

KONSEP DAN PRINSIP PENYEHATAN UDARA

Penulis :

**Naris Dyah Prasetyawati, Ninin Gusdini, Fitria Fatma,
Bambang Suhartawan, Taty Alfiah, Nasruddin Syam**



KONSEP DAN PRINSIP PENYEHATAN UDARA

**Naris Dyah Prasetyawati
Ninin Gusdini
Fitria Fatma
Bambang Suhartawan
Taty Alfiah
Nasruddin Syam**



GET PRESS INDONESIA

KONSEP DAN PRINSIP PENYEHATAN UDARA

Penulis :

Naris Dyah Prasetyawati
Ninin Gusdini
Fitria Fatma
Bambang Suhartawan
Taty Alfiah
Nasruddin Syam

ISBN : 978-623-125-548-8

Editor : Mila Sari., S.ST, M.Si

Penyunting : Rantika Maida Sahara., S.Tr.Kes

Desain Sampul dan Tata Letak : Atyka Trianisa, S.Pd

Penerbit : GET PRESS INDONESIA
Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Redaksi :

Jln. Palarik Air Pacah No 26 Kel. Air Pacah
Kec. Koto Tengah Kota Padang Sumatera Barat
Website : www.getpress.co.id
Email : adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, Desember 2024

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

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT dalam segala kesempatan. Sholawat beriring salam dan doa kita sampaikan kepada Nabi Muhammad SAW. Alhamdulillah atas Rahmat dan Karunia-Nya penulis telah menyelesaikan Konsep Dan Prinsip Penyehatan Udara ini.

Buku ini membahas Kesehatan Lingkungan Dan Kualitas Udara, Metode Pengukuran Polutan Udara, Pengaruh Kualitas Udara Terhadap Kesehatan Masyarakat, Strategi Penyehatan Udara, Teknologi Penyaringan Udara Dan Pengendalian Polusi, Penyakit Akibat Polusi Udara.

Proses penulisan buku ini berhasil diselesaikan atas kerjasama tim penulis. Demi kualitas yang lebih baik dan kepuasan para pembaca, saran dan masukan yang membangun dari pembaca sangat kami harapkan.

Penulis ucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung dalam penyelesaian buku ini. Terutama pihak yang telah membantu terbitnya buku ini dan telah mempercayakan mendorong, dan menginisiasi terbitnya buku ini. Semoga buku ini dapat bermanfaat bagi masyarakat Indonesia.

Padang, Desember 2024

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
BAB 1 KESEHATAN LINGKUNGAN DAN KUALITAS UDARA.....	1
1.1 Kesehatan Lingkungan.....	1
1.2 Udara	2
1.2.1 Komponen udara.....	2
1.2.2 Pencemaran Udara.....	3
1.2.3 Dampak Pencemaran Udara.....	4
1.3 Kualitas Udara	6
1.3.1 Metode pengukuran Kualitas Udara	6
1.3.2 Index Quality Air (IQAir).....	7
1.3.3 Indeks Kualitas Udara (IKU).....	7
1.3.4 Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU).....	8
DAFTAR PUSTAKA.....	9
BAB 2 METODE PENGUKURAN POLUTAN UDARA.....	15
2.1 Pendahuluan.....	15
2.2 Dasar Hukum Pengukuran Kualitas Udara	16
2.3 Pengukuran Kualitas Udara.....	18
2.3.1 Bakumutu Kualitas Udara	18
2.3.2 Skala Pengukuran	19
2.3.3 Metode Sampling Kualitas Udara.....	19
2.3.4 Alat Pengukur Kualitas Udara.....	21
2.4 Lokasi Pengukuran Kualitas Udara Ambien	23
2.5 Lokasi Pengukuran Kualitas Udara Emisi	24
2.6 Teknis Pengukuran Kualitas Udara Ambien.....	25
2.6.1 Pengukuran Gas	25
DAFTAR PUSTAKA.....	27
BAB 3 PENGARUH KUALITAS UDARA TERHADAP KESEHATAN MASYARAKAT	29
3.1 Pendahuluan.....	29
3.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Pencemaran Udara.....	30
3.2.1 Meteorologi dan iklim.....	30

3.2.2 Topografi.....	31
3.3 Penyebab Pencemaran Udara.....	31
3.4 Efek Pencemaran Udara.....	33
3.5 Indikator Pencemaran Udara.....	35
3.6 Parameter Lain untuk Indikator Pencemaran Udara.....	35
3.7 Dampak Pencemaran Udara.....	37
3.8 Dampak Pencemaran Udara.....	39
3.9 Mencegah Dampak Polusi Udara.....	41
DAFTAR PUSTAKA.....	43
BAB 4 STRATEGI PENYEHATAN UDARA.....	45
4.1 Aspek-aspek Penyehatan Udara.....	45
4.2 Penerapan Strategi Penyehatan Udara.....	46
DAFTAR PUSTAKA.....	67
BAB 5 TEKNOLOGI PENGENDALIAN POLUSI UDARA.....	69
5.1 Karakteristik Udara Emisi.....	69
5.1.1 Partikulat.....	69
5.1.2 Gas-gas pencemar pada Udara Emisi.....	71
5.2 Teknologi Pembersih Partikulat pada Udara Emisi.....	71
5.2.1 Pertimbangan pemilihan peralatan.....	71
5.2.2 Siklon Separator (<i>Cyclone Separators</i>).....	72
5.2.3 <i>Fabric filters</i> atau <i>Baghouses</i>	75
5.2.4 Presipitator Elektrostatis (<i>ESP – Electrostatic Precipitator</i>).....	77
5.2.5 Skrubber Basah (<i>Wet Scrubber</i>).....	80
5.3 Teknologi Pembersih Gas pada Udara Emisi.....	82
5.3.1 Pemilihan Peralatan Pembersih Gas.....	82
5.3.2 Absorpsi.....	83
5.3.3 Adsorpsi.....	84
5.3.4 Kondensasi.....	87
5.4 Pemanfaatan Peralatan Pembersih Udara.....	88
DAFTAR PUSTAKA.....	91
BAB 6 PENYAKIT AKIBAT POLUSI UDARA: STUDI KASUS ANAK DENGAN NEURODEVELOPMENTAL DISORDER	95
6.1 Pendahuluan.....	95
6.2 Polutan Udara.....	97
6.3 Anak dengan Neurodevelopmental Disorder.....	98

6.4 Epidemiologi Anak Neurodevelopmental Disorder	99
6.5 Hubungan Pencemaran Udara dengan <i>Neurodevelopmental Disorder</i>	101
6.6 Mekanisme Potensial.....	104
6.6.1 Stres Oksidatif dan Peradangan Saraf	105
6.6.2 Disbiosis mikrobioma usus.	107
6.6.3 Perubahan Epigenetik.	107
6.7 Mitigasi	108
6.8 Penutup	109
DAFTAR PUSTAKA.....	110

BIODATA PENULIS

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Dampak Pencemaran Udara pada Kesehatan.....	38
Tabel 3.2. Dampak Pencemaran Udara pada Iklim.....	39
Tabel 5.1. Perbandingan teknologi absorpsi, adsorpsi dan kondensasi untuk membersihkan udara emisi	83
Tabel 5.2. Jenis adsorben dan gas polutan pada proses adsorpsi	85
Tabel 6.1. Literatur penelitian-penelitian mengenai hubungan polutan udara dengan <i>Neurodevelopmental Disorder</i>	101

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Peralatan pengambilan sampel gas dengan Impinger	25
Gambar 2.2. <i>High Volume Air Sampler</i>	26
Gambar 5.1. ukuran PM10 dan PM2,5	70
Gambar 5.2. Pemilihan peralatan pembersih partikulat dalam udara emisi.....	72
Gambar 5.3. Gaya yang bekerja pada partikulat dalam siklon separator	73
Gambar 5.4. Mekanisme pembersihan udara menggunakan siklon	74
Gambar 5.5. Pemanfaatan siklon pada sumber pencemar udara.....	74
Gambar 5.6. Bagian dari peralatan Siklon Separator	75
Gambar 5.7. Skema aliran udara emisi pada peralatan Fabric Filter atau <i>Baghouse</i>	76
Gambar 5.8. Konstruksi peralatan <i>Fabric Filter</i> atau <i>Baghouse</i>	77
Gambar 5.9. Mekanisme penyisihan partikulat pada Presipitator Elektrostatik	78
Gambar 5.10. Peralatan Presipitator Elektrostatik	78
Gambar 5.11. Jenis presipitator elektrostatik (i) tipe plat paralel dan (ii) tipe tabung.....	79
Gambar 5.12 Presipitator elektrostatik tipe tabung.	79
Gambar 5.13. Presipitator elektrostatik jenis plat paralel	79
Gambar 5.14. Peralatan Skrubber basah (<i>wet scrubber</i>).....	81
Gambar 5.15. Proses absorpsi untuk menghilangkan gas CO ₂	84
Gambar 5.16. Reaksi permukaan antara gas SO ₂ dengan sorben	86
Gambar 5.17. Skema tahapan adsorpsi dilanjutkan dengan tahap regenerasi dan sistem <i>recovery</i> produk sampingnya.	86
Gambar 5.18. Skema penyisihan senyawa organik volatil dengan teknologi kondensasi	88

Gambar 6.1. Peta Sebaran Autisme di Tingkat Global 100

Gambar 6.2. Modifikasi alur mekanisme potensial
polutan udara masuk ke dalam tubuh
yang mempengaruhi kerusakan saraf
dan mengakibatkan *Neurodevelopmental*
Disorder 105

BAB 1

KESEHATAN LINGKUNGAN DAN KUALITAS UDARA

1.1 Kesehatan Lingkungan

Kesehatan lingkungan merupakan suatu hal yang sangat penting untuk diperhatikan dalam kehidupan sehari-hari. Kesehatan lingkungan merupakan cabang kesehatan masyarakat yang membahas semua aspek lingkungan yang lebih luas yang dapat mempengaruhi aspek kesehatan pada manusia. Menurut Permenkes Nomor 2 Tahun 2023, kesehatan lingkungan adalah upaya pencegahan penyakit dan/atau gangguan kesehatan dari faktor risiko lingkungan untuk mewujudkan kualitas lingkungan yang sehat baik dari aspek fisik, kimia, biologi maupun sosial (Kementerian Kesehatan RI, 2023). Dalam peraturan ini juga ditetapkan standar baku mutu kesehatan lingkungan dan persyaratan kesehatan yang ditetapkan untuk media air, udara, tanah, pangan, sarana dan bangunan, vektor dan binatang pembawa penyakit yang ada di lingkungan : permukiman, tempat kerja, tempat rekreasi dan fasilitas umum. Komponen kesehatan lingkungan terdiri dari air, tanah dan udara sedangkan ruang lingkup kesehatan lingkungan meliputi: penyediaan air minum, pengelolaan air buangan dan pengendalian pencemaran, pengelolaan sampah padat, pengendalian vektor dan binatang pengganggu, pengendalian dan pencegahan pencemaran tanah, hygiene sanitasi makanan, pengendalian pencemaran udara, termasuk pengendalian radiasi, kesehatan kerja pengendalian kebisingan, permukiman, transportasi, aspek sanitasi tempat-tempat umum, sanitasi bencana dan berbagai tindakan pencegahan yang diperlukan untuk menjamin lingkungan tetap berfungsi sesuai daya dukung dan daya tampungnya.

Seorang individu yang tinggal atau bekerja di suatu lingkungan baru terkadang mengalami kondisi yang tidak nyaman karena perubahan lingkungan yang disebabkan karena polusi udara

di sekitarnya (Edwards, Wilkinson, Rutter, & Milojevic, 2022). Potensi peningkatan penghirupan polutan meningkat seiring dengan meningkatnya jumlah orang yang suka beraktivitas dengan berjalan kaki dan bersepeda sehari-hari di lingkungan yang tercemar (Nazelle, Rodriguez, & Crawford-Brown, 2009). Strategi yang mendesak dibutuhkan untuk pengendalian emisi yang efektif dan intervensi kebijakan untuk memitigasi risiko polusi udara (Sannoh, et al., 2024).

1.2 Udara

Udara merupakan campuran atau kumpulan gas yang ada di permukaan bumi (DLH Kota Semarang, 2019). Udara bersih adalah udara yang tidak memiliki kadar polutan (kotoran dan bahan kimia) berbahaya yang terkandung di dalamnya (AirNow, n.d.). Udara yang baik tidak dapat dilihat karena tidak berwarna, memiliki aroma segar ketika dihirup dan tidak menyesakkan nafas ketika dihirup (DLH Kota Semarang, 2020). Dalam satu menit seorang manusia rata-rata menghirup 7-8 liter udara atau 11.000 liter per hari dalam kondisi normal. Sebanyak 20% udara yang dihirup tersebut adalah Oksigen (Ardiansyah, 2022).

1.2.1 Komponen udara

Gas Karbondioksida merupakan elemen kunci dari siklus karbon dan merupakan sumber utama fotosintesis (Gayatri, et al., 2021). Komposisi udara bersih umumnya mengandung 78,09% Nitrogen, 20,95% Oksigen, 0,93% Argon, 0,04% Karbon dioksida dan gas-gas lain dalam jumlah yang sedikit. Uap air juga merupakan unsur udara yang terkandung dalam jumlah yang bervariasi bersama dengan partikel debu lainnya. Di atmosfer polutan udara dapat bertambah komposisinya dengan adanya kegiatan alam dan manusia (Murachman, Sarto, & Setyawati, 2013). Gas sebagai polutan udara dipancarkan langsung ke udara dari bahan bakar fosil dan gas alam yang dibakar di pembangkit listrik, mobil dan sumber pembakaran lainnya.

1.2.2 Pencemaran Udara

Pencemaran lingkungan merupakan suatu kondisi apabila komponen fisik dan biologi dari sistem bumi dan atmosfer terkontaminasi sehingga berdampak pada gangguan keseimbangan ekosistem lingkungan itu sendiri (Pasla, 2023). Pencemaran lingkungan mencakup pencemaran air, pencemaran tanah dan pencemaran udara (DLH Kota Semarang, 2019). Pencemaran yang terjadi di lingkungan terbagi menjadi empat tahapan, yaitu: tingkat pertama belum menimbulkan kerugian, tingkat kedua mulai mengganggu komponen ekosistem dan menimbulkan iritasi pada manusia, tingkatan ketiga mulai menimbulkan reaksi fatal pada tubuh dan penyakit kronis serta tingkatan keempat sudah terlalu parah dan dapat menimbulkan kematian pada makhluk hidup karena kadar polutan yang sangat tinggi (WHO, n.d.). Pencemaran udara di lingkungan dipengaruhi oleh berbagai macam faktor, antara lain : kestabilan atmosfer, faktor meteorologi, sinar matahari dan perputaran bumi serta kecepatan angin (Murachman, Sarto, & Setyawati, 2013), peningkatan jumlah penduduk dan kegiatan eksploitasi alam yang tidak terkendali dan kegiatan industri yang tidak dikelola dengan baik (Nandy, n.d.).

Pencemaran udara merupakan salah satu tanda terjadinya kerusakan lingkungan, berupa penurunan kualitas udara karena masuk atau dimasukkannya unsur berbahaya ke dalam komponen udara tersebut. Sumber pencemaran di udara dapat disebabkan karena aktivitas alami dan buatan. Kendaraan bermotor mengeluarkan sejumlah Karbon monoksida, Hidrokarbon, Nitrogen Oksida dan zat beracun lainnya serta partikel-partikel halus lainnya. Polutan yang dikeluarkan tersebut dapat menyebabkan dampak buruk terhadap kesehatan dan lingkungan (Walsh, 2019). Menurut *The Environmental Protection Agency* (EPA) terdapat enam jenis polutan udara yang berasal dari aktivitas manusia dan industri, yaitu : *Particulate Matter* (PM), Nitrogen Dioksida (NO_2), Ozon (O_3), Sulfur Dioksida (SO_2), Timbal (Pb) dan Karbon Monoksida (CO) (Betapramestiasia, 2023).

Pengendalian pencemaran udara menjadi kebutuhan yang mendesak untuk dilakukan dalam suatu aksi nyata. Pengendalian polusi udara tidak dapat dilakukan secara tunggal akan tetapi

memerlukan tindakan terkoordinasi dari semua aspek (Han, Yan, & Sun, 2024). Kebijakan udara bersih merupakan mekanisme penting untuk memperbaiki lingkungan perkotaan dan mendorong pembangunan ekonomi hijau (Zhou, Fan, Hu, & Yu, 2024).

1.2.3 Dampak Pencemaran Udara

Perkembangan jumlah penduduk memicu berbagai aktivitas untuk memenuhi kebutuhannya. Hal ini juga berdampak pada meningkatnya jumlah industri dan transportasi (Yankes Kemenkes RI, 2024). Dampak pencemaran udara terjadi pada berbagai aspek, antara lain :

1. Lingkungan

Emisi kendaraan bermotor paling erat kaitannya dengan perubahan yang terjadi di lingkungan, khususnya terkait kualitas udara. Gas Rumah Kaca juga menyebabkan perubahan iklim yang semakin banyak dihasilkan oleh sektor transportasi (Walsh, 2019), (Thurston, 2017). Polutan lain yang terkait dengan kendaraan juga berkontribusi terhadap pemanasan global (Walsh, 2019). Gas CO₂ meningkat secara drastis dari 250 menjadi 418 ppm karena penggunaan bahan bakar fosil secara ekstrem. Pelepasan CO₂ yang semakin cepat berperan sebagai sumber utama dalam proses terjadinya perubahan iklim dan efek gas rumah kaca yang kemudian mengakibatkan : pemanasan global, mencairnya es di kutub, biogekimia, perubahan curah hujan, pengasaman laut, eutrofikasi danau dan ketidakseimbangan komunitas ekologi, kepunahan beberapa spesies yang berdampak juga terhadap kesuburan tanah (Gayatri, et al., 2021). Perubahan iklim juga diperkirakan akan memperburuk tekanan panas (Chowdhury, Marginean, Chaudhary, Upadhyay, & Aunan, 2024)

2. Kesehatan

Dampak polusi udara terhadap kesehatan tidak hanya mencakup polutan yang dapat diukur tetapi juga mencakup sinergi yang cukup kompleks dari kebisingan, asap, stress dan gangguan terhadap kehidupan sehari-hari (Duque, et al., 2024) Penelitian dalam jangka panjang menunjukkan bukti bahwa

perubahan paparan polusi udara yang diterima oleh seorang individu selama remaja mempunyai dampak terukur terhadap pertumbuhan fungsi paru-parunya (Edwards, Wilkinson, Rutter, & Milojevic, 2022). Penelitian terbaru bahkan menunjukkan bahwa kondisi stress yang dialami oleh seseorang dapat memperbesar dampak buruk polusi udara yang diterima (Astell-Burt, et al., 2013). Polusi udara PM_{2.5} dalam jangka panjang berkontribusi terhadap kematian spesifik khususnya kanker paru-paru, penyakit jantung serta dapat menyebabkan stress pada individu (Weichenthal, et al., 2016). Terdapat hubungan yang sangat erat antara aspek kesehatan dan kesadaran terhadap lingkungan khususnya terkait udara (Pluhar, F.Piko, Kovacs, & Uzzoli, 2009). Peningkatan polusi udara akan berdampak secara langsung pada kesehatan dan produktivitas kerja seseorang (IQAir, 2016). Perubahan iklim berdampak pada kesehatan dengan membuat udara menjadi kurang sehat untuk dihirup (Chowdhury, Marginean, Chaudhary, Upadhyay, & Aunan, 2024).

3. Ekonomi

Biaya ekonomi untuk menghitung dampak pencemaran udara dilakukan dengan mempertimbangkan berbagai aspek, antara lain : fungsi kesehatan, fungsi permintaan untuk kegiatan mitigasi dan fungsi permintaan untuk kegiatan pencegahan (Purushothaman, Selvam, & Muthunarayanan, 2021). Peningkatan kualitas udara menghasilkan penurunan angka kematian bayi secara signifikan terutama melalui penyakit pernafasan dan paparan dalam rahim dan pasca melahirkan. Dampak langsung yang dirasakan adalah keuntungan ekonomi yang mencapai \$312,5 juta (Kyrychenko, 2024). Sementara di Kanada diperkirakan \$40 miliar dihabiskan untuk pengeluaran yang terkait dengan mortalitas prematur dan morbiditas orang yang terkena polusi udara (IQAir, 2017). Estimasi perhitungan kerugian ekonomi yang disebabkan karena polusi udara dapat menjadi dasar pengambilan keputusan terkait pembiayaan kesehatan bagi masyarakat dalam suatu negara.

1.3 Kualitas Udara

Kualitas udara merupakan gambaran kondisi udara yang terjadi di suatu wilayah yang dihasilkan dari pengukuran beberapa parameter, yaitu fisik, kimia, biologis yang mempengaruhi terhadap kesehatan manusia, lingkungan dan ekosistem secara keseluruhan. Upaya mengukur dan memahami kualitas udara sangat penting karena polusi udara memiliki dampak serius terhadap berbagai aspek (kesehatan, ekonomi dan lingkungan) (Universitas Bakrie, 2024). Kualitas udara yang baik memiliki kondisi udara yang hanya mengandung sedikit partikel padat dan polutan kimia (Betapramestiasia, 2023). Pemantauan kualitas udara mengacu pada aktivitas pengumpulan dan pengukuran sampel udara yang ada di sekitarnya. Data ini kemudian dibandingkan dengan standar kualitas udara yang berlaku di lokasi tersebut dan informasi historis mengenai kualitas udara, beserta data yang menggambarkan dampak kesehatan dan lingkungan untuk menentukan kondisi udara (Clarity, 2023).

1.3.1 Metode pengukuran Kualitas Udara

Upaya untuk melakukan pemantauan kualitas udara dilakukan dengan metode *passive sampler* dan *active air sampling* menggunakan otomatis kontinue. Kedua metode ini memiliki peran sangat penting dalam upaya pemantauan lingkungan yang dilakukan, baik untuk penilaian lingkungan jangka panjang atau deteksi polutan secara langsung (Tisch Env, 2022).

1. **Metode *passive sampler*** merupakan suatu metode yang dilakukan dengan menggunakan sistem penyerapan gas secara difusi melalui media yang dipaparkan dalam waktu tertentu tanpa menggunakan pompa penghisap, dengan memanfaatkan sifat fisis gas yang berdifusi dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi rendah. Metode ini biasa digunakan untuk mengukur parameter Sulfur Dioksida (SO_2) dan Nitrogen Dioksida (NO_2) (DLHK Kab.Mamuju, 2023). Metode ini biasanya digunakan untuk tujuan pemantauan lingkungan jangka Panjang, pemantauan kepatuhan dan study epidmiologi (Tisch Env, 2022)

2. **Metode *active air sampling*** salah satunya menggunakan sistem otomatis kontinue. System ini merupakan pemantauan kualitas udara menggunakan *Air Quality Monitoring Station (AQMS)* yang berlangsung secara terus menerus selama 24 jam dan setiap hari. Pengambilan sampel udara dilakukan menggunakan pompa mekanis untuk menyedot sejumlah udara melalui alat pengumpul seperti filter atau tabung menyerap dengan laju aliran udara yang terhisap terkendali. Metode ini biasanya digunakan dengan tujuan memantau Tingkat polutan di lingkungan industry, menyediakan informasi tanggap darurat dan melakukan pemantauan kualitas udara perkotaan (Tisch Env, 2022)

1.3.2 *Index Quality Air (IQAir)*

Laporan mengenai *Air Quality Index (AQI)* menggambarkan kualitas udara di seluruh dunia, berasal dari lebih 30.000 stasiun pemantau yang dioperasikan oleh lembaga penelitian, badan pemerintah, universitas dan fasilitas pendidikan, organisasi nirlaba, perusahaan swasta dan ilmuwan di 134 negara secara realtime. Parameter yang diukur adalah $PM_{2.5}$ tahunan dan menerapkan panduan pengukuran dan standar nilai ambang batas $PM_{2.5}$ yang ditetapkan oleh WHO (IQAir, 2023). Hasil pemantauan diintegrasikan melalui laman <https://www.iqair.com/> yang dapat diakses secara luas oleh masyarakat dunia. Informasi ini juga ditautkan ke lebih dari 7.000 laman khusus yang memuat data dan informasi kualitas udara real time perkotaan dunia.

1.3.3 Indeks Kualitas Udara (IKU)

Indeks Kualitas Lingkungan Hidup (IKLH) merupakan nilai yang menggambarkan kualitas lingkungan hidup dalam suatu wilayah pada waktu tertentu, yang merupakan nilai komposit dari Indeks Kualitas Air, Indeks Kualitas Udara, indeks Kualitas Lahan dan Indeks Kualitas Air Laut. Indeks Kualitas Udara (IKU) merupakan ukuran yang menggambarkan kualitas udara yang merupakan nilai komposit parameter udara dalam suatu wilayah pada waktu tertentu. Lokasi pemantauan dilakukan di lokasi dengan

kriteria : daerah padat transportasi yang meliputi jalan utama dengan lalu lintas padat mewakili kawasan transportasi, daerah kawasan industri, permukiman padat penduduk mewakili kawasan permukiman serta kawasan perkantoran atau komersial yang tidak terpengaruh langsung transportasi mewakili kawasan perkantoran dan komersial. Perhitungan IKU dilakukan di tingkat Kabupaten, Provinsi dan Nasional. Metode yang digunakan manual dan otomatis. Parameter yang diukur di udara ambien adalah Sulfur Dioksida (SO_2) dan Nitrogen Dioksida (NO_2). Kategori IKU yang ditetapkan meliputi : sangat kurang, kurang, sedang, baik dan sangat baik (KLHK RI, 2021)

1.3.4 Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU)

Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) merupakan angka yang tidak mempunyai satuan yang menggambarkan kondisi mutu udara ambien di lokasi tertentu, yang didasarkan kepada dampak terhadap kesehatan manusia, nilai estetika dan makhluk hidup lainnya. Parameter yang diukur meliputi : Partikel PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$, dan unsur gas meliputi CO , NO_2 , SO_2 , O_3 dan HC yang ditentukan dengan tahapan perhitungan, pelaporan dan penetapan (KLHK, 2020). Saat ini sudah terpasang lebih dari 45 stasisun *Air Quality Monitoring Station* (AQMS) pemantau di seluruh wilayah Indonesia dan jumlahnya akan terus diupayakan untuk ditingkatkan (PPID KLHK , 2021). Nilai ISPU pada rentang 0-300, apabila level ISPU menunjukkan nilai 0-50 merupakan kategori baik dan tidak menimbulkan risiko kesehatan akan tetapi jika level ISPU lebih dari 300 termasuk kategori berbahaya. Kategori ISPU yang ditetapkan meliputi baik, sedang, tidak sehat, sangat tidak sehat dan berbahaya. Hasil penentuan kategori kemudian ditampilkan ke publik melalui laman <http://iku.menlhk.go.id/aqms/> setiap jam selama 24 jam untuk parameter $\text{PM}_{2,5}$ dan minimal dua kali dalam satu hari untuk parameter PM_{10} , SO_2 , CO , O_3 , NO_2 , dan HC (KLHK, 2020). Melalui ISPU, masyarakat dapat memantau informasi tentang mutu kualitas udara yang tepat dan akurat di lingkungan sekitarnya secara realtime (PPID KLHK , 2021)

DAFTAR PUSTAKA

- Betapramestiasia . (2023). <https://lab.id/pengertian-kualitas-udara>. Retrieved from <https://lab.id/pengertian-kualitas-udara>
- AirNow. (n.d.). <https://www.airnow.gov/education/students/clean-and-dirty-air-part-one/>. Retrieved from <https://www.airnow.gov/education/students/clean-and-dirty-air-part-one/>
- Ardiansyah. (2022). *Direktorat Jenderal Pelayanan Kesehatan Kemenkes RI*. Retrieved from <https://yankes.kemkes.go.id/> : https://yankes.kemkes.go.id/view_artikel/575/oksigen-sebagai-kebutuhan-dasar-manusia#:~:text=Dari%20total%20sekitar%2011.000%20iter,jika%20dinominalkan%20dalam%20bentuk%20rupiah
- Astell-Burt, T., J.Maynard, M., Lenguerrand, E., J.Whitrow, M., R.Moloadi, O., & Harding, S. (2013). Effect of air pollution and racism on ethnic differences in respiratory health among adolescents living in an urban environment. *Health & Place*, 23, 171-178. doi:<https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2013.07.004>
- Chowdhury, S., Marginean, I., Chaudhary, E., Upadhyay, A., & Aunan, K. (2024). Chapter 13 - Impact of the changing climate on air pollution, heat stress and human health. In *Health and Environmental Effects of Ambient Air pollution* (pp. 331-359). doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-443-16088-2.00009-0>
- Clarity. (2023). https://www-clarity-io.translate.goog/blog/what-is-air-quality-monitoring-why-is-it-important?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=id&_x_tr_hl=id&_x_tr_pto=rq#:~:text=Air%20quality%20monitoring%20refers%20to,the%20state%20of%20the%20air. Retrieved from https://www-clarity-io.translate.goog/blog/what-is-air-quality-monitoring-why-is-it-important?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=id&_x_tr_hl=id&_x_tr_pto=rq#:~:text=Air%20quality%20monitoring%20refers%20to,the%20state%20of%20the%20air

- DLH Kota Semarang. (2019). <http://dlh.semarangkota.go.id>. Retrieved 2024, from <http://dlh.semarangkota.go.id/jenis-dan-tingkatan-pencemaran-yang-merusak-lingkungan>
- DLH Kota Semarang. (2020, November 19). <https://dlh.semarangkota.go.id/>. Retrieved from <https://dlh.semarangkota.go.id/seperti-apa-ya-ciri-ciri-udara-yang-tercemar/#:~:text=Udara%20yang%20baik%20tidak%20dapat,berbahaya%20yang%20bercampur%20dengan%20ok%20sigen>
- DLHK Kab.Mamuju. (2023). <https://dlhk.mamujukab.go.id/berita-5195-dlhk-kabupaten-mamuju-menggunakan-metode-passive-sampler-untuk-mengukur-parameter-iku.html#:~:text=Menurut%20KLH%20RI%2C%20metode%20passive,konsentrasi%20tinggi%20ke%20konsentrasi%20rendah>. Retrieved from <https://dlhk.mamujukab.go.id/berita-5195-dlhk-kabupaten-mamuju-menggunakan-metode-passive-sampler-untuk-mengukur-parameter-iku.html#:~:text=Menurut%20KLH%20RI%2C%20metode%20passive,konsentrasi%20tinggi%20ke%20konsentrasi%20rendah>
- Duque, L. A., Acuna, R. A., Munn, T., Munoz, . C., Johnson, S., Gilbert, M., & Hayes-Conroy, A. (2024). What matters beyond particle matter?: Examining air pollution's synergistic effects on bodies and health through Bio3Science in Medellin. *Social Science & Medicine*, 361. doi:<https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2024.117331>
- Edwards, L., Wilkinson, P., Rutter, G., & Milojevic, A. (2022). Health effects in people relocating between environments of differing ambient air pollution concentrations: A literature review. *Environmental Pollution*, 292 Part A. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118314>
- Gayatri, R., Mahboob, S., Govindarajan, M., Al-Ghanim, K. A., Ahmed, Z., Al-Mulhm, N., . . . Vijayalakshmi, S. (2021). A review on biological carbon sequestration: A sustainable solution for a cleaner air environment, less pollution and lower health

- risks. *Journal of King Saud University-Science*, 33(2). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.101282>
- Han, D., Yan, S., & Sun, X. (2024). Research on the air pollution reduction effect of winter clean heating policy. *Urban Climate*, 53. doi:<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101760>
- IQAir. (2016). <https://www.iqair.com/id/newsroom/new-focus-air-pollution-and-worker-productivity>. Retrieved from <https://www.iqair.com/id/newsroom/new-focus-air-pollution-and-worker-productivity>
- IQAir. (2017). <https://www.iqair.com/id/newsroom/economic-cost-of-air-pollution-in-canada-reaches-huge-usd40-billion-in-one-year>. Retrieved from <https://www.iqair.com/id/newsroom/economic-cost-of-air-pollution-in-canada-reaches-huge-usd40-billion-in-one-year>
- IQAir. (2023). <https://www.iqair.com/id/world-air-quality-report>. Retrieved from <https://www.iqair.com/id/world-air-quality-report>
- Kementerian Kesehatan RI. (2023). Permenkes No 2 tahun 2023 tentang Peraturan Pelaksanaan PP No 66 Tahun 2014 tentang Kesehatan Lingkungan. DKI Jakarta: Kementerian Hukum dan HAM.
- KLHK. (2020). Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan RI No P.14/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2020 tentang Indeks Standar Pencemar Udara. DKI Jakarta: Dirjen Peraturan Perundang-Undangan KemenkumHAM RI.
- KLHK RI. (2021). PermenLHK No 27 Tahun 2021 tentang Indeks Kualitas Lingkungan Hidup. DKI Jakarta : Dirjen Peraturan Perundang-Undangan KemenkumHAM RI.
- Kyrychenko, O. (2024). Health benefits of air pollution reduction: Evidence from economic slowdown in India. *Economic & Human Biology*, 55. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ehb.2024.101437>
- Murachman, B., Sarto, & Setyawati, E. (2013). *Teknologi Pengendalian Pencemaran Udara pada Industri* (I ed.). DI Yogyakarta: Sekolah Pascasarjana Universitas Gadjah Mada.

