on adult male mice: *Ecotoxicology and Environmental Safety* 168.
- Elwood E, Lim Z, Naveed H, & Galea I. (2017). The effect of systemic inflammation on human brain barrier function: *Brain, Behavior, and Immunity* 62.
- Fiordelisi A, Piscitelli P, Trimarco B, Coscioni E, Iaccarino G, & Sorriento D. (2017). The mechanisms of air pollution and particulate matter in cardiovascular diseases: *Heart Failure Reviews* 22.
- Garcia GJ, Schroeter JD, & Kimbell JS. (2015). Olfactory deposition of inhaled nanoparticles in humans: *Inhalation Toxicology* 27.
- Genc S, Zadeoglulari Z, Fuss SH, & Genc K. (2012). The adverse effects of air pollution on the nervous system: *Journal of Toxicology*. DOI: 782462 10.1155/2012/782462.
- Jennifer A. Ailshire, Caleb E Finch. (2021). Recently decreased association of air pollution with cognitive impairment in a population-based aging cohort and in a mouse model. *Alzheimer's & Dementia: The Journal of the Alzheimer's Association*. DOI: 10.1002/alz.12471.
- Khan SS, & Bloom GS. (2016). Tau: The center of signaling nexus in Alzheimer's disease: *Frontiers in Neuroscience* 10.
- Lee S, Lee W, Kim D, Kim E, Myung W, Kim SY, et al. (2019). Short-term PM2.5 exposure and emergency hospital admissions for mental disease: *Environmental Research* 171.
- Lema-Tome' CM, Tyson T, Rey NL, Grathwohl S, Britschgi M, & Brundin P. (2013). Inflammation and alpha-synuclein prion-like behavior in Parkinson's disease – is there a link?: *Molecular Neurobiology* 47.
- Lochhead JJ, McCaffrey G, Quigley CE, Finch J, DeMarco KM, Nametz N, et al. (2010). Oxidative stress increases blood-brain barrier permeability and induces alterations in occluding during hypoxia-reoxygenation: *Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism* 30.

- Musgrove RE, Jewell SA, & Di Monte DA. (2015). Overview of neurodegenerative disorders and susceptibility factors in neurodegenerative processes In Aschner M, & Costa LG (Eds.), *Environmental factors in neurodevelopmental and neurodegenerative disorders*: Elsevier.
- O'Brien JT, & Thomas A. (2015). Vascular dementia. *Lancet* 386.
- Pressman P, & Rabinovici GD. (2014). Alzheimer's disease In Aminoff MJ, & Daroff RB (Eds.). *The encyclopedia of neurological sciences*: Elsevier.
- Saez M, Barcelo MA, Farrerons M, & Lopez-Casasnovas G. (2018). The association between exposure to environmental factors and the occurrence of attention-deficit/hyperactivity disorder (ADHD). A population-based retrospective cohort study: *Environmental Research* 156.
- Scheltens P, Blennow K, Breteler MBB, de Strooper B, Salloway S, & Van der Flier WM. (2016). Alzheimer's disease: *Lancet* 388.
- Sram RJ, Veleminsky M, Veleminsky M, & Stejskalova J. (2017). The impact of air pollution to central nervous system in children and adults: *Neuroendocrinology Letters* 38.
- Walker Z, Possin KL, Boeve BF, & Aarsland D. (2015). Lewy body dementias: *Lancet* 386.
- Ward A, Crean S, Mercald CJ, Collins JM, Boyd D, Cook MN, et al. (2012). Prevalence of apolipoprotein E4 genotype and homozygotes (APOE e4/4) among patients diagnosed with Alzheimer's disease: A systematic review and meta-analysis: *Neuroepidemiology* 38.
- Woodward NC, Haghani A, Johnson RG, Hsu TM, Saffari A, Sioutas C, et al. (2018). Prenatal and early life exposure to air pollution induced hippocampal vascular leakage and impaired neurogenesis in association with behavioral deficits: *Translational Psychiatry* 8.

