ISBN 978-634-255-776-1



PENCEMARAN UDARA

Neny Rochyani, Ika Kusmawati,
Tri Mulyani, Titia Erika Sarlota Awom,
Bambang Suhartawan, Rahmawati Ning Utami

PENCEMARAN UDARA

Neny Rochyani
Ika Kusmawati
Tri Mulyani
Titia Erika Sarlota Awom
Bambang Suhartawan
Rahmawati Ning Utami

GET PRESS INDONESIA

PENCEMARAN UDARA

Penulis :
Neny Rochyani
Ika Kusmawati
Tri Mulyani
Titia Erika Sarlota Awom
Bambang Suhartawan
Rahmawati Ning Utami

ISBN : 978-634-255-776-1

Editor : Mila Sari, M. Si.
Desain Sampul dan Tata Letak : Tri Putri Wahyuni, S. Pd.

PENERBIT : GET PRESS INDONESIA
Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022
Jl. Palarik RT 01 RW 06 Kelurahan Air Pacah
Kecamatan Koto Tangah Padang Sumatera Barat
website: www.getpress.co.id
email: adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, Oktober 2026

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk
dan dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya sehingga buku **"Pencemaran Udara"** ini dapat diselesaikan dengan baik. Buku ini disusun sebagai bahan pembelajaran untuk memberikan pemahaman mengenai konsep dasar pencemaran udara, jenis dan sumber pencemar, proses terjadinya pencemaran, serta dampaknya terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Pembahasan juga mencakup pengaruh pencemaran udara terhadap ekosistem, hubungan pengelolaan sampah dengan polusi udara, pencemaran udara di kawasan perkotaan, serta pengendalian polusi udara dalam sektor pertanian.

Penyusunan buku ini diharapkan dapat membantu mahasiswa, pendidik, praktisi, maupun pembaca umum dalam memahami permasalahan pencemaran udara dan berbagai upaya pengendaliannya. Penulis menyadari bahwa buku ini masih memiliki keterbatasan, sehingga kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan untuk penyempurnaan pada masa mendatang. Semoga buku ini dapat memberikan manfaat, menambah wawasan, serta mendorong kepedulian dan partisipasi pembaca dalam menjaga kualitas udara dan kelestarian lingkungan.

.

Padang, Agustus 2026

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR i

DAFTAR ISI ii

DAFTAR GAMBAR v

BAB 1 PENGANTAR PENCEMARAN UDARA 1

1.1 Definsi Pencemaran Udara 3

1.2 Jenis dan Sumber Pencemaran Udara 6

1.3 Proses Terjadinya Pencemaran Udara 9

1.4 Dampak Pencemaran Udara 12

1.5 Indikator dan Parameter Pencemaran Udara 15

1.6 Regulasi dan Kebijakan Lingkungan Serta Peran Mayarakat dalam Pengendalian Pencemaran Udara 19

DAFTAR PUSTAKA 23

BAB 2 SUMBER-SUMBER PENCEMARAN UDARA 25

2.1 Pengenalan Kualitas Udara 25

2.2 Mengenal Jenis-jenis Pencemaran Udara 29

2.3 Sumber Pencemar Udara 39

2.4 Transformasi Polutan di Atmosfer 43

DAFTAR PUSTAKA 46

BAB 3 PENGARUH PENCEMARAN UDARA TERHADAP EKOSISTEM 47

3.1 Karakteristik dan Sumber Emisi Polutan Udara 48

3.2 Mekanisme Kerusakan Ekosistem Terestrial 52

3.3 Kerusakan Ekosistem Akuatik 55

3.4 Dampak Terhadap Biodiversitas dan Struktur Trofik 58

DAFTAR PUSTAKA 61

BAB 4 PENGELOLAAN SAMPAH DAN POLUSI UDARA 65

4.1 Hubungan Pengelolaan Sampah dengan Pencemaran Udara 66

4.2 Sumber Emisi Polusi Udara pada Sistem Pengelolaan Sampah 72

4.3 Dampak Polusi Udara Akibat Pengelolaan Sampah 76

4.4 Teknologi Pengelolaan Sampah untuk Mengurangi Polusi Udara 78

4.5 Strategi Pengendalian Polusi Udara dari Sektor Persampahan 92

DAFTAR PUSTAKA 99

BAB 5 PENCEMARAN UDARA DI KOTA-KOTA BESAR 103

5.1 Sumber dan Jenis Pencemar Udara di Perkotaan 104

5.2 Dampak Pencemaran Udara Terhadap Kesehatan Masyarakat 112

5.3 Pemantauan dan Pengukuran Kualitas Udara Perkotaan 120

5.4 Kebijakan dan Strategi Pengendalian Pencemaran Udara Perkotaan 129

DAFTAR PUSTAKA 139

BAB 6 PENGENDALIAN POLUSI UDARA DALAM PERTANIAN 143

6.1 Sumber Polusi Udara dalam Pertanian 145
6.2 Dampak Polusi Udara dalam Pertanian 149
6.3 Strategi Pengendalian dan Mitigasi Polusi Udara dalam Pertanian 154
DAFTAR PUSTAKA 159
BIODATA PENULIS 165

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Ilustrasi Perbandingan Ukuran Partikel PM.....35
Gambar 3. 1 *Biomagnification*.....60
Gambar 4. 1 Praktik Pembakaran Terbuka *(Open Burning)*.....70
Gambar 4. 2 *Sanitary Landfill*.....81
Gambar 4. 3 Tahap Arus Proses Landfill Gas Recovery.....82
Gambar 4. 4 *Landfill Methane Capure*.....84
Gambar 4. 5 *Electrostatic Precipitator (ESP)*.....86
Gambar 4. 6 *Baghouse Filter*.....87
Gambar 4. 7 Activated Carbon Injection (ACI).....90
Gambar 4. 8 Perbandingan Ekonomi Linear dan Ekonomi Sirkular.....97

BAB 1

PENGANTAR PENCEMARAN UDARA

Oleh Neny Rochyani

Udara merupakan salah satu komponen utama yang sangat penting bagi keberlangsungan kehidupan di bumi. Semua makhluk hidup, baik manusia, hewan, maupun tumbuhan membutuhkan udara untuk menjalankan proses biologis seperti respirasi, fotosintesis, dan metabolisme. Udara yang bersih dan sehat menjadi syarat utama terciptanya kualitas hidup yang baik. Namun, seiring dengan perkembangan zaman, pertumbuhan penduduk, industrialisasi, urbanisasi, dan peningkatan aktivitas manusia telah menyebabkan kualitas udara mengalami penurunan yang signifikan.

Perkembangan sektor industri dan transportasi memberikan kontribusi besar terhadap kemajuan ekonomi dan pembangunan suatu negara. Akan tetapi, aktivitas tersebut juga menghasilkan emisi gas dan partikel pencemar yang dilepaskan ke atmosfer. Kendaraan bermotor menghasilkan gas buang seperti karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NOx), dan hidrokarbon, sedangkan aktivitas industri menghasilkan sulfur dioksida (SO_2), partikulat debu, dan berbagai zat kimia lainnya. Selain itu, aktivitas rumah tangga seperti pembakaran sampah, penggunaan bahan bakar tradisional, dan kebakaran lahan turut memperburuk kondisi kualitas udara (Alley, F. C. 2000)

Pencemaran udara terjadi ketika zat, energi, atau komponen lain masuk ke atmosfer dalam jumlah yang melebihi ambang batas sehingga mengganggu keseimbangan lingkungan dan membahayakan makhluk hidup. Pencemaran udara dapat terjadi di lingkungan luar ruangan (outdoor air pollution) maupun di dalam ruangan (indoor air pollution). Pencemaran udara luar ruangan umumnya berasal dari transportasi, industri, pembangkit listrik, dan kebakaran hutan, sedangkan pencemaran udara dalam ruangan dapat berasal dari asap rokok, penggunaan kompor berbahan bakar biomassa, ventilasi yang buruk, serta penggunaan bahan kimia rumah tangga.

Masalah pencemaran udara saat ini telah menjadi isu global yang mendapat perhatian dunia internasional. Organisasi Kesehatan Dunia atau World Health Organization (WHO) menyatakan bahwa pencemaran udara merupakan salah satu faktor risiko utama penyebab kematian dini di dunia. Jutaan orang setiap tahunnya mengalami gangguan kesehatan akibat terpapar udara yang tercemar. Dampak kesehatan yang ditimbulkan meliputi gangguan saluran pernapasan, penyakit paru-paru kronis, asma, penyakit jantung, stroke, hingga kanker paru-paru. Kelompok masyarakat yang paling rentan terhadap dampak pencemaran udara adalah anak-anak, lansia, ibu hamil, dan individu dengan kondisi kesehatan tertentu.

Selain berdampak pada kesehatan manusia, pencemaran udara juga memberikan pengaruh besar terhadap lingkungan. Emisi gas tertentu seperti sulfur dioksida dan nitrogen oksida dapat menyebabkan hujan asam yang merusak tanaman, tanah, perairan, serta bangunan. Peningkatan konsentrasi gas rumah kaca seperti karbon dioksida (CO_2) dan metana (CH_4) juga berkontribusi terhadap pemanasan global dan perubahan iklim. Kondisi ini menyebabkan meningkatnya suhu bumi, perubahan pola

cuaca, mencairnya es di kutub, serta meningkatnya risiko bencana alam (Arya, S. P. 1999).

Di Indonesia, masalah pencemaran udara menjadi tantangan yang semakin serius, terutama di kota-kota besar dan kawasan industri. Tingginya jumlah kendaraan bermotor, aktivitas industri, pembakaran hutan dan lahan, serta penggunaan energi berbasis fosil menjadi faktor utama penyebab menurunnya kualitas udara. Beberapa daerah di Indonesia bahkan sering mengalami kabut asap akibat kebakaran hutan yang berdampak luas terhadap kesehatan masyarakat, aktivitas ekonomi, dan sektor pendidikan.

Permasalahan pencemaran udara tidak hanya berkaitan dengan aspek lingkungan, tetapi juga menyangkut aspek sosial, ekonomi, dan pembangunan berkelanjutan. Penurunan kualitas udara dapat meningkatkan biaya kesehatan, menurunkan produktivitas masyarakat, serta mengurangi kualitas hidup manusia. Oleh karena itu, pengendalian pencemaran udara menjadi tanggung jawab bersama antara pemerintah, industri, dan masyarakat.

Berdasarkan uraian tersebut, dapat dipahami bahwa pencemaran udara merupakan permasalahan kompleks yang memerlukan perhatian serius dan penanganan terpadu. Pemahaman mengenai sumber pencemaran, jenis polutan, dampak yang ditimbulkan, serta upaya pengendaliannya sangat penting untuk mendukung terciptanya lingkungan yang sehat dan berkelanjutan bagi generasi sekarang maupun generasi mendatang (Cooper, C. D., dan Alley, F. C. 2011).

1.1 Definsi Pencemaran Udara

Pencemaran udara merupakan salah satu bentuk pencemaran lingkungan yang terjadi akibat masuknya zat, energi, atau komponen lain ke dalam atmosfer sehingga menyebabkan perubahan kualitas udara dan menurunkan

fungsi udara bagi kehidupan makhluk hidup. Pencemaran udara dapat berasal dari aktivitas alami maupun aktivitas manusia (antropogenik) yang menghasilkan berbagai polutan berbahaya.

Menurut World Health Organization (WHO), pencemaran udara adalah kondisi ketika udara mengandung bahan pencemar dalam konsentrasi yang dapat membahayakan kesehatan manusia, hewan, tumbuhan, maupun lingkungan secara umum. WHO menjelaskan bahwa polusi udara menjadi salah satu risiko kesehatan terbesar di dunia karena paparan jangka panjang terhadap udara tercemar dapat menyebabkan berbagai penyakit serius seperti gangguan pernapasan, penyakit jantung, dan kanker paru-paru (Fardiaz, S. 1992).

Secara umum, pencemaran udara dapat diartikan sebagai perubahan susunan alami atmosfer akibat masuknya bahan pencemar baik berupa gas, partikel padat, cairan, maupun energi yang menyebabkan kualitas udara menurun. Udara normal pada dasarnya tersusun atas nitrogen sekitar 78%, oksigen 21%, serta gas lainnya seperti argon, karbon dioksida, dan uap air dalam jumlah kecil. Ketika terdapat penambahan zat asing dengan konsentrasi tertentu, keseimbangan udara terganggu dan menimbulkan pencemaran.

Pencemaran udara adalah: “Masuk atau dimasukkannya zat, energi, dan/atau komponen lain ke dalam udara ambien oleh kegiatan manusia sehingga mutu udara turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan udara tidak dapat berfungsi sesuai peruntukannya.”

Definisi tersebut menekankan bahwa pencemaran udara erat kaitannya dengan penurunan mutu udara akibat aktivitas manusia. Penurunan kualitas udara terjadi ketika konsentrasi polutan melampaui baku mutu lingkungan yang telah ditetapkan.

Pencemaran udara dapat dibedakan menjadi dua jenis berdasarkan lokasi terjadinya, yaitu:

1. Pencemaran Udara Luar Ruangan (*Outdoor Air Pollution*)

   Pencemaran udara luar ruangan terjadi di atmosfer terbuka akibat emisi dari: Kendaraan bermotor, Industri, Pembangkit Listrik, Kebakaran hutan. Aktivitas pertambangan Jenis pencemaran ini biasanya mencakup polutan seperti karbon monoksida (CO), sulfur dioksida (SO_2), nitrogen oksida (NOx), ozon troposfer, dan partikulat debu (PM10 dan PM2.5).

2. Pencemaran Udara Dalam Ruangan (*Indoor Air Pollution*)

   Pencemaran udara dalam ruangan terjadi di lingkungan tertutup seperti rumah, kantor, sekolah, dan bangunan lainnya. Sumber pencemaran antara lain: Asap rokok, Penggunaan kompor berbahan bakar kayu atau minyak tanah, Ventilasi buruk, Penggunaan bahan, kimia rumah tangga, Debu dan jamur. Selain berdasarkan lokasi, pencemar udara juga dapat dibedakan berdasarkan bentuknya, yaitu:

   a. Polutan Primer

      Polutan yang langsung dilepaskan ke udara dari sumber pencemar. Contoh: Karbon monoksida (CO), Sulfur dioksida (SO_2) , Debu

   b. Polutan Sekunder

      Polutan yang terbentuk akibat reaksi kimia di atmosfer. Contoh: Ozon troposfer (O_3), Kabut fotokimia

   Pencemaran udara dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti jumlah emisi, kondisi cuaca, arah angin, suhu udara, kelembapan, serta topografi wilayah. Di daerah perkotaan, tingkat pencemaran udara cenderung

lebih tinggi karena tingginya aktivitas transportasi dan industri.

1.2 Jenis dan Sumber Pencemaran Udara

Pencemaran udara terjadi akibat masuknya berbagai zat pencemar (polutan) ke atmosfer dalam jumlah tertentu sehingga menurunkan kualitas udara dan mengganggu kehidupan makhluk hidup. Polutan udara memiliki karakteristik yang berbeda-beda, baik dari segi bentuk, sifat kimia, sumber, maupun dampaknya terhadap kesehatan dan lingkungan. Oleh karena itu, pemahaman mengenai jenis dan sumber pencemaran udara sangat penting dalam upaya pengendalian pencemaran lingkungan.

A. Jenis Jenis Pencemaran Udara

Pencemar udara dapat diklasifikasikan berdasarkan bentuk fisik, proses terbentuknya, serta sumber asalnya (Godish, T. 2004).

1. Berdasarkan Bentuk Fisiknya

   a. Pencemar Berbentuk Gas

      Pencemar gas merupakan zat pencemar yang berada dalam bentuk gas di atmosfer. Jenis pencemar ini paling banyak ditemukan di daerah perkotaan dan kawasan industri. Antara lain karbon monoksida (CO), Sulfur dioksida (SO_2), Nitrogen Oksida (NO_x), Karbon dioksida (CO_2), Ozon traposfer (O_3)

   b. Pencemar Berbentuk Partikel

      Partikulat merupakan pencemar udara berbentuk padat atau cair berukuran sangat kecil yang melayang di udara. Antara lain : PM10 Partikel dengan diameter kurang dari 10

mikrometer, PM2.5 Partikel sangat halus dengan diameter kurang dari 2,5 mikrometer.

2. Berdasarkan Proses Terbentuknya

   a. Polutan Primer

      Polutan primer adalah polutan yang langsung dilepaskan ke atmosfer dari sumber pencemar.

   b. Polutan Sekunder

      Polutan sekunder terbentuk akibat reaksi kimia antarpolutan di atmosfer.

3. Berdasarkan Lokasi Terjadinya

   a. Pencemaran Udara Luar Ruangan (*Outdoor*)

      Terjadi di atmosfer terbuka akibat: Kendaraan, Industri, Kebakaran hutan

   b. Pencemaran Udara Dalam Ruangan (*Indoor*)

      Terjadi di ruang tertutup seperti rumah dan kantor. Berupa Asap rokok, Ventilasi buruk, Kompor biomassa

B. Sumber Pencemaran Udara

Sumber pencemaran udara dapat dibedakan menjadi sumber alami dan sumber akibat aktivitas manusia.

1. Sumber Alami

   Pencemaran udara alami berasal dari proses alam tanpa campur tangan manusia. Antara lain : Letusan Gunung Api, Kebakaran Hutan Alami, Debu dan Angin.

2. Sumber Antropogenik (Akibat Aktivitas Manusia)

Sumber antropogenik merupakan penyebab utama pencemaran udara modern.

a. Transportasi

Transportasi merupakan penyumbang utama pencemaran udara perkotaan.

b. Industri

Industri menghasilkan emisi dari proses produksi dan pembakaran energi.

c. Rumah Tangga

Aktivitas rumah tangga juga menjadi sumber pencemaran udara.

d. Pertanian dan Peternakan

Pertanian menghasilkan: Amonia, Pestisida, Asap pembakaran lahan sedangkan Peternakan menghasilkan: Gas metana (CH_4)

e. Pertambangan

Aktivitas tambang menghasilkan: Debu, Gas beracun Partikel logam

f. Kebakaran Hutan dan Lahan

Kebakaran hutan menghasilkan kabut asap lintas wilayah.

C. Faktor yang mempengaruhi Pencemaran Udara

Beberapa faktor yang memengaruhi tingkat pencemaran udara:

1. Kondisi Meteorologi yaitu : Kecepatan angin, Suhu udara, Curah hujan

2. Topografi Wilayah yaitu Daerah lembah cenderung menahan polutan lebih lama.
3. Kepadatan Penduduk yaitu Semakin padat penduduk, semakin tinggi aktivitas pencemar.
4. Urbanisasi dan Industrialisasi menyebabkan Pengembangan kota meningkatnya konsumsi energi dan emisi.

1.3 Proses Terjadinya Pencemaran Udara

Pencemaran udara merupakan proses masuknya zat pencemar atau polutan ke atmosfer sehingga menyebabkan perubahan kualitas udara yang dapat membahayakan kesehatan manusia, makhluk hidup lain, serta lingkungan. Proses terjadinya pencemaran udara tidak berlangsung secara sederhana, melainkan melalui serangkaian tahapan yang melibatkan sumber emisi, pelepasan polutan, penyebaran di atmosfer, reaksi kimia, hingga dampaknya terhadap lingkungan dan kesehatan.

Secara umum, pencemaran udara terjadi ketika jumlah polutan yang masuk ke atmosfer melebihi kemampuan alami lingkungan untuk menetralisir atau menguraikannya. Atmosfer sebenarnya memiliki kemampuan alami untuk membersihkan udara melalui proses pengenceran, pengendapan, dan pencucian oleh hujan. Namun, peningkatan aktivitas manusia menyebabkan jumlah polutan yang dilepaskan menjadi sangat besar sehingga melampaui daya dukung lingkungan (Mukono, H. J. 2008).

A. Tahapan Proses Terjadinya Pencemaran Udara

Proses pencemaran udara dapat dijelaskan melalui beberapa tahapan utama berikut:

1. Pembentukan dan Pelepasan Polutan

   Tahap awal pencemaran udara dimulai dari terbentuknya zat pencemar akibat aktivitas alami maupun aktivitas manusia.

   a. Aktivitas Alami

      Beberapa proses alami menghasilkan polutan udara, antara lain: Letusan gunung api Kebakaran hutan alami Debu akibat angin Pembusukan bahan organik

   b. Aktivitas Manusia (Antropogenik)

      Aktivitas manusia merupakan penyebab utama pencemaran udara modern. Sumber utama: Kendaraan bermotor, Industri, Pembangkit Listrik, Pembakaran sampah, Pertambangan, Pertanian

2. Emisi Polutan Ke Atmosfer

   Setelah terbentuk, polutan dilepaskan ke udara melalui proses emisi.

   Jenis Emisi

   a. Emisi Bergerak

      Berasal dari kendaraan bermotor seperti: Mobil, Motor, Truk, Pesawat

   b. Emisi Tidak Bergerak

      Berasal dari: Cerobong pabrik, Pembangkit Listrik, Industri

   c. Emisi Area

      Berasal dari wilayah tertentu seperti: Tempat pembakaran sampah, Kebakaran lahan, Kawasan pertanian

3. Penyebaran dan Transportasi Polutan

Polutan yang telah masuk ke atmosfer tidak langsung menetap di satu tempat, tetapi mengalami penyebaran dan perpindahan akibat pengaruh meteorologi.

Faktor yang Mempengaruhi Penyebaran Polutanantara lain, Angin membawa polutan dari satu wilayah ke wilayah lain. Suhu mempengaruhi pergerakan udara dan kemampuan atmosfer menyebarkan polutan.Inversi suhu terjadi ketika lapisan udara dingin terperangkap di bawah lapisan udara panas sehingga polutan tertahan dekat permukaan bumi. Kelembapan tinggi mempercepat pembentukan kabut dan partikel. Hujan membantu membersihkan atmosfer melalui proses:

4. Transformasi Kimia Di Atmosfer

Polutan yang berada di udara dapat mengalami reaksi kimia akibat pengaruh: sinar matahari, Oksigen, Uap air, Polutan lain. Reaksi ini menghasilkan polutan sekunder yang sering kali lebih berbahaya (Manahan, S. E. 2010).

a. Pembentukan Ozon Troposfer

Nitrogen oksida (NOx) dan hidrokarbon bereaksi dengan sinar matahari menghasilkan ozon troposfer (O_3).

Reaksi sederhana:

NOx + Hidrokarbon + Sinar Matahari $\rightarrow O_3$

b. Pembentukan Hujan Asam

Sulfur dioksida (SO_2) dan nitrogen oksida (NOx) bereaksi dengan uap air membentuk asam.

Reaksi:
$SO_2 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$

$NOx + H_2O \rightarrow HNO_3$

c. Pembentukan Kabut Fotokimia

Kabut fotokimia terbentuk akibat reaksi polutan dengan cahaya matahari.

5. Akumulasi Polutan di Atmosfer

Apabila jumlah polutan yang dilepaskan lebih besar daripada kemampuan atmosfer untuk membersihkan diri, maka terjadi penumpukan polutan. Akumulasi biasanya terjadi pada: Kota besar, Kawasan industry, Wilayah padat kendaraan (Seinfeld, J. H., dan Pandis, S. N. 2016).

1.4 Dampak Pencemaran Udara

Pencemaran udara merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang memberikan dampak luas terhadap kehidupan manusia, hewan, tumbuhan, serta keseimbangan ekosistem. Dampak pencemaran udara tidak hanya dirasakan secara langsung dalam bentuk gangguan kesehatan, tetapi juga berdampak terhadap lingkungan, ekonomi, sosial, bahkan perubahan iklim global. Tingkat dampak yang ditimbulkan sangat dipengaruhi oleh jenis polutan, konsentrasi polutan, lama paparan, kondisi lingkungan, dan tingkat kerentanan makhluk hidup yang terpapar (Miller, G. T., dan Spoolman, S. 2015).

A. Dampak Terhadap Kesehatan Manusia

Dampak utama pencemaran udara paling banyak dirasakan pada sistem kesehatan manusia, terutama sistem pernapasan dan kardiovaskular. Polutan udara dapat masuk ke dalam tubuh melalui proses pernapasan

dan kemudian memengaruhi organ-organ vital (WHO. 2021).

1. Gangguan Sistem Pernapasan

   Sistem pernapasan merupakan organ pertama yang terkena dampak pencemaran udara. Polutan seperti: Partikulat (PM2.5 dan PM10), Sulfur dioksida (SO_2), Nitrogen dioksida (NO_2), Ozon (O_3) dapat menyebabkan iritasi saluran pernapasan.

   Penyakit yang Ditimbulkan antara lain : Infeksi Saluran Pernapasan Akut (ISPA), Asma, Bronkitis dan Penyakit Paru Kronis, Kanker Paru-Paru

2. Gangguan Sistem Kardiovaskular

   Partikulat halus PM2.5 dapat masuk ke aliran darah dan memengaruhi jantung.

3. Gangguan pada Anak dan Ibu Hamil

   Anak-anak lebih rentan karena sistem pernapasan mereka belum berkembang sempurna.

4. Gangguan Sistem Saraf

   Penelitian menunjukkan bahwa paparan polusi udara jangka panjang dapat memengaruhi fungsi otak.

5. Kematian Dini

   Pencemaran udara menjadi penyebab jutaan kematian dini setiap tahun.

B. Dampak Terhadap Lingkungan

Selain kesehatan manusia, pencemaran udara juga berdampak besar terhadap lingkungan hidup dan keseimbangan ekosistem (Wardhana, W. A. 2004).

1. Hujan Asam

Hujan asam terjadi akibat reaksi sulfur dioksida (SO_2) dan nitrogen oksida (NOx) dengan uap air di atmosfer.

2. Kerusakan Tumbuhan dan Hutan

Polutan seperti ozon troposfer dapat merusak jaringan tumbuhan.

3. Penurunan Kualitas Air dan Tanah

4. Gangguan Ekosistem

C. Dampak Terhadap Iklim Global

Pencemaran udara memiliki hubungan erat dengan perubahan iklim.

1. Pemanasan Global

2. Perubahan Iklim

3. Penipisan Lapisan Ozon

D. Dampak Sosila dan Ekonomi

Pencemaran udara juga berdampak pada kehidupan sosial dan ekonomi masyarakat.

1. Peningkatan Biaya Kesehatan

Meningkatnya jumlah penderita penyakit menyebabkan:

2. Penurunan Produktivitas Kerja

Masyarakat yang sakit mengalami: Penurunan kemampuan kerja

3. Gangguan Aktivitas Masyarakat

Kabut asap dapat mengganggu: Transportasi, Pendidikan, Pariwisata

4. Kerugian Ekonomi Nasional

Kerugian akibat pencemaran udara meliputi: Kerusakan lingkungan, Penurunan hasil, Pertanian, Gangguan industri dan perdagangan.

E. Dampak Dalam Ruangan *(Indoor)*

Pencemaran udara dalam ruangan juga berbahaya. Berdampak pada Gangguan paru-paru, Iritasi mata, Sakit kepala

1.5 Indikator dan Parameter Pencemaran Udara

Kualitas udara merupakan salah satu indikator penting dalam menentukan tingkat kesehatan lingkungan dan keselamatan makhluk hidup. Untuk mengetahui apakah udara berada dalam kondisi baik atau telah tercemar, diperlukan pengukuran terhadap berbagai parameter pencemar udara. Pengukuran ini dilakukan melalui indikator dan parameter tertentu yang menunjukkan konsentrasi polutan di atmosfer (Nugroho, S. 2006).

Indikator dan parameter pencemaran udara digunakan untuk:

- Menilai kualitas udara
- Mengidentifikasi tingkat pencemaran
- Menentukan dampak terhadap kesehatan
- Menjadi dasar pengambilan kebijakan lingkungan
- Menentukan langkah pengendalian pencemaran

A. Indikator Pencemaran Udara

Indikator pencemaran udara adalah tanda atau ukuran yang digunakan untuk menunjukkan tingkat kualitas udara dan tingkat pencemaran di suatu wilayah.

Indikator ini dapat berupa: Nilai konsentrasi polutan, Perubahan warna udara, Jarak pandang, Dampak terhadap kesehatan, Kerusakan lingkungan

B. Parameter Pencemaran Udara

Parameter pencemaran udara adalah jenis zat pencemar tertentu yang diukur konsentrasinya di udara. Parameter ini biasanya berupa: Gas pencemar, Partikulat, Senyawa kimia berbahaya

Parameter Utama Pencemaran Udara

Beberapa parameter utama yang umum digunakan dalam pengukuran kualitas udara adalah sebagai berikut.

1. Partikulat (PM10 DAN PM2.5) Partikulat adalah partikel kecil padat atau cair yang melayang di udara.
   a. PM10 PM10 adalah partikel dengan diameter kurang dari 10 mikrometer.
   b. PM2.5 PM2.5 adalah partikel sangat halus dengan diameter kurang dari 2,5 mikrometer PM2.5 menjadi parameter paling berbahaya karena ukurannya sangat kecil sehingga mudah masuk ke dalam tubuh.
2. Karbon Monoksida (CO)

   Karbon monoksida merupakan gas tidak berwarna dan tidak berbau yang berasal dari pembakaran tidak sempurna bahan bakar fosil.
3. Sulfur Dioksida (SO_2)

   SO_2 merupakan gas pencemar yang berasal dari pembakaran bahan bakar yang mengandung sulfur.

4. Nitrogrm Dioksida (NO_2)

   NO_2 adalah gas berwarna cokelat kemerahan yang berasal dari proses pembakaran suhu tinggi.

5. Ozon Troposfer (O_3)

   Ozon troposfer terbentuk akibat reaksi kimia antara NOx dan hidrokarbon dengan bantuan sinar matahari.

6. Timbal (Pb)

   Timbal merupakan logam berat beracun.

7. Hidrokarbon (HC)

   Hidrokarbon berasal dari pembakaran bahan bakar yang tidak sempurna.

8. Amonia (NH_3)

   Amonia banyak dihasilkan dari aktivitas pertanian dan peternakan.

Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU)

Di Indonesia, kualitas udara dinilai menggunakan:

Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU)

ISPU merupakan angka yang menggambarkan kondisi kualitas udara berdasarkan konsentrasi polutan tertentu. Tujuan ISPU: Memberikan informasi kualitas udara kepada Masyarakat, Menentukan tingkat bahaya pencemaran.

Kategori ISPU

Nilai ISPU	Kategori	Dampak
0–50	Baik	Tidak berpengaruh terhadap kesehatan
51–100	Sedang	Tidak berpengaruh pada manusia sehat
101–200	Tidak Sehat	Merugikan kelompok sensitif
201–300	Sangat Tidak Sehat	Merugikan kesehatan masyarakat
>300	Berbahaya	Risiko serius bagi kesehatan

D. Baku Mutu Udara Ambien

Baku mutu udara adalah batas kadar maksimum polutan yang diperbolehkan berada di udara. Baku mutu ditetapkan untuk: Melindungi kesehatan manusia, Menjaga kualitas lingkungan, Parameter yang diatur: PM2.5, PM10, SO_2, NO_2, CO, O_3 (Soedomo, M. 2001)

E. Faktor yang Memppengaruhi Nilai Parameter Pencemaran

1. Kondisi Cuaca Angin, Hujan, Suhu
2. Kepadatan Kendaraan Semakin banyak kendaraan, emisi meningkat.
3. Aktivitas Industri Industri menghasilkan emisi besar.
4. Kebakaran Hutan Meningkatkan PM2.5 secara signifikan.

G. Dampak Parameter Pencemaran Terhadap Kesehatan

Parameter	Dampak Utama
PM2.5	Penyakit paru dan jantung
CO	Keracunan
SO_2	Iritasi paru
NO_2	Gangguan pernapasan
O_3	Iritasi mata dan paru
Pb	Kerusakan saraf

1.6 Regulasi dan Kebijakan Lingkungan Serta Peran Mayarakat dalam Pengendalian Pencemaran Udara

Pencemaran udara merupakan permasalahan lingkungan yang memerlukan penanganan secara menyeluruh melalui keterlibatan pemerintah, dunia industri, dan masyarakat. Dalam upaya pengendalian pencemaran udara, regulasi dan kebijakan lingkungan memiliki peranan penting sebagai dasar hukum dan pedoman dalam pengelolaan kualitas udara. Selain itu, partisipasi masyarakat juga sangat diperlukan karena keberhasilan pengendalian pencemaran udara tidak dapat dicapai hanya melalui kebijakan pemerintah tanpa dukungan dan kesadaran publik.

Regulasi lingkungan berfungsi untuk mengatur batas pencemaran, mengendalikan sumber emisi, memberikan sanksi terhadap pelanggaran, serta menjamin hak masyarakat untuk memperoleh lingkungan hidup yang baik dan sehat. Sementara itu, masyarakat berperan sebagai pelaku utama dalam menjaga lingkungan melalui perubahan

perilaku dan partisipasi aktif dalam kegiatan pelestarian lingkungan.

A. Regulasi Dan Kebijakan Lingkungan Dalam Pengendalian Pencemaran Udara

1. Pengertian

   Regulasi lingkungan adalah seperangkat aturan, kebijakan, dan ketentuan hukum yang dibuat pemerintah untuk melindungi lingkungan hidup dari kerusakan dan pencemaran.

   Tujuan regulasi lingkungan:

   1. Menjaga kualitas lingkungan
   2. Melindungi kesehatan masyarakat
   3. Mengendalikan aktivitas pencemar
   4. Menjamin pembangunan berkelanjutan
   5. Memberikan kepastian hukum

2. Tujuan

   Kebijakan pengendalian pencemaran udara bertujuan untuk:

   - Mengurangi emisi polutan
   - Menjaga kualitas udara ambien
   - Melindungi kesehatan manusia
   - Mengurangi dampak perubahan iklim
   - Mendorong penggunaan teknologi bersih
   - Meningkatkan kesadaran masyarakat

3. Regulasi Pencemaran Udara di Indonesia

   Indonesia memiliki berbagai regulasi terkait perlindungan lingkungan dan pengendalian pencemaran udara.

a. Undang-Undang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup

Dasar hukum utama pengelolaan lingkungan di Indonesia adalah: Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup

b. Peraturan Pemerintah tentang Pengendalian Pencemaran Udara

Pemerintah menetapkan aturan mengenai: Baku mutu udara ambien, Batas emisi kendaraan, Batas emisi industri

c. Kebijakan Uji Emisi Kendaraan

Uji emisi dilakukan untuk: Mengontrol gas buang kendaraan, Mengurangi pencemaran transportasi Kendaraan yang tidak memenuhi standar dapat dikenakan sanksi.

d. Kebijakan Industri Ramah Lingkungan

Industri diwajibkan: Mengolah gas buang, Menggunakan teknologi pengendali emisi, Memenuhi standar lingkungan

e. Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL)

AMDAL merupakan kajian dampak lingkungan suatu kegiatan sebelum dilaksanakan.

4. Penegakan Hukum Lingkungan

Penegakan hukum penting untuk memastikan kepatuhan terhadap regulasi lingkungan.

5. Kebijakan Global Dalam Pengendalian Pencemaran Udara

Masalah pencemaran udara juga menjadi perhatian dunia internasional. Beberapa kebijakan global: Protokol Kyoto, Perjanjian Paris (*Paris Agreement*), *Sustainable Development Goals* (SDGs)

7. Kebijakan Transportasi Berkelanjutan

   Pemerintah mengembangkan: Transportasi umum, Kendaraan Listrik, Jalur sepeda, Hari bebas kendaraan

8. Kebijakan Energi Bersih

   Penggunaan energi terbarukan menjadi solusi pengurangan pencemaran udara. Contoh: Energi surya, Energi angin, Energi air

B. Peran Mayarakat Dalam Pengendalian Pencemaran Udara

Peran masyarakat adalah keterlibatan individu maupun kelompok dalam upaya menjaga dan memperbaiki kualitas lingkungan hidup.