- Nandy. (n.d.). *Pencemaran Lingkungan : Pengertian, Contoh, Dampak dan Cara Mengatasi* . Retrieved from <https://www.gramedia.com/literasi/pencemaran-lingkungan/>:
<https://www.gramedia.com/literasi/pencemaran-lingkungan/>
- Nazelle, A. d., Rodriguez, D. A., & Crawford-Brown, D. (2009). The built environment and health: Impacts of pedestrian-friendly designs on air pollution exposure. *Science of The Total Environment*, 407(8), 2525-2535.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.01.006>
- Pasla, B. N. (2023). <http://bnp.jambiprov.go.id/pencemaran-lingkungan>. Retrieved 2024, from <http://bnp.jambiprov.go.id/pencemaran-lingkungan-pengertian-jenis-dampak-dan-pencegahan>
- Pluhar, Z. F., F. Piko, B., Kovacs, S., & Uzzoli, A. (2009). "Air pollution is bad for my health": Hungarian children's knowledge of the role of environment in health and disease. *Health & Place*, 15(1), 239-246.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2008.05.005>
- PPID KLHK . (2021). [https://ppid.menlhk.go.id/berita/siaran-pers/5850/melalui-ispu-masyarakat-dapat-mengetahui-kualitas-udara#:~:text=Parameter%20yang%20digunakan%20dalam%20perhitungan,%2C%20dan%20Hidrokarbon%20\(HC\).](https://ppid.menlhk.go.id/berita/siaran-pers/5850/melalui-ispu-masyarakat-dapat-mengetahui-kualitas-udara#:~:text=Parameter%20yang%20digunakan%20dalam%20perhitungan,%2C%20dan%20Hidrokarbon%20(HC).)
Retrieved from [https://ppid.menlhk.go.id/berita/siaran-pers/5850/melalui-ispu-masyarakat-dapat-mengetahui-kualitas-udara#:~:text=Parameter%20yang%20digunakan%20dalam%20perhitungan,%2C%20dan%20Hidrokarbon%20\(HC\).](https://ppid.menlhk.go.id/berita/siaran-pers/5850/melalui-ispu-masyarakat-dapat-mengetahui-kualitas-udara#:~:text=Parameter%20yang%20digunakan%20dalam%20perhitungan,%2C%20dan%20Hidrokarbon%20(HC).)
- Purushothaman, S. K., Selvam, J., & Muthunarayanan, V. (2021). Ambient indoor air pollution and its consecutive effect on environment materials and health. *Materialstoday : Proceedings*, 37 (Part 2), 504-508.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.483>
- Sannoh, F., Fatmi, Z., Carpenter, D. O., Santoso, M., Siddique, A., Khan, K., . . . Khwaja, H. A. (2024). Air pollution we breathe:

- Assessing the air quality and human health impact in a megacity of Southeast Asia. *Science of The Total Environment*, 942. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173403>
- Thurston, G. D. (2017). Outdoor Air Pollution: Sources, Atmospheric Transport, and Human Health Effects. In G. D. Thurston, & S. R. Quah (Ed.), *International Encyclopedia of Public Health (Second Edition)* (Second ed., pp. 367–377). Academic Press. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803678-5.00320-9>
- Tisch Env. (2022). https://tisch--env-com.translate.goog/difference-between-passive-and-active-air-sampling/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=id&_x_tr_hl=id&_x_tr_pto=rq#:~:text=Passive%20air%20sampling%20collects%20air,its%20simplicity%20and%20low%20cost. Retrieved from https://tisch--env-com.translate.goog/difference-between-passive-and-active-air-sampling/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=id&_x_tr_hl=id&_x_tr_pto=rq#:~:text=Passive%20air%20sampling%20collects%20air,its%20simplicity%20and%20low%20cost.
- Universitas Bakrie. (2024). <https://bakrie.ac.id/articles/623-bagaimana-sebenarnya-parameter-kualitas-udara-baca-selengkapnya>. Retrieved from <https://bakrie.ac.id/articles/623-bagaimana-sebenarnya-parameter-kualitas-udara-baca-selengkapnya.html#:~:text=Kualitas%20udara%20merujuk%20pada%20kondisi,lingkungan%2C%20dan%20ekosistem%20secara%20keseluruhan>.
- Walsh, M. (2019). Mobile Source Related Air Pollution: Effects on Health and the Environment. *Encyclopedia of Environmental Health*, 436-442. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11661-6>
- Weichenthal, S., L.Crouse, D., Pinault, L., Godri-Pollitt, K., LAvigne, E., Evans, G., . . . T.Burnett, R. (2016). Oxidative burden of fine particulate air pollution and risk of cause-specific mortality in the Canadian Census Health and Environment Cohort (CanCHEC). *Environmental Research*, 146, 92-99. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.12.013>

- WHO. (n.d.). <http://dlh.semarangkota.go.id>. Retrieved from <http://dlh.semarangkota.go.id>
- Yankes Kemenkes RI. (2024). <https://yankes.kemkes.go.id/>. Retrieved from https://yankes.kemkes.go.id/view_artikel/3608/dampak-pencemaran-udara-terhadap-kesehatan
- Zhou, L., Fan, J., Hu, M., & Yu, X. (2024). Clean air policy and green total factor productivity: Evidence from Chinese prefecture-level cities. *Energy Economics*, 133. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.107512>

BAB 2

METODE PENGUKURAN POLUTAN UDARA

2.1 Pendahuluan

Kualitas udara memiliki banyak dampak terhadap berbagai sektor kehidupan, seperti kesehatan, ekonomi, sosial dan budaya. Selain berbahaya untuk manusia, kualitas udara yang buruk memberikan konsekuensi kepada keseimbangan ekologi, perubahan iklim, produktivitas dan efisiensi energi (Imam, Adam, Dev, & Nesa, 2024). Karena hal tersebut, maka kualitas udara perlu di monitoring secara berkala dan berkelanjutan. Monitoring kualitas udara dilakukan guna mengetahui pola polusi udara, mengidentifikasi sumber pencemar, serta merumuskan strategi mitigasi yang efektif.

Sistem monitooring dari waktu ke waktu semakin berkembang. Pada awalnya pemantauan kualitas udara mengandalkan kondisi bioindikator yang ada di lingkungan. Kemudian berkembang menjadi pemantauan secara manual melalui pengambilan sampel udara dan menganalisis di laboratorium. Hingga kini sistem pemantauan yang bersifat digital yang memanfaatkan teknologi informasi baik dalam sampling, pengolahan data hingga distribusi data ke publik secara real time.

Berdasarkan data yang diperoleh dari sistem pemantauan kualitas udara, para stakeholder seperti pemerintah, badan lingkungan, dan masyarakat dapat mengambil tindakan yang tepat untuk mengurangi polusi udara. Secara khusus tujuan utama dari monitoring kualitas udara adalah (Imam, Adam, Dev, & Nesa, 2024) :

1. Memantau tingkat pencemar udara di berbagai lokasi dan mengetahui pola distribusi pencemar udara.
2. Menilai kualitas udara terhadap bakumutu yang telah ditetapkan guna melindungi kesehatan manusia dan lingkungan.

3. Mengidentifikasi sumber-sumber polusi udara untuk merencanakan tindakan-tindakan preventif yang efisien dan efektif
4. Memberikan informasi kepada masyarakat tentang kualitas udara dan dampaknya terhadap kesehatan dalam mendorong keterbukaan informasi kepada publik dan upaya perlindungan pada kesehatan dan keselamatan masyarakat.
5. Memberikan dasar untuk pengembangan kebijakan dan strategi pengelolaan kualitas udara yang efektif

Untuk memenuhi tujuan tersebut, perlu mendapat dukungan dari berbagai pihak dan regulasi yang jelas terkait dengan teknis pengukuran, sistem pemantauan, dan pemanfaatan data hasil pemantauan.

2.2 Dasar Hukum Pengukuran Kualitas Udara

Pengukuran kualitas udara dilakukan dengan mengacu pada regulasi yang berlaku di Indonesia. Regulasi dalam pengukuran kualitas udara diklasifikasikan menjadi 3 yaitu, regulasi pengukuran kualitas udara ambien, regulasi pengukuran sumber bergerak dan regulasi untuk pengukuran sumber statis (tidak bergerak). Regulasi tersebut adalah sebagai berikut:

1. Kualitas Udara ambien
 - a. PP No. 22 tahun 2021 tentang Penyelenggaraan perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup
 - b. Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No: 50/1996 tentang Baku tingkat kebauan
 - c. Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No: 49/1996 tentang Baku tingkat getaran
 - d. Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No: 48/1996 tentang Baku tingkat kebisingan
 - e. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No: 12/2010 tentang Pelaksanaan pengendalian pencemaran udara di daerah
 - f. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No: 14/2020 tentang Indeks Standar Pencemar Udara

2. Kualitas Udara Pada Sumber Bergerak
 - a. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No: 8/2023 tentang Penerapan Baku Mutu Emisi Kendaraan Bermotor Kategori M, Kategori N, Kategori O & Kategori L
 - b. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No: 4/2009 (tipe baru)
 - c. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No.23/2012 (untuk motor baru)
3. Kualitas Udara Pada Sumber Statis/Tidak Bergerak
 - a. Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No.13/1995 (Semen, Besi Baja, Pulp and Paper, dan kegiatan dan lain-lain)
 - b. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 7/2007 (Ketel uap)
 - c. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 13/2009 (Migas)
 - d. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 17/2008 (Keramik)
 - e. Permen LH No. 21/2008 (PLTU)
 - f. Kep Ka BAPEDAL No 03/2005 (Baku Mutu Emisi Insinerator)
 - g. Permen LH No 56 tahun 2015 (Insinerator Yankes)
 - h. Permen LHK No 17 tahun 2019 (Baku Mutu Emisi Pupuk)
 - i. Permen LHK No 11 tahun 2021 (Mesin dengan pembakaran dalam)

Selain baku mutu yang ditetapkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup, terdapat pula regulasi yang ditetapkan oleh kementerian kesehatan yaitu terkait kualitas udara dalam ruangan (*indoor air quality*). Sedangkan standar pengukuran kualitas dapat mengacu pada SNI (Standar Nasional Indonesia) khusus untuk pengukuran kualitas udara . Hingga saat ini tercatat 63 standar nasional terkait kualitas udara, diantaranya SNI 19-1422-1989 tentang cara uji kadar debu pada cerobong udara, SNI 19-1429-1989 tentang Cara pengambilan contoh gas dari cerobong, SNI 19-1430-1989 tentang Gas buang, Cara uji kadar hidrogen klorida dan lain-lain.

2.3 Pengukuran Kualitas Udara

2.3.1 Bakumutu Kualitas Udara

Pengukuran kualitas udara diklasifikasikan menjadi 2 bakumutu, yaitu :

1. Bakumutu kualitas udara ambien

Bakumutu ambien adalah batas maksimal kandungan zat pada udara bebas. Bakumutu ini digunakan untuk mengendalikan tingkat pencemaran pada suatu wilayah. Tujuan dari bakumutu ini adalah untuk menjaga kualitas udara dan melindungi kesehatan manusia. Bakumutu udara ambien diklasifikasikan menjadi 2 yaitu standar ambien di *outdoor* (luar ruangan) yang ditetapkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup, dan bakumutu ambien di *indoor* (dalam ruangan) yang ditetapkan oleh Kementerian kesehatan.

2. Bakumutu kualitas udara emisi

Bakumutu emisi adalah batasan maksimal kandungan polutan yang boleh dibuang ke lingkungan/udara bebas. Bakumutu emisi ini sangat dipengaruhi dengan jenis bahan bakar yang digunakan serta proses pembakaran yang dilakukan. Bakumutu emisi diklasifikasikan menjadi 2, yaitu Bakumutu emisi sumber bergerak seperti dari sektor transportasi dan standar emisi sumber statis/tidak bergerak, seperti bakumutu untuk emisi cerobong industri. Pada bakumutu emisi kendaraan bermotor dikenal standar emisi uni eropa (Euppean Union-EU). Standar ini mendorong perbaikan sektor transportasi untuk memanfaatkan teknologi ramah lingkungan. Kebijakan ini dimulai sejak tahun 1990 EU dikenal dengan Euro 1 mengeluarkan kebijakan yang mewajibkan penggunaan katalis untuk mobil bensin tujuannya untuk memperkecil kadar bahan pencemar yang diemisikan oleh kendaraan bermotor. Pada EU 1 mewajibkan penggunaan bensin tanpa timbal. Tahun 1996 dikeluarkan kebijakan yang lebih ketat yang dikenal dengan standar EU 2. Pada EU 2 di fokuskan untuk mobil disel yang diwajibkan menggunakan solar dengan kadar sulfur maksimum 500 ppm. Selanjutnya dikeluarkan EU 3 dan 4 yang lebih memperketat kandungan

sulfur pada kendaraan mesin bensin dan solar, sedangkan untuk kendaraan truk disel diatur dalam EU 5. Pada EU 4 ditetapkan kandungan nitrogen oksida tidak lebih dari 80 mg/km untuk mesin bensin, 250 mg/km untuk mesin disel dan 25 mg/km partikulat matter untuk mesin disel. Penerapan dari standar EU ini harus diikuti dengan perbaikan kualitas bahan bakar dan teknologi mesin kendaraan.

2.3.2 Skala Pengukuran

Pengukuran kualitas udara mengikuti 2 skala pengukuran yaitu :

1. Volumetrik, skala pengukuran kualitas udara untuk parameter dalam bentuk gas, seperti CO, CO₂, NO, SO₂ dan lain-lain. Skala pengukuran ini berdampak pada metode dan jenis alat ukur yang digunakan. Alat ukur yang digunakan berupa gas sampler.
2. Grafimetrik, skala pengukuran kualitas udara untuk parameter dalam bentuk partikulat, seperti PM₁₀, PM_{2,5}.

3.3.3 Metode Sampling Kualitas Udara

Pada pengukuran kualitas udara dilakukan contoh/sampel udara pada lokasi yang representatif. Proses pengambilan contoh/sampel dapat dilakukan dengan berbagai metode yaitu :

1. Pengambilan sampel berdasarkan periode waktu
 - a. *Grab sampling*, pengambilan contoh uji yang dilakukan dalam satu waktu sesaat.
 - b. *Long-term sampling*, pengambilan contoh uji yang dilakukan dengan durasi pengukuran 8 jam.
 - c. *Contineuos sampling*, pengambilan contoh uji dalam durasi lebih dari 8 jam.
 - d. *Short-term sampling*, pengambilan contoh uji dalam durasi singkat misalnya 15 menit.
2. Berdasarkan penempatan/lokasinya,
 - a. *Personal sampling*, digunakan untuk mengukur pajanan inividu seperti pajanan yang diterima pada pekerja. *Personal sampling* dilakukan pada area "breathing

zone” yaitu area disekitar saluran pernapasan (berjarak antara 30 cm di sekitar mulut dan hidung).

- b. Area sampling, digunakan untuk mengukur pajanan di area kerja atau pemukiman atau area lainnya. Sampling dilakukan pada area yang akan diukur, dapat dilakukan pada luar ruangan atau di alam ruangan.
3. Pengambilan sampel berdasarkan keberadaan aliran udara menuju media sampling.
 - a. *Active Sampling*, pengambilan contoh udara dengan memanfaatkan peralatan mekanik, seperti pompa untuk mengalirkan udara ke media sampling. Ada tiga elemen utama, yaitu *Calibrator* berfungsi untuk memperlihatkan berapa banyak udara yang telah didorong atau diisap, *Sampling pump* berfungsi untuk mendorong atau mengisap udara. *Sampling media* berfungsi untuk mengumpulkan kontaminan udara.
 - b. *Passive Sampling*, pengambilan contoh udara tanpa menggunakan peralatan mekanik seperti pompa. Proses perpindahan aliran udara dilakukan secara fisik, yaitu difusi secara alami ke lapisan udara statik, atau media sampling ataupun secara proses permeasi melalui membrane.

Selain penetapan metode sampling, kondisi meteorologi menjadi faktor yang mempengaruhi distribusi polutan. Faktor meteorologi antara lain meliputi, a) kecepatan angin, merupakan faktor yang mempengaruhi arah penyebaran dan akumulasi bahan pencemar. Semakin tinggi kecepatan angin maka semakin luas sebaran daerah yang terpapar polusi udara sehingga konsentrasi polutan di area dekan sumber menjadi lebih kecil. Kecepatan angin yang rendah menyebabkan penyebaran udara menjadi lebih kecil dan polutan cenderung terakumulasi di wilayah yang berdekatan dengan lokasi sumber, sehingga di wilayah tersebut konsentrasinya akan menjadi lebih tinggi (Zulkifli Ibrahim, Boekoesoe, & Lalu, 2022). b) Suhu udara, suhu memiliki pengaruh terhadap konsentrasi polutan, pada suhu tinggi mempengaruhi stabilitas atmosfer, peningkatan suhu menyebabkan terjadinya perenggangan

udara di atmosfer. Suhu udara memiliki hubungan negative terhadap konsentrasi polutan. Semakin tinggi suhu udara, maka semakin rendah konsentrasi polutan yang terdapat di atmosfer (Turyanti & Santikayasa, 2006). c) Kelembaban udara, kelembapan udara konsentrasi polutan di udara. Kondisi kelembapan tinggi akan menyebabkan kadar molekul uap air bereaksi dengan senyawa yang ada di atmosfer dan menyebabkan munculnya polutan sekunder dan pada kelembapan rendah (<60%) menyebabkan konsentrasi total partikulat suspended solid semakin tinggi (Turyanti & Santikayasa, 2006).

2.3.4 Alat Pengukur Kualitas Udara

Pengukuran kualitas udara membutuhkan peralatan. Jenis alat yang digunakan berbeda-beda sesuai dengan jenis parameter yang diukur. Seiring dengan perkembangan teknologi, alat ukur parameter kualitas udara, ada yang bersifat konvensional dan ada yang modern. Berikut ini, peralatan yang digunakan untuk pengukuran parameter kualitas udara:

1. Alat Pengukuran Konvensional, diantaranya (Fatma, 2010):
 - a. Pengukur Partikulat (PM):
 - 1) Gravimetric Sampler, prinsip kerja pada alat ini adalah konsentrasi partikulat dihitung berdasarkan berat partikulat yang tertangkap pada filter selama durasi waktu tertentu.
 - 2) Impactor, berfungsi memisahkan partikulat berdasarkan ukuran dengan mengarahkannya ke substrat berlapis minyak silikon atau kertas selanjutnya dihitung untuk menentukan distribusi ukuran partikulat.
 - 3) TSP (*Total Suspended Particles*) Sampler, alat ini mengumpulkan semua partikulat diudara tanpa memisahkan partikel berdasarkan ukuran.
 - b. Pengukur Gas
 - 1) Tube Detector
Tube-detector atau tube colorimetric digunakan untuk mengukur konsentrasi gas tertentu dengan

menghitung perubahan warnatabuang reaksi yang berisi reagen kimia saat terpapar gas target.

2) Gas Detector Tubes

Alat ini berupa tabung khusus yang berisi larutan kimia yang berubah warna ketika terpapar gas tertentu. Konsentrasi gas diukur dengan membandingkan warna larutan kimia dengan skala yang diketahui.

2. Alat Pengukuran Modern, peralatan yang digunakan merupakan modifikasi dari peralatan konvensional. Peralatan tersebut diantaranya adalah:

a. Sensor-sensor Cerdas (*Smart Sensors*) (Kurniawan, 2017)

1) Sensor Partikulat

Alat berupa sensor yang digunakan untuk mendeteksi dan mengukur konsentrasi partikulat diudara secara real time. Sensor memanfaatkan teknologi elektromagnetik dalam mengukur partikulat dan terhubung ke jaringan untuk memantau secara kontinue.

2) Sensor Gas

Alat berupa sensor yang digunakan untuk mendeteksi berbagai gas polutan seperti nitrogen dioksida (NO_2), karbon monoksida (CO), ozon (O_3), dan lainnya. Alat menggunakan sensor kimia, elektrokimia, atau fotoionisasi untuk mengukur konsentrasi gas.

b. Pemantauan Berbasis DNA (*DNA-Based Monitoring*)

1) Metagenomics

Alat ini digunakan untuk mengidentifikasi dan memantau mikroorganisme yang ada diudara dengan menganalisis sampel DNA. Alat dapat digunakan untuk memahami populasi bakteri atau jamur diudara dan memantau potensi ancaman terhadap kesehatan manusia.

2) DNA Barcoding

Alat digunakan untuk mengidentifikasi spesies organisme di udara berdasarkan urutan DNA. Ini dapat

digunakan untuk memantau populasi serangga, alergen, atau organisme patogen dalam udara.

c. Remote Sensing (Pemantauan Jarak Jauh)

1) Satelit

Satelit digunakan untuk pemantauan polusi udara secara luas dan global. Alat ini dapat mengukur konsentrasi gas seperti CO₂, SO₂, dan NO₂ dari luar angkasa.

2) Drone

Drone dapat digunakan untuk pemantauan udara dalam skala yang lebih lokal. Drone dilengkapi dengan sensor untuk mengukur parameter udara tertentu di lokasi yang spesifik.

2.4 Lokasi Pengukuran Kualitas Udara Ambien

Pada setiap kegiatan pengukuran kualitas udara ambien didahului dengan berbagai persiapan diantaranya penentuan lokasi sampling dan persiapan peralatan yang digunakan. Kriteria lokasi sampling sebagai berikut:

1. Merupakan wilayah dengan indikasi konsentrasi pencemar tinggi atau diwilayah tersebut terdapat aktivitas dengan emisi tinggi.
2. Merupakan wilayah dengan kepadatan penduduk yang tinggi
3. Diperuntukan sebagai kawasan studi.
4. Merupakan wilayah yang diproyeksikan menjadi daerah yang terdampak pencemaran untuk menentukan efek akibat perkembangan wilayah.
5. Merupakan perwakilan dari seluruh wilayah studi.
6. Penetapan titik sampling harus mempertimbangkan aspek meteorologi yang meliputi arah angin, kecepatan angin kelembaban udara dan temperature.
7. Lokasi pemantauan ditetapkan di wilayah dengan arah angin dominan. Pada lokasi yang berada di arah angin dominan pengukuran minimum di lakukan pada 2 titik.

Hal-hal yang perlu dihindari dalam pengukuran kualitas udara ambien adalah:

1. Hindari lokasi yang dapat mengubah konsentrasi akibat adanya adsorpsi atau desorpsi (seperti dekat dengan pepohonan atau gedung-gedung)
2. Hindari lokasi yang terdapat pengganggu kimia terhadap bahan pencemar yang akan diukur.
3. Hindari lokasi yang terdapat pengganggu fisika yang dapat menghasilkan sesuatu yang dapat mempengaruhi hasil pengukuran. Misalnya hindari lokasi yang dekat dengan incinerator, jaringan listrik bertegangan tinggi, dll
4. Hindari peletakan peralatan pengukuran berdekatan dengan gedung /bangunan/ dinding.
5. Untuk pengukuran yang bersifat berkelanjutan, hindari lokasi yang dinamis/sangat cepat terjadi perubahan pemanfaatan ruang.

2.5 Lokasi Pengukuran Kualitas Udara Emisi

Untuk pengukuran emisi tidak bergerak harus memenuhi ketentuan sebagai berikut:

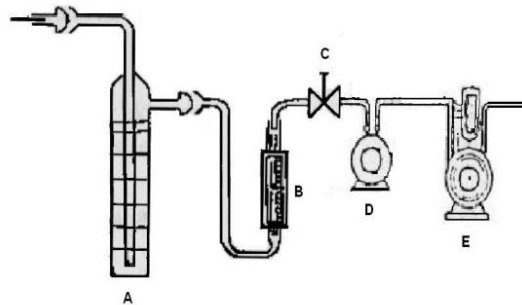
1. Mendeteksi minimal semua parameter yang terdapat dalam baku mutu yang ditetapkan sesuai dengan jenis aktivitas industrinya
2. Titik pengukuran berada pada lokasi yang berjarak 8 kali diameter cerobong dari belokan bagian bawah atau 2 kali diameter dari ujung atas cerobong.
3. Titik pantau letaknya harus mudah terlihat dalam pemeriksaan kualitas udara.
4. Pengukuran harus berada pada lokasi yang relatif kuat untuk menjamin keamanan petugas dan alat ukur yang digunakan.

2.6 Teknis Pengukuran Kualitas Udara Ambien

2.6.1 Pengukuran Gas

Ada 4 teknik pengambilan sampel untuk pencemar dalam bentuk gas, yaitu:

1. Teknik absorpsi, teknik ini memanfaatkan kemampuan gas pencemar terabsorpsi/bereaksi dengan larutan pereaksi spesifik. Peralatan yang digunakan pada teknik ini berupa impinger. Parameter yang diukur diantaranya adalah : Sulfur Dioksida (SO_2), Nitrogen Dioksida (NO_2), Oksidan (Ox), Amoniak (NH_3), Hidrogen sulfida (H_2S).



Gambar 2.1. Peralatan pengambilan sampel gas dengan Impinger

A = botol penyerap

D = pompa hisap

B = flow meter

E = gas meter tipe kering

C = kran pengatur

dgn rentang 1L/putaran

2. Teknik desorpsi, teknik ini memanfaatkan kemampuan gas pencemar terdesorpsi pada permukaan pada adsorben. Jenis adsorben yang biasa digunakan adalah karbon aktif.
3. Teknik *Evacuated*, teknik ini menggunakan alat penampung gas berupa botol inert yang sebelumnya dilakukan proses vakum. Teknik ini sering dimanfaatkan dalam pengukuran gas pencemar yang memiliki konsentrasi tinggi.
4. Teknik *Direct Reading*, teknik ini menggunakan alat yang dapat menyatakan secara langsung konsentrasi pencemar di udara. Pembacaan konsentrasi dengan menggunakan sensor terhadap sifat kimia dan fisik pencemar.