BIODATA PENULIS



Dr. Umi Budi Rahayu, Ftr., MKes lahir di Mojolaban Sukoharjo, pada 20 Nopember 1973. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 Fisioterapi di Fakultas Ilmu Kesehatan Universitas Muhammadiyah Surakarta, dan telah menyelesaikan pula pendidikannya S2 dan S3 di Universitas Gadjah Mada Yogyakarta pada Program Studi Ilmu Kedokteran Dasar dan Biomedis dengan konsentrasi Neuroanatomi serta Program Studi Doktor Ilmu Kedokteran dan Kesehatan dengan konsentrasi Neural System Disease. Saat ini penulis aktif riset dan mengajar di Program Studi Fisioterapi Fakultas Ilmu Kesehatan Universitas Muhammadiyah Surakarta.

BAB 16

Polusi Udara dan Kesehatan Mental

Sailent Rizki Sari Simaremare, S.K.M., Ph.D

A. Pendahuluan

Polusi udara merupakan salah satu risiko kesehatan lingkungan yang sangat penting secara global, dan menjadi ancaman lingkungan terbesar bagi kesehatan manusia (World Health Organization, 2021). Sumber utama polusi udara seperti pembakaran bahan bakar fosil, emisi kendaraan bermotor, dan aktivitas industri, telah menyebabkan peningkatan konsentrasi polutan berbahaya seperti partikulat halus ($PM_{2.5}$, PM_{10}), ozon (O_3), nitrogen dioksida (NO_2), dan sulfur dioksida (SO_2) di atmosfer (Manisalidis et al., 2020). Dampak dari polusi ini terlihat dari meningkatnya berbagai penyakit seperti gangguan pernapasan, kardiovaskular, dan kanker paru-paru (World Health Organization, 2021). WHO memperkirakan 4,2 juta dan 3,8 juta kematian dini disebabkan oleh polusi udara di dalam dan luar ruangan (World Health Organization, 2021).

Dalam beberapa tahun terakhir, perhatian terhadap dampak polusi udara tidak hanya terbatas pada kesehatan fisik, tetapi juga mengungkap keterkaitan antara polusi udara dan kesehatan mental. Meningkatnya prevalensi gangguan mental seperti depresi, kecemasan, dan gangguan neuropsikiatri lainnya secara global telah memicu kekhawatiran akan peran faktor lingkungan, termasuk polusi udara (Zundel et al., 2022). Beberapa penelitian telah menginvestigasi mekanisme biologis yang berpotensi mengakibatkan gangguan kesehatan mental akibat paparan polusi udara, termasuk mekanisme yang melibatkan

peradangan sistemik, stress oksidatif serta gangguan pada sistem saraf pusat (van den Bosch & Meyer-Lindenberg, 2019).

Bab buku ini bertujuan untuk menjelaskan hubungan antara polusi udara dan kesehatan mental serta mekanisme biologis yang menyebabkannya berdasarkan bukti-bukti ilmiah terkini. Bab ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai dampak polusi udara terhadap kesehatan mental yang nantinya dapat digunakan sebagai referensi kebijakan untuk menghadapi tantangan kompleks di bidang ini.

B. Polusi Udara dan Kesehatan Mental

1. Polusi Udara

a. Jenis dan Sumber Polusi Udara

Polusi udara merupakan zat apa pun di udara yang, dalam konsentrasi yang cukup tinggi, dapat membahayakan kesehatan manusia dan lingkungan serta menyebabkan kerusakan sumber daya. Polutan udara dapat mencakup hampir semua komposisi materi alami dan buatan yang dapat berupa partikel padat di udara, tetesan cairan, gas, atau kombinasi keduanya (US EPA, 2021). Beberapa polutan yang menjadi perhatian utama kesehatan masyarakat berdasarkan badan kesehatan dunia (WHO) meliputi materi partikulat (PM), karbon monoksida (CO), ozon (O₃), nitrogen dioksida (NO₂), dan sulfur dioksida (SO₂) (World Health Organization, 2024). Polusi udara dapat bersumber dari sumber antropogenik (buatan manusia) dan sumber alami (Manisalidis et al., 2020). Sumber antropogenik seperti, emisi gas buang kendaraan bermotor (CO, NO_x, dan PM), proses manufaktur dan industri (SO₂, NO_x), penggunaan pupuk dan pengelolaan limbah ternak (NH₃) serta pembakaran rumah tangga untuk memasak atau pemanas (CO dan PM). Dan Sumber alami seperti erupsi gunung berapi (SO₂, PM, dan gas lainnya) dan proses biologis, seperti penguraian bahan organik (CH₄ dan CO₂).