Partisipasi masyarakat dapat dilakukan secara: Individu, Kelompok, Komunitas Organisasi lingkungan

DAFTAR PUSTAKA

Alley, F. C. 2000. *Air Pollution Control: A Design Approach*. 3rd ed. Illinois: Waveland Press.

Arya, S. P. 1999. *Air Pollution Meteorology and Dispersion*. New York: Oxford University Press.

Cooper, C. D., dan Alley, F. C. 2011. *Air Pollution Control: A Design Approach*. Long Grove: Waveland Press.

Fardiaz, S. 1992. *Polusi Air dan Udara*. Yogyakarta: Kanisius.

Godish, T. 2004. *Air Quality*. 4th ed. Boca Raton: CRC Press.

Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia. 2013. *Pedoman Pengendalian Pencemaran Udara*. Jakarta: KLH RI.

Manahan, S. E. 2010. *Environmental Chemistry*. 9th ed. Boca Raton: CRC Press.

Miller, G. T., dan Spoolman, S. 2015. *Environmental Science*. 14th ed. Boston: Cengage Learning.

Mukono, H. J. 2008. *Prinsip Dasar Kesehatan Lingkungan*. Surabaya: Airlangga University Press.

Nugroho, S. 2006. *Pengendalian Pencemaran Udara*. Jakarta: Rineka Cipta.

Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara. 1999. Jakarta: Pemerintah Republik Indonesia.

Seinfeld, J. H., dan Pandis, S. N. 2016. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. 3rd ed. New Jersey: John Wiley & Sons.

Soedomo, M. 2001. *Pencemaran Udara*. Bandung: ITB Press.

Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. 2009. Jakarta: Pemerintah Republik Indonesia.

Wardhana, W. A. 2004. *Dampak Pencemaran Lingkungan*. Yogyakarta: Andi Offset.

WHO. 2021. *Air Pollution and Health*. Geneva: World Health Organization

United Nations Environment Programme (UNEP)

United Nations Climate Action

BAB 2

SUMBER-SUMBER PENCEMARAN UDARA

Oleh Ika Kusmawati

2.1 Pengenalan Kualitas Udara

Berdasarkan pemahaman mengenai regulasi lingkungan di Indonesia, mari kita uraikan deskripsi mengenai Udara Ambien (udara sekitar) serta bagaimana elemen-elemen di dalamnya berinteraksi dengan lingkungan dan kesehatan masyarakat. Sebagaimana Anda sebutkan, Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 mendefinisikan udara ambien sebagai udara bebas di permukaan bumi pada lapisan troposfer yang dibutuhkan dan berpengaruh terhadap kesehatan manusia, makhluk hidup, dan unsur lingkungan hidup lainnya.

- Lapisan Troposfer: Ini adalah lapisan atmosfer terbawah (tempat kita bernapas), yang memiliki ketebalan rata-rata sekitar 10-15 km dari permukaan bumi. Di lapisan inilah hampir seluruh fenomena cuaca terjadi dan seluruh aktivitas manusia berlangsung.
- Wilayah NKRI: Penegakan hukum dan pengelolaan kualitas udara ini berlaku di seluruh yurisdiksi Indonesia, mencakup daratan, perairan pedalaman, laut teritorial, dan zona ekonomi eksklusif yang menjadi bagian dari ruang udara Indonesia.

- Udara ambien tidak sekadar gas tak kasat mata, melainkan campuran kompleks yang memiliki parameter kualitas spesifik. Dalam konteks pengelolaan lingkungan, kualitas udara diukur berdasarkan konsentrasi polutan yang ada di dalamnya:
- Gas Alami (Komposisi Sehat): Udara bersih idealnya terdiri dari Nitrogen (78%), Oksigen (21%), Argon (0,9%), dan Karbon Dioksida (0,04%).

Polutan (Elemen Pengotor): Kualitas udara menjadi "tercemar" ketika elemen-elemen berikut melebihi ambang batas baku mutu:

1. PM2.5 dan PM10: Partikulat debu mikroskopis yang berbahaya bagi sistem pernapasan.
2. SO2 (Sulfur Dioksida) & NO2 (Nitrogen Dioksida): Sering dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil.
3. CO (Karbon Monoksida): Hasil pembakaran tidak sempurna.
4. O3 (Ozon Permukaan): Polutan sekunder yang terbentuk dari reaksi kimia di bawah sinar matahari.

Berdasarkan ketentuan dalam Pasal 1 angka 49 PP No. 22 Tahun 2021 memberikan pengertian Pencemaran Udara adalah masuk atau dimasukkannya zat, energi, dan/atau komponen lainnya ke dalam Udara Ambien oleh kegiatan manusia sehingga melampaui Baku Mutu Udara Ambien yang telah ditetapkan. Klasifikasi pencemaran meliputi pencemaran: fisik, biologis, kimia dan budaya/sosial ekonomi. Sementara itu, sumber pencemar akibat usaha industri beraneka ragam melalui media air, tanah dan udara. Sebagai gambaran dapat disebutkan beberapa jenis limbah industri yang menjadi sumber pencemar, antara lain meliputi:

a. sumber limbah padat limbah padat banyak dijumpai pada industri mesin, aneka industri, industri kimia dan industri kecil;

b. sumber limbah cair dijumpai pada industri yang menggunakan air dalam proses produksi mulai dari pra pengolahan seperti pencucian sampai dengan produk akhir;
c. sumber limbah gas gas, uap dan debu serta asap dijumpai pada industri kimia. gas seperti chlor, SO_2 dan CO terdapat pada industri logam. Pabrik asam sulfat membuat udara berbau belerang. Gas karbon monoksida timbul karena tidak sempurna dalam ruang pembakaran; dan
d. bahan berbahaya dan beracun bahan berbahaya dan beracun dapat diidentifikasikan dalam bentuk dan sifat bahan itu sendiri, apakah berupa cairan ataupun gas. bahan berbahaya dan beracun banyak dikaitkan dengan masalah penyimpanan dan penggunaan.

Faktor Meteorologis yang Mempengaruhi Pencemaran Udara Faktor meteorologi merupakan faktor penting yang akan mempengaruhi proses tranformasi dan transportasi polutan di atmosfer. Suhu udara vertikal dapat menentukan stabilitas atmosfer dan lapisan inversi suhu yang berpengaruh pada kualitas udara di lingkungan industri (Barmpadimos, 2011).

a. Curah Hujan

Hujan merupakan kondisi meteorologi yang sangat mempengaruhi konsentrasi pencemar pada udara ambien. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Intan Agustine (2017) menyebutkan bahwa pada musim hujan saat nilai curah hujan cenderung tinggi, konsentrasi pencemar pada udara ambien akan justru menurun. Hal ini dikarenakan pencemar pada udara ambien terbawa dan terbilas masuk kedalam air hujan.

b. Suhu Udara

Suhu udara merupakan unsur iklim di atmosfer yang sangat penting karena berubah sesuai tempat dan

waktu. Suhu udara akan berfluktuasi dengan nyata setiap periode 24 jam. Fluktuasi suhu akan terganggu apabila turbulensi udara atau pergerakkan massa udara menjadi sangat aktif, misalnya pada kondisi kecepatan angin tinggi (Tjasyono, 2004). Menurut Okrofoar (2014) dalam Istikharotun dkk (2016), menjelaskan bahwa perbedaan temperatur mempengaruhi konsentrasi polutan di udara ambien dan konsentrasi pencemar akan cenderung menurun seiring dengan meningkatnya temperatur.

c. Kecepatan Angin

Kecepatan angin adalah rata- rata laju pergerakan angin yang merupakan gerakan horizontal udara terhadap permukaan bumi suatu waktu yang diperoleh dari hasil pengukuran harian. Kecepatan angin dapat diukur dengan suatu alat yang dinamakan anemometer (Neiburger, 1995).

Menurut Tasic dkk (2013) dalam Isirokhatun dkk (2016) menjelaskan, semakin tinggi kecepatan angin, maka konsentrasi polutan di udara akan semakin kecil karena polutan tersebut terbawa angin menjauhi lokasi pengukuran. Semakin tinggi kecepatan angin, maka pencemar akan terdilusi melalui dispersi sehingga peningkatan kecepatan angin akan mempercepat terjadinya dispersi dan dilusi pencemar udara sehingga konsentrasi pencemar rendah.

d. Kelembapan Udara

Menurut Tjasyono (2004), yang dimaksud kelembaban udara adalah banyaknya uap air yang terkandung dalam massa udara pada waktu dan tempat tertentu. Secara singkat, pengukuran kelembaban di udara dilakukan dengan pengukuran kelembaban relatif. Kelembaban relatif adalah perbandingan antara tekanan uap air yang terukur dengan tekanan uap air pada

kondisi jenuh yang dinyatakan dalam persen. Kelembaban relatif dapat diukur menggunakan higrometer atau psikometer. Kelembaban relatif akan berubah sesuai dengan tempat dan waktu. Menjelang tengah hari maka kelembaban akan relatif berangsur-angsur turun kemudian bertambah besar pada sore hari hingga menjelang pagi.

2.2 Mengenal Jenis-jenis Pencemaran Udara

Baku mutu udara ambien adalah nilai pencemar udara yang ditenggang keberadaannya dalam udara ambien. Sumber pencemar udara adalah setiap kegiatan manusia yang mengeluarkan pencemar udara ke dalam udara ambien. (PP RI No. 22 Tahun 2021), yaitu: $PM^{2.5}$, SO_2, NO_x, CO, O_3

2.2.1 *Particulate Matter* (PM)

A. Definisi PM10

PM10 adalah partikel padat dan cair yang mengapung di udara dengan diameter aerodinamis 10 mikrometer berukuran sedang. Ada beberapa nama lain untuk partikel 10 mikron. Yaitu, PM10 sebagai inhalable particles, respirable particulate, respirable dust, dan inhalable dust. PM10 adalah kelompok partikel yang dapat di hirupi, tetapi karena ukurannya, PM10 lebih spesifik merupakan partikulat yang respirable dan predictor kesehatan yang baik (Koren, 2003). Debu halus adalah benda padat, cair, atau campuran partikel padat dan cair yang bercampur atau tersuspensi di udara. Partikel diklasifikasikan menjadi dua jenis berdasarkan massa dan komposisinya.

a. Debu Kasar (*Coarse Particle*) Debu kasar adalah partikel dengan diameter aerodinamis lebih

besar dari 2,5 μm, dan partikel ini terbentuk dari pecahan partikel yang lebih besar.

b. Debu Halus (*Fine Particle*) Debu halus adalah partikel dengan diameter aerodinamis kurang dari 2,5 μm, yang sebagian besar terbentuk dari gas.

Secara alami berasal dari tanah, bakteri, virus, jamur, ragi, serbuk sari serta partikulat garam dan evaporasi air laut. Sedangkan dari aktifitas manusia, partikulat dihasilkan dari penggunaan kendaraan bermotor, hasil pembakaran, proses industri dan tenaga listrik. PM10 dibuat langsung dari emisi mesin diesel, industri pertanian, aktivitas jalan, dan reaksi fotokimia dengan polutan. Sumber partikel menurut ukuan diameter adalah (EPA, 2004):

a. Partikulat sangat halus (diameter ≤ 0,1 μm), Ini berasal dari hasil konversi SO2 atmosfer dan pembakaran campuran organik, serta hasil proses kimia suhu tinggi.
b. Partikulat mode akumulasi (diameter 0,1 μm sampai 3 μm), Hasil konversi NOx, SO2, campuran organik dari pembakaran batubara, minyak bumi, bensin, solar dan kayu bakar, dan hasil proses temperatur tinggi (pabrik logam dan pabrik baja).
c. Partikulat kasar/coarse (> 3 μm), hasil dari turbulensi partikel industri, jalan tak beraspal di jalan raya, pemadaman kontak dengan tanah (pertanian, pertambangan, jalan tak beraspal), kegiatan konstruksi dan pembongkaran, dan pembakaran minyak dan batu bara yang tidak terkendali.

Dampak PM10 Terhadap Kesehatan dan Lingkungan Polusi udara dari debu dapat menyebabkan penyakit seperti bronkitis kronis, emfisema, dan kanker paru-paru. Sementara itu, polusi gas dapat menular langsung ke paru-paru. Contoh pencemaran udara dari timbal di udara dapat mengganggu pembentukan sel darah merah, yang dapat menyebabkan gangguan kesehatan lainnya seperti kerusakan ginjal dan anemia. (Soedomo, 2001). PM10 dapat masuk ke saluran pernapasan dan menyebabkan penyakit pernapasan kronis seperti bronkitis kronis, emfisema, asma bronkial, dan kanker paru-paru (Linna, 2011). Sekitar 50% dari partikel berukuran 0,01-0,1 μm dapat masuk di kompartemen paru-paru.

Studi epidemiologi yang dilakukan untuk menentukan hubungan antara konsentrasi partikel di udara ambien dan indikator kesehatan menunjukkan bahwa kematian meningkat 0,7 – 1,6% dengan peningkatan PM10 10 μg/m3 (Ruslinda, 2014). Partikel juga dapat menyebabkan gangguan pernapasan, iritasi mata, dan penyakit pernapasan lainnya, terutama jika partikel tersebut mengandung zat berbahaya yang dapat menyebabkan gangguan kesehatan. Ukuran terkecil sekalipun dapat menembus jaringan terdalam tubuh seperti paru-paru dan jantung Jantung dan paru-paru penyakit (Rohmah dkk., 2018).

Menurut Pujiastuti (1998) selain dampak kesehatan, partikel juga memiliki dampak lingkungan.

- Hal ini menyebabkan bahaya estetika lingkungan seperti bangunan di sekitarnya

menjadi kotor atau tidak sedap dipandang, dan warna bangunan menjadi lebih terang.

- Kerusakan tanaman disebabkan tertutupnya pori-pori daun oleh partikel sehingga mengganggu proses fotosintesis dan menghambat tanaman untuk tumbuh dengan baik.
- Mengganggu aktivitas transportasi darat dan udara, sehingga mengganggu aktivitas sosial ekonomi masyarakat.
- Menyebabkan perubahan iklim global regional dan internasional. 5. Menyebabkan iritasi mata, alergi, kanker paru-paru dan penyakit lainnya

PM atau Particulate Matter merupakan partikel campuran yang ditemukan di udara yang terdiri dari partikel padat dan cairan. $PM^{2,5}$ mengacu pada ukuran partikel yang memiliki diameter lebih kecil dari 2,5 μm (micron). Rata-rata satu helai rambut manusia memiliki diameter 70 micron sehingga $PM^{2,5}$ memiliki ukuran yang 30 kali lebih kecil dibandingkan satu helai rambut manusia3.

$PM^{2,5}$ dapat bersumber dari buatan manusia maupun terbentuk secara alami. $PM^{2,5}$ yang bersumber dari buatan manusia umumnya disebabkan oleh proses pembakaran seperti pembakaran motor, pembakaran pembangkit listrik, proses pembakaran pada pabrik, asap dari perapian, kembang api, dan rokok. Sedangkan $PM^{2,5}$ yang terbentuk secara alami bersumber dari debu, jelaga, spora tumbuhan, serbuk sari, dan garam yang tertiup angin. $PM^{2,5}$ yang tersebar di udara merupakan kumpulan dari berbagai macam komponen dengan sumber yang berbeda-beda sehingga komposisi dari $PM^{2,5}$ sangat beragam. Selain itu, $PM^{2,5}$ juga dapat terbentuk dari hasil

reaksi kimia antar polutan lain di udara. Senyawa kimia yang umumnya terdapat pada $PM^{2,5}$ adalah sulfur dioksida, nitrogen dioksida, amonia, karbon, debu mineral, air, dan senyawa organik lainnya yang mudah menguap.

$PM^{2,5}$ dapat masuk kedalam sistem peredaran darah dan bahkan otak manusia. Partikel berukuran kecil ini telah terbukti meningkatkan kemungkinan penyakit pernapasan, penurunan fungsi paru-paru, dan bahkan kematian dini. $PM^{2,5}$ dapat masuk melewati mekanisme perangkap tubuh seperti silia di paru-paru dan bulu hidung. $PM^{2,5}$ juga dapat menjadi media bagi kontaminan-kontaminan di udara untuk masuk kedalam tubuh manusia, air, dan tanah.

Beberapa masalah kesehatan yang diakibatkan oleh $PM^{2,5}$ adalah penyakit jantung, bronkitis, empisema, serangan jantung, detak jantung tidak teratur, dan asma yang memburuk. Oleh karena itu ketika AQI Indeks melebihi 100, orang yang memiliki riwayat penyakit pernapasan atau jantung, orang tua, dan anak-anak memiliki risiko yang sangat tinggi untuk mengalami gangguan kesehatan.

Fun Fact: virus SARS-CoV-2 memiliki ukuran sekitar 0,1 micron. Sehingga, $PM^{2,5}$ dapat kita hindari menggunakan cara yang sama seperti COVID-19 yaitu menggunakan masker dan air purifier. Jenis masker yang dapat digunakan yaitu masker N95, masker bedah level II, dan masker yang dilengkapi dengan pembersih udara. Lalu untuk menjaga kualitas udara di dalam rumah maupun perkantoran dapat menggunakan Air Purifier HEPA filters, sistem ventilasi yang dilengkapi dengan

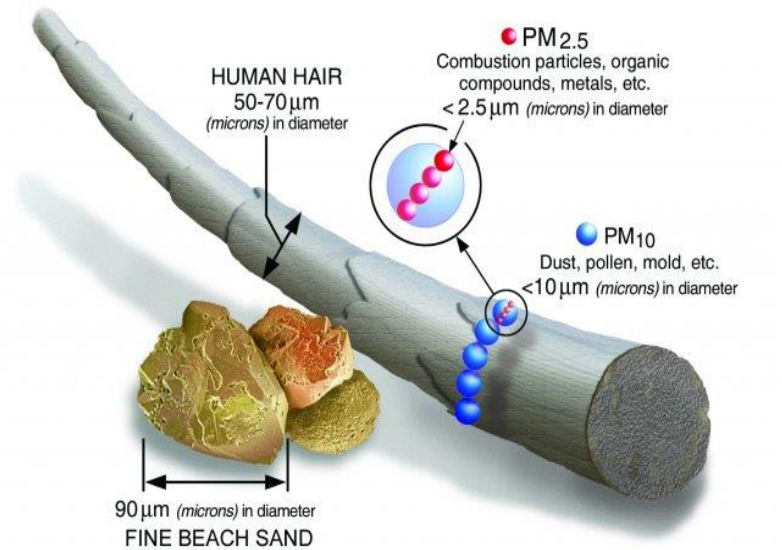
MERV 14 filters, memasang unit HVAC dengan filter udara yang memiliki efisiensi tinggi, dan menutup jendela agar udara luar yang kotor tidak masuk ke dalam.

PM adalah singkatan dari particulate matter (juga disebut polusi partikel): istilah yang merujuk pada campuran partikel padat dan butiran cair yang terdapat di udara. Beberapa partikel, seperti debu, kotoran, jelaga, atau asap, berukuran cukup besar atau berwarna cukup gelap sehingga dapat dilihat dengan mata telanjang. Partikel lainnya berukuran sangat kecil sehingga hanya dapat dideteksi menggunakan mikroskop elektron. (https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics)

Polusi partikel meliputi:

- PM10: partikel yang dapat terhirup, dengan diameter umumnya sebesar 10 mikrometer atau lebih kecil; dan
- PM2,5: partikel halus yang dapat terhirup, dengan diameter umumnya sebesar 2,5 mikrometer atau lebih kecil.

Seberapa kecil ukuran 2,5 mikrometer? Bayangkan sehelai rambut di kepala Anda. Rambut manusia rata-rata memiliki diameter sekitar 70 mikrometer — artinya, ukurannya 30 kali lebih besar dibandingkan partikel halus yang berukuran paling besar sekalipun.



Gambar 2. 1 Ilustrasi Perbandingan Ukuran Partikel PM

Sumber: https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-09/pm2.5_scale_graphic-color_2.jpg

Partikel-partikel ini memiliki beragam ukuran dan bentuk, serta dapat tersusun dari ratusan jenis zat kimia yang berbeda. Sebagian di antaranya dilepaskan langsung dari sumbernya, seperti lokasi pembangunan, jalan yang tidak beraspal, lahan pertanian, cerobong asap, atau kebakaran. Sebagian besar partikel terbentuk di atmosfer akibat reaksi kimia yang rumit dari zat seperti belerang dioksida dan nitrogen oksida — keduanya merupakan polutan yang dihasilkan oleh pembangkit listrik, industri, dan kendaraan bermotor.

2.2.2 *Sulfuric Acid* (SO2)

Sulfur Dioksida (SO_2) adalah salah satu polutan utama yang menjadi parameter standar dalam pemantauan kualitas udara ambien. Berikut adalah deskripsi mendalam mengenai karakteristik dan dampaknya:

- Sifat Kimia: SO_2 adalah gas yang tidak berwarna namun memiliki bau yang menyengat dan tajam.
- Sumber Utama: Gas ini utamanya dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar fosil yang mengandung sulfur, seperti batubara dan minyak bumi dalam sektor industri serta pembangkit listrik.
- Dampak Lingkungan (Hujan Asam): SO_2 merupakan kontributor utama dalam pembentukan hujan asam di atmosfer, yang dapat merusak kualitas air tanah dan kesehatan vegetasi atau tanaman.
- Dampak Kesehatan: Paparan SO_2 bersifat iritan kuat bagi sistem pernapasan manusia dan dapat memicu berbagai gangguan kesehatan jika konsentrasinya melebihi ambang batas baku mutu yang ditetapkan pemerintah.

2.2.3 Nitrogen Acid (NOx)

Nitrogen Oksida, yang secara kolektif disebut sebagai NO_x, adalah kelompok gas reaktif yang memainkan peran krusial dalam kimia atmosfer dan polusi udara. Berikut adalah deskripsi mendalam mengenai NO_x:

- Definisi dan Komposisi: NO_x terdiri terutama dari Nitrogen Monoksida (NO) dan Nitrogen Dioksida (NO_2), yang keduanya terbentuk selama proses pembakaran pada suhu tinggi.
- Sumber Utama: Gas ini utamanya dihasilkan dari emisi kendaraan bermotor, pembangkit listrik, dan

berbagai proses industri manufaktur yang melibatkan pembakaran bahan bakar fosil.

- Polutan Sekunder: NO_x adalah prekursor (bahan baku) penting dalam pembentukan polutan sekunder, seperti ozon permukaan (O_3) dan partikulat halus, yang terbentuk melalui reaksi kimia di bawah pengaruh radiasi matahari.
- Dampak Kesehatan: Paparan NO_x dapat menyebabkan iritasi saluran pernapasan, menurunkan fungsi paru-paru, dan memperburuk kondisi kesehatan pada penderita asma atau penyakit pernapasan kronis lainnya.

2.2.4 Carbon Monoxyde (CO)

Karbon Monoksida (CO) merupakan salah satu polutan udara yang paling berbahaya karena sifatnya yang beracun dan sulit dideteksi oleh indra manusia. Berikut adalah deskripsi mendalam mengenai karakteristik dan dampaknya:

- Karakteristik Fisik: CO adalah gas yang tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak berasa, sehingga sering disebut sebagai "pembunuh senyap" (silent killer) karena keberadaannya tidak dapat disadari tanpa bantuan alat detektor.
- Proses Pembentukan: Gas ini dihasilkan dari pembakaran tidak sempurna bahan bakar yang mengandung karbon, seperti bensin, solar, batubara, atau kayu, terutama dalam kondisi kekurangan pasokan oksigen.
- Mekanisme Dampak Kesehatan: Saat terhirup, CO berikatan dengan hemoglobin dalam darah jauh lebih kuat daripada oksigen, yang secara drastis menghambat kemampuan darah untuk mengikat dan menyalurkan oksigen ke jaringan serta organ vital tubuh.

- Sumber Utama di Lingkungan: Sumber utama emisi CO di wilayah perkotaan berasal dari sektor transportasi (kendaraan bermotor) serta pembakaran sampah atau penggunaan peralatan dapur yang tidak memiliki ventilasi yang baik.

2.2.5 Ozon (O3)

Ozon Troposferik (O_3) menempati posisi unik dalam ilmu kualitas udara karena perannya yang berbeda tergantung pada ketinggiannya di atmosfer. Berikut adalah deskripsi mendalam mengenai Ozon sebagai polutan udara:

- Definisi dan Sifat: Berbeda dengan polutan lain, ozon di permukaan tanah (ground-level ozone) tidak dilepaskan langsung ke udara oleh sumber emisi. Ozon adalah polutan sekunder yang terbentuk dari reaksi kimia kompleks antara NO_x (Nitrogen Oksida) dan VOCs (Volatile Organic Compounds) di bawah pengaruh radiasi sinar matahari.
- Proses Pembentukan: Pembentukan ozon sangat bergantung pada kondisi cuaca. Intensitas cahaya matahari yang kuat dan suhu udara yang tinggi akan mempercepat reaksi fotokimia ini, sehingga konsentrasi ozon biasanya memuncak pada siang hari saat cuaca cerah.
- Dampak Kesehatan: Ozon adalah iritan pernapasan yang sangat kuat. Paparan ozon dapat menyebabkan peradangan pada saluran napas, menurunkan kapasitas paru-paru, serta memperburuk gejala penyakit seperti asma, bronkitis, dan emfisema.
- Dampak Ekologis: Tidak hanya merugikan manusia, ozon permukaan juga bersifat toksik bagi vegetasi. Ozon dapat masuk ke dalam stomata daun, merusak

jaringan fotosintesis, dan menghambat pertumbuhan tanaman serta hasil panen.

2.3 Sumber Pencemar Udara

2.3.1 Sumber Antropogenik

Sumber antropogenik merupakan kontributor terbesar terhadap penurunan kualitas udara ambien saat ini. Aktivitas manusia yang intensif menciptakan beban emisi yang konsisten dan tersebar luas. Berikut adalah uraian detail mengenai sumber-sumber tersebut:

1. Sektor Transportasi: Emisi Kendaraan Bermotor

   Transportasi menjadi penyumbang emisi paling dominan di kawasan perkotaan karena mobilitas manusia yang tinggi.

   - Mekanisme: Proses pembakaran tidak sempurna bahan bakar fosil (bensin dan solar) di dalam mesin kendaraan menghasilkan emisi gas buang.
   - Polutan Utama: Menghasilkan konsentrasi tinggi Karbon Monoksida (CO), Nitrogen Oksida (NOx), senyawa organik volatil (VOCs), serta partikulat halus ($PM^{2.5}$) dari sisa pembakaran dan abrasi ban/rem.
   - Pengaruh Bahan Bakar: Kualitas bahan bakar (misalnya kandungan sulfur dalam solar) sangat menentukan tingkat polutan yang dilepaskan ke udara.

2. Industri & Pembangkit Listrik: Stationary Sources

   Sektor ini merupakan point source (sumber titik) yang melepaskan polutan dalam volume besar dari satu lokasi spesifik.

- Cerobong Asap: Berfungsi mengalirkan gas sisa produksi ke atmosfer tinggi, namun tetap menyebarkan polutan ke wilayah sekitar melalui dispersi angin.
- Pembakaran Batubara: Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang membakar batubara melepaskan sulfur dioksida (SO_2) dalam jumlah masif, yang menjadi penyebab utama hujan asam.
- Proses Manufaktur: Industri kimia, semen, dan logam melepaskan polutan spesifik tergantung jenis produksinya, seperti debu semen atau gas-gas beracun hasil reaksi kimia industri.

3. Sektor Domestik & Pembakaran Terbuka

Ini adalah sumber emisi yang seringkali tidak terawasi namun memiliki dampak kesehatan langsung yang sangat serius di lingkungan pemukiman.

- Sampah Rumah Tangga: Pembakaran sampah plastik atau organik secara terbuka melepaskan dioksin, furan, dan partikulat berbahaya yang bersifat karsinogenik (pemicu kanker).
- Pembakaran Biomassa: Penggunaan kayu bakar atau arang untuk memasak di rumah tangga dengan ventilasi buruk menyebabkan paparan polusi udara dalam ruangan (indoor air pollution) yang tinggi bagi anggota keluarga.
- Kebakaran Hutan Ilegal: Pembukaan lahan dengan cara membakar hutan secara sengaja melepaskan jutaan ton CO^2, NO^x, dan partikulat $PM^{2.5}$ yang menyebar lintas wilayah hingga lintas negara (kabut asap).

4. Konstruksi & Pertambangan: Fugitive Dust

Sumber ini menghasilkan polusi udara yang bersifat non-cerobong atau debu buronan (*fugitive dust*).

- Debu Suspensi: Aktivitas pengerukan tanah, pengangkutan material pasir/tanah menggunakan truk tanpa penutup, dan penggundulan lahan menyebabkan partikulat tanah tersuspensi ke udara oleh tiupan angin.
- Aktivitas Pemecahan Material: Proses penghancuran batuan (*crushing*) di tambang atau pemotongan material beton di lokasi konstruksi menghasilkan debu kasar (PM^{10}) dan halus ($PM^{2.5}$) dalam jumlah yang sangat besar.

2.3.2 Sumber Alami (Non-Antropogenik)

Pencemaran udara tidak selalu berasal dari aktivitas manusia; alam memiliki mekanisme sendiri dalam melepaskan gas dan partikel ke atmosfer. Meskipun sering kali bersifat episodik (terjadi pada waktu tertentu), kontribusinya terhadap komposisi atmosfer sangat signifikan.

A. Aktivitas Geologi: Erupsi Gunung Berapi

Gunung berapi adalah "cerobong alam" yang mampu melepaskan polutan dalam skala global.

- Emisi Sulfur (SO_2): Saat erupsi, gunung berapi melepaskan sulfur dioksida dalam jumlah besar. SO_2 ini dapat naik ke stratosfer dan membentuk aerosol sulfat yang memantulkan sinar matahari, sehingga berpotensi mendinginkan suhu global untuk sementara waktu.

- Partikulat (Debu Vulkanik): Debu halus dari erupsi dapat melayang di atmosfer selama berbulan-bulan, mengganggu kualitas udara di wilayah yang sangat luas dan membahayakan penerbangan.

B. Proses Biologis

Ekosistem secara alami melepaskan senyawa kimia sebagai bagian dari siklus kehidupannya.

- Emisi VOCs dari Vegetasi: Banyak jenis pohon (seperti pinus dan pohon jenis konifer) melepaskan Volatile Organic Compounds (VOCs) seperti isoprena dan terpena ke udara. Secara alami, ini memberi aroma hutan yang khas, namun secara kimiawi, VOCs ini adalah prekursor penting dalam pembentukan ozon troposferik.
- Dekomposisi Organik: Proses pembusukan materi organik (tumbuhan/hewan mati) di rawa-rawa atau lahan basah melepaskan gas metana (CH_4) dan hidrogen sulfida (H_2S) yang berkontribusi pada komposisi gas rumah kaca dan bau yang menyengat.

C. Fenomena Meteorologi

Kekuatan alam dapat mengangkat material dari permukaan bumi ke udara secara masif.

- Badai Debu: Di wilayah kering (gurun), angin kencang mampu mengangkat jutaan ton debu dan pasir, menciptakan badai debu yang menurunkan jarak pandang dan meningkatkan konsentrasi PM^{10} secara drastis.
- Kebakaran Hutan Alami: Sambaran petir pada hutan yang kering sering memicu kebakaran hebat. Ini melepaskan emisi karbon, partikulat,

dan asap yang intens, yang dampaknya serupa dengan kebakaran hutan akibat manusia.

2.4 Transformasi Polutan di Atmosfer

Polutan yang dilepaskan ke udara tidak berhenti pada wujud aslinya; mereka sering mengalami "evolusi" kimiawi yang menjadikannya lebih berbahaya.

A. Pencemar Primer vs. Sekunder

- Pencemar Primer: Adalah zat yang dilepaskan langsung dari sumbernya, seperti CO dari knalpot, SO_2 dari cerobong, atau debu dari konstruksi.
- Pencemar Sekunder: Terbentuk di atmosfer melalui reaksi kimia antara polutan primer dengan zat lain di bawah pengaruh sinar matahari atau kelembapan.
- Contoh: Ozon Troposferik (O_3) tidak keluar dari knalpot. Ia adalah hasil reaksi antara NO_x dan VOCs dengan bantuan sinar ultraviolet (fotokimia).

B. Efek Hujan Asam dan Kabut Asap (Smog)

Hujan Asam: Terjadi ketika SO_2 dan NO_x di atmosfer bereaksi dengan uap air membentuk asam sulfat (H_2SO_4) dan asam nitrat (HNO_3). Ketika turun sebagai hujan, air ini bersifat asam dan dapat merusak bangunan, menurunkan kualitas tanah, dan membuat ekosistem perairan menjadi beracun bagi organisme air.

1. *Classical Smog* (London Smog)

Dikenal juga sebagai *sulfurous smog*, fenomena ini sangat bergantung pada konsumsi bahan bakar fosil tradisional.

- Penyebab Utama: Pembakaran batubara dalam jumlah besar di rumah tangga dan industri

yang melepaskan gas Sulfur Dioksida (SO_2) dan jelaga (partikulat karbon).

- Mekanisme: Terjadi ketika kelembapan udara sangat tinggi (kabut) bercampur dengan emisi pembakaran batubara. Partikel jelaga bertindak sebagai inti kondensasi bagi tetesan air kabut, menciptakan "sup" polutan yang sangat asam dan pekat.
- Karakteristik: Berwarna abu-abu kehitaman, bersifat pereduksi, dan sering terjadi pada kondisi cuaca yang dingin dan lembap.
- Sejarah: Fenomena ini mencapai puncaknya pada *Great Smog of London* (1952) yang menyebabkan ribuan kematian akibat gangguan pernapasan akut.

2. *Photochemical Smog* (Los Angeles Smog)

Ini adalah tipe *smog* modern yang lebih umum dijumpai di kota-kota besar dengan kepadatan kendaraan bermotor yang tinggi.

- Penyebab Utama: Emisi gas buang kendaraan bermotor (terutama Nitrogen Oksida, NO_x) dan senyawa organik volatil (VOCs) dari industri dan pelarut kimia.
- Mekanisme: Berbeda dengan *classical smog*, *photochemical smog* memerlukan energi dari radiasi sinar matahari untuk memulai reaksi kimia. NO_x dan VOCs bereaksi di bawah terik matahari untuk membentuk Ozon Troposferik (O_3) dan peroxyacetyl nitrates (PANs).
- Karakteristik: Berwarna kecokelatan (karena kehadiran Nitrogen Dioksida, NO_2), bersifat pengoksidasi, dan sangat mengiritasi mata

serta sistem pernapasan. Fenomena ini biasanya memuncak pada siang hari saat intensitas cahaya matahari berada di titik tertinggi.

- Kondisi Khusus: Sering diperparah oleh inversi suhu yang "mengunci" polutan tersebut di permukaan tanah sehingga tidak bisa terdispersi ke atmosfer yang lebih tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

Alias, Masitah dkk. 2007. PM10 and Total Suspended Particulates (TSP) Measurements in Various Power Stations. The Malaysian Journal Sciences Vol 11 (1) h:255-261.

Budiyono, Afif. 2001. Pencemaran Udara: Dampak Pencemaran Udara pada Lingkungan. Jurnal Berita Dirgantara Vol.2 (1) h: 21-27.

HK. B. Tjasyono, Klimatologi. Bandung: Penerbit ITB, 2004.