2.6.2 Pengukuran Partikulat

Pengukuran partikulat dilakukan dengan menggunakan alat HVS (*high volume sampling*). Teknik sampling dengan alat HVS mengacu pada SNI 19-7119.3-2005. HVS terdiri dari *filter holder* dan *inlet cascade impactor filter Whatman Glass Microfibre Filters* ukuran 20,3 x 25,4 cm. Prinsip kerja dari alat ini adalah udara dihisap oleh pompa vakum sehingga udara akan melalui filter dan partikulat yang terhisap akan terkumpul pada permukaan filter. Laju alir udara dijaga 1200L/menit selama 24 jam sesuai dengan periode pengukuran. Setelah selesai sampling partikulat di permukaan filter kemudian ditimbang dengan timbangan analitik dalam ruangan bersuhu (15-27)° C dan kelembaban 0-50% (BSN, 2015). Konsentrasi partikulat dinyatakan dalam satuan $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ dan diperoleh dengan rumus sebagai berikut (Rohmah, Salim, Hindratmo, Lestari, & Nelson2, 2018):

$$C = \frac{(W2-W1) \times 10^6}{V}$$

Keterangan:

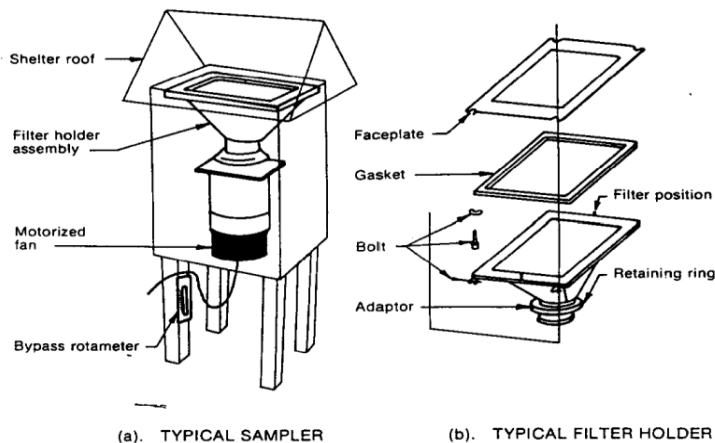
C : konsentrasi massa partikel tersuspensi ($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)

W1 : berat filter awal (gram)

W2 : berat filter akhir (gram)

V : volume contoh uji udara (m^3)

10^6 : konversi gram ke μg .



Gambar 2.2. High Volume Air Sampler

DAFTAR PUSTAKA

- BSN. (2015). *Standar Nasional Indonesia 19-7119.3-20215: Cara Uji Partikel Tersuspensi Total Menggunakan Peralatan HVAS dengan Metoda Gravimetri*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional Republik Indonesia.
- Fatma, L. (2010). *Bahaya Kimia : Sampling dan Pengukuran Kontaminan Kimia di Udara*. Jakarta: EGC.
- Imam, M., Adam, S., Dev, S., & Nesa, N. (2024). Air quality monitoring using statistical learning models for sustainable environment. *Intelligent Systems with Applications*; 22.
- Kurniawan, A. (2017). Pengukuran Parameter Kualitas Udara(Co, No2, So2, O3 Dan Pm10) Di Bukit Kototabang Berbasis Ispu. *Jurnal Teknosains*; 7(1), 1-3.
- Rohmah, I., Salim, C., Hindratmo, B., Lestari, R. P., & Nelson2, R. (2018). Perbandingan Metode Sampling Kualitas Udara: High Volume Air Sampler (Hvas) Dan Low Volume Air Sampler (Lvas). *Ecolab*, 83-92.
- Turyanti, A., & Santikayasa, I. (2006). Analisis poluan unsur Meteorologi Dan Konsentrasi Polutan Di Udara Ambien Studi Kasus : Jakarta Dan Bandung. *Jurnal Agromet Indonesia*.
- Zulkifli Ibrahim, Boekoesoe, L., & Lalu, N. A. (2022). Public Health and Surveillance Review 1 (1) 202224Identifikasi Kualitas Udara Ambien Disekitar Wilayah Kota Gorontalo. *Public Health and Surveillance Review*; 1(1).

BAB 3

PENGARUH KUALITAS UDARA TERHADAP KESEHATAN MASYARAKAT

3.1 Pendahuluan

Kualitas udara sangat penting untuk kesehatan manusia karena udara adalah kebutuhan pokok yang dibutuhkan setiap saat. Udara bersih dan sehat sangat penting untuk kesehatan. Penjagaan kualitas udara sangat berperan dalam bidang kesehatan. Ini terjadi karena ada pencemar yang tidak bergerak seperti di lingkungan kerja perkantoran dan industri, serta pencemar yang berasal dari sumber yang bergerak seperti kendaraan bermotor. (Maharani and Aryanta, 2023)

Adanya bahan pencemar dari sumber yang bergerak atau tidak bergerak dapat memengaruhi kualitas udara di sekitar. Keberadaan bahan pencemar tersebut dapat berasal dari alam maupun dari kegiatan manusia. Teknologi yang terus dikembangkan manusia dapat membawa kemajuan dalam kehidupan, namun juga menyebabkan pencemaran udara dan kerusakan lingkungan. (Ertiana, 2022)

Bahan pencemar bisa berupa debu partikulat. Partikel debu yang masih berada di bawah batas yang ditetapkan dalam peraturan dianggap aman bagi tubuh. Namun, jika konsentrasi debu partikulat melebihi batas yang ditentukan, dapat membahayakan kesehatan manusia. Beberapa masalah kesehatan yang berkaitan dengan pernapasan meliputi gangguan proses pernapasan, penurunan fungsi paru, alergi dan bronkitis. (Prasetyawati and Sudaryanto, 2021)

Peningkatan polusi udara berbahaya bagi kesehatan manusia dan hewan di seluruh dunia. Menurut data dari WHO, polusi udara menyebabkan 7 juta kematian setiap tahun di seluruh dunia. Polusi udara tidak hanya berbahaya untuk kesehatan manusia, tetapi juga

dapat menyebabkan terbentuknya kabut asap dan hujan asam. Hal ini dapat merusak tanaman dan hutan, serta mencemari lingkungan secara keseluruhan. (Anandari, Wajdi and Harsono, 2024)

3.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Pencemaran Udara

Pencemaran udara terjadi di permukaan bumi karena beberapa faktor, seperti cuaca dan iklim, serta bentuk topografi.

3.2.1 Meteorologi dan iklim

Variabel yang termasuk didalam faktor meteorologi dan iklim antara lain :

1. Temperatur

Lapisan udara dingin yang bergerak ke suatu kawasan industri bisa menyebabkan temperatur inversi. Udara dingin akan terperangkap di kawasan tersebut. Polutan akan tetap berada di permukaan bumi dan menjadi semakin tinggi dalam waktu lama. (Udara, 2022)

Dalam situasi ini, udara tidak dapat bertukar di permukaan bumi. Karena situasi ini sudah berlangsung lama, udara di bumi jadi penuh dengan polusi yang membahayakan kesehatan. Sebagai contoh, pada tahun 1970 kota Tokyo di Jepang mengalami kabut asap yang tebal. Akibatnya, masyarakat mulai menderita penyakit infeksi saluran pernapasan atas dan infeksi mata. (Candrasari *et al.*, 2023)

2. Arah dan kecepatan Angin

Angin kencang akan membawa polusi terbang ke segala arah dan bisa mencemari udara di wilayah sekitarnya. Kebakaran hutan di Indonesia menyebabkan kabut asap di Malaysia dan Singapura. Sebaliknya, jika kecepatan angin lambat, polusi akan tertahan di tempat dan mengotori udara di daerah pemukiman sekitar lokasi kebakaran hutan tersebut. (Adolph, 2016)

3. Hujan

Air hujan yang sering disebut sebagai air angkasa terjadi karena siklus hidrologi yang terkait dengan polutan di udara bebas. Kawasan industri yang menggunakan batubara sebagai sumber energi bisa menyebabkan polusi udara di sekitarnya. Pembakaran batubara menghasilkan gas sulfur dioksida. Bila gas itu bercampur dengan air hujan, akan terbentuk asam sulfat. Akibatnya, air hujan menjadi asam dan disebut hujan asam. (Elsa Sulistiani and Ageng Saepudin Kanda S, 2024)

3.2.2 Topografi

Variabel-variabel yang termasuk didalam faktor topografi, antara lain :

1. Dataran rendah

Daerah dataran rendah angin cenderung membawa polutan terbang jauh keseluruh penjuru dan dapat melewati batas negara dan mencemari negara lain.

2. Pegunungan

Daerah dataran tinggi sering terjadi temperatur inversi dan udara dingin yang terperangkap akan menahan polutan tetap berada dilapisan permukaan bumi.

3. Lembah

Daerah lembah, aliran angin sedikit dan tidak tertiup ke segala penjuru. Keadaan ini cenderung menahan polutan yang terdapat dipermukaan bumi. (Maharani and Aryanta, 2023)

3.3 Penyebab Pencemaran Udara

Secara umum, pencemaran udara disebabkan oleh adanya gas, cairan, dan partikel padat yang terperangkap di udara. Partikel berasal dari aerosol, debu, asap pabrik, kebakaran hutan, asap kendaraan bermotor, dan asap rokok. (Elsa Sulistiani and Ageng Saepudin Kanda S, 2024).

Beberapa zat pencemar yang sering tersebar adalah logam berat, karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO_x), ozon (O₃),

senyawa organik volatil (VOC), dan sulfur dioksida (SO₂). Indonesia termasuk negara yang polusinya tinggi. (Ertiana, 2022).

Untuk memahami lebih mendalam, berikut penyebab utama pencemaran udara (Maharani and Aryanta, 2023)

1. Emisi Kendaraan Bermotor

Kendaraan bermotor salah satu penyebab utama polusi udara di kota. Gas buang dari mesin mobil mengandung CO, NO₂, dan partikel berbahaya. Emisi ini disebabkan oleh pembakaran bahan bakar fosil di mesin kendaraan.

2. Industri dan Pabrik

Proses produksi dan operasional pabrik serta industri bisa menciptakan polusi udara dalam jumlah besar. Emisi gas, asap, dan partikel-partikel berbahaya dari pabrik bisa menyebabkan polusi udara di sekitar area tersebut. Polusi yang dihasilkan termasuk sulfur dioksida (SO₂), hidrokarbon, partikel kecil, dan senyawa kimia berbahaya.

3. Pembakaran Sampah dan Limbah

Membakar sampah di tempat pembuangan akhir atau di tempat lain dapat mengeluarkan asap dan gas berbahaya ke udara. Hal ini dapat mencemari udara. Polutan seperti dioksin, furan, serta bahan kimia beracun lain bisa masuk ke udara dan merugikan kesehatan manusia dan lingkungan.

4. Pembangkit Listrik

Pembangkit listrik menggunakan minyak bumi dan batu bara sebagai bahan bakar dalam jumlah besar untuk menghasilkan energi. Proses pembakaran menyebabkan gas nitrogen oksida, karbon dioksida, partikulat (PM), dan sulfur dioksida (SO₂) dilepaskan ke udara, yang berkontribusi sebanyak 80% dari polusi udara.

5. Aktivitas Pertanian

Penggunaan pupuk di pertanian sangat penting untuk menambah kesuburan tanah dan tanaman. Namun, jika terlalu banyak menggunakan pupuk, dapat menghasilkan gas ammonia (NH₃) yang berbahaya bagi atmosfer bumi. Penggunaan insektisida dan pestisida, serta pembakaran ladang untuk membuka lahan, ikut menyebabkan pencemaran udara.

6. Kebakaran Hutan

Kebakaran hutan menghasilkan polutan seperti nitrogen dioksida (NO₂), ozon, hidrokarbon aromatik, dan timbal yang berbahaya bagi kesehatan manusia dan makhluk hidup di sekitarnya. Kebakaran hutan dapat membuat iklim berubah dan musim kemarau tiba lebih awal.

7. Aktivitas Domestik

Merokok dan membakar sampah berbahaya karena dapat mengeluarkan polutan yang merugikan kesehatan dan iklim. Selain itu, menggunakan AC, pembersih rumah, dan cat dapat mencemarkan udara di dalam ruangan serta melepaskan bahan kimia berbahaya ke udara dan lingkungan. (Prasetyawati and Sudaryanto, 2021)

3.4 Efek Pencemaran Udara

Dalam kehidupan masyarakat, dampak pencemaran udara sangat terasa. Dampak tersebut meliputi dampak umum, dampak terhadap ekosistem, dampak terhadap kesehatan, dampak terhadap tumbuhan dan hewan, dampak terhadap cuaca dan iklim, serta dampak terhadap sosial ekonomi. (Candrasari *et al.*, 2023)

1. Efek umum

Pencemaran udara memiliki efek umum terhadap kehidupan masyarakat, antara lain (Elsa Sulistiani and Ageng Saepudin Kanda S, 2024) :

- a. Pengaruh dari matahari terhadap tanaman adalah dalam bentuk kuantitas dan kualitas sinar matahari yang diterima oleh tanaman di permukaan bumi.
- b. Matahari juga memengaruhi proses fotosintesis tanaman. Peningkatan kadar CO₂ di udara menyebabkan perubahan iklim dengan adanya efek rumah kaca. Ini terjadi karena lapisan bawah atmosfer menahan panas.
- c. Dampak pencemaran udara adalah merusak cat pada benda, merusak karet, dan menyebabkan karat pada logam.
- d. Mengganggu penglihatan bisa membuat kecelakaan lalu lintas lebih sering terjadi.

e. Warna pada pakaian menjadi lebih buram.

2. Efek Terhadap Ekosistem

Industri atau perusahaan yang menggunakan batubara sebagai bahan bakar akan mengeluarkan oksida sulfat ke udara. Hal ini dapat menyebabkan air hujan menjadi asam, yang dikenal sebagai hujan asam. Jika situasi ini terus berlanjut, ekosistem di danau akan mengalami perubahan. Perubahan pH air di danau membuatnya menjadi asam dan mengakibatkan penurunan hasil tangkapan nelayan. (Anandari, Wadjdi and Harsono, 2024)

3. Efek Terhadap Kesehatan

a. Efek lambat

Salah satu dampak tertinggi dari pencemaran udara adalah penyakit bronkhitis kronis dan kanker paru primer. Penyakit-penyakit seperti emfisema paru, asbestosis, silikosis, bisinosis, asma, dan eksema sering terjadi pada anak-anak akibat pencemaran udara.

b. Efek cepat

Berdasarkan penelitian, dampak polusi udara terbesar pada kesehatan adalah infeksi saluran pernapasan. Dalam kasus ini, terjadi peningkatan gas CO pada darah yang mengubah hemoglobin menjadi metemoglobin yang lebih kuat daripada daya ikatan O₂. (Udara, 2022)

4. Efek Terhadap Hewan dan Tumbuhan

Tumbuhan rentan terhadap polusi gas seperti sulfur dioksida, ozon, hidrokarbon, klorin, dan CO. Konsentrasi gas meningkat saat udara tercemar, menyebabkan daun tumbuhan berlubang dan layu.

Hewan sakit jika makan tumbuhan tercemar klorin. (Elsa Sulistiani and Ageng Saepudin Kanda S, 2024)

5. Efek Terhadap Cuaca dan Iklim

Gas karbon dioksida cenderung menahan panas di bawah lapisan atmosfer, yang menyebabkan efek rumah kaca dan meningkatkan suhu di permukaan bumi. Partikel debu dan polutan di udara dapat memantulkan sinar matahari sebelum mencapai permukaan bumi, membuat udara di

atmosfer bawah menjadi dingin. (Maharani and Aryanta, 2023)

6. Efek Terhadap Sosial Ekonomi

Dampak polusi udara bisa menyebabkan turunnya produktivitas pekerja, biaya kesehatan yang lebih tinggi, pariwisata menurun, investasi terhambat, serta biaya perawatan bangunan dan infrastruktur meningkat. (Candrasari *et al.*, 2023)

3.5 Indikator Pencemaran Udara

Cara menentukan tingkat pencemaran udara adalah dengan mengukur konsentrasi gas sulfur dioksida, indeks asap, dan partikel debu di udara. (Prasetyawati and Sudaryanto, 2021)

1. Gas Sulfur Dioksida

Gas sulfur oksida adalah gas polutan udara yang paling tinggi konsentrasinya di daerah industri dan perkotaan. Gas ini berasal dari limbah hasil pembakaran batu bara dan minyak.

2. Indeks Asap

Metode penggunaan indeks asap adalah dengan menyaring sampel udara menggunakan kertas dan mengukur densitasnya dengan alat fotoelektrik meter. Hasil pengukuran disampaikan dalam satuan Coh Units per 1000 linear feet dari sampel udara. Indeks asap berubah setiap hari tergantung pada cuaca.

3. Partikel Debu

Partikel debu dan arang ini berasal dari pembakaran sampah dan industri. Mereka digunakan untuk mengukur tingkat polusi udara. Hasil pengukuran disampaikan dalam satuan miligram atau mikrogram partikel per meter kubik udara.

3.6 Parameter Lain untuk Indikator Pencemaran Udara

Berikut ini parameter lain yang dapat digunakan untuk menentukan derajat pencemaran udara adalah (Elsa Sulistiani and Ageng Saepudin Kanda S, 2024) :

1. Karbon monoksida

Gas beracun tidak berwarna dan tidak berbau. Gas ini berasal dari membakar bahan-bahan seperti kayu, gas alam, bensin, dan arang yang tidak sempurna. Karbon monoksida dapat berasal dari berbagai sumber.

- a. Kendaraan bermotor
- b. Pembangkit listrik
- c. Kebakaran hutan
- d. Insinerator
- e. Tungku pembakaran gas dan minyak
- f. Generator portabel
- g. Pemanggang arang
- h. Asap rokok

Dampak karbon monoksida pada kesehatan sangat berbahaya bahkan menyebabkan kematian. Gejala keracuna karbon monoksida antara lain :

- a. Sakit kepala
- b. Nyedi dada
- c. Nyeri otot
- d. Hilang keseimbangan dan koordinasi tubuh
- e. Gangguan penglihatan
- f. Sulit berkonsentrasi atau berpikir
- g. Pusing yang bertambah parah
- h. Kejang
- i. Denyut jantung cepat
- j. Gangguan irama jantung

2. Nitrogen dioksida

Gas beracun terbuat dari satu atom nitrogen dan dua atom oksigen. Gas ini berwarna merah kecoklatan, berbau tajam, lebih berat dari udara, mudah menguap, memiliki oksidan kuat, korosif, dan sulit larut dalam air. (Anandari, Wajdi and Harsono, 2024)

Nitrogen dioksida memiliki dampak diantaranya :

- a. Berperan dalam pembentukan ozon dipermukaan tanah, komponen utama kabut asap

- b. Pembentukan hujan asam
- c. Kadar partikel meningkat dan dapat terhirup
- d. Menurunkan fungsi paru sistem pernapasan.

3. Timah hitam atau timbal

Senyawa kimia ini digunakan untuk mencampur bensin. Fungsi timbal adalah untuk mengatur jumlah oktan dalam bahan bakar, sehingga hasil pembakaran lebih efisien dan kemampuan pelumas lebih baik. (Maharani and Aryanta, 2023)

3.7 Dampak Pencemaran Udara

Pencemaran udara bisa menyebabkan infeksi seperti masalah pernapasan dan gangguan pada jantung serta pembuluh darah.

Selain berdampak buruk pada kesehatan masyarakat, polusi juga berdampak pada lingkungan dengan menyebabkan pemanasan global yang sangat merugikan. Pemanasan global memengaruhi iklim dunia dalam jangka panjang dan menyebabkan perubahan besar dalam kehidupan makhluk hidup, seperti banjir, kenaikan permukaan air laut, dan kekeringan. (Ertiana, 2022)

Sekarang, polusi udara di bumi semakin mengganggu kegiatan manusia dan membuat masyarakat khawatir.

Pencemaran udara dapat memengaruhi kualitas hidup manusia melalui dampaknya pada kesehatan dan lingkungan, contohnya:

1. Penyakit

Udara bisa menyebar penyakit mudah karena bisa membawa zat berbahaya, zat kimia, dan debu yang bisa menyebarkan penyakit.

Beberapa penyakit yang ditimbulkan akibat pencemaran udara pada tabel berikut ini :

Tabel 3.1. Dampak Pencemaran Udara pada Kesehatan

No	Bagian Tubuh	Dampak	Penyebab
1	Otak	Gangguan pertumbuhan dan kecerdasan	Timbal
2	Mata	Iritasi dan peradangan	Hidrokarbon
3	Perut	Mual, lesu, penurunan nafsu makan	Timbal
4	Tenggorokan	Peradangan	Hidrakarbon
5	Paru-paru	Flek hingga memicu serangan asma	Hidrakarbon dan Nitrogen Oksida
6	Jantung	Kekurangan oksigen pada darah	Karbon monoksida dan Nitrogen Oksida
7	Sistem Reproduksi	Terganggunya sistem reproduksi	Timbal

2. Pemanasan Global

Istilah global warming merupakan istilah yang sering kita jumpai dimanapun, karena memiliki dampak yang sangat besar ditengah kehidupan masyarakat.

Dampak pemanasan global dapat merubah tatanan iklim bumi yang mengakibatkan bencana alam, seperti :

Tabel 3.2. Dampak Pencemaran Udara pada Iklim

No	Dampak	Penyebab
1	Meningkatnya muka air laut	Mencairnya es akibat panasnya permukaan bumi menyebabkan naiknya permukaan air laut sehingga terjadi banjir ROB
2	Wabah penyakit	Perubahan suhu menyebabkan perubahan imun tubuh manusia
3	Es kutub mencair	Meningkatnya suhu pada kutub bumi sehingga es mencair
4	Kebakaran Hutan	Terjadi peningkatan suhu di permukaan bumi sehingga terjadi kebakaran hutan
5	Krisis air bersih	Perubahan suhu menjadi penyebab kekeringan karena penguapan air dalam tanah

3.8 Dampak Pencemaran Udara

Pencemaran udara bisa merusak kesehatan kita, bahkan dalam jangka waktu yang panjang. Beberapa dampak kesehatan dari paparan pencemaran udara (Prasetyawati and Sudaryanto, 2021):

1. Gangguan pada Mata

Udara yang buruk dan tidak sehat dapat menyebabkan berbagai masalah pada mata orang yang terpapar, antara lain iritasi, sindrom mata kering, konjungtivitis atau mata merah, dan glaucoma (kerusakan pada saraf mata).

2. Peradangan Hidung

Peningkatan konsentrasi polutan PM_{2.5} dalam udara dapat memicu iritasi atau peradangan pada lapisan dalam hidung, yang dikenal sebagai rhinitis. Gejalanya berupa hidung tersumbat, bersin dan gatal pada hidung, disertai dengan keluarnya ingus secara berlebihan.

3. Penyakit Asma

Paparan kualitas udara yang buruk dapat meningkatkan serangan asma, yaitu peradangan paru-paru kronis yang menyebabkan penyempitan pada saluran pernapasan. Gejalanya berupa batuk, sesak napas, dan suara mengi saat bernapas.

4. Penyakit Paru Obstruktif Kronik (PPOK)

Paparan polutan dan asap rokok secara terus menerus dapat menyebabkan PPOK atau Penyakit Paru Obstruktif Kronik. Sama seperti serangan asma, PPOK juga penyakit paru-paru kronis yang disebabkan oleh penyempitan saluran pernapasan dalam jangka panjang. Bedanya, PPOK bersifat progresif dan tidak bisa dipulihkan kembali seperti semula, sehingga gejalanya yaitu sesak napas dan batuk disertai dahak, bersifat lebih konstan dan bisa berujung pada kematian.

5. Kanker Paru-paru

Polusi udara mengandung zat-zat karsinogenik, seperti karbon dioksida (CO_2), partikel ozon dan asap rokok. Jika terhirup dan terpapar terus menerus dalam waktu lama, dapat memicu timbulnya sel-sel kanker pada paru-paru.

6. Penyakit Kardiovaskular

Partikel polutan dalam polusi udara yang dihirup dapat masuk ke dalam aliran darah melalui jantung dan paru-paru. Akibatnya, pembuluh darah dapat menjadi lebih keras dan sempit, sehingga meningkatkan risiko penyakit jantung dan pembuluh darah.

7. Kanker Kulit

Asap, debu dan polutan dalam polusi udara, jika menempel pada kulit dan menyumbat pori-pori, dapat menimbulkan masalah pada kulit. Apalagi jika polutan yang mengandung zat-zat berbahaya ini terserap oleh kulit dalam waktu lama, bisa meningkatkan risiko timbulnya kanker kulit.

8. Gangguan pada Kehamilan

Polutan dalam udara yang buruk dapat menyebabkan peradangan, stres oksidatif dan mengendap di plasenta janin dalam kandungan. Hal ini dapat mengakibatkan berbagai

komplikasi kehamilan, kelahiran prematur, bayi lahir dengan berat badan lahir rendah hingga kematian.

9. Gangguan Kognitif

Polusi udara dapat berdampak buruk pada otak dan menyebabkan gangguan belajar dan memori, serta meningkatkan risiko dementia.

3.9 Mencegah Dampak Polusi Udara

Setelah memahami bahaya polusi udara bagi kesehatan dan lingkungan, penting bagi kita untuk mengambil langkah-langkah mencegah dan mengurangi dampak polusi udara. Hal ini bisa dilakukan dengan berbagai cara, seperti (Candrasari *et al.*, 2023) :

1. Memantau Kualitas Udara

Pantau kualitas udara secara rutin melalui situs BMKG atau aplikasi pemantau kualitas udara lainnya. Kurangi aktivitas di luar ruangan dan tutup ventilasi di rumah, kantor atau ruangan lainnya jika tingkat polusi udara tinggi.

2. Gunakan Masker

Jika harus ke luar rumah atau beraktivitas di luar ruangan, gunakan masker untuk mencegah partikel polutan masuk ke dalam hidung dan saluran pernapasan. Gunakan masker yang pas di wajah dan dapat menyaring partikel polutan dalam udara, seperti masker KF 94 atau KN 95.

3. Kurangi Penggunaan Kendaraan Pribadi

Emisi dari kendaraan merupakan salah satu penyumbang terbesar dari polusi udara. Lakukan uji emisi dan pastikan mesin

kendaraan dalam keadaan baik sebelum menggunakan kendaraan pribadi.

Lebih baik lagi jika Anda mengurangi pemakaian kendaraan pribadi dan menggunakan moda transportasi lainnya, seperti transportasi umum, bersepeda atau berjalan kaki untuk mengurangi polusi udara.

4. Bijak dalam Menggunakan Listrik

Pembangkit listrik juga merupakan salah satu penyumbang utama polutan dan zat kimia dalam polusi udara. Anda bisa mengurangi pencemaran udara dengan membatasi pemakaian

listrik, seperti mematikan lampu dan peralatan elektronik jika sedang tidak digunakan.

5. Hindari Rokok dan Sumber Polusi Lainnya

Berhenti merokok akan mengurangi asap rokok yang dapat mencemari lingkungan dan orang-orang di sekitarnya. Jauhi pula tempat-tempat yang tingkat polusi udaranya tinggi, seperti pabrik dan jalan raya dengan lalu lintas padat.

6. Pola Hidup Sehat

Jalankan perilaku hidup sehat dengan makan makanan bergizi, minum vitamin dan berolahraga rutin untuk menjaga daya tahan tubuh. Pastikan asupan cairan cukup untuk mencegah dehidrasi, membuat lapisan lendir di tenggorokan lebih encer dan pernapasan lebih lancar.

7. Memelihara Tanaman

Tanaman menyerap karbon dioksida dalam udara dan melepas oksigen ke udara, sehingga membuat udara lebih segar. Perbanyak tanaman di rumah dan sekitarnya, terutama yang mampu mengurangi polusi, seperti palem bambu atau lidah mertua.

8. Bersihkan Rumah dengan Cara Aman

Hindari membakar sampah karena dapat menghasilkan asap yang mengandung zat-zat beracun. Hindari pula penggunaan bahan pembersih rumah tangga yang berbahan kimia keras. Ganti pengharum ruangan berbahan kimia dengan bahan alami seperti aromaterapi.

Meski telah melakukan berbagai cara untuk mengurangi dampak polusi udara, risiko untuk terpapar tetap ada. Segera kunjungi fasilitas kesehatan dan konsultasi dengan tenaga kesehatan, jika mengalami gejala gangguan pernapasan dan berbagai penyakit lainnya yang dipicu oleh kualitas udara buruk.

Pahami benar bahaya polusi udara bagi kesehatan, mulai dari diri sendiri. Selalu jalankan perilaku hidup bersih sehat, yaitu menjaga kebersihan diri dan lingkungan, sebagai langkah penting dalam mengurangi pencemaran udara dan berbagai gangguan kesehatan akibat paparan kualitas udara yang tidak sehat. (Elsa Sulistiani and Ageng Saepudin Kanda S, 2024)

DAFTAR PUSTAKA

- Adolph, R. (2016) '濟無No Title No Title No Title', 8(2), pp. 1–23.
- Anandari, A.A., Wadjdi, A.F. and Harsono, G. (2024) 'Dampak Polusi Udara terhadap Kesehatan dan Kesiapan Pertahanan Negara di Provinsi DKI Jakarta', *Journal on Education*, 6(2), pp. 10868–10884. Available at: <https://doi.org/10.31004/joe.v6i2.4880>.
- Candrasari, S. *et al.* (2023) 'Pemulihan Dampak Pencemaran Udara bagi Kesehatan Masyarakat Indonesia', *Professional: Jurnal Komunikasi dan Administrasi Publik*, 10(2), pp. 849–854. Available at: <https://doi.org/10.37676/professional.v10i2.5417>.
- Elsa Sulistiani and Ageng Saepudin Kanda S (2024) 'Fenomena Pencemaran Lingkungan: Dampak Pencemaran Udara Terhadap Kesehatan', *Jurnal Manajemen Dan Bisnis Ekonomi*, 2(2), pp. 301–305. Available at: <https://doi.org/10.54066/jmbe-itb.v2i2.1599>.
- Ertiana, E.. (2022) 'Dampak Pencemaran Udara Terhadap Kesehatan Masyarakat: Literatur Review', *Jurnal Ilmiah Permas: Jurnal Ilmiah STIKES Kendal*, 12(2), pp. 287–296.
- Maharani, S. and Aryanta, W.R. (2023) 'Dampak Buruk Polusi Udara Bagi Kesehatan Dan Cara Meminimalkan Risikonya', *Jurnal Ecocentrism*, 3(2), pp. 47–58. Available at: <https://doi.org/10.36733/jeco.v3i2.7035>.
- Prasetyawati, N.D. and Sudaryanto, S. (2021) 'Pengaruh Pencemaran Udara Terhadap Terjadinya Air Borne Disease Dan Gangguan Kesehatan Lainnya', *JURNAL KESEHATAN LINGKUNGAN: Jurnal dan Aplikasi Teknik Kesehatan Lingkungan*, 18(2), pp. 111–120. Available at: <https://doi.org/10.31964/jkl.v18i2.309>.
- Udara, P.P. (2022) 'EL-THAWALIB', 3(2), pp. 375–386.