b. Polusi Udara di Indonesia

Polusi udara merupakan masalah serius di Indonesia. Sektor transportasi menjadi penyumbang terbesar terhadap polusi udara di Indonesia, diikuti oleh emisi dari industri, kebakaran hutan dan lahan gambut, serta aktivitas rumah tangga (Haryanto, 2018). Ibu kota Indonesia menduduki peringkat ke-7 sebagai kota dengan polusi udara tertinggi berdasarkan rata-rata tahunan konsentrasi $PM_{2.5}$ dalam indeks kualitas udara ibu kota dunia tahun 2023 (Hasan, 2024). Pada tahun 2023, rata-rata konsentrasi $PM_{2.5}$ di Indonesia mencapai 7,4 kali lipat dari nilai pedoman kualitas udara tahunan WHO (IQ Air, 2023).

Polusi udara memiliki dampak signifikan terhadap kesehatan manusia, baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang, yang menimbulkan kerugian kesehatan dan ekonomi yang sangat besar dan beragam pada individu, komunitas dan negara (Chen et al., 2024). Polusi udara telah menyebabkan lebih dari 7000 dampak kesehatan yang merugikan pada anak-anak, lebih dari 10,000 kematian, dan lebih dari 5000 rawat inap setiap tahunnya di Jakarta dengan total biaya dari dampak kesehatan yang diakibatkan oleh polusi udara mencapai sekitar USD 2943,42 juta setiap tahunnya (Syuhada et al., 2023). Dengan dampak yang begitu besar, polusi udara menjadi salah satu tantangan utama yang perlu segera diatasi untuk melindungi kesehatan manusia di berbagai kelompok populasi.

2. Kesehatan Mental

a. Definisi dan Jenis Gangguan Kesehatan Mental

Kesehatan mental adalah keadaan pikiran yang ditandai oleh kesejahteraan emosional, penyesuaian perilaku yang baik, kebebasan relatif dari kecemasan dan gejala-gejala yang melumpuhkan, serta kapasitas untuk menjalin hubungan yang konstruktif dan mengatasi tuntutan serta tekanan hidup sehari-hari

(American Psychological Association, 2018). Dalam konteks yang lebih luas, kesehatan mental tidak hanya berarti ketiadaan gangguan mental namun merupakan sebuah kontinum yang kompleks yang dialami secara unik oleh setiap individu. Tingkat kesulitan dan tekanan serta kemungkinan dampak sosial dan klinis dapat bervariasi dari satu individu ke individu lainnya (World Health Organization, 2022b).

Gangguan mental berdasarkan Klasifikasi Penyakit Internasional Revisi ke-11 (ICD-11) meliputi gangguan kecemasan, depresi, gangguan bipolar, skizofrenia, gangguan stres pascatrauma (PTSD), gangguan makan, perilaku disruptif dan gangguan disosialisasi, dan gangguan perkembangan saraf (World Health Organization, 2022a).

b. Determinan Kesehatan Mental

Pemahaman yang lebih komprehensif tentang faktor risiko gangguan mental dapat memberikan informasi tentang pengobatan dan pencegahan yang lebih baik. Penelitian sebelumnya telah mengungkapkan bahwa gen (Devor et al., 2017), faktor sosial ekonomi (Hawkins et al., 2020) dan pola makan (Lim et al., 2016) merupakan faktor risiko penting yang menyebabkan gangguan kesehatan mental. Selain itu, bukti epidemiologi yang semakin meningkat juga menunjukkan adanya dampak buruk dari faktor lingkungan terhadap kesehatan mental (Helbich, 2018; Schmidt, 2007).