How to cite. Barmpadimos, I., Hueglin, C., Keller, J., Henne, S., and Prévôt, A. S. H.: Influence of meteorology on PM_{10} trends and variability in Switzerland from 1991 to 2008, Atmos. Chem. Phys., 11, 1813–1835, https://doi.org/10.5194/acp-11-1813-2011, 2011.

Particulate Matter (PM) Basics. https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics. Diunduh pada tanggal 20 Mei 2026.

Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 tentang Peraturan Pemerintah tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup

BAB 3

PENGARUH PENCEMARAN UDARA TERHADAP EKOSISTEM

Oleh Tri Mulyani

Pencemaran udara saat ini telah bergeser dari isu lokal estetika lingkungan perkotaan menjadi salah satu ancaman ekstensial yang paling krusial bagi biosfer bumi. Industrialisasi yang massif, pertumbuhan populasi eksponensial, serta ketergantungan yang akut pada pembakaranaan bakar fosil telah mengubah kompisisi kimia di atmosfer bumi secara dramatis (Smith *et al*., 2011). Atmosfer yang semula berfungsi sebagai system penyangga kahidupan yang seimbang, kini menjadi medium akumulasi sebagai senyawa polutan beracun dalam konsentrasi yang jauh melampaui kapasitas asimilasi asililasi alamiah lingkungan.

Ekosistem baik terrestrial maupun akuatik merupakan jaringan kompleks yang melibatkan intraksi timbal balik antara komponen biotik dan abiotic yang sangat peka terhadap perubahan kimiawi lingkungan sekitar. Ketika polutan udara mengendap atau terserap ke dalam system ekologis ini, keseimbangan dinamis yang telah berevolusi selama jutaaan tahu akan mengalami disrupsi yang hebat(Lovett *et al*., 2009). Polutan polutan utama seperti sulfur dioksida (SO2), nitrogen oksida (NOx), ozon (O3), dan partikulat halus ($PM_{2,5}$) bertindak sebagai stressor ekologis multivariat yang menyerang berbagai tingkatan organisasi

biologis, mulai dari Tingkat seluler, organisme, populasi, hingga komunitas.

Dampak ekologis dari populasi ini sangat luas dan bersifat kaskade. Sebagai contoh emisi gas asam tidak hanya menurunkan kualitas udara yang dihirup oleh fauna, tetapi juga mentransformasi sifat kimia tanah melalui hujan asam yang pada gilirannya memobilisasi logam berat toksik yang meracuni system perakan tumbuhan dan mematikan biota perairan tawan (Cronan & Schofield, 1990).Menginngat pentingnya fungsi ekosistem dalam menyediakan jasa lingkungan (ecosystem service) yang vital bagi kelangsungan hidup manusia termasuk didalamnya regulasi iklim, siklus hidrologi, penyedia pangan dan permurnian air, maka diperlukan pemahaman mendalam, komprehensif, dan berbasis ilmiah mengenai pengaruh pencemaran udara terhadap ekososstem menjadi suatu urgensi global yang mutlak untuk dikaji secala lebih mendalam.

3.1 Karakteristik dan Sumber Emisi Polutan Udara

3.1.1 Klasifikasi Polutan Udara (Primer dan Sekunder)

Secara konseptual, polutan atmosfer diklasifikasikan menjadi 2 (dua) kelompok besar berdasarkan proses pembentukannya, yaitu polutan pimer dan polutan sekunder. Polutan primer adalah senyawa berbahawa yang diemisikan secara langsung dari sumber polusi udara ke atmosfer bumi tanpa mengalami perubahan fase kimia sebelumnya. Contoh nyata dari polutan primer meliputi sulfur dioksida (SO2), Nitrogen monoksida (NO), Karbon monoksida (CO), serta patikulat mentah yang dilepaskan oleh cerobong industry maupun knalpot kendaraan bermotor (Fowler *et al*., 2013).

Sebaliknya, polutan sekunder tidak dilepaskan secara langsung oleh sumber emisi mana pun, melainkan terbentuk di dalam atmosfer melalui reaksi kimia, foto kimia, ataupun interaksi fisik antar polutan primer dengan komponen alami atmosfer seperti uap, oksigen, dan radikal hidroksil. Polutasn sekunder yang paling relevan dan memiliki efek fitotoksik ing radikal terhadap ekosistem adalah ozon troposfer (O_3) serta aerosol asam seperti asam sulfat (H_2SO_4) dan asam nitrat (HNO_3) yang menjadi komponen utama pengasaman lingkungan (Ainsworth *et al*., 2012).

3.1.2 Polutan Gas Utama dan Dinamika Kimia Atmosfer

Dampak ekologis polusi udara sebagian besar digerakkan oleh beberapa jenis gas reaktif yang mengganggu kestabilan kimia lingkungan. Sifat fisikokimiawi dan dinamika gas-gas tersebut dijelaskan secara rinci sebagai berikut:

Sulfur Dioksida (SO_2): Gas berbau tajam, tidak berwarna, dan sangat larut dalam air. Sumber utama emisi SO_2 antropogenik adalah pembakaran batu bara berkadar sulfur tinggi pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) serta proses peleburan bijih logam sulfida (Smith *et al*., 2011). Di atmosfer, SO_2 mengalami oksidasi fase gas oleh radikal hidroksil (OH) atau fase cair di dalam tetesan awan oleh hidrogen peroksida (H_2O_2) untuk membentuk asam sulfat, yang merupakan kontributor utama penurunan pH air hujan.

Nitrogen Oksida (NO_x): Merupakan istilah kolektif untuk gas nitrogen monoksida (NO) dan nitrogen dioksida (NO_2). Gas-gas ini terbentuk ketika nitrogen dan oksigen dari udara bebas bereaksi di dalam ruang bakar bersuhu sangat tinggi, seperti pada mesin pembakaran dalam kendaraan bermotor dan turbin gas

industri (James N. Galloway, 2003). Selain berkontribusi pada pembentukan hujan asam melalui konversi menjadi HNO_3, NO_x bertindak sebagai katalis utama dalam pembentukan kabut asap fotokimia (photochemical smog).

Ozon Troposfer (O_3): Ozon yang berada di lapisan troposfer (permukaan bumi) merupakan polutan sekunder yang bersifat oksidator sangat kuat. Ozon ini terbentuk melalui serangkaian reaksi fotokimia kompleks yang melibatkan prekursor berupa NO_x dan Senyawa Organik Mudah Menguap (*Volatile Organic Compounds*/VOCs) dengan bantuan paparan radiasi ultraviolet sinar matahari (Ainsworth *et al*., 2012). Oleh karena itu, konsentrasi ozon permukaan umumnya mencapai puncaknya pada siang hari yang terik di kawasan sub-urban yang terletak searah embusan angin dari pusat kota.

3.1.3 Particulate Matter (PM dan Kandungan Logam Berat

Materi partikulat (PM) adalah campuran kompleks dari partikel padat dan cair yang tersuspensi di udara. Karakteristik ekologis partikulat sangat ditentukan oleh ukuran diameter aerodinamisnya. Partikel berukuran PM_{10} (diameter ≤ 10 mikrometer) dan $PM_{2,5}$ (diameter ≤ 2.5 mikrometer) memiliki waktu tinggal (residence time) yang sangat lama di atmosfer, berkisar antara hitungan hari hingga minggu, sehingga mampu ditransportasikan oleh angin melintasi batas-batas negara(DA Grantz *et al*., 2003).

Secara ekologis, partikulat halus bertindak sebagai vektor pembawa zat-zat toksik yang berbahaya. Pada permukaannya yang berpori, partikulat ini mengadsorpsi berbagai senyawa berbahaya seperti Hidrokarbon Aromatik Polisiklik (PAH) serta logam-

logam berat persisten seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), arsenik (As), dan merkuri (Hg) (Grantz *et al*., 2003). Ketika partikulat ini mengendap di permukaan daun atau permukaan tanah, kandungan logam berat di dalamnya akan terlepas dan masuk ke dalam siklus biologis ekosistem, memicu toksisitas sistemik jangka panjang.

Tabel 3. 1 Karakteristik, Sumber Emisi dan Ekosistem Terdampak

Jenis Polutan	Sumber Antropogenis	Sumber Alami	Ekosistem
Sulfur Dioksida (SO_2)	LPTU batu bara, industry pemurnian minyak, peleburan logam.	Erupsi gunung berapi, emisi gas biogenik laut.	Hutan boreal, danau Oligotrofik pegunungan tinggi.
Nitrogen Oksida (NO_x)	Transportasi jalan raya, mesin industri, pembakaran biomassa.	Sambaran petir, aktivitas mikroba denitrifikasi tanah.	Ekosistem estuari, hutan tropis dataran rendah.
Ozon Permukaan (O_3)	Reaksi sekunder dari emisi kendaraan dan pelarut industri.	Intrusi ozon stratosfer ke bawah (sangat jarang).	Lahan pertanian monokultur, hutan gugur daun.
($PM_{2.5}$)	Mesin diesel, industry semen, debu jalan raya,	Kebakaran hutan, badai debu gurun,	Komunitas lichen epifit, padang

Jenis Polutan	Sumber Antropogenis	Sumber Alami	Ekosistem
	pembakaran sampah.	cipratan garam laut.	lamun dangkal.

Sumber : Penulis

3.2 Mekanisme Kerusakan Ekosistem Terestrial

3.2.1 Deposisi Asam dan Proses Kaskade Degradasi Tanah

Ekosistem terestrial, khususnya hutan, menerima dampak destruktif dari pencemaran udara melalui dua jalur utama: deposisi basah (hujan, kabut, atau salju asam) dan deposisi kering (penyerapan gas dan partikulat langsung oleh permukaan vegetasi dan tanah). Ketika asam kuat seperti H_2SO_4 dan HNO_3 mencapai permukaan tanah hutan melalui tetesan hujan, mereka melepaskan ion hidrogen (H^+) bebas dalam jumlah besar ke dalam larutan tanah, yang memicu serangkaian disrupsi kimiawi tanah yang parah (Likens *et al*., 1996).

Mekanisme pertama adalah pencucian nutrisi esensial (*nutrient leaching*). Tanah yang sehat memiliki kompleks pertukaran kation pada permukaan koloid lempung dan bahan organic yang mengikat nutrisi penting seperti kalsium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), dan kalium (K^+). Kelimpahan ion H^+ dari deposisi asam akan menggantikan kation-kation nutrisi tersebut dari situs ikatannya melalui reaksi pertukaran ion. Akibatnya, nutrisi penting terlepas ke dalam larutan tanah dan tercuci (leached) ke lapisan subsoil yang lebih dalam oleh aliran air bawah tanah, menyebabkan tanaman mengalami kelaparan nutrisi kronis (Likens *et al*., 1996)

Mekanisme kedua yang jauh lebih berbahaya adalah mobilisasi ion aluminium toksik (Al^{3+}). Pada kondisi normal dengan pH tanah di atas 5.5, aluminium terikat kuat dalam struktur mineral silikat yang tidak larut dan tidak beracun. Namun, ketika deposisi asam menurunkan pH tanah di bawah ambang batas kritis 5.0, mineral aluminium akan melarut dan melepaskan ion Al^{3+} reaktif ke dalam air tanah (Cronan & Schofield, 1990). Reaksi pelarutan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

$$Al(OH)_3 \text{ (padat)} + 3H^+ \text{ (larutan)} \rightarrow Al^{3+} \text{ (larutan)} + 3H_2O$$

Keberadaan ion Al^{3+} bebas dalam larutan tanah sangat beracun bagi perakaran pohon. Ion aluminium merusak integritas dinding sel akar, menghambat proses pembelahan sel pada meristem apikal akar, dan secara kompetitif memblokir saluran penyerapan kalsium dan magnesium. Akibatnya, sistem perakaran pohon menjadi kerdil, rapuh, kehilangan kemampuan menyerap air secara optimal, sehingga vegetasi menjadi sangat rentan terhadap cekaman kekeringan, tiupan angin kencang, dan infeksi penyakit (Cronan & Schofield, 1990).

3.2.2 Fitotoksistas Ozon Troposfer dan Kerusakan Fisiologis Daun

Ozon (O_3) merusak komponen vegetasi melalui jalur penyerapan gas langsung. Gas ozon masuk ke dalam jaringan internal daun melalui stomata selama proses pertukaran gas normal untuk respirasi dan fotosintesis. Begitu berada di dalam ruang sub-stomata, ozon yang bersifat sangat tidak stabil akan segera bereaksi dengan cairan dinding sel (apoplas) dan menginduksi pembentukan radikal bebas berbahaya yang dikenal sebagai Reactive Oxygen Species (ROS), seperti hidrogen

peroksida (H_2O_2), radikal superoksida (O_2), dan radikal hidroksil (OH) (Ainsworth *et al*., 2012).

Akumulasi ROS yang masif memicu terjadinya stres oksidatif yang parah di dalam sel-sel mesofil daun. ROS menyerang asam lemak tak jenuh pada membran sel melalui proses peroksidasi lipid, menghancurkan struktur membran tilakoid kloroplas, mempercepat degradasi pigmen klorofil, serta secara dramatis menonaktifkan kerja enzim RuBisCO (*Ribulose-1,5bisphosphate carboxylase-oxygenase*) yang merupakan motor penggerak siklus Calvin dalamfiksasi karbon fotosintesis (FISCUS *et al*., 2005).

Secara makroskopis, kerusakan fisiologis ini memanifestasikan dirinya dalam bentuk gejala visual yang khas pada helaian daun, seperti timbulnya bintik-bintik klorosis (menguning karena kehilangan klorofil), nekrosis bercak perak atau kehitaman, penuaan dini (*senescence*), hingga pengguguran daun secara prematur sebelum waktunya. Dampak sistemik dari fenomena ini adalah penurunan drastis pada Nilai Produktivitas Primer Bersih (*Net Primary Productivity*/NPP) ekosistem hutan global, yang secara tidak langsung melemahkan kapasitas biosfer bumi untuk bertindak sebagai penyerap karbon (*carbon sink*) dalam skema mitigasi perubahan iklim global (FISCUS *et al*., 2005).

3.2.3 Dampak pada Mikroba Simbiosis dan Fauna Tanah

Pengaruh buruk pencemaran udara tidak berhenti di atas permukaan tanah, melainkan merambat jauh ke dalam tanah dan merusak jaringan komunitas biologi yang bertugas menjaga kesuburan tanah. Jamur mikoriza, yang bersimbiosis mutualisme obligat dengan system perakaran pohon hutan untuk meningkatkan efisiensi penyerapan unsur fosfor dan air, terbukti

sangat peka terhadap penurunan drastis pH tanah dan lonjakan pasokan nitrogen akibat deposisi udara. Kerusakan pada miselium jamur mikoriza memutus suplai nutrisi ke pohon inang dan menurunkan ketahanan tanaman terhadap infeksi patogen tular tanah (Van Der Heijden *et al*., 2008).

Selain itu, makrofauna tanah yang berperan sebagai agen rekayasa ekosistem (*ecosystem engineers*), seperti cacing tanah (*Lumbricidae*), mengalami penurunan populasi yang sangat drastis atau bahkan kepunahan lokal pada tanah-tanah yang mengalami asidifikasi akut. Kulit cacing tanah yang tipis dan lembap sangat rentan terhadap iritasi kimia oleh ion hidrogen dan aluminium bebas. Hilangnya populasi cacing tanah menghentikan proses aerasi alami tanah, pencampuran vertikal bahan organik, serta memperlambat laju dekomposisi serasah dedaunan, sehingga siklus biogeokimiawi nutrisi di lantai hutan menjadi terhambat (Van Der Heijden *et al*., 2008).

3.3 Kerusakan Ekosistem Akuatik

3.3.1 Pengasaman Badan Air (*Aquatic Acidification*) dan Toksisitas Insang

Ekosistem perairan darat seperti danau oligotrofik, sungai dataran tinggi, dan aliran air di daerah tangkapan air (*catchment areas*) merupakan indikator akhir yang paling sensitif terhadap beban pencemaran udara wilayah regional. Badan-badan air ini menerima akumulasi polutan asam dari dua sumber sekaligus: deposisi asam yang jatuh langsung ke atas permukaan air, serta aliran limpasan permukaan (*surface runoff*) yang membawa asam dan ion logam beracun yang tercuci dari tanah sekitar (Spry & Wiener, 1991).

Ketika kapasitas penyangga keasaman (*acid neutralizing capacity*) alami perairan-yang umumnya dikontrol oleh konsentrasi ion bikarbonat (HCO_3^-)—telah habis terlampaui oleh pasokan asam eksternal, pH air danau akan merosot tajam hingga di bawah nilai 5.0. Penurunan pH air ini disertai dengan lonjakan konsentrasi ion aluminium reaktif (Al^{3+}) yang terbawa dari daratan. Kombinasi antara keasaman tinggi dan keberadaan aluminium terlarut menciptakan kondisi lingkungan osmoregulasi yang mematikan bagi sebagian besar biota akuatik, terutama kelompok pisces (Spry & Wiener, 1991).

Ion aluminium terlarut pada pH rendah memiliki sifat kimia spesifik yang membuatnya mudah mengendap kembali sebagai polimer aluminium hidroksida yang lengket Ketika bersentuhan dengan mukus insang ikan yang ber-pH sedikit lebih tinggi. Endapan kimia ini menyumbat ruang antar-lamela insang, merusak sel-sel epitel pernapasan, dan memicu sekresi defensif secara berlebihan oleh tubuh ikan. Akibatnya, transfer gas oksigen menjadi terhambat secara total, ikan mengalami kematian massal akibat asfiksia (kekurangan oksigen) akut dan kegagalan fungsi regulasi ion natrium-klorida dalam darah (Spry & Wiener, 1991).

3.3.2 Kaskade Deposisi Nitrogen dan Fenomena Eutrofikasi

Selain masalah keasaman, pencemaran udara oleh emisi senyawa nitrogen reaktif seperti nitrogen oksida (NO_x) dari sektor transportasi dan gas amonia (NH_3) dari aktivitas pertanian intensif bertindak sebagai fertilisasi udara yang tidak terkendali. Senyawa-senyawa nitrogen ini terdeposisi ke permukaan perairan estuari, laut semi-tertutup, dan danau, bertindak sebagai pasokan nutrien

pembatas yang melimpah (James N. Galloway, 2003). Pada ekosistem akuatik alami, produktivitas biota umumnya dibatasi oleh ketersediaan nitrogen atau fosfor (limiting nutrients). Masukan senyawa nitrogen antropogenik yang dari atmosfer memicu gangguan kesetimbangan nutrien, yang berujung pada fenomena ofikasi atau pengayaan nutrien berlebih (Schindler, 2006). Dampak kaskade dari proseseutrofikasi ini diuraikan secara kronologis sebagai berikut:

1. Ledakan Populasi Alga (Algal Blooms): Ketersediaan nitrogen yang melimpah memicu pertumbuhan populasi fitoplankton dan alga makro secara eksplosif dan tidak terkendali. Permukaan air danau atau teluk tertutup oleh lapisan pekat ganggang hijau-biru cyanobacteria) yang memblokir penetrasi cahaya matahari untuk masuk ke lapisan air yang lebih dalam.
2. Kematian Vegetasi Bentik: Karena ketiadaan cahaya matahari akibat terhalang lapisan di permukaan, tumbuhan air yang hidup melekat di dasar perairan (makrofit) kehilangan kemampuan untuk berfotosintesis, layu, dan akhirnya mati massal.
3. Dekonstruksi Oksigen Terlarut (Anoksia): Ketika masa hidup alga yang meledak tersebut berakhir, jutaan ton biomassa alga mati akan tenggelam ke dasar perairan. Populasi bakteri pengurai (dekomposer heterotrofik) mengalami lonjakan populasi yang masif untuk menguraikan serasah alga tersebut. Proses pembusukan organik ini mengonsumsi gas Oksigen Terlarut (Dissolved Oxygen/DO) di dalam air secara masif dan cepat (Schindler, 2006).
4. Penciptaan Zona Mati (Dead Zones): Konsentrasi DO di dalam air merosot tajam hingga berada di

bawah ambang batas kritis anoksik (< 2 mg/L). Ketiadaan oksigen ini memicu kematian massal hewan air yang tidak bermigrasi cepat seperti ikan dasar, kepiting, udang, dan kerang. Kawasan perairan tersebut berubah menjadi "zona mati" yang sunyi dari kehidupan dan berbau busuk akibat pelepasan gas hidrogen sulfida (H_2S) hasil respirasi anaerobik mikroba dasar (Schindler, 2006).

3.4 Dampak Terhadap Biodiversitas dan Struktur Trofik

3.4.1 Komunitas Lichen sebagai Bioindikator Sensitif Cekaman Polusi

Pencemaran udara memiliki dampak yang sangat asimetris terhadap berbagai spesies hayati; beberapa kelompok organisme sangat rentan dan punah dengan cepat, sementara kelompok lainnya memiliki toleransi yang tinggi. Respons diferensial ini dimanfaatkan dalam ekologi modern melalui penggunaan spesies indikator biologis (bioindikator). Komunitas lumut kerak atau Lichen merupakan instrumen bioindikator kualitas udara terestrial yang paling sahih dan diakui secara internasional (Hawksworth and Rose1970). Lichen adalah organisme asosiasi simbiotik mutualisme antara fungi (jamur) dengan fotoautotrof berupa alga hijau atau cyanobacteria. Karakteristik anatomi lichen yang tidak memiliki lapisan kutikula lilin pelindung, tidak memiliki stomata, serta ketiadaan system perakaran sejati memaksa organisme ini untuk menyerap air, gas, dan seluruh nutrisi mineralnya secara pasif langsung dari atmosfer udara (Hawksworth and Rose1970.). Sifat biologi ini membuat lichen menjadi sistem pengumpul polutan udara yang sangat efisien sekaligus rentan.

Paparan gas SO_2 atau senyawa fluorida dalam konsentrasi rendah sekalipun mampu merusak klorofil alga simbion di dalam lichen, menghambat respirasi jamur, dan menghentikan pertumbuhan talus. Di kawasan dengan tingkat pencemaran udara tinggi, spesies lichen frutikosa (berbentuk seperti semak bergantung) yang sangat sensitif seperti genus Usnea, Bryoria, dan Ramalina akan mengalami kematian dan menghilang dari kulit-kulit pohon hutan(Hawksworth dan Rose, 1970). Sebaliknya, hanya sedikit spesies lichen crustosa (berbentuk kerak menempel kuat) yang sangat toleran seperti Lecanora conizaeoides yang mampu bertahan hidup di pusatpusat kota industri, menciptakan zona gurun lichen (lichen desert).

3.4.2 Mekanisme Biomagnifikasi Logam Berat Persisten pada Rantai Makanan

Logam berat persisten seperti meruri (Hg), Kadmium (Cd), Timbal (Pb), dan Arsenik (As) merupakan polutan lingkungan yang menjadi perhatian global. Berbeda dengan senyawa organic yang dapat diurai ileh mikroorganisme, logam berat bersifat antropogenik dan tidak dapat didegradasi secara biologis mauoun kimia (Ali *et al*., 2019).Ketika memasuki ekosistem perairan atau daratan melalui limbah industry dan domestic, logam-logam ini akan bertahan dalam waktu yang sangat lama di lingkungan (persisten) dan masuk ke dalam siklus biogeokimia.

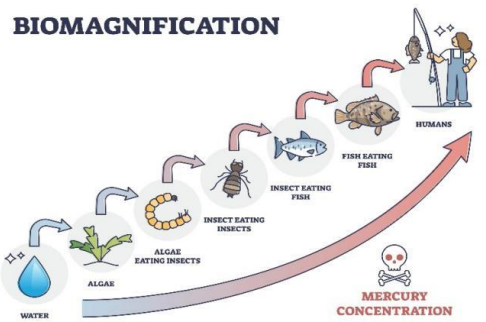
Untuk dapat meahami bagaimana logam berat mengancam predator puncak, penting untuk membedakan 2 (dua) proses interkoneksi: Bioakumulasi dan Biomagnifikasi.

Bioakumulasi: merupakan proses penumpukan kontamunan di dalam tubuh organisme individu

sepanjang hidupnya, dimana laju penyerapan polutan dari air, udara, atau makanan lebih cepat daripada laju ekskresi atau metabolismenya (Rainbow & Furness, 2018).

Biomagnifikasi: merupakan kelanjutan dari bioakumulasi, dimana konsentrasi pulutan meningkat secara progresif di setiap tingkatan trofik(Tingkat rantai makanan), dari produsen hingga konsumen puncak (Gray, 2002).

Salah satu konsekuensi paling mengerikan dari pencemaran udara terhadap integritas keanekaragaman hayati jangka panjang adalah deposisi atmosferik logam berat persisten. Logam berat seperti metilmerkuri (CH_3Hg^+) dan timbal (Pb) yang dilepaskan ke udara dari pembakaran batu bara, pembakaran sampah medis, dan industri metalurgi tidak dapat diuraikan secara biologis (non-biodegradable) oleh sistem metabolisme makhluk hidup mana pun 9 (Driscoll *et al*., 2013).



Gambar 3. 1 *Biomagnification*

Sumber: https://encrypted-tbn3.gstatic.com/licensed-image?q=tbn:ANd9GcR0F9NIWhSqjG17fl0j0wyffTsZkuBR9mX945AdxvxzI4DFn1ULFJ8I0wSzHA8kv14PW1fMTAHHgmbPQiHtPXH5V0QwxRvDSCiZd0vgsQ28BJx3yLo

DAFTAR PUSTAKA

Ainsworth, E. A., Yendrek, C. R., Sitch, S., Collins, W. J., & Emberson, L. D. (2012). The effects of tropospheric ozone on net primary productivity and implications for climate change. In *Annual Review of Plant Biology* (Vol. 63, pp. 637–661). https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042110-103829

Ali, H., Khan, E., & Ilahi, I. (2019). Environmental Chemistry and Ecotoxicology of Hazardous Heavy Metals: Environmental Persistence, Toxicity, and Bioaccumulation. *Journal of Chemistry*, *2019*, 1–14. https://doi.org/10.1155/2019/6730305

Cronan, C. S., & Schofield, C. L. (1990). Relationships between aqueous aluminum and acidic deposition in forested watersheds of North America and northern Europe. *Environmental Science & Technology*, *24*(7), 1100–1105. https://doi.org/10.1021/es00077a022

DA Grantz, JHB Garner, & DW Johnson c. (2003). Ecological effects of particulate matter. *Environment International*, *29*(2), 213–239.

Driscoll, C. T., Mason, R. P., Chan, H. M., Jacob, D. J., & Pirrone, N. (2013). Mercury as a Global Pollutant: Sources, Pathways, and Effects. *Environmental Science & Technology*, *47*(10), 4967–4983. https://doi.org/10.1021/es305071v

FISCUS, E. L., BOOKER, F. L., & BURKEY, K. O. (2005). Crop responses to ozone: Uptake, modes of action, carbon assimilation and partitioning. *Plant, Cell & Environment*, *28*(8), 997–1011. https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01349.x

Gray, J. S. (2002). Biomagnification in marine systems: the perspective of an ecologist. *Marine Pollution Bulletin*, *45*(1–12), 46–52. https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00323-X

HawksworthRose1970SO2LichenScale. (n.d.).

James N. Galloway, J. D. A. J. W. E. S. P. S. R. W. H. E. B. C. B. J. C. (2003). Article Navigation JOURNAL ARTICLE The Nitrogen Cascade. *BioScience*, *53*(4), 341–356.

Likens, G. E., Driscoll, C. T., & Buso, D. C. (1996). Long-Term Effects of Acid Rain: Response and Recovery of a Forest Ecosystem. *Science*, *272*(5259), 244–246. https://doi.org/10.1126/science.272.5259.244

Lovett, G. M., Tear, T. H., Evers, D. C., Findlay, S. E. G., Cosby, B. J., Dunscomb, J. K., Driscoll, C. T., & Weathers, K. C. (2009). Effects of Air Pollution on Ecosystems and Biological Diversity in the Eastern United States. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1162*(1), 99–135. https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.04153.x

Nilsson, J. (1988). Critical Loads for Sulphur and Nitrogen. In *Air Pollution and Ecosystems* (pp. 85–91). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-009-4003-1_11

Rainbow, P. S., & Furness, R. W. (2018). Heavy Metals in the Marine Environment. In *Heavy Metals in the Marine Environment* (pp. 1–4). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781351073158-1

Schindler, D. W. (2006). Recent advances in the understanding and management of eutrophication. *Limnology and Oceanography*, *51*(1part2), 356–363. https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.1_part_2.0356

Smith, S. J., Van Aardenne, J., Klimont, Z., Andres, R. J., Volke, A., & Delgado Arias, S. (2011). Anthropogenic sulfur dioxide emissions: 1850-2005. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *11*(3), 1101–1116. https://doi.org/10.5194/acp-11-1101-2011

Spry, D. J., & Wiener, J. G. (1991). Metal bioavailability and toxicity to fish in low-alkalinity lakes: A critical review. *Environmental Pollution*, *71*(2–4), 243–304. https://doi.org/10.1016/0269-7491(91)90034-T

Van Der Heijden, M. G. A., Bardgett, R. D., & Van Straalen, N. M. (2008). The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, *11*(3), 296–310. https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01139.x

BAB 4

PENGELOLAAN SAMPAH DAN POLUSI UDARA

Oleh Titia Erika Sarlota Awom

Pengelolaan sampah merupakan salah satu komponen penting dalam pengelolaan lingkungan yang memiliki keterkaitan erat dengan upaya pengendalian pencemaran udara. Meningkatnya jumlah penduduk, urbanisasi, dan perubahan pola konsumsi telah menyebabkan volume sampah terus bertambah, sehingga menimbulkan tantangan yang semakin kompleks dalam sistem pengelolaannya. Berbagai aktivitas persampahan, mulai dari pengumpulan, pengangkutan, pengolahan, hingga pemrosesan akhir, berpotensi menghasilkan emisi gas pencemar dan partikulat yang memengaruhi kualitas udara, kesehatan masyarakat, serta keseimbangan lingkungan. Oleh karena itu, pengelolaan sampah tidak lagi hanya berorientasi pada pengurangan timbulan limbah, tetapi juga pada upaya meminimalkan emisi yang dihasilkan selama seluruh siklus pengelolaannya.

Seiring dengan berkembangnya konsep pembangunan berkelanjutan, pengelolaan sampah telah mengalami perubahan paradigma dari pendekatan *end-of-pipe* menuju pendekatan yang lebih preventif dan terintegrasi. Penerapan prinsip 3R (*Reduce, Reuse,* dan *Recycle*), ekonomi sirkular, teknologi pengolahan rendah emisi, serta pemanfaatan sistem pemantauan berbasis teknologi menjadi bagian penting dalam mewujudkan sistem persampahan yang lebih

efisien dan ramah lingkungan. Keberhasilan upaya tersebut memerlukan dukungan kebijakan yang kuat, tata kelola yang kolaboratif, serta partisipasi aktif pemerintah, dunia usaha, dan masyarakat.

Bab ini membahas keterkaitan antara pengelolaan sampah dan pencemaran udara, meliputi sumber emisi pada sistem persampahan, dampak yang ditimbulkan terhadap kesehatan dan lingkungan, teknologi pengelolaan sampah untuk mengurangi emisi, inventarisasi emisi dan pemantauan kualitas udara, serta strategi pengendalian polusi udara dalam mendukung pengelolaan sampah yang berkelanjutan. Melalui pembahasan tersebut, pembaca diharapkan memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai peran pengelolaan sampah dalam menjaga kualitas udara dan mendukung pembangunan yang berkelanjutan.

4.1 Hubungan Pengelolaan Sampah dengan Pencemaran Udara

Pengelolaan sampah memiliki hubungan yang sangat erat dengan kualitas udara karena setiap tahap dalam sistem persampahan berpotensi menghasilkan emisi gas maupun partikel yang mencemari atmosfer. Isu persampahan lebih identik dengan pencemaran air, tanah, dan air, padahal pencemaran udara juga merupakan salah satu sumber penting yang sering terjadi di wilayah perkotaan dengan kepadapatan penduduk yang tinggi. Urbanisasi menyebabkan lonjakan jumlah penduduk sehingga mengalami peningkatan drastis pada kebutuhan energi, transportasi, industri, serta aktivitas rumah tangga dan pembakaran sampah (Saputra *et al.*, 2024). Timbulan sampah yang tidak dikelola secara baik dapat mengalami dekomposisi secara anaerobik sehingga menghasilkan berbagai macam gas, seperti metana (CH_4), karbon dioksida, (CO_2), hydrogen sulfida (H_2S), ammonia (NH_3), dan senyawa organik volatil lainnya. Selain

menimbulkan bau yang mengganggu, gas-gas tersebut dapat memperburuk kualitas udara, meningkatkan risiko gangguan kesehatan masyarakat, serta berkontribusi terhadap pemanasan global. Oleh karena itu, pengelolaan sampah tidak hanya dipandang sebagai upaya menjaga kebersihan lingkungan, tetapi juga sebagai bagian integral dari strategi pengendalian pencemaran udara.

Sumber emisi udara dari aktivitas pengelolaan sampah berasal dari berbagai tahapan operasional, mulai dari pengumpulan, pengangkutan, pengolahan, hingga pemrosesan akhir. Kendaraan pengangkut sampah yang menggunakan bahan bakar fosil menghasilkan emisi karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO), sulphur dioksida (SO_2), karbon dioksida (CO_2), serta partikulat halus (PM2.5 dan PM10). Pada tahap pengolahan, kegiatan seperti pencacahan, pemindahan, dan pengomposan dapat melepaskan debu, bioaerosol, dan gas berbau ke lingkungan sekitar. Tiba di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA), proses dekomposisi bahan organik menghasilkan gas metana yang memiliki potensi pemanasan global sekitar 28 kali lebih besar dibandingkan karbon dioksida dalam horizon waktu 100 tahun (Interngovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007). Selain itu praktik pembakaran terbuka *(open burning)* yang masih banyak ditemukan diberbagai daerah menghasilkan emisi partikulat, karbon hitam, dioksin, furan, serta senyawa toksik lainnya yang membahayakan kesehatan manusia dan lingkungan (Sekarsari, Kristanto and Dahlan, 2023).

Sektor persampahan memiliki kontribusi yang cukup besar terhadap perubahan iklim global melalui emisi gas rumah kaca, seperti gas metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2) yang dihasilkan dari dekomposisi limbah organik di tempat pemrosesan akhir (Halomoan and Putri, 2025). Meskipun, proporsi emisi dari sektor persampahan lebih kecil dibandingkan sektor energi atau transportasi, emisi

metana memiliki daya pemanasan yang jauh lebih tinggi dibandingkan karbon dioksida sehingga memberikan dampak yang signifikan terhadap peningkatan suhu bumi. Selain emisi dari *landfill* pembakaran sampah secara terbuka maupun penggunaan incinerator yang tidak dilengkapi teknologi pengendalian emisi juga menghasilkan karbon dioksida dan karbon hitam yang mempercepat proses pemanasan global. Sehingga strategi penting untuk menurunkan emisi gas rumah kaca sekaligus meningkatkan kualitas udara adalah penerapan prinsip *Reduce, Reuse, dan Recycle (3R),* peningkatan daur ulang, pemanfaatan sampah organik menjadi kompos atau biogas, serta pengembangan ekonomi sirkular.

Penerapan prinsip *Reduce, Reuse,* dan *Recycle (3R)* menjadi langkah awal dalam mewujudukan pengelolaan sampah yang berkelanjutan.