BAB 4

STRATEGI PENYEHATAN UDARA

4.1 Aspek-aspek Penyehatan Udara

Penyehatan udara adalah serangkaian tindakan dan kebijakan yang bertujuan untuk meningkatkan kualitas udara, mengurangi polusi udara, dan melindungi kesehatan manusia serta lingkungan. Ini mencakup berbagai langkah dari pengendalian emisi polutan udara hingga promosi kesadaran masyarakat tentang pentingnya udara bersih. Pengertian penyehatan udara melibatkan beberapa aspek, termasuk:

1. Pengendalian Emisi:

Upaya untuk mengurangi emisi polutan udara dari berbagai sumber seperti industri, transportasi, dan pembangkit listrik. Ini bisa dilakukan melalui penerapan teknologi pengendalian emisi, kebijakan regulasi, dan insentif untuk menggunakan teknologi bersih.

2. Penggunaan Energi Terbarukan:

Memperkenalkan energi terbarukan seperti energi surya, angin, dan hidro untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil yang menyebabkan polusi udara.

3. Penghijauan Kota:

Melakukan penanaman pohon, pembangunan taman kota, dan peningkatan vegetasi untuk menyaring polusi udara dan meningkatkan kualitas udara di perkotaan.

4. Pendidikan dan Kesadaran Masyarakat:

Mengedukasi masyarakat tentang dampak polusi udara terhadap kesehatan dan lingkungan, serta cara untuk melindungi diri mereka sendiri dan berpartisipasi dalam upaya penyehatan udara.

5. Pemantauan Kualitas Udara:

Membangun sistem pemantauan kualitas udara yang baik untuk memantau tingkat polusi udara, mengidentifikasi sumber polusi, dan mengambil tindakan preventif jika diperlukan.

6. Kebijakan Lingkungan yang Ketat:

Menetapkan standar emisi yang ketat dan efektif, serta mengadopsi kebijakan lingkungan yang mendukung penggunaan teknologi bersih dan pengurangan emisi.

7. Inovasi Teknologi Hijau:

Mendukung penelitian dan pengembangan teknologi hijau untuk mengurangi polusi udara dan mengembangkan solusi yang lebih efektif dalam menyehatkan udara.

Pada intinya, penyehatan udara adalah upaya lintas sektor yang melibatkan pemerintah, industri, masyarakat sipil, dan individu untuk menciptakan lingkungan udara yang lebih bersih dan sehat untuk semua.

4.2 Penerapan Strategi Penyehatan Udara

Strategi untuk menyehatkan udara bisa mencakup beberapa pendekatan, baik dari sudut pandang individu maupun pemerintah. Berikut beberapa strategi yang bisa diterapkan:

1. Pengurangan Pencemaran Udara:

- a. Pengurangan emisi kendaraan bermotor dengan mendorong penggunaan transportasi ramah lingkungan seperti transportasi umum, sepeda, atau mobil listrik. Pengurangan emisi kendaraan bermotor merupakan salah satu strategi penting dalam upaya menyehatkan udara. Mendorong penggunaan transportasi ramah lingkungan seperti transportasi umum, sepeda, atau mobil listrik dapat dilakukan melalui berbagai langkah dan kebijakan. Berikut ini adalah uraian detail tentang cara-cara tersebut:

1) Peningkatan Aksesibilitas Transportasi Umum:

- o Membangun infrastruktur transportasi umum yang lebih luas dan efisien, termasuk jaringan kereta api, bus rapid transit (BRT), dan layanan angkutan umum lainnya.
- o Menyediakan tarif yang terjangkau dan fasilitas yang nyaman bagi pengguna transportasi umum, seperti halte bus yang aman dan bersih, serta

stasiun kereta yang terintegrasi dengan fasilitas penunjang seperti tempat parkir sepeda.

2) **Insentif Penggunaan Transportasi Ramah Lingkungan:**

- Memberikan insentif finansial bagi individu atau kelompok yang menggunakan transportasi ramah lingkungan, seperti subsidi tiket transportasi umum, diskon pajak untuk pembelian sepeda atau mobil listrik, atau insentif pajak untuk perusahaan yang menyediakan fasilitas transportasi umum bagi karyawan mereka.
- Menetapkan aturan atau kebijakan di wilayah perkotaan yang memberikan keuntungan atau akses prioritas bagi pengguna transportasi ramah lingkungan, misalnya, jalur khusus untuk sepeda atau mobil listrik.

3) **Promosi Gaya Hidup Bersepeda:**

- Membangun infrastruktur yang mendukung bersepeda, seperti jalur sepeda yang aman dan terpisah dari lalu lintas kendaraan bermotor, tempat parkir sepeda yang aman di area publik, serta fasilitas mandi dan penyimpanan sepeda di tempat-tempat umum.
- Mengadakan kampanye dan acara yang mempromosikan manfaat bersepeda bagi kesehatan dan lingkungan, serta menyediakan program penyewaan sepeda umum yang terjangkau.

4) **Pengembangan Infrastruktur untuk Mobil Listrik:**

- Membangun infrastruktur pengisian mobil listrik yang luas dan mudah diakses, termasuk stasiun pengisian di jalan-jalan umum, tempat parkir umum, pusat perbelanjaan, dan tempat-tempat umum lainnya.
- Memberikan insentif finansial dan kebijakan dukungan bagi pemilik mobil listrik, seperti pembebasan pajak atau diskon parkir bagi mobil

listrik, serta insentif fiskal untuk pembelian dan penggunaan mobil listrik.

5) Penyuluhan dan Edukasi:

- Mengadakan kampanye penyuluhan dan edukasi kepada masyarakat tentang manfaat penggunaan transportasi ramah lingkungan, termasuk transportasi umum, bersepeda, dan mobil listrik, serta dampak positifnya terhadap kesehatan dan lingkungan.
- Melibatkan media massa dan sosial dalam menyebarkan informasi tentang transportasi ramah lingkungan dan menginspirasi perubahan perilaku masyarakat.

Melalui langkah-langkah ini, diharapkan penggunaan transportasi ramah lingkungan dapat meningkat, sehingga dapat mengurangi emisi kendaraan bermotor dan meningkatkan kualitas udara serta kesehatan masyarakat secara keseluruhan.

- b. Mengurangi emisi dari industri dan pembangkit listrik dengan menerapkan teknologi ramah lingkungan dan memperketat regulasi emisi

Mengurangi emisi dari industri dan pembangkit listrik merupakan langkah penting dalam upaya menjaga kualitas udara dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Berikut ini adalah uraian detail tentang cara-cara untuk mencapai hal tersebut dengan menerapkan teknologi ramah lingkungan dan memperketat regulasi emisi:

1) Penerapan Teknologi Ramah Lingkungan:

- **Penggunaan Teknologi Bersih:** Menerapkan teknologi bersih dan ramah lingkungan dalam proses produksi industri dan pembangkit listrik, seperti teknologi pembersihan gas buang (scrubbers), penggunaan bahan bakar alternatif yang lebih bersih seperti gas alam, atau penggunaan

teknologi penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS) untuk mengurangi emisi CO₂.

- **Efisiensi Energi:** Meningkatkan efisiensi energi dalam proses produksi industri dan pembangkit listrik untuk mengurangi konsumsi bahan bakar fosil dan emisi gas rumah kaca. Ini dapat dilakukan melalui penggunaan peralatan yang lebih efisien, perbaikan sistem manajemen energi, dan investasi dalam teknologi energi terbarukan.
- **Inovasi Teknologi:** Mendorong riset dan pengembangan teknologi baru yang lebih ramah lingkungan, seperti teknologi energi terbarukan, proses produksi yang lebih efisien, dan teknologi pengurangan emisi yang lebih canggih.

2) **Perketatan Regulasi Emisi:**

- **Penyusunan dan Penegakan Regulasi Lingkungan yang Ketat:** Menerapkan regulasi yang ketat terkait emisi industri dan pembangkit listrik, termasuk batasan emisi untuk berbagai polutan udara seperti sulfur dioksida (SO₂), nitrogen oksida (NO_x), partikulat, dan zat-zat berbahaya lainnya.
- **Pengawasan dan Pemeriksaan Rutin:** Melakukan pengawasan dan pemeriksaan rutin terhadap industri dan pembangkit listrik untuk memastikan bahwa mereka mematuhi regulasi emisi yang ada dan menerapkan teknologi pengendalian emisi yang sesuai.
- **Denda dan Sanksi:** Mengenakan denda dan sanksi yang tegas terhadap pelanggar regulasi emisi, sebagai upaya penegakan hukum yang efektif untuk mendorong kepatuhan.

3) **Peningkatan Kesadaran dan Partisipasi Masyarakat:**

- **Kampanye Edukasi:** Mengadakan kampanye edukasi kepada masyarakat tentang dampak negatif emisi industri dan pembangkit listrik terhadap

kesehatan dan lingkungan, serta pentingnya penggunaan teknologi ramah lingkungan.

- o **Partisipasi Masyarakat:** Mendorong partisipasi aktif masyarakat dalam pengawasan dan pemantauan emisi industri dan pembangkit listrik, misalnya melalui program pelaporan atau forum diskusi terbuka.

4) **Kemitraan antara Pemerintah dan Industri:**

- o **Kolaborasi dalam Pengembangan Teknologi:** Membangun kemitraan antara pemerintah, industri, dan lembaga riset untuk mengembangkan dan menerapkan teknologi ramah lingkungan secara bersama-sama.
- o **Insentif dan Dukungan Finansial:** Memberikan insentif finansial kepada industri dan pembangkit listrik untuk mengadopsi teknologi ramah lingkungan, seperti pemberian insentif fiskal atau subsidi untuk investasi dalam teknologi yang bersih.

Dengan menerapkan langkah-langkah di atas, diharapkan dapat terjadi pengurangan signifikan dalam emisi industri dan pembangkit listrik, sehingga dapat menjaga kualitas udara dan lingkungan hidup secara keseluruhan.

- c. Meningkatkan efisiensi energi untuk mengurangi kebutuhan bahan bakar fosil.

Meningkatkan efisiensi energi merupakan langkah kunci dalam mengurangi kebutuhan akan bahan bakar fosil, mengurangi emisi gas rumah kaca, dan mempromosikan keberlanjutan energi. Berikut adalah uraian detail tentang cara meningkatkan efisiensi energi:

1) **Penggunaan Teknologi Efisiensi Energi:**

- o **Teknologi Peralatan Efisien:** Menggunakan peralatan rumah tangga, industri, dan komersial yang lebih efisien energi, seperti lampu LED, peralatan rumah tangga berlabel Energy Star, mesin produksi yang lebih efisien, dan sistem pemanas dan pendingin yang hemat energi.

- Sistem Manajemen Energi: Menerapkan sistem manajemen energi yang canggih untuk mengoptimalkan penggunaan energi di gedung-gedung komersial dan industri, termasuk penggunaan sensor, kontrol otomatis, dan analisis data untuk mengidentifikasi dan mengurangi pemborosan energi.
- 2) **Praktik Efisiensi Energi di Industri:**
- **Audit Energi:** Melakukan audit energi secara teratur untuk mengidentifikasi potensi penghematan energi di dalam proses produksi industri, termasuk analisis efisiensi peralatan, isolasi termal, dan tata kelola energi yang lebih baik.
 - **Penyuluhan dan Pelatihan:** Memberikan penyuluhan dan pelatihan kepada karyawan industri tentang praktik efisiensi energi, penggunaan peralatan yang benar, dan manajemen energi yang efektif.
- 3) **Efisiensi Transportasi:**
- **Transportasi Publik yang Efisien:** Meningkatkan efisiensi sistem transportasi publik dengan menggunakan armada kendaraan yang lebih efisien energi, rute yang lebih optimal, dan sistem pengelolaan lalu lintas yang lebih cerdas.
 - **Penggunaan Kendaraan Ramah Lingkungan:** Mendorong penggunaan kendaraan yang lebih efisien energi, seperti mobil listrik atau kendaraan hibrida, serta menyediakan insentif bagi penggunaan transportasi berbagi seperti carpooling atau ridesharing.
- 4) **Pengembangan Infrastruktur Ramah Lingkungan:**
- **Infrastruktur Transportasi Publik yang Memadai:** Membangun dan meningkatkan infrastruktur transportasi publik seperti jaringan kereta api, bus rapid transit (BRT), dan jalur sepeda yang aman dan terhubung.

- **Infrastruktur Pengisian Mobil Listrik:** Membangun infrastruktur pengisian mobil listrik yang luas dan mudah diakses di tempat-tempat umum seperti stasiun pengisian di jalan-jalan umum, pusat perbelanjaan, dan tempat parkir umum.

5) **Kebijakan dan Regulasi:**

- **Standar Efisiensi Energi:** Menerapkan standar efisiensi energi yang ketat untuk peralatan rumah tangga, kendaraan bermotor, dan industri, serta mendorong inovasi dalam teknologi efisiensi energi.
- **Insentif Fiskal:** Memberikan insentif fiskal bagi individu, perusahaan, dan industri yang mengadopsi teknologi dan praktik efisiensi energi, seperti diskon pajak atau kredit pajak untuk investasi dalam peralatan efisiensi energi.

Dengan meningkatkan efisiensi energi di berbagai sektor, kita dapat mengurangi kebutuhan akan bahan bakar fosil, emisi gas rumah kaca, dan dampak negatif terhadap lingkungan, sambil mengurangi biaya operasional dan meningkatkan ketahanan energi secara keseluruhan.

2. **Penanaman Pohon:**

Penanaman pohon dan penghijauan kota dapat membantu menyaring polusi udara dan meningkatkan kualitas udara di perkotaan.

Penanaman pohon dan penghijauan kota merupakan strategi yang efektif dalam meningkatkan kualitas udara di perkotaan. Berikut ini adalah uraian detail tentang bagaimana penanaman pohon dan penghijauan kota dapat membantu menyaring polusi udara dan meningkatkan kualitas udara:

a. **Penyaring Polusi Udara:**

- **Penyerapan Partikulat:** Pohon dan vegetasi perkotaan mampu menyerap partikulat, seperti debu, jelaga, dan polutan lainnya dari udara melalui daun dan permukaan tumbuhan.

- **Penyaring Gas Beracun:** Pohon juga mampu menyerap gas beracun seperti oksida nitrogen (NO_x), sulfur dioksida (SO_2), dan karbon monoksida (CO) melalui proses fotosintesis.
- b. Penyediaan Oksigen:**
 - **Produksi Oksigen:** Proses fotosintesis yang dilakukan oleh pohon menghasilkan oksigen sebagai produk sampingan, yang membantu meningkatkan kadar oksigen di udara dan mengurangi polusi udara yang disebabkan oleh kekurangan oksigen.
 - **Penyediaan Udara Segar:** Penanaman pohon di perkotaan juga membantu menyediakan udara segar yang lebih baik bagi penduduk kota, sehingga meningkatkan kesehatan dan kenyamanan masyarakat.
- c. Penurunan Suhu Udara:**
 - **Efek Teduh:** Pohon memberikan efek teduh yang dapat menurunkan suhu udara di perkotaan, terutama pada musim panas, sehingga mengurangi kebutuhan akan pendingin udara dan mengurangi emisi gas rumah kaca yang dihasilkan oleh sistem pendingin.
 - **Penguapan Air:** Daun dan permukaan tanah di bawah pepohonan juga menguapkan air ke atmosfer melalui proses transpirasi, yang membantu menurunkan suhu udara dan meningkatkan kelembaban udara.
- d. Meningkatkan Kualitas Lingkungan Hidup:**
 - **Mengurangi Pemanasan Global:** Penanaman pohon membantu mengurangi pemanasan global dengan menyerap karbon dioksida (CO_2) dari udara selama proses fotosintesis.
 - **Mengurangi Efek Urban Heat Island:** Vegetasi perkotaan, termasuk pepohonan, dapat membantu mengurangi efek Urban Heat Island (UHI) dengan menurunkan suhu permukaan kota dan meningkatkan sirkulasi udara.

e. Estetika dan Kenyamanan:

- **Peningkatan Estetika Kota:** Penanaman pohon dan penghijauan kota memberikan manfaat estetika dengan meningkatkan keindahan lingkungan perkotaan dan menciptakan ruang terbuka hijau yang menyegarkan.
- **Pengurangan Kebisingan:** Pepohonan juga dapat berfungsi sebagai penghalang alami untuk mengurangi kebisingan lalu lintas dan industri, sehingga meningkatkan kenyamanan akustik di lingkungan perkotaan.

Melalui penanaman pohon dan penghijauan kota yang efektif, dapat terjadi peningkatan kualitas udara di perkotaan, pengurangan polusi udara, serta penciptaan lingkungan yang lebih sehat dan nyaman bagi penduduk kota.

3. Pemantauan Kualitas Udara:

Membangun sistem pemantauan kualitas udara yang baik untuk memantau tingkat polusi udara dan mengambil tindakan preventif ketika diperlukan.

Membangun sistem pemantauan kualitas udara yang baik sangat penting untuk memantau tingkat polusi udara dan mengambil tindakan preventif ketika diperlukan. Berikut ini adalah uraian detail tentang langkah-langkah yang diperlukan dalam membangun sistem pemantauan kualitas udara yang efektif:

a. Penempatan Lokasi Pemantauan:

- **Pemilihan Lokasi yang Representatif:** Menempatkan sensor pemantauan di lokasi yang mewakili kondisi udara secara keseluruhan di suatu daerah, termasuk di area perkotaan, pinggiran kota, industri, dan daerah pedesaan.
- **Pemantauan Titik-titik Rawan:** Memilih lokasi pemantauan di dekat sumber polusi utama seperti jalan raya, industri, dan pembangkit listrik untuk memantau paparan tinggi terhadap polutan udara.

b. Pemilihan Parameter Pemantauan:

- **Polusi Udara Utama:** Memantau parameter-parameter polusi udara utama seperti partikulat PM_{2.5} dan PM₁₀, oksida nitrogen (NO_x), sulfur dioksida (SO₂), ozon (O₃), karbon monoksida (CO), dan senyawa organik volatil (VOCs).
- **Sensor Tambahan:** Memasang sensor tambahan untuk memantau parameter lain yang berkaitan dengan kualitas udara seperti suhu, kelembaban, dan angin, serta parameter kesehatan seperti polen dan spora jamur.

c. Teknologi Pemantauan:

- **Sensor Canggih:** Menggunakan sensor-sensor canggih dan sistem pemantauan otomatis yang dapat memberikan data kualitas udara secara real-time dengan akurasi tinggi.
- **Jaringan Pemantauan:** Membangun jaringan pemantauan yang terintegrasi dan terhubung secara online untuk memungkinkan pengumpulan dan pemrosesan data secara terus-menerus.

d. Analisis Data dan Pelaporan:

- **Pemrosesan Data Real-time:** Menerapkan sistem pemrosesan data real-time untuk menganalisis data pemantauan secara langsung dan mendeteksi adanya lonjakan polusi udara atau kejadian darurat.
- **Pelaporan Publik:** Memberikan akses publik ke data kualitas udara melalui platform online dan aplikasi seluler, serta mengirimkan peringatan atau peringatan dini kepada masyarakat melalui pesan teks atau media sosial.

e. Kerjasama antara Pemerintah dan Masyarakat:

- **Kerjasama Pemerintah:** Membangun kerjasama antara pemerintah pusat, pemerintah daerah, dan lembaga terkait untuk mengelola dan mengoperasikan sistem pemantauan kualitas udara.
- **Partisipasi Masyarakat:** Melibatkan masyarakat dalam pengelolaan sistem pemantauan dengan

mendorong partisipasi dalam pelaporan polusi udara dan pengawasan terhadap pemantauan kualitas udara.

f. Tindakan Pencegahan dan Pengendalian:

- **Respon Cepat:** Mengambil tindakan pencegahan dan pengendalian yang cepat ketika terjadi lonjakan polusi udara, termasuk mengurangi emisi dari sumber polusi, memberlakukan pembatasan lalu lintas, dan memberikan peringatan kesehatan kepada masyarakat.
- **Penyuluhan dan Edukasi:** Mengedukasi masyarakat tentang risiko polusi udara dan cara melindungi diri mereka sendiri, serta mendorong perubahan perilaku yang dapat mengurangi paparan terhadap polusi udara.

Dengan membangun sistem pemantauan kualitas udara yang baik dan efektif, pemerintah dan masyarakat dapat bekerja sama untuk mengawasi dan mengambil tindakan preventif dalam menghadapi masalah polusi udara, sehingga meningkatkan kualitas udara dan kesehatan masyarakat secara keseluruhan.

4. Edukasi Masyarakat:

Mengedukasi masyarakat tentang dampak polusi udara terhadap kesehatan dan cara untuk melindungi diri mereka sendiri, seperti menggunakan masker saat udara tercemar atau mengurangi penggunaan kendaraan pribadi.

Mengedukasi masyarakat tentang dampak polusi udara terhadap kesehatan dan cara untuk melindungi diri mereka sendiri merupakan langkah penting dalam meningkatkan kesadaran akan risiko polusi udara dan mendorong perubahan perilaku yang positif. Berikut adalah uraian detail tentang langkah-langkah yang dapat diambil dalam upaya tersebut:

a. Kampanye Penyuluhan dan Edukasi:

- **Informasi tentang Dampak Polusi Udara:** Memberikan informasi yang jelas dan mudah dipahami kepada masyarakat tentang dampak negatif polusi udara terhadap kesehatan, termasuk gangguan

pernapasan, iritasi mata dan tenggorokan, serta risiko penyakit jangka panjang seperti penyakit kardiovaskular dan kanker.

- **Pengaruh Polusi Udara terhadap Anak-anak dan Lansia:** Menyoroti risiko kesehatan yang lebih besar bagi kelompok rentan seperti anak-anak, lansia, dan individu dengan kondisi medis tertentu, serta mengajak masyarakat untuk melindungi anggota keluarga mereka yang rentan.

b. Promosi Cara-cara Melindungi Diri:

- **Penggunaan Masker:** Memberikan informasi tentang jenis-jenis masker yang efektif dalam melindungi diri dari polusi udara, seperti masker N95 atau masker dengan filter partikulat PM_{2.5}, serta cara penggunaannya yang benar.
- **Pengurangan Penggunaan Kendaraan Pribadi:** Mengedukasi masyarakat tentang dampak emisi kendaraan bermotor terhadap polusi udara dan mengajak mereka untuk mengurangi penggunaan kendaraan pribadi dengan beralih ke transportasi umum, bersepeda, atau berjalan kaki.

c. Pengembangan Materi Pendidikan:

- **Materi Kurikulum Sekolah:** Memasukkan materi tentang polusi udara dan kesehatan lingkungan ke dalam kurikulum sekolah, mulai dari tingkat sekolah dasar hingga menengah, untuk meningkatkan kesadaran generasi muda tentang pentingnya menjaga kualitas udara.
- **Sosialisasi di Komunitas:** Melakukan kegiatan sosialisasi dan workshop di komunitas lokal untuk membahas dampak polusi udara, memberikan pelatihan tentang cara melindungi diri, dan mempromosikan praktik-praktik berkelanjutan.

d. Kemitraan dengan Media Massa:

- **Kampanye Media Sosial:** Menggunakan media sosial dan platform online lainnya untuk menyebarkan informasi tentang polusi udara dan cara-cara

melindungi diri, serta mengajak masyarakat untuk berpartisipasi dalam upaya menjaga kualitas udara.

- **Program TV dan Radio:** Mengadakan program khusus di televisi dan radio yang membahas isu-isu polusi udara dan memberikan saran praktis kepada pendengar tentang bagaimana cara melindungi diri dari paparan polusi udara.

e. Pengawasan dan Evaluasi:

- **Pemantauan Kualitas Udara:** Melakukan pemantauan kualitas udara secara teratur dan menyediakan informasi yang akurat kepada masyarakat tentang tingkat polusi udara di wilayah mereka.
- **Evaluasi Efektivitas Program:** Melakukan evaluasi secara berkala terhadap efektivitas program edukasi dan penyuluhan untuk mengetahui sejauh mana pesan-pesan yang disampaikan telah dipahami dan diimplementasikan oleh masyarakat.

Dengan mengedukasi masyarakat tentang dampak polusi udara dan cara melindungi diri mereka sendiri, diharapkan akan terjadi peningkatan kesadaran dan tindakan preventif yang dapat membantu melindungi kesehatan dan kesejahteraan masyarakat dari paparan polusi udara.

5. Penggunaan Teknologi Pembersih Udara:

Penggunaan teknologi pembersih udara di dalam rumah dan gedung untuk mengurangi paparan polusi dalam ruangan.

Penggunaan teknologi pembersih udara di dalam rumah dan gedung adalah langkah yang efektif dalam mengurangi paparan polusi dalam ruangan. Berikut adalah uraian detail tentang berbagai teknologi pembersih udara yang dapat digunakan:

a. Filter Udara HEPA:

- **Prinsip Kerja:** Filter udara HEPA (High Efficiency Particulate Air) menggunakan serat-serat halus untuk menangkap partikel-partikel kecil seperti debu, serbuk sari, bulu hewan, dan bakteri yang berada dalam udara.

- **Efektivitas:** Filter HEPA sangat efektif dalam menangkap partikel-partikel kecil hingga 0,3 mikron dengan tingkat efisiensi filtrasi di atas 99%.
- b. Pembersih Udara dengan Sistem Filtrasi Multistage:**
 - **Prinsip Kerja:** Sistem filtrasi multistage menggunakan beberapa tahap filtrasi, termasuk pre-filter untuk menangkap partikel besar, filter HEPA untuk menangkap partikel halus, dan filter karbon aktif untuk menyerap gas-gas beracun dan bau tidak sedap.
 - **Efektivitas:** Kombinasi beberapa tahap filtrasi meningkatkan kemampuan pembersihan udara dari berbagai jenis polutan dan meningkatkan kualitas udara secara keseluruhan.
- c. Pembersih Udara dengan Teknologi Ionisasi:**
 - **Prinsip Kerja:** Pembersih udara dengan teknologi ionisasi menghasilkan ion negatif yang menempel pada partikel-partikel polutan udara, sehingga membuat partikel-partikel tersebut lebih berat dan jatuh ke permukaan, sehingga mudah dihilangkan.
 - **Efektivitas:** Teknologi ionisasi dapat membantu mengurangi partikel-partikel polutan udara dalam ruangan, termasuk debu, serbuk sari, dan bakteri, meskipun tidak efektif untuk menghilangkan gas-gas beracun.
- d. Pembersih Udara dengan Teknologi UV-C:**
 - **Prinsip Kerja:** Pembersih udara dengan teknologi UV-C menggunakan sinar ultraviolet tipe C untuk membunuh atau menonaktifkan bakteri, virus, jamur, dan mikroorganisme lainnya yang terdapat dalam udara.
 - **Efektivitas:** Teknologi UV-C efektif dalam membunuh mikroorganisme yang berpotensi menyebabkan penyakit, sehingga meningkatkan kualitas udara dalam ruangan.
- e. Pembersih Udara dengan Teknologi Ozone:**
 - **Prinsip Kerja:** Pembersih udara dengan teknologi ozon menghasilkan molekul ozon (O_3) yang bertindak

sebagai agen pemurnian udara dengan menguraikan dan menghilangkan zat-zat berbahaya dalam udara.

- o **Efektivitas:** Teknologi ozon dapat efektif membersihkan udara dari bau tidak sedap, polutan organik, dan bakteri, namun penggunaan ozon harus dilakukan dengan hati-hati karena ozon dapat berbahaya bagi kesehatan manusia bila terhirup dalam konsentrasi tinggi.

f. Pemantauan Kualitas Udara dalam Ruangan:

Sensor Pemantauan Kualitas Udara: Menggunakan sensor pemantauan kualitas udara dalam ruangan untuk memantau tingkat polutan udara dan mengatur penggunaan pembersih udara secara otomatis sesuai kebutuhan.

Penggunaan teknologi pembersih udara dalam rumah dan gedung dapat membantu mengurangi paparan polusi dalam ruangan dan meningkatkan kesehatan serta kenyamanan penghuninya. Namun, pemilihan teknologi pembersih udara yang tepat harus disesuaikan dengan jenis polutan udara yang dominan dan kebutuhan spesifik dari lingkungan tempat tinggal atau bekerja.

6. Penggunaan Energi Terbarukan:

Mendorong penggunaan energi terbarukan seperti energi surya dan angin untuk mengurangi polusi udara dari pembangkit listrik konvensional.

Mendorong penggunaan energi terbarukan seperti energi surya dan angin merupakan langkah yang krusial dalam mengurangi polusi udara yang dihasilkan dari pembangkit listrik konvensional. Berikut adalah uraian detail tentang bagaimana energi terbarukan dapat membantu mengurangi polusi udara:

a. Energi Surya:

- o **Prinsip Kerja:** Energi surya mengkonversi sinar matahari menjadi energi listrik melalui panel surya yang terbuat dari sel fotovoltaik.
- o **Tidak Menghasilkan Emisi:** Pembangkit listrik surya tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca atau polutan

udara selama operasinya karena tidak menggunakan bahan bakar fosil.