3. Hubungan Polusi Udara dan Kesehatan Mental

Peningkatan polusi udara tidak hanya menyebabkan gangguan kesehatan fisik namun juga berhubungan dengan peningkatan risiko gangguan kesehatan mental, seperti kecemasan, depresi, dan gangguan kognitif.

a. Studi terkait Polusi Udara dan Kesehatan Mental

Dalam studi tinjauan yang dilakukan antara tahun 2007 dan 2018, ditemukan bahwa polusi udara

adalah salah satu paparan fisik yang paling banyak menimbulkan dampak buruk. Dari 26 penelitian epidemiologi, 24 di antaranya menunjukkan hubungan positif antara polusi udara dan depresi, sedangkan dua penelitian lainnya menunjukkan hasil paparan jangka panjang yang tidak signifikan (van den Bosch & Meyer-Lindenberg, 2019).

Hasil studi meta analisis mengidentifikasi hubungan kecil namun signifikan antara paparan jangka panjang terhadap partikel halus di udara dengan gejala depresi dan penurunan fungsi kognitif (King et al., 2022). Studi cross-sectional dari Barcelona (Vert et al., 2017) menemukan bahwa peningkatan paparan polutan udara (PM_{2.5}, PM₁₀ dan NO₂) dalam jangka panjang dapat meningkatkan kemungkinan depresi dan penggunaan antidepresan. Kemungkinan depresi meningkat sebanyak 2 kali untuk setiap peningkatan 10µg/m³ NO₂. Dan kemungkinan penggunaan antidepresan sebesar 1,23 kali untuk setiap peningkatan 20µg/m³ NO_x. Namun, hubungan peningkatan polutan udara dengan gangguan kecemasan tidak signifikan secara statistik.

Polusi udara berdampak serius pada kesehatan mental, terutama pada kelompok rentan seperti ibu hamil. Penelitian menunjukkan bahwa paparan polusi udara selama kehamilan, khususnya polutan seperti NO₂ dan PM₁₀, berhubungan dengan peningkatan risiko depresi pascapersalinan. Depresi ini dapat berlangsung mulai dari 12 bulan hingga 3 tahun setelah persalinan, dengan paparan di trimester kedua sebagai periode sensitif (Hu et al., 2024). Paparan bahan organik PM_{2.5}, karbon hitam, O₃ selama kehamilan dan postpartum, serta PM pada akhir kehamilan dan periode postpartum, dapat meningkatkan risiko depresi pascapersalinan lebih lanjut (Sun et al., 2023).

Sebuah studi kohort di Cina yang melibatkan 10.209 ibu hamil menunjukkan bahwa peningkatan $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM₁₀, NO₂, dan $0,1 \text{ mg}/\text{m}^3$ CO selama kehamilan secara signifikan meningkatkan risiko depresi 1,4 - 2,69 kali pada 6 minggu pascapersalinan (Duan et al., 2022). Penelitian lain di Los Angeles pada kelompok wanita berpenghasilan rendah, mayoritas Hispanik/Latin, menemukan bahwa paparan NO₂ dan PM_{2.5} pada trimester kedua dapat menggandakan risiko depresi pada 12 bulan pascapersalinan. Temuan ini menekankan pentingnya memahami kontribusi faktor lingkungan yang dapat dimodifikasi selama masa kehamilan, terutama dalam fase yang dianggap kritis (Chavez et al., 2021).

Selain risiko paparan jangka panjang, polusi udara dalam paparan jangka pendek juga berdampak pada kesehatan mental. Penelitian mengenai dampak paparan polusi udara jangka pendek terhadap kesehatan mental menunjukkan adanya hubungan signifikan, terutama dalam konteks skizofrenia. Studi di Cina menemukan bahwa paparan jangka pendek terhadap polusi udara sekitar, seperti PM₁₀, SO₂, dan NO₂, berhubungan dengan peningkatan kunjungan rawat jalan harian untuk skizofrenia (Liang et al., 2019). Studi lain juga menunjukkan bahwa paparan jangka pendek terhadap PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, dan NO₂ meningkatkan risiko gangguan mental. NO₂ memiliki dampak paling konsisten terhadap morbiditas mental, meskipun pengaruh SO₂ terhadap gangguan afektif dan PM_{2.5} terhadap skizofrenia tidak signifikan. Kelompok pria dan lansia tampak lebih rentan terhadap dampak ini (Li et al., 2020).