1. Prinsip *Reduse* dilakukan dengan mengurangi timbulan sampah sejak dari sumbernya, misalnya melalui penggunaan barang yang tahan lama, menghindari produk sekali pakai, serta memilih produk dengan kemasan yang lebih sederhana.
2. Prinsip *Reuse* diterapkan dengan menggunakan kembali barang yang masih layak pakai, seperti botol, wadah makanan, kantong belanja, atau peralatan rumah tangga, sehingga dapat memperpanjang masa pakainya.
3. Prinsip *Recycle* dilakukan dengan mendaur ulang sampah yang telah dipilah berdasarkan jenisnya menjadi bahan baku atau produk baru yang memiliki nilai guna dan nilai ekonomi.

Peningkatan tingkat daur ulang memerlukan dukungan sistem pengelolaan sampah yang terintegrasi, mulai dari pemilahan, pengumpulan, pengangkutan, hingga proses pengolahan di fasilitas daur ulang. Sampah anorganik seperti plastik, kertas, logam, dan kaca dapat diolah kembali menjadi

bahan baku industri sehingga mengurangi kebutuhan akan sumber daya alam baru. Di sisi lain, sampah organik yang berasal dari sisa makanan, dedaunan, dan limbah pertanian dapat dimanfaatkan melalui proses pengomposan untuk menghasilkan pupuk organik yang berguna dalam meningkatkan kesuburan tanah. Selain itu, sampah organik juga dapat diolah menggunakan teknologi diester aneorob untuk menghasilkan biogas, yaitu gas yang akan metana dan dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif untuk memasak maupun pembangkit listrik skala kecil. Pemanfaatan sampah organik tersebut tidak hanya mengurangi volume sampah yang dibuang ke tempat pemrosesan akhir, tetapi juga menekan pembentukan emisi gas rumah kaca dari proses pembusukan yang tidak terkendali.

Ada juga konsep 5R (*Refuse, Reduce, Reuse, Recycle,* dan *Rot*) yang berkembang dari konsep 3R (*Reduce, Reuse* dan *Recycle*). Konsep 5R bertujuan memperkuat upaya pengurangan timbulan sampah sejak dari sumbernya. Jika konsep 3R berfokus pada pengurangan, penggunaan kembali dan pendaurulangan limbah yang telah dihasilkan, maka konsep 5R menambahkan dua prinsip penting, yaitu *refuse* (menolak) dan *rot* (mengomposkan). Prinsip *refuse* menekankan pentingnya menolak penggunaan barang yang tidak diperlukan, terutama produk sekali pakai dan kemasan yang berlebihan, sehingga potensi timbulan sampah dapat dicegah sejak awal. Sementara itu, prinsip *rot* mendorong pemanfaatan sampah organik melalui proses pengomposan atau pengolahan biologis lainnya sehingga menghasilkan kompos atau pupuk organik yang bermanfaat bagi tanah. Sehingga, konsep 5R tidak hanya berorientasi pada pengelolaan sampah, tetapi juga pada perubahan pola konsumsi dan perilaku masyarakan agar lebih bijaksana dalam menggunakan sumber daya.

Dibandingkan dengan konsep 3R, pendekatan 5R lebih komprehensif karena tidak hanya berfokus pada pengelolaan limbah setelah terbentuk, tetapi juga menekankan upaya pencegahan sejak tahap konsumsi. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular, yang memandang limbah sebagai sumber daya yang masih memiliki nilai dan harus dipertahankan dalam siklus pemanfaatan selama mungkin. Melalui penerapan konsep 5R, penggunaan sumber daya alam dapat dilakukan secara lebih efisien, timbulan sampah yang berakhir di tempat pemrosesan akhir dapat dikurangi serta dampak pencemaran terhadap udara, air, dan tanah dapat diminimalkan. Oleh Karen itu, konsep 5R menjadi salah satu pendekatan penting dalam mendukung pengelolaan sampah yang berkelanjutan sekaligus mewujudkan pembangunan yang berwawasan lingkungan.



Gambar 4. 1 Praktik Pembakaran Terbuka *(Open Burning)*

Sumber (https://unair.ac.id/post_fetcher/sekolah-ilmu-kesehatan-ilmu-alam-bakar-sampah-polusi-tersembunyi-yang-mengancam-kesehatan-dan-lingkungan/)

Hubungan antara pengelolaan sampah dan pencemaran udara dapat dipahami melalui siklus pencemaran yang dimulai sejak sampah dihasilkan oleh rumah tangga, kawasan komersial, industri, maupun fasilitas publik hingga mencapai tahap pemrosesan akhir. Selanjutnya, selama proses pengumpulan dan transportasi, emisi kendaraan serta debu dari aktivitas bongkar muat turut berkontribusi terhadap beban pencemaran udara. Ketika sampah diproses melalui pengomposan, insinerasi, atau ditimbun di tempat pemrosesan akhir, masing-masing metode menghasilkan karakteristik emisi yang berbeda. Apabila sistem pengelolaan dilakukan secara tidak terkendali, emisi tersebut akan terlepas ke atmosfer dan memengaruhi kualitas udara di wilayah sekitarnya. Untuk itu penerapan metode seperti *sanitary landfill,* penangkapan gas metana *(landfill gas recovery),* pengomposan dan fasilitas insinerasi dengan sistem pengendalian emisi mampu menekan pelepasan polutan ke udara secara signifikan.

Negara-negara berkembang menghadapi tantangan yang lebih kompleks dalam mengelola sampah dan mengendalikan pencemaran udara dibandingkan negara maju. Pertumbuhan penduduk yang pesat, urbanisasi, peningkatan konsumsi masyarakat, serta keterbatasan infrastruktur menyebabkan volume sampah meningkat lebih cepat daripada kapasistas sistem pengelolaannya. Di banyak daerah, praktik pembuangan sampah secara sembarangan dan pembakaran terbuka masih menjadi solusi yang umum dilakukan karena rendahnya cakupan layanan persampahan, keterbatasan pendanaan, serta kurangnya fasilitas pengolahan yang memadai. Kondisi ini diperburuk oleh lemahnya penegakan regulasi, rendahnya tingkat pemilahan sampah di sumber, serta terbatasnya kesadaran masyarakat mengenai dampak pencemaran udara akibat pengelolaan sampah yang tidak berkelanjutan. Oleh sebab itu, diperlukan pendekatan yang komprehensif melalui penguatan kebijakan, investasi pada

teknologi pengelolaan sampah rendah emisi, peningkatan kapasitas pemerinta daerah, partisipati aktif masyarakat dan sektor swasta. Pendekatan tersebut akan mendukung terwujudnya sistem pengelolaan sampah yang berkelanjutan, sekaligus berkontribusi pada peningkatan kualitas udara dan pencapaian target pembangunan rendah karbon.

4.2 Sumber Emisi Polusi Udara pada Sistem Pengelolaan Sampah

Sumber emisi pencemaran udara dalam sistem pengelolaan sampah dapat diklasifikasikan menjadi sumber bergerak *(mobile source)* dan sumber tidak bergerak *(stationary sources).* Sumber bergerak terutama berasal dari kendaraan pengangkut sampah yang menggunakan bahan bakar fosil, sedangkan sumber tidak bergerak meliputi tempat pemrosesan akhir (TPA), fasilitas pengolahan sampah, unit pengomposan, instalasi pengolahan termal, dan aktivitas pembakaran terbuka. Masing-masing sumber menghasilkan jenis polutan yang berbeda sesuai dengan karakteristik proses yang berlangsung. Dengan demikian, identifikasi sumber emisi menjadi langkah awal dalam penyusunan inventarisasi emisi *(emission inventory)* dan penentuan strategi pengendalian pencemaran udara pada sektor persampahan.

Emisi dari kegiatan pengumpulan dan transportasi sampah terutama dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar pada mesin kendaraan. Besarnya emisi dipengaruhi oleh jenis kendaraan, kapasitas angkut, umur kendaraan, kualitas bahan bakar, kondisi lalu lintas, serta frekuensi perjalanan menuju fasilitas pengolahan. Pada daerah perkotaan dengan sistem pengumpulan yang kurang efisien, kendaraan sering berhenti dan berjalan kembali *stop-and-go-operation,* sehingga konsumsi bahan bakar meningkat dan menghasilkan emisi karbon monoksida, nitrogen dioksida,

hidrokarbon, sulful dioksida, serta partikulat disel (González, Jerónimo Franco Izquierdo, Antonio Gallardo Commans and Carlos, 2021). Selain emisi gas buang, aktivitas pemuatan dan pembongkaran sampah juga menghasilkan debu dan bioaerosol yang mengandung mikroorganisme seperti jamur, virus, spora, endotoksin, dan fragmen bahan organik yang dapat memengaruhi kesehatan pekerja maupun masyarakat di sekitar lokasi operasional. Debu dan aerosol terbentuk akibat pergerakan kendaraan, penggunaan alat berat, serta proses pemindahan dan penumpukan sampah yang menyebabkan partikel halus terdispersi ke udara. Paparan aerosol dalam jangka pendek dapat menimbulkan iritasi pada mata, hidung, dan saluran pernapasan, sedangkan paparan dalam jangka panjang berpotensi meningkatkan risiko gangguan pernapan kronis, alergi, asma, serta infeksi, terutama pada pekerja yang melakukan kontak langsung dengan sampah. Terlebih masyarakat yang bermukim disekitar lokasi operasional tempat pemrosesan akhir juga dapat terdampak apabila konsentrasi debu dan aerosol tinggi serta terbawa angina ke kawasan permukiman. Tingkat paparan dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti jenis sampah yang ditangani, kondisi cuaca, kecepatan angin, kelembapan udara, dan efektivitas penerapan langkah-langkah pengendalian di lokasi.

Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) merupakan sumber emisi yang didominasi oleh proses biologis. Selama dekomposisi anaerobik limbah organik, mikroorganisme menghasilkan gas landfill yang umumnya terdiri dari metana, karbon dioksida, (CO_2), hidrogen sulfida (H_2S), amonia (NH_3), dan senyawa organik volatil lainnya. Salah satu penelitian yang dilakukan di TPA Bengkala Kabupaten Buleleng oleh (Nurjaya and Rachmanto, 2023) dengan menggunakan pemodelan Land GEM, IPCC, dan LCA guna mengukur potensi produksi gas metana dengan tujuan mengevaluasi dampak lingkungan dari penanganan sampak di lokasi tersebut.

Komposisi gas tersebut dipengaruhi oleh umur timbunan sampah, kadar air, kandungan bahan organik, dan sistem pengelolaan *landfill*. Selain menimbulkan bau yang menyengat emisi *Volatile Organic Compound (VOC)* berpotensi membentuk ozon troposfer melalui reaksi fotokimia, sedangkan metana menjadi salah satu gas rumah kaca yang berkontribusi terhadap perubahan iklim. Sehingga, penerapan sistem penangkapan *(gas collection system)* dan pemanfaat gas landfill menjadi energi merupakan praktik terbaik dalam pengelolaan TPA modern.

Sumber emisi lain yang memiliki dampak signifikan adalah pembakaran sampah, baik melalui praktik *open burning* maupun fasilitas *incinerator*. Praktik pembakaran terbuka (*open burning*) masih menjadi salah satu sumber emisi yang signifikan, terutama di daerah yang belum memiliki sistem pengelolaan sampah yang memadai. Pembakaran dilakukan tanpa pengendalian suhu maupun suplai oksigen sehingga proses oksidasi berlangsung tidak sempurna.Pada pembakaran terbuka, proses berlangsung pada suhu rendah dan tanpa pengendalian udara sehingga menghasilkan pembakaran tidak sempurna yang melepaskan karbon monoksida (CO), partikulat PM 2.5 dan PM 10, karbon hitam, dioksi, furta serta hidrokarbon aromatik polisiklik (PAH). Sebaliknya, insinerator modern bekerja pada suhu tinggi dengan suplai oksigen yang terkontrol sehingga proses pembakaran lebih sempurna dan volume sampah berkurang secara signifikan. Namun demikian, insinerator tetap menghasilkan gas buang yang memerlukan sistem pengendalian emisi, seperti *baghouse filter, electrostatic precipitator, scrubber,* dan *selective catalytic reduction* (SCR), agar konsentrasi partikulat seperti NO, SO, logam berat dan senyawa organik persisten memenuhi baku mutu lingkungan. Sedangkan, praktik *open burning* merupakan salah satu sumber emisi yang paling sulit dikendalikan apabila tidak disertai dengan peningkatan sistem pelayanan persampahan.

Selain emisi gas, sistem pengelolaan sampah juga menjadi sumber pembentukan partikulat, terutama PM10 dan PM2.5**,** yang memiliki dampak signifikan terhadap kualitas udara. Partikulat dapat terbentuk melalui proses mekanis, seperti aktivitas pemindahan sampah, lalu lintas kendaraan di area fasilitas persampahan, dan pengangkutan material, maupun melalui proses pembakaran yang menghasilkan partikel hasil kondensasi gas. PM_{10} umumnya berasal dari debu dan partikel berukuran lebih besar, sedangkan $PM_{2.5}$ didominasi oleh partikel halus hasil pembakaran yang mampu bertahan lebih lama di atmosfer dan berpindah hingga jarak yang jauh. Selain partikulat primer, beberapa gas seperti sulfur dioksida (SO_2), nitrogen oksida (NO_x), dan senyawa organik volatil (VOC) juga dapat mengalami transformasi kimia di atmosfer membentuk partikulat sekunder. Inventarisasi seluruh sumber emisi, baik berupa gas maupun partikulat, menjadi dasar penting dalam penyusunan strategi pengendalian pencemaran udara pada sektor persampahan serta dalam pengembangan sistem pengelolaan sampah yang lebih efisien dan rendah emisi.

Karakteristik emisi dari setiap tahapan pengelolaan sampah menunjukkan bahwa tidak ada satu sumber yang menjadi penyebab utama pencemaran udara, melainkan merupakan akumulasi dari berbagai aktivitas dalam sistem persampahan. Sehingga, pengendalian emisi harus dilakukan melalui pendekatan terpadu yang mencakup peningkatan efisiensi transportasi, pengurangan timbulan sampah di sumber, penerapan teknologi pengolahan rendah emisi, pengelolaan gas *landfill,* serta penghentian praktik pembakaran terbuka. Selain itu, inventarisasi emisi, pemantauan kualitas udara secara berkala, dan penerapan standard emisi pada fasilitas pengelolaan sampah menjadi instrument penting untuk mengevaluasi efektivitas kebijakan pengendalian pencemaran udara. Dengan pendekatan tersebut, sektor persampahan dapat bertransformasi

menjadi sistem yang tidak hanya efektif dalam menangani limbah padat, tetapi juga mampu meminimalkan dampaknya terhadap kualitas udara dan kesehatan masyarakat.

4.3 Dampak Polusi Udara Akibat Pengelolaan Sampah

Polusi udara yang berasal dari sistem pengelolaan sampah dapat menimbulkan konsekuensi terhadap kesehatan manusia, kualitas lingkungan, stabilitas iklim, serta kehidupan sosial-ekonomi masyarakat. Dampak tersebut tidak hanya bergantung pada konsentrasi polutan di udara tetapi juga dipengaruhi oleh lamanya paparan, kondisi meteorologi, kepadatan penduduk, serta tingkat kerentanan individu. Dalam perspektif kesehatan lingkungan, dampak pencemaran udara dipandang sebagai hasil interaksi antara sumber pencemar, media lingkungan, jalur paparan, dan penerima risiko. Oleh karena itu, pengelolaan dampak tidak hanya dilakukan melalui pengendalian emisi, tetapi juga melalui pengurangan tingkat paparan masyarakat terhadap polutan yang telah tersebar di lingkungan.

Dampak terhadap kesehatan manusia merupakan konsekuensi yang paling nyata dari menurunnya kualitas udara akibat aktivitas pengelolaan sampah. Paparan polutan secara terus-menerus dapat meningkatkan beban penyakit melalui gangguan pada sistem pernapasan, kardiovaskular, dan metabolisme tubuh. Selain menimbulkan penyakit akut, paparan kronis dapat mempercepat penurunan fungsi paru, menurunkan harapan hidup. Dampak kesehatan tersebut pada akhirnya tidak hanya dirasakan oleh individu, tetapi juga menjadi beban bagi sistem pelayanan kesehatan karena meningkatnya kebutuhan pengobatan, rehabilitasi, dan pelayanan medis jangka panjang.

Dari perspektif ekologi, polusi udara mengubah kualitas lingkungan melalui proses yang berlangsung secara bertahap dan akumulatif. Deposisi polutan dari atmosfer ke permukaan tanah maupun badan air dapat memengaruhi keseimbangan ekosistem, mengubah sifat kimia tanah, mengganggu produktivas vegetasi dan memenuhi keanekaragaman hayati. Penurunan kualitas udara juga dapat mengurangi fungsi ekosistem sebagai penyedia jasa lingkungan, seperti penyerapan karbon, penyediaan habitat, serta pengaturan siklus air. Dalam jangka panjang, akumulasi dampak tersebut berpotensi menurunkan daya dukung lingkungan, khususnya di wilayah perkotaan yang memiliki tekanan pembangunan dan volume timbulan sampah yang tinggi.

Dalam skala yang lebih luas, dampak polusi udara dari sektor persampahan berkaitan dengan perubahan iklim dan pembangunan berkelanjutan. Emisi gas rumah kaca dari sektor ini berkontribusi terhadap peningkatan temperature global yang kemudian menyebabkan berbagai perubahan lingkungan, seperti meningkatnya kejadian cuaca ekstrem, perubahan pola curah hujan, serta gangguan terhadap ketahanan pangan dan sumber daya air. Dampak tersebut memperlihatkan bahwa pengelolaan sampah tidak lagi menjadi isu lokal semata, melainkan bagian dari agenda global dalam mencapai target pengurangan emisi gas rumah kaca dan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan *(Sustainable Development Goals).* Dengan demikian, keberhasilan pengelolaan sampah juga memberikan kontribusi terhadap peningkatan kualitas udara sekaligus mitigasi perubahan iklim.

Dampak sosial dan ekonomi dari polusi udara cenderung dirasakan secara tidak merata karena dipengaruhi oleh kondisi sosial, tingkat pendapatan, serta lokasi tempat tinggal masyarakat. Kelompok berpenghasilan rendah yang bermukim di sekitar fasilitas pengelolaan sampah umumnya

memiliki tingkat paparan yang lebih tinggi, sementara akses terhadap layanan kesehatan dan lingkungan yang berkualitas relatif lebih terbatas. Anak-anak, lanjut usia, ibu hamil serta pekerja sektor persampahan merupakan kelompok yang paling rentan karena memiliki kapasitas fisiologis atau tingkat paparan yang lebih tinggi dibandingkan populasi umum. Kondisi ini menunjukkan bahwa pencemaran udara tidak hanya menjadi persoalan lingkungan, tetapi juga berkaitan dengan aspek keadilan lingkungan, di mana distribusi risiko dan manfaat pembangunan belum dirasakan secara seimbang oleh seluruh lapisan masyarakat. Oleh karena itu, kebijakan pengelolaan sampah perlu mempertimbangkan perlindungan terhadap kelompok rentan melalui pendekatan kesehatan masyarakat, pemerataan layanan lingkungan, dan penguatan partisipasi masyarakat dalam pengambilan keputusan.

4.4 Teknologi Pengelolaan Sampah untuk Mengurangi Polusi Udara

Perkembangan teknologi pengelolaan sampah merupakan salah satu strategi utama dalam mengurangi emisi polutan udara sekaligus meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya. Pendekatan modern tidak lagi berorientasi pada pembuangan sampah semata, tetapi menempatkan sampah sebagai sumber daya yang masih memiliki nilai ekonomi dan potensi untuk dimanfaatkan kembali. Pergeseran paradigma ini mendorong penerapan sistem pengelolaan sampah yang terintegrasi, mulai dari pengurangan timbulan di sumber, pemanfaatan kembali material yang masih bernilai, hingga penerapan teknologi pengolahan yang mampu meminimalkan pelepasan emisi ke atmosfer. Dengan demikian, keberhasilan pengelolaan sampah tidak hanya diukur dari berkurangnya volume sampah yang dibuang ke tempat pemrosesan akhir, tetapi

juga dari kemampuan sistem tersebut dalam menekan pencemaran udara, mengurangi emisi gas rumah kaca, dan mendukung pembangunan rendah karbon.

Prinsip *Reduce, Reuse,* dan *Recycle* (3R) menjadi fondasi utama dalam pengelolaan sampah berkelanjutan dan merupakan bagian penting dari konsep ekonomi sirkular (*circular economy*). Pendekatan ini bertujuan mempertahankan nilai material selama mungkin di dalam siklus ekonomi sehingga kebutuhan terhadap bahan baku baru dan volume limbah yang dihasilkan dapat ditekan. Melalui kegiatan pengurangan konsumsi, penggunaan kembali produk, serta pendaurulangan material seperti plastik, kertas, logam, dan kaca, jumlah sampah yang harus diangkut maupun diproses dapat berkurang secara signifikan. Penurunan timbulan sampah tersebut secara tidak langsung mengurangi kebutuhan transportasi, memperpanjang umur operasional tempat pemrosesan akhir, serta menekan pembentukan emisi udara dari seluruh rantai pengelolaan sampah. Dalam konteks ekonomi sirkular, limbah dipandang sebagai bahan baku sekunder yang dapat dimanfaatkan kembali melalui inovasi teknologi, pengembangan industri daur ulang, serta desain produk yang lebih mudah digunakan kembali atau didaur ulang.

Untuk limbah organik yang mendominasi komposisi sampah di banyak negara berkembang, teknologi pengomposan (*composting*) dan biodigester merupakan alternatif yang efektif dibandingkan penimbunan di tempat pemrosesan akhir. Pengomposan adalah proses alami mendaur ulang bahan organic menjadi pupuk subur dengan memanfaatkan aktivitas mikroorganisme aerobik untuk mengubah bahan organik menjadi kompos yang dapat digunakan sebagai pembenah tanah maupun pupuk organik. Proses ini tidak hanya mengurangi volume sampah organik, tetapi juga menekan pembentukan gas metana yang umumnya terjadi pada kondisi anaerobik. Sementara itu,

biodigester memanfaatkan proses fermentasi anaerobik yang terkontrol untuk menghasilkan biogas, terutama metana, yang kemudian dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan. Selain menghasilkan energi, biodigester juga menghasilkan residu berupa *digestate* yang masih dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik. Dengan memanfaatkan limbah organik sebagai sumber energi dan bahan penyubur tanah, kedua teknologi tersebut mampu mengurangi emisi gas rumah kaca sekaligus mendukung pengembangan sistem pertanian dan energi yang lebih berkelanjutan.

Pada tahap pemrosesan akhir, penerapan *sanitary landfill* menjadi standar pengelolaan yang lebih ramah lingkungan dibandingkan sistem *open dumping*. *Sanitary landfill* dirancang dengan lapisan kedap (*liner system*), sistem pengumpulan lindi (*leachate collection system*), penutupan harian sampah, serta jaringan penangkapan gas landfill (*landfill gas collection system*). Salah satu komponen penting dalam sistem ini adalah pengelolaan gas landfill yang terbentuk selama proses dekomposisi limbah organik. Gas yang terkumpul dapat dibakar melalui *flaring* untuk mengurangi dampak pemanasan global atau dimanfaatkan sebagai bahan bakar pembangkit listrik maupun sumber energi bagi industri. Pengelolaan gas *landfill* tidak hanya mengurangi emisi gas rumah kaca, tetapi juga menurunkan risiko ledakan, mengendalikan bau, serta meningkatkan keselamatan operasional tempat pemrosesan akhir. Oleh karena itu, teknologi *sanitary landfill* dipandang sebagai solusi transisi menuju sistem pengelolaan sampah yang lebih berkelanjutan, terutama bagi wilayah yang masih bergantung pada metode penimbunan.



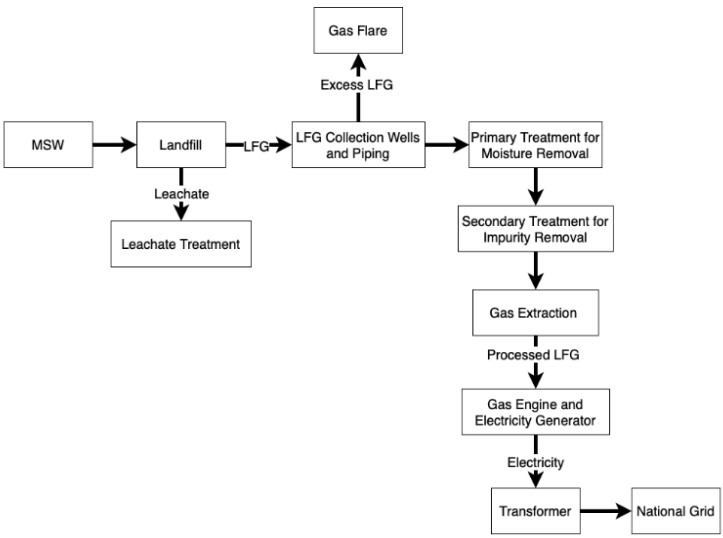
Gambar 4. 2 *Sanitary Landfill*

(Sumber https://thisistbs.com/id/publikasi/kisah/sanitary-landfill-pengertian-cara-kerja-dan-manfaat)

Sanitary Landfill merupakan metode pembuangan akhir sampah yang dirancang secara teknis untuk meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat. Berbeda dengan sistem *open dumping,* menurut (Winardi, Mochtar and Sari, 2022) *sanitary landfill* bekerja dengan menempatkan sampah secara berlapis di dalam sel *(landfill cell)* yang telah dirancang secara teknis untuk mencegah pencemaran lingkungan.

Sebelum sampah ditimbun, dasar landfill dilapisi dengan material kedap air, seperti tanah liat atau membrane geosintetik *(geomembrane),* untuk mencegah air lindi *(leachate)* meresap ke dalam tanah dan mencemari air tanah. Sampah kemudian dipadatkan menggunakan alat berat agar volumenya berkurang dan setiap lapisan sampah ditutup secara berkala dengan tanah atau material penutup alternatif guna mengurangi bau, mencegah penyebaran sampah oleh angin, serta menghambat berkembangnya lalat dan hewan

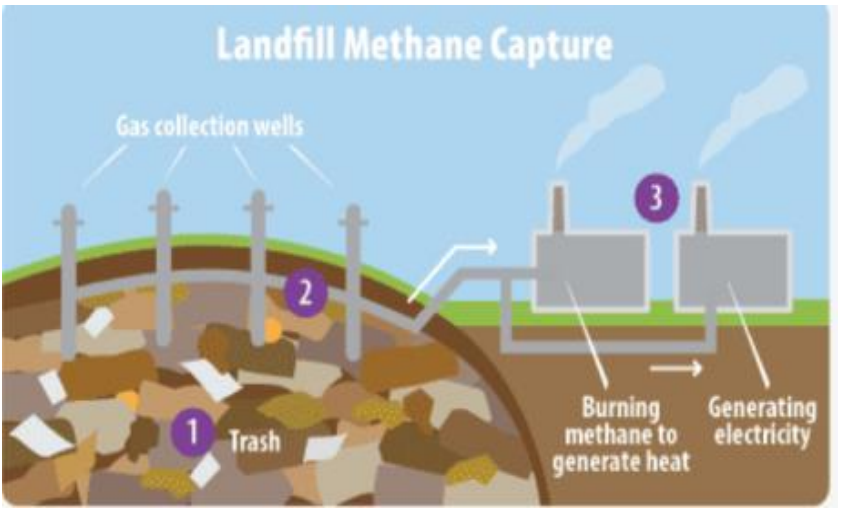
pembawa penyakit. Air lindi yang terbentuk dari proses dekomposisi dikumpulkan melalui jaringan pipa untuk diolah sebelum dibuang ke lingkungan, sedangkan gas landfill, terutama metana (CH_4), dan karbon dioksida (CO_2) ditangkap melalui sumur atau pipa gas dan dapat dimanfaatkan sebagai sumber energy. Setelah kapasitas *landfill* penuh, area tersebut ditutup dengan lapisan penutup akhir dan direvegetasi agar lahan menjadi lebih stabil derta dapat dimanfaatkan kembali sesuai dengan peruntukan yang sama. Penerapan sistem ini bertujuan mengurangi bau, mencegah berkembangnya vektor penyakit, menekan risiko kebakaran, serta mengendalikan emisi gas rumah kaca. Sebagai metode yang direkomendasikan dalam pengelolaan sampah modern, *sanitary landfill* menjadi pilihan yang lebih ramah lingkungan karena mampu mengendalikan pencemaran sekaligus mendukung pemanfaatan gas metana sebagai sumber energy apabila dilengkapi dengan sistem penangkapan *(landfill gas recovery).*



Gambar 4. 3 Tahap Arus Proses Landfill Gas Recovery

Sumber (Tang *et al.*, 2021)

Landfill Gas Recovery merupakan sistem pemulihan gas yang dihasilkan dari dekomposisi anaerobik sampah organik di tempat pemrosesan akhir (TPA). Gas *landfill* umumnya terdiri atas sekitar metana (CH_4), karbon dioksida (CO_2), dan sejumlah gas lainnya. Melalui pemasangan sumur gas, jaringan pipa, dan unit pengumpul gas metana ditangkap sebelum terlepas ke atmosfer sehingga dapat mengurangi emisi gas rumah kaca dan risiko ledakan. Gas yang terkumpul selanjutnya dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi untuk menghasilkan listrik, bahan bakar *boiler,* atau bahan bakar alternatif setelah melalui proses pengolahan yang sesuai. Dengan demikian, *landfill gas recovery* tidak hanya berfungsi sebagai upaya pengendalian pencemaran udara, tatapi juga mendukung pemanfaatan limbah menjadi energi terbarukan dalam pengelolaan sampah yang berkelanjutan. Ada beberapa contoh seperti pemanfaatan gas TPA menjadi listrik di TPA Jatibarang, Kota Semarang (Nurhadi *et al.*, 2020), pemanfaatan gas metana (CH_4) dari TPA Wonokerto, Kabupaten Pasuruan dipakai dalam berbagai keperluan seperti disalurkan ke jaringan listrik, produksi bahan vakar alternatif untuk transportasi, serta pemanfaatan termal (Rokhmawati, Firatama and Triono, 2025).



Gambar 4. 4 *Landfill Methane Capure*

(Sumber https://archive-epa-gov.translate.goog/climatechange/kids/solutions/technologies/methane.html?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=id&_x_tr_hl=id&_x_tr_pto=imgs

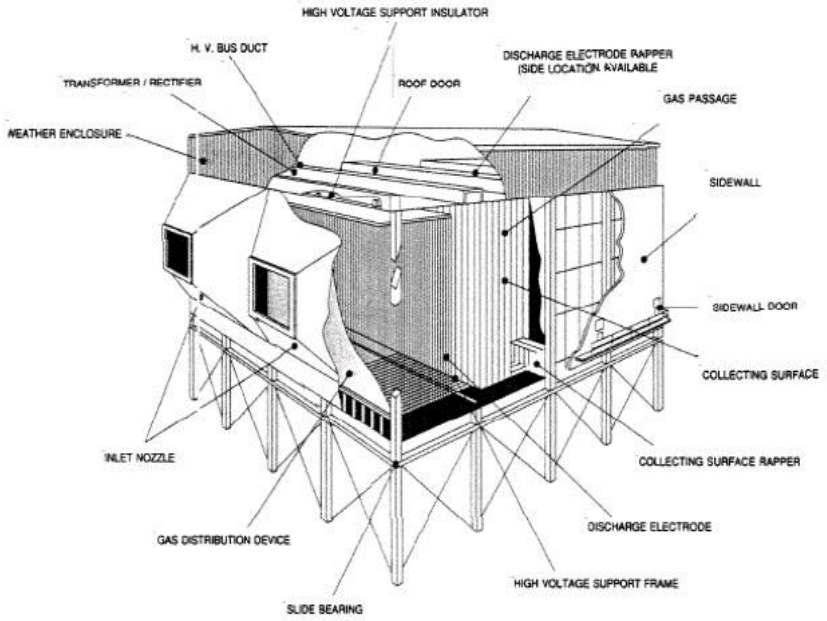
Landill methane capture adalah sistem atau teknologi yang dirancang secara khusus untuk menangkap gas metana (CH_4) yang terbentuk selama proses dekomposisi anaerobik sampak organik di tempat pemrosesan akhir (TPA) ataupun *sanitary landfill*. Gas metana ditangkap melalui sumur ekstrasi dan jaringan pipa, kemudian dialirkan ke fasilitas pengolahan untuk dimanfaatkan sebagai sumber energy atau dibakar *(flaring)* apabila belum dimanfaatkan. Proses ini juga disebut dengan *methane avoidance* yang bertujuan untuk menghindari pelepasan gas metana menjadi karbon dioksida yang memiliki potensi pemanasan global sekitar 28 kali lebih besar daripada karbon dioksida dalam periode 100 tahun, sehingga berkontribusi terhadap mitigasi perubahan iklim (Interngovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007).

Perlu diketahui bahwa perbedaan utama antara *landfill methane capture* dan *landfill gas recovery* terletak pada cakupan dan tujuan pemanfaatannya. *Landfill methane capture* berfokus secara spesifik pada penangkapan gas metana sebagai komponen utama yang perlu dikendalikan karena dampaknya terhadap perubahan iklim, sedangkan *landfill gas recovery* merupakan konsep yang lebih luas, yaitu pengumpulan seluruh gas *landfill* terutama campuran metana dan karbon dioksida untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi atau dikelola secara aman. Oleh karena itu, *landfill methane capture* dapat dipandang sebagai bagian atau tahapan dari sistem *landfill gas recovery* yang menitikberatkan pada pengendalian dan pemanfaatan metana.

Seiring meningkatnya kebutuhan akan energi dan keterbatasan lahan untuk tempat pemrosesan akhir, teknologi *Waste-to-Energy* (WtE) berkembang sebagai salah satu alternatif dalam pengelolaan sampah modern. Konsep WtE bertujuan mengubah sampah menjadi energi melalui berbagai proses, seperti pembakaran terkendali (*incineration*), gasifikasi, pirolisis, maupun pencernaan anaerobik untuk limbah organik (Wirjawan and Choandi, 2024). Teknologi ini mampu mengurangi volume sampah secara signifikan sekaligus menghasilkan energi listrik atau panas yang dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan industri maupun rumah tangga. Namun demikian, penerapan WtE memerlukan pengelolaan yang cermat, terutama dalam pemilihan teknologi yang sesuai dengan karakteristik sampah, efisiensi pemulihan energi, serta pengelolaan residu yang dihasilkan. Pada fasilitas yang menggunakan proses insinerasi, sistem pengendalian emisi menjadi komponen yang tidak terpisahkan.

Berbagai teknologi seperti *electrostatic precipitator*, *baghouse filter*, *wet scrubber*, *dry scrubber*, *activated carbon injection*, dan *selective catalytic reduction (SCR)* digunakan

untuk mengurangi konsentrasi partikulat, gas asam, logam berat, dioksin, furan, serta nitrogen oksida sebelum gas buang dilepaskan ke atmosfer.