- **Pemanfaatan Lahan Tidak Intensif:** Panel surya dapat dipasang di atap bangunan, tanah yang tidak produktif, atau lahan terbuka lainnya tanpa mengganggu aktivitas lain, sehingga tidak menimbulkan dampak lingkungan yang signifikan.

b. Energi Angin:

- **Prinsip Kerja:** Energi angin menggunakan turbin angin untuk mengubah energi kinetik angin menjadi energi listrik.
- **Energi Bersih:** Pembangkit listrik angin tidak menghasilkan emisi polutan udara atau gas rumah kaca selama operasinya karena tidak menggunakan bahan bakar fosil.
- **Pemanfaatan Lahan Fleksibel:** Turbin angin dapat dipasang di lahan terbuka, di pesisir pantai, atau bahkan di lautan, sehingga dapat dimanfaatkan di berbagai lokasi tanpa perlu melakukan deforestasi atau merusak habitat alami.

c. Manfaat Pengurangan Polusi Udara:

- **Menggantikan Pembangkit Listrik Konvensional:** Dengan menggantikan pembangkit listrik konvensional yang menggunakan batu bara atau minyak dengan pembangkit listrik terbarukan seperti surya dan angin, dapat mengurangi jumlah polusi udara yang dihasilkan dari sektor pembangkit listrik.
- **Peningkatan Kualitas Udara:** Dengan mengurangi jumlah polutan udara yang dilepaskan ke atmosfer, penggunaan energi terbarukan dapat membantu meningkatkan kualitas udara di wilayah tersebut dan mengurangi dampak negatifnya terhadap kesehatan masyarakat.

d. Kebijakan Dukungan:

- **Insentif Finansial:** Memberikan insentif finansial seperti tarif feed-in, subsidi pajak, atau kredit pajak

untuk investasi dalam pembangkit listrik terbarukan, sehingga membuatnya lebih menarik secara ekonomi.

- **Regulasi yang Mendukung:** Menerapkan regulasi yang mendukung pengembangan dan penggunaan energi terbarukan, seperti target ketersediaan energi terbarukan dalam penyediaan energi nasional atau kebijakan pembelian energi terbarukan oleh pemerintah dan industri.

e. Penyuluhan dan Edukasi:

- **Kampanye Penyuluhan:** Mengadakan kampanye penyuluhan kepada masyarakat tentang manfaat energi terbarukan dalam mengurangi polusi udara dan dampak positifnya terhadap lingkungan dan kesehatan.
- **Pendidikan tentang Teknologi:** Memberikan pendidikan dan pelatihan kepada masyarakat tentang teknologi energi terbarukan, instalasi panel surya, operasi turbin angin, dan manfaatnya bagi lingkungan.

Dengan mendorong penggunaan energi terbarukan seperti surya dan angin, kita dapat mengurangi polusi udara yang dihasilkan dari pembangkit listrik konvensional, serta menyediakan sumber energi yang bersih dan berkelanjutan untuk masa depan.

7. Pengaturan Kebijakan:

Mengadopsi kebijakan lingkungan yang ketat dan efektif untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan polutan udara lainnya.

Mengadopsi kebijakan lingkungan yang ketat dan efektif adalah langkah penting dalam upaya mengurangi emisi gas rumah kaca dan polutan udara lainnya. Berikut adalah uraian detail tentang bagaimana kebijakan lingkungan yang ketat dan efektif dapat dirancang dan diterapkan:

a. Standar Emisi yang Ketat:

- **Pengaturan Batas Emisi:** Menetapkan standar emisi yang ketat untuk industri, kendaraan bermotor, dan pembangkit listrik, yang mencakup berbagai polutan udara seperti sulfur dioksida (SO_2), nitrogen oksida

(NO_x), partikulat, dan gas rumah kaca seperti karbon dioksida (CO₂).

- **Penegakan Hukum yang Tegas:** Memastikan penerapan dan penegakan hukum terhadap standar emisi yang ditetapkan, dengan memberlakukan sanksi dan denda bagi pelanggar serta mengawasi kepatuhan secara berkala.

b. Pengembangan Teknologi Bersih:

- **Investasi dalam Riset dan Pengembangan:** Mendorong investasi dalam riset dan pengembangan teknologi bersih untuk industri, transportasi, dan pembangkit listrik, seperti teknologi pengendalian emisi, energi terbarukan, dan efisiensi energi.
- **Insentif untuk Adopsi Teknologi Bersih:** Memberikan insentif finansial, seperti subsidi atau kredit pajak, kepada perusahaan yang mengadopsi teknologi bersih dan ramah lingkungan.

c. Peningkatan Efisiensi Energi:

- **Promosi Efisiensi Energi:** Mendorong penggunaan teknologi dan praktik efisiensi energi dalam industri, transportasi, dan sektor rumah tangga, seperti penggunaan peralatan yang lebih efisien, insulasi bangunan, dan sistem transportasi yang lebih efisien.
- **Kampanye Kesadaran Masyarakat:** Melakukan kampanye kesadaran masyarakat tentang pentingnya efisiensi energi, manfaatnya bagi lingkungan dan ekonomi, serta cara-cara untuk mengurangi konsumsi energi secara keseluruhan.

d. Penggunaan Bahan Bakar Bersih:

- **Transisi ke Energi Terbarukan:** Mendorong transisi dari bahan bakar fosil menuju energi terbarukan seperti surya, angin, dan hidro, serta mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil yang lebih polutan.
- **Penggunaan Bahan Bakar Alternatif:** Mendorong penggunaan bahan bakar alternatif yang lebih bersih

seperti gas alam, biodiesel, atau bahan bakar hidrogen dalam industri dan transportasi.

e. Pengaturan Transportasi Publik dan Penataan Ruang Kota:

- **Promosi Transportasi Ramah Lingkungan:** Meningkatkan infrastruktur transportasi publik, seperti kereta api, bus cepat, dan jalur sepeda, serta memberikan insentif bagi penggunaan transportasi berbagi dan kendaraan listrik.
- **Perencanaan Ruang Kota Berkelanjutan:** Menerapkan perencanaan ruang kota yang berkelanjutan dengan memprioritaskan penggunaan lahan yang ramah lingkungan, meningkatkan aksesibilitas transportasi publik, dan meminimalkan penggunaan kendaraan pribadi.

f. Kerjasama Internasional dan Perjanjian Lingkungan:

- **Partisipasi dalam Perjanjian Lingkungan Global:** Berpartisipasi aktif dalam perjanjian lingkungan global seperti Protokol Kyoto, Persetujuan Paris, dan perjanjian regional lainnya untuk mengurangi emisi gas rumah kaca secara kolaboratif.
- **Kerjasama Regional:** Membangun kerjasama regional untuk pertukaran informasi, teknologi, dan sumber daya dalam upaya mengurangi polusi udara lintas batas.

Dengan menerapkan kebijakan lingkungan yang ketat dan efektif, kita dapat mengurangi emisi gas rumah kaca dan polutan udara lainnya secara signifikan, menjaga kualitas udara dan lingkungan hidup, serta meningkatkan kesehatan masyarakat secara keseluruhan.

8. Penelitian dan Inovasi:

Mendukung penelitian dan inovasi dalam teknologi hijau untuk mengurangi polusi udara dan mengembangkan solusi yang lebih efektif.

Mendukung penelitian dan inovasi dalam teknologi hijau merupakan langkah penting dalam mengurangi polusi udara

dan mengembangkan solusi yang lebih efektif. Berikut adalah uraian detail tentang bagaimana dukungan terhadap penelitian dan inovasi dalam teknologi hijau dapat dilakukan:

a. Pendanaan Penelitian dan Pengembangan:

- **Dana Publik dan Swasta:** Memberikan pendanaan baik dari pemerintah maupun sektor swasta untuk mendukung penelitian dan pengembangan teknologi hijau, termasuk program hibah, dana riset, dan investasi modal ventura.
- **Kemitraan Publik-Swasta:** Mendorong kemitraan antara pemerintah, universitas, lembaga riset, dan industri untuk melakukan penelitian bersama dan mengembangkan solusi inovatif.

b. Pusat Penelitian dan Kolaborasi:

- **Pembentukan Pusat Penelitian:** Mendirikan pusat-pusat penelitian dan inovasi yang fokus pada teknologi hijau dan pengurangan polusi udara, yang memungkinkan kolaborasi antarpemilisi dan berbagi sumber daya.
- **Kolaborasi antar Lembaga:** Mendorong kolaborasi antara lembaga penelitian, universitas, industri, dan pemerintah untuk meningkatkan akses terhadap pengetahuan dan infrastruktur penelitian.

c. Peningkatan Akses Terhadap Data dan Informasi:

- **Penyediaan Data Terbuka:** Mendorong penyediaan data terbuka tentang polusi udara, emisi gas rumah kaca, dan kualitas udara, sehingga memungkinkan para peneliti untuk melakukan analisis lebih lanjut dan mengembangkan solusi yang lebih efektif.
- **Platform Kolaborasi:** Membangun platform kolaborasi online yang memungkinkan para peneliti, ahli, dan praktisi untuk berbagi informasi, hasil penelitian, dan ide-ide inovatif.

d. Stimulasi Inovasi Teknologi Hijau:

- **Perlombaan dan Kompetisi:** Mengadakan perlombaan dan kompetisi inovasi teknologi hijau, baik tingkat lokal, nasional, maupun internasional,

untuk mendorong munculnya ide-ide baru dan solusi yang lebih efektif.

- **Insentif Fiskal:** Memberikan insentif fiskal seperti kredit pajak, insentif pajak, atau subsidi untuk perusahaan yang mengembangkan dan mengadopsi teknologi hijau dalam operasinya.

e. Pengembangan Teknologi Bersih:

- **Teknologi Pembersih Udara:** Mendukung penelitian dan pengembangan teknologi pembersih udara seperti filter udara, teknologi pengendalian emisi, dan pembersih udara berbasis tanaman untuk mengurangi polusi udara dalam ruangan dan luar ruangan.
- **Inovasi Energi Terbarukan:** Mendorong inovasi dalam teknologi energi terbarukan seperti energi surya, angin, dan hidro untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mengurangi emisi gas rumah kaca.

f. Pengembangan Solusi Digital:

- **Pemanfaatan Teknologi Digital:** Menerapkan teknologi digital seperti Internet of Things (IoT), big data, dan kecerdasan buatan (AI) dalam pengembangan solusi untuk mengurangi polusi udara dan meningkatkan efisiensi energi.
- **Solusi Monitoring dan Pemantauan:** Mengembangkan solusi pemantauan dan pemodelan polusi udara berbasis teknologi digital untuk memantau polusi udara secara real-time, mengidentifikasi sumber polusi, dan merencanakan tindakan mitigasi.

Dengan mendukung penelitian dan inovasi dalam teknologi hijau, kita dapat mengembangkan solusi yang lebih efektif dalam mengurangi polusi udara, melindungi lingkungan, dan meningkatkan kualitas hidup bagi masyarakat secara keseluruhan.

Kombinasi dari berbagai strategi di atas dapat membantu meningkatkan kualitas udara dan melindungi kesehatan masyarakat serta lingkungan hidup secara keseluruhan.

DAFTAR PUSTAKA

- Cooper, C. D. and Alley, F. C. 1994. Air Pollution Control, 2nd ed., Waveland Press, Inc., Prospect Heights, IL. Fardiaz, S., 1992 , " Polusi air dan udara " cetakan ke-9 , Kanisius, Yogyakarta .
- Hadiyanto, A., dan Sasongko, D.P., 1998, "Buku Teks ; Pengendalian Pencemaran Udara " , Pusat Studi lingkungan Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Departemen Pendidikan dan Kebudayaan , Jakarta.
- Hesketh, H. E.. 1979. Fabric filtration. Handbook of Environmental Engineering, Volume 1, Air and Noise Pollution Control.
- Humana, Totowa, NJ.Nevers de., N., 2000, "Air Pollution Control Engineering " , Second Edition , McGraw-Hill International Editions, Tokyo
- Ogawa, A. 1984. Separation of Particles from Air and Gases. CRC, Boca Raton, FL, Vol. II.
- Soedomo, M., 2001, "Pencemaran Udara (Kumpulan karya ilmiah), ITB press, Bandung
- Wang, L. K., Pereira, N. C., dan Hung, Y.-T. 2004. Air pollution control engineering (Vol. 1): Springer.
- Wark, K, and Warner,C.F., 1981, " Air Pollution its Origin and Control " Second Edition , Harper & Row, Publishers, New York

BAB 5

TEKNOLOGI PENGENDALIAN POLUSI UDARA

5.1 Karakteristik Udara Emisi

Kegiatan manusia dalam memenuhi kebutuhan hidupnya, sering kali menghasilkan limbah/buangan ke udara ambien atau atmosfer. Kegiatan yang menghasilkan pencemar udara, disebut sebagai sumber pencemar udara atau sumber emisi udara (PP Nomor 22 Tahun 2021, 2021). Sumber pencemar udara dapat dibedakan menjadi sumber tetap/diam (*stationary source*) dan sumber bergerak (*mobile source*). Sumber emisi tetap/diam (*stationary source*) adalah sumber emisi pencemar udara yang tetap berada pada lokasi tertentu di permukaan bumi. Sumber tetap/diam pencemar udara misalnya, aktifitas memasak pada perumahan, proses produksi industri, kegiatan pembangkitan listrik pada pembangkit listrik tenaga uap, pembakaran biomasa, lahan urug sampah (landfill), dll. Sumber emisi bergerak (*mobile source*) adalah sumber emisi pencemar udara, yang lokasinya di permukaan bumi dapat berpindah terhadap waktu. Sumber pencemar udara bergerak, misalnya motor, mobil, kereta api, pesawat terbang, kapal laut.

Untuk menjaga kualitas udara ambien, aliran udara emisi dari sumber pencemar perlu diolah dengan peralatan pengendali atau pembersih udara. Pemilihan teknologi untuk membersihkan udara emisi dipengaruhi oleh karakteristik udara emisi. Umumnya udara emisi dari sumber pencemar mengandung campuran bahan, berbentuk padat dan gas.

5.1.1 Partikulat

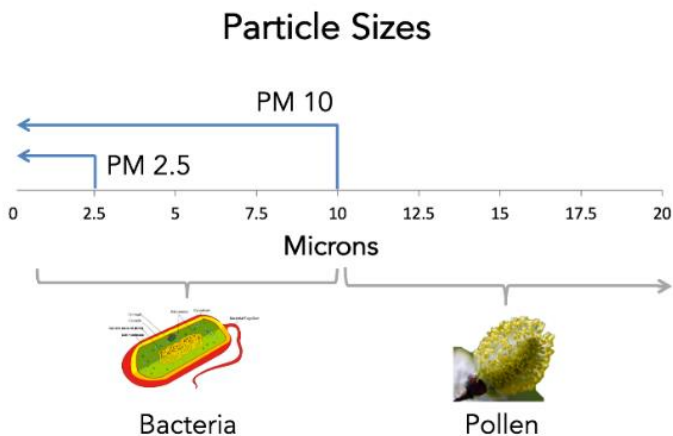
Partikulat (*Partikulat Matter*) adalah istilah umum yang digunakan untuk campuran partikel padat dan partikel cair yang tersuspensi di udara. Partikulat yang dilepaskan dalam aliran gas terdiri dari partikel-partikel kecil yang tersuspensi. Ukuran

partikulat pada udara emisi, dinyatakan dalam satuan micron (μm – mikrometer ; $1\mu\text{m} = 0,0001\text{ cm}$). Ukuran partikel berkisar dari $100\mu\text{m}$ hingga $0,1\mu\text{m}$ atau bahkan lebih kecil.

Klasifikasi ukuran partikulat

1. Ukuran lebih dari 100 mikron dikategorikan sebagai kelompok yang mudah mengendap,
2. Ukuran kurang dari 100 mikron sebagai partikulat tersuspensi di udara.
3. Untuk ukuran kurang dari 10 mikron dapat berpotensi untuk berpengaruh terhadap sistem pernapasan (*inhalable particulate*)
4. Kurang dari 1 mikron merupakan kelompok *permanently suspended* di udara.

Berdasarkan dampaknya terhadap kesehatan manusia, dikenal istilah PM10 dan PM2,5. PM10 adalah partikel dengan diameter aerodinamis 10 mikrometer (μm) atau kurang, sedangkan PM2.5 adalah partikel dengan diameter aerodinamis 2,5 mikrometer (μm) atau kurang.



Gambar 5.1. ukuran PM10 dan PM2,5

Sumber <https://smartairfilters.com/wordpress/wp-content/uploads/2017/11/Particle-Sizes-PM10-vs-PM2.5-EN.png>

5.1.2 Gas-gas pencemar pada Udara Emisi

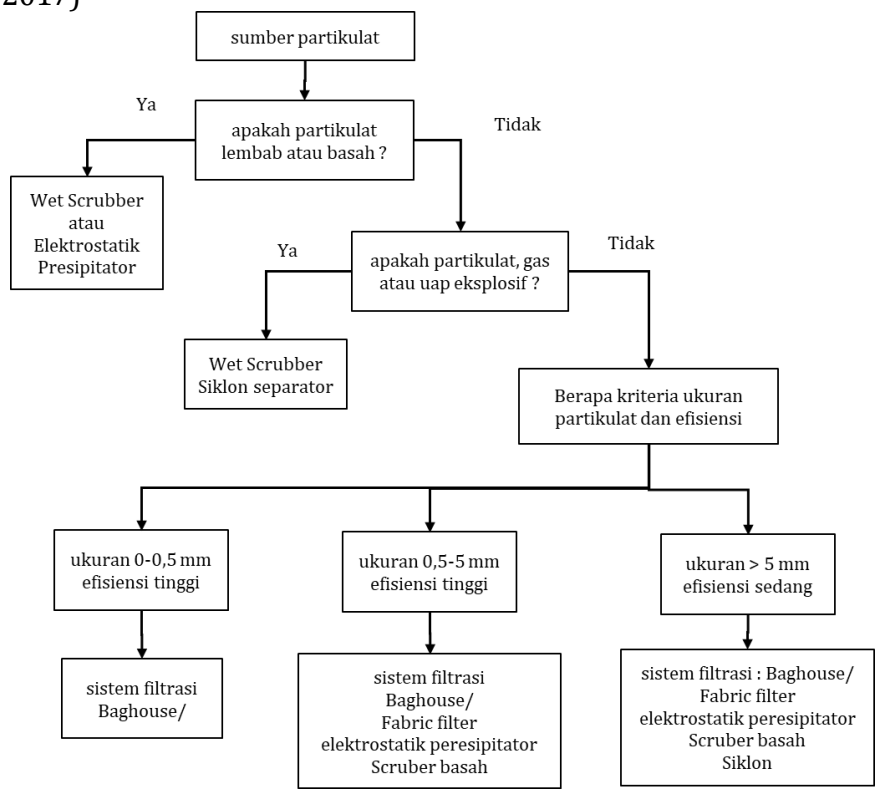
Gas-gas dalam aliran udara emisi, memiliki konsentrasi yang tinggi, sehingga dapat menyebabkan gangguan terhadap kesehatan manusia, tumbuhan dan mencemari lingkungan. Gas-gas pencemar dalam aliran udara emisi perlu dibersihkan, sebelum udara emisi dialirkan ke atmosfer. Empat polutan jenis gas yang sering terdapat dalam aliran udara emisi adalah Oksida Belerang (SO_x), Oksida Nitrogen (NO_x), Senyawa Organik Volatil (VOC), dan Karbon Monoksida (CO). Gas-gas polutan tersebut umumnya diemisikan dari proses pembakaran bahan bakar fosil, baik dari sumber tetap maupun bergerak, tetapi masing-masing juga dapat diemisikan dari proses non-pembakaran seperti SO_x dari tungku peleburan, penguapan organik dari tangki minyak, dan NO_x dari kegiatan pertanian (Varandani, 2017).

5.2 Teknologi Pembersih Partikulat pada Udara Emisi

5.2.1 Pertimbangan pemilihan peralatan

Pengendalian partikulat pada aliran udara emisi, pada dasarnya adalah teknologi pemisahan. Partikulat dipisahkan dari aliran udara emisi, sehingga diperoleh udara bersih yang dapat dialirkan ke atmosfer tanpa menimbulkan pencemaran yang dapat berdampak terhadap kesehatan manusia, mengganggu hewan dan tumbuhan serta lingkungan. Partikulat dalam udara emisi, dapat dipisahkan dari udara menggunakan sistem basah maupun sistem kering. Partikulat berukuran besar lebih mudah dipisahkan dari aliran udara emisi. Pemisahan partikulat dalam kondisi kering misalnya *cyclone*, *electrostatic precipitator* dan *fabric filter (baghouse)*. *Cyclone* umumnya digunakan sebagai pengolahan pendahuluan, dilanjutkan pengolahan menggunakan peralatan lain. *Cyclone* efektif untuk partikulat berukuran lebih besar dari 5 mikrometer. *Baghouse* dan *electrostatic precipitator* dapat digunakan setelah *cyclone*. Elektrostatic precipitator sesuai untuk mengolah udara emisi dengan volume besar. *Wet scrubber* adalah pemisahan partikulat menggunakan sistem basah (Kenneth C. Schiffner, 2021).

Pemilihan peralatan untuk menyisihkan partikulat dalam udara emisi, dapat menggunakan diagram alir sebagai berikut (Varandani, 2017)



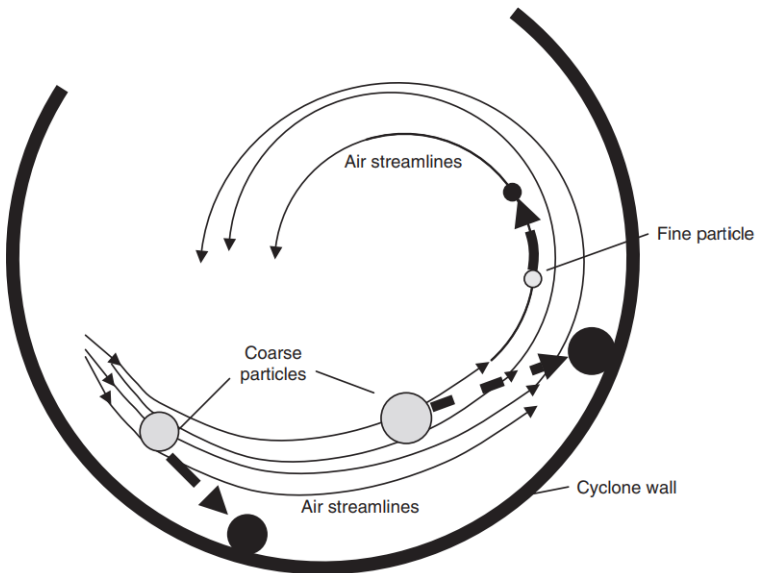
Gambar 5.2. Pemilihan peralatan pembersih partikulat dalam udara emisi

Sumber ; (Varandani, 2017)

5.2.2 Siklon Separator (*Cyclone Separators*)

Siklon adalah peralatan yang banyak dimanfaatkan untuk membersihkan partikulat dari udara emisi, sehingga diperoleh udara yang bersih. Teknologi yang digunakan untuk memisahkan partikulat dari aliran udara emisi adalah gaya sentrifugal dan gaya gravitasi pada partikel. Siklon digunakan untuk memisahkan partikulat hingga berukuran 5 μm sehingga diperoleh udara yang bebas dari partikulat.

Siklon memisahkan partikulat dari aliran udara emisi dalam kondisi kering dengan memanfaatkan gaya sentrifugal. Udara emisi masuk melalui inlet siklon dengan kecepatan tinggi dengan arah tangensial dan bergerak menuju badan siklon. Kecepatan tinggi dengan arah tangensial menyebabkan aliran udara bergerak memutar sehingga pada partikulat bekerja gaya tangensial. Partikulat akan terlempar ke arah dinding siklon, dan menempel pada dinding siklon. Partikulat yang menempel pada dinding siklon, akan jatuh pada bagian bawah siklon, berbentuk debu kering. Siklon dapat dioperasikan secara tunggal maupun multisiklon dengan susunan seri maupun paralel (Lawrence K. Wang, Norman C. Pereira, 2004) (Louis Theodore, 2008).

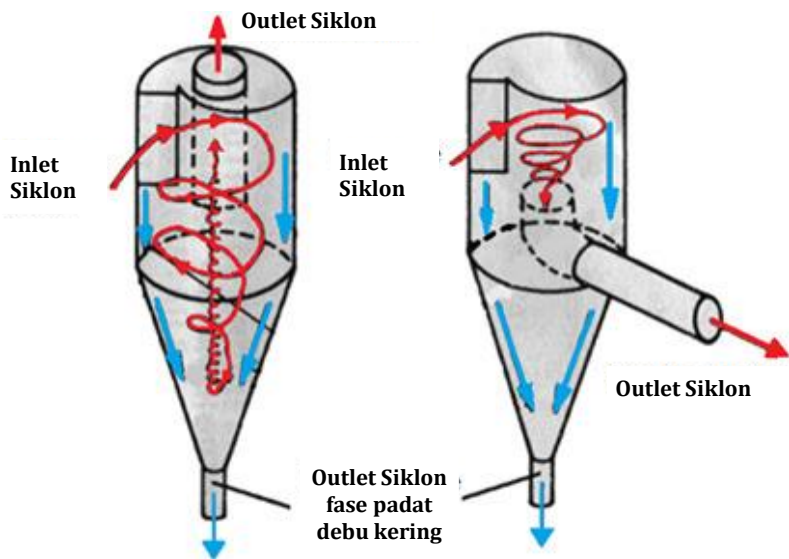


Gambar 5.3. Gaya yang bekerja pada partikulat dalam siklon separator

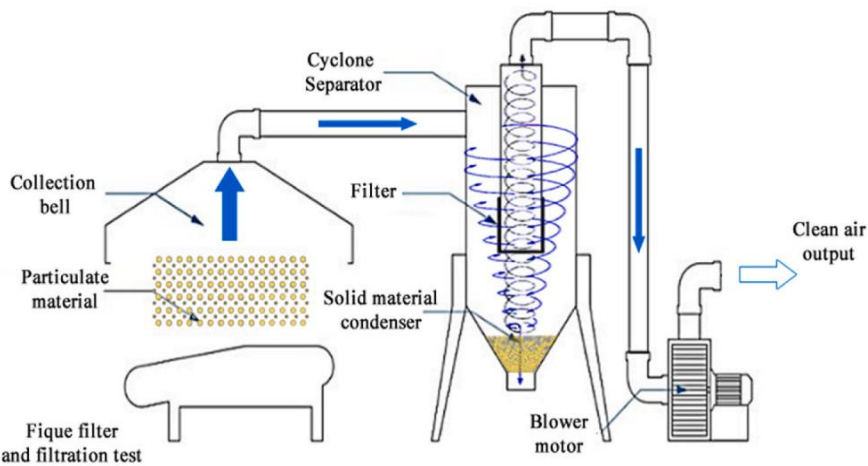
Sumber ; (Vallero, 2008)

Beberapa kelebihan siklon antara lain, operasional peralatan sederhana, dapat beroperasi pada suhu tinggi, pemeliharaan mudah, biaya pengadaan peralatan relatif rendah, tidak memerlukan ruang yang besar untuk penempatan siklon, merupakan sistem pembersih udara kering, dihasilkan debu kering, tidak menghasilkan limbah

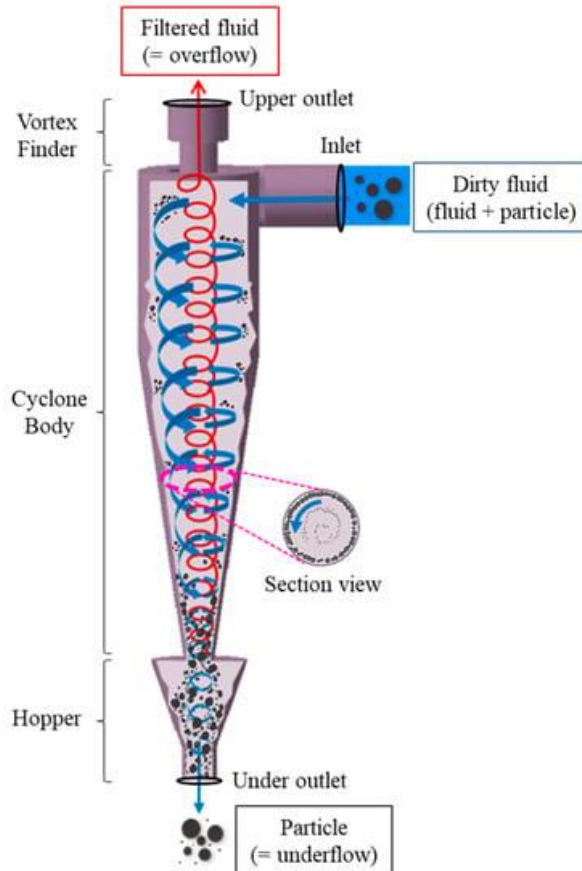
cair. Sedangkan kekurangan siklon antara lain, efisiensi relatif rendah bila partikulat berukuran kecil, dan kehilangan tekanan siklon relatif tinggi (Rocha E. M, Silva and Mathias, 2021).



Gambar 5.4. Mekanisme pembersihan udara menggunakan siklon (sumber : Monir et al, 2023)



Gambar 5.5. Pemanfaatan siklon pada sumber pencemar udara Sumber (Gutierrez et al, 2024)



Gambar 5.6. Bagian dari peralatan Siklon Separator
(sumber : (Kang and Kwak, 2023))

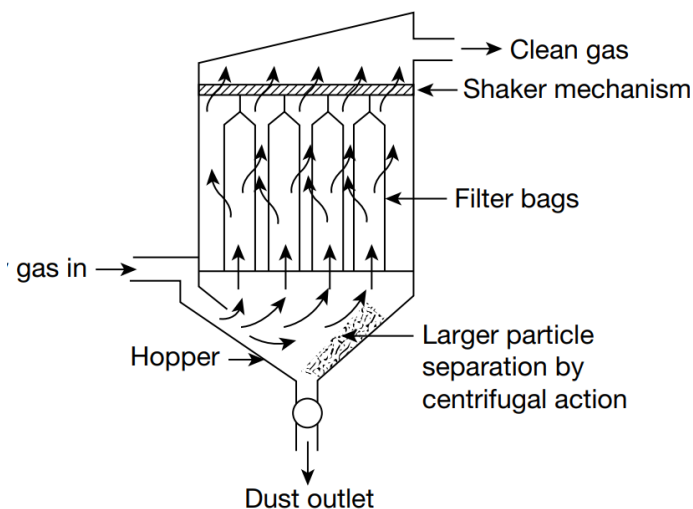
5.2.3 *Fabric filters* atau *Baghouses*

Peralatan *fabric filter* juga disebut sebagai *baghouse*, digunakan untuk menyaring partikulat yang terbawa dalam aliran udara emisi. Teknologi yang digunakan adalah penyaringan melalui pori-pori media filter. Peralatan ini tersusun dari beberapa kantung filter. Kantung filter berbentuk tabung, dimana filter disangga oleh kerangka logam.