Banyak penelitian telah dilakukan untuk mengkaji dampak polusi udara terhadap kesehatan mental. Sebagian besar hasil penelitian menunjukkan hubungan yang signifikan meskipun beberapa

penelitian masih menunjukkan hasil yang inkonsisten (Zundel et al., 2022). Penelitian di bidang ini masih menghadapi tantangan metodologis, seperti kesulitan dalam mengukur tingkat paparan polutan secara akurat dan kendala dalam pengumpulan data terkait dampak pada kesehatan mental. Kompleksitas ini perlu diatasi untuk meningkatkan validitas dan reliabilitas hasil penelitian, sehingga dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai dampak polusi udara terhadap kesehatan mental (King et al., 2022).

b. Mekanisme Biologis Dampak Polusi Udara terhadap Kesehatan Mental

Penelitian yang telah dilakukan untuk menjelaskan mekanisme keterkaitan antara polusi udara dan kesehatan mental sebagian besar dilakukan pada studi hewan dan beberapa pada studi manusia. Pada bab ini mekanisme yang berperan dalam hubungan antara polusi udara dengan kesehatan mental akan dijelaskan berdasarkan dua studi tinjauan.

Studi yang pertama (Zundel et al., 2022) menjelaskan mekanisme yang berfokus pada bagian frontolimbik otak, yang berperan penting dalam proses kompleks seperti regulasi emosi, pengambilan keputusan, dan perilaku sosial. Paparan polusi udara diduga meningkatkan risiko internalisasi psikopatologi melalui mekanisme neurobehavioral yang melibatkan perubahan struktural dan fungsional di wilayah frontolimbik otak seperti peningkatan inflamasi pada hipokampus dan korteks prefrontal, perubahan neurit dan sistem neurotransmitter terutama pada hipokampus dan frontolimbik, serta peningkatan marker stress oksidatif (contohnya: Mangan Superoksida Dismutase (MnSOD), Glutation (GSH) dan Malondialdehida (MDA)) (Zundel et al., 2022).

Pada studi kedua (van den Bosch & Meyer-Lindenberg, 2019) dampak polutan udara terhadap

kesehatan mental melibatkan mekanisme peradangan sistemik, stres oksidatif, dan gangguan pada sistem saraf pusat. Polutan udara dapat memengaruhi fungsi neurotransmitter, seperti serotonin, serta aktivitas neuron dopaminergik. Paparan polutan udara dapat memodulasi sitokin inflamasi dan menyebabkan perubahan morfologi neuron di hipokampus, yang berkontribusi pada stres oksidatif, terutama di area otak seperti korteks prefrontal dan striatum. Selain itu, polutan udara memengaruhi plastisitas saraf, yang berdampak pada kognisi, fungsi memori, dan masalah perilaku. Penurunan kadar faktor neurotropik yang berasal dari otak (brain-derived neurotrophic factor, BDNF), yang berperan penting dalam plastisitas saraf, juga telah dikaitkan dengan paparan polutan udara. Perubahan konsentrasi BDNF ini dapat diekspresikan dalam bentuk gangguan kejiwaan, termasuk depresi.

4. Kesimpulan dan Rekomendasi

Polusi udara tidak hanya berdampak pada kesehatan fisik tetapi juga meningkatkan risiko gangguan mental seperti depresi, penurunan fungsi kognitif, dan penggunaan antidepresan. Paparan jangka panjang maupun jangka pendek terhadap partikel halus (PM_{2.5}, PM₁₀) dan gas seperti NO₂ secara signifikan meningkatkan risiko depresi. Peningkatan risiko depresi pascapersalinan perlu diperhatikan pada kelompok rentan seperti ibu hamil, terutama pada trimester kedua kehamilan. Mekanisme yang mendasari dampak polusi udara terhadap kesehatan mental melibatkan peradangan sistemik, stress oksidatif dan perubahan struktur serta fungsi otak seperti penurunan plastisitas saraf dan gangguan pada neurotransmitter. Untuk itu diperlukan mitigasi polusi udara melalui pengurangan emisi polutan, pemantauan kualitas udara, perlindungan kelompok rentan, dan intervensi psikososial. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk lebih memahami dampak ini secara lebih mendalam,

guna mendukung kebijakan berbasis bukti dalam mengurangi beban kesehatan akibat polusi udara.