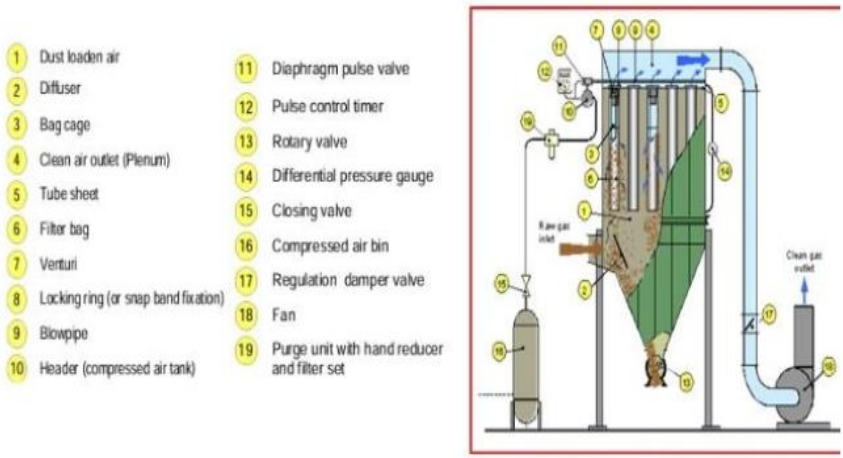


Gambar 4. 5 *Electrostatic Precipitator (ESP)*

(Sumber *US Environmental Protection Agency* https://www.epa.gov/air-emissions-monitoring-knowledge-base/monitoring-control-technique-electrostatic-precipitators)

Electrostatic precipitator (ESP) merupakan teknologi pengendalian pencemaran udara yang banyak di Indonesia untuk mengurangi emisi partikulat dari gas buang industri terutama pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), industri semen, peleburan logam, serta pabrik pulp dan kertas. Prinsip kerja ESP memanfaatkan medan listrik bertegangan tinggi untuk memberikan muatan listrik pada partikel debu yang

terkandung dalam aliran gas buang. Partikel bermuatan tersebut kemudian tertarik dan menempel pada pelat kolektor bermuatan berlawanan, sehingga gas yang dilepaskan ke atmosfer memiliki kandungan partikulat yang jauh lebih rendah. Teknologi ini memiliki efisiensi penangkapan debu yang sangat tinggi, bahkan dapat mencapai lebih dari 99% untuk partikel berukuran halus, sehingga efektif dalam menurunkan emisi partikulat dan meningkatkan kualitas udara. Di Indonesia, penggunaan *electrostatic precipitator* menjadi salah satu upaya penting bagi industri untuk memenuhi baku mutu emisi sebagaimana diatur dalam berbagai peraturan lingkungan hidup, sekaligus mendukung pengendalian pencemaran udara dan perlindungan kesehatan masyarakat di sekitar kawasan industri (Sutrisno and Meilasari, 2024).



Gambar 4. 6 *Baghouse Filter*

(Sumber (Putra *et al.*, 2025))

Baghouse filter atau *Baghouse* merupakan teknologi pengendalian pencemaran udara yang bekerja berdasarkan prinsip filtrasi mekanis, yaitu menyaring partikel debu

menggunakan kantong-kantong kain (*filter bags*) yang terbuat dari bahan tahan panas, seperti *fiberglass,* polyester, atau Nomex. Gas buang dialirkan melewati kantong filter sehingga partikel debu tertahan pada permukaan kain, sedangkan gas yang telah bersih diteruskan ke atmosfer. Seiring waktu, lapisan debu yang terbentuk *(dust cake)* justru meningkatkan efisiensi penyaringan karena mampu menangkap partikel yang lebih halus. Ketika debu telah menumpuk, sistem pembersihan otomatis seperti pulse jet, reverse air, atau mechanical shaker akan melepaskan debu dari kantong filter untuk kemudian dikumpulkan dan dibuang atau dimanfaatkan kembali. *Bag filter* dikenal memiliki efisiensi penangkapan partikulat yang sangat tinggi, bahkan dapat mencapai lebih dari 99% termasuk untuk partikel halus berukuran kurang dari 10 mikrometer. Di Indonesia, *baghouse filter* digunakan pada berbagai industri seperti PT Power Steel, Kabupaten Tangerang, (Putra *et al.*, 2025), dan industri semen (Vhirgiani *et al.*, 2022)

Wet scrubber dapat digunakan untuk menghilangkan polutan dari gas buang melalui kontak langsung antara aliran gas dan cairan penyerap, umumnya air atau larutan kimia tertentu. Berbeda dengan *electrostatic precipitator (ESP)* yang memanfaatkan gaya elektrostatik dan *baghouse filter* yang menggunakan media penyaring, *wet scrubber* bekerja dengan menangkap partikel debu serta melarutkan atau menyerap gas pencemar ke dalam cairan. Ketika gas buang dialirkan ke dalam *scrubber*, cairan disemprotkan dalam bentuk tetesan halus sehingga terjadi tumbukan antara partikel atau gas pencemar dengan cairan tersebut. Partikel debu akan terperangkap, sedangkan gas-gas mudah larut, seperti sulphur dioksida (SO_2), hydrogen klorida (HCL), ammonia (NH_3), dan beberapa senyawa berbahaya lainnya, akan terserap ke dalam cairan sebelum gas yang telah dibersihkan dilepaskan ke atmosfer (Hita *et al.*, 2026). Namun, teknologi ini menghasilkan limbah cair yang harus

diolah terlebih dahulu agar tidak menimbulkan pencemaran air dan tanah, sehingga pengoperasiannya perlu didukung dengan sistem pengolahan air limbah yang memadai (Gunawan, Rahwati and Supardin, 2026).

Dry scrubber bekerja dengan menginjeksi bahan penyerap *(sorbent)* kering atau semi kering, seperti kapur hidrat (Ca(OH)2) atau natrium bikarbonat (NaHCO3), ke dalam aliran gas buang. Bahan penyerap tersebut bereaksi secara kimia dengan gas pencemar, terutama sulphur doksida (SO2), hydrogen klorida (HCl), dan hydrogen fluorida (HF), membentuk senyawa padat yang kemudian ditangkap menggunakan *baghouse filter* atau *electrostatic precipitator (ESP).* Dibandingkan dengan *wet scrubber, dry scrubber* memiliki kebutuhan air yang jauh lebih rendah, menghasilkan limbah cair yang minimal, serta membutuhkan biaya operasi yang lebih rendah.



Gambar 4. 7 *Activated Carbon Injection (ACI)*

Sumber: (Ladwig and Blythe, 2017)

Activated Carbon Injection (ACI) dirancang untuk menghilangkan polutan berbahaya terutama merkuri (Hg), dioksin, furan, serta berbagai senyawa organic volatil dari gas buang industri. Sistem ini bekerja dengan menyuntikkan serbuk karbon aktif ke dalam saluran gas buang sebelum gas memasuki alat pengumpul partikulat, seperti *bagfilter* atau *electrostatic precipitator.* Karbon aktif memiliki luas permukaan yang sangat besar sehingga mampu mengadsorpi berbagai zat pencemar pada permukaanya. Setelah proses adsorpsi berlangsung, karbon aktif yang telah mengikat polutan akan ditangkap bersama debu oleh alat pengendali partikulat. Teknologi *Activated Carbon Injection (ACI)* banyak digunakan pada incinerator limbah, pembangkit listrik berbahan bakar batu bara, dan industri yang berpotensi

menghasilkan emisi logam berat maupun senyawa organik beracun.

Selective Catalytic Reduction (SCR) adalah teknologi pengendalian pencemaran udara yang digunakan untuk menurunkan emisi nitrogen oksida (NOx), salah satu penyebab utama pembentukan hujan asam, kabut fotokimia, dan ozon troposferik. Teknologi ini bekerja dengan menginjeksikan amonia (NH_3) atau larutan urea ke dalam aliran gas buang yang kemudia dialirkan melalui reactor yang mengandung katalis, seperti vanadium, titanium, atau zeolit. Di dalam rekator, nitrogen oksida bereaksi secara selektif dengan ammonia membentuk nitrogen (N_2) dan uap air (H_2O), yang merupakan komponen alami atmsofer dan tidak berbahaya. Teknologi SCR mampu mencapai efisiensi pengurangan emisi nitrogen dioksida (NO_2) hingga lebih dari 90% sehingga banyak diterapkan pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), industri semen, kilang menyak, serta berbagai fasilitas pembakaran berskala besar. Di Indonesia, penggunaan *Selective Catalytic Reduction (*SCR) makin berkembang sebagai bagian dari upaya industri untuk memenuhi baku mutu emisi udara dan mendukung pengurangan pencemaran udara akibat proses pembakaran bahan bakar fosil.

Dengan kombinasi berbagai teknologi tersebut, insinerator modern dapat beroperasi sesuai dengan standar baku mutu emisi yang ditetapkan oleh berbagai regulasi lingkungan. Transformasi menuju sistem pengelolaan sampah yang lebih efektif juga didukung oleh pemanfaatan teknologi digital sebagai bagian dari konsep *smart waste management*. Teknologi seperti *Internet of Things (IoT)*, sensor volume sampah, *Global Positioning System (GPS)*, *Geographic Information System (GIS)*, kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*), *big data analytics*, dan aplikasi berbasis digital memungkinkan proses pengelolaan sampah dilakukan secara lebih efisien dan berbasis data. Sensor pada

tempat sampah dapat memberikan informasi kapasitas secara *real-time*, sehingga rute pengangkutan dapat dioptimalkan untuk mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi kendaraan. Sementara itu, GIS dan analisis spasial mendukung perencanaan lokasi fasilitas pengelolaan sampah serta pemantauan sebaran sumber pencemar udara. Di sisi lain, platform digital juga mempermudah pelaporan masyarakat, pengembangan bank sampah digital, pelacakan material daur ulang, hingga evaluasi kinerja sistem pengelolaan sampah secara menyeluruh. Integrasi antara inovasi teknologi, ekonomi sirkular, dan digitalisasi tersebut menjadi fondasi penting dalam mewujudkan sistem pengelolaan sampah yang efisien, rendah emisi, adaptif terhadap perkembangan teknologi, dan mampu mendukung tercapainya tujuan pembangunan berkelanjutan.

4.5 Strategi Pengendalian Polusi Udara dari Sektor Persampahan

Pengendalian polusi udara dari sektor persampahan memerlukan pendekatan yang komprehensif melalui penguatan kebijakan, regulasi, serta tata kelola yang mampu mengintegrasikan aspek lingkungan, kesehatan, dan pembangunan berkelanjutan. Keberhasilan pengelolaan sampah tidak hanya ditentukan oleh kemampuan mengurangi volume sampah, tetapi juga oleh efektivitas kebijakan dalam meminimalkan dampak pencemaran udara yang ditimbulkan selama proses pengelolaannya serta kolaborasi pentahelix, yaitu sinergi antara pemerintah, dunia usaha, akademisi, masyarakat, dan media. Pemerintah berperan dalam menyusun regulasi yang mengatur dan mengawasi seluruh tahapan pengelolaan sampah, mulai dari pengurangan di sumber, pemilahan, pengangkutan, pengolahan, hingga pemrosesan akhir dengan memperhatikan standar perlindungan kualitas udara.

Kebijakan tersebut harus didukung oleh penegakan hukum yang konsisten, penerapan baku mutu emisi pada fasilitas pengelolaan sampah, serta mekanisme evaluasi yang berkelanjutan. Di Indonesia, strategi ini sejalan dengan kebijakan pengurangan sampah, pengembangan ekonomi sirkular, serta komitmen nasional dalam menurunkan emisi gas rumah kaca melalui pembangunan rendah karbon.

Selain penguatan regulasi, pengawasan kualitas udara di sekitar fasilitas persampahan menjadi instrumen penting untuk memastikan bahwa aktivitas pengelolaan sampah tidak menimbulkan risiko yang berlebihan bagi kesehatan masyarakat dan lingkungan. Pemantauan kualitas udara dilakukan melalui pengukuran parameter seperti partikulat (PM2.5 dan PM10), sulfur dioksida (SO_2), nitrogen oksida (NO_x), karbon monoksida (CO), ozon (O_3), serta parameter spesifik seperti hidrogen sulfida (H_2S), amonia (NH_3), dan senyawa organik volatil (VOC) yang sering ditemukan di sekitar tempat pemrosesan akhir. Hasil pemantauan tersebut berfungsi sebagai dasar dalam mengevaluasi kepatuhan terhadap baku mutu lingkungan, mengidentifikasi potensi risiko kesehatan, serta menyusun tindakan korektif apabila terjadi peningkatan konsentrasi polutan. Pengembangan sistem pemantauan berbasis sensor otomatis (*continuous air quality monitoring*) dan pemanfaatan teknologi informasi juga memungkinkan proses pengawasan dilakukan secara lebih cepat, akurat, dan transparan.

Masyarakat menjadi aktor utama dalam melakukan pemilahan sampah, menerapkan prinsip 3R atau 5R, serta mengurangi praktik pembakaran sampah terbuka. Sementara itu, media berfungsi sebagai sarana penyebarluasan informasi, edukasi, dan kampanye lingkungan untuk meningkatkan kesadaran publik mengenai pentingnya pengelolaan sampah yang berkelanjutan. Melalui kolaborasi *pentahelix*, pengendalian polusi udara dari sektor persampahan dapat dilakukan secara terintegrasi, efektif, dan

berkelanjutan sehingga mampu mendukung peningkatan kualitas lingkungan dan kesehatan masyarakat. Aspek edukasi dan perubahan perilaku masyarakat juga menjadi faktor dalam mengurangi polusi udara yang berasal dari sektor persampahan. Masih banyak masyarakat yang membakar sampah rumah tangga karena dianggap sebagai cara yang paling mudah dan murah untuk mengurangi volume sampah.

Diperlukan program edukasi yang bekelanjutan dari lembaga pendidikan dan institusi penelitian berkontribusi dalam menghasilkan inovasi teknologi, kajian ilmiah, dan rekomendasi kebijakan berbasis bukti. Di tingkat masyarakat, perubahan perilaku melalui pemilahan sampah sejak dari sumber, pengurangan penggunaan produk sekali pakai, partisipasi dalam bank sampah, serta keterlibatan dalam program edukasi lingkungan menjadi faktor penting dalam menurunkan timbulan sampah dan mengurangi potensi pencemaran udara. Selain pendekatan teknis dan kelembagaan, pengendalian polusi udara dari sektor persampahan juga memerlukan penguatan sistem pemantauan *(monitoring)* dan evaluasi kualitas udara secara berkelenajutan.

Dunia usaha memiliki tanggung jawab untuk menerapkan teknologi pengelolaan sampah yang ramah lingkungan, meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya, serta menjalankan tanggung jawab produsen melalui konsep *Extended Producer Responsibility* (EPR) atau Tanggung Jawab Produsen yang Diperluas merupakan pendekatan kebijakan pengelolaan limbah yang menempatkan tanggung jawab produsen tidak hanya pada tahap produksi dan pemasaran tetapi juga hingga tahap pascakonsumsi dari produk yang dihasilkannya. Melalui konsep ini, produsen didorong untuk mengelola kembali kemasan atau produk yang telah menjadi limbah melalui mekanisme seperti pengumpulan, penggunaan kembali

(reuse), daur ulang *(recycling),* atau pemanfaatan kembali (*recovery*). Penerapan EPR bertujuan untuk mengurangi jumlah sampah yang berakhir di tempat pemrosesan akhir, meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya, serta mendorong produsen untuk merancang produkk yang lebih ramah lingkungan, mudah didaur ulang, dan memiliki umur pakai yang lebih panjang. Dengan demikian, EPR menjadi salah satu instrumen penting dalam mewujudkan antara produsen, pemerintah, pelaku usaha dan masyarakat untuk menciptakan sistem pengelolaan sampah yang lebih berkelanjutan.

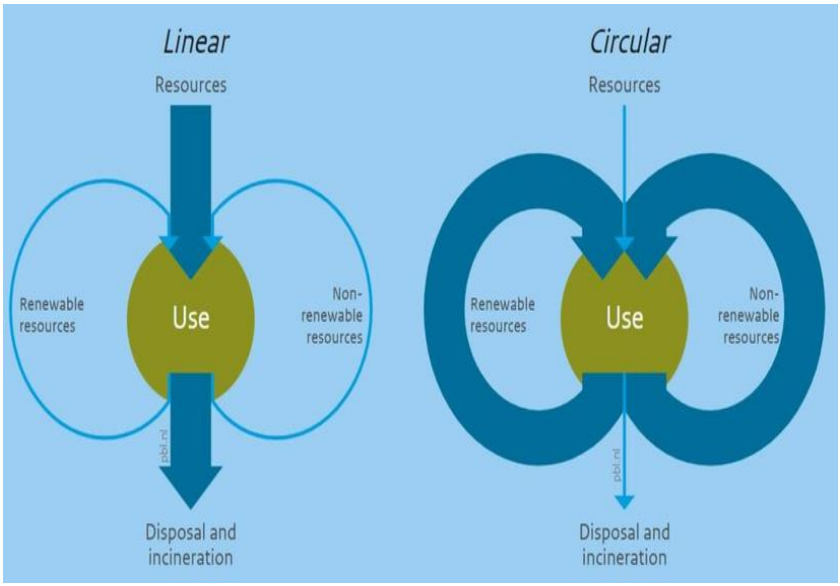
Implementasi kebijakan EPR diatur melalui Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 75 Tahun 2019 tentang Peta Jalan Pengurangan Sampah oleh Produsen. Pada regulasi ini produsen khususnya yang bergerak di sektor manufaktur, ritel serta makanan dan miniman untuk menyusun dan melaksanakan peta jalan pengurangan sampah yang berasal dari produk, kemasan, dan/atau wadah yang mereka hasilkan (Hasan and Hernanda, 2026). Bentuk implementasi EPR meliputi pembatasan timbulan sampah melalui desain produk yang lebih ramah lingkungan, pendauran ulang dengan membangun sistem pengumpulan dan pengolahan kembali kemasan pascakonsumsi, serta pemanfaatan kembali *(reuse)* produk atau kemasan agar memiliki masa pakai yang lebih panjang. Melalui kebijakan ini, tanggung jawab produsen diperluas hingga tahap pascakonsumsi, sehingga pengelolaan sampah tidak lagi menjadi tanggung jawab pemerintah dan masyarakat. Di beberapa Indonesia sudah mulai menerapkan konsep EPR dalam pengelolaan sampah saset di Kota Depok, Jawa Barat (Rahayuningtyas *et al.*, 2023). Penerapan EPR diharapkan dapat mendukung terciptanya ekonomi sirkular, meningkatkan daur ulang, mengurangi beban tempat pemrosesan akhir, serta mendorong inovasi dalam

pengembangan produk dan kemasan yang lebih berkelanjutan.

Perubahan konsep pendekatan *linier economy* menjadi *circular economy* memberikan arah baru dalam strategi pengendalian polusi udara dengan mengubah paradigma pengelolaan sampah dari sistem linear (*take–make–dispose*) atau pola "ambil-buat-gunakan-buang", di mana bahan baku diekstrasi, diolah menjadi produk, digunakan oleh konsumen, kemudian dibuang sebagai limbah setelah masa pakainya berakhir. Ini menjadi sistem yang mempertahankan nilai material dalam siklus produksi dan konsumsi selama mungkin. Sebagai ilustrasi, pada ekonomi linear, botol plastik sekali pakai diproduksi, digunakan oleh konsumen, kemudian dibuang ke tempat sampah dan berakhir di tempat pemrosesan akhir atau bahkan mencemari lingkungan.

Sebaliknya, pada konsep ekonomi sirkular, botol plastik dirancang agar dapat digunakan kembalim dikumpulkan melalui sistem pengembalian *(take-back-system),* kemudian didaur ulang menjadi bahan baku untuk menghasilkan botol baru atau produk lain yang bernilai ekonomis. Konsep ini mendorong pengurangan timbulan sampah melalui desain produk yang berkelanjutan, peningkatan penggunaan kembali (*reuse*), perbaikan (*repair*), manufaktur ulang (*remanufacturing*), serta daur ulang (*recycling*). Dalam jangka panjang, penerapan ekonomi sirkular mendukung tercapainya konsep *zero waste*, yaitu suatu kondisi ketika sebagian besar material dapat dimanfaatkan kembali sehingga hanya sedikit residu yang memerlukan pembuangan akhir. Pendekatan tersebut tidak hanya mengurangi tekanan terhadap tempat pemrosesan akhir, tetapi juga menurunkan kebutuhan transportasi, konsumsi energi, dan emisi polutan udara yang dihasilkan sepanjang rantai pengelolaan sampah. Dengan demikian, ekonomi sirkular menjadi salah satu instrumen strategis dalam

mendukung efisiensi sumber daya sekaligus meningkatkan kualitas lingkungan.



Gambar 4. 8 Perbandingan Ekonomi Linear dan Ekonomi Sirkular.

(Sumber https://iptek.web.id/2023/10/25/apa-perbedaan-antara-ekonomi-linear-dan-ekonomi-sirkular/)

Sinergi antaraktor, monitoring dan evaluasi mencerminkan pendekatan tata kelola kolaboratif yang semakin dibutuhkan dalam menghadapi kompleksitas persoalan persampahan. Ke depan, pengembangan sistem pengelolaan sampah rendah emisi akan menjadi bagian penting dari agenda pembangunan berkelanjutan di tingkat nasional maupun global. Dalam jangka panjang, strategi pengendalian polusi udara dari sektor persampahan harus menjadi bagian dari kebijakan pembangunan berkelanjutan dan mitigasi perubahan iklim. Pengurangan emisi dari sektor persampahan tidak hanya berkontribusi terhadap

peningkatan kualitas udara lokal, tetapi juga mendukung penurunan emisi gas rumah kaca pada tingkat nasional.

Transformasi tersebut memerlukan integrasi antara inovasi teknologi, kebijakan berbasis sains, investasi pada infrastruktur hijau, serta peningkatan kapasitas kelembagaan dan sumber daya manusia. Pengelolaan sampah tidak lagi dipandang sebagai layanan publik yang bersifat reaktif, tetapi sebagai bagian dari sistem pembangunan yang berkontribusi terhadap peningkatan kualitas udara, mitigasi perubahan iklim, efisiensi penggunaan sumber daya, dan pencapaian kesejahteraan masyarakat. Dalam konteks ini, penerapan indikator kinerja lingkungan, inventarisasi emisi sektor persampahan, pembiayaan hijau (*green financing*), serta penguatan kolaborasi multipihak menjadi faktor pendukung yang semakin penting. Melalui strategi yang terintegrasi dan berorientasi pada keberlanjutan, sektor persampahan dapat bertransformasi menjadi sektor yang tidak hanya mampu mengelola limbah secara efektif, tetapi juga berkontribusi nyata terhadap terciptanya lingkungan yang lebih bersih, udara yang lebih sehat, dan pembangunan yang tangguh bagi generasi sekarang maupun mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

González, Jerónimo Franco Izquierdo, Antonio Gallardo Commans, F. and Carlos, M. (2021) "Fuel-efficient driving in the context of urban waste-collection: A Spanish case study," *Journal of Cleaner Production*, 289. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125831.

Gunawan, G., Rahwati and Supardin (2026) "Kinerja Wet Scrubber sebagai Teknologi Pengendalian Emisi Insinerator dalam A-240 A-241," *Proceeding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe*, 9(1), pp. 240–246.

Halomoan, N. and Putri, A.R. (2025) "Potensi Emisi Gas Rumah Kaca di Tempat Pemrosesan Akhir Sampah Cikundul, Kota Sukabumi," *Nata Palemahan: Journal of Environmental Engineering Innovations*, 2(2), pp. 80–88. Available at: https://doi.org/10.38043/natapalemahan.v2i2.7016.

Hasan, H. and Hernanda, A.R.A. (2026) "Penerapan Skema Extended Producer Responsibility sebagai Instrumen Tanggung Jawab Perusahaan dalam Pengelolaan Limbah Makanan," *Al-Zayn: Jurnal Ilmu Sosial & Hukum*, 4(2), pp. 3550–3562.

Hita, M.A. *et al.* (2026) "DEVELOPMENT OF WET SCRUBBER TECHNOLOGY TO IMPROVE ENVIRONMENTAL QUALITY IN AGRO-INDUSTRY," *Jurnal Rekayasa dan Manajemen Agroindustri*, 14(1), pp. 62–81.

Interngovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007) *Waste-IPCC Guidelines for Nation Greenhouse Gas Inventories (IPCC Guidelines)*.

Ladwig, K.. . and Blythe, G.. (2017) "3- Flue-gas desulfurization products and other air emissions controls," *Coal Combustion Products (CCP's) Characteristics, Utilization and Benefication*, pp. 67–95. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100945-1.00003-4.

Nurhadi, N. *et al.* (2020) "Evaluasi Pemanfaatan Gas TPA Menjadi Listrik , Studi Kasus TPA Jatibarang Kota Semarang," *JEBT: Jurnal Energi Baru & Terbarukan*, 1(1), pp. 20–27. Available at: https://doi.org/10.14710/jebt.2020.8134.

Nurjaya, L.A.N.W. and Rachmanto, T.A. (2023) "Potensi produksi gas metana (CH4) dari kegiatan landfilling TPA di Bengkala Kabupaten Buleleng dengan kombinasi pemodelan LandGem, IPCC dan LCA," *Envirotek: Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*, 15(2), pp. 114–123.

Putra, R.D. *et al.* (2025) "KEMAMPUAN BAG FILTER DALAM PENGENDALIAN PENCEMARAN UDARA DI PT POWER STEEL INDONESIA," *Jurnal Teknologi dan Inovasi Industri*, 6(1), pp. 53–58. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.23960/jtii.v6i1.108.

Rahayuningtyas, C.M. *et al.* (2023) "Partisipasi Masyarakat dan Produsen dalam Pengelolaan Sampah Saset di Kota Depok , Jawa Barat Community and Producer Participation in Sachet Waste Management in Depok City , West Java Pendahuluan Jawa Barat tercatat dalam Sensus 2020 sebagai provinsi deng," *Aspirasi: Jurnal Masalah-Masalah Sosial*, 14(1), pp. 37–58.

Rokhmawati, Y., Firatama, A.D. and Triono, I.W. (2025) "Analisa Pemanfaatan Gas Metana dari Dekomposisi Sampah Organik pada Sanitary Landfill (Studi Kasus : TPA Wonokerto Kabupaten Pasuruan)," 5.

Saputra, H.Y. *et al.* (2024) "Urbanisasi Dan Dampaknya Terhadap Kualitas Lingkungan : Literatur Review," *Gudang Jurnal Multidisiplin Ilmu*, 2(12), pp. 920–926. Available at: https://gudangjurnal.com/index.php/gjmi.

Sekarsari, N., Kristanto, G.A. and Dahlan, A.V. (2023) "Greenhouse Gas Emissions from Waste Management in Jakarta, Indonesia," *Jurnal Reka Lingkungan*, 11(1), pp. 71–82.

Sutrisno, H. and Meilasari, F. (2024) "Teknologi Pengolahan Emisi dengan Menggunakan Electrostatic Presipitator (ESP)," *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 12(3), pp. 616–623.

Tang, Y.Y. *et al.* (2021) "Malaysia Moving Towards a Sustainability Municipal Waste Management," *Industrial and Domestic Waste Management*, 1(1), pp. 26–40.

Vhirgiani, C. *et al.* (2022) "EVALUASI KINERJA ALAT BAG HOUSE FILTER K1P11 DI UNIT COAL MILL PABRIK II PT SEMEN BATURAJA (PERSERO) TBK. YANG DITINJAU DARI CAN VELOCITINYA," *Jiran Jurnal Imu Terapan*, 3(1).

Winardi, A., Mochtar, N.E. and Sari, P.T.K. (2022) "Perencanaan Sanitary Landfill dan Lapisan Dasar Landfill pada Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Sekoto-Kabupaten Kediri," *Jurnal Teknik ITS*, 11(1). Available at: https://doi.org/10.12962/j23373539.v11i1.82062.

Wirjawan, J.K. and Choandi, M. (2024) “IMPLEMENTASI ARSITEKTUR BERKELANJUTAN DENGAN PENGELOLAAN SAMPAH MELALUI SISTEM TEKNOLOGI WASTE TO ENERGY (WTE),” *Jurnal STUPA Sains, Teknologi, Urban, Perancangan, Arsitektur*, 6(1), pp. 295–310. Available at: https://doi.org/10.24912/stupa.v6i1.27474.

BAB 5

PENCEMARAN UDARA DI KOTA-KOTA BESAR

Oleh Bambang Suhartawan

Pencemaran udara merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang paling mendesak di era industrialisasi dan urbanisasi modern. Secara umum, pencemaran udara didefinisikan sebagai keberadaan satu atau lebih zat kimia, fisik, maupun biologis di atmosfer dalam konsentrasi yang melebihi batas ambang yang dapat ditoleransi oleh makhluk hidup dan ekosistem *(Fardiaz, 2019; Soedomo, 2017; Wardhana, 2020)*. Menurut World Health Organization *(WHO, 2021)*, pencemaran udara ambien menjadi penyebab utama sekitar tujuh juta kematian dini setiap tahunnya di seluruh dunia, menjadikannya salah satu risiko lingkungan terbesar bagi kesehatan manusia. Di Indonesia, permasalahan ini semakin menguat seiring dengan pesatnya pertumbuhan kawasan perkotaan, peningkatan jumlah kendaraan bermotor, dan ekspansi sektor industri yang tidak selalu disertai penerapan teknologi ramah lingkungan *(Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan RI [KLHK], 2022; Mukono, 2018)*.

Kota-kota besar di Indonesia, seperti Jakarta, Surabaya, Bandung, Medan, dan Makassar, menghadapi tantangan pencemaran udara yang sangat kompleks karena berbagai sumber pencemar dari sektor transportasi, industri, pembakaran biomassa, dan aktivitas domestik berinteraksi

membentuk campuran polutan yang beragam dan dinamis di lapisan atmosfer perkotaan *(Mukono, 2018; Fardiaz, 2019)*. Polutan-polutan utama seperti partikel halus (PM2,5 dan PM10), karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO2), sulfur dioksida (SO2), ozon troposferik (O3), dan senyawa organik volatil (VOC) telah terdeteksi dalam konsentrasi yang kerap melampaui Baku Mutu Udara Ambien Nasional yang ditetapkan dalam Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 *(Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021; KLHK, 2022)*. Pemahaman yang mendalam tentang dinamika, sumber, dampak, serta upaya pengendalian pencemaran udara di kota-kota besar menjadi sangat penting bagi tenaga kesehatan lingkungan, pengambil kebijakan, dan masyarakat luas dalam rangka membangun kota yang sehat dan berkelanjutan *(Soedomo, 2017; Wardhana, 2020; Kementerian Kesehatan RI [Kemenkes RI], 2023)*.

5.1 Sumber dan Jenis Pencemar Udara di Perkotaan

Memahami sumber dan jenis pencemar udara merupakan langkah awal yang fundamental dalam mengelola kualitas udara perkotaan secara efektif *(Soedomo, 2017; Fardiaz, 2019)*. Kota-kota besar pada umumnya memiliki profil sumber emisi yang sangat beragam, mulai dari sektor transportasi yang menyumbang fraksi polutan terbesar, hingga kegiatan industri, pembangkit energi, pengelolaan limbah, dan aktivitas rumah tangga yang secara kolektif membentuk beban pencemaran udara yang harus ditanggung oleh ekosistem perkotaan *(KLHK, 2022; Wardhana, 2020)*. Identifikasi yang tepat terhadap sumber-sumber emisi tersebut menjadi dasar bagi penyusunan inventarisasi emisi, pemodelan dispersi polutan, dan penetapan kebijakan pengendalian yang terukur dan berbasis bukti ilmiah *(Soedomo, 2017; Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021)*.

5.1.1 Sumber Emisi dari Sektor Transportasi

Sektor transportasi merupakan penyumbang terbesar polutan udara di hampir seluruh kota besar di Indonesia *(Mukono, 2018; KLHK, 2022)*. Jutaan kendaraan bermotor yang beroperasi setiap hari menghasilkan gas buang yang mengandung berbagai senyawa berbahaya, termasuk CO, NOx, HC (hidrokarbon), PM2,5, dan PM10 *(Soedomo, 2017; Fardiaz, 2019)*. Jakarta sebagai kota dengan kepadatan lalu lintas tertinggi di Asia Tenggara mencatat kontribusi sektor transportasi mencapai lebih dari 47 persen total emisi udara ambien kota *(KLHK, 2022)*. Tingginya jumlah kendaraan berbahan bakar fosil, ditambah kemacetan yang memperlama waktu idling mesin, menjadi faktor utama yang memperburuk kualitas udara di kawasan perkotaan *(Wardhana, 2020; Mukono, 2018)*.

Jenis kendaraan sangat mempengaruhi karakteristik emisi yang dihasilkan. Kendaraan berbahan bakar bensin cenderung menghasilkan emisi CO dan HC yang lebih tinggi, sementara kendaraan diesel menjadi sumber dominan emisi PM2,5 dan NOx yang sangat berbahaya bagi kesehatan pernapasan *(Fardiaz, 2019; Soedomo, 2017)*. Bus-bus tua dan kendaraan angkutan barang bermesin diesel yang belum memenuhi standar emisi Euro terbaru menjadi titik kritis penghasil partikel hitam (black carbon) dan senyawa organik volatil sekunder yang mudah terbentuk di atmosfer perkotaan *(Wardhana, 2020; KLHK, 2022)*. Kondisi ini diperparah dengan masih banyaknya armada kendaraan tua yang beroperasi tanpa pemeriksaan emisi secara berkala *(Soedomo, 2017)*.

Pola temporal emisi kendaraan mengikuti dinamika pergerakan manusia di kota. Pagi dan sore hari pada jam sibuk (peak hours) merupakan periode dengan

konsentrasi polutan tertinggi, di mana arus kendaraan yang padat pada ruas jalan arteri utama dapat menciptakan hotspot pencemaran yang melampaui ambang batas aman hingga dua hingga tiga kali lipat standar WHO *(WHO, 2021; Mukono, 2018)*. Fenomena inversi termal yang sering terjadi pada pagi hari di kawasan perkotaan memperburuk kondisi ini karena mencegah dispersi vertikal polutan, sehingga konsentrasi zat berbahaya tertahan di lapisan udara dekat permukaan *(Mukono, 2018; Fardiaz, 2019)*. Di kota-kota seperti Bandung yang dikelilingi perbukitan, efek topografi ini menjadi faktor amplifikasi tambahan yang meningkatkan akumulasi polutan di cekungan kota *(Soedomo, 2017)*.

Upaya pengurangan emisi dari sektor transportasi telah mulai diimplementasikan melalui berbagai instrumen kebijakan. Pengetatan standar emisi kendaraan baru melalui regulasi Euro 4 untuk kendaraan bensin menjadi langkah penting yang telah diambil oleh pemerintah Indonesia *(Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021; KLHK, 2022)*. Program uji emisi berkala kendaraan bermotor, pengembangan transportasi massal berbasis listrik, serta pemberian insentif fiskal bagi pembelian kendaraan listrik merupakan intervensi sistemik yang diarahkan untuk mengurangi beban emisi transportasi secara progresif dalam jangka panjang *(KLHK, 2022; Wardhana, 2020)*. Keberhasilan strategi ini sangat bergantung pada komitmen pemerintah daerah dalam mengintegrasikan kebijakan transportasi dan lingkungan hidup secara terpadu di tingkat kota *(Soedomo, 2017; Mukono, 2018)*.

5.1.2 Sumber Emisi dari Sektor Industri

Kegiatan industri merupakan sumber kedua terbesar emisi udara di kawasan perkotaan dan sekitarnya *(KLHK, 2022; Fardiaz, 2019)*. Industri manufaktur, pembangkit listrik berbahan bakar batubara, kilang minyak, industri semen, peleburan logam, dan pabrik kimia melepaskan berbagai polutan primer ke atmosfer, termasuk SO2, NOx, PM, logam berat seperti timbal, merkuri, dan kadmium, serta senyawa organik berbahaya *(Mukono, 2018; Soedomo, 2017)*. Kawasan industri yang berdekatan dengan permukiman, seperti yang terdapat di Cikarang, Cikupa, atau Gresik, menciptakan zona paparan kronis bagi penduduk sekitarnya yang rentan terhadap dampak kesehatan jangka panjang *(Mukono, 2018; Wardhana, 2020)*.