Prinsip kerja dari *fabric filter* adalah penyaringan melalui media padat. Udara emisi dialirkan melalui kantung filter yang memiliki pori-pori. Udara akan mampu mengalir melalui pori-pori media filter, sedangkan partikulat tertahan pada permukaan filter.

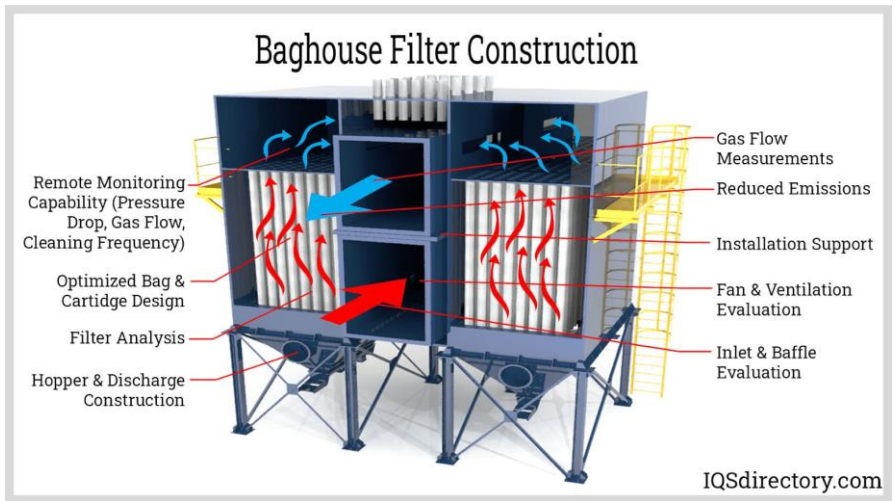
Partikulat yang tertahap pada permukaan filter dibersihkan dengan beberapa metoda. Penggantian media filter dilakukan, bila filter mengalami kerusakan. (Rocha E. M, Silva and Mathias, 2021)

Beberapa kelebihan *fabric filter* antara lain, efisien untuk menyaring partikel dengan rentang ukuran besar hingga kecil, dapat digunakan pada debit udara emisi bervariasi, tidak menghasilkan limbah cair, kehilangan tekanan relatif kecil. Sedangkan beberapa kelemahannya antara lain memerlukan ruang yang luas, kurang sesuai untuk udara emisi dengan suhu tinggi dan korosif karena dapat merusak material kantung filter, tidak dapat dioperasikan pada kondisi lembab, kemungkinan terjadi kebakaran atau ledakan, serta memerlukan biaya pemeliharaan yang mahal (Louis Theodore, 2008).



Gambar 5.7. Skema aliran udara emisi pada peralatan *Fabric Filter* atau *Baghouse* (Sumber :Varandani, 2017)

Keberhasilan desain *fabric filter* atau *baghouse* bergantung pada variabel desain utama, yaitu : material kantung filter, metode pembersihan kain, rasio udara terhadap kain, konfigurasi *baghouse* (misalnya, tekanan paksa atau tekanan hisap) dan bahan konstruksi (Lawrence K. Wang, Norman C. Pereira, 2004).

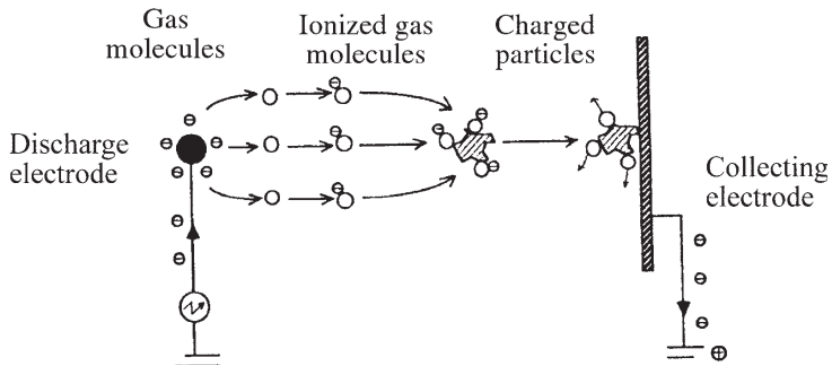


Gambar 5.8. Konstruksi peralatan *Fabric Filter* atau *Baghouse*
 Sumber : <https://www.iqsdirectory.com/articles/dust-collector/baghouse/baghouse-filter-construction.jpg> Access Date
 November 9, 2024

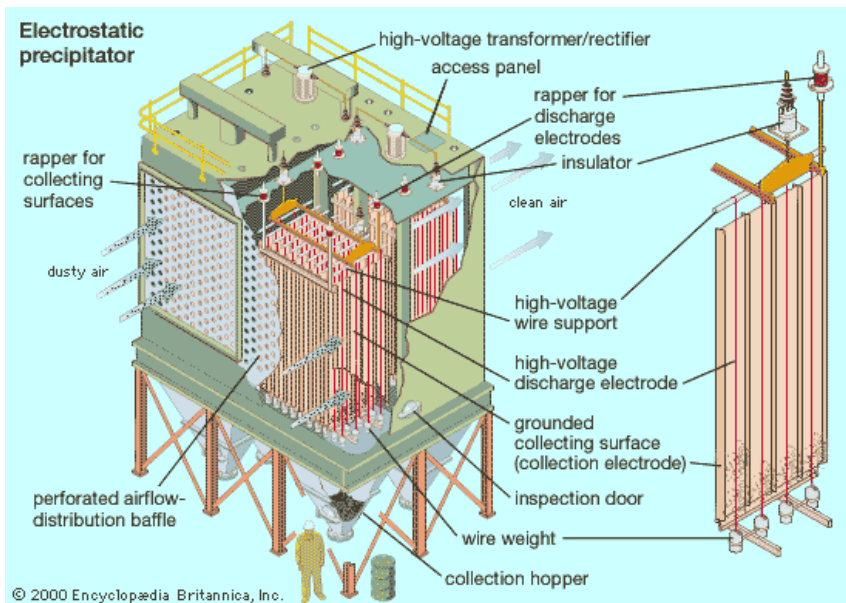
5.2.4 Presipitator Elektrostatik (ESP - *Electrostatic Precipitator*)

Presipitator elektrostatik adalah peralatan yang berfungsi untuk memisahkan partikulat tersuspensi dari aliran udara emisi dengan teknologi medan listrik. Peralatan ini umumnya digunakan untuk mengolah aliran udara emisi dengan debit besar, seperti pada pembangkit listrik tenaga uap, industri semen, industri kertas (Varandani, 2017).

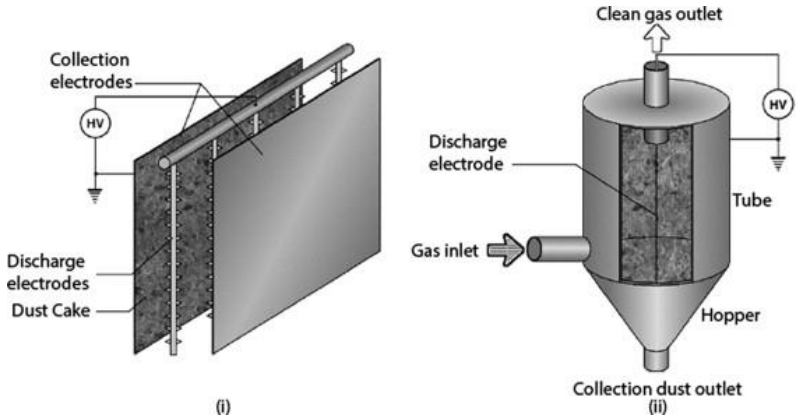
Prinsip kerja dari presipitator elektrostatik adalah : aliran udara emisi yang mengandung partikulat masuk melalui inlet ke dalam ruang dengan medan listrik. Hal ini menyebabkan partikulat bermuatan listrik. Pada saat aliran udara melalui ruang antar elektroda logam, partikel bermuatan negatif akan menempel pada elektroda positif dan terpisah dari aliran udara. Partikel yang menempel akan jatuh menjadi debu pada bagian bawah peralatan presipitator elektrostatik. Terdapat dua jenis ESP yaitu : (a) Tipe tabung atau pipa dan (b) Tipe pelat. (Varandani, 2017) (Louis Theodore, 2008).



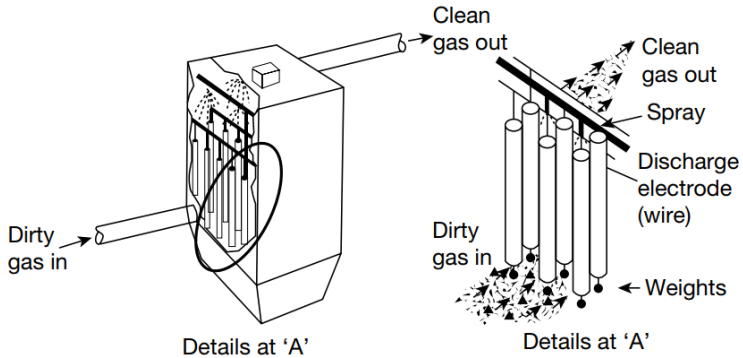
Gambar 5.9. Mekanisme penyisihan partikulat pada Presipitator Elektrostatik
(sumber (Lawrence K. Wang, Norman C. Pereira, 2004)



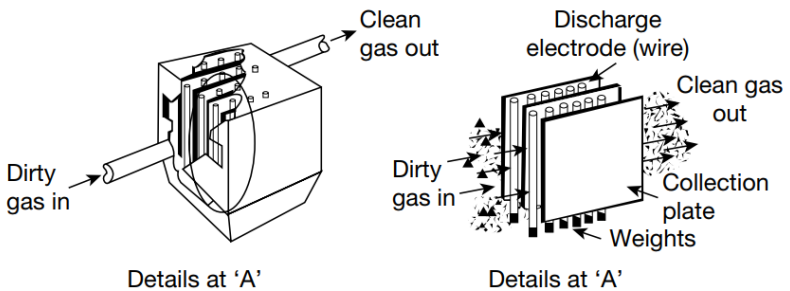
Gambar 5.10. Peralatan Presipitator Elektrostatik
(sumber : <https://www.britannica.com/technology/electrostatic-precipitator#/media/1/1091275/19727> ; Access Date November 9, 2024)



Gambar 5.11. Jenis presipitator elektrostatik (i) tipe plat paralel dan (ii) tipe tabung. (sumber : (Singh and Shukla, 2014)



Gambar 5.12 Presipitator elektrostatik tipe tabung. (sumber : Varandani, 2017)



Gambar 5.13. Presipitator elektrostatik jenis plat paralel (sumber : (Varandani, 2017)

Kelebihan presipitator elektrostatis antara lain : efisiensi tinggi, mampu menyisihkan partikulat berukuran kecil (0,1 – 10 mikron), dapat digunakan untuk membersihkan aliran udara emisi dengan debit besar, kehilangan tekanan kecil, dapat dioperasikan untuk membersihkan udara emisi bersuhu tinggi, biaya operasional relatif rendah. Sedangkan kelemahan presipitator elektrostatis antara lain, biaya kapital mahal, memerlukan ruang yang luas karena peralatan berukuran besar (Rocha E. M, Silva and Mathias, 2021) (Lawrence K. Wang, Norman C. Pereira, 2004).

Electrostatic precipitator digunakan pada beberapa industri seperti pembangkit tenaga listrik, Industri Pulp dan Kertas, Industri Metalurgi, Industri Semen, Industri Perminyakan, dan Insinerator Limbah Padat Perkotaan, dll (Lawrence K. Wang, Norman C. Pereira, 2004).

5.2.5 Skrubber Basah (*Wet Scrubber*)

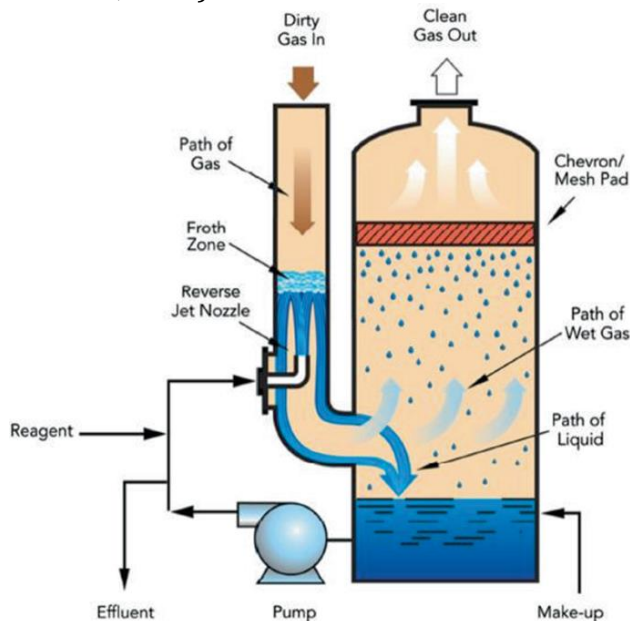
Skrubber basah adalah peralatan pembersih udara emisi yang dapat digunakan untuk membersihkan partikulat maupun gas dari aliran udara emisi. Mekanisme penyisihan partikulat dari udara emisi dilakukan dengan kontak antara partikulat dengan butiran cairan atau pelarut. Cairan pelarut yang banyak digunakan adalah air. Kinerja dari skrubber basah dipengaruhi oleh ukuran partikel, kecepatan partikulat dan kecepatan tetesan air (Varandani, 2017).

Pada scrubber basah, air atau larutan tertentu disemprotkan dengan arah berlawanan arah dengan aliran udara emisi. Biasanya larutan disemprotkan dari bagian atas, sedang udara emisi masuk melalui inlet di bagian bawah scrubber basah, sehingga terjadi kontak antara larutan dengan udara emisi. Partikulat akan terperangkap dalam larutan dan selanjutnya jatuh pada bagian bawah scrubber basah.

Skrubber basah diaplikasikan untuk memisahkan partikulat dengan karakteristik berikut: (i) partikulat bersifat lengket dan/atau higroskopis atau mudah menyerap air]; (ii) partikulat yang mudah terbakar, korosif, dan eksplosif; (iii) Partikulat yang sulit dihilangkan dalam kondisi keringnya; (iv) partikulat bercampur dengan gas yang mudah larut; (v) partikulat dalam aliran gas buang dengan kadar kelembaban tinggi (Varandani, 2017).

Kelebihan *scrubber* basah antara lain mampu menetralkan partikulat yang bersifat korosif dan mudah terbakar, mampu menurunkan suhu udara emisi, serta tidak memerlukan lahan yang luas untuk penempatan *scrubber* basah. Adapun kekurangan *scrubber* basah adalah penggunaannya terbatas pada debit udara emisi kurang dari 47 m³/detik **dan** suhu di bawah 400°C, menghasilkan limbah cair yang memerlukan penanganan lebih lanjut, kemungkinan terjadi korosi pada peralatan, kehilangan tekanan besar, serta biaya perawatan peralatan relatif tinggi.

Skruber basah dibedakan berdasarkan metode kontak antara butiran cairan dengan partikulat. Ada 4 jenis skruber basah, yaitu a. menara semprot atau ruang semprot (*spray towers*, *spray chambers*) dengan aliran berlawanan arah (*counter current flow*) atau aliran silang (*cross-flow*), b. Skruber sentrifugal (*centrifugal/cyclone spray chambers*) c. Skruber dengan media tetap atau skruber kolom pelat (*packed beds dan plate columns*) d. skruber venturi (*venturi scrubbers*) (Varandani, 2017) (Lawrence K. Wang, Norman C. Pereira, 2004).



Gambar 5.14. Peralatan Scrubber basah (*wet scrubber*)
(sumber (Chiang and Gao, 2022b))

5.3 Teknologi Pembersih Gas pada Udara Emisi

5.3.1 Pemilihan Peralatan Pembersih Gas

Pemilihan dan desain sistem pengendali pencemar gas berdasarkan pada data aliran udara emisi yang akan diolah, antara lain : sifat partikulat dalam aliran udara emisi ; debit udara emisi rata-rata dan debit puncak; suhu rata-rata dan suhu maksimum; konsentrasi rata-rata dan maksimum partikulat; konsentrasi oksigen minimum, rata-rata, dan maksimum ; konsentrasi rata-rata dan puncak kontaminan; karakteristik penyalan kontaminan. Data debit aliran udara emisi dan suhu diperlukan desain dimensi peralatan pengendali dan menentukan kondisi operasional penyisihan pencemar peralatan. Data konsentrasi oksigen dan kemampuan penyalan gas dan uap diperlukan untuk menentukan konsentrasi kontaminan yang diijinkan. Banyak senyawa organik dan anorganik yang terkumpul dapat menyala jika konsentrasi kontaminan, konsentrasi oksigen, dan suhu gas berada dalam kisaran berbahaya (Richards, 2000).

Teknologi yang umum digunakan untuk menyisihkan gas pencemar dari aliran udara emisi adalah kondensasi, adsorpsi dan absorpsi. Penyisihan gas kontaminan pada kondensasi dilakukan dengan pengaturan suhu, yang dapat mengubah gas kontaminan menjadi cairan dan terpisah dari aliran udara. Pada teknik teknologi absorpsi, gas kontaminan dikontakkan dengan cair yang sesuai, tergantung jenis gas, suhu, kelarutan dan faktor lain. Pada adsorpsi, gas kontaminan dikontakkan dengan material absorben yang sesuai sehingga terpisah dari aliran udara emisi (Kenneth C. Schiffner, 2021).

Pemilihan teknologi untuk membersihkan gas pencemar dari aliran udara emisi dapat dilihat dari tabel berikut (Varandani, 2017)

Tabel 5.1. Perbandingan teknologi absorpsi, adsorpsi dan kondensasi untuk membersihkan udara emisi

	Absorpsi	Adsorpsi	Kondensasi
Penggunaan umum	Gas bersifat asam Senyawa organik	Gas bersifat asam Senyawa organik	Senyawa organik
Rentang konsentrasi gas	< 1 ppm sampai > 100.000 ppm	< 1 pp sampai 25% LEL	>100 ppm
Suhu gas	< 65 °C	< 54 °C	-160 °C sampai 27 °C
Mampu digunakan untuk mengendalikan beberapa kontaminan	Ya	Ya	Ya
Mampu mengolah aliran udara emisi yang mengandung partikulat	Ya	Seringkali perlu pengolahan pendahuluan	Seringkali perlu pengolahan pendahuluan

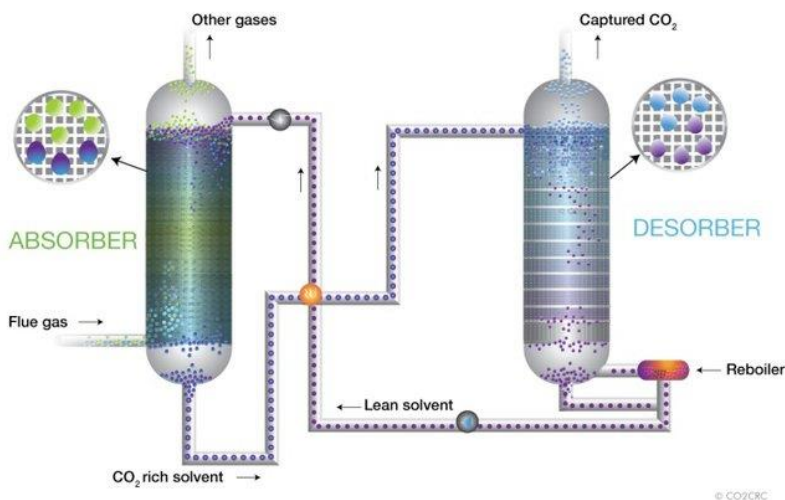
Sumber : (Varandani, 2017)

5.3.2 Absorpsi

Absorpsi juga disebut dengan pencucian (*scrubbing*). Absorpsi digunakan untuk menyisihkan atau bahkan membersihkan gas pencemar tertentu dari aliran udara emisi. Pada peralatan absorpsi terjadi proses difusi di mana molekul gas dipindahkan ke dalam fase cair, sehingga terjadi pemindahan polutan dari fase gas ke fase cair melintasi antarmuka (antara absorber dan absorbent). Proses ini dapat berupa penyerapan fisik maupun penyerapan kimia. Penyerapan fisik hanya melibatkan proses pelarutan, yaitu melarutkan polutan gas dalam pelarut. Air adalah pelarut yang paling umum digunakan. Air efektif untuk menghilangkan gas pencemar bersifat asam, seperti HCl, HF, dan gas pencemar bersifat basa seperti NH_3 .

Mekanisme absorpsi melalui 3 tahapan yaitu : difusi molekul polutan dari fase gas (udara) ke permukaan cairan penyerap (absorben); lalu) pelarutan (molekul gas) ke dalam cairan di antarmuka; dan difusi spesies terlarut dari antarmuka ke dalam bagian utama cairan. Secara umum, absorpsi dapat mencapai efisiensi pembersihan lebih dari 95%, namun salah satu potensi masalah absorpsi adalah timbulnya air limbah, yang mengubah masalah pencemaran udara menjadi masalah pencemaran air (Varandani, 2017).

Kelebihan absorpsi adalah efisiensi penyisihan gas polutan tinggi, biaya investasi relatif rendah, tidak memerlukan luas lahan yang besar, kehilangan tekanan relatif kecil. Adapun kekurangannya antara lain, beberapa gas terabsorpsi pada media absorben, menghasilkan limbah cair yang perlu diolah, memerlukan proses regenerasi, serta biaya pemeliharaan relatif tinggi (Louis Theodore, 2008).



Gambar 5.15. Proses absorpsi untuk menghilangkan gas CO₂
Sumber (Sullivan & Sivak, 2012)

5.3.3 Adsorpsi

Adsorpsi adalah peralatan yang digunakan untuk menyisihkan gas pencemar dari aliran udara emisi. Pada adsorpsi,

proses yang berlangsung adalah molekul gas polutan tertarik dan menempel pada permukaan adsorben yang berada dalam fase padat. Permukaan adsorben meliputi permukaan luar, retakan, dan celah-celah atau juga disebut dengan luas permukaan adsorben.

Adsorpsi sesuai untuk mengolah udara emisi dengan volume yang besar dengan kadar polutan sangat rendah serta mampu menghilangkan kontaminan gas hingga konsentrasi sangat rendah. Adsorpsi biasanya dilakukan dalam sebuah lapisan yang diisi dengan adsorben berbutir untuk menahan aliran udara emisi.

Proses adsorpsi dapat diterapkan untuk membersihkan gas-gas pencemar pada pengolahan gas buang industri yang mengandung produk pembakaran tidak sempurna (PAH: Hidrokarbon Poliaromatik, dioksin, dan senyawa aromatik terhalogenasi lainnya) serta CO, SO₂, dan CO₂, untuk mengurangi emisi NO_x dari knalpot kendaraan serta untuk menghilangkan bau dari tempat pengolahan sampah (lahan urug, *landfill*) (Varandani, 2017).

Kelebihan teknologi adsorpsi adalah hasil pengolahan dapat dimanfaatkan kembali, serta mampu menyisihkan gas pada konsentrasi rendah. Sedangkan kekurangannya antara lain, kapasitas adsorpsi terbatas, biaya investasi mahal, regenerasi adsorben perlu peralatan khusus (Louis Theodore, 2008).

Beberapa jenis adsorben yang umum digunakan untuk membersihkan gas polutan.

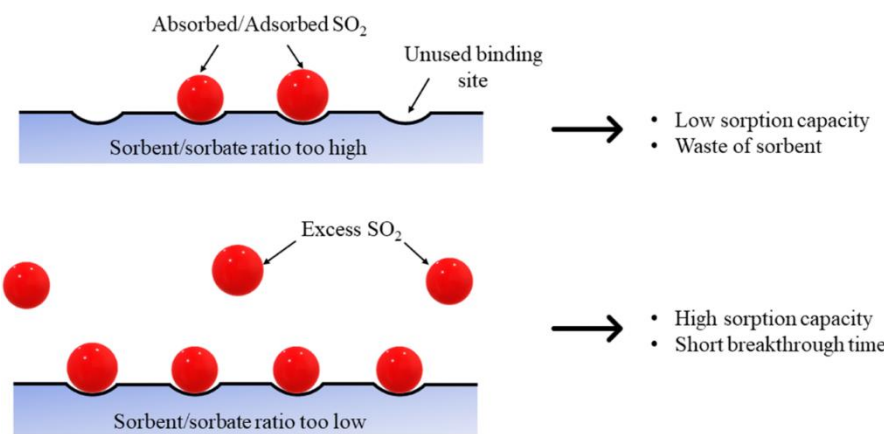
Tabel 5.2. Jenis adsorben dan gas polutan pada proses adsorpsi

No	Jenis adsorben	Gas-gas polutan
1	Batu kapur	SO ₂ (sulfur dioksida)
2	Oksida besi	H ₂ S (hidrogen sulfida)
3	Gumpalan batu kapur	HF (hidrogen florida)
4	Silika gel	NO _x (oksida nitrogen)
5	Karbon aktif	Uap pelarut organik

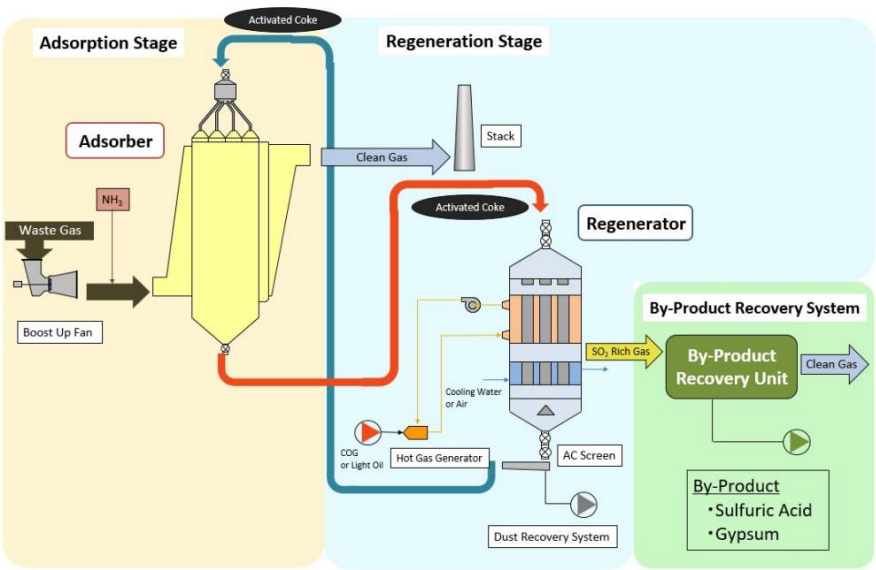
Sumber : (Varandani, 2017)

Proses adsorpsi untuk membersihkan gas polutan dari udara emisi, merupakan reaksi permukaan. Sorben menggunakan media padat, yang permukaannya memiliki gaya tarik terhadap molekul

gas. Gambaran reaksi permukaan adsorpsi antara molekul gas SO₂ digambarkan di bawah ini :



Gambar 5.16. Reaksi permukaan antara gas SO₂ dengan sorben
 Sumber : (Hanif, Ibrahim and Abdul Jalil, 2020)



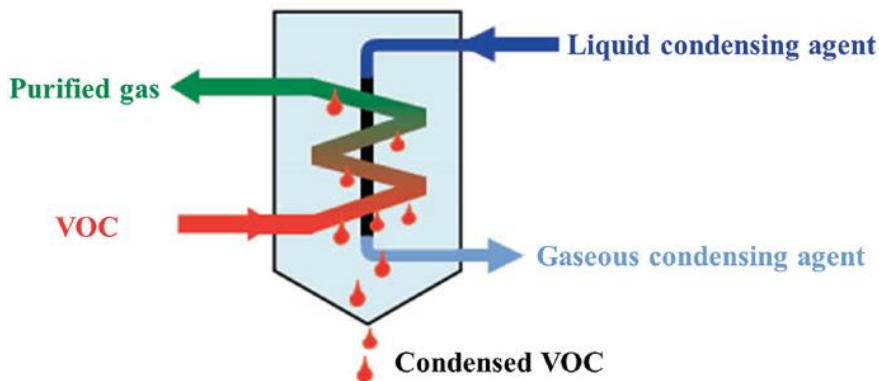
Gambar 5.17. Skema tahapan adsorpsi dilanjutkan dengan tahap regenerasi dan sistem *recovery* produk sampingnya.
 Sumber (Wang *et al.*, 2021)

5.3.4 Kondensasi

Kondensasi adalah peralatan untuk menyisihkan gas pencemar berupa senyawa organik volatil, dengan cara mengatur suhu sehingga fase gas pencemar berubah menjadi fase cair. Sistem kondensasi digunakan pada udara emisi proses industri (aliran gas buang), yaitu untuk mendapatkan kembali senyawa organik volatil (*Volatile Organic Compound*) pada konsentrasi sedang hingga tinggi. Kondensasi sangat efektif untuk memulihkan senyawa organik yang memiliki tekanan uap relatif rendah pada suhu ruang, misalnya senyawa yang hampir berubah menjadi cairan pada suhu ruang. Semakin tinggi tekanan uap suatu senyawa, semakin mudah menguap senyawa tersebut. Kondensasi biasanya digunakan untuk perlakuan awal pada aliran gas yang terpolusi dan untuk memulihkan sebagian VOC target. Sistem kondensasi merupakan pengolahan awal sebelum pengolahan lainnya seperti adsorpsi atau insinerasi. Sistem kondensasi mengurangi konsentrasi kontaminan dalam aliran udara emisi hingga konsentrasi yang setara dengan tekanan uap senyawa pada suhu operasional kondensor (Varandani, 2017).