DAFTAR PUSTAKA

- American Psychological Association. (2018). *APA Dictionary of Psychology - Mental Health*.
<https://dictionary.apa.org/mental-health>
- Chavez, T., Habre, R., Hernandez-Castro, I., Grubbs, B., Toledo-Corral, C., Farzan, S., Lurvey, N., Lerner, D., Eckel, S., Lurmann, F., Lagomasino, I. & Breton, C. (2021). Prenatal ambient air pollution and maternal depression at 12 months postpartum in the MADRES pregnancy cohort. *Environmental Health*, 20.
<https://doi.org/10.1186/s12940-021-00807-x>
- Chen, F., Zhang, W., Mfarrej, M. F. B., Saleem, M. H., Khan, K. A., Ma, J., Raposo, A. & Han, H. (2024). Breathing in danger: Understanding the multifaceted impact of air pollution on health impacts. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 280, 116532.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116532>
- Devor, A., Andreassen, O. A., Wang, Y., Mäki-Marttunen, T., Smeland, O. B., Fan, C.-C., Schork, A. J., Holland, D., Thompson, W. K., Witoelar, A., Chen, C.-H., Desikan, R. S., McEvoy, L. K., Djurovic, S., Greengard, P., Svenningsson, P., Einevoll, G. T. & Dale, A. M. (2017). Genetic evidence for role of integration of fast and slow neurotransmission in schizophrenia. *Molecular Psychiatry*, 22(6), 792–801. <https://doi.org/10.1038/mp.2017.33>
- Duan, C.-C., Li, C., Xu, J.-J., He, Y.-C., Xu, H.-L., Zhang, D., Yang, J.-Q., Yu, J.-L., Zeng, W.-T., Wang, Y., Chen, L., Dennis, C.-L., Wu, Y.-T. & Huang, H.-F. (2022). Association between prenatal exposure to ambient air pollutants and postpartum depressive symptoms: A multi-city cohort study. *Environmental Research*, 209, 112786.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112786>
- Haryanto, B. (2018). Climate Change and Urban Air Pollution Health Impacts in Indonesia. In R. Akhtar & C. Palagiano

- (Eds.), *Climate Change and Air Pollution: The Impact on Human Health in Developed and Developing Countries* (pp. 215–239). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61346-8_14
- Hasan, K. (2024). *Indonesia's Air Quality: Decline in 2023 due to lack of intervention and El Nino. what about 2024?*
- Hawkins, C., Bwanika, J. M. & Ibanda, M. (2020). Socio-economic factors associated with mental health disorders in Fort Portal, western Uganda. *The South African Journal of Psychiatry : SAJP : The Journal of the Society of Psychiatrists of South Africa*, 26. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:221214945>
- Helbich, M. (2018). Mental Health and Environmental Exposures: An Editorial. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15. <https://doi.org/10.3390/ijerph15102207>
- Hu, Y., Niu, Z., Eckel, S. P., Toledo-Corral, C., Yang, T., Chen, X., Vigil, M., Pavlovic, N., Lurmann, F., Garcia, E., Lerner, D., Lurvey, N., Grubbs, B., Al-Marayati, L., Johnston, J., Dunton, G. F., Farzan, S. F., Habre, R., Breton, C. & Bastain, T. M. (2024). Prenatal exposure to ambient air pollution and persistent postpartum depression. *Science of The Total Environment*, 953, 176089. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176089>
- IQ Air. (2023). *Indonesia Air Quality Index (AQI) and Air Pollution information* | IQAir. <https://www.iqair.com/indonesia?srsltid=AfmBOob-8Wo1llaMMB-sHSLMYkd6HhsQGeRBLKdwUx1u-G31UQt4wrF>
- King, J. D., Zhang, S. & Cohen, A. (2022). Air pollution and mental health: associations, mechanisms and methods. *Current Opinion in Psychiatry*, 35(3). https://journals.lww.com/co-psychiatry/fulltext/2022/05000/air_pollution_and_mental_health_associations,.10.aspx