Proses pembakaran bahan bakar fosil dalam skala industri menghasilkan emisi SO2 dalam jumlah yang sangat signifikan, terutama dari industri yang masih menggunakan batubara berkualitas rendah dengan kandungan sulfur tinggi *(Soedomo, 2017; Fardiaz, 2019)*. SO2 yang terlepas ke atmosfer dapat bertransformasi menjadi asam sulfat melalui reaksi fotokimia, berkontribusi pada pembentukan hujan asam yang merusak ekosistem dan infrastruktur kota *(Fardiaz, 2019; Wardhana, 2020)*. Selain itu, proses industri tertentu seperti insinerasi limbah dan produksi semen juga melepaskan senyawa dioksin, furan, dan partikulat respirabel yang sangat berbahaya bahkan dalam konsentrasi rendah *(Soedomo, 2017; KLHK, 2022)*.

Pengendalian emisi industri di Indonesia diatur melalui Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak yang tercantum dalam peraturan perundang-undangan lingkungan hidup *(Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021)*. Industri diwajibkan memasang alat pengendalian

polusi udara seperti electrostatic precipitator, baghouse filter, scrubber basah, dan sistem selektif katalitik reduksi untuk meminimalkan emisi pencemar udara sebelum dilepaskan ke atmosfer *(Soedomo, 2017; KLHK, 2022)*. Namun pengawasan kepatuhan terhadap regulasi ini masih menjadi tantangan besar, terutama bagi usaha industri skala menengah dan kecil yang memiliki keterbatasan kapasitas teknis dan finansial untuk menerapkan teknologi pengendalian emisi yang memadai *(Wardhana, 2020; Fardiaz, 2019)*.

Transformasi menuju industri hijau menjadi agenda yang semakin mendesak dalam konteks pengurangan pencemaran udara perkotaan *(Wardhana, 2020; KLHK, 2022)*. Program eco-industrial park, penerapan teknologi bersih dalam proses produksi, efisiensi energi, dan transisi ke sumber energi terbarukan merupakan strategi jangka panjang yang tidak hanya mengurangi emisi udara tetapi juga meningkatkan daya saing industri *(KLHK, 2022)*. Insentif ekonomi berupa pajak karbon, skema perdagangan emisi, dan subsidi teknologi hijau menjadi instrumen kebijakan yang semakin banyak dipertimbangkan pemerintah dalam mendorong transformasi sektor industri menuju standar lingkungan yang lebih tinggi *(Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021; Soedomo, 2017)*.

5.1.3 Sumber Emisi dari Pembakaran Biomassa dan Aktivitas Domestik

Pembakaran biomassa, meliputi pembakaran sampah rumah tangga, pembakaran lahan pertanian, dan penggunaan kayu bakar untuk memasak, merupakan sumber emisi yang sering diabaikan namun memberikan kontribusi tidak kecil terhadap pencemaran udara perkotaan dan periurban *(Mukono, 2018; KLHK, 2022)*. Di kota-kota seperti Palembang, Pekanbaru, dan Pontianak,

kebakaran lahan gambut yang terjadi hampir setiap musim kemarau menghasilkan asap tebal yang mengandung PM2,5, CO, dan senyawa organik berbahaya dalam konsentrasi yang jauh melampaui ambang batas kesehatan *(KLHK, 2022; WHO, 2021)*. Menurut Global Burden of Disease Study 2019, paparan polutan dari pembakaran bahan bakar padat dalam rumah tangga berkontribusi terhadap lebih dari dua juta kematian setiap tahun secara global *(WHO, 2021; Kemenkes RI, 2023)*.

Aktivitas domestik seperti penggunaan kompor berbahan bakar minyak tanah atau kayu dan penggunaan produk rumah tangga yang mengandung VOC juga berkontribusi terhadap kualitas udara dalam ruangan maupun udara ambien sekitarnya *(Fardiaz, 2019; Mukono, 2018)*. Penelitian menunjukkan bahwa paparan polutan udara dalam ruangan dari pembakaran bahan bakar padat untuk memasak menjadi salah satu penyebab utama penyakit pernapasan kronis, terutama pada perempuan dan anak-anak yang lebih banyak menghabiskan waktu di dalam rumah di kawasan permukiman padat perkotaan *(WHO, 2021; Kemenkes RI, 2023)*. Polutan dalam ruangan seperti NO2, CO, dan PM2,5 dari kompor biomassa dapat mencapai konsentrasi yang beberapa kali lebih tinggi daripada di udara luar ruangan yang sudah tercemar *(Mukono, 2018; Fardiaz, 2019)*.

Praktik pembakaran sampah terbuka yang masih umum dilakukan di lingkungan permukiman, pasar tradisional, dan tempat pembuangan akhir menghasilkan campuran polutan yang sangat berbahaya *(Wardhana, 2020; Soedomo, 2017)*. Pembakaran sampah yang tidak terkontrol pada suhu rendah menghasilkan dioksin, furan, polisiklik aromatik hidrokarbon (PAH), dan berbagai logam berat yang bersifat karsinogenik

(Soedomo, 2017; Fardiaz, 2019). Kondisi ini menjadi perhatian serius karena aktivitas pembakaran sampah seringkali terjadi di area terbuka yang berdekatan dengan kawasan perumahan dan sekolah, meningkatkan risiko paparan langsung bagi kelompok populasi rentan *(Wardhana, 2020; Mukono, 2018)*.

Program penggantian kompor biomassa dengan kompor LPG atau kompor listrik, pengelolaan sampah berbasis reduce-reuse-recycle (3R), dan pembangunan fasilitas pengolahan sampah modern merupakan intervensi yang terbukti efektif dalam mengurangi emisi dari sektor domestik *(KLHK, 2022; Kemenkes RI, 2023)*. Di sisi lain, edukasi masyarakat tentang bahaya pembakaran sampah terbuka dan pemberdayaan bank sampah di tingkat kelurahan menjadi pendekatan berbasis komunitas yang semakin banyak diterapkan di berbagai kota Indonesia sebagai strategi komplementer dalam pengendalian pencemaran udara dari sumber emisi domestik *(KLHK, 2022; WHO, 2021)*.

5.1.4 Polutan Primer dan Polutan Sekunder

Pemahaman tentang perbedaan antara polutan primer dan polutan sekunder sangat penting dalam analisis kualitas udara perkotaan *(Fardiaz, 2019; Soedomo, 2017)*. Polutan primer adalah zat pencemar yang langsung diemisikan dari sumbernya ke atmosfer dalam bentuk berbahaya, seperti CO, SO2, NO, PM10, dan VOC *(Fardiaz, 2019; Wardhana, 2020)*. Polutan-polutan ini dapat langsung memberikan dampak negatif bagi kesehatan manusia dan lingkungan setelah dilepaskan ke udara. Karakteristik polutan primer ditentukan oleh komposisi bahan bakar yang digunakan, teknologi pembakaran, dan kondisi operasional sumber emisi yang bersangkutan *(Soedomo, 2017; Mukono, 2018)*.

Polutan sekunder terbentuk melalui reaksi kimia dan fotokimia yang terjadi di atmosfer antara polutan primer dengan komponen atmosfer lainnya *(Fardiaz, 2019; Soedomo, 2017)*. Ozon troposferik (O3) merupakan contoh polutan sekunder yang paling dikenal, terbentuk dari reaksi antara NOx dan VOC di bawah pengaruh radiasi ultraviolet matahari pada kondisi meteorologi tertentu *(WHO, 2021; Mukono, 2018)*. Partikel halus sekunder (secondary organic aerosol atau SOA) juga terbentuk melalui mekanisme serupa dan berkontribusi signifikan terhadap total massa PM2,5 di atmosfer perkotaan, terutama pada musim kemarau dengan intensitas radiasi matahari yang tinggi *(Soedomo, 2017; KLHK, 2022)*.

Kompleksitas hubungan antara polutan primer dan sekunder menjadikan pemodelan kualitas udara perkotaan sebagai tantangan ilmiah yang cukup rumit *(Soedomo, 2017; WHO, 2021)*. Pengurangan emisi satu polutan primer belum tentu secara linear menurunkan konsentrasi polutan sekunder yang terkait, karena proses pembentukan polutan sekunder melibatkan interaksi non-linear antara berbagai prekursor *(WHO, 2021; Fardiaz, 2019)*. Misalnya, dalam kondisi tertentu pengurangan emisi NOx justru dapat meningkatkan konsentrasi ozon troposferik karena NOx juga berperan sebagai penghancur ozon melalui reaksi kimia tertentu di atmosfer perkotaan *(Soedomo, 2017; Mukono, 2018)*. Pemahaman mendalam tentang kimia atmosfer perkotaan sangat diperlukan untuk merancang kebijakan pengendalian emisi yang benar-benar efektif *(Fardiaz, 2019)*.

Pemantauan kualitas udara yang komprehensif, baik untuk polutan primer maupun sekunder, merupakan fondasi bagi pengelolaan kualitas udara berbasis bukti *(KLHK, 2022; WHO, 2021)*. Jaringan

stasiun pemantauan kualitas udara ambien yang tersebar di berbagai titik strategis kota, dilengkapi dengan instrumen analitik yang mampu mengukur polutan dalam konsentrasi sangat rendah, menjadi infrastruktur data yang esensial *(Soedomo, 2017; KLHK, 2022)*. Di Indonesia, Sistem Pemantauan Kualitas Udara (SPKU) yang dikelola oleh KLHK dan dinas lingkungan hidup daerah terus dikembangkan untuk memperluas cakupan pemantauan dan meningkatkan akurasi data yang dapat diakses secara real-time oleh masyarakat dan pengambil kebijakan *(KLHK, 2022; Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021)*.

5.2 Dampak Pencemaran Udara Terhadap Kesehatan Masyarakat

Dampak pencemaran udara terhadap kesehatan masyarakat merupakan aspek yang paling kritis dan mendapat perhatian terbesar dari komunitas ilmiah internasional maupun pengambil kebijakan kesehatan *(WHO, 2021; Kemenkes RI, 2023)*. Spektrum dampak kesehatan yang ditimbulkan oleh paparan polutan udara sangat luas, mulai dari iritasi saluran pernapasan atas yang bersifat akut dan reversibel, hingga penyakit kronis degeneratif seperti penyakit paru obstruktif kronik (PPOK), penyakit kardiovaskular, dan kanker paru yang mengancam jiwa *(Mukono, 2018; Fardiaz, 2019)*. Beban penyakit akibat pencemaran udara tidak terdistribusi secara merata dalam populasi; kelompok rentan seperti anak-anak, lansia, ibu hamil, dan penderita penyakit kronis menanggung beban yang jauh lebih berat dibandingkan populasi umum, menciptakan dimensi keadilan kesehatan lingkungan yang penting untuk diperhatikan *(WHO, 2021; Kemenkes RI, 2023; Mukono, 2018)*.

5.2.1 Dampak pada Sistem Pernapasan

Sistem pernapasan merupakan pintu masuk utama polutan udara ke dalam tubuh manusia, menjadikannya organ yang paling langsung terdampak oleh pencemaran udara *(Mukono, 2018; Fardiaz, 2019)*. Partikel PM2,5 yang terhirup dapat menembus saluran pernapasan hingga ke alveoli paru karena ukurannya yang sangat kecil, menyebabkan respons inflamasi lokal yang dapat berlanjut menjadi penyakit kronis bila paparan terjadi secara berulang dan berkepanjangan *(WHO, 2021; Mukono, 2018)*. Penelitian epidemiologi longitudinal telah secara konsisten menunjukkan bahwa paparan PM2,5 dalam jangka panjang berkorelasi signifikan dengan penurunan fungsi paru yang diukur melalui kapasitas vital paksa (FVC) dan volume ekspirasi paksa dalam satu detik (FEV1) *(WHO, 2021; Fardiaz, 2019; Kemenkes RI, 2023)*.

Asma merupakan salah satu kondisi pernapasan yang paling sensitif terhadap kualitas udara ambien *(Mukono, 2018; WHO, 2021)*. Paparan terhadap polutan seperti ozon troposferik, NO2, SO2, dan partikulat dapat memicu eksaserbasi asma akut pada penderita yang sudah terdiagnosis, serta diduga berkontribusi pada peningkatan kejadian asma baru terutama pada anak-anak yang tinggal di kawasan dengan kualitas udara buruk *(Fardiaz, 2019; KLHK, 2022)*. Data dari berbagai penelitian di kota-kota besar Indonesia menunjukkan bahwa angka kejadian dan keparahan asma pada anak-anak usia sekolah berkorelasi positif dengan tingkat paparan PM2,5 dan ozon di lingkungan tempat tinggal mereka *(Kemenkes RI, 2023; Mukono, 2018; KLHK, 2022)*.

Penyakit Paru Obstruktif Kronik (PPOK) yang mencakup bronkitis kronis dan emfisema merupakan konsekuensi kesehatan jangka panjang yang paling

serius dari paparan kronis terhadap polutan udara *(Mukono, 2018; Kemenkes RI, 2023)*. Paparan berkepanjangan terhadap partikel halus dan gas-gas iritan menyebabkan inflamasi kronis pada saluran napas, kerusakan jaringan paru yang bersifat ireversibel, dan penurunan kapasitas pernapasan yang progresif *(Fardiaz, 2019; WHO, 2021)*. Di Indonesia, PPOK menjadi penyebab kematian keempat terbesar, dan beban penyakit ini diperkirakan akan terus meningkat seiring dengan berlanjutnya pertumbuhan kota dan pencemaran udara yang menyertainya *(Kemenkes RI, 2023; KLHK, 2022)*.

Infeksi saluran pernapasan akut (ISPA), terutama pada anak-anak balita, memiliki hubungan yang erat dengan kualitas udara lingkungan *(Kemenkes RI, 2023; WHO, 2021)*. Polutan udara melemahkan mekanisme pertahanan mukosiliaris saluran napas dan mengganggu fungsi imunitas paru, meningkatkan kerentanan terhadap infeksi bakteri dan virus patogen *(Mukono, 2018; Fardiaz, 2019)*. ISPA secara konsisten tercatat sebagai penyakit dengan angka kunjungan Puskesmas tertinggi di Indonesia, dan bukti epidemiologi menunjukkan peningkatan kasus yang signifikan pada periode musim kemarau ketika konsentrasi polutan udara mencapai puncaknya *(Kemenkes RI, 2023; KLHK, 2022)*. Pencegahan ISPA melalui pengendalian kualitas udara menjadi salah satu strategi kesehatan masyarakat yang paling cost-effective *(WHO, 2021)*.

5.2.2 Dampak pada Sistem Kardiovaskular

Selain sistem pernapasan, sistem kardiovaskular merupakan organ target kedua yang paling rentan terhadap dampak pencemaran udara *(WHO, 2021; Mukono, 2018)*. Penelitian epidemiologi skala besar dalam beberapa dekade terakhir telah mengungkap

hubungan kausal yang kuat antara paparan PM2,5 jangka panjang dengan peningkatan risiko penyakit jantung koroner, stroke iskemik, gagal jantung, dan aritmia *(WHO, 2021; Fardiaz, 2019)*. Mekanisme patofisiologis yang mendasari hubungan ini mencakup induksi inflamasi sistemik, stres oksidatif, disfungsi endotel vaskular, peningkatan viskositas darah, dan percepatan proses aterosklerosis yang merupakan akar dari berbagai penyakit kardiovaskular *(WHO, 2021; Mukono, 2018; Kemenkes RI, 2023)*.

Paparan akut terhadap polutan udara, terutama pada konsentrasi tinggi seperti yang terjadi selama episode asap kebakaran lahan atau pada hari-hari dengan kualitas udara sangat buruk, dapat memicu kejadian kardiovaskular akut seperti serangan jantung dan stroke *(WHO, 2021; KLHK, 2022)*. Studi berbasis data rumah sakit dari Jakarta dan Surabaya menunjukkan peningkatan angka rawat inap akibat penyakit kardiovaskular yang berkorelasi dengan lonjakan konsentrasi PM2,5 pada hari-hari sebelumnya, memberikan bukti epidemiologi yang kuat tentang hubungan dosis-respons antara paparan polutan udara akut dan risiko kejadian kardiovaskular *(Fardiaz, 2019; KLHK, 2022; Mukono, 2018)*.

Kelompok lansia dan individu dengan faktor risiko kardiovaskular yang sudah ada sebelumnya, seperti hipertensi, diabetes, dislipidemia, atau riwayat penyakit jantung, memiliki kerentanan yang jauh lebih tinggi terhadap dampak kardiovaskular dari pencemaran udara *(Kemenkes RI, 2023; WHO, 2021)*. Penelitian menunjukkan bahwa pada kelompok populasi ini, peningkatan konsentrasi PM2,5 sebesar 10 $\mu g/m^3$ sudah cukup untuk meningkatkan risiko kematian kardiovaskular secara signifikan secara statistik *(WHO, 2021)*. Ini menegaskan pentingnya sistem peringatan

dini kualitas udara yang terintegrasi dengan sistem kesehatan agar kelompok rentan dapat mengambil tindakan protektif pada hari-hari dengan kualitas udara buruk *(Kemenkes RI, 2023; KLHK, 2022)*.

Dampak pencemaran udara terhadap sistem kardiovaskular tidak terbatas pada usia dewasa dan lansia. Bukti terkini menunjukkan bahwa paparan polutan udara selama kehamilan berkaitan dengan peningkatan risiko hipertensi gestasional, preeklampsia, dan gangguan perkembangan kardiovaskular janin yang dapat bermanifestasi sebagai penyakit jantung bawaan *(WHO, 2021; Kemenkes RI, 2023)*. Gangguan pertumbuhan intrauterin akibat paparan polutan udara dapat meningkatkan risiko penyakit kronis pada anak tersebut ketika dewasa, menambah dimensi beban penyakit jangka panjang dari pencemaran udara *(WHO, 2021; Mukono, 2018)*. Perspektif siklus hidup (life-course) dalam memahami dampak pencemaran udara pada kesehatan kardiovaskular ini menegaskan perlunya perlindungan kualitas udara bagi kesehatan generasi yang akan datang *(Fardiaz, 2019; KLHK, 2022)*.

5.2.3 Dampak pada Kesehatan Anak dan Kelompok Rentan

Anak-anak merupakan kelompok yang paling rentan terhadap dampak pencemaran udara karena beberapa alasan fisiologis yang khas *(WHO, 2021; Mukono, 2018)*. Sistem pernapasan dan sistem saraf anak masih dalam tahap perkembangan aktif, sehingga paparan polutan pada masa kritis ini dapat mengakibatkan gangguan perkembangan yang bersifat permanen *(WHO, 2021; Kemenkes RI, 2023)*. Laju pernapasan anak yang lebih tinggi dibandingkan orang dewasa menyebabkan mereka menghirup lebih banyak polutan per unit berat badan, dan kebiasaan beraktivitas

di luar ruangan secara lebih intensif meningkatkan dosis polutan yang terhirup *(Mukono, 2018; Fardiaz, 2019)*. Kerentanan biologis ini menjadikan kualitas udara di sekitar sekolah dan kawasan bermain anak sebagai indikator kesehatan lingkungan yang sangat penting untuk dipantau secara berkala *(WHO, 2021; KLHK, 2022)*.

Dampak paparan polutan udara pada perkembangan otak anak telah menjadi topik penelitian yang semakin intensif dalam satu dekade terakhir *(WHO, 2021; Fardiaz, 2019)*. PM2,5 dan logam berat seperti timbal (Pb) yang terkandung dalam polutan udara dapat menembus sawar darah-otak, mengganggu perkembangan saraf, dan berkaitan dengan penurunan fungsi kognitif serta gangguan perhatian *(Mukono, 2018; WHO, 2021)*. Selain itu, paparan polutan udara sejak dalam kandungan atau pada masa bayi awal dikaitkan dengan peningkatan risiko gangguan spektrum autisme berdasarkan serangkaian studi epidemiologi prospektif di berbagai negara *(WHO, 2021; Kemenkes RI, 2023)*. Penelitian di Jakarta menunjukkan korelasi antara kadar timbal darah pada anak-anak dengan penurunan skor IQ, meskipun penggunaan bensin bertimbal telah dihentikan sejak tahun 2006 *(Fardiaz, 2019; KLHK, 2022)*.

Ibu hamil merupakan kelompok rentan lainnya yang mendapat perhatian serius dalam epidemiologi pencemaran udara *(WHO, 2021; Kemenkes RI, 2023)*. Paparan PM2,5 dan polutan lain selama kehamilan dikaitkan dengan peningkatan risiko bayi lahir prematur, berat badan lahir rendah, dan keguguran spontan berdasarkan berbagai studi kohort prospektif skala besar *(WHO, 2021; Fardiaz, 2019)*. Plasenta yang berfungsi sebagai penghalang antara sirkulasi ibu dan janin ternyata tidak mampu memblokir semua polutan udara, sehingga beberapa senyawa berbahaya dapat

langsung mempengaruhi perkembangan janin *(Mukono, 2018; WHO, 2021)*. Gangguan pertumbuhan intrauterin akibat paparan polutan udara menambah beban penyakit jangka panjang yang ditanggung oleh generasi mendatang *(Kemenkes RI, 2023)*.

Lansia dan individu dengan penyakit kronis merupakan kelompok rentan tambahan yang memerlukan perhatian khusus dalam strategi perlindungan kesehatan dari dampak pencemaran udara *(Mukono, 2018; WHO, 2021)*. Penurunan kapasitas kompensasi fisiologis pada lansia, dikombinasikan dengan sistem imun yang melemah dan adanya penyakit penyerta, membuat mereka jauh lebih sensitif terhadap fluktuasi kualitas udara harian *(WHO, 2021; Kemenkes RI, 2023)*. Program kesehatan masyarakat yang responsif terhadap kualitas udara perlu mengembangkan mekanisme notifikasi dan pedoman perilaku spesifik bagi kelompok rentan, termasuk rekomendasi untuk mengurangi aktivitas outdoor pada hari-hari dengan indeks kualitas udara yang buruk *(KLHK, 2022; Kemenkes RI, 2023)*.

5.2.4 Dampak Jangka Panjang dan Beban Penyakit

Beban penyakit akibat pencemaran udara di kota-kota besar Indonesia bersifat multidimensi dan berdampak besar pada sistem kesehatan nasional *(Kemenkes RI, 2023; WHO, 2021)*. Ukuran beban penyakit yang komprehensif seperti Disability-Adjusted Life Years (DALYs) menggambarkan jumlah tahun hidup sehat yang hilang akibat kematian dini maupun kecacatan yang disebabkan oleh paparan polutan udara *(WHO, 2021)*. Berdasarkan data Global Burden of Disease 2019, pencemaran udara ambien dan dalam ruangan secara bersama-sama berkontribusi terhadap lebih dari 160.000 kematian dini di Indonesia setiap tahunnya,

menjadikannya faktor risiko lingkungan dengan beban kesehatan tertinggi di negeri ini *(WHO, 2021; Kemenkes RI, 2023)*.

Dampak ekonomi dari pencemaran udara terhadap sistem kesehatan sangat substansial *(Wardhana, 2020; KLHK, 2022)*. Biaya langsung yang mencakup pengeluaran untuk rawat inap, rawat jalan, obat-obatan, dan rehabilitasi pasien penyakit berbasis pencemaran udara, serta biaya tidak langsung berupa hilangnya produktivitas kerja dan penurunan prestasi akademik anak-anak, secara kolektif membebani perekonomian nasional dalam skala yang sangat signifikan *(KLHK, 2022; Wardhana, 2020)*. Studi ekonomi lingkungan memperkirakan kerugian ekonomi akibat pencemaran udara di Indonesia dapat mencapai triliunan rupiah per tahun, angka yang jauh melampaui biaya investasi yang dibutuhkan untuk mengimplementasikan teknologi dan kebijakan pengendalian pencemaran yang efektif *(KLHK, 2022; Soedomo, 2017)*.

Kanker paru merupakan dampak jangka panjang yang paling mengancam dari paparan kronis polutan udara, khususnya PM2,5, polisiklik aromatik hidrokarbon (PAH), benzena, formaldehida, dan senyawa organik volatil lainnya yang bersifat karsinogenik *(WHO, 2021; Mukono, 2018)*. International Agency for Research on Cancer (IARC) telah mengklasifikasikan polutan udara ambien sebagai karsinogen Grup 1 bagi manusia berdasarkan bukti epidemiologi yang kuat *(WHO, 2021)*. Di Indonesia, tren peningkatan kejadian kanker paru yang tercatat dalam beberapa dekade terakhir tidak dapat sepenuhnya dijelaskan oleh faktor merokok semata, mengisyaratkan peran pencemaran udara sebagai faktor risiko independen yang semakin signifikan *(Kemenkes RI, 2023; Mukono, 2018; Fardiaz, 2019)*.

Dampak neurologi jangka panjang dari paparan polutan udara kronis mulai mendapat perhatian ilmiah yang semakin besar *(WHO, 2021; Mukono, 2018)*. Penelitian terbaru menunjukkan asosiasi antara paparan PM2,5 jangka panjang dengan peningkatan risiko penyakit neurodegeneratif seperti demensia, Parkinson, dan Alzheimer pada populasi lanjut usia *(WHO, 2021; Fardiaz, 2019)*. Mekanisme yang diusulkan mencakup neuroinflammasi kronis akibat partikel ultrafine yang mampu mencapai otak melalui jalur saraf olfaktorius atau sawar darah-otak yang permeabel *(Mukono, 2018; WHO, 2021)*. Temuan-temuan ini memperluas cakupan dampak kesehatan pencemaran udara melampaui penyakit pernapasan dan kardiovaskular, menegaskan perlunya pendekatan lintas sektor dalam penanganan pencemaran udara sebagai isu kesehatan masyarakat yang fundamental *(WHO, 2021; KLHK, 2022; Kemenkes RI, 2023)*.

5.3 Pemantauan dan Pengukuran Kualitas Udara Perkotaan

Pemantauan kualitas udara yang sistematis dan berkelanjutan merupakan pilar utama dalam pengelolaan pencemaran udara perkotaan yang berbasis bukti ilmiah *(KLHK, 2022; WHO, 2021)*. Tanpa data kualitas udara yang akurat, representatif, dan mudah diakses, tidak mungkin dilakukan penilaian risiko kesehatan yang tepat, evaluasi efektivitas kebijakan pengendalian emisi, maupun penyampaian informasi yang tepat waktu kepada masyarakat tentang kualitas udara yang mereka hirup setiap hari *(Soedomo, 2017; KLHK, 2022)*. Sistem pemantauan kualitas udara yang modern harus mampu mengukur berbagai polutan dalam berbagai skala spasial dan temporal, mengintegrasikan data dari berbagai sumber, dan

menyajikan informasi tersebut dalam format yang mudah dipahami oleh berbagai kalangan, dari pengambil kebijakan hingga masyarakat awam *(WHO, 2021; Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021)*.

5.3.1 Metode dan Instrumen Pemantauan Kualitas Udara

Pemantauan kualitas udara dapat dilakukan melalui berbagai metode yang berbeda dalam hal akurasi, biaya, portabilitas, dan kemampuan pengukuran parameter yang berbeda *(Soedomo, 2017; KLHK, 2022)*. Metode pemantauan konvensional menggunakan stasiun pemantauan tetap (fixed monitoring station) yang dilengkapi dengan instrumen analitik berkinerja tinggi seperti penganalisis SO2 berbasis ultraviolet fluoresen, penganalisis NO/NO2 berbasis kemiluminesen, penganalisis CO berbasis inframerah non-dispersif, dan fotometer partikel untuk pengukuran PM2,5 dan PM10 *(Soedomo, 2017; Fardiaz, 2019)*. Instrumen-instrumen ini memberikan data dengan akurasi dan presisi tinggi, namun memiliki biaya pengadaan dan operasional yang sangat besar serta memerlukan tenaga teknis terlatih untuk pengoperasian dan pemeliharaannya *(KLHK, 2022; Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021)*.

Sensor kualitas udara berbiaya rendah (low-cost sensor atau LCS) telah mengalami perkembangan teknologi yang pesat dalam dekade terakhir dan menawarkan alternatif pemantauan yang lebih terjangkau dengan kemampuan penyebaran jaringan yang jauh lebih luas *(WHO, 2021; KLHK, 2022)*. Sensor elektrokimia untuk gas-gas seperti CO, NO2, dan O3, serta sensor optis berbasis penghamburan cahaya untuk pengukuran partikel, kini tersedia dengan harga yang terjangkau dan dapat diintegrasikan dalam jaringan pemantauan berbasis Internet of Things (IoT) yang memberikan data kualitas udara secara real-time dari

banyak titik pengukuran secara bersamaan *(WHO, 2021; KLHK, 2022)*. Keterbatasan utama LCS adalah akurasi yang lebih rendah dan kerentanan terhadap gangguan kondisi lingkungan seperti kelembaban dan suhu, yang memerlukan prosedur kalibrasi dan koreksi data yang cermat *(Mukono, 2018; Soedomo, 2017)*.

Pemantauan kualitas udara dari platform penginderaan jauh menggunakan satelit atau pesawat nirawak (drone) menawarkan kemampuan pemantauan skala luas yang tidak dapat dicapai oleh jaringan stasiun darat *(KLHK, 2022; WHO, 2021)*. Satelit seperti Sentinel-5P dari Badan Antariksa Eropa (ESA) mampu memetakan distribusi spasial NO2, SO2, CO, dan aerosol optis di seluruh permukaan bumi dengan resolusi spasial yang semakin meningkat *(KLHK, 2022)*. Data satelit ini sangat berguna untuk memantau sumber emisi skala besar, mengidentifikasi hotspot pencemaran, dan memvalidasi model dispersi polutan udara, meskipun tidak dapat menggantikan pengukuran in-situ di tingkat permukaan yang diperlukan untuk penilaian paparan manusia yang akurat *(Fardiaz, 2019; WHO, 2021)*.

Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) merupakan alat komunikasi yang digunakan di Indonesia untuk menyajikan kondisi kualitas udara harian kepada masyarakat dalam skala yang mudah dipahami tanpa memerlukan pengetahuan teknis tentang satuan konsentrasi polutan *(KLHK, 2022; Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021)*. ISPU dihitung berdasarkan konsentrasi lima polutan utama yaitu PM10, PM2,5, SO2, CO, NO2, dan O3, dan dinyatakan dalam skala numerik 0-500 yang dibagi menjadi kategori Baik, Sedang, Tidak Sehat, Sangat Tidak Sehat, dan Berbahaya *(Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021)*. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.14/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2020 mengatur

metodologi perhitungan dan tata cara pelaporan ISPU di Indonesia *(KLHK, 2022; Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021)*.

5.3.2 Jaringan Pemantauan Kualitas Udara di Indonesia

Infrastruktur pemantauan kualitas udara di Indonesia dikelola oleh beberapa instansi pemerintah dengan tingkatan yang berbeda *(KLHK, 2022; Soedomo, 2017)*. Di tingkat nasional, KLHK melalui Direktorat Pengendalian Pencemaran Udara mengelola Sistem Pemantauan Kualitas Udara Ambien (SPKUA) yang terdiri dari stasiun pemantauan udara ambien (SPUA) di berbagai kota besar *(KLHK, 2022)*. Dinas Lingkungan Hidup Daerah (DLHD) di tingkat provinsi dan kabupaten/kota juga mengelola sejumlah stasiun pemantauan, meskipun kapasitas dan kualitas data yang dihasilkan sangat bervariasi antar daerah bergantung pada kapasitas fiskal dan teknis masing-masing pemerintah daerah *(KLHK, 2022; Soedomo, 2017)*.

Kota Jakarta memiliki jaringan pemantauan kualitas udara paling komprehensif di Indonesia, dengan stasiun-stasiun yang ditempatkan di berbagai lokasi representatif mencakup kawasan perumahan, komersial, dan industri *(KLHK, 2022; Mukono, 2018)*. Data dari jaringan pemantauan Jakarta dapat diakses secara real-time melalui portal daring resmi pemerintah DKI Jakarta, memungkinkan masyarakat untuk memantau kondisi kualitas udara di lokasi terdekat mereka *(KLHK, 2022)*. Namun demikian, sebagian besar kota besar dan menengah di luar Jawa masih mengalami defisit infrastruktur pemantauan yang signifikan, dengan banyak daerah yang belum memiliki satu pun stasiun pemantauan kualitas udara yang beroperasi secara rutin *(KLHK, 2022; Soedomo, 2017)*.

Pengembangan jaringan pemantauan kualitas udara berbasis partisipasi komunitas (citizen science) melalui sensor berbiaya rendah yang ditempatkan di rumah-rumah warga, sekolah, dan gedung perkantoran merupakan pendekatan inovatif yang mulai berkembang di beberapa kota Indonesia *(WHO, 2021; KLHK, 2022)*. Inisiatif jaringan sensor komunitas memungkinkan pengumpulan data kualitas udara dengan densitas spasial yang jauh lebih tinggi dari yang dapat dicapai oleh jaringan stasiun resmi pemerintah, meskipun memerlukan protokol jaminan kualitas data yang ketat untuk memastikan keterbandingan dan keandalan data yang dikumpulkan *(Fardiaz, 2019; WHO, 2021)*. Kombinasi data dari jaringan resmi dan jaringan komunitas memberikan gambaran yang lebih komprehensif tentang distribusi spasial polutan udara di tingkat lingkungan perumahan *(KLHK, 2022)*.

Integrasi data dari berbagai sumber pemantauan melalui platform data terpadu merupakan arah pengembangan sistem pemantauan kualitas udara masa depan yang semakin relevan *(KLHK, 2022; WHO, 2021)*. Platform terintegrasi semacam ini memungkinkan analisis data secara komprehensif, validasi silang antar sumber data, dan pengembangan model prediksi kualitas udara yang lebih akurat berbasis kecerdasan buatan (artificial intelligence) dan pembelajaran mesin (machine learning) *(WHO, 2021)*. Pengembangan sistem informasi kualitas udara yang komprehensif, terbuka, dan mudah diakses publik merupakan investasi infrastruktur data yang esensial dalam mewujudkan tata kelola kualitas udara perkotaan yang transparan dan akuntabel *(KLHK, 2022; Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021)*.

5.3.3 Baku Mutu Udara Ambien dan Standar Kesehatan

Baku mutu udara ambien merupakan standar konsentrasi polutan udara yang ditetapkan secara regulasi untuk melindungi kesehatan masyarakat dan ekosistem dari dampak negatif pencemaran udara *(Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021; KLHK, 2022)*. Di Indonesia, baku mutu udara ambien nasional ditetapkan dalam Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, yang menggantikan regulasi sebelumnya dengan standar yang lebih ketat dan sejalan dengan perkembangan ilmu pengetahuan tentang dampak kesehatan polutan udara *(Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021)*. PP No. 22 Tahun 2021 menetapkan konsentrasi maksimum untuk berbagai polutan dalam berbagai periode pengukuran, mulai dari rata-rata satu jam hingga rata-rata tahunan, sebagai acuan dalam penilaian kepatuhan kualitas udara di seluruh wilayah Indonesia *(Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021; KLHK, 2022)*.

Standar kualitas udara WHO yang diperbarui pada tahun 2021 menetapkan nilai panduan yang secara umum jauh lebih ketat daripada baku mutu nasional Indonesia *(WHO, 2021; KLHK, 2022)*. Sebagai contoh, WHO merekomendasikan konsentrasi PM2,5 rata-rata tahunan tidak lebih dari 5 $\mu g/m^3$, sementara baku mutu nasional Indonesia menetapkan angka 15 $\mu g/m^3$ *(WHO, 2021; Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021)*. Kesenjangan ini mencerminkan pertimbangan praktis dan kapasitas pengendalian emisi yang berbeda antara negara berkembang dan negara maju, namun juga menunjukkan bahwa meskipun memenuhi baku mutu nasional, udara di kota-kota besar Indonesia masih berada pada tingkat yang berpotensi membahayakan

kesehatan menurut standar ilmiah internasional terkini *(WHO, 2021; KLHK, 2022)*.

