



MODUL PEMBELAJARAN

PENCEMARAN UDARA DAN PERUBAHAN IKLIM



Universitas
Islam Negeri
Maulana Malik
Ibrahim Malang

Fakultas
Sains
dan
Teknologi

Program
Studi
Teknik
Lingkungan

Kode MK
[24090211D16]

Disusun Oleh:
Rona Rofida, M.T.

[2025]





Daftar isi

Daftar isi	i
Daftar Tabel	iii
Daftar Gambar	iv
Definisi Pencemaran Udara, Sumbernya, dan Keterkaitannya dengan Isu Perubahan Iklim	1
1. Definisi Pencemaran Udara	1
2. Sumber Pencemaran Udara	1
3. Keterkaitan dengan Isu Perubahan Iklim.....	4
4. Klasifikasi Jenis Pencemar Udara, Karakteristik, dan Dampaknya	5
5. Dampak Pencemar Udara	10
Udara Ambien dan Standar Kualitas Udara	13
1. Konsep Udara Ambien	13
2. Regulasi dan Standar Kualitas Udara	13
Kualitas Udara Indoor	17
1. Definisi dan Karakteristik	17
2. Parameter Kualitas Udara Indoor	17
3. Sumber Pencemar Indoor	18
4. Dampak Kesehatan.....	19
5. Standar Kualitas Udara Indoor	19
Meteorologi dan Dispersi Pencemar Udara	21
1. Peran Kondisi Meteorologi dalam Penyebaran Pencemar	21
2. Metode Pemantauan dan Pengukuran Kualitas Udara	22
Inventarisasi Emisi dan Model Kualitas Udara	29
1. Inventarisasi Emisi	29
2. Metode Penyusunan Inventarisasi Emisi.....	31



3. Model Kualitas Udara.....	31
Studi Kasus Pencemaran Udara di Indonesia & Dunia	35
1. Kasus Pencemaran Udara di Dunia	35
2. Kasus Pencemaran Udara di Indonesia	36
Konsep Dasar Perubahan Iklim	36
1. Mekanisme Efek Rumah Kaca.....	39
2. Dampak Perubahan Iklim.....	40
3. Adaptasi dan Mitigasi Perubahan Iklim	41
Kebijakan, Regulasi, dan Instrumen Pengendalian	45
1. Kebijakan dan Regulasi Internasional	45
2. Kebijakan dan Regulasi Nasional (Indonesia).....	45
3. Instrumen Pengendalian	46
Teknologi Pengendalian Pencemaran Udara	49
1. Pengendalian Partikulat	49
2. Pengendalian Gas Pencemar	53
3. Pemilihan Teknologi	59
Daftar Pustaka	iv



Daftar Tabel

Tabel 1 Baku Mutu Udara Ambien Nasional:	13
Tabel 2 Konversi Nilai Konsentrasi.....	15
Tabel 3 Kategori Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU)	15
Tabel 4 Baku Mutu Udara	15



Daftar Gambar

Gambar 1 Contoh <i>windrose</i>	21
Gambar 2 <i>Baghouse Filter</i>	49
Gambar 3 <i>ESP</i> (MN Rofandi & Irwanto, 2022)	52
Gambar 4 <i>Cyclon</i>	52
Gambar 5 <i>Wet scrubber</i>	54
Gambar 6 <i>Insenerator</i>	57

MATERI 1





Definisi Pencemaran Udara, Sumbernya, dan Keterkaitannya dengan Isu Perubahan Iklim

1. Definisi Pencemaran Udara

Pencemaran udara adalah kondisi ketika udara mengandung zat, energi, atau komponen lain dalam jumlah yang dapat membahayakan kesehatan, kehidupan makhluk hidup, serta mengganggu kenyamanan dan keseimbangan lingkungan. Menurut *World Health Organization* (2021), pencemaran udara merupakan kontaminasi udara luar maupun dalam ruangan oleh agen kimia, fisik, atau biologis yang mengubah sifat alami atmosfer. WHO juga menekankan bahwa polusi udara merupakan risiko lingkungan terbesar terhadap kesehatan manusia.

Di Indonesia, Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup Pasal 1 angka 49 mendefinisikan sebagai masuk atau dimasukkannya zat, energi, dan/atau komponen lainnya ke dalam Udara Ambien oleh kegiatan manusia sehingga melampaui Baku Mutu Udara Ambien yang telah ditetapkan.

2. Sumber Pencemaran Udara

Sumber pencemaran udara dapat berasal dari proses alami maupun aktivitas manusia (antropogenik). Kedua jenis sumber ini berkontribusi secara berbeda terhadap kualitas udara, di mana pencemaran dari aktivitas manusia umumnya lebih dominan dan berdampak luas.

a. Sumber Alami

Walaupun sebagian besar pencemaran udara saat ini disebabkan oleh aktivitas manusia, alam juga memiliki kontribusi dalam menghasilkan polutan ke atmosfer. Sumber alami ini terjadi secara periodik maupun insidental, dan meskipun bersifat alami, dampaknya bisa sangat besar terhadap kualitas udara. Sumber alami polusi udara meliputi letusan gunung berapi, kebakaran hutan alami, debu gurun, dan emisi biologis seperti metana dari lahan basah. Meskipun dapat menurunkan kualitas udara secara lokal maupun regional, kontribusinya relatif konstan dan tidak meningkat secara signifikan (Jacobson, 2002).





- Aktivitas Vulkanik (Gunung Berapi)

Aktivitas gunung berapi yang mengeluarkan abu dan gas vulkanik merupakan salah satu sumber utama pencemaran udara alami. Saat meletus, gunung berapi mengeluarkan abu vulkanik, gas beracun, pasir, dan material berbahaya lainnya. Hasil letusan tersebut akan mencemari udara dan dapat mengganggu kesehatan. Gas-gas yang dikeluarkan meliputi sulfur dioksida (SO_2), karbon dioksida (CO_2), dan berbagai senyawa kimia berbahaya lainnya.

- Kebakaran Hutan Alami

Kebakaran hutan dapat terjadi akibat faktor alam seperti sambaran petir. Peristiwa ini menghasilkan asap pekat yang mengandung karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO_2), nitrogen oksida (NO_x), serta partikulat halus (PM). Polutan tersebut berbahaya bagi kesehatan manusia dan berkontribusi pada pemanasan global.

- Debu Tanah dan Badai Pasir (*Dust Storms*)

Daerah gersang atau padang pasir sering mengalami badai debu yang dapat mengangkut partikel padat (PM_{10} dan $\text{PM}_{2.5}$) ke atmosfer. Partikel ini dapat menyebar ribuan kilometer, menurunkan kualitas udara di wilayah jauh dari sumbernya.

- Proses Biologis

Aktivitas mikroorganisme di tanah dan perairan alami dapat menghasilkan gas seperti metana (CH_4) dari rawa-rawa, serta dinitrogen oksida (N_2O) dari proses denitrifikasi di tanah. Kedua gas ini tergolong gas rumah kaca yang berkontribusi terhadap pemanasan global. Berdasarkan IPCC (2021), rawa-rawa tropis dan lahan basah alami merupakan salah satu sumber utama emisi metana secara global.

b. Sumber Antropogenik

Sumber antropogenik berasal dari aktivitas manusia, seperti transportasi, industri, rumah tangga, dan pertanian. Kendaraan bermotor menghasilkan karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO_x), partikulat (PM), dan hidrokarbon. Pembangkit listrik berbahan bakar fosil melepaskan sulfur dioksida (SO_2), karbon dioksida (CO_2), dan partikulat. Sektor rumah tangga menghasilkan polutan dari pembakaran biomassa, sedangkan sektor pertanian melepaskan





amonia (NH_3) dan metana (CH_4). (Seinfeld & Pandis, 2016) menekankan bahwa transportasi dan energi berbasis fosil adalah penyumbang utama pencemaran udara di kota modern.

- Transportasi

Kendaraan bermotor, kapal, dan pesawat menjadi penyumbang terbesar polutan udara di kawasan perkotaan. Bahan bakar fosil yang dibakar menghasilkan karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NOx), hidrokarbon (HC), serta partikulat halus ($\text{PM}_{2.5}$ dan PM_{10}). Emisi ini tidak hanya berdampak pada kesehatan pernapasan, tetapi juga memicu pembentukan ozon troposferik yang berbahaya. Menurut World Health Organization (2021), transportasi menyumbang lebih dari 25% emisi CO_2 global, sekaligus menjadi salah satu penyebab utama pencemaran udara perkotaan.

- Industri dan Pembangkit Energi

Pembangkit listrik berbahan bakar batu bara dan minyak menghasilkan sulfur dioksida (SO_2), nitrogen oksida (NOx), serta partikel debu dalam jumlah besar. Sektor industri kimia, semen, baja, dan tekstil juga berkontribusi pada emisi senyawa organik volatil (VOC) dan logam berat yang mencemari udara. Sektor industri merupakan salah satu kontributor terbesar emisi SO_2 dan partikulat ke atmosfer, terutama di negara berkembang (Seinfeld & Pandis, 2016).

- Kegiatan Rumah Tangga dan Perkotaan

Aktivitas rumah tangga seperti penggunaan kayu bakar, arang, dan minyak tanah untuk memasak dapat menghasilkan asap pekat yang mengandung karbon monoksida dan partikulat. Selain itu, pembakaran sampah terbuka di kawasan perkotaan menambah pencemar berupa dioxin, furan, dan polutan organik persisten lainnya. Pembakaran sampah terbuka menjadi sumber pencemar udara yang berbahaya, terutama di kota-kota dengan pengelolaan sampah yang belum memadai.

- Pertanian dan Peternakan

Kegiatan pertanian menghasilkan gas dinitrogen oksida (N_2O) dari penggunaan pupuk nitrogen, sedangkan peternakan menghasilkan gas metana (CH_4) dari kotoran hewan ruminansia. Kedua gas tersebut termasuk dalam gas rumah kaca yang berkontribusi signifikan terhadap





pemanasan global. Sektor *Agriculture, Forestry, and Other Land Use* (AFOLU) menyumbang sekitar 22-30% total emisi gas rumah kaca global (IPPC, 2021).

- Pembakaran Terbuka dan Sampah

Selain kebakaran lahan pertanian yang disengaja untuk membuka lahan baru, pembakaran sampah terbuka juga memperburuk kualitas udara. Asap hasil pembakaran mengandung karbon monoksida, partikulat halus, dan senyawa beracun yang dapat berdampak langsung pada kesehatan masyarakat.

3. Keterkaitan dengan Isu Perubahan Iklim

Pencemaran udara dan perubahan iklim merupakan dua isu lingkungan global yang saling berkaitan erat. Keduanya memiliki hubungan timbal balik, baik dari segi penyebab maupun dampak yang ditimbulkan. Secara umum, pencemaran udara mengacu pada masuknya zat atau partikel berbahaya ke atmosfer dalam jumlah yang dapat mengganggu kesehatan, ekosistem, serta kenyamanan lingkungan. Sementara itu, perubahan iklim merujuk pada pergeseran pola iklim global dalam jangka panjang, yang salah satunya didorong oleh meningkatnya konsentrasi gas rumah kaca (GRK) di atmosfer.

Salah satu bentuk keterkaitan yang paling jelas adalah bahwa banyak polutan udara juga berperan sebagai gas rumah kaca. Contohnya, karbon dioksida (CO_2) dan metana (CH_4) tidak hanya menurunkan kualitas udara, tetapi juga memperkuat efek rumah kaca yang memicu pemanasan global (IPCC, 2021). Selain itu, dinitrogen oksida (N_2O) yang dihasilkan dari aktivitas pertanian berkontribusi pada perubahan iklim sekaligus merusak lapisan ozon.

Gas rumah kaca seperti CO_2 , CH_4 , dan N_2O menyebabkan pemanasan global, dengan sumber utama dari energi, transportasi, dan pertanian. Selain itu, *United Nations Environment Programme dan World Meteorological Organization* (2011) menyoroti peran polutan jangka pendek seperti karbon hitam, ozon troposfer, dan metana, yang mempercepat pemanasan sekaligus membahayakan kesehatan. Aerosol sulfat dari emisi sulfur industri memiliki efek pendinginan karena memantulkan cahaya matahari, sementara *black carbon* atau karbon hitam dari pembakaran bahan bakar fosil justru menyerap panas dan mempercepat pencairan es di kutub (Bond *et al.*, 2013). Di sisi lain, kebakaran gambut di Indonesia





menghasilkan kabut asap berbahaya sekaligus emisi karbon besar yang memperburuk perubahan iklim global (Field *et al.*, 2009).

Keterkaitan lain muncul dari sumber emisi yang sama. Sektor transportasi, industri, pembangkit listrik berbahan fosil, serta pembakaran biomassa, semuanya melepaskan polutan udara sekaligus gas rumah kaca. Hal ini menjadikan pencemaran udara dan perubahan iklim tidak dapat dipisahkan. Upaya pengendalian yang dilakukan pada salah satunya akan memberikan dampak positif pada yang lain. Misalnya, pengurangan emisi kendaraan bermotor tidak hanya menurunkan kadar partikulat dan nitrogen oksida di udara perkotaan, tetapi juga mengurangi emisi CO₂ yang berkontribusi pada perubahan iklim (WHO, 2021).

Dengan demikian, pencemaran udara dan perubahan iklim memiliki hubungan erat dan saling memperkuat dampaknya. Pengendalian pencemaran udara tidak hanya penting untuk meningkatkan kualitas kesehatan masyarakat, tetapi juga merupakan strategi mitigasi perubahan iklim. Sebaliknya, mitigasi perubahan iklim melalui transisi energi bersih dan efisiensi energi akan berdampak signifikan terhadap perbaikan kualitas udara.

4. Klasifikasi Jenis Pencemar Udara, Karakteristik, dan Dampaknya

Pencemar udara dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok besar, yaitu pencemar primer dan pencemar sekunder. Klasifikasi ini penting untuk memahami asal-usul polutan dan bagaimana mereka berinteraksi di atmosfer hingga menimbulkan dampak terhadap kesehatan, lingkungan, dan iklim. Selain itu penting untuk mengetahui karakteristik fisik-kimia pencemar udara. Karakteristik pencemar udara berbeda-beda tergantung pada jenis senyawanya, sumber emisi, serta reaktivitasnya di atmosfer.

a. Pencemar Udara Primer

Pencemar udara primer adalah pencemar yang dilepaskan langsung dari sumbernya ke atmosfer tanpa melalui transformasi kimia lebih lanjut. Menurut Seinfeld & Pandis (2016), pencemar primer umumnya bersifat lokal dan langsung terukur di sekitar sumber emisi. Berikut ini penjelasan mengenai karakteristik dan dampak dari pencemar udara primer.





1) Karbon Monoksida (CO)

Karbon monoksida merupakan salah satu pencemar udara primer yang paling berbahaya karena sifatnya tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak berasa sehingga sulit terdeteksi oleh manusia. Gas ini dihasilkan dari proses pembakaran tidak sempurna bahan bakar fosil, terutama pada kendaraan bermotor, mesin industri, dan pembakaran biomassa. CO memiliki kemampuan berikatan dengan hemoglobin dalam darah 200–250 kali lebih kuat dibandingkan oksigen, sehingga menghambat distribusi oksigen ke seluruh jaringan tubuh. Akibatnya, paparan karbon monoksida dapat menyebabkan gejala mulai dari sakit kepala, pusing, hingga kehilangan kesadaran, bahkan kematian pada konsentrasi tinggi (WHO, 2021).

2) Sulfur Dioksida (SO₂)

Sulfur dioksida dilepaskan ke atmosfer melalui pembakaran bahan bakar fosil yang mengandung sulfur, seperti batu bara dan minyak bumi, serta dari kegiatan industri peleburan logam. Selain itu, sumber alami seperti letusan gunung berapi juga berkontribusi pada pelepasan SO₂ dalam jumlah besar. Gas ini berbau tajam, mudah larut dalam air dan membentuk asam sulfat maupun asam sulfat di atmosfer. Senyawa ini berkontribusi pada hujan asam yang merusak ekosistem (Jacobson, 2002). Paparan jangka pendek terhadap SO₂ menyebabkan iritasi saluran pernapasan, memperburuk asma, dan menurunkan fungsi paru. Dalam jangka panjang, keberadaan SO₂ di atmosfer berkontribusi terhadap kerusakan ekosistem hutan, tanah, serta infrastruktur akibat hujan asam (Seinfeld & Pandis, 2016).

3) Nitrogen Oksida (NOx = NO dan NO₂)

Nitrogen oksida terbentuk terutama dari proses pembakaran bersuhu tinggi di mesin kendaraan bermotor, pembangkit listrik, serta aktivitas industri. Nitric oxide (NO) adalah gas tidak berwarna, sedangkan nitrogen dioksida (NO₂) berwarna cokelat kemerahan dengan bau menyengat, bersifat reaktif, berwarna coklat kemerahan, dan berperan dalam pembentukan ozon troposfer serta hujan asam (Finlanson-Pitts & Pitts, 2000). NOx tidak hanya berbahaya secara langsung bagi kesehatan manusia karena dapat menyebabkan iritasi paru-paru, memperburuk asma, dan meningkatkan kerentanan terhadap infeksi





pernapasan, tetapi juga berperan dalam reaksi fotokimia di atmosfer. NO_x bereaksi dengan senyawa organik volatil (VOC) dan radiasi matahari, menghasilkan ozon troposfer dan partikel sekunder yang menjadi komponen utama smog perkotaan.

4) Partikulat (PM₁₀ dan PM_{2.5})

Partikel padat atau cair yang melayang di udara dengan ukuran beragam, biasanya PM10 (diameter ≤ 10 µm) dan PM2.5 (diameter ≤ 2,5 µm). PM sering mengandung campuran debu, jelaga, logam, dan senyawa organik (Seinfeld & Pandis, 2016). *Particulate Matter* merupakan campuran partikel padat dan cair di udara dengan ukuran sangat kecil. Partikulat primer dapat berasal dari debu jalan, aktivitas industri, konstruksi, pembakaran biomassa, hingga asap kendaraan. PM₁₀ memiliki diameter kurang dari 10 mikrometer, sedangkan PM_{2.5} lebih kecil lagi, yaitu kurang dari 2,5 mikrometer. Ukurannya yang sangat halus membuat PM_{2.5} mampu menembus hingga ke alveoli paru-paru dan bahkan masuk ke aliran darah. Dampaknya sangat serius, mulai dari gangguan pernapasan, penyakit jantung, stroke, kanker paru-paru, hingga kematian prematur. Selain membahayakan kesehatan manusia, partikulat juga mempengaruhi lingkungan dengan menurunkan jarak pandang dan memberikan efek pendinginan atau pemanasan pada iklim (U.S. EPA, 2019).

5) Hidrokarbon (HC) dan Senyawa Organik Volatil (VOC)

Hidrokarbon dan senyawa organik volatil (VOC) dilepaskan ke atmosfer dari emisi kendaraan bermotor, aktivitas kilang minyak, industri kimia, penggunaan pelarut, cat, serta pembakaran biomassa. VOC sangat mudah menguap dan sebagian di antaranya bersifat toksik serta karsinogenik, misalnya benzena yang diketahui dapat menyebabkan leukemia. Selain dampak langsung pada kesehatan, VOC memainkan peran penting dalam proses reaksi fotokimia di atmosfer. Bersama dengan nitrogen oksida dan radiasi sinar matahari, VOC dapat menghasilkan ozon troposfer, yang merupakan komponen utama kabut fotokimia (*photochemical smog*) di kawasan perkotaan. Kondisi ini tidak hanya menurunkan kualitas udara, tetapi juga berdampak negatif terhadap kesehatan manusia dan produktivitas tanaman.





6) Logam Berat

Logam berat, seperti Pb, Cd, Hg, dan As, dapat berada dalam bentuk partikel maupun uap di atmosfer dan tergolong sebagai pencemar udara. Logam berat bersifat toksik, persisten, dan bioakumulatif. Pencemaran udara berupa logam berat biasanya terbentuk dari proses pembakaran batubara, smelter (peleburan logam), industri baterai, cat, hingga insinerasi limbah. Paparan kronis logam berat dapat menyebabkan kerusakan saraf, ginjal, dan sistem kekebalan tubuh (Jacobson, 2002).

7) Gas Rumah Kaca (GRK)

Gas Rumah Kaca, yaitu gas-gas yang ada di atmosfer bumi dan memiliki kemampuan untuk menyerap serta memancarkan kembali radiasi inframerah. Gas-gas ini secara alami penting untuk menjaga suhu bumi agar tetap hangat dan memungkinkan kehidupan. Namun, peningkatan konsentrasi GRK akibat aktivitas manusia menyebabkan efek rumah kaca yang berlebihan, sehingga memicu pemanasan global dan perubahan iklim. Gas ini dilepaskan langsung dari aktivitas manusia dan alam. Gas seperti CO₂, CH₄, N₂O, dan fluorokarbon yang tidak bersifat toksik langsung bagi manusia, tetapi memerangkap panas di atmosfer. Gas rumah kaca menjadi penyebab utama perubahan iklim global (IPCC, 2021). Gas CO₂ dihasilkan dari proses pembakaran batubara, minyak, gas, dan deforestasi. CH₄ dihasilkan dari proses emisi pertanian, peternakan, sawah, dan dekomposisi limbah. N₂O dihasilkan dari penggunaan pupuk nitrogen. Sedangkan fluorokarbon dihasilkan dari refrigeran, aerosol, proses industri.

b. Pencemar Udara Sekunder

Pencemar udara sekunder adalah polutan yang tidak langsung dilepaskan dari sumber, melainkan terbentuk di atmosfer melalui reaksi kimia antara polutan primer dengan radiasi matahari, oksigen, atau uap air. Jenis polutan ini sering kali lebih berbahaya dibandingkan pencemar primer karena sifatnya yang lebih reaktif dan bertahan lebih lama di udara. Berikut ini penjelasan mengenai karakteristik dan dampak dari pencemar udara sekunder.





1) Ozon Troposfer (O_3)

Ozon troposfer merupakan pencemar udara sekunder yang terbentuk akibat reaksi fotokimia antara nitrogen oksida (NO_x) dan senyawa organik volatil (VOC) dengan bantuan sinar matahari. Berbeda dengan ozon di stratosfer yang berperan melindungi bumi dari radiasi ultraviolet, ozon di lapisan troposfer justru bersifat berbahaya. Ozon troposfer sangat oksidatif, berbahaya bagi kesehatan pernapasan, dan menurunkan produktivitas tanaman (Seinfeld & Pandis, 2016). Ozon dapat menyebabkan iritasi saluran pernapasan, memperburuk penyakit asma, menurunkan fungsi paru, serta meningkatkan risiko penyakit kronis pada sistem pernapasan. Selain itu, ozon troposfer juga merusak vegetasi dan menurunkan hasil pertanian karena menghambat proses fotosintesis. Menurut WHO (2021), paparan ozon troposfer merupakan salah satu penyebab utama beban penyakit akibat pencemaran udara di kawasan perkotaan.

2) Asam Nitrat (HNO_3)

Asam nitrat terbentuk melalui reaksi antara nitrogen dioksida (NO_2) dengan radikal hidroksil (OH) di atmosfer. Senyawa ini merupakan prekursor penting dalam pembentukan hujan asam. Asam nitrat dapat larut dalam air hujan sehingga menurunkan pH air hujan, yang berdampak pada pengasaman tanah, kerusakan ekosistem perairan, serta percepatan korosi pada bangunan dan infrastruktur. Dari sisi kesehatan, partikel nitrat yang berasal dari HNO_3 dapat terhirup dan menyebabkan gangguan pernapasan, terutama pada kelompok rentan seperti anak-anak dan lansia (Seinfeld & Pandis, 2016).

3) Asam Sulfat (H_2SO_4)

Asam sulfat terbentuk dari oksidasi sulfur dioksida (SO_2) di atmosfer, baik melalui reaksi gas maupun dalam fase cair pada tetesan awan. Seperti halnya asam nitrat, asam sulfat berperan utama dalam pembentukan hujan asam yang dapat merusak ekosistem hutan, mengasamkan danau, serta mempercepat degradasi bangunan dan monumen bersejarah. Dari sisi kesehatan, aerosol sulfat yang terbentuk dapat meningkatkan risiko penyakit kardiovaskular dan pernapasan. Menurut (Finlanson-Pitts & Pitts, 2000), partikel sulfat sekunder memiliki





peran besar dalam pembentukan kabut asap (smog) yang mengurangi jarak pandang di atmosfer.

4) Partikulat Sekunder (Sulfat, Nitrat, dan Amonium)

Selain partikulat primer, atmosfer juga menghasilkan partikulat sekunder yang terbentuk melalui reaksi kimia. Sulfat berasal dari oksidasi SO_2 , nitrat dari oksidasi NO_x , sedangkan amonium berasal dari interaksi amonia (NH_3) dengan sulfat atau nitrat. Partikulat sekunder ini berukuran sangat kecil ($\text{PM}_{2.5}$) sehingga mampu menembus jauh ke dalam paru-paru dan bahkan masuk ke aliran darah. Dampaknya sangat serius, termasuk peningkatan risiko serangan jantung, stroke, dan kanker paru-paru. Dari perspektif lingkungan, partikulat sekunder juga berkontribusi terhadap pembentukan kabut asap pekat (*haze*) yang sering terjadi di kota besar maupun wilayah dengan tingkat polusi tinggi (U.S. EPA, 2019).

5) Peroxyacetyl Nitrate (PANs)

Peroxyacetyl nitrate (PANs) merupakan senyawa oksidator yang terbentuk melalui reaksi antara VOC, NO_x , dan sinar matahari. PANs sangat beracun bagi tumbuhan, karena dapat menyebabkan kerusakan jaringan daun, menghambat pertumbuhan, serta menurunkan hasil pertanian. Pada manusia, paparan PANs dapat menimbulkan iritasi pada mata, hidung, dan tenggorokan, serta memperburuk kondisi pernapasan pada penderita asma atau penyakit paru obstruktif kronis. PANs adalah salah satu komponen utama kabut fotokimia yang menjadi masalah serius di wilayah perkotaan padat lalu lintas.

5. Dampak Pencemar Udara

Pencemar udara memberikan dampak serius terhadap kesehatan, lingkungan, dan iklim. WHO (2021) melaporkan bahwa polusi udara menyebabkan sekitar 7 juta kematian prematur setiap tahun, terutama akibat penyakit jantung, stroke, kanker paru-paru, dan gangguan pernapasan. Dari sisi lingkungan, hujan asam yang terbentuk dari polutan sulfur dan nitrogen merusak ekosistem hutan, menurunkan kesuburan tanah, serta merusak bangunan. Ozon troposfer mengganggu proses fotosintesis dan menurunkan hasil panen pertanian. Sementara itu, partikel karbon hitam berperan





dalam mempercepat pemanasan global dengan menyerap radiasi matahari dan mempercepat pencairan es di kutub.

a. Dampak terhadap kesehatan manusia

PM2.5 menyebabkan penyakit kardiovaskular dan kanker paru-paru. NO₂ memicu asma dan iritasi paru. SO₂ mengiritasi saluran pernapasan. CO mengurangi kapasitas darah membawa oksigen. Ozon troposfer menurunkan fungsi paru dan memperburuk penyakit kronis. WHO (2021) melaporkan sekitar 7 juta orang di dunia meninggal lebih cepat dari harapan hidup normal setiap tahun akibat dampak polusi udara.

b. Dampak terhadap ekosistem

Hujan asam dari SO₂ dan NOx menurunkan pH tanah dan air, merusak vegetasi, serta membunuh organisme akuatik. Ozon troposfer mengurangi hasil panen gandum, kedelai, dan tanaman pangan lainnya. Logam berat mencemari rantai makanan dan menumpuk pada jaringan hewan serta manusia. Aerosol juga memengaruhi iklim dengan mengubah pola radiasi matahari dan pembentukan awan (Seinfeld & Pandis, 2016).

c. Dampak terhadap material

Polutan udara mempercepat korosi logam, merusak bangunan, dan mempercepat pelapukan batu bersejarah. SO₂ dan hujan asam sangat merusak struktur berbahan kapur dan marmer. Partikulat menghitamkan permukaan bangunan dan patung, menurunkan nilai estetika (Jacobson, 2002).

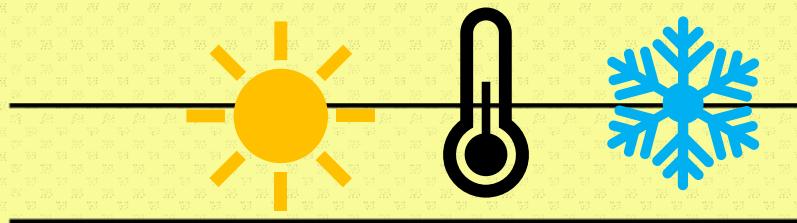


**SOAL LATIHAN**

Sebutkan dan jelaskan dampak dari perubahan iklim!

Diskusikan dampak gas rumah kaca terhadap perubahan iklim global, sertakan contoh kebijakan mitigasi yang relevan di Indonesia.

Analisis bagaimana kondisi meteorologi (inversi suhu, kecepatan angin) dapat memperburuk tingkat pencemaran udara?



MATERI 1





Udara Ambien dan Standar Kualitas Udara

1. Konsep Udara Ambien

Udara ambien adalah udara bebas di atmosfer yang berada di sekitar permukaan bumi yang dapat mempengaruhi kesehatan manusia, makhluk hidup, dan unsur lingkungan hidup lainnya. Udara ambien merupakan campuran gas-gas yang membentuk atmosfer bumi dan dapat tercemar oleh berbagai aktivitas antropogenik maupun alamiah.

Udara ambien dalam kondisi normal tersusun atas beberapa gas utama dengan konsentrasi yang relatif stabil. Gas yang paling dominan adalah nitrogen (N_2) yang mencapai sekitar 78,08% dari total volume, diikuti oleh oksigen (O_2) sebesar 20,95%. Argon (Ar) menempati urutan ketiga dengan proporsi 0,93%, sedangkan karbon dioksida (CO_2) hadir dalam jumlah lebih kecil, yaitu sekitar 0,04%. Selain itu, terdapat pula gas-gas lain dalam jumlah sangat kecil, sekitar 0,003%, yang meliputi neon, helium, metana, kripton, dan hidrogen (Wardhana, 2004).

2. Regulasi dan Standar Kualitas Udara

I. Regulasi Nasional Indonesia

A. Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021

PP 22/2021 merupakan revisi dari PP 41/1999 yang mengatur baku mutu udara ambien nasional. Regulasi ini menetapkan standar yang lebih ketat untuk melindungi kesehatan masyarakat dan lingkungan.

Tabel 1 Baku Mutu Udara Ambien Nasional:

Parameter	Waktu Pengukuran	Baku Mutu	Satuan
SO_2	1 jam	150	$\mu g/m^3$
SO_2	24 jam	75	$\mu g/m^3$
SO_2	1 tahun	45	$\mu g/m^3$
CO	1 jam	10.000	$\mu g/m^3$
CO	8 jam	4.000	$\mu g/m^3$
NO_2	1 jam	200	$\mu g/m^3$
NO_2	24 jam	65	$\mu g/m^3$
NO_2	1 tahun	50	$\mu g/m^3$



Parameter	Waktu Pengukuran	Baku Mutu	Satuan
O_3	1 jam	150	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
O_3	8 jam	100	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
O_3	1 tahun	35	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Partikulat debu (TSP)	24 jam	230	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM₁₀	24 jam	75	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM₁₀	1 tahun	40	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM_{2.5}	24 jam	55	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM_{2.5}	1 tahun	15	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Timbal (Pb)	24 jam	2	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Hidrokarbon Non Metana (NMHC)	3 jam	160	$\mu\text{g}/\text{m}^3$

Sumber: Lampiran VII PP 22 Tahun 2021

B. Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU)

ISPU merupakan angka tanpa satuan, digunakan untuk menggambarkan kondisi mutu udara ambien di lokasi tertentu dan didasarkan kepada dampak terhadap kesehatan manusia, nilai estetika dan makhluk hidup lainnya. Khusus untuk daerah rawan terdampak kebakaran hutan dan lahan, informasi ini dapat digunakan sebagai *early warning system* atau sistem peringatan dini bagi masyarakat sekitar. Tujuan disusunnya ISPU agar memberikan kemudahan dari keseragaman informasi mutu udara ambien kepada masyarakat di lokasi dan waktu tertentu serta sebagai bahan pertimbangan dalam melakukan upaya-upaya pengendalian pencemaran udara baik bagi pemerintah pusat maupun pemerintah daerah. Pada tahun 2020, KLHK telah mengeluarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan nomor 14 tahun 2020 tentang Indeks Standar Pencemar Udara.



**Tabel 2 Konversi Nilai Konsentrasi**

ISPU	24 Jam PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 Jam PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 Jam SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 Jam CO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 Jam O ₃ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 Jam NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 Jam HC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
0 - 50	50	15,5	52	4000	120	80	45
51 - 100	150	55,4	180	8000	235	200	100
101 - 200	350	150,4	400	15000	400	1130	215
201 - 300	420	250,4	800	30000	800	2260	432
>300	500	500	1200	45000	1000	3000	648

Keterangan:

- Data pengukuran selama 24 jam secara terus-menerus.
- Hasil perhitungan ISPU parameter partikulat (PM2.5) disampaikan tiap jam selama 24 jam.
- Hasil perhitungan ISPU parameter partikulat (PM10), sulfur dioksida (SO₂), karbon monoksida (CO), ozon (O₃), nitrogen dioksida (NO₂) dan hidrokarbon (HC), diambil nilai ISPU parameter tertinggi dan paling sedikit disampaikan setiap jam 09.00 dan jam 15.00.

Tabel 3 Kategori Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU)

Rentang	Kategori	Penjelasan
1-50	Baik	Tingkat mutu udara yang sangat baik, tidak memberikan efek negatif terhadap manusia, hewan dan tumbuhan
51-100	Sedang	Tingkat mutu udara masih dapat diterima pada kesehatan manusia, hewan dan tumbuhan.
101-200	Tidak Sehat	Tingkat mutu udara yang bersifat merugikan pada manusia, hewan dan tumbuhan.
201-300	Sangat Tidak Sehat	Tingkat mutu udara yang dapat meningkatkan resiko kesehatan pada sejumlah segmen populasi yang terpapar.
301+	Berbahaya	Tingkat mutu udara yang dapat merugikan kesehatan serius pada populasi dan perlu penanganan cepat.

II. Standar Internasional

A. World Health Organization (WHO) - 2021 Guidelines

Tabel 4 Baku Mutu Udara

Parameter	Waktu Rata-rata	Nilai Pedoman	Satuan
PM _{2.5}	Tahunan	5	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM _{2.5}	24 jam	15	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM ₁₀	Tahunan	15	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM ₁₀	24 jam	45	$\mu\text{g}/\text{m}^3$





Parameter	Waktu Rata-rata	Nilai Pedoman	Satuan
O ₃	8 jam	100	µg/m ³
NO ₂	Tahunan	10	µg/m ³
NO ₂	24 jam	25	µg/m ³
SO ₂	24 jam	40	µg/m ³
CO	8 jam	4	mg/m ³

Sumber: (WHO, 2021)



MATERI 3





Kualitas Udara Indoor

1. Definisi dan Karakteristik

Kualitas udara dalam ruangan atau *Indoor Air Quality* (IAQ) merupakan istilah yang mengacu pada kondisi udara di dalam maupun di sekitar bangunan yang secara langsung memengaruhi kesehatan dan kenyamanan penghuninya. Secara umum, udara dalam ruangan memiliki karakteristik yang berbeda dengan udara luar. Konsentrasi polutan di dalam ruangan biasanya 2–5 kali lebih tinggi dibanding udara luar, bahkan dalam kondisi tertentu dapat mencapai hingga 100 kali lipat. Hal ini menjadi penting mengingat manusia menghabiskan 80–90% waktunya di dalam ruangan. Selain itu, sirkulasi udara di dalam bangunan cenderung terbatas, sehingga pertukaran udara lebih rendah dibandingkan udara luar. Kondisi ini mendorong terjadinya akumulasi polutan dalam jangka panjang. Setiap ruangan juga memiliki kondisi mikro yang berbeda (*microenvironment*), sehingga karakteristik pencemarnya pun bervariasi.

Beberapa faktor utama yang memengaruhi kualitas udara dalam ruangan antara lain kekuatan emisi dari sumber pencemar (*source strength*), laju pertukaran udara atau ventilasi (*ventilation rate*), kondisi selubung bangunan (*building envelope*) yang memungkinkan terjadinya kebocoran atau infiltrasi udara, aktivitas penghuni, serta kondisi iklim seperti suhu dan kelembaban.

2. Parameter Kualitas Udara Indoor

A. Parameter Kimia.

Berbagai senyawa kimia dapat ditemukan di udara dalam ruangan. Karbon dioksida (CO_2) misalnya, menjadi indikator utama ventilasi dan aktivitas penghuni. Kadar normalnya berada di bawah 1000 ppm, sementara paparan di atas 2000 ppm dianggap tidak sehat karena menurunkan konsentrasi dan produktivitas. Karbon monoksida (CO), gas beracun yang tidak berwarna dan tidak berbau, sering berasal dari kompor gas atau kendaraan di garasi. Gas ini berbahaya karena dapat mengikat hemoglobin dan menyebabkan hipoksia. Senyawa lain seperti nitrogen dioksida





(NO₂) yang berasal dari rokok dan kompor gas dapat mengiritasi saluran pernapasan, terutama pada anak-anak dan penderita asma.

Selain itu, formaldehida (CH₂O) banyak dilepaskan dari material bangunan, furnitur, maupun produk pembersih, yang dalam jangka panjang dikategorikan sebagai karsinogen. Benzene (C₆H₆) juga kerap ditemukan dari asap rokok dan produk berbasis pelarut, yang menurut WHO tidak memiliki ambang batas aman karena bersifat karsinogenik. Radon (Rn-222), gas radioaktif hasil peluruhan uranium di tanah dan batuan, sering masuk melalui retakan pondasi dan diketahui sebagai penyebab kanker paru terbesar kedua setelah rokok.

B. Parameter Biologis.

Udara dalam ruangan juga dapat terkontaminasi oleh agen biologis. Bakteri total seringkali berasal dari manusia, hewan, atau sistem pendingin udara (HVAC). Beberapa spesies bakteri patogen seperti *Legionella* dapat menimbulkan penyakit serius. Jamur seperti *Aspergillus*, *Penicillium*, dan *Cladosporium* tumbuh baik pada kelembaban tinggi dan dapat menimbulkan alergi, asma, hingga produksi mikotoksin. Endotoksin dari dinding sel bakteri gram negatif juga dapat terdistribusi melalui debu rumah dan menyebabkan gangguan pernapasan.

C. Parameter Fisik.

Suhu, kelembaban, kecepatan aliran udara, dan partikel halus (PM_{2.5}) menjadi parameter fisik yang menentukan kenyamanan dan kesehatan. Suhu optimal berkisar antara 21–25°C, sedangkan kelembaban ideal berada pada 40–60%. Kelembaban rendah meningkatkan iritasi saluran pernapasan dan memperpanjang kelangsungan hidup virus, sedangkan kelembaban tinggi memicu pertumbuhan mikroorganisme. Partikel halus (PM_{2.5}) sering berasal dari aktivitas memasak, merokok, maupun infiltrasi udara luar, dan berkontribusi terhadap risiko penyakit kardiovaskular maupun respiratori.

3. Sumber Pencemar Indoor

Sumber pencemar udara dalam ruangan dapat dibagi menjadi dua kategori utama, yakni sumber internal dan eksternal. Dari sisi internal, aktivitas manusia menjadi penyumbang utama, misalnya pernapasan yang menghasilkan CO₂, memasak yang memproduksi





PM_{2.5} dan NO₂, serta merokok yang melepaskan lebih dari 4000 bahan kimia berbahaya. Material bangunan seperti cat, perekat, karpet, dan furnitur juga melepaskan senyawa organik volatil (VOC) serta formaldehida. Peralatan rumah tangga seperti pemanas, AC, printer, dan fotokopi menambah beban pencemar melalui pelepasan gas berbahaya, ozon, dan partikel. Produk pembersih, parfum, maupun pestisida turut menyumbang polutan yang berpotensi toksik.

Sementara itu, sumber eksternal meliputi infiltrasi udara luar yang membawa polutan seperti ozon, NO₂, dan SO₂ melalui celah bangunan. Ventilasi mekanis yang tidak dilengkapi dengan filtrasi yang baik dapat menjadi jalur masuk polutan eksternal, sementara gas tanah seperti radon dapat masuk melalui retakan fondasi.

4. Dampak Kesehatan

Paparan polutan dalam ruangan dapat menimbulkan efek kesehatan jangka pendek maupun jangka panjang. Efek akut biasanya muncul dalam hitungan menit hingga jam, berupa iritasi mata, hidung, tenggorokan, sakit kepala, mual, dan kelelahan, yang umumnya akan hilang setelah keluar dari ruangan. Namun, paparan kronis dapat menimbulkan masalah serius seperti asma, alergi, kanker (dari formaldehida, benzena, radon, dan asap rokok), penyakit jantung, hingga penyakit paru obstruktif kronis (COPD).

Selain itu, dikenal pula kondisi *Sick Building Syndrome* (SBS), yaitu kumpulan gejala nonspesifik yang dialami penghuni bangunan akibat kualitas udara yang buruk. Gejalanya meliputi iritasi saluran pernapasan, sakit kepala, kelelahan mental, hingga iritasi kulit. Lebih jauh, terdapat juga *Building Related Illness* (BRI) yang merupakan penyakit spesifik dengan penyebab jelas, seperti *Legionnaires' disease* akibat bakteri *Legionella* atau sindrom akibat paparan jamur toksik.

5. Standar Kualitas Udara Indoor

Untuk menjaga kualitas udara dalam ruangan, sejumlah standar telah ditetapkan, salah satunya adalah ASHRAE 62.1-2019 diterbitkan oleh ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) yang mengatur ventilasi untuk kualitas udara yang dapat diterima. Misalnya, ruang kantor memerlukan aliran udara segar minimal 2,5 L/s per orang ditambah 0,3 L/s per m² luas ruangan, sementara ruang kelas memerlukan 3,8 L/s per orang. Standar juga menetapkan bahwa





konsentrasi CO₂ di dalam ruangan sebaiknya tidak melebihi 700 ppm di atas kadar udara luar, dengan target ideal pada kisaran 600–800 ppm. Efektivitas ventilasi diukur dari distribusi dan efisiensi sistem, yang umumnya berada pada rentang 0,6–1,2.

SOAL LATIHAN

Analisis bagaimana penggunaan bahan bangunan modern (cat, perekat, karpet) dapat memengaruhi kualitas udara indoor dan sebutkan langkah mitigasinya!

Sebutkan dan jelaskan parameter kimia, fisik, dan biologis yang umumnya dipantau dalam uji kualitas udara indoor sesuai standar nasional, serta alasan pemantauan masing-masing parameter!



MATERI 4





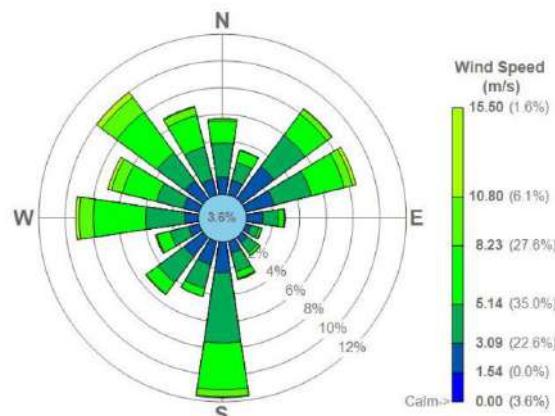
Meteorologi dan Dispersi Pencemar Udara

1. Peran Kondisi Meteorologi dalam Penyebaran Pencemar

Faktor meteorologi memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap sebaran, konsentrasi, dan arah pergerakan polutan di udara. Beberapa faktor penting yang perlu dipahami adalah:

a. Angin (*Wind*)

Angin merupakan faktor utama yang mengontrol arah dan kecepatan pergerakan polutan. Semakin tinggi kecepatan angin, semakin cepat polutan terdilusi dan terdispersi. Arah angin menentukan wilayah yang terdampak pencemaran. (Seinfeld & Pandis, 2016). Mawar angin atau cakra angin (*rose*) adalah sebuah metode penggambaran informasi mengenai kecepatan dan arah angin pada suatu lokasi tertentu (Tulandi *et al.*, 2020). Menurut Suryana (2022), mawar angin digambarkan dalam format melingkar dengan skema frekuensi angin yang berhembus dari arah tertentu. Panjang setiap mahkota menunjukkan tingkat frekuensi berhembusnya angin dari arah tersebut, bernilai nol di pusat mawar dan terus meningkat hingga tepi mawar. *Windrose* dapat digunakan untuk menganalisis data angin untuk keperluan meteorologi dari suatu data angin. *Windrose* merupakan diagram yang sangat penting dalam representasi data meteorologi terutama dalam kajian pencemaran udara. Dengan adanya *windrose* dapat diketahui arah persebaran polutan terjauh dan jangkauan maksimum dari polutan.



Gambar 1 Contoh *windrose*

**b. Temperatur (*Temperature*)**

Temperatur berpengaruh terhadap kestabilan atmosfer. Dalam kondisi atmosfer stabil, gerakan vertikal terbatas sehingga polutan cenderung terakumulasi di dekat sumber emisi. Sebaliknya, atmosfer labil atau tidak stabil mendorong pencampuran vertikal yang lebih baik sehingga polutan lebih cepat menyebar (Jacobson, 2002).

c. Kelembaban Udara (*Humidity*)

Kelembaban udara dapat memengaruhi reaksi kimia polutan di atmosfer. Misalnya, sulfur dioksida (SO_2) dan nitrogen oksida (NO_x) dapat bereaksi dengan uap air sehingga membentuk aerosol sulfat atau nitrat yang berkontribusi pada pembentukan kabut (*haze*) maupun smog. Pada kelembaban tinggi, risiko terbentuknya partikel sekunder juga meningkat (Seinfeld & Pandis, 2016).

d. Inversi Suhu (*Temperature Inversion*)

Inversi suhu (*temperature inversion*) terjadi ketika lapisan udara hangat berada di atas lapisan udara yang lebih dingin, sehingga mencegah terjadinya konveksi vertikal. Akibatnya, polutan terjebak di lapisan dekat permukaan tanah dan konsentrasi meningkat tajam. Fenomena ini pernah menimbulkan kasus pencemaran udara parah, salah satunya adalah peristiwa *Great Smog* di London tahun 1952 (Jacobson, 2002).

2. Metode Pemantauan dan Pengukuran Kualitas Udara

A. Prinsip Pemantauan Kualitas Udara

Pemantauan kualitas udara merupakan kegiatan sistematis untuk mengukur konsentrasi polutan di atmosfer dalam kurun waktu tertentu guna menilai kondisi lingkungan dan dampaknya bagi kesehatan manusia serta ekosistem. Prinsip utamanya adalah memperoleh data yang representatif, akurat, dan dapat dipertanggungjawabkan, sehingga dapat digunakan dalam pengendalian pencemaran udara dan perumusan kebijakan lingkungan (Mukono, 2008).

B. Teknik Pemantauan Kualitas Udara

Pemantauan kualitas udara merupakan langkah penting dalam upaya pengendalian pencemaran udara, karena hasil pemantauan digunakan sebagai dasar evaluasi kondisi





lingkungan, penentuan kebijakan, serta peringatan dini bagi masyarakat. Teknik pemantauan dapat dilakukan dengan berbagai pendekatan, baik secara langsung di lapangan maupun melalui pemodelan.

1) Metode Manual (Konvensional)

Metode manual mengandalkan pengambilan sampel udara secara langsung, kemudian dianalisis di laboratorium. Kelebihan dari metode ini adalah relative murah, akurat, cocok untuk pengambilan sampel jangka pendek. Akan tetapi memiliki kekurangan tidak dapat memberikan data *real-time*, memerlukan tenaga, dan waktu analisis.

Pengukuran Partikulat

- *High Volume Sampler (HVS)* : untuk mengukur TSP (*Total Suspended Particulate*) dan PM₁₀.
- *Gravimetric Method* : pada prinsipnya berat filter atau kertas saring sebelum dan sesudah digunakan menunjukkan konsentrasi partikulat.

Pengukuran Gas

- *Impingers*: udara dilewatkan ke cairan penyerap, kemudian dianalisis secara kimia.
- *Tabung Adsorben (Activated Carbon/Silica Gel)*: digunakan untuk menyerap polutan organik volatil (VOCs).

2) Metode Otomatis (*Continuous Monitoring*)

Metode ini menggunakan instrument atau alat sensor yang dapat mengukur konsentrasi polutan udara secara *real-time*, analisis kontinu, dan berkesinambungan. Metode ini dapat mengukur konsentrasi polutan udara secara langsung di lapangan (*in situ*). Data yang diperoleh direkam dalam interval waktu singkat (umumnya 1–5 menit) sehingga menghasilkan informasi real time mengenai kondisi udara. Instrumen utama dari metode ini adalah *Continuous Ambient Air Quality Monitoring Station* (CAAQMS) yaitu sistem stasiun pemantauan otomatis yang dilengkapi sensor untuk berbagai parameter pencemar, antara lain:





- Gas Pencemar: SO₂, NOx, CO, O₃, NH₃, VOC.
- Partikulat: PM₁₀ dan PM_{2.5}.
- Parameter Meteorologi: suhu, kelembaban, kecepatan dan arah angin, radiasi matahari.

Metode Analisis yang Digunakan:

- Partikulat (PM_{2.5}, PM₁₀)
 - *Beta Attenuation Monitor (BAM)*: prinsipnya menggunakan pelemahan radiasi beta.
 - *Tapered Element Oscillating Microbalance (TEOM)*: mengukur massa partikulat berdasarkan perubahan frekuensi osilasi.
- Sulfur Dioksida (SO₂)
 - *UV Fluorescence Analyzer*: mendeteksi pencerahan cahaya fluoresen dari molekul SO₂.
- Nitrogen Oksida (NO & NO₂)
 - *Chemiluminescence Analyzer*: reaksi NO dengan ozon menghasilkan cahaya yang terukur.
- Karbon Monoksida (CO)
 - *Non-Dispersive Infrared Analyzer (NDIR)*: mendeteksi penyerapan gelombang inframerah oleh molekul CO.
- Ozon (O₃)
 - *UV Photometric Analyzer*: mendeteksi serapan radiasi UV oleh ozon.

Metode ini sangat menguntungkan karena dapat memberikan data *real-time*, monitoring berkelanjutan, dan bisa terintegrasi dengan sistem online (*Air Quality Monitoring System*). Dibutuhkan biaya yang cukup mahal serta membutuhkan pemeliharaan rutin dan kalibrasi berkala (KLHK, 2020). Selain itu, alat ini juga sensitif terhadap gangguan teknis dan kondisi lingkungan ekstremal.

3) Biomonitoring

Metode ini memanfaatkan organisme hidup seperti lumut, lichen, atau tanaman tertentu sebagai indikator biologis pencemaran. Metode ini berguna untuk memantau dampak jangka panjang polutan pada ekosistem.





4) Pemodelan Dispersi Pencemar

Metode dengan pemodelan menggunakan model matematis seperti *Gaussian Plume Model* untuk memperkirakan sebaran pencemar berdasarkan data meteorologi dan karakteristik emisi. Aplikasi ini sering dipakai dalam Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL) dan perencanaan tata ruang.

5) Penginderaan Jauh (*Remote Sensing*)

Metode ini menggunakan satelit, drone, atau sensor berbasis laser (*LIDAR*) untuk mendekripsi konsentrasi polutan dalam skala luas. Di Indonesia, data satelit juga dimanfaatkan untuk memantau kebakaran hutan dan sebaran asap lintas wilayah.

Dengan memadukan metode manual, otomatis, biologis, dan berbasis teknologi canggih, pemantauan kualitas udara di Indonesia dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif, sekaligus mendukung kebijakan pengendalian pencemaran dan upaya mitigasi dampaknya terhadap kesehatan serta lingkungan.

PENGAMBILAN UJI UDARA AMBIEN

<https://www.youtube.com/watch?v=xFqatHsRA38>

Metode *Passive Sampler*

<https://www.youtube.com/watch?v=MmRmao5pDpQ>



Scan untuk melihat modul praktikum 😊





Sistem Pemantauan Kualitas Udara di Indonesia

Penerapan sistem pemantauan otomatis kualitas udara di Indonesia dikenal dengan SPKU (Stasiun Pemantauan Kualitas Udara) yang dikelola oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) serta pemerintah daerah. SPKU ditempatkan di berbagai kota besar untuk memantau polutan utama seperti SO_2 , NO_2 , CO, O_3 , PM_{10} , dan $\text{PM}_{2.5}$. Data dari SPKU digunakan untuk:

- Menghitung dan mengumumkan Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU). Data yang diperoleh digunakan untuk menyusun Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU), yang dikategorikan menjadi Baik, Sedang, Tidak Sehat, Sangat Tidak Sehat, dan Berbahaya.
- Mendukung perencanaan kebijakan pengendalian pencemaran udara.
- Memberikan peringatan dini kepada masyarakat pada saat terjadi pencemaran tinggi, seperti kabut asap atau smog perkotaan.

KLHK memiliki jaringan *Continuous Air Quality Monitoring System* (AQMS) di berbagai kota besar. Hasil ISPU dapat diakses masyarakat melalui situs resmi KLHK atau aplikasi.

Analisis Data Kualitas Udara

Data yang diperoleh dari stasiun pemantauan (manual maupun otomatis) biasanya disajikan dalam satuan konsentrasi ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ atau ppm) dan dibandingkan dengan baku mutu udara ambien.

- Untuk menganalisis, data dibandingkan dengan Baku Mutu Udara Ambien Nasional sesuai PP No. 22 Tahun 2021.
- Secara internasional, acuan dapat menggunakan WHO Air Quality Guidelines (2021).
- Analisis dapat meliputi:
 - Perbandingan dengan baku mutu.
 - Tren harian/mingguan/bulanan.
 - Identifikasi sumber pencemar potensial.
 - Rekomendasi pengendalian (transportasi, industri, dll).

Mahasiswa diharapkan mampu membaca data kualitas udara harian dari stasiun pemantauan, menganalisis kecenderungan, fluktuasi, serta membandingkannya dengan standar baku mutu





untuk menilai tingkat pencemaran. Analisis ini penting untuk memberikan rekomendasi terkait pengendalian polutan udara.

Mengenal ISPU

<https://www.youtube.com/watch?v=LXEGOHeMBHg>

https://www.youtube.com/watch?v=_B0aJSYSSh4

<https://www.youtube.com/watch?v=G7UXa-ERGkU>





MATERI 5





Inventarisasi Emisi dan Model Kualitas Udara

1. Inventarisasi Emisi

Emisi adalah pelepasan atau keluarnya zat, gas, atau partikel tertentu ke udara yang dihasilkan dari aktivitas manusia atau proses alami, yang dapat membahayakan lingkungan dan kesehatan. Inventarisasi emisi adalah proses sistematis untuk mengidentifikasi, mengkuantifikasi, dan mengkarakterisasi sumber-sumber polutan udara serta jumlah polutan yang dilepaskan ke atmosfer dalam suatu wilayah dan periode waktu tertentu(U.S. EPA, 2023). Tujuannya adalah untuk mengetahui kontribusi masing-masing sumber pencemar sehingga dapat disusun strategi pengendalian pencemaran udara.

Tujuan Inventarisasi Emisi:

- Mengidentifikasi sumber-sumber utama pencemaran udara
- Menghitung jumlah emisi dari setiap sumber
- Menyediakan data dasar untuk pemodelan kualitas udara
- Mendukung pengembangan strategi pengendalian pencemaran
- Memantau efektivitas kebijakan pengendalian emisi

Jenis Sumber Emisi

Emisi pencemar udara dapat berasal dari berbagai sumber, baik akibat aktivitas manusia (antropogenik) maupun dari proses alamiah. Secara umum, sumber emisi dibedakan menjadi empat kelompok utama, yaitu sumber bergerak, sumber tidak bergerak, sumber area, dan sumber alamiah.

A. Sumber Bergerak (*Mobile Sources*)

Sumber bergerak adalah sumber pencemar yang berasal dari alat transportasi yang dapat berpindah tempat.

- **Kendaraan bermotor darat:** mobil, motor, truk, dan bus yang menggunakan bahan bakar fosil. Aktivitas pembakaran bahan bakar menghasilkan emisi seperti karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NOx), hidrokarbon (HC), serta partikulat halus ($PM_{2.5}$ dan PM_{10}).
- **Transportasi laut dan udara:** kapal laut dan pesawat terbang juga menyumbang emisi signifikan, terutama berupa





NO_x, SO₂, dan partikulat, akibat pembakaran bahan bakar minyak dengan kandungan sulfur tinggi.

B. Sumber Tidak Bergerak (*Stationary Sources*)

Sumber tidak bergerak adalah sumber pencemar yang lokasinya tetap atau stasioner.

- **Industri:** pabrik semen, baja, pupuk, serta kilang minyak merupakan contoh industri yang menghasilkan emisi besar dari proses produksi maupun pembakaran energi.
- **Pembangkit listrik berbahan fosil:** Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) berbasis batubara atau pembangkit listrik tenaga gas (PLTG) menyumbang polutan seperti SO₂, NO_x, dan partikulat.
- **Rumah tangga:** pembakaran biomassa seperti kayu bakar, arang, atau minyak tanah untuk memasak dan pemanas juga menjadi sumber emisi, terutama di daerah pedesaan.

C. Sumber Area (*Area Sources*)

Sumber area adalah emisi yang berasal dari suatu kawasan tertentu dengan sebaran yang lebih luas dibanding sumber titik.

- **Kegiatan pertanian:** pembakaran lahan, penggunaan pupuk nitrogen, dan kegiatan peternakan dapat menghasilkan emisi gas rumah kaca (CH₄, N₂O) maupun polutan udara lainnya.
- **Tempat pembuangan akhir (TPA):** limbah padat yang mengalami dekomposisi menghasilkan metana (CH₄), suatu gas rumah kaca yang kuat.
- **Debu jalan:** berasal dari pergerakan kendaraan di jalan yang tidak beraspal atau minim perawatan, yang melepaskan partikulat ke udara.

D. Sumber Alamiah (*Natural Sources*)

Selain aktivitas manusia, proses alam juga dapat menghasilkan emisi pencemar udara.

- **Kebakaran hutan:** baik karena faktor alami maupun antropogenik, dapat menghasilkan asap pekat yang mengandung CO, CO₂, NO_x, dan partikulat.
- **Aktivitas gunung berapi:** letusan maupun aktivitas vulkanik mengeluarkan gas SO₂, CO₂, dan abu vulkanik ke atmosfer.
- **Proses biogeni:** seperti pelepasan metana dari rawa-rawa, lahan gambut, serta emisi serbuk sari dari tumbuhan.



2. Metode Penyusunan Inventarisasi Emisi

a. Pendekatan Top-Down

- Menggunakan data aktivitas secara makro (misalnya jumlah kendaraan, konsumsi BBM) lalu dikalikan dengan *emission factor*.
- Contoh: Emisi CO₂ = konsumsi BBM (liter) × faktor emisi CO₂ (kg/liter).

b. Pendekatan Bottom-Up

- Menggunakan data aktivitas detail pada tingkat sumber emisi individu (misalnya jumlah kendaraan per jenis, jam operasi, teknologi mesin).
- Lebih akurat, namun membutuhkan data rinci.

Formula Umum Inventarisasi Emisi

$$E=A \times EF$$

Keterangan:

E = Emisi (ton/tahun atau g/s).

A = Aktivitas (misalnya jumlah kendaraan, ton bahan bakar, jam operasi).

EF = Faktor emisi (g per unit aktivitas).

Sumber faktor emisi biasanya diperoleh dari IPCC *Guidelines* (2006), U.S. EPA AP-42, atau KLHK (2020).

3. Model Kualitas Udara

Model kualitas udara adalah representasi matematis dari proses fisika dan kimia yang mengatur penyebaran, transformasi, dan deposisi polutan di atmosfer. Model digunakan untuk memprediksi konsentrasi polutan pada suatu lokasi berdasarkan data emisi, meteorologi, dan kondisi lingkungan (Seinfeld & Pandis, 2016).

Tujuan Penggunaan Model

- Memperkirakan konsentrasi polutan di suatu lokasi.
- Membantu dalam perencanaan tata ruang dan pengendalian pencemaran.
- Menilai dampak dari sumber emisi baru (misalnya rencana pembangunan PLTU).





- Membandingkan skenario kebijakan (misalnya pembatasan emisi kendaraan).

Jenis Model Kualitas Udara

1. Model Gauss (Gaussian Plume Model)

- Model paling sederhana dan banyak digunakan.
- Berdasarkan asumsi bahwa polutan menyebar mengikuti distribusi Gaussian dalam arah horizontal dan vertikal.
- Cocok untuk sumber titik (industri, cerobong).
- Persamaan dasar:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

Keterangan:

$C(x,y,z)$ = konsentrasi polutan (g/m^3 atau mg/m^3)

Q = laju emisi polutan (g/s)

u = kecepatan angin rata-rata (m/s)

H = tinggi efektif cerobong (m) (tinggi cerobong + kenaikan plume)

σ_y, σ_z = parameter dispersi (m), fungsi dari jarak x dan stabilitas atmosfer

x = jarak ke arah angin dari sumber (m)

y = jarak ke arah horizontal tegak lurus angin (m)

z = ketinggian titik pengamatan (m)

2. Model Box (Box Model)

- Menganggap atmosfer suatu kota sebagai "kotak" dengan input dan output polutan.
- Cocok untuk analisis perkotaan dengan skala besar.

3. Model Numerik (Eulerian dan Lagrangian)

- Digunakan untuk simulasi yang lebih kompleks, misalnya CMAQ, AERMOD, CALPUFF.

Aplikasi Model

- Menentukan konsentrasi maksimum polutan dari cerobong industri.
- Menilai efektivitas regulasi emisi kendaraan bermotor.
- Membantu pengambilan kebijakan lingkungan berbasis data.





Inventarisasi emisi merupakan langkah awal dalam pemodelan kualitas udara. Inventarisasi ini menyajikan informasi mengenai sumber, jenis, jumlah, dan waktu pelepasan polutan ke atmosfer. Data tersebut menjadi input utama dalam model kualitas udara.

Model kualitas udara, seperti Gaussian Plume, AERMOD, atau CALPUFF, memanfaatkan data inventarisasi emisi bersama dengan informasi meteorologi (arah dan kecepatan angin, suhu, kelembaban, kondisi stabilitas atmosfer) serta karakteristik wilayah (topografi, tata guna lahan). Melalui perhitungan matematis, model ini dapat memprediksi dispersi polutan dan menentukan konsentrasi polutan pada titik tertentu di udara ambien.

Hasil dari model kualitas udara kemudian dibandingkan dengan data pemantauan lapangan untuk mengetahui sejauh mana model tersebut sesuai dengan kondisinya. Jika terdapat perbedaan yang signifikan, maka hasil ini dapat digunakan sebagai umpan balik untuk memperbaiki inventarisasi emisi maupun parameter model yang digunakan.

SOAL LATIHAN

Sebutkan tiga contoh sumber emisi utama di sektor industri!

Jelaskan perbedaan antara emisi *fugitive* dan emisi *point source*, serta berikan contoh industri yang berisiko menghasilkan masing-masing jenis emisi tersebut!





MATERI 6





Studi Kasus Pencemaran Udara di Indonesia & Dunia

Studi kasus pencemaran udara penting untuk dipelajari karena memberi gambaran nyata bagaimana aktivitas manusia maupun faktor alam dapat memicu pencemaran udara dengan dampak serius terhadap kesehatan, lingkungan, dan kebijakan publik. Dengan memahami kasus historis, mahasiswa dapat menganalisis penyebab, menilai dampak, dan mengevaluasi efektivitas langkah pengendalian.

1. Kasus Pencemaran Udara di Dunia

a. Smog London (1952)

- Faktor penyebab:
 - Pembakaran batubara dalam jumlah besar pada musim dingin.
 - Kondisi meteorologi *temperature inversion* memerangkap polutan.
- Dampak:
 - Sekitar 4.000 kematian langsung selama 5 hari (WHO, 2021).
 - Peningkatan kasus ISPA, bronkitis, dan penyakit kardiovaskular.
- Kebijakan pengendalian:
 - Pemerintah Inggris mengeluarkan *Clean Air Act* (1956), yang membatasi penggunaan batubara di perkotaan dan mendorong penggunaan energi bersih.

b. Smog Los Angeles (1940-an – 1970-an)

- Faktor penyebab:
 - Emisi kendaraan bermotor yang sangat tinggi.
 - Reaksi fotokimia antara NOx dan hidrokarbon menghasilkan ozon troposfer.
- Dampak:
 - Gangguan pernapasan, iritasi mata, menurunnya produktivitas kerja.
- Kebijakan pengendalian:
 - Penerapan standar emisi kendaraan.
 - Pengembangan transportasi umum dan bahan bakar rendah emisi.





<https://www.youtube.com/shorts/UP0QAHYrrSs>

Polusi Udara di Indonesia

https://www.youtube.com/shorts/_QQ7a4TABxY

<https://www.youtube.com/watch?v=XwLCXVTWqPY>

<https://www.youtube.com/watch?v=Q37IJ2ulyq4>

2. Kasus Pencemaran Udara di Indonesia

a. Kabut Asap Akibat Kebakaran Hutan (1997, 2015, 2019)

- Faktor penyebab:
 - Pembakaran lahan gambut untuk pembukaan perkebunan kelapa sawit.
 - Kekeringan akibat fenomena El Nino memperburuk kondisi.
- Dampak:
 - Pada 2015, banyak penduduk terdampak dengan ribuan kasus ISPA (KLHK, 2020).
 - Gangguan transportasi udara (penutupan bandara).
 - Kerugian ekonomi diperkirakan mencapai Rp 220 triliun (*World Bank*, 2016).
- Kebijakan pengendalian:
 - Penerapan moratorium izin pembukaan lahan gambut.
 - Penegakan hukum terhadap perusahaan pembakar lahan.





- Program restorasi gambut oleh BRG (Badan Restorasi Gambut).

b. Pencemaran Udara Perkotaan (Jakarta, Surabaya, Bandung)

- Faktor penyebab:
 - Emisi kendaraan bermotor sebagai sumber utama (lebih dari 70%).
 - Industri dan pembangkit listrik berbahan bakar fosil.
- Dampak:
 - Berdasarkan IQAir pada tahun 2022, Jakarta termasuk salah satu kota dengan kualitas udara terburuk di dunia.
 - Peningkatan risiko penyakit jantung, stroke, dan ISPA.
- Kebijakan pengendalian:
 - Uji emisi kendaraan bermotor wajib (Peraturan Gubernur DKI Jakarta No. 66 Tahun 2020).
 - Pengembangan transportasi massal (MRT, LRT, TransJakarta).
 - Perluasan ruang terbuka hijau.





MATERI 7





Konsep Dasar Perubahan Iklim

Perubahan iklim adalah perubahan signifikan pada pola iklim global dalam jangka panjang, yang ditandai dengan peningkatan suhu rata-rata bumi, perubahan pola curah hujan, serta meningkatnya frekuensi kejadian cuaca ekstrem. Perubahan iklim saat ini banyak dipengaruhi oleh aktivitas manusia, khususnya melalui peningkatan emisi gas rumah kaca (GRK).

1. Mekanisme Efek Rumah Kaca

Efek rumah kaca alami adalah proses ketika gas-gas tertentu di atmosfer (misalnya CO₂, CH₄, N₂O, uap air) menyerap dan memantulkan kembali radiasi inframerah sehingga menjaga suhu bumi tetap hangat dan layak huni. Efek rumah kaca tambahan terjadi akibat peningkatan konsentrasi GRK dari aktivitas manusia (pembakaran bahan bakar fosil, deforestasi, pertanian, industri), yang menyebabkan suhu bumi meningkat lebih tinggi dari kondisi alami. Konsekuensinya adalah pemanasan global, yang menjadi pemicu utama perubahan iklim.

Siklus Karbon dan Keterkaitannya dengan Emisi GRK

Siklus karbon alami melibatkan pertukaran karbon antara atmosfer, biosfer, hidrosfer, dan geosfer. Misalnya, tanaman menyerap CO₂ untuk fotosintesis, sementara respirasi dan pelapukan batuan mengembalikannya ke atmosfer. Aktivitas manusia dapat mengganggu keseimbangan siklus ini. Seperti pembakaran bahan bakar fosil yang menyebabkan meningkatkan CO₂. Deforestasi akan mengurangi kemampuan penyerapan karbon oleh hutan. Pertanian dan peternakan akan menghasilkan metana (CH₄) dan dinitrogen oksida (N₂O). Akibatnya, konsentrasi GRK di atmosfer meningkat jauh di atas kondisi pra-industri.

Bukti Ilmiah Perubahan Iklim Global

1. Peningkatan suhu rata-rata global

Data (NASA, 2022) menunjukkan suhu rata-rata global meningkat sekitar 1,1°C sejak 1880.

2. Pencairan es di kutub dan gletser

Laporan IPCC (2021) menunjukkan berkurangnya volume es laut Arktik sebesar >40% sejak 1979.

3. Kenaikan muka air laut





Permukaan laut global naik rata-rata 3,7 mm per tahun akibat pencairan es dan pemuaian termal laut.

4. Perubahan pola curah hujan dan cuaca ekstrem
Fenomena hujan ekstrem, gelombang panas, dan badai tropis semakin sering terjadi.
5. Konsentrasi GRK meningkat drastic
 CO_2 atmosfer meningkat dari 280 ppm (pra-industri) menjadi >415 ppm pada 2020 (NOAA, 2020).

2. Dampak Perubahan Iklim

Perubahan iklim merupakan fenomena global yang ditandai dengan peningkatan suhu rata-rata bumi, perubahan pola curah hujan, serta meningkatnya kejadian cuaca ekstrem. Dampak perubahan iklim bersifat multidimensional, mencakup sektor lingkungan, kesehatan, sosial, dan ekonomi. Selain itu, perubahan iklim memiliki keterkaitan erat dengan kualitas udara.

a. Dampak terhadap Lingkungan

Perubahan iklim memengaruhi keseimbangan ekosistem dan fungsi lingkungan.

- Perubahan pola curah hujan dapat menyebabkan banjir di satu wilayah dan kekeringan di wilayah lain.
- Kenaikan muka air laut mengancam ekosistem pesisir dan pulau-pulau kecil.
- Kepunahan spesies terjadi karena perubahan suhu dan habitat yang tidak lagi sesuai.
- Menurut IPCC (2021), sekitar 20–30% spesies global berisiko punah jika suhu bumi meningkat lebih dari 2–3 °C.

b. Dampak terhadap Kesehatan

Perubahan iklim berimplikasi langsung maupun tidak langsung terhadap kesehatan manusia.

- Peningkatan penyakit pernapasan akibat kualitas udara yang menurun, terutama karena kombinasi emisi polutan dengan suhu tinggi yang mempercepat pembentukan ozon troposferik.
- Penyakit menular seperti malaria, demam berdarah, dan diare berpotensi meningkat karena perubahan iklim memengaruhi distribusi vektor dan kualitas air.





- *Heat stress* semakin sering dialami populasi rentan di wilayah perkotaan.

c. Dampak terhadap Sosial

- Migrasi iklim : komunitas yang tinggal di pesisir, delta, atau pulau kecil terpaksa pindah karena kenaikan muka air laut.
- Konflik sumber daya: perebutan air, pangan, dan energi berpotensi meningkat akibat ketersediaan yang menurun.
- Kerentanan masyarakat miskin lebih tinggi karena keterbatasan akses terhadap adaptasi dan perlindungan sosial.

d. Dampak terhadap Ekonomi

- Kerugian ekonomi akibat bencana iklim (banjir, badai, kekeringan) yang merusak infrastruktur dan pertanian.
- Produktivitas pertanian menurun akibat pergeseran musim tanam dan meningkatnya serangan hama.
- Biaya kesehatan meningkat karena penyakit terkait iklim dan polusi udara.
- Diperkirakan bahwa perubahan iklim dapat menurunkan PDB global jika tidak ada langkah mitigasi.

Keterkaitan Perubahan Iklim dengan Kualitas Udara

Perubahan iklim dan kualitas udara memiliki hubungan dua arah:

- Perubahan iklim memengaruhi kualitas udara: suhu yang lebih tinggi meningkatkan pembentukan ozon troposferik, kekeringan memicu kebakaran hutan, dan perubahan pola angin memengaruhi dispersi polutan.
- Kualitas udara memperburuk perubahan iklim: emisi gas rumah kaca (CO_2 , CH_4 , N_2O) dan polutan jangka pendek seperti *black carbon* dan ozon berkontribusi pada pemanasan global.

Dengan demikian, kebijakan pengendalian kualitas udara (*air quality management*) juga dapat memberikan manfaat ganda dalam mitigasi perubahan iklim.

3. Adaptasi dan Mitigasi Perubahan Iklim

Perubahan iklim merupakan tantangan global yang berdampak luas pada lingkungan, kesehatan, sosial, dan ekonomi. Untuk





menghadapinya, terdapat dua pendekatan utama yaitu adaptasi dan mitigasi. Keduanya memiliki tujuan berbeda, tetapi saling melengkapi dalam upaya mengurangi risiko perubahan iklim.

A. Adaptasi Perubahan Iklim

Adaptasi adalah langkah penyesuaian diri terhadap dampak perubahan iklim yang sudah atau diperkirakan akan terjadi. Tujuannya adalah mengurangi kerentanan dan meningkatkan ketahanan masyarakat serta ekosistem. Beberapa contoh adaptasi perubahan iklim diantaranya adalah:

- Di sektor lingkungan, rehabilitasi hutan mangrove dapat melindungi wilayah pesisir dari abrasi dan kenaikan muka laut.
- Di sektor kesehatan, sistem peringatan dini gelombang panas membantu masyarakat mengantisipasi risiko penyakit akibat suhu ekstrem.
- Di sektor pertanian, petani dapat menggunakan varietas padi tahan kekeringan untuk menjaga produktivitas.

Adaptasi umumnya bersifat lokal, karena setiap daerah menghadapi tantangan iklim yang berbeda.

B. Mitigasi Perubahan Iklim

Mitigasi adalah upaya mengurangi sumber emisi gas rumah kaca atau meningkatkan penyerapannya. Strategi mitigasi bersifat lebih luas karena bertujuan memperlambat laju perubahan iklim secara global. Beberapa contoh mitigasi diantaranya:

- Mengurangi ketergantungan pada batubara dengan mengganti ke energi terbarukan seperti tenaga surya atau angin.
- Meningkatkan efisiensi energi di sektor industri, transportasi, dan rumah tangga.
- Melakukan penghijauan kembali (reforestasi) untuk meningkatkan penyerapan karbon di atmosfer.
- Mengelola limbah dengan prinsip 3R (*Reduce, Reuse, Recycle*) dan pemanfaatan gas metana dari TPA.

Mitigasi melalui Pengendalian Pencemaran Udara

Upaya mitigasi seringkali memberikan manfaat ganda (*co-benefits*), yaitu menurunkan emisi gas rumah kaca sekaligus





memperbaiki kualitas udara. Beberapa strategi yang relevan antara lain:

- Pengembangan transportasi ramah lingkungan seperti bus listrik atau kereta cepat untuk mengurangi emisi kendaraan bermotor.
- Penerapan teknologi industri bersih, misalnya *scrubber* atau filter partikulat, untuk mengurangi polusi sekaligus emisi karbon.
- Peralihan pembangkit listrik dari batubara ke gas alam atau energi terbarukan.
- Pemakaian kompor gas atau biogas di rumah tangga sebagai pengganti kayu bakar yang menghasilkan asap pekat.
- Praktik pertanian berkelanjutan, termasuk pengurangan pembakaran lahan dan pengelolaan pupuk untuk menekan emisi N₂O.

Keterkaitan Adaptasi dan Mitigasi

Adaptasi dan mitigasi bukanlah pilihan yang berdiri sendiri, tetapi strategi yang saling mendukung. Misalnya, penggunaan transportasi publik ramah lingkungan (mitigasi) dapat menurunkan polusi udara, yang pada saat sama juga melindungi kesehatan masyarakat dari penyakit pernapasan (adaptasi).

Mekanisme Efek Rumah Kaca:

<https://www.youtube.com/watch?v=yqtbz8ANW8w>





MATERI 8





Kebijakan, Regulasi, dan Instrumen Pengendalian

Pengendalian pencemaran udara dan perubahan iklim tidak hanya membutuhkan pemahaman teknis, tetapi juga dukungan kebijakan dan regulasi. Tanpa aturan yang jelas, upaya teknis tidak akan berjalan efektif. Oleh karena itu, diperlukan kerangka hukum, perjanjian internasional, serta instrumen ekonomi dan teknologi untuk mengatur dan mengarahkan tindakan pengendalian.

1. Kebijakan dan Regulasi Internasional

Pada tingkat global, kerja sama antarnegara menjadi kunci karena pencemaran udara dan perubahan iklim tidak mengenal batas negara.

- Paris Agreement (2015) merupakan perjanjian internasional di bawah *United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)*. Tujuannya membatasi kenaikan suhu global di bawah 2 °C, bahkan berusaha menekan hingga 1,5 °C dibandingkan masa pra-industri. Setiap negara berkomitmen melalui *Nationally Determined Contributions (NDC)*, yaitu target pengurangan emisi yang disesuaikan dengan kapasitas masing-masing negara.
- Protokol Montreal (1987) berfokus pada penghapusan bahan perusak ozon seperti CFC, yang juga berdampak pada iklim.
- Agenda *Sustainable Development Goals (SDGs)* terutama pada tujuan ke-13 (*Climate Action*) yang menekankan aksi nyata untuk melawan perubahan iklim.

2. Kebijakan dan Regulasi Nasional (Indonesia)

Indonesia telah memiliki sejumlah regulasi untuk mengendalikan pencemaran udara dan perubahan iklim.

- PP No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup yang mengatur baku mutu udara ambien, emisi dari sumber bergerak maupun stasioner, serta perizinan lingkungan.
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 8 Tahun 2023 tentang Penerapan Baku Mutu Emisi Kendaraan Bermotor Kategori M, Kategori N, Kategori O, dan Kategori L
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.19/Menlhk/Setjen/Kum.1/2/2017





Tentang Baku Mutu Emisi Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Industri Semen

- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 11 Tahun 2021 Tentang Baku Mutu Emisi Mesin dengan Pembakaran Dalam
- UU No. 16 Tahun 2016 ratifikasi *Paris Agreement*, yang menegaskan komitmen Indonesia dalam menurunkan emisi gas rumah kaca sebesar 31,89% (dengan usaha sendiri) dan hingga 43,20% (dengan dukungan internasional) pada 2030.
- Strategi Jangka Panjang Rendah Karbon dan Ketahanan Iklim 2050 (LTS-LCCR) merupakan peta jalan transisi menuju pembangunan rendah karbon.

3. Instrumen Pengendalian

Untuk mengimplementasikan kebijakan, digunakan berbagai instrumen yang dapat dikelompokkan menjadi tiga:

a. Instrumen Hukum (Regulatif/Command and Control)

Instrumen ini berupa aturan yang bersifat wajib, misalnya:

- Penetapan baku mutu udara ambien nasional.
- Standar emisi untuk kendaraan bermotor dan industri.
- Sanksi administratif atau pidana bagi pelanggar.

b. Instrumen Ekonomi

Instrumen ini memberikan insentif atau disinsentif ekonomi agar masyarakat dan industri terdorong melakukan pengendalian, misalnya:

- Pajak karbon (*carbon tax*) untuk mendorong pengurangan emisi.
- Skema perdagangan karbon (*carbon trading*) di sektor energi dan industri.
- Subsidi atau insentif bagi energi terbarukan, kendaraan listrik, atau teknologi ramah lingkungan.

c. Instrumen Teknologi

Instrumen ini berupa penerapan inovasi teknis untuk mengurangi pencemaran, misalnya:

- Pemasangan *electrostatic precipitator* atau *scrubber* pada cerobong industri.





- Penggunaan teknologi bahan bakar bersih dan efisiensi energi.
- Sistem monitoring kualitas udara berbasis sensor dan satelit untuk pemantauan emisi secara real time.

Evaluasi Efektivitas Instrumen

- Instrumen hukum efektif jika ada penegakan yang konsisten, namun sering terkendala lemahnya pengawasan.
- Instrumen ekonomi mampu mendorong perubahan perilaku, tetapi membutuhkan regulasi pendukung agar tidak menambah beban masyarakat miskin.
- Instrumen teknologi penting untuk solusi jangka panjang, tetapi membutuhkan investasi yang besar serta kesiapan sumber daya manusia.

Dengan demikian, keberhasilan pengendalian pencemaran udara dan perubahan iklim sangat bergantung pada kombinasi ketiga instrumen tersebut, serta dukungan politik, kelembagaan, dan partisipasi masyarakat.





MATERI 9





Teknologi Pengendalian Pencemaran Udara

Teknologi pengendalian pencemaran udara dirancang untuk mengurangi atau menghilangkan zat pencemar sebelum dilepaskan ke atmosfer. Pemilihan teknologi yang tepat sangat bergantung pada jenis polutan (partikulat atau gas) dan karakteristik emisi (konsentrasi, suhu, kelembaban, serta sifat kimia).

1. Pengendalian Partikulat

Partikulat adalah bahan padat atau cair yang tersuspensi di udara (debu, asap, jelaga). Teknologi pengendaliannya meliputi:

- Filtrasi (*Baghouse Filter/Fabric Filter*)**

Penggunaan filtrasi (*Baghouse Filter/Fabric Filter*) banyak diaplikasikan pada industri semen, logam, dan pembangkit listrik. Hal ini karena efisiensinya yang tinggi mencapai >99% untuk partikel halus. Namun *Baghouse Filter* butuh perawatan berkala dan tidak cocok untuk gas bersuhu sangat tinggi. Filter kain, yang kadang disebut *baghouse*, menggunakan prinsip filtrasi kain untuk menghilangkan partikel dari aliran gas tercemar dengan cara menahan partikel pada material kain. Kemampuan filter ini dalam menangkap partikel berukuran mikrometer kecil hingga sub-mikrometer bukan terutama berasal dari kain itu sendiri, melainkan dari lapisan debu (*dust cake*) yang menumpuk di permukaan kain. Filter biasanya berbentuk kantong kain silindris, sehingga dikenal dengan istilah *fabric filter* atau *baghouse*. Namun, filter ini juga dapat berbentuk kartrid yang dibuat dari kain, logam sinter, atau keramik berpori. Secara umum, filter kain mampu mencapai efisiensi penangkapan lebih dari 99 persen.



Gambar 2 *Baghouse Filter*



Jenis-jenis Filter Kain

Terdapat tiga jenis utama filter kain, yang dibedakan berdasarkan metode pembersihan material filternya. Seiring penumpukan debu pada permukaan filter, tekanan diferensial (*pressure drop*) meningkat. Agar tekanan tidak terlalu tinggi, filter harus dibersihkan secara berkala. Metode pembersihan yang paling umum adalah:

a. *Shaker Fabric Filter* (Pengguncangan)

Pada tipe ini, kantong dibersihkan dengan diguncang secara perlahan. Kolektor shaker memiliki *tube sheet* yang memisahkan antara dinding vertikal dan hopper. Bagian bawah kantong silindris menempel pada lubang *tube sheet*, sedangkan bagian atas yang tertutup terhubung dengan mekanisme pengguncang di bagian atas casing. Gas tercemar masuk ke *hopper*, mengalir melalui lubang *tube sheet* ke dalam kantong vertikal. Karena bagian atas kantong tertutup, aliran gas melewati kain dan meninggalkan lapisan debu di bagian dalam kantong. Secara berkala, aliran gas dihentikan dan kantong diguncang sehingga lapisan debu terlepas dan jatuh ke hopper untuk kemudian dikeluarkan dari kolektor.

b. *Reverse Air Fabric Filter* (Aliran Balik Udara)

Prinsipnya mirip dengan tipe *shaker*. Kolektor *reverse air* memiliki *tube sheet* yang memisahkan casing dengan hopper. Bagian bawah kantong terpasang pada lubang *tube sheet*, sedangkan bagian atas terhubung dengan struktur penyangga di atas casing sehingga kantong tetap tegang. Gas tercemar masuk ke *hopper*, lalu mengalir ke dalam kantong dan melewati kain, sehingga debu menumpuk di bagian dalam. Untuk membersihkan, aliran gas dihentikan, kemudian dialirkan gas bersih ke arah berlawanan. Gas balik ini biasanya diambil dari aliran gas bersih yang keluar dari kompartemen lain. Agar kantong tidak sepenuhnya kolaps, cincin kaku dijahit sepanjang kantong. Debu yang terlepas akibat aliran balik jatuh ke hopper dan dikeluarkan.





c. Reverse Pulse atau Pulse Jet (Semburan Udara Bertekanan)

Pada tipe ini, pembersihan dilakukan dengan semburan singkat udara bertekanan. Kolektor memiliki *tube sheet* di bagian atas casing vertikal, tempat kantong digantung. Di dalam setiap kantong terdapat rangka kawat untuk mencegah kantong kolaps. Gas tercemar masuk melalui sisi atau hopper kolektor, lalu mengalir ke dalam kantong dan melewati kain, sehingga debu menumpuk di bagian luar kantong. Pembersihan dilakukan dengan mengarahkan semburan udara bertekanan singkat pada satu atau beberapa baris kantong, sementara kantong lain tetap beroperasi. Dengan demikian, kolektor tidak perlu dihentikan saat proses pembersihan berlangsung. Debu yang terlepas jatuh ke hopper dan dikeluarkan.

Faktor yang Mempengaruhi Kinerja Filter Kain

Kinerja filter kain dipengaruhi oleh kondisi operasi serta frekuensi pembersihan. Beberapa faktor penting adalah:

- ✓ Suhu minimum operasi: sangat penting bila terdapat gas asam dalam aliran. Suhu rendah dapat menyebabkan gas asam mengembun dan mengakibatkan korosi pada casing serta bagian logam lain.
- ✓ Kondensasi: dapat menyebabkan *bag blinding*, yaitu tersumbatnya aliran udara pada kantong.
- ✓ Suhu tinggi: dapat merusak material kain.

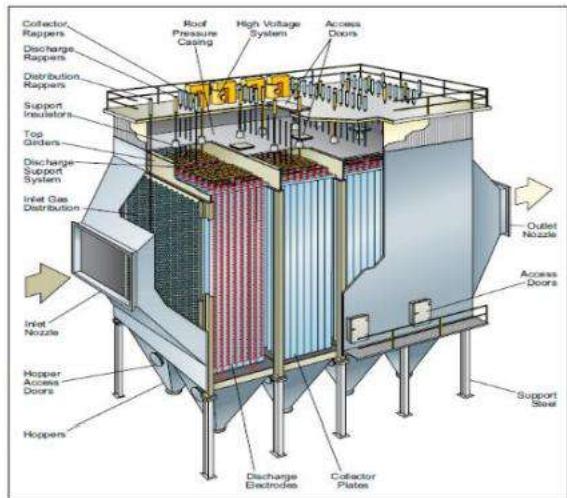
• Electrostatic Precipitator (ESP)

Electrostatic precipitator (ESP) adalah teknologi penangkap abu atau debu atau partikel padat dengan memanfaatkan prinsip elektrostatis. Prinsip dasar dari sistem *Elektrostatic Precipitator* (ESP) adalah menangkap atau menahan partikel-partikel padat, abu, dan debu yang dihasilkan dari proses pembakaran. Hal ini dicapai dengan memberikan arus listrik searah (DC) dan tegangan yang tinggi pada kawat elektroda yang bermuatan negatif. Proses ini menyebabkan abu atau debu atau partikel padat bermuatan negatif. Partikel padat yang bermuatan negatif akan terikat oleh plat-plat yang bermuatan positif sehingga gas yang keluar ke atmosfer dari cerobong asap bersih (Rofandi & Irwanto, 2022). ESP sangat



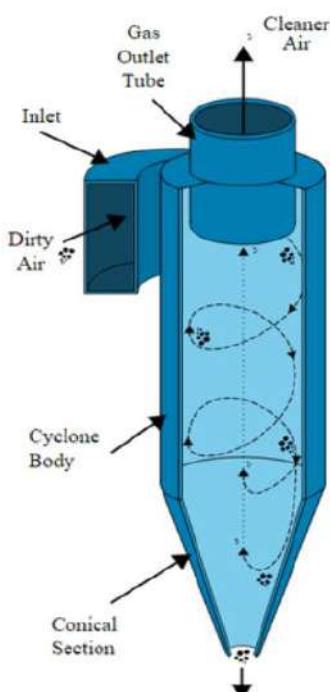


efektif sebagai pengandali partikulat yang berukuran ≤ 10 mikron. Pada prinsipnya partikel bermuatan listrik dialirkan melalui medan listrik sehingga menempel pada elektroda. Aplikasi penggunaannya biasanya digunakan pada PLTU batubara, industri baja, pabrik pulp dan kertas. ESP memiliki kelebihan yaitu memiliki efisiensi yang tinggi untuk debu halus ($PM_{2.5}$). Namun investasinya mahal dan memerlukan listrik tambahan. Efektifitas ESP dapat menurun bila gas buang memiliki kelembapan atau kandungan resin yang tinggi.



Gambar 3 *ESP* (Rofandi & Irwanto, 2022)

- **Cyclone Separator**



Gambar 4 *Cyclon*

Cyclone separator adalah alat yang menggunakan prinsip gaya sentrifugal dan tekanan rendah karena adanya perputaran untuk memisahkan materi berdasarkan perbedaan massa jenis dan ukuran. Biasanya digunakan pada industri kayu, semen, pengolahan bijih atau industri metalurgi dan boiler kecil. *Cyclone separator* ini juga biasanya digunakan sebagai *pre-cleaner* sebelum unit pengendalian lain seperti *bag filter* atau *electrostatic precipitator* (ESP). Kelebihannya yakni memiliki konstruksi yang sederhana sehingga biayanya juga relative murah, tahan terhadap suhu tinggi dan tekanan besar. Namun



kurang efektif untuk partikel sangat halus ($<5 \mu\text{m}$). Efisiensi *cyclone separator* dapat menurun jika laju aliran gas tidak stabil dan membutuhkan ruang yang cukup besar dalam instalasinya. Menurut Cooper & Alley (2010), *cyclone separator* merupakan alat pengendalian pencemar partikulat yang sederhana, relatif murah, dan efektif untuk partikel kasar berukuran menengah hingga besar ($>10 \mu\text{m}$).

Prinsip Kerja

- ✓ Gas yang mengandung partikel masuk ke dalam *cyclone* secara tangensial.
- ✓ Aliran gas berputar di dalam tabung silinder berbentuk kerucut, menimbulkan gaya sentrifugal.
- ✓ Partikel dengan massa lebih besar ter dorong ke dinding *cyclone*, jatuh ke bagian bawah (*hopper*) karena gravitasi.
- ✓ Gas yang relatif bersih keluar melalui pipa di bagian atas.

2. Pengendalian Gas Pencemar

Gas pencemar udara yang umum dihasilkan dari aktivitas industri, transportasi, dan pembakaran meliputi SO₂, NOx, CO, dan VOC. Gas-gas ini memiliki dampak signifikan terhadap kesehatan manusia, ekosistem, serta berkontribusi pada perubahan iklim dan hujan asam. Oleh karena itu, diperlukan teknologi pengendalian yang efektif, diantaranya adalah:

• Absorpsi (*Scrubber Basah*)

Absorpsi atau *wet scrubbing* adalah metode pengendalian pencemaran udara dengan cara melarutkan gas pencemar ke dalam cairan penyerap. Proses ini memanfaatkan kontak langsung antara gas buang dan cairan sehingga polutan gas berpindah fase dari udara ke cairan. *Scrubber* basah atau *wet scrubbing* banyak digunakan untuk mengendalikan gas asam seperti SO₂, HCl, HF, maupun debu kasar dalam aliran gas. Pengendalian gas SO₂ biasanya diaplikasikan pada PLTU batubara dengan *limestone scrubber* (larutan CaCO₃/Ca(OH)₂). Pada industri kimia biasanya juga digunakan untuk menangkap gas HCl atau NH₃. Pada pabrik baja digunakan untuk mengurangi emisi debu dan gas asam