- Li, H., Zhang, S., Qian, Z. (Min), Xie, X.-H., Luo, Y., Han, R., Hou, J., Wang, C., McMillin, S. E., Wu, S., Tian, F., Deng, W.-F. & Lin, H. (2020). Short-term effects of air pollution on cause-specific mental disorders in three subtropical Chinese cities. *Environmental Research*, 191, 110214. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110214>
- Liang, Z., Xu, C., Cao, Y., Kan, H.-D., Chen, R.-J., Yao, C.-Y., Liu, X.-L., Xiang, Y., Wu, N., Wu, L., Li, Y.-F., Ji, A.-L. & Cai, T.-J. (2019). The association between short-term ambient air pollution and daily outpatient visits for schizophrenia: A hospital-based study. *Environmental Pollution*, 244, 102–108. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.09.142>
- Lim, S. Y., Kim, E. J., Kim, A., Lee, H. J., Choi, H. J. & Yang, S. J. (2016). Nutritional Factors Affecting Mental Health. *Clin Nutr Res*, 5(3), 143–152. <https://doi.org/10.7762/cnr.2016.5.3.143>
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A. & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. *Frontiers in Public Health*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>
- Schmidt, C. (2007). Environmental Connections: A Deeper Look into Mental Illness. *Environmental Health Perspectives*, 115, A404, A406–10. <https://doi.org/10.1289/ehp.115-a404>
- Sun, Y., Headon, K. S., Jiao, A., Slezak, J. M., Avila, C. C., Chiu, V. Y., Sacks, D. A., Molitor, J., Benmarhnia, T., Chen, J.-C., Getahun, D. & Wu, J. (2023). Association of Antepartum and Postpartum Air Pollution Exposure With Postpartum Depression in Southern California. *JAMA Network Open*, 6(10), e2338315–e2338315. <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2023.38315>
- Syuhada, G., Akbar, A., Hardiawan, D., Pun, V., Darmawan, A., Heryati, S., Siregar, A., Kusuma, R., Driejana, R., Ingole, V., Kass, D. & Mehta, S. (2023). Impacts of Air Pollution on Health and Cost of Illness in Jakarta, Indonesia.

- International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20, 2916. <https://doi.org/10.3390/ijerph20042916>
- US EPA. (2021). *ROE Glossary | EPA's Report on the Environment (ROE)* | US EPA. https://19january2021snapshot.epa.gov/report-environment/roe-glossary_.html
- van den Bosch, M. & Meyer-Lindenberg, A. (2019). Environmental Exposures and Depression: Biological Mechanisms and Epidemiological Evidence. *Annual Review of Public Health*, 40. <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-040218-044106>
- Vert, C., Sánchez-Benavides, G., Martinez, D., Gotsens, X., Gramunt, N., Cirach, M., Molinuevo, J., Sunyer, J., Nieuwenhuijsen, M., Crous-Bou, M. & Gascon, M. (2017). Effect of Long-term Exposure to Air Pollution on Anxiety and Depression in Adults: a Cross-Sectional Study. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 220. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2017.06.009>
- World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization. <https://iris.who.int/handle/10665/345329>
- World Health Organization. (2024). *Air pollution*. https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1
- Zundel, C. G., Ryan, P., Brokamp, C., Heeter, A., Huang, Y., Strawn, J. R. & Marusak, H. A. (2022). Air pollution, depressive and anxiety disorders, and brain effects: A systematic review. *NeuroToxicology*, 93, 272–300. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.neuro.2022.10.011>

BIODATA PENULIS



Sailent Rizki Sari Simaremare lahir di Kampung Pon, pada 24 Desember 1991. Menyelesaikan pendidikan S1 di Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Sumatera Utara dan S3 di Sains Kedokteran Universitas Tzu Chi, Taiwan (R.O.C). Saat ini penulis sebagai calon Peneliti di Pusat Riset Kesehatan Masyarakat dan Gizi, BRIN.



PT MEDIA PUSTAKA INDO
Jl. Merdeka RT4/RW2
Binangun, Kab. Cilacap, Provinsi Jawa Tengah
No hp. 0838 6333 3823
Website: www.mediapustakaindo.com
E-mail: mediapustakaindo@gmail.com