Penetapan baku mutu udara ambien merupakan proses ilmiah dan kebijakan yang kompleks yang mempertimbangkan berbagai faktor secara bersamaan *(Soedomo, 2017; Wardhana, 2020)*. Dari sisi ilmiah, baku mutu diturunkan dari studi dosis-respons epidemiologi yang mengidentifikasi konsentrasi polutan yang tidak menyebabkan efek kesehatan yang dapat diukur pada populasi yang paling sensitif *(WHO, 2021; Fardiaz, 2019)*. Dari sisi kebijakan, baku mutu juga mempertimbangkan keterbatasan teknologi pengendalian emisi yang tersedia, dampak ekonomi dari pengetatan standar terhadap industri dan masyarakat, serta konteks sosial-politik yang melatarbelakangi proses perumusan regulasi lingkungan di masing-masing negara *(Soedomo, 2017; Wardhana, 2020; Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021)*.

Evaluasi kepatuhan terhadap baku mutu udara ambien di kota-kota besar Indonesia menunjukkan gambaran yang memprihatinkan *(KLHK, 2022; Kemenkes RI, 2023)*. Data pemantauan dari berbagai stasiun di kota-kota besar seperti Jakarta, Surabaya, dan Bandung secara konsisten menunjukkan pelampauan baku mutu PM2,5, PM10, dan ozon troposferik dalam frekuensi yang tinggi, terutama pada musim kemarau *(KLHK, 2022; Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021)*. Kondisi ini mengindikasikan bahwa upaya pengendalian pencemaran udara yang ada saat ini masih belum memadai untuk membawa kualitas udara kota-kota besar Indonesia ke tingkat yang aman bagi kesehatan masyarakat, dan diperlukan percepatan implementasi berbagai kebijakan dan teknologi pengendalian emisi yang lebih komprehensif *(KLHK, 2022; Kemenkes RI, 2023)*.

5.3.4 Pemodelan Kualitas Udara dan Penilaian Risiko

Pemodelan kualitas udara merupakan alat ilmiah yang sangat penting dalam pengelolaan pencemaran udara perkotaan karena mampu memberikan informasi tentang distribusi spasial polutan, mengevaluasi skenario kebijakan pengendalian emisi sebelum diimplementasikan, dan memprediksi kualitas udara di masa mendatang *(Soedomo, 2017; KLHK, 2022)*. Model dispersi polutan udara mensimulasikan pergerakan dan transformasi kimia polutan di atmosfer berdasarkan data emisi dari berbagai sumber, kondisi meteorologi, dan karakteristik topografi kawasan yang dimodelkan *(Soedomo, 2017; Fardiaz, 2019)*. Model-model seperti AERMOD, CALPUFF, WRF-Chem, dan CMAQ telah banyak digunakan dalam studi kualitas udara di kota-kota besar Indonesia dan menjadi acuan ilmiah dalam penyusunan dokumen Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL) untuk proyek-proyek industri berskala besar *(KLHK, 2022; Soedomo, 2017)*.

Penilaian risiko kesehatan akibat pencemaran udara merupakan proses sistematis untuk mengestimasi besarnya dampak kesehatan yang ditimbulkan oleh paparan polutan udara pada suatu populasi *(Mukono, 2018; WHO, 2021)*. Proses ini mencakup empat tahapan utama: identifikasi bahaya (*hazard identification)* untuk menentukan sifat toksikologi polutan, penilaian hubungan dosis-respons (*dose-response assessment*) untuk mengkuantifikasi risiko pada berbagai tingkat paparan, penilaian paparan *(exposure assessment*) untuk mengestimasi konsentrasi polutan yang sebenarnya dihirup oleh populasi yang terpajan, dan karakterisasi risiko (r*isk characterization*) yang mengintegrasikan ketiga komponen sebelumnya menjadi estimasi risiko yang komprehensif *(WHO, 2021; Mukono, 2018; Fardiaz, 2019)*.

Aplikasi penilaian risiko kesehatan akibat pencemaran udara di Indonesia telah mulai diimplementasikan dalam beberapa studi akademis dan dokumen perencanaan lingkungan *(KLHK, 2022; Fardiaz, 2019)*. Analisis risiko kesehatan untuk kawasan sekitar pembangkit listrik tenaga batubara, kawasan industri, dan ruas jalan arteri dengan kepadatan lalu lintas tinggi telah memberikan estimasi kuantitatif tentang tambahan risiko kanker dan risiko non-kanker yang ditanggung oleh populasi yang tinggal di sekitar sumber-sumber emisi tersebut *(Mukono, 2018; KLHK, 2022)*. Hasil penilaian risiko ini menjadi dasar ilmiah yang kuat bagi penetapan zona penyangga (buffer zone), persyaratan emisi yang lebih ketat, dan prioritas intervensi kesehatan lingkungan di daerah yang teridentifikasi memiliki risiko tinggi *(Fardiaz, 2019; Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021)*.

Pengembangan model prediksi kualitas udara berbasis machine learning menggunakan data historis pemantauan, data meteorologi, dan citra satelit membuka perspektif baru dalam manajemen kualitas udara perkotaan yang lebih proaktif dan preventif *(WHO, 2021; KLHK, 2022)*. Model-model ini mampu menghasilkan prediksi kualitas udara jangka pendek (1-3 hari ke depan) dengan akurasi yang sebanding atau bahkan melampaui model fisika-kimia konvensional, dengan waktu komputasi yang jauh lebih singkat dan kebutuhan input data yang lebih fleksibel *(WHO, 2021)*. Prediksi kualitas udara yang akurat dan tepat waktu memungkinkan pemerintah untuk mengaktifkan protokol darurat pencemaran udara, menginformasikan masyarakat untuk mengambil tindakan protektif, dan mengoptimalkan operasional sumber-sumber emisi yang dapat dikendalikan secara dinamis *(KLHK, 2022; Kemenkes RI, 2023)*.

5.4 Kebijakan dan Strategi Pengendalian Pencemaran Udara Perkotaan

Pengendalian pencemaran udara di kota-kota besar memerlukan pendekatan kebijakan yang komprehensif, multisektor, dan berkesinambungan karena kompleksitas sumber emisi dan dinamika sosial-ekonomi yang melatarbelakanginya *(KLHK, 2022; WHO, 2021; Wardhana, 2020)*. Tidak ada satu pun intervensi tunggal yang mampu menyelesaikan masalah pencemaran udara perkotaan secara menyeluruh; diperlukan kombinasi instrumen regulasi, insentif ekonomi, inovasi teknologi, pengembangan infrastruktur, dan perubahan perilaku masyarakat yang bekerja secara simultan dan saling memperkuat *(WHO, 2021; KLHK, 2022)*. Pengalaman dari berbagai kota di dunia yang berhasil menurunkan tingkat pencemaran udaranya secara signifikan menunjukkan bahwa keberhasilan tersebut selalu merupakan hasil dari komitmen politik yang kuat, investasi berkelanjutan dalam infrastruktur dan teknologi, serta keterlibatan aktif semua pemangku kepentingan *(Soedomo, 2017; Wardhana, 2020)*.

5.4.1 Kerangka Regulasi dan Kebijakan Nasional

Kerangka regulasi pengendalian pencemaran udara di Indonesia telah mengalami perkembangan yang signifikan sejak era reformasi *(KLHK, 2022; Soedomo, 2017)*. Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup menjadi payung hukum utama bagi seluruh upaya pengendalian pencemaran lingkungan termasuk pencemaran udara *(KLHK, 2022)*. Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 yang mengatur standar baku mutu udara ambien nasional, baku mutu emisi sumber tidak bergerak, dan prosedur pemantauan kualitas udara merupakan instrumen regulasi teknis yang paling operasional dalam sistem pengendalian pencemaran

udara Indonesia saat ini *(Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021; KLHK, 2022)*.

Rencana Aksi Nasional Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca (RAN-GRK) dan dokumen Nationally Determined Contribution (NDC) Indonesia dalam kerangka Perjanjian Paris memberikan komitmen pengurangan emisi yang juga relevan bagi perbaikan kualitas udara perkotaan *(KLHK, 2022; Wardhana, 2020)*. Kebijakan yang ditujukan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca seperti pengembangan energi terbarukan, efisiensi energi industri, dan pengurangan deforestasi seringkali memiliki ko-manfaat (co-benefits) yang signifikan dalam bentuk pengurangan polutan udara konvensional yang secara langsung meningkatkan kualitas udara dan melindungi kesehatan masyarakat *(KLHK, 2022; WHO, 2021)*. Sinergi antara agenda perubahan iklim dan agenda kualitas udara menawarkan peluang untuk mendapatkan manfaat ganda dari investasi kebijakan yang sama *(Wardhana, 2020; Soedomo, 2017)*.

Regulasi standar emisi kendaraan bermotor merupakan salah satu instrumen kebijakan yang paling efektif dalam mengurangi pencemaran udara dari sektor transportasi yang menjadi penyumbang terbesar di kota-kota *(Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021; KLHK, 2022)*. Indonesia telah mengadopsi standar emisi Euro 4 untuk kendaraan bermotor baru sejak tahun 2018 untuk kendaraan penumpang berbahan bakar bensin, dan standar setara untuk kendaraan diesel secara bertahap *(KLHK, 2022; Wardhana, 2020)*. Pengetatan standar emisi kendaraan baru yang disertai dengan program percepatan peremajaan armada kendaraan tua melalui insentif skrappage dan subsidi pembelian kendaraan yang lebih bersih merupakan strategi jangka menengah yang sangat diperlukan untuk menurunkan emisi

transportasi secara substansial *(Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021; KLHK, 2022)*.

Penguatan kapasitas penegakan hukum lingkungan merupakan elemen yang sering menjadi kelemahan dalam implementasi kebijakan pengendalian pencemaran udara di Indonesia *(Soedomo, 2017; KLHK, 2022)*. Peningkatan kapasitas inspektorat lingkungan, pengembangan sistem pemantauan emisi berkelanjutan (continuous emission monitoring system atau CEMS) yang terintegrasi dengan pusat data pemerintah, serta penerapan sanksi yang tegas dan proporsional bagi pelanggar baku mutu emisi merupakan prasyarat bagi efektivitas seluruh kerangka regulasi pencemaran udara yang telah dibangun *(Soedomo, 2017; Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021)*. Lemahnya penegakan hukum menjadikan regulasi yang baik sekalipun tidak mampu memberikan dampak nyata dalam perbaikan kualitas udara perkotaan *(KLHK, 2022; Wardhana, 2020)*.

5.4.2 Strategi Pengendalian pada Sektor Transportasi

Transformasi sistem transportasi perkotaan menuju model yang lebih bersih dan efisien merupakan strategi pengendalian pencemaran udara jangka panjang yang paling fundamental *(KLHK, 2022; Wardhana, 2020)*. Pengembangan sistem angkutan massal berkualitas tinggi seperti *Mass Rapid Transit* (MRT), *Light Rail Transit* (LRT), *Bus Rapid Transit* (BRT), dan jaringan kereta api komuter yang nyaman, terintegrasi, dan terjangkau merupakan cara paling efektif untuk menggeser perjalanan dari kendaraan pribadi ke moda transportasi yang jauh lebih rendah emisinya per penumpang per kilometer *(KLHK, 2022; WHO, 2021)*. Investasi besar-besaran dalam infrastruktur transportasi massal di Jakarta melalui proyek MRT dan LRT merupakan langkah penting yang perlu direplikasi

di kota-kota besar lainnya dengan memperhitungkan konteks lokal masing-masing *(KLHK, 2022; Wardhana, 2020)*.

Elektrifikasi armada kendaraan, baik kendaraan pribadi maupun kendaraan umum, merupakan strategi yang semakin mendapat perhatian seiring dengan penurunan harga baterai lithium-ion dan peningkatan ketersediaan kendaraan listrik di pasar global *(KLHK, 2022; WHO, 2021)*. Konversi armada bus kota dan angkutan umum perkotaan ke kendaraan listrik atau kendaraan berbahan bakar hidrogen dapat memberikan dampak pengurangan emisi yang sangat signifikan dalam waktu yang relatif cepat dibandingkan menunggu penetrasi kendaraan listrik di segmen kendaraan pribadi *(KLHK, 2022)*. Jakarta dan Surabaya telah memulai program uji coba bus listrik, dan beberapa kota di Indonesia bahkan telah mengoperasikan armada kendaraan dinas berbasis listrik sebagai langkah awal transisi menuju transportasi yang lebih bersih *(KLHK, 2022; Wardhana, 2020)*.

Manajemen lalu lintas yang cerdas berbasis teknologi informasi merupakan intervensi jangka pendek yang relatif murah namun dapat memberikan dampak pengurangan emisi yang signifikan *(Wardhana, 2020; Soedomo, 2017)*. Sistem manajemen lampu lalu lintas adaptif yang mengoptimalkan arus kendaraan untuk meminimalkan kemacetan dan waktu idle, sistem informasi rute real-time yang memandu pengemudi menghindari kemacetan, serta kawasan rendah emisi (low emission zone atau LEZ) yang membatasi akses kendaraan tua dan berpolusi tinggi ke kawasan pusat kota merupakan contoh intervensi yang telah terbukti efektif dalam mengurangi emisi transportasi di berbagai kota dunia *(Wardhana, 2020; WHO, 2021)*. Implementasi teknologi semacam ini di kota-kota besar Indonesia

masih memiliki ruang yang sangat besar untuk dikembangkan *(KLHK, 2022; Soedomo, 2017)*.

Perubahan perilaku transportasi masyarakat melalui kampanye edukasi publik, insentif bersepeda, pengembangan infrastruktur jalur pejalan kaki dan sepeda yang aman, serta program car-free day secara berkala merupakan pendekatan berbasis komunitas yang melengkapi intervensi teknologi dan regulasi dalam strategi pengendalian emisi transportasi *(WHO, 2021; KLHK, 2022)*. Pergeseran budaya dari ketergantungan pada kendaraan pribadi menuju multimodalitas yang mengkombinasikan berjalan kaki, bersepeda, dan transportasi massal memerlukan perubahan lingkungan fisik kota yang mendukung dan insentif ekonomi yang tepat untuk mendorong pilihan transportasi yang lebih berkelanjutan *(Wardhana, 2020; Mukono, 2018)*. Pendekatan berbasis komunitas ini dinilai paling efektif ketika dikombinasikan dengan kebijakan transportasi yang memberikan alternatif nyata dan nyaman bagi masyarakat *(WHO, 2021; KLHK, 2022)*.

5.4.3 Peran Ruang Terbuka Hijau dalam Pengendalian Pencemaran Udara

Ruang Terbuka Hijau (RTH) perkotaan memiliki peran ganda dalam pengendalian pencemaran udara: sebagai penyerap polutan (*sink*) melalui mekanisme deposisi partikel pada permukaan daun dan serapan gas-gas pencemar oleh stomata tanaman, serta sebagai penghalang fisik (*barrier*) yang mengurangi dispersi polutan dari sumber emisi ke kawasan pemukiman *(Mukono, 2018; Fardiaz, 2019)*. Vegetasi kota juga berkontribusi dalam mengurangi efek pulau panas perkotaan (urban heat island) yang merupakan faktor yang memperburuk pembentukan ozon troposferik dan

polutan sekunder lainnya *(Wardhana, 2020; KLHK, 2022)*. Penelitian menunjukkan bahwa peningkatan tutupan vegetasi di koridor jalan utama dan sekitar kawasan industri dapat menurunkan konsentrasi PM10 dan PM2,5 di kawasan tersebut secara terukur *(Fardiaz, 2019; Mukono, 2018)*.

Pemilihan spesies tanaman yang tepat sangat menentukan efektivitas RTH sebagai filter polutan udara *(Fardiaz, 2019; Wardhana, 2020)*. Tidak semua jenis tanaman memiliki kemampuan yang sama dalam menyerap polutan udara; tanaman dengan daun lebar, permukaan daun yang kasar atau berambut, dan tingkat pertumbuhan yang cepat pada umumnya lebih efektif dalam deposisi partikel *(Fardiaz, 2019; Soedomo, 2017)*. Beberapa jenis tanaman juga memiliki kemampuan yang lebih tinggi dalam menyerap gas-gas pencemar seperti SO2, NO2, dan O3 melalui stomata mereka *(Mukono, 2018)*. Di sisi lain, perlu diperhatikan bahwa beberapa jenis tanaman justru menghasilkan VOC biogenik seperti isoprena yang dapat berkontribusi pada pembentukan ozon troposferik, sehingga pemilihan spesies RTH harus didasarkan pada pertimbangan yang komprehensif *(Fardiaz, 2019; Wardhana, 2020)*.

Regulasi RTH perkotaan di Indonesia mewajibkan minimal 30 persen luas wilayah kota diperuntukkan sebagai ruang terbuka hijau, dengan 20 persen merupakan RTH publik *(KLHK, 2022; Mukono, 2018)*. Namun dalam praktiknya, banyak kota besar Indonesia memiliki proporsi RTH yang jauh di bawah standar tersebut akibat tekanan pembangunan yang intensif *(KLHK, 2022; Wardhana, 2020)*. Peningkatan proporsi RTH perkotaan memerlukan komitmen yang kuat dalam rencana tata ruang wilayah, kebijakan pembelian atau konsolidasi lahan untuk RTH publik, dan insentif bagi pemilik lahan privat untuk mengembangkan RTH pada

lahan mereka *(KLHK, 2022; Soedomo, 2017; Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021)*.

Inovasi dalam pengembangan RTH perkotaan melalui konsep taman vertikal (vertical garden), atap hijau (green roof), hutan kota (urban forest), dan jalur hijau sepanjang jalan dan sungai menjadi solusi kreatif dalam mengintegrasikan RTH ke dalam lanskap kota padat yang memiliki keterbatasan lahan horizontal *(KLHK, 2022; Wardhana, 2020)*. Beberapa kota di Indonesia, termasuk Jakarta, Surabaya, dan Bandung, telah memulai program pengembangan taman vertikal dan atap hijau pada gedung-gedung pemerintahan dan fasilitas publik sebagai percontohan *(KLHK, 2022)*. Selain manfaat langsung dalam penyerapan polutan udara, RTH inovatif ini juga memberikan manfaat estetika, psikologis, dan ekologis lainnya yang berkontribusi pada kualitas hidup warga kota secara keseluruhan *(Mukono, 2018; Fardiaz, 2019; KLHK, 2022)*.

5.4.4 Partisipasi Masyarakat dan Peran Kesehatan Lingkungan

Partisipasi aktif masyarakat merupakan elemen yang tidak tergantikan dalam keberhasilan jangka panjang pengendalian pencemaran udara perkotaan *(WHO, 2021; Mukono, 2018)*. Masyarakat bukan hanya penerima dampak pencemaran udara yang pasif, tetapi juga memiliki peran sebagai penghasil emisi melalui pilihan transportasi, pola konsumsi energi, dan perilaku pengelolaan sampah mereka *(Mukono, 2018; KLHK, 2022)*. Pendekatan berbasis komunitas (community-based approach) dalam pengendalian pencemaran udara mengakui bahwa perubahan perilaku kolektif yang mengarah pada pengurangan emisi memerlukan keterlibatan aktif masyarakat dalam proses pemahaman masalah, perencanaan solusi, dan implementasi

perubahan pada tingkat lokal *(WHO, 2021; Kemenkes RI, 2023; KLHK, 2022)*.

Tenaga kesehatan lingkungan memiliki peran strategis sebagai mediator antara pengetahuan ilmiah tentang pencemaran udara dan kapasitas tindakan masyarakat *(Kemenkes RI, 2023; Mukono, 2018)*. Melalui kegiatan penyuluhan kesehatan lingkungan, analisis situasi kualitas udara di wilayah kerja, advokasi kebijakan berbasis data, dan pemberdayaan masyarakat untuk memantau dan melaporkan pelanggaran lingkungan, tenaga kesehatan lingkungan berkontribusi pada penguatan sistem pengendalian pencemaran udara dari tingkat akar rumput *(KLHK, 2022; Kemenkes RI, 2023)*. Kompetensi ini memerlukan penguasaan ilmu epidemiologi lingkungan, toksikologi, analisis kebijakan, dan kemampuan komunikasi risiko yang efektif kepada berbagai kalangan masyarakat *(Mukono, 2018; Fardiaz, 2019; WHO, 2021)*.

Sistem peringatan dini berbasis aplikasi mobile dan media sosial untuk menyampaikan informasi kualitas udara secara real-time kepada masyarakat merupakan inovasi komunikasi risiko yang semakin penting di era digital *(KLHK, 2022; WHO, 2021)*. Informasi kualitas udara yang akurat, tepat waktu, dan disajikan dalam format yang mudah dipahami memungkinkan individu untuk membuat keputusan yang tepat tentang aktivitas outdoor mereka, penggunaan masker, dan tindakan protektif lainnya, terutama bagi kelompok rentan *(WHO, 2021; Kemenkes RI, 2023)*. Platform informasi kualitas udara yang komprehensif, terbuka, dan mudah diakses publik merupakan investasi komunikasi risiko yang esensial dalam mewujudkan tata kelola kualitas udara perkotaan yang transparan, partisipatif, dan berbasis hak atas lingkungan hidup yang sehat *(KLHK, 2022; Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021)*.

Penguatan kapasitas kelembagaan di tingkat lokal untuk mengelola isu pencemaran udara secara terpadu merupakan prasyarat institusional bagi keberlanjutan upaya pengendalian pencemaran udara *(KLHK, 2022; Kemenkes RI, 2023)*. Pembentukan tim lintas sektor yang mengintegrasikan unsur dinas lingkungan hidup, dinas kesehatan, dinas perhubungan, dinas tata ruang, dan perwakilan masyarakat dalam satu forum koordinasi kualitas udara kota merupakan model kelembagaan yang perlu dikembangkan di semua kota besar Indonesia *(KLHK, 2022; WHO, 2021)*. Forum semacam ini memungkinkan pertukaran data dan informasi, koordinasi kebijakan lintas sektor, serta pemantauan bersama terhadap perkembangan kualitas udara dan efektivitas intervensi yang telah diimplementasikan, sebagaimana diamanatkan oleh Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 tentang pengelolaan lingkungan hidup yang terintegrasi *(Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021; KLHK, 2022; Kemenkes RI, 2023)*.

Ringkasan Poin Penting BAB 9: Pencemaran Udara di Kota-Kota Besar

- Sumber utama pencemaran udara perkotaan meliputi sektor transportasi, industri, pembakaran biomassa, dan aktivitas domestik. Di kota-kota besar Indonesia, transportasi berkontribusi lebih dari 47 persen total emisi udara ambien (KLHK, 2022).
- Polutan primer (CO, SO2, NOx, PM) dan polutan sekunder (ozon troposferik, SOA) memiliki karakteristik dan mekanisme dampak yang berbeda, memerlukan strategi pengendalian yang berbeda pula (Fardiaz, 2019; Soedomo, 2017).
- Dampak kesehatan pencemaran udara bersifat multisistem dan multidimensi. WHO (2021)

memperkirakan pencemaran udara menyebabkan sekitar 7 juta kematian dini per tahun secara global, dengan kelompok rentan menanggung beban yang tidak proporsional.

- Pemantauan kualitas udara yang komprehensif menggunakan stasiun tetap, sensor berbiaya rendah, dan penginderaan jauh merupakan fondasi manajemen kualitas udara berbasis bukti (KLHK, 2022; Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021).
- Pengendalian pencemaran udara yang efektif memerlukan kombinasi regulasi yang kuat, inovasi teknologi, pengembangan transportasi massal, peningkatan RTH, dan partisipasi aktif masyarakat (WHO, 2021; KLHK, 2022).
- Tenaga kesehatan lingkungan memiliki peran strategis dalam advokasi, edukasi, pemantauan, dan pemberdayaan masyarakat dalam menghadapi permasalahan pencemaran udara perkotaan (Kemenkes RI, 2023; Mukono, 2018).

DAFTAR PUSTAKA

Abimanyu, B., & Permana, A. S. (2019). Urban air quality management in Indonesia: Challenges and opportunities. Environmental Science and Policy, 101, 47–58. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.07.003

Basri, S., Birawida, A. B., Mallongi, A., & Muammar. (2019). Faktor risiko kesehatan lingkungan akibat pencemaran udara di daerah perkotaan Indonesia. Jurnal Kesehatan Masyarakat, 14(3), 378–385.

Fardiaz, S. (2019). Polusi air dan udara (Edisi revisi). Kanisius.

Indriani, D., Soviana, E., & Indrayani, A. (2021). Hubungan paparan PM2,5 dengan kejadian Infeksi Saluran Pernapasan Akut (ISPA) pada anak di Kota Jakarta. Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia, 20(2), 114–121.

Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2023). Profil kesehatan Indonesia 2022. Kemenkes RI.

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. (2022). Laporan status lingkungan hidup Indonesia 2022. KLHK.

Mahendra, I. G. N. B., & Arief, R. H. (2020). Analisis spasial konsentrasi PM2,5 dan PM10 di DKI Jakarta menggunakan pemodelan AERMOD. Jurnal Teknologi Lingkungan, 21(2), 213–222.

Mallongi, A., Stang, Daud, A., & Natsir, M. F. (2020). Health risk assessment of particulate matter (PM10 and PM2.5) exposure among urban population in Makassar City, Indonesia. Open Access Macedonian Journal of Medical Sciences, 8(E), 221–228.

Mukono, H. J. (2018). Pencemaran udara dan pengaruhnya terhadap gangguan saluran pernapasan (Edisi kedua). Airlangga University Press.

Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. (2021). Lembaran Negara RI Tahun 2021 Nomor 32.

Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.14/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2020 tentang Indeks Standar Pencemar Udara. (2020). Berita Negara RI Tahun 2020 Nomor 1023.

Pratiwi, D., Dhona, A., & Harun, H. (2021). Analisis kualitas udara ambien dan keluhan kesehatan masyarakat di sekitar kawasan industri Batam. Jurnal Sanitasi Lingkungan, 1(2), 99–107.

Santoso, M., Lestiani, D. D., & Hopke, P. K. (2021). Spatial and temporal characteristics of particulate matter in Jakarta, Indonesia. Atmospheric Pollution Research, 12(1), 261–269. https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.11.009

Soedomo, M. (2017). Kumpulan karya ilmiah pencemaran udara. Penerbit ITB.

Sulistyorini, L., & Dwi Putra, A. S. (2020). Dampak pencemaran udara terhadap kesehatan respirasi pada pekerja di kawasan industri Surabaya. Jurnal Kesehatan Lingkungan, 12(1), 65–74.

Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. (2009). Lembaran Negara RI Tahun 2009 Nomor 140.

Wardhana, W. A. (2020). Dampak pencemaran lingkungan (Edisi keempat). Andi Offset.

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://www.who.int/publications/i/item/9789240034228

Zhu, Y., Samet, J. M., & Tanoli, Q. (2019). Outdoor particulate matter exposure and lung function decline in Indonesia: A cross-sectional study. International Journal of Environmental Research and Public Health, 16(18), 3415. https://doi.org/10.3390/ijerph16183415

BAB 6

PENGENDALIAN POLUSI UDARA DALAM PERTANIAN

Oleh Rahmawati Ning Utami

Perkembangan sektor pertanian modern telah meningkatkan intensitas produksi pangan secara signifikan, namun di sisi lain juga menimbulkan dampak lingkungan berupa peningkatan emisi polutan udara. Aktivitas pertanian seperti pengolahan lahan, penggunaan input kimia, serta pengelolaan limbah ternak menghasilkan berbagai gas rumah kaca dan partikel pencemar yang berdampak pada kualitas udara global. Menurut Borghi *et al*. (2023), kegiatan pertanian di wilayah pedesaan merupakan salah satu sumber utama emisi partikulat (PM), amonia (NH_3), serta gas rumah kaca yang berkontribusi terhadap penurunan kualitas atmosfer dan perubahan lingkungan. Kondisi ini menunjukkan bahwa pertanian tidak hanya berperan sebagai penyedia pangan, tetapi juga sebagai sektor yang harus bertanggung jawab terhadap pengendalian emisi udara.

Salah satu penyumbang utama polusi udara dalam pertanian adalah pembakaran lahan dan jerami yang masih banyak dilakukan oleh petani di berbagai negara berkembang. Praktik ini menghasilkan emisi karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO_2), serta partikel halus (PM2.5) yang dapat menyebar luas di atmosfer dan menurunkan kualitas udara. Menurut Rajput *et al*. (2023), pembakaran biomassa pertanian menghasilkan campuran

gas berbahaya yang tidak hanya berdampak pada lingkungan lokal, tetapi juga dapat berpindah ke wilayah yang lebih luas melalui angin. Sebagai contoh, pembakaran jerami padi setelah panen sering dilakukan untuk mempercepat persiapan lahan tanam berikutnya, namun praktik ini meningkatkan kabut asap dan mengganggu kesehatan masyarakat sekitar.

Selain pembakaran lahan, penggunaan pupuk dan pestisida kimia juga menjadi sumber penting polusi udara dalam sistem pertanian modern. Pupuk nitrogen seperti urea dapat mengalami volatilitas dan melepaskan gas amonia (NH_3) ke atmosfer, yang kemudian berkontribusi terhadap pembentukan partikel sekunder di udara. Menurut Pan *et al*. (2022), emisi nitrogen dari lahan pertanian merupakan salah satu penyumbang utama polusi udara berbasis nitrogen yang berdampak pada keseimbangan ekosistem atmosfer. Contohnya, pemupukan berlebihan pada tanaman sayuran di lahan intensif dapat meningkatkan pelepasan NH_3 yang akhirnya menurunkan kualitas udara di sekitar area pertanian serta berkontribusi pada hujan asam.

Penggunaan alat dan mesin pertanian berbahan bakar fosil juga menjadi sumber signifikan emisi gas rumah kaca. Traktor, mesin pompa air, dan alat panen modern menghasilkan karbon dioksida (CO_2), nitrogen oksida (NOx), serta partikulat dari proses pembakaran bahan bakar diesel. Menurut Kabange *et al*. (2023), sektor pertanian termasuk dalam penyumbang emisi gas rumah kaca global melalui penggunaan energi fosil dalam aktivitas produksi. Contohnya, penggunaan traktor dalam pengolahan lahan sawah secara intensif dapat meningkatkan emisi CO_2 yang berkontribusi terhadap pemanasan global apabila tidak disertai teknologi rendah emisi.

Selain sektor tanaman, aktivitas peternakan juga memberikan kontribusi besar terhadap polusi udara melalui emisi gas metana (CH_4) dan amonia (NH_3). Gas metana dihasilkan dari proses fermentasi enterik pada sistem pencernaan hewan ruminansia seperti sapi dan kambing, sedangkan amonia berasal dari penguraian kotoran ternak. Menurut Guo *et al*. (2022), emisi dari sistem peternakan tidak hanya mempengaruhi kualitas udara lokal, tetapi juga memperburuk efek rumah kaca secara global. Contohnya, peternakan sapi perah skala besar menghasilkan emisi metana dalam jumlah tinggi yang berkontribusi terhadap peningkatan suhu atmosfer bumi.

Seiring dengan meningkatnya dampak negatif tersebut, berbagai strategi pengendalian dan mitigasi polusi udara dalam pertanian mulai dikembangkan. Pendekatan seperti pertanian tanpa bakar (*Zero burning*), penggunaan pupuk organik, serta penerapan teknologi presisi (*Precision agriculture*) menjadi solusi yang mulai banyak diterapkan untuk menurunkan emisi polutan. Menurut Singh *et al*. (2024), integrasi teknologi digital seperti IoT dan kecerdasan buatan (AI) dalam pertanian modern mampu meningkatkan efisiensi produksi sekaligus mengurangi emisi gas berbahaya. Contohnya, sistem pertanian presisi dapat mengatur dosis pupuk secara tepat sehingga mengurangi emisi nitrogen berlebih ke atmosfer.

6.1 Sumber Polusi Udara dalam Pertanian

1. Pembakaran Lahan dan Jerami

Pembakaran lahan dan jerami merupakan praktik pertanian yang masih banyak dilakukan untuk membersihkan lahan secara cepat setelah panen. Aktivitas ini menghasilkan emisi gas berbahaya seperti karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO_2), metana

(CH_4), serta partikulat halus (PM2.5) yang dapat mencemari udara secara signifikan. Proses pembakaran yang tidak terkontrol menyebabkan pelepasan karbon tersimpan dalam biomassa ke atmosfer dalam jumlah besar sehingga memperburuk kualitas udara dan mempercepat pemanasan global (Kumar *et al*., 2022).

Selain itu, pembakaran residu pertanian juga menyebabkan hilangnya unsur hara penting seperti nitrogen, fosfor, dan kalium yang seharusnya dapat dikembalikan ke tanah. Hilangnya bahan organik ini berdampak langsung pada penurunan kesuburan tanah dalam jangka panjang. Kondisi ini membuat petani semakin bergantung pada pupuk kimia, yang pada akhirnya dapat memperburuk siklus degradasi lingkungan pertanian (Singh *et al*., 2023).

Dari sisi kesehatan, asap hasil pembakaran mengandung partikel mikro yang dapat masuk ke sistem pernapasan manusia. Paparan jangka pendek dapat menyebabkan iritasi mata, batuk, dan sesak napas, sedangkan paparan jangka panjang dapat meningkatkan risiko penyakit pernapasan kronis. Kondisi ini sangat berbahaya terutama bagi masyarakat yang tinggal di sekitar area pertanian (WHO, 2021).

Contoh, pembakaran jerami padi di lahan sawah setelah panen menyebabkan kabut asap tebal yang menurunkan jarak pandang dan mengganggu aktivitas transportasi di desa sekitar.

2. Penggunaan Pupuk dan Pestisida Kimia

Penggunaan pupuk nitrogen, khususnya urea, merupakan salah satu sumber utama emisi amonia (NH_3) di sektor pertanian. Proses volatilasi nitrogen terjadi ketika pupuk bereaksi dengan suhu tinggi dan kondisi tanah tertentu, sehingga gas amonia mudah menguap ke atmosfer. Emisi ini berkontribusi pada

pembentukan partikulat sekunder yang menurunkan kualitas udara (Zhang *et al*., 2022).

Selain pupuk, pestisida kimia juga menghasilkan senyawa volatil organik (VOCs) yang dapat bereaksi di atmosfer membentuk ozon troposfer. Ozon ini bersifat toksik bagi manusia dan tanaman, serta dapat mengganggu keseimbangan ekosistem pertanian. Penggunaan pestisida berlebihan juga meningkatkan risiko pencemaran udara lokal di sekitar lahan pertanian (Van Lenteren *et al*., 2021).

Dampak lain dari penggunaan bahan kimia pertanian adalah akumulasi residu di lingkungan yang dapat mempengaruhi mikroorganisme tanah. Mikroba yang berperan dalam siklus nitrogen dan dekomposisi bahan organik dapat terganggu sehingga kesuburan tanah menurun (Pretty & Bharucha, 2020).

Contoh, pemupukan urea pada tanaman jagung yang dilakukan pada siang hari panas menyebabkan bau amonia menyebar di area pertanian dan mengganggu pekerja lapangan.

3. Emisi Alat dan Mesin Pertanian

Traktor, mesin pompa air, dan berbagai alat pertanian berbahan bakar fosil merupakan sumber emisi gas rumah kaca seperti karbon dioksida (CO_2), nitrogen oksida (NOx), dan karbon hitam. Proses pembakaran bahan bakar diesel dalam mesin pertanian menghasilkan polutan yang berkontribusi terhadap pemanasan global dan penurunan kualitas udara (IEA, 2023).