Terdapat tiga variasi sistem kondensasi, berdasarkan suhu operasinya, yaitu : (i) Berbasis air, kondensor langsung maupun tidak langsung yang beroperasi pada rentang suhu 4,44 °C hingga 26 °C; (ii) Kondensor Pendinginan beroperasi pada rentang suhu -45 °C hingga -101 °C dan (iii) Kondensor Kriogenik yang beroperasi pada rentang suhu 73 °C hingga -195 °C (Varandani, 2017).

Kelebihan teknologi kondensasi, air yang digunakan sebagai pendingin, tidak berkontak langsung dengan aliran udara emisi, sehingga air dapat dimanfaatkan kembali. Adapun kekurangannya antara lain, efisiensi penyisihan pencemar gas relatif rendah, diperlukan proses pendinginan dan proses pencairan serta biaya operasional relatif mahal.



Gambar 5.18. Skema penyisihan senyawa organik volatil dengan teknologi kondensasi
 Sumber : (Chiang and Gao, 2022a)

Efisiensi kondensasi untuk menyisihkan senyawa organik volatil yang dapat terkondensasi mencapai 50–95%. Efisiensi penyisihan dipengaruhi oleh karakteristik aliran uap, konsentrasi komponen aliran emisi, dan parameter operasi kondensor. Efisiensi penyisihan bergantung pada sifat dan konsentrasi komponen aliran emisi. Senyawa dengan titik didih tinggi (volatilitas rendah) lebih mudah terkondensasi dibandingkan dengan senyawa bertitik didih rendah. Oleh karena itu, suhu kondensasi rancang dan pemilihan sistem pendingin didasarkan pada data tekanan uap dan suhu (Lawrence K. Wang, Norman C. Pereira, 2004).

5.4 Pemanfaatan Peralatan Pembersih Udara

Pada industri, umumnya digunakan lebih dari satu jenis teknologi untuk membersihkan aliran udara emisi dari proses produksi, berikut beberapa contoh pemanfaatan peralatan pembersih udara.

Peralatan *cyclone* dan *electrostatic precipitator* pabrik semen
 (Nur H. T. Molek, Saputri A. Renelda and S. Syaiful, 2020)

Industri semen menyumbangkan pencemar udara. Bahan baku utama pada industri semen adalah batu kapur dan tanah liat, dengan bahan tambahan koreksi berupa pasir besi dan pasir silika. Aliran udara emisi dari proses produksi semen perlu diolah

menggunakan peralatan pengendali pencemar udara, sebelum dialirkan ke atmosfer. *Cyclone* dan *electrostatic precipitator* (EP) adalah contoh alat yang dapat mengurangi pencemaran udara di industri semen.

Hasil penelitian menunjukkan, bahwa peralatan *Cyclone* dan *electrostatic precipitator* (EP) sesuai digunakan untuk mengendalikan pencemar udara berupa partikulat pada industri semen. Hasil pengukuran terhadap *cyclone* terpasang, menunjukkan efisiensi sebesar 95,5% dan efisiensi *electrostatic precipitator* EP sebesar 98,72%. Hal ini menunjukkan bahwa kedua peralatan pengendali pencemar partikulat yang terpasang pada industri semen masih berada dalam kinerja yang baik.

Cyclone dan Wet Scrubber pada industri kertas daur ulang (Rahmawati, Samadikun and Hadiwidodo, 2020)

Sumber pencemar pada industri kertas daur ulang adalah boiler yang menggunakan bahan bakar batu bara sehingga menghasilkan pencemar partikulat. Proses pembakaran boiler dengan bahan bakar batu bara menghasilkan 80% flyash dan 20% bottom ash. Aliran udara emisi dari boiler dialirkan melalui *cyclone* dan *wet scrubber* sebelum dialirkan menuju cerobong asap dan dibuang ke atmosfer. Pada industri kertas daur ulang ini menggunakan 2 buah boiler, yaitu boiler hitachi dengan konsentrasi partikulat terukur sebesar 109.3 mg/Nm³ dan boiler Hamada dengan konsentrasi partikulat terukur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *cyclone* mampu mengumpulkan partikulat sebesar 202,48 mg/m³ atau sekitar 37,9 %. Sedangkan *wet scrubber* mampu menyisihkan partikulat sebesar 186,71 mg/m³ atau memiliki efisiensi 56,2 %.

Peralatan wet scrubber dan bag filter pada industri besi dan baja (Firdaus, Wulandari and Novembrianto, 2023)

Teknologi *Bag Filter* dan *Wet Scrubber* digunakan untuk mengolah udara emisi dari proses produksi pada industri besi dan baja. Proses pembakaran batubara pada boiler, menghasilkan udara emisi berupa gas dan partikel halus serta uap asam. Udara emisi diolah menggunakan *Bag Filter* untuk menyisihkan partikulat dan

Wet Scrubber untuk menetralkan uap asam. Setelah melalui *Bag Filter* dan *Wet Scrubber*, udara dialirkan menuju cerobong asap menuju atmosfer.

Hasil uji pada peralatan *Bag Filter* dan *Wet Scrubber*, menunjukkan bahwa efisiensi alat pengendali *bag filter* sebesar 75 % dengan kecepatan alir gas sebesar 10 m/s, dan alat pengendali *wet scrubber* dengan efisiensi sebesar 67% serta kecepatan alir sebesar 8,92 m/s.

Cerobong pada industri besi dan baja memiliki tinggi 31 m dan diameter 91, 44 cm. Hasil pengukuran udara pada cerobong asap, diperoleh nilai SO₂ sebesar <10,53 µ/m³, NO₂ sebesar 28,6 µ/m³, partikulat sebesar 16,6 µ/m³, dan opasitas sebesar 17%. Hal ini menunjukkan bahwa emisi dari industri besi dan baja telah memenuhi baku mutu emisi berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No.22 tahun 2021.

DAFTAR PUSTAKA

- Dehdarinejad, E., & Bayareh, M. (2021). An Overview of Numerical Simulations on Gas-Solid Cyclone Separators with Tangential Inlet. *ChemBioEng Reviews*, 8(4), 375-391 <https://doi.org/10.1002/cben.202000034>
- Chiang, P.-C. and Gao, X. (2022a) 'Volatile Organic Compounds (VOCs) Control BT - Air Pollution Control and Design', in Chiang, P.-C. and Gao, X. (eds). Singapore: Springer Nature Singapore, pp. 91–142. doi: 10.1007/978-981-13-7488-3_4.
- Chiang, P.-C. and Gao, X. (2022b) 'Wet Scrubber BT - Air Pollution Control and Design', in Chiang, P.-C. and Gao, X. (eds). Singapore: Springer Nature Singapore, pp. 589–620. doi: 10.1007/978-981-13-7488-3_17.
- Firdaus, N. A., Wulandari, B. M. and Novembrianto, R. (2023) 'Analisa Efisiensi Unit Bag Filter dan Wet Scrubber terhadap Parameter Partikulat, SO₂, NO₂, dan Opasitas Pada Industri Besi dan Baja di Surabaya', *Environmental Engineering Journal ITATS*, 3(1), pp. 57–64. doi: 10.31284/j.envitats.2023.v3i1.3838.
- Gutierrez, J. A. *et al.* (2024) 'Development of a cyclone separator for particulate matter control in fique bag production: A case study at Empaques del Cauca S.A.', *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10(September). doi: 10.1016/j.cscee.2024.100951.
- Hanif, M. A., Ibrahim, N. and Abdul Jalil, A. (2020) 'Sulfur dioxide removal: An overview of regenerative flue gas desulfurization and factors affecting desulfurization capacity and sorbent regeneration', *Environmental Science and Pollution Research*, 27(22), pp. 27515–27540. doi: 10.1007/s11356-020-09191-4.
- Kang, Y. R. and Kwak, J. B. (2023) 'A Numerical Approach to Characterize the Efficiency of Cyclone Separator', *Machines*, 11(4). doi: 10.3390/machines11040440.
- Kenneth C. Schiffner (2021) *Air Pollution Control Equipment Selection Guide*. Third Edit, *Sustainability (Switzerland)*. Third Edit. Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC. Available at:

http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEMBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI.

- Lawrence K. Wang, Norman C. Pereira, Y.-T. H. (2004) *Volume 1 Handbook Of Environmental Engineering: Air Pollution Control Engineering, Handbook of Loss Prevention Engineering*. New Jersey: Humana Press Inc. doi: 10.1002/9783527650644.ch33.
- Louis Theodore (2008) *Air Pollution Control Equipment Calculations*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Monir, M. U. *et al.* (2023) 'Chapter 8 - Simulation of cyclone separator for particulate removal from syngas', in Rahimpour, M. R., Makarem, M. A., and Meshksar Technologies and Applications, M. B. T.-A. in S. G.: M. (eds). Elsevier, pp. 219–240. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91879-4.00008-4>.
- Nur H. T. Molek, Saputri A. Renelda and S. Syaiful (2020) 'Performa cyclone dan electrostatic precipitator sebagai penangkap debu pada pabrik semen', *Jurnal Teknik Kimia*, 26(1), pp. 22–26. doi: 10.36706/jtk.v26i1.22.
- PP Nomor 22 Tahun 2021 (2021) 'Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Pedoman Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup', *Sekretariat Negara Republik Indonesia*. Jakarta, pp. 1–483. Available at: <http://www.jdih.setjen.kemendagri.go.id/>.
- Rahmawati, F., Samadikun, B. P. and Hadiwidodo, M. (2020) 'Performance Evaluation of Cyclone Particulate Controller and Wet Scrubber Unit in Paper Mill 7/8 PT. Pura Nusapersada Kudus', *Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, 17(2), pp. 144–153. doi: 10.14710/presipitasi.v17i2.144-153.
- Richards, J. (2000) *Control of Gaseous Emissions: Student Manual, Air Pollution Training Institute (APTI)*. United States Environmental Protection Agency. Available at:

- <https://www.4cleanair.org/wp-content/uploads/APTI/415combined.pdf>.
- Rocha E. M, Silva, R. S. A. and Mathias, A. L. (2021) 'Main Industrial Air Pollution Control Equipment: a Review', *International Journal of Development Research*, 11(11), pp. 51765–51770. Available at: <https://www.journalijdr.com/sites/default/files/issue-pdf/23277.pdf>.
- Singh, R. and Shukla, A. (2014) 'A review on methods of flue gas cleaning from combustion of biomass', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, pp. 854–864. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.005>.
- Sullivan, J. M. and Sivak, M. (2012) *Carbon Capture In Vehicles: A Review Of General Support, Available Mechanisms, And Consumer-Acceptance Issues*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/265632523_CARBON_CAPTURE_IN_VEHICLES_A_REVIEW_OF_GENERAL_SUPPORT_AVAILABLE_MECHANISMS_AND_CONSUMER-ACCEPTANCE_ISSUES.
- Vallero, D. A. (2008) *Fundamentals of air pollution*. Fourth Edi. London, UK: Academic Press is an imprint of Elsevier.
- Varandani, N. S. (2017) *Environmental Engineering Principles and Practices Volume 1*. Uttar Pradesh, India.: Pearson India Education Services Pvt. Ltd.
- Wang, S. *et al.* (2021) 'Simultaneous removal of SO₂ and NO_x from flue gas by low-temperature adsorption over activated carbon', *Scientific Reports*, 11(1). doi: 10.1038/s41598-021-90532-9.

BAB 6

PENYAKIT AKIBAT POLUSI UDARA: STUDI KASUS ANAK DENGAN *NEURODEVELOPMENTAL DISORDER*

6.1 Pendahuluan

World Health Organization (WHO) melaporkan 6,7 juta kematian di dunia ini sebagai akibat dari paparan pencemaran udara (air polutan) baik ambien maupun rumah tangga. Polutan udara ambien pada tahun 2019 menyebabkan 4,2 juta kematian. Penyebab kematian dini tersebut adalah polutan udara ambien seperti *particulate matter* 2.5 μm (PM_{2.5}). Sebanyak 37% kematian dini terkait polutan udara ambien ditimbulkan oleh stroke dan jantung iskemik, 23% dan 18% mortalitas disebabkan oleh penyakit paru obstruktif menahun dan infeksi saluran pernapasan bawah akut, dan 11% mortalitas ditimbulkan oleh kanker dalam saluran pernapasan (WHO, 2019a).

Meningkatnya polutan udara ambien sangat terkait dengan pertumbuhan ekonomi negara tersebut, serta kebutuhannya akan energi khususnya bersumber bahan bakar fosil. Beberapa negara yang sedang bertumbuh dengan cepat, menunjukkan tingkat polutan udara yang tinggi. China dan India misalnya, tahun 2019 menunjukkan jumlah konsentrasi partikel PM_{2.5} masing-masing rerata sebanyak 38,15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan 50,17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sedangkan Indonesia sebanyak 19,34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (WHO, 2019b).

Polutan udara akan menimbulkan risiko kesehatan secara langsung terhadap organ paru-paru dan jantung, sehingga hampir semua penyakit yang ditimbulkan terkait dengan kedua target organ tersebut. Hanya saja, penelitian dalam 10 tahun terakhir menunjukkan temuan baru bahwa polutan udara secara kronik juga dapat menargetkan organ sistem saraf pusat dan menimbulkan kerusakan yang berakibat pada *Neurodevelopmental Disorder*. *Neurodevelopmental Disorder* yang lazim adalah *Autism Spectrum*

Disoder (ASD), Attention Deficit Hyperactivity Disorder (ADHD), Intellectual Disorder (ID).

Beberapa penelitian mengenai ASD seperti studi ekologi di Taranto, menunjukkan anak-anak di daerah polusi tinggi menunjukkan prevalensi ASD yang lebih tinggi (9,58 vs 6,66 per 1000) dibandingkan dengan daerah yang kurang tercemar (Moschetti *et al.*, 2024). Studi lainnya seperti studi kasus-kontrol menunjukkan hubungan yang signifikan antara paparan karbon monoksida (CO) dan nitrogen dioksida (NO₂) selama kehamilan dan peningkatan risiko ASD, terutama pada trimester kedua (Ghahari, Yousefian and Najafi, 2023). Sedangkan studi polutan PM_{2.5} diidentifikasi sebagai faktor penyebab potensial ASD (Jin *et al.*, 2024).

Laporan Zhao *et al.* menunjukkan paparan di masa prenatal oleh polutan PM_{2.5} dan nitrogen oksida (NO_x) telah dikaitkan dengan peningkatan risiko ADHD, sementara paparan di masa postnatal terhadap PM_{2.5}, PM₁₀, dan NO₂ juga berkorelasi dengan peningkatan kasus ADHD (Zhao *et al.*, 2024). Sementara di Denmark, paparan NO₂ dan PM_{2.5} selama anak usia dini dikaitkan dengan peningkatan risiko ADHD, dengan rasio tingkat kejadian masing-masing 1,38 dan 1,51 (Thygesen *et al.*, 2020).

Kasus-kasus yang ditemukan berhubungan dengan kelompok berisiko yaitu ibu hamil dan balita. Paparan polutan udara tersebut dapat terjadi pada masa prenatal, perinatal dan posnatal. Pada anak-anak, peningkatan kasus ASD di seluruh dunia seperti yang diperkirakan WHO yaitu sekitar 1 anak ASD untuk setiap 100 anak di tahun 2023 (WHO, 2024). Tetapi di Amerika Serikat menunjukkan prevalensi yang lebih tinggi, yaitu 1 anak ASD untuk setiap 36 anak di tahun 2020 (SARRC, 2024). Di Indonesia, sampai saat ini belum ada data ril mengenai jumlah anak ASD dan ADHD.

Neurodevelopmental Disorder pada anak, dapat disebabkan karena adanya kerusakan sistem saraf pusat khususnya pada bagian sistem limbik yaitu amigdala dan hipokampus yang merupakan pengatur emosi, agresivitas, masukan sensori, serta proses belajar. Begitupula dengan adanya kelainan di otak kecil (*cerebellum*) yang terjadi sejak masa embrio, sehingga diyakini terlibat dalam gangguan fungsi kognitif. Mekanisme kerusakan sistem saraf pusat

yang potensial untuk menjelaskan hubungannya dengan polutan udara dapat melalui neuroinflamasi, stres oksidatif, inflamasi sistemik, disbiosis mikrobioma usus, dan perubahan epigenetik(Liu *et al.*, 2023).

Penelitian lainnya, juga menunjukkan bahwa kelompok berisiko lainnya seperti lansia yang menderita Parkinson, Demensia dan Alzheimer juga dikaitkan dengan paparan polutan udara secara kronik(Gialluisi *et al.*, 2023; Kim *et al.*, 2024). Hanya saja, tulisan ini lebih menfokuskan penyakit akibat polusi udara dengan studi kasus anak dengan *neurodevelopmental disorder*. Untuk itu, tulisan ini mencoba menjawab pertanyaan-pertanyaan seperti, Bagaimana situasi pencemaran atau polutan udara saat ini? Apa saja parameter polutan udara? Apa dampaknya terhadap kesehatan masyarakat, khususnya kasus *Neurodevelopmental Disorder*?, Berapa banyak kasus *Neurodevelopmental Disorder*? Apa hubungan pencemaran udara dengan *Neurodevelopmental Disorder*?, Bagaimana mekanismenya? Bagaimana dengan penelitian-penelitian terkini dan relevan? Serta apa yang harus dilakukan (mitigasinya)?

6.2 Polutan Udara

Polutan udara adalah zat yang terdapat di udara dan dapat menyebabkan pencemaran udara, seperti PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, CO, NO₂, SO₂ dan logam berat timbal (Pb) yang dapat menimbulkan risiko kesehatan dan tantangan lingkungan, terutama di lingkungan industri dan perkotaan(Meo *et al.*, 2024). PM_{2.5} adalah polutan udara kritis, sering mengandung logam berat seperti timbal (Pb), arsenik (As), dan mangan (Mn). Di daerah perkotaan, konsentrasi PM_{2.5} dapat secara signifikan melebihi tingkat yang diizinkan, dengan dampak kesehatan bervariasi menurut wilayah. Misalnya, di Seoul, As sangat berdampak, sementara di Wonju, Mn lebih berpengaruh(Park *et al.*, 2024). Logam berat dalam PM_{2.5} dapat berasal dari berbagai sumber, termasuk emisi industri dan lalu lintas kendaraan.

CO, CO, NO₂, SO₂ adalah polutan gas umum yang terkait dengan masalah pernapasan. CO adalah gas beracun yang tidak berwarna dan tidak berbau, dihasilkan dari pembakaran bahan bakar yang tidak sempurna. Tingkat CO sangat tinggi di daerah yang

tercemar lalu lintas. NO₂ dan SO₂ juga adalah gas beracun yang diproduksi dari pembakaran bahan bakar. Hanya saja, telah menunjukkan tren menurun secara global karena peningkatan kontrol emisi, namun lonjakan lokal masih terjadi, memerlukan pemantauan yang berkelanjutan (Meo *et al.*, 2024).

Polutan udara seperti PM₁₀, PM_{2.5}, CO, NO₂, SO₂, dan logam berat Pb berdampak pada kesehatan manusia. Paparan PM_{2.5} dan polutan lainnya telah dikaitkan dengan gangguan fungsi paru-paru (Meo *et al.*, 2024). Paparan kronis dapat memperburuk kondisi pernapasan seperti asma, yang menyebabkan peningkatan morbiditas dan mortalitas (Fiter *et al.*, 2023). Selain itu, juga merupakan faktor risiko utama untuk penyakit kardiovaskular, meningkatkan risiko kejadian seperti infark miokard dan stroke (Henning, 2024). Sedangkan logam berat Pb merupakan polutan yang sangat berbahaya, terutama bagi anak-anak, karena dapat menyebabkan kerusakan pada sistem saraf dan gangguan perkembangan. Paparan timbal telah dikaitkan dengan penurunan *Intellectual Question* (IQ), gangguan perilaku, dan masalah kognitif (Bora *et al.*, 2024; Gudadhe, Singh and Ahsan, 2024).

6.3 Anak dengan Neurodevelopmental Disorder

Neurodevelopmental Disorders atau Gangguan Perkembangan Saraf menurut *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders, Fifth Edition* (DSM-5) adalah jenis kelainan yang mempengaruhi fungsi otak dan mengubah perkembangan saraf, menyebabkan kesulitan dalam fungsi sosial, kognitif, dan emosional (Harris, 2014). Gangguan perkembangan saraf ini telah terjadi pada masa prenatal, perinatal dan posnatal. Gejala klinis sudah dapat diamati pada awal perkembangan bayi atau anak. Seringkali sebelum anak memasuki sekolah dasar, bahkan pada usia 2 hingga 3 tahun. *Neurodevelopmental Disorders* ditandai dengan defisit perkembangan yang menyebabkan gangguan dalam fungsi pribadi, sosial, akademik, atau aktivitas. DSM-5 mengkategorikan beberapa jenis gangguan perkembangan saraf yang utama yaitu ASD, ADHD, ID, *Language Communication Disorder*, dan berbagai *Motor and Tic Disorder*, seperti gangguan koordinasi perkembangan dan gangguan

tik(Morris-Rosendahl and Crocq, 2020), tetapi yang umum dibicarakan adalah ASD, ADHD dan ID.

ASD ditandai dengan defisit yang persisten dalam komunikasi sosial dan interaksi, bersama dengan pola perilaku, minat, atau aktivitas yang repetitif dan terbatas. DSM-5 mengonsolidasikan apa yang sebelumnya dianggap sebagai gangguan terpisah, seperti Sindrom Asperger dan gangguan perkembangan pervasif yang tidak ditentukan, menjadi satu diagnosis ASD, mencerminkan spektrum dari tingkat gejala keparahan(Wills, 2014).

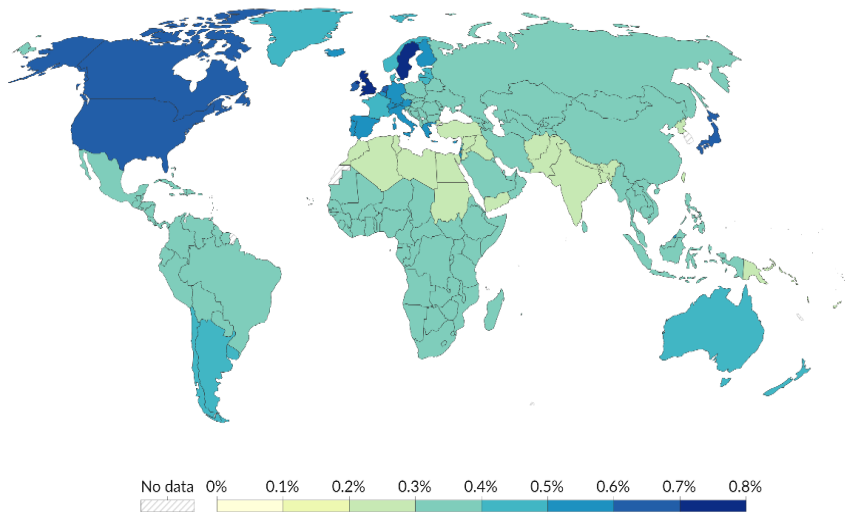
ADHD ditandai dengan gejala ketidakperhatian, hiperaktivitas, dan impulsivitas yang mengganggu fungsi atau perkembangan. Gangguan pembelajaran spesifik melibatkan kesulitan dalam belajar dan menggunakan keterampilan akademik, yang secara signifikan di bawah apa yang diharapkan untuk usia individu. Gangguan-gangguan ini menyoroti pentingnya identifikasi dan intervensi dini, karena dapat mempengaruhi perkembangan dan kualitas hidup anak secara signifikan jika tidak ditangani(Regier, Kuhl and Kupfer, 2013; Morris-Rosendahl and Crocq, 2020).

ID yang sebelumnya dikenal sebagai keterbelakangan mental, didefinisikan oleh keterbatasan signifikan dalam fungsi intelektual (biasanya IQ di bawah 70) dan perilaku adaptif, yang mempengaruhi keterampilan kehidupan sehari-hari(Wills, 2014).

6.4 Epidemiologi Anak Neurodevelopmental Disorder

Epidemiologi *Neurodevelopmental Disorders* yaitu ASD, ADHD dan ID secara global menunjukkan adanya perbedaan pendekatan dan perspektif dalam memperkirakan prevalensi global. OurWorldInData.Org memperkirakan prevalensi *Neurodevelopmental Disorder* menurut jenisnya di dunia tahun 2021, yaitu ADHD sebanyak 88,3 juta, ASD sebanyak 61, 2 juta(OurWorldInData, 2022). Studi di Amerika Serikat (AS) menunjukkan bahwa prevalensi antara anak-anak dan remaja AS berusia 3–17 tahun pada tahun 2019 dan 2020, berdasarkan wawancara terhadap 14.983 orang dari *National Health Interview Survey* (NHIS), menunjukkan prevalensi ADHD, ASD, ID masing-

masing adalah 8,5%, 2,9% dan 1,4%. Prevalensi ADHD, ASD dan ID lebih tinggi pada anak laki-laki dari perempuan(Santos *et al.*, 2023).



Gambar 6.1. Peta Sebaran Autisme di Tingkat Global
(Sumber : IHME, *Global Burden of Disease*)

WHO menyampaikan prediksi prevalensi global ASD yang terkini tahun 2023 adalah dari 100 anak satu diantaranya memiliki ASD(WHO, 2024). Prediksi ini merupakan angka rerata, dan prevalensi yang disampaikan secara substansial bervariasi di semua kajian. Sedangkan *Center for Disease Control and Prevention* (CDC) Amerika Serikat, merilis data baru yang menyatakan sekitar 1 dari 36 anak dibawah 8 tahun, didiagnosis dengan ASD tahun 2020(SARRC, 2024). Anak laki-laki memiliki peluang empat kali lebih besar untuk diidentifikasi memiliki ASD dibandingkan anak perempuan. Pada anak-anak yang diidentifikasi memiliki ASD yang memiliki skor kecerdasan intelektual (IQ) yang tersedia, sekitar sepertiga (35,2%) juga memiliki disabilitas intelektual.

Gambar 6.1, menunjukkan perkiraan *Institute for Health Metrics and Evaluation* (IHME) dalam peta prevalensi ASD tahun 2019 secara global, yaitu Inggris (0,7%), Swedia (0,7%), Jepang (0,6%), Amerika (0,6%), Australia (0,4%) dan Indonesia (0,3%)(Rudra, 2024).

Sampai saat ini belum ada data ril mengenai jumlah anak ASD dan ADHD di Indonesia. Hal ini dipicu belum dilakukannya pencatatan aktif (survei) dan pencatatan pasif (kunjungan ke puskesmas dan rumah sakit). Data prevalensi yang ada, hanya didasarkan terhadap riset-riset mengenai prevalensi ASD dan ADHD. Inipun baru dilakukan secara terbatas pada kota atau provinsi yang menjadi wilayah survei.

6.5 Hubungan Pencemaran Udara dengan *Neurodevelopmental Disorder*

Tabel 6.1 menunjukkan beberapa penelitian terkini dan relevan mengenai adanya hubungan polutan udara dengan *Neurodevelopmental Disorder* seperti ASD, ADHD dan ID.

Tabel 6.1. Literatur penelitian-penelitian mengenai hubungan polutan udara dengan *Neurodevelopmental Disorder*

No	Judul, Penulis dan Tahun	Metode	Temuan
1.	An ecological study shows increased prevalence of ASD in children living in a heavily polluted area,(Moschetti <i>et al.</i> , 2024)	• Studi ekologi cross-sectional • Tes Chi Square untuk evaluasi perbedaan	• Prevalensi ASD yang lebih tinggi pada anak-anak di dekat fasilitas industri. • Hubungan antara kedekatan perumahan perkotaan dan prevalensi ASD
2.	Multipollutant Associations Between Air Pollution and ASD in California, (Osharkey <i>et al.</i> , 2023)	• Desain kohort berbasis populasi dengan 2.376.489 peserta • Penilaian paparan polusi udara	• Paparan PM_{2.5} terkait dengan 14,7% peningkatan risiko ASD. • Paparan NO₂ terkait dengan 3,1% peningkatan risiko ASD.
3.	A Family Based	• Studi kasus-	• Paparan CO yang

No	Judul, Penulis dan Tahun	Metode	Temuan
	Case Control Study on Perinatal Exposure to Ambient Air Pollution and Autism,(Ghahari, Yousefian and Najafi, 2023)	kontrol berbasis keluarga • Paparan polusi udara sekitar selama kehamilan dan awal kehidupan	lebih tinggi pada trimester ke-2 terkait dengan risiko autisme. • Peningkatan paparan NO ₂ selama kehamilan terkait dengan risiko ASD yang lebih tinggi.
4.	Association of prenatal and postnatal exposure to air pollution with clinically diagnosed ADHD: a systematic review,(Zhao <i>et al.</i> , 2024)	• Tinjauan sistematis dari 801 studi dari berbagai database. • Menggunakan Skala Newcastle-Ottawa untuk penilaian kualitas dan bias.	• Paparan prenatal terhadap PM _{2.5} dan NO _x terkait dengan risiko ADHD. • Paparan postnatal terhadap PM _{2.5} , PM ₁₀ , NO ₂ terkait dengan risiko ADHD.
5.	Exposure to air pollution in early childhood and the association with ADHD (Thygesen <i>et al.</i> , 2020)	Studi kohort prospektif nasional terhadap 809.654 anak-anak Denmark Diagnosis klinis ADHD dari register dinilai oleh psikiater	• Paparan awal terhadap NO ₂ dan PM _{2.5} terkait dengan peningkatan risiko ADHD. • Menurunkan kadar polutan dapat mencegah ADHD
6.	Evidence for an association of prenatal exposure to	• Data pemantauan kualitas udara • Analisis Subjek	• Paparan prenatal yg lebih tinggi pada PM terkait dgn keparahan ASD

No	Judul, Penulis dan Tahun	Metode	Temuan
	particulate matter with clinical severity of ASDr,(Santos <i>et al.</i> , 2023)	bertingkat berdasarkan tingkat keparahan klinis	• Paparan PM terkait dengan peradangan saraf, stres oksidatif, dan perubahan epigenetik.