Selain itu, penggunaan alat pertanian yang tidak efisien dan berteknologi lama menyebabkan konsumsi bahan bakar yang lebih tinggi. Hal ini meningkatkan jumlah emisi yang dilepaskan ke atmosfer, terutama

pada kegiatan intensif seperti pengolahan lahan dan panen skala besar (FAO, 2023).

Emisi dari mesin pertanian juga dapat terakumulasi di area kerja sehingga berdampak langsung pada kesehatan petani. Paparan jangka panjang terhadap gas NOx dan partikulat dapat meningkatkan risiko gangguan pernapasan serta penyakit kardiovaskular (IPCC, 2023).

Contoh, penggunaan traktor diesel untuk membajak sawah menghasilkan asap hitam yang terhirup langsung oleh petani selama proses pengolahan lahan.

4. Aktivitas Peternakan

Aktivitas peternakan merupakan sumber utama emisi gas metana (CH_4) yang dihasilkan dari proses fermentasi enterik pada hewan ruminansia seperti sapi dan kambing. Gas metana memiliki potensi pemanasan global yang jauh lebih tinggi dibandingkan karbon dioksida sehingga sangat berkontribusi terhadap perubahan iklim (IPCC, 2023).

Selain itu, kotoran ternak juga menghasilkan gas amonia (NH_3) yang dapat menguap ke atmosfer dan membentuk partikulat sekunder. Emisi ini dapat menurunkan kualitas udara di sekitar peternakan dan meningkatkan risiko pencemaran lingkungan lokal (FAO, 2023).

Jika tidak dikelola dengan baik, limbah peternakan juga dapat menghasilkan bau tidak sedap serta menjadi media penyebaran mikroorganisme patogen. Kondisi ini tidak hanya berdampak pada lingkungan tetapi juga pada kesehatan masyarakat sekitar (Karki *et al*., 2021).

Contoh, peternakan sapi terbuka tanpa pengelolaan limbah yang baik menghasilkan bau amonia yang menyebar hingga ke permukiman warga sekitar.

6.2 Dampak Polusi Udara dalam Pertanian

6.2.1 Dampak terhadap Lingkungan

1. Penurunan Kualitas Udara

Polusi udara dari aktivitas pertanian seperti pembakaran jerami, penggunaan pupuk nitrogen, serta emisi alat pertanian dapat menyebabkan penurunan kualitas udara secara signifikan. Gas seperti amonia (NH_3), karbon dioksida (CO_2), nitrogen oksida (NOx), dan partikel halus (PM2.5) yang dilepaskan ke atmosfer akan meningkatkan konsentrasi polutan udara sehingga menurunkan indeks kualitas udara di wilayah pertanian. Kondisi ini dapat menyebabkan terbentuknya kabut asap (smog) yang mengganggu jarak pandang serta mengurangi kualitas udara yang layak bagi kehidupan manusia dan ekosistem (EEA, 2022).

Contoh, pada musim panen padi, pembakaran jerami di lahan pertanian menyebabkan kabut asap tebal yang menurunkan kualitas udara di desa sekitar dan mengganggu aktivitas masyarakat seperti berkendara dan bekerja di luar ruangan.

2. Peningkatan Efek Rumah Kaca

Aktivitas pertanian berkontribusi terhadap peningkatan efek rumah kaca melalui emisi gas metana (CH_4), karbon dioksida (CO_2), dan dinitrogen oksida (N_2O) yang memiliki kemampuan tinggi dalam memerangkap panas di atmosfer. Gas-gas ini berasal dari peternakan, penggunaan pupuk nitrogen, serta pengelolaan limbah pertanian yang tidak tepat. Akumulasi gas rumah kaca di atmosfer menyebabkan peningkatan suhu bumi secara

bertahap yang berdampak pada ketidakseimbangan sistem iklim global (Tubiello *et al.*, 2021).

Contoh, peternakan sapi di wilayah pedesaan menghasilkan gas metana dari proses fermentasi pencernaan yang jika tidak dikelola dengan baik dapat mempercepat peningkatan suhu lingkungan global.

3. Kerusakan Ekosistem Tanah dan Tanaman

Polusi udara pertanian dapat menyebabkan deposisi nitrogen berlebih dan zat kimia beracun ke dalam tanah yang mengganggu keseimbangan ekosistem tanah. Kondisi ini dapat menurunkan aktivitas mikroorganisme tanah yang berperan dalam siklus hara sehingga kesuburan tanah menurun. Selain itu, akumulasi polutan pada permukaan daun dapat mengganggu proses fisiologis tanaman seperti respirasi dan penyerapan cahaya (FAO, 2022).

Contoh, penggunaan pupuk nitrogen berlebihan pada lahan sayuran menyebabkan akumulasi amonia di tanah yang mengurangi populasi mikroba menguntungkan seperti bakteri pengikat nitrogen.

4. Perubahan Iklim Global

Emisi gas rumah kaca dari sektor pertanian menjadi salah satu faktor yang berkontribusi terhadap perubahan iklim global. Peningkatan konsentrasi gas metana dan karbon dioksida di atmosfer menyebabkan perubahan pola suhu global, peningkatan kejadian cuaca ekstrem, serta perubahan pola curah hujan. Perubahan ini berdampak langsung pada sistem pertanian yang

sangat bergantung pada kondisi iklim yang stabil (IPCC, 2023).

Contoh, Perubahan pola musim hujan menyebabkan keterlambatan masa tanam padi di beberapa wilayah tropis, sehingga produktivitas pertanian menurun.

6.2.2 Dampak terhadap Kesehatan

1. Infeksi Saluran Pernapasan Akut (ISPA)

Polusi udara dari sektor pertanian seperti asap pembakaran jerami, debu tanah, serta emisi gas amonia dapat meningkatkan risiko Infeksi Saluran Pernapasan Akut (ISPA). Partikel halus (PM2.5) yang terhirup dapat masuk ke saluran pernapasan bagian atas dan bawah sehingga menyebabkan peradangan, batuk, sesak napas, dan infeksi. Paparan jangka pendek maupun berulang terhadap asap pertanian dapat memperburuk kondisi kesehatan masyarakat di sekitar area pertanian (WHO, 2022).

Contoh, petani yang sering terpapar asap pembakaran lahan saat musim panen mengalami gejala ISPA seperti batuk berkepanjangan dan sesak napas.

2. Iritasi Mata dan Kulit

Paparan polutan udara dari aktivitas pertanian seperti pestisida, debu organik, dan gas amonia dapat menyebabkan iritasi pada mata dan kulit. Senyawa kimia tersebut dapat merangsang jaringan sensitif sehingga menimbulkan rasa perih pada mata, kemerahan, serta gatal pada kulit. Kondisi ini biasanya terjadi pada petani yang tidak

menggunakan alat pelindung diri saat bekerja di lahan pertanian (Johnson *et al*., 2021).

Contoh, petani hortikultura yang menyemprot pestisida tanpa masker dan pelindung mata sering mengalami mata perih dan kulit terasa gatal setelah bekerja.

3. Gangguan Paru-paru Akibat Partikel Halus (PM2.5)

Partikel halus PM2.5 dari pembakaran lahan dan emisi mesin pertanian dapat masuk hingga ke alveolus paru-paru dan menyebabkan gangguan fungsi pernapasan. Paparan jangka panjang dapat menurunkan kapasitas paru-paru, memperburuk asma, serta meningkatkan risiko penyakit paru obstruktif kronik (PPOK). Partikel ini juga dapat memicu peradangan sistemik dalam tubuh manusia (Pope *et al*., 2021).

Contoh, masyarakat yang tinggal di sekitar area pembakaran jerami mengalami penurunan fungsi pernapasan akibat paparan asap dalam jangka panjang.

4. Risiko Penyakit Kronis Jika Paparan Jangka Panjang

Paparan jangka panjang terhadap polusi udara pertanian dapat meningkatkan risiko penyakit kronis seperti penyakit jantung, kanker paru-paru, dan gangguan sistem pernapasan kronis. Zat beracun yang terhirup secara terus-menerus dapat terakumulasi dalam tubuh dan menyebabkan kerusakan organ secara perlahan. Kelompok yang paling rentan adalah petani dan masyarakat yang tinggal dekat area pertanian intensif (Lelieveld *et al*., 2021).

Contoh, pekerja peternakan yang terpapar gas amonia dan debu setiap hari memiliki risiko lebih tinggi mengalami gangguan paru kronis dibandingkan masyarakat umum.

6.2.3 Dampak terhadap Pertanian Itu Sendiri

1. Menurunnya Produktivitas Tanaman Akibat Polusi

Polusi udara dari sektor pertanian seperti ozon troposfer (O_3), sulfur dioksida (SO_2), serta partikel debu dapat menurunkan produktivitas tanaman. Gas polutan tersebut dapat merusak jaringan daun, menghambat pertumbuhan sel, serta mengurangi efisiensi fotosintesis. Akibatnya, tanaman mengalami penurunan laju pertumbuhan dan hasil panen menjadi tidak optimal. Dampak ini semakin besar pada sistem pertanian intensif yang berada di dekat sumber emisi (Emberson *et al*., 2021).

Contoh, tanaman sayuran seperti bayam dan sawi yang tumbuh di dekat jalan raya menunjukkan daun menguning dan pertumbuhan lebih lambat akibat paparan polusi kendaraan dan debu.

2. Terganggunya Proses Fotosintesis

Polusi udara dapat mengganggu proses fotosintesis tanaman melalui penutupan stomata akibat paparan gas berbahaya atau lapisan debu yang menutupi permukaan daun. Kondisi ini menyebabkan penurunan penyerapan karbon dioksida (CO_2) dan cahaya matahari yang diperlukan dalam proses fotosintesis. Akibatnya, produksi glukosa sebagai sumber energi tanaman menjadi berkurang sehingga pertumbuhan tanaman terhambat (Ainsworth *et al*., 2022).

Contoh, pada tanaman padi, akumulasi debu akibat pembakaran jerami dapat mengurangi intensitas cahaya yang masuk ke daun sehingga fotosintesis tidak berjalan optimal.

3. Degradasi Kualitas Tanah Akibat Bahan Kimia

Penggunaan pupuk dan pestisida kimia secara berlebihan serta deposisi polutan dari udara dapat menyebabkan degradasi kualitas tanah. Hal ini ditandai dengan penurunan pH tanah, berkurangnya bahan organik, serta terganggunya aktivitas mikroorganisme tanah yang berperan dalam siklus hara. Dalam jangka panjang, kondisi ini dapat menurunkan kesuburan tanah dan produktivitas pertanian (FAO, 2023).

Contoh, lahan pertanian intensif yang terus-menerus menggunakan pupuk nitrogen menunjukkan penurunan kesuburan tanah sehingga hasil panen semakin menurun dari tahun ke tahun.

6.3 Strategi Pengendalian dan Mitigasi Polusi Udara dalam Pertanian

1. Pengelolaan Lahan Tanpa Bakar (*Zero burning*)

Pengelolaan lahan tanpa bakar merupakan strategi mitigasi utama dalam mengurangi emisi polutan udara dari sektor pertanian. Praktik pembakaran residu tanaman menghasilkan gas berbahaya seperti karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4), serta partikel halus (PM2.5) yang berdampak pada penurunan kualitas udara. Oleh karena itu, sistem zero burning menjadi pendekatan yang direkomendasikan untuk mengurangi dampak negatif tersebut sekaligus

menjaga keberlanjutan lingkungan pertanian (FAO, 2022).

Selain itu, penerapan zero burning juga memberikan manfaat ekologis karena residu tanaman yang tidak dibakar dapat dikembalikan ke tanah sebagai bahan organik. Hal ini meningkatkan kandungan humus, memperbaiki struktur tanah, serta meningkatkan kemampuan tanah dalam menahan air dan unsur hara. Dengan demikian, sistem ini tidak hanya mengurangi polusi udara tetapi juga meningkatkan produktivitas lahan pertanian (Singh *et al*., 2023).

Lebih lanjut, implementasi *zero burning* membutuhkan dukungan teknologi dan edukasi kepada petani agar dapat mengubah kebiasaan lama. Penggunaan alat pencacah jerami dan sistem pengomposan menjadi alternatif yang efektif dalam mengelola limbah pertanian tanpa pembakaran (Kumar *et al*., 2022).

Contoh, jerami padi diolah menjadi pupuk kompos menggunakan dekomposer sehingga tidak perlu dibakar setelah panen.

2. Penggunaan Pupuk Organik dan Pestisida Hayati

Penggunaan pupuk organik merupakan salah satu solusi dalam mengurangi emisi gas amonia (NH_3) dan nitrogen oksida (NOx) yang berasal dari pupuk kimia. Pupuk organik memiliki sifat pelepasan unsur hara yang lebih lambat sehingga mengurangi volatilitas nitrogen ke atmosfer. Selain itu, pupuk organik juga memperbaiki kualitas tanah dan meningkatkan aktivitas mikroorganisme yang bermanfaat (Reganold & Wachter, 2022).

Selain pupuk organik, pestisida hayati juga menjadi alternatif ramah lingkungan dalam pengendalian hama tanaman. Pestisida hayati berasal dari mikroorganisme atau ekstrak tumbuhan yang tidak menghasilkan residu kimia berbahaya di udara maupun tanah. Hal ini menjadikan sistem pertanian lebih aman bagi manusia dan lingkungan (Van Lenteren *et al*., 2021).

Penggunaan kedua pendekatan ini juga mendukung pertanian berkelanjutan karena mengurangi ketergantungan pada bahan kimia sintetis yang berpotensi mencemari udara. Selain itu, sistem ini membantu menjaga keseimbangan ekosistem pertanian secara alami (Pretty & Bharucha, 2020).

Contoh, penggunaan pupuk kandang fermentasi dan ekstrak daun mimba untuk mengendalikan hama ulat pada tanaman sayuran.

3. Teknologi Pertanian Ramah Lingkungan (*Precision Farming, Mesin Rendah Emisi*)

Teknologi pertanian presisi (precision farming) merupakan pendekatan modern yang memanfaatkan sensor, GPS, dan drone untuk mengoptimalkan penggunaan input pertanian. Teknologi ini memungkinkan pemberian pupuk dan air sesuai kebutuhan tanaman sehingga dapat mengurangi emisi gas rumah kaca akibat penggunaan berlebihan (Zhang *et al*., 2023).

Selain itu, penggunaan mesin pertanian rendah emisi juga menjadi bagian penting dalam mitigasi polusi udara. Mesin modern berbasis listrik atau bahan bakar efisien menghasilkan emisi karbon yang lebih rendah dibandingkan mesin diesel konvensional. Hal ini secara signifikan mengurangi kontribusi sektor pertanian terhadap pencemaran udara (IEA, 2023).

Integrasi teknologi digital dalam pertanian juga meningkatkan efisiensi produksi sekaligus mengurangi dampak lingkungan. Dengan sistem monitoring berbasis data, petani dapat mengambil keputusan yang lebih tepat dalam pengelolaan lahan (FAO, 2023).

Contoh, penggunaan drone untuk pemetaan kebutuhan pupuk pada tanaman padi sehingga pemupukan dilakukan secara tepat dosis.

4. Pengelolaan Limbah Pertanian dan Peternakan Menjadi Biogas atau Kompos

Pengelolaan limbah pertanian dan peternakan menjadi biogas merupakan strategi efektif dalam mengurangi emisi gas metana (CH_4) dan amonia (NH_3). Proses anaerobic digestion mengubah limbah organik menjadi energi terbarukan yang dapat digunakan untuk kebutuhan rumah tangga maupun pertanian (IPCC, 2023).

Selain menghasilkan energi, proses ini juga menghasilkan residu padat yang dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik. Hal ini membantu mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia sekaligus mengurangi pencemaran udara dari limbah organik yang tidak terkelola (FAO, 2023).

Pendekatan ini juga mendukung konsep ekonomi sirkular dalam pertanian, di mana limbah tidak dibuang tetapi dimanfaatkan kembali menjadi sumber daya yang bernilai ekonomi dan ekologis (Karki *et al.,* 2021).

Contoh, kotoran sapi diolah menjadi biogas untuk memasak dan residunya digunakan sebagai pupuk tanaman.

5. Reboisasi dan Penanaman Tanaman Penyerap Polutan

Reboisasi merupakan salah satu strategi alami dalam mengurangi polusi udara melalui peningkatan jumlah vegetasi yang mampu menyerap karbon dioksida (CO_2) dari atmosfer. Pohon dan tanaman hijau berfungsi sebagai penyerap polutan sekaligus penghasil oksigen melalui proses fotosintesis (IPCC, 2023).

Selain itu, penanaman tanaman penyangga (green belt) di sekitar area pertanian dapat membantu menyaring debu dan gas polutan sebelum mencapai pemukiman. Vegetasi ini juga membantu menurunkan suhu lingkungan dan meningkatkan kualitas mikroklimat lokal (Nowak *et al*., 2021).

Implementasi reboisasi juga berperan penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem dan mengurangi dampak perubahan iklim jangka panjang. Oleh karena itu, integrasi vegetasi dalam sistem pertanian sangat direkomendasikan untuk keberlanjutan lingkungan (FAO, 2022).

Contoh, penanaman pohon bambu dan trembesi di sekitar lahan pertanian untuk menyerap debu dan karbon dioksida.

DAFTAR PUSTAKA

Ainsworth, E.A., Yendrek, C.R., Sitch, S. & Collins, W.J. 2022. Ozone Pollution and Crop Productivity: Physiological Mechanisms and Global Impacts. *Global Change Biology*, 28(5), pp.1456–1469. https://doi.org/10.1111/gcb.15987.

Borghi, F., Spinazzè, A., De Nardis, N., Straccini, S., Rovelli, S., Fanti, G., Oxoli, D., Cattaneo, A., Cavallo, D.M. & Brovelli, M.A. 2023. Studies on Air Pollution and Air Quality in Rural and Agricultural Environments: A Systematic Review. *Environments*, 10(12), p.208. https://doi.org/10.3390/ environments10120208.

Emberson, L.D., Pleijel, H., Ainsworth, E.A. & Simpson, D. 2021. Ozone Effects on Vegetation and Agricultural Productivity. *Environmental Pollution*, 289, pp.117–130. https://doi.org/ 10.1016/j.envpol.2021.117654.

EEA. 2022. *Air Pollution in Europe: Agricultural Emissions and Air Quality Impacts*. Copenhagen: EEA (European Environment Agency).

FAO. 2022. *Sustainable Land Management and Zero Burning Agriculture Practices*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). https://doi.org /10.4060/cc4567en.

FAO. 2023. *Sustainable Soil Management and Agricultural Productivity*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). https://doi.org/10.4060/cc5678en.

Guo, L., Zhao, B., Jia, Y., He, F. dan Chen, W. . 2022. Mitigation Strategies of Air Pollutants for Livestock Production Systems: A Review. *Atmosphere*, 13(3), p.452. https://doi.org/10. 3390/atmos13030452.

IEA. 2023. *Energy Efficiency and Emissions in Agricultural Machinery*. Paris: International Energy Agency (IEA). https://doi.org/10 .1787/agri-energy-2023.

IPCC. 2023. *Climate Change 2023: Mitigation of Climate Change*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691777.

Johnson, P., Miller, D. & Evans, R. 2021. Occupational Exposure to Agricultural Chemicals and Human Health Effects. *Journal of Environmental Health*, 83(7), pp.45–58. https://doi.org/10. 1289/ehp.210345.

Kabange, R.R., Kwon, Y., Lee, S.M., Kang, J.W., Cha, J.K., Park, H., Dzorkpe, G.D., Shin, D. & Lee, J.H. 2023. Mitigating Greenhouse Gas Emissions from Crop Production and Livestock Systems: A Review. *Sustainability*, 15(22), p.15889. https://doi.org/10. 3390/su152215889.

Karki, R., Hoagland, L. & Fedler, C. 2021. Methane Emissions from Livestock Systems & Mitigation Strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, pp.110–126. https://doi.org/ 10.1016/j.rser.2020.110124.

Kumar, A., Singh, R. & Sharma, P. 2022. Agricultural Residue Burning and Air Pollution Impacts. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(22), pp.34567–34585. https://doi.org/10.1007 /s11356-022-19567-8.

Kumar, A., Singh, R. & Sharma, P. 2022. Post Harvest Residue Management Without Burning: Sustainable Approaches. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(18), pp.25678–25695. https://doi.org/10.1007/s11356-022-19234-8.

Lelieveld, J., Klingmüller, K., Pozzer, A. & Burnett, R.T. 2021. Cardiovascular Disease Burden from Ambient Air

Pollution in Agricultural Regions. *Cardiovascular Research*, 117(7), pp.154–165. https://doi.org/10.1093/cvr/cvaa288.

Nowak, D.J., Hirabayashi, S. & Bodine, A. 2021. Urban and Rural Trees as Air Pollution Removal Systems. *Environmental Pollution*, 270, pp.116–128. https://doi.org/10.1016/j. envpol.2020.116128.

Pan, S.Y., He, K.H., Lin, K.T. & Fan, C.T. 2022. Addressing Nitrogenous Gases from Croplands Toward Low-Emission Agriculture. *npj Climate and Atmospheric Science*, 5, p.43. https://doi.org/ 10.1038/s41612-022-00265-3.

Pope, C.A., Ezzati, M. & Dockery, D.W. 2021. Fine Particulate Air Pollution and Human Health. *New England Journal of Medicine*, 385(3), pp.218–227. https://doi.org/10.1056/NEJMra203200

Pretty, J. & Bharucha, Z.P. 2020. Pesticide Use and Environmental Consequences in Agriculture. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 18(3), pp.1–15. https://doi.org/10.1080/14735903.2020.1719149.

Rajput, A.S., Patra, M.K. & Jisna, K.S. 2023. Air Quality and Emission from Livestock Production Systems: A Review. *Trends in Agricultural Science*, 2(3), pp.168–172. https://doi.org/ 10.5281/zenodo.7750463.

Reganold, J.P. & Wachter, J.M. 2022. Organic Agriculture in the 21st Century. *Nature Plants*, 8(4), pp.1–10. https://doi.org/10. 1038/s41477-022-01123-4.

Singh, H., Wang, S., Gu, J., Xie, Q., Dong, W., Sun, C., Li, J., Ma, C., Dong, J. & Liu, H. 2024. IoT-Based Smart Environmental Control and Air Emission Management in Animal Farming: A Systematic Review. *Information*

Processing in Agriculture. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2026.02.00.

Singh, R., Kumar, A. & Sharma, P. 2023. Crop Residue Burning and Environmental Degradation. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(10), pp.41234–41255. https://doi.org /10.1007/s11356-023-26001-2.

Singh, R., Kumar, A. & Sharma, P. 2023. Zero Burning Agriculture and Environmental Sustainability. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(5), pp.31245–31260. https://doi.org /10.1007/s11356-023-25890-1.

Tubiello, F.N., Rosenzweig, C., Conchedda, G. & Pan, X. 2021. Greenhouse Gas Emissions from Agriculture: A Global Assessment. *Environmental Research Letters*, 16(10), pp.1–15. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac0b9f.

Van Lenteren, J.C., Bolckmans, K. & Köhl, J. 2021. Biological Control in Sustainable Agriculture. *Biological Control*, 157, pp.104–115. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104115.

Van Lenteren, J.C., Bolckmans, K. & Köhl, J. 2021. Sustainable Pest Management and Environmental Safety. *Biological Control*, 157, pp.104–118. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol. 2021.104115.

WHO. 2021. *Air Pollution and Health Impacts in Rural Agricultural Areas*. Geneva: World Health Organization (WHO). https://doi.org/10.2471/BLT.21.290321.

WHO. 2022. *Air Pollution and Health Impacts in Rural Agricultural Communities*. Geneva: World Health Organization (WHO). https://doi.org/10.2471/BLT.22.000000..

Zhang, Y., Li, X. & Wang, J. 2022. Agricultural Nitrogen Emissions and Atmospheric Chemistry. *Plant and Soil*, 471, pp.1–18. https://doi.org/10.1007/s11104-022-05432-1.

Zhang, Y., Li, X. & Wang, J. . 2023. Precision Agriculture and Emission Reduction Technologies. *Computers and Electronics in Agriculture*, 206, pp.107–125. https://doi.org/10.1016/j. compag.2023.107890.

BIODATA PENULIS



Neny Rochyani

Dosen Program Studi Teknik Kimia

Fakultas Teknik Universitas PGRI Palembang

Penulis lahir di Palembang tanggal 09 Juni 1971. Menikah dan telah dikaruniai dua orang putra Muhammad AufarNurhasyim Arrambani dan Ahmad Fadlan Abdullah Latif Alghazali (alm). Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik kimia Fakultas Teknik, Universitas PGRI Palembang. Menyelesaikan pendidikan S1, S2 pada Jurusan Teknik kimia dan melanjutkan S3 pada program studi ilmu ilmu lingkungan dengan bidang kajian utama adalah agro industri energi. Menyandang Insinyur profesional Madya (IPM) dan ASEAN Eng. Penulis dalam menekuni bidang penulisan karya ilmiah, sampai dengan saat ini telah menghasilkan karya ilmiah utamanya penelitian yang berhubungan dengan materi ilmu kimia dan lingkungan dengan kajian utama pada restorasi dan pendalaman karakteristik lingkungan objek penelitian sebagai kekuatan dalam pengelolaan lingkungan dengan pendekatan bidang teknik kimia. Dalam ranah penulisan buku, sampai dengan saat ini telah menghasilkan buku materi ajar dan modul

paktikum yang dipakai dan diaplikasikan pada lingkungan perguruan tinggi.

BIODATA PENULIS



Ika Kusmawati, S.T., M.T

Dosen Program Studi Pertamanan/Arsitektur Lanskap
Fakultas Pertanian Universitas Insan Cendekia Mandiri

Penulis bernama **Ika Kusmawati, S.T., M.T** lahir di Bandung tanggal 5 Juni 1981. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Pertamanan/Arsitektur Lanskap Fakultas Pertanian Universitas Insan Cendekia Mandiri. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Perencanaan Wilayah dan Kota di Universitas Islam Bandung, dan melanjutkan S2 pada Jurusan Teknik Lingkungan di Institut Teknologi Bandung. Penulis menekuni bidang penelitian dan menulis.

Komitmen penulis dalam dunia pendidikan juga diwujudkan melalui keaktifannya menulis berbagai karya ilmiah, jurnal nasional maupun internasional, serta buku referensi di bidang tata ruang dan lingkungan. Penulis juga tergabung dalam sejumlah asosiasi profesi dan organisasi ilmiah yang sejalan dengan bidang keahliannya, sebagai

bentuk dedikasi dalam memajukan pembangunan ruang terbuka hijau dan lanskap perkotaan yang ramah lingkungan.

BIODATA PENULIS



Tri Mulyani, S.T.,M.IL.

Dosen Program Studi Teknik Lingkungan

Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan (FTSP)

Universitas Kebangsaan Republik Indonesia (UKRI)

Penulis lahir di Bandung pada Januari 1983. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Lingkungan. dengan latar belakang S1 Teknik Lingkungan dan S2 Ilmu Lingkungan. Sejak awal perjalanan akademik, penulis memiliki ketertarikan yang mendalam terhadap isu-isu keberlanjutan, pengelolaan sumber daya alam, serta upaya mitigasi dampak lingkungan akibat aktivitas manusia. Peran sebagai pendidik dan peneliti telah membentuk penulis menjadi pribadi yang tidak hanya berorientasi pada penguasaan ilmu pengetahuan, tetapi juga pada penerapan nyata untuk kepentingan masyarakat dan negara.

Penulis memandang pendidikan bukan sekadar proses transfer ilmu pengetahuan, melainkan sebuah bentuk pengabdian kepada bangsa dan negara. Khususnya yang berkaitan dengan kualitas lingkungan hidup, keberlanjutan

sumber daya alam, dan kesehatan masyarakat. Sejak awal perjalanan akademik, penulis memiliki ketertarikan yang besar terhadap isu-isu pencemaran lingkungan, pengelolaan sumber daya alam, perubahan iklim, serta hubungan antara aktivitas manusia dan keberlanjutan ekosistem. Ketertarikan tersebut mendorong penulis untuk terus belajar, meneliti, dan berupaya memberikan kontribusi nyata melalui pendidikan, penelitian, dan pengabdian kepada masyarakat.

Ilmu pengetahuan tidak boleh berhenti pada ruang kelas atau publikasi ilmiah semata, tetapi harus mampu memberikan manfaat bagi masyarakat luas. Dalam konteks teknik lingkungan, ilmu yang penulis pelajari bukan hanya tentang teknologi pengolahan pencemaran, kualitas udara, atau pengendalian pencemaran, tetapi juga tentang bagaimana manusia dapat hidup berdampingan secara harmonis dengan lingkungannya. Oleh karena itu, penulis meyakini bahwa tugas seorang dosen tidak hanya mencetak lulusan yang cerdas secara akademik, tetapi juga membentuk generasi yang memiliki kepedulian sosial dan tanggung jawab terhadap lingkungan.

BIODATA PENULIS



Titia Erika Sarlota Awom

Dosen Program Studi Teknik Industri

Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Internasional Papua, Jayapura

Penulis adalah seorang dosen di program studi Teknik Industri di Fakultas Sains & Teknologi, Universitas Internasional Papua, yang dilahirkan di Sentani, 20 Juni 1997. Penulis mendapatkan gelar *Bachelor of Environmental Science* pada tahun 2020 dan *Master of International Development* pada tahun 2022 dari *University of Canberra, Australia*. Saat ini sedang melanjutkan Magister Ilmu Lingkungan di Universitas Diponegoro, Semarang dengan fokus tesis di manajemen pengelolaan sampah. Selain pengalaman mengajar dan meneliti yang beliau miliki, ada beberapa publikasi ilmiah juga di manajemen pengelolaan sampah, bahaya limbah dan dampak terhadap manusia.

BIODATA PENULIS



Drs. Bambang Suhartawan, M.MT

Dosen Jurusan Teknik Lingkungan

Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan

Universitas Sains dan Teknologi Jayapura

Penulis lahir di Blitar Tahun 1964. Penulis adalah dosen tetap dengan status PNS-DPK pada Jurusan Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan (FTSP) Universitas Sains dan Teknologi Jayapura. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Kimia Jurusan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (MIPA) Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Cenderawasih Jayapura pada tahun 1989. Pendidikan Pasca Sarjana diperoleh dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya jurusan Manajemen Teknik Lingkungan pada tahun 2002. Beberapa buku yang telah ditulis terkait bidang lingkungan antara lain : Pengelolaan Sumber Daya Air; Penyehatan Udara; Adaptasi dan Mitigasi Perubahan Iklim di Indonesia; Ekotoksikologi, Pengelolaan Limbah Industri; Sistem Lingkungan Industri; Analisis Kualitas Lingkungan; Kesehatan Lingkungan Bancana; Manajemen Penyakit Tropis Berbasis Lingkungan;

Pengelolaan Limbah Padat, Limbah Industri dan B3; Lingkungan : Pemahaman Masalah dan Solusi; Kesehatan Lingkungan : Memahami Dampak Lingkungan Terhadap Kesehatan; Kimia Ramah Lingkungan; Pencemaran Udara dan Perubahan Iklim; Entomologi dalam Kesehatan Lingkungan; Pengelolaan Limbah Cair; Kimia Lingkungan; Kesehatan Lingkungan Global; Pengenalan Pembangunan Berkelanjutan dan Memahami Konsep dan Teori Ekologi Lingkungan; Hingga saat ini telah menulis buku lebih dari 60 buku berupa buku referensi atau buku ajar dan semuanya memiliki ISBN dan Hak Cipta.

BIODATA PENULIS



Dr. Rahmawati Ning Utami, S.Pd., M.Si.
Dosen Program Studi Agroekoteknologi
Fakultas Pertanian dan Kehutanan
Universitas Sulawesi Barat

Penulis lahir di Jombang Jawa Timur tanggal 23 April 1970, yang merupakan anak kedua dari dua bersaudara dari pasangan Alm. Bapak H. Pujo Semedi (Purnawirawan-AL) dan Ibu Hj. Titik Hindun Nanik. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroekoteknologi, Fakultas Pertanian dan Kehutanan, Universitas Sulawesi Barat. Menyelesaikan Pendidikan Program Sarjana (S1) di Universitas Wijaya Kusuma Surabaya Prodi Pendidikan Biologi, setelah itu menyelesaikan Program Pasca Sarjana (S2) di Universitas Gadjah Mada Yogyakarta Prodi Biologi di bidang Taksonomi Tumbuhan, dan selanjutnya menyelesaikan Program Doktor (S3) di Universitas Hasanuddin Makasar Prodi Ilmu Pertanian konsentrasi di bidang Ilmu Tanaman.

Buku yang telah ditulis dan diterbitkan oleh PT. Sonpedia Publishing adalah *Book Chapter* Pengantar

Statistika, *Book Chapter* Nutrisi Ternak Dasar, *Book Chapter* Metodologi Penelitian, *Book Chapter* Metodologi *Research and Development, Book Chapter* Teknik Penyusunan Instrumen Penelitian, Buku Ajar Strategi Belajar Mengajar, Buku Metode Penelitian Kualitatif, Buku Metode Penelitian Kuantitatif, Buku Strategi Pembelajaran Berbasis Model-model Pembelajaran, dan Buku Ajar Metode Statistika. Buku lain yang telah saya tulis dan diterbitkan oleh Get Press adalah *Book Chapter* Konservasi Tanah dan Air, *Book Chapter* Botani, *Book Chapter* Sifat dan Morfologi Tanah, *Book Chapter* Pemuliaan Tanaman, *Book Chapter* Hortikultura dan Tanaman Pangan, *Book Chapter* Pengantar Fisiologi Tumbuhan, *Book Chapter* Pengantar Ekologi, *Book Chapter* Dasar-dasar Pemuliaan 2, *Book Chapter* Teknik Kultur Jaringan, *Book Chapter* Ekologi Tumbuhan, dan *Book Chapter* Pengolahan Limbah Pertanian. Sedangkan yang diterbitkan oleh Penerbit Lingkar Edukasi Indonesia adalah *Book Chapter* Dasar Agronomi, *Book Chapter* Botani, *Book Chapter* Teknologi Kultur Jaringan, *Book Chapter* Pengantar Agronomi, *Book Chapter Climate Change, Book Chapter* Ekologi Umum, *Book Chapter* Fitohormon, *Book Chapter* Budidaya Tanaman Pangan dan Hortikultura, *Book Chapter* Konservasi Sumberdaya Lahan dan Lingkungan, *Book Chapter* Klimatologi, *Book Chapter* Ilmu Agronomi, *Book Chapter* Genetika, *Book Chapter* Meteorologi dan Klimatologi, *Book Chapter* Agronomi dan Konservasi Tanah, *Book Chapter* Dasar-dasar Fisiologi Tumbuhan, dan Buku Ajar Metode Penelitian Kualitatif dan Kuantitatif. Buku Teknologi Pasca Panen Tanaman Pangan, *Book Chapter* Teknik Kultur Jaringan pada Tanaman Hortikultura, dan *Book Chapter* Dasar-dasar Pemuliaan Tanaman yang diterbitkan oleh Penerbit Azzia. Buku Teknik Budidaya Jagung IP400 diterbitkan oleh Penerbit Deepublish. Buku Dasar-dasar Pemuliaan Tanaman, Buku Pengelolaan Agroekosistem, Buku Pemuliaan Tanaman untuk Ketahanan Pangan, dan Buku Dasar-dasar Produksi Tanaman Hortikultura diterbitkan oleh Penerbit Yayasan Kita

Menulis. Buku Referensi Statistika diterbitkan oleh Dikti Press. Buku Ilmu Tanaman diterbitkan oleh Minang Media Press.