Laporan penelitian ekologi di Taronto yang dilakukan Moschetti, A *et al.* menemukan anak-anak di daerah polusi tinggi menunjukkan prevalensi ASD yang lebih tinggi (9,58 vs 6,66 per 1000) dibandingkan dengan daerah yang kurang tercemar(Moschetti *et al.*, 2024). Begitupula dengan penelitian Osharkey, K *et al.*, dengan desain kohort berbasis populasi menggunakan catatan kelahiran di California, Amerika Serikat, menemukan peningkatan 14,7% risiko ASD akibat paparan PM_{2.5} dan 3,1% risiko ASD akibat paparan NO₂(Osharkey *et al.*, 2023). Penelitian yang tidak jauh berbeda dilakukan Ghahari, N *et al.* dengan jumlah kasus sebanyak 97 dan kontrol sebanyak 54, menemukan hubungan yang signifikan antara paparan CO dan NO₂ selama kehamilan dan peningkatan risiko ASD, terutama pada trimester kedua(Ghahari, Yousefian and Najafi, 2023).

Penelitian yang terkait dengan ADHD, juga menemukan hasil yang tidak jauh berbeda. Seperti penelitian yang dilakukan Zhao *et al.* menunjukkan paparan di masa prenatal oleh polutan PM_{2.5} dan nitrogen oksida (NO_x) telah dikaitkan dengan peningkatan risiko ADHD, sementara paparan di masa postnatal terhadap PM_{2.5}, PM₁₀, dan NO₂ juga berkorelasi dengan peningkatan kasus ADHD(Zhao *et al.*, 2024). Sementara penelitian yang dilakukan di Denmark, paparan NO₂ dan PM_{2.5} selama anak usia dini dihubungkan dengan peningkatan risiko ADHD, dengan rasio tingkat kejadian masing-masing 1,38 dan 1,51(Thygesen *et al.*, 2020).

Sedangkan penelitian yang melihat korelasi polutan udara dengan respon imun pada anak yang dilahirkan ASD sebanyak 217 oleh Santos, JX *et al.*, menemukan bahwa paparan PM₁₀ dan PM_{2.5} yang lebih tinggi kepada ibu hamil di masa prenatal terkait dengan tingkat keparahan ASD yang lebih tinggi juga, serta paparan polutan

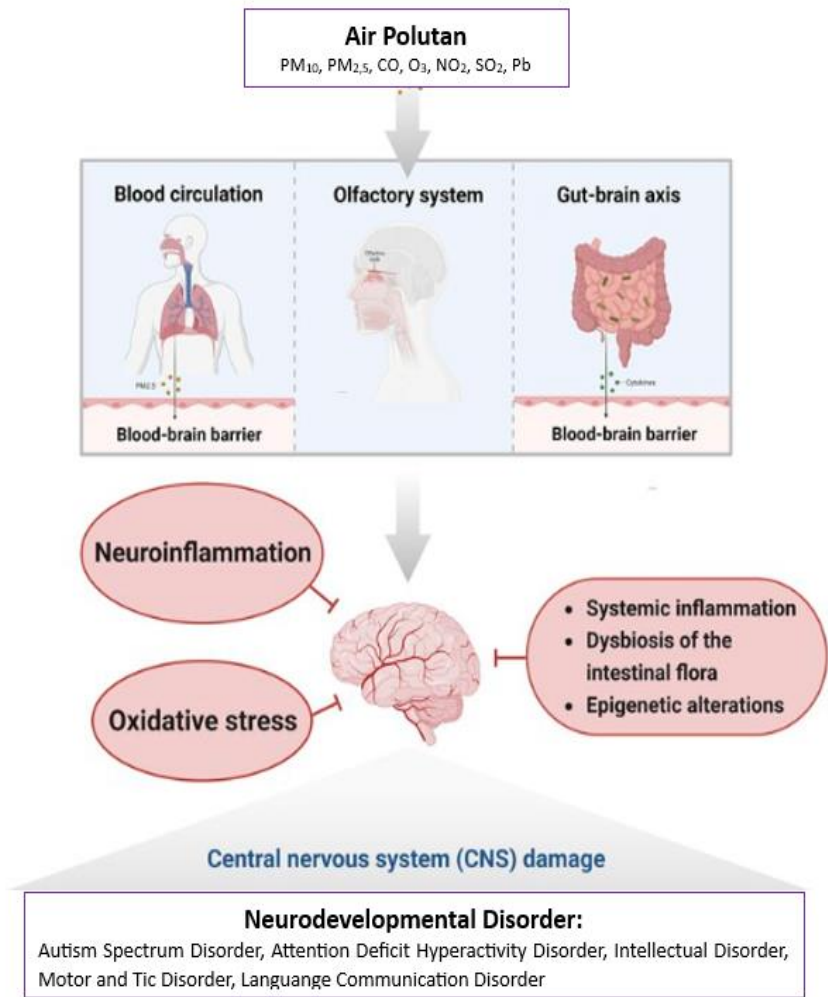
udara tersebut terkait dengan peradangan saraf, stres oksidatif, dan perubahan epigenetik(Santos *et al.*, 2023). Temuan yang sama juga didapatkan oleh Liu, Xin Qi *et al.* yang menyatakan paparan PM_{2.5} terkait dengan perkembangan saraf, neurodegeneratif, dan gangguan mental serta mekanisme peradangan saraf, stres oksidatif, dan perubahan epigenetik(Liu *et al.*, 2023).

6.6 Mekanisme Potensial

Meskipun belum ada mekanisme yang dapat menjelaskan secara pasti bagaimana polutan udara seperti PM₁₀, PM_{2.5}, CO, NO₂, SO₂ dan logam berat Pb dapat mengakibatkan kerusakan saraf dan menimbulkan *Neurodevelopmental Disorder* seperti ASD, ADHD dan *Intellectual Disorder*, tetapi mekanisme potensial yang mungkin terjadi yaitu neuroinflamasi, stres oksidatif, inflamasi sistemik, disbiosis mikrobioma usus, dan perubahan epigenetik(Liu *et al.*, 2023).

Polutan udara seperti PM₁₀, PM_{2.5}, CO, NO₂, SO₂ dan logam berat Pb yang masuk ke dalam tubuh baik melalui inhalasi dan ingesti dengan target organ pada sistem saraf pusat. Pada jalur inhalasi, polutan udara di alveoli kemudian masuk ke sirkulasi darah melewati penghalang darah-otak. Penghalang darah-otak adalah lapisan sel yang melindungi otak dari zat berbahaya yang dapat menyebabkan kerusakan. Begitu pula dengan polutan udara yang menkontaminasi makanan dan minuman menembus penghalang darah otak melalui sumbu otak-usus. Sedangkan jalur yang potensial lainnya melalui *olfactory system*.

Gambar 6.2 menunjukkan beberapa mekanisme potensial yang dapat terjadi pada kerusakan *central nervous system* (CNS) yaitu neuroinflamasi, stres oksidatif, inflamasi sistemik, disbiosis mikrobioma usus, dan perubahan epigenetik(Liu *et al.*, 2023).



Gambar 6.2. Modifikasi alur mekanisme potensial polutan udara masuk ke dalam tubuh yang mempengaruhi kerusakan saraf dan mengakibatkan *Neurodevelopmental Disorder* (Sumber : Liu *et al.*, 2023)

6.6.1 Stres Oksidatif dan Peradangan Saraf

Stres oksidatif adalah penelitian yang paling banyak dilakukan untuk menilai terjadinya toksisitas perkembangan saraf pada anak ASD, ADHD dan ID. Model eksperimental yang menggunakan hewan

coba, telah menunjukkan bahwa paparan polutan udara, khususnya PM_{2.5} selama masa kehamilan dan menyusui menyebabkan terjadinya *reactive oxygen species* (ROS) yang menginduksi stres oksidatif pada subjek ibu hamil. Hal ini berdampak buruk pada kemampuan emosional dan memori kognitif janin yang dikandungnya(Jia *et al.*, 2022).

Stres oksidatif akan mengaktivasi enzim *catalase* (CAT) dan *superoksida dismutase* (SOD). Jika berlangsung terus, akan meningkatkan *malondialdehyde* (MDA) yang menjadi biomarker penting untuk menilai peningkatan apoptosis sel neuron di otak(Schieber and Chandel, 2014). MDA juga terkait dengan paparan logam berat seperti Pb yang dilepaskan oleh emisi kendaraan bermotor. Peningkatan apoptosi mengakibatkan gangguan pada memori, defisit kognitif dan psikomotorik anak ASD, ADHD dan ID.

Mekanisme yang diusulkan yang dapat menghubungkan materi racun lingkungan atau polutan udara dengan ASD, ADHD dan ID mencakup proses inflamasi dan aktivasi sel mikroglial(Nephew *et al.*, 2020). Racun lingkungan atau polutan udara dapat memicu aktivasi inflammasome NLRP3 dalam mikroglia hippocampal, menghasilkan peningkatan yang bergantung besarnya dosis pada interleukin-18 (IL-18) dan interleukin-1 β (IL-1 β), sehingga menimbulkan kerusakan pada struktur saraf hipokampus(Liu *et al.*, 2022).

Setelah polutan udara menyusup ke otak, ia memicu proliferasi berlebihan pada mikroglia. Proses ini, menghasilkan sitokin inflamasi seperti *interleukin 6* (IL-6) dan *tumor nekrosis faktor-alpha* (TNF- α), yang pada akhirnya menghasilkan siklus peradangan saraf dan kerusakan oksidatif yang dapat berkontribusi pada kerusakan otak anak dengan *Neurodevelopmental Disorder*(Allen *et al.*, 2017). Peningkatan paparan polutan udara, seperti paparan PM_{2.5} selama masa kehamilan telah dikaitkan dengan gangguan perilaku seperti ASD, ditandai dengan berkurangnya keterlibatan sosial dan peningkatan perilaku berulang(Allen *et al.*, 2017).

6.6.2 Disbiosis mikrobioma usus.

Mikrobioma usus mempengaruhi perkembangan otak dan tubuh serta fungsi kekebalan tubuh di awal kehidupan khususnya pada masa prenatal dan postnatal(Zhuang *et al.*, 2019). Gejala ASD berkorelasi dengan perubahan mikrobioma usus(Wang *et al.*, 2019). Masalah gastrointestinal lazim pada 46% hingga 84% anak dengan ASD. Penelitian eksprimen pada model hewan coba, menunjukkan bahwa perubahan mikrobiota usus dan metabolitnya dapat menginduksi perilaku seperti ASD(Al-Beltagi, 2021). Sebuah penelitian di Jinan, China menetapkan hubungan antara PM_{2.5} dan mikrobiota GBA. Studi ini mengukur paparan PM_{2.5} pada 76 peserta lanjut usia, mengungkapkan peningkatan kecemasan 19,77% berkorelasi dengan kenaikan 10 µg/m³ pada PM_{2.5}. Paparan PM_{2.5} dapat mengganggu fungsi neurologis melalui mikrobiota usus dan inflamasi. Selain itu, faktor lingkungan pada masa prenatal dan neonatal dapat menginduksi dysbiosis, berdampak pada perkembangan mikrogliial dan meningkatkan risiko ASD(Davoli-Ferreira, Thomson and McCoy, 2021). Namun, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengklarifikasi bagaimana PM_{2.5} dan mikrobiota usus berinteraksi sehingga berkontribusi terhadap ASD pada manusia.

6.6.3 Perubahan Epigenetik.

Pewarisan epigenetik melibatkan biomarker molekuler yang dapat menyebabkan variasi fenotipik di antara individu dengan genotipe identik. Epigenetik dapat mencerminkan faktor lingkungan dan genetik awal yang mempengaruhi risiko perkembangan saraf sebagai akibat paparan polusi udara(Park *et al.*, 2022). Metilasi DNA, sebagai biomarker utama terjadinya epigenetik, ketika tidak diatur, dapat mengakibatkan gangguan kognitif dan masalah perilaku. Perubahan metilasi DNA, telah diamati pada otak anak ASD, yang menunjukkan terjadinya disregulasi epigenetik, sehingga dapat berkontribusi pada patogenesis ASD(Hannon *et al.*, 2018). Penelitian epidemiologi telah membuktikan adanya hubungan antara metilasi DNA abnormal dengan paparan PM_{2.5}, terutama pada kejadian hipometilasi genomik pada populasi yang terpapar polutan udara seperti PM_{2.5}(Jia *et al.*, 2022).

PM_{2.5} dapat mengganggu metilasi DNA dan ekspresi mRNA gen anak ASD, khususnya ekspresi gen terkait sinapsis. Gen kandidat anak ASD merupakan bagian integral dari arsitektur dan fungsi sinaptik(Wei *et al.*, 2016). Duri dendritik, penting untuk menstimulus sinapsis, sehingga mempengaruhi fungsi sinaptik dan kemampuan beradaptasi. Individu atau anak dengan ASD menunjukkan penyimpangan dalam kuantitas dan morfologi tulang belakang dendritik, yang mengakibatkan gangguan neurologis. Kepadatan protein postsinaptik sangat penting untuk transmisi sinaptik dan plastisitas, dengan perubahan kepadatan protein ini menjadi signifikan dalam patogenesis ASD(Lo and Lai, 2020).

6.7 Mitigasi

Pengendalian risiko (Mitigasi) yang harus dilakukan pada dasarnya dapat dimulai dari tingkat hulu yaitu sumber pencemar, khususnya pada pencemaran udara ambien sehingga mengurangi keterpaparan pada manusia. Pengendalian risiko berupa pengurangan pemakaian energi fosil (zero emisi) ataupun substitusi dengan sumber energi hijau. Selain itu, pembatasan kendaraan bermotor dan kelayakannya, kemudian berpindah ke transportasi umum yang bebas energi fosil. Untuk itu, diperlukan regulasi dan penegakannya dalam mengendalikan di tingkat sumber.

Pengendalian risiko juga dapat dilakukan pada media udara itu sendiri, misalnya pemantauan kualitas udara dengan pembangunan stasiun monitoring udara, sehingga masyarakat dapat mengetahui situasi dan kondisi terkini dari udara, yang akan mendorong masyarakat untuk menghindari ataupun mengurangi terpapar polutan udara. Penghijauan, juga merupakan mitigasi yang utama untuk mengurangi tingkat polusi udara.

Bila diperlukan, setiap orang yang menghadapi situasi udara yang tidak sehat lagi, sebaiknya menggunakan Alat Pelindung Diri (APD) berupa masker. Kemudian dapat meningkatkan imunitasnya melalui konsumsi makanan dan minuman sehat ataupun suplementasi vitamin dan mikronutrien. Imunitas juga dapat ditingkatkan dengan istirahat yang cukup dan olahraga. Perilaku Hidup Bersih dan Sehat (PHBS) tidak hanya sebagai motto, tetapi harus dilakukan secara serius dan terus menerus. Selain itu,

mengetahui dengan tepat informasi mengenai faktor risiko *Neurodevelopmental Disorder* dan gejala awal yang muncul, sehingga dapat melakukan tindakan tepat, sebelum parah.

6.8 Penutup

Polutan udara seperti PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, CO, NO₂, SO₂ dan logam berat timbal (Pb) berpotensi menimbulkan beberapa jenis *Neurodevelopmental Disorder* yang utama yaitu ASD, ADHD, dan ID. Hal ini didasarkan atas beberapa laporan dari lembaga seperti WHO, CDC dan lembaga lainnya, yang menyampaikan adanya tren peningkatan prevalensi ASD dan ADHD setiap tahunnya.

Penting untuk melakukan pengendalian risiko (mitigasi) yang ditimbulkan dari polutan udara terhadap *Neurodevelopmental Disorder*. Mitigasi dapat dimulai dari hulu (sumber polutan) hingga ke hilir (gangguan kesehatan). Mitigasi ini, harus melibatkan seluruh *stakeholder* yang terkait seperti eksekutif dan legislatif, perguruan tinggi, swasta, dan masyarakat umumnya.

Tantangan kedepannya, seiring meningkatnya pencemaran udara, maka setiap orang yang ada dan akan lahir di permukaan bumi ini, berpotensi akan terpapar polutan udara dan berisiko mengalami gangguan kesehatan yang berhubungan sistem saraf dan menimbulkan beberapa penyakit seperti *Neurodevelopmental Disorder* khususnya untuk kelompok berisiko seperti ibu hamil dan balita.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Beltagi, M. (2021) 'Autism medical comorbidities', *World Journal of Clinical Pediatrics*, 10(3). doi: 10.5409/wjcp.v10.i3.15.
- Allen, J. L. *et al.* (2017) 'Developmental neurotoxicity of inhaled ambient ultrafine particle air pollution: Parallels with neuropathological and behavioral features of autism and other neurodevelopmental disorders', *NeuroToxicology*, 59.
- Bora, J. *et al.* (2024) 'Health Effects of Heavy Metals Contamination in Children', in *Nanotechnology Applications and Innovations for Improved Soil Health*. IGI Global, pp. 254–275.
- Davoli-Ferreira, M., Thomson, C. A. and McCoy, K. D. (2021) 'Microbiota and Microglia Interactions in ASD', *Frontiers in Immunology*. doi: 10.3389/fimmu.2021.676255.
- Fiter, R. J. *et al.* (2023) 'The impact of air pollution on asthma: clinical outcomes, current epidemiology, and health disparities', *Expert Review of Respiratory Medicine*.
- Ghahari, N. and Najafi, E. (2023) 'A Family Based Case Control Study on Perinatal Exposure to Ambient Air Pollution and Autism'.
- Gialluisi, A. *et al.* (2023) 'Prominent role of PM10 but not of circulating inflammation in the link between air pollution and the risk of neurodegenerative disorders', *medRxiv*, pp. 2005–2023.
- Gudadhe, S., Singh, S. K. and Ahsan, J. (2024) 'Cellular and Neurological Effects of Lead (Pb) Toxicity', in *Lead Toxicity Mitigation: Sustainable Nexus Approaches*. Springer, pp. 125–145.
- Hannon, E. *et al.* (2018) 'Elevated polygenic burden for autism is associated with differential DNA methylation at birth', *Genome Medicine*, 10(1). doi: 10.1186/s13073-018-0527-4.
- Harris, J. C. (2014) 'New classification for neurodevelopmental disorders in DSM-5', *Current Opinion in Psychiatry*.
- Henning, R. J. (2024) 'Particulate matter air pollution is a significant risk factor for cardiovascular disease', *Current Problems in Cardiology*, 49(1), p. 102094.
- Jia, Z. li *et al.* (2022) 'Impact of airborne total suspended particles (TSP) and fine particulate matter (PM2.5)s', *Journal of*

- Applied Toxicology*, 42(10). doi: 10.1002/jat.4325.
- Jin, T. *et al.* (2024) 'Particulate matter 2.5 causally increased genetic risk of autism spectrum disorder', *BMC psychiatry*, 24(1), p. 129.
- Kim, B. *et al.* (2024) 'Alzheimer's disease neuropathologic change mediates the relationship between ambient air pollution and dementia severity', *medRxiv*, pp. 2007–2024.
- Liu, C. *et al.* (2022) 'HMGB1-NLRP3-P2X7R pathway participates in PM2.5-induced hippocampal neuron impairment', *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 239.
- Liu, X. Q. *et al.* (2023) 'Neurodevelopmental toxicity induced by PM2.5 Exposure and its possible role in Neurodegenerative and mental disorders', *Human and Experimental Toxicology*.
- Lo, L. H. Y. and Lai, K. O. (2020) 'Dysregulation of protein synthesis and dendritic spine morphogenesis in ASD', *Molecular Autism*.
- Meo, S. A. *et al.* (2024) 'Environmental pollutants particulate matter (PM2.5, PM10), Carbon Monoxide (CO), Nitrogen dioxide (NO2), Sulfur dioxide (SO2), and Ozone (O3) impact on lung functions', *Journal of King Saud University-Science*, p. 103280.
- Morris-Rosendahl, D. J. and Crocq, M.-A. (2020) 'Neurodevelopmental disorders—the history and future of a diagnostic concept', *Dialogues in clinical neuroscience*, 22(1), pp. 65–72.
- Moschetti, A. *et al.* (2024) 'An ecological study shows increased prevalence of autism spectrum disorder in children living in a heavily polluted area', *Scientific Reports*, 14(1), p. 17159.
- Nephew, B. C. *et al.* (2020) 'Traffic-related particulate matter affects behavior, inflammation, and neural integrity in a developmental rodent model', *Environmental Research*, 183.
- Osharkey, K. *et al.* (2023) 'Multipollutant Associations Between Air Pollution and Autism Spectrum Disorder in California: How Sociodemographics and Region Impact Risk.', in *ISEE Conference Abstracts*.
- OurWorldInData (2022) *Number with a mental or neurodevelopmental disorder by type, World, 2021*. Available at: <https://ourworldindata.org/> (Accessed: 20 Sept. 2024).

- Park, J. *et al.* (2022) 'The role of histone modifications', *Signal Transduction and Targeted Therapy*. doi: 10.1038/s41392-022-022-
- Park, S. *et al.* (2024) 'PM_{2.5} and heavy metals in urban and agro-industrial areas: health risk assessment considerations', *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 18(1), p. 16.
- Regier, D. A., and Kupfer, D. J. (2013) 'The DSM-5: Classification and criteria changes', *World psychiatry*, 12(2), pp. 92–98.
- Rudra, K. (2024) *Understanding Autism Spectrum Disorder (ASD)*. Available at: <https://globalindiannetwork.com/understanding-autism-spectrum-disorder-asd/> (Accessed: 20 Sept. 2024).
- Santos, J. X. *et al.* (2023) 'Evidence for an association of prenatal exposure to particulate matter with clinical severity of ASD', *Environmental Research*, 228.
- SARRC (2024) *New Autism Prevalence Rate Released by CDC*. Available at: <https://autismcenter.org/> (Accessed: 19 Sept. 2024).
- Schieber, M. and Chandel, N. S. (2014) 'ROS function in redox signaling and oxidative stress', *Current Biology*.
- Thygesen, M. *et al.* (2020) 'Exposure to air pollution in early childhood and the association with Attention-Deficit Hyperactivity Disorder', *Environmental Research*.
- Wang, M. *et al.* (2019) 'Alterations in Gut Glutamate Metabolism Associated with Changes in Gut Microbiota Composition in Children with Autism Spectrum Disorder', *mSystems*, 4(1).
- Wei, H. *et al.* (2016) 'Redox/methylation mediated abnormal DNA methylation as regulators of ambient fine particulate matter-induced neurodevelopment related impairment in human neuronal cells', *Scientific Reports*, 6. doi: 10.1038/srep33402.
- WHO (2019a) *Ambient (outdoor) air pollution*. Available at: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) (Accessed: 19 Sept. 2024).
- WHO (2019b) *National air quality standards*. Available at: <https://www.who.int/air-quality> (Accessed: 19 Sept. 2024).
- WHO (2024) *Autism*. Available at: 19 Sept. 2024.

- Wills, C. D. (2014) 'DSM-5 and neurodevelopmental and other disorders of childhood and adolescence', *Journal of the American Academy of Psychiatry and the Law*, 42(2).
- Zhao, J. *et al.* (2024) 'Association of prenatal and postnatal exposure to air pollution with clinically diagnosed ADHD: a systematic review', *Frontiers in Public Health*, 12, p. 1396251.
- Zhuang, L. *et al.* (2019) 'Intestinal Microbiota in Early Life and Its Implications on Childhood Health', *Genomics, Proteomics and Bioinformatics*. doi: 10.1016/j.gpb.2018.10.002.

BIODATA PENULIS



Naris Dyah Prasetyawati

Dosen Jurusan Kesehatan Lingkungan Poltekkes Kemenkes
Yogyakarta

Penulis lahir di Malang tanggal 25 Maret 1987. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Sarjana Terapan Sanitasi Lingkungan Jurusan Kesehatan Lingkungan Poltekkes Kemenkes Yogyakarta. Menyelesaikan pendidikan D3 dan D4 pada Jurusan Kesehatan Lingkungan Poltekkes Kemenkes Yogyakarta kemudian menyelesaikan Pendidikan S2 dan S3 pada Program Studi Ilmu Lingkungan peminatan Kesehatan lingkungan Universitas Sebelas Maret Surakarta. Penulis aktif dalam berbagai kegiatan sebagai konsultan, peneliti, narasumber seminar dan pelatihan, pengembangan keilmuan serta pengabdian masyarakat dalam bidang Kesehatan lingkungan, khususnya pengendalian pencemaran udara dan penyehatan udara, manajemen risiko lingkungan, sanitasi rumah sakit, penyidikan lingkungan, Sanitasi Total Berbasis Masyarakat (STBM). Berbagai hasil karya tulis telah diterbitkan pada jurnal nasional dan internasional, Majalah, buku dan media publikasi lainnya. Saat ini penulis sedang berfokus pada berbagai penelitian dan publikasi terkait polusi udara dan Upaya pengendalian pencemaran udara, baik pada *indoor* maupun *outdoor pollution*. Penulis juga memiliki berbagai sertifikat pengakuan hak cipta berupa HKI, karya buku ber ISBN dari hasil-hasil kegiatan ilmiah yang telah dilakukan.

BIODATA PENULIS



Dr. Ninin Gusdini, ST, MT

Dosen Program Studi Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Universitas Sahid

Penulis lahir di Jakarta 28 Agustus 1974. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Sahid. Menyelesaikan pendidikan S1 dan S2 pada Jurusan Teknik Lingkungan dan melanjutkan S3 pada Program Studi Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan. Selain mengajar di Prodi Teknik Lingkungan, penulis juga aktif dalam asosiasi profesi Perkumpulan Tenaga Ahli Lingkungan Indonesi (P-TALI) dan Ikatan Ahli Teknik Penyehatan Indonesia (IATPI) dan kegiatan konsultasi di bidang lingkungan.

BIODATA PENULIS



Fitria Fatma, SKM, M.Kes.

Dosen Program Studi Ilmu Kesehatan Masyarakat
Fakultas Kesehatan Universitas Fort De Kock

Fitria Fatma, SKM, M.Kes. Penulis lahir di Kota Bukittinggi tanggal 15 Juni 1986. Penulis sebagai Dosen Tetap Prodi Ilmu Kesehatan Masyarakat, Fakultas Kesehatan, Universitas Fort De Kock Bukittinggi. Lulus S1 di Program Studi Ilmu Kesehatan Masyarakat Universitas Fort De Kock Kota Bukittinggi, dan S2 di Program Studi Ilmu Kesehatan Masyarakat Universitas Andalas Kota Padang. Sejak tahun 2009 hingga sekarang menjadi dosen tetap Program Studi Ilmu Kesehatan Masyarakat Universitas Fort De Kock Bukittinggi. Kepakaran pada Ilmu Kesehatan Lingkungan dan Kesehatan Keselamatan Kerja (K3). Beberapa mata kuliah yang diampu di kampus adalah Dasar Ilmu Kesehatan Lingkungan, Kesehatan Lingkungan Perumahan, Current Issue Kesehatan Lingkungan, Analisis Kualitas Lingkungan, Pengelolaan Limbah, Pengelolaan Sumber Daya Air. Aktif melakukan penelitian dan publikasi di beberapa jurnal nasional terakreditasi tentang sampah, air bersih yang masih ruang lingkup kesehatan lingkungan. Dalam organisasi aktif sebagai anggota IAKMI Kota Bukittinggi dan AK3U Provinsi Sumatera Barat. Silahkan menghubungi penulis melalui email fitriafatma1986@gmail.com

BIODATA PENULIS



Drs. Bambang Suhartawan, M.MT

Dosen Jurusan Teknik Lingkungan, FTSP
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.

BIODATA PENULIS



Taty Alfiah, S.T., M.T.

Dosen Program Studi Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan,
Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya.

Penulis lahir di Bojonegoro pada Oktober 1968. Sejak Desember 2020, penulis bertugas menjadi dosen tetap pada Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Penyehatan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS), kemudian melanjutkan studi S2 pada Magister Teknik Lingkungan Institut Teknologi Bandung (ITB). Penulis memiliki pengalaman bekerja sebagai tenaga ahli pada konsultan teknik di Semarang dan Surabaya. Penelitian dan publikasi penulis, terkait topik pengolahan air bersih, pengolahan air limbah, pengelolaan sampah dan kualitas udara. Hingga saat ini telah terlibat dalam kolaborasi penyusunan buku dengan topik : konstruksi hijau, penyediaan air bersih, pencegahan kebakaran pada bangunan, bahan beracun dan berbahaya (B3), peralatan pengendali pencemar udara.

BIODATA PENULIS



Nasruddin Syam

Dosen Program Studi Kesehatan Masyarakat
Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Muslim Indonesia

Penulis adalah dosen pada Program Studi Kesehatan Masyarakat, Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas Muslim Indonesia. Sebelumnya, pernah bekerja sebagai ASN di Balai Teknik Kesehatan Lingkungan Kemenkes di Makassar tahun 2002-2008 dan Balai Besar Pelatihan Kesehatan Kemenkes di Makassar 2008-2011. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 dan S2 di Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas Hasanuddin. Saat ini, penulis terlibat aktif pada riset dan pengabdian masyarakat mengenai dampak lingkungan khususnya logam berat terhadap anak dengan Neurodevelopmental Disorder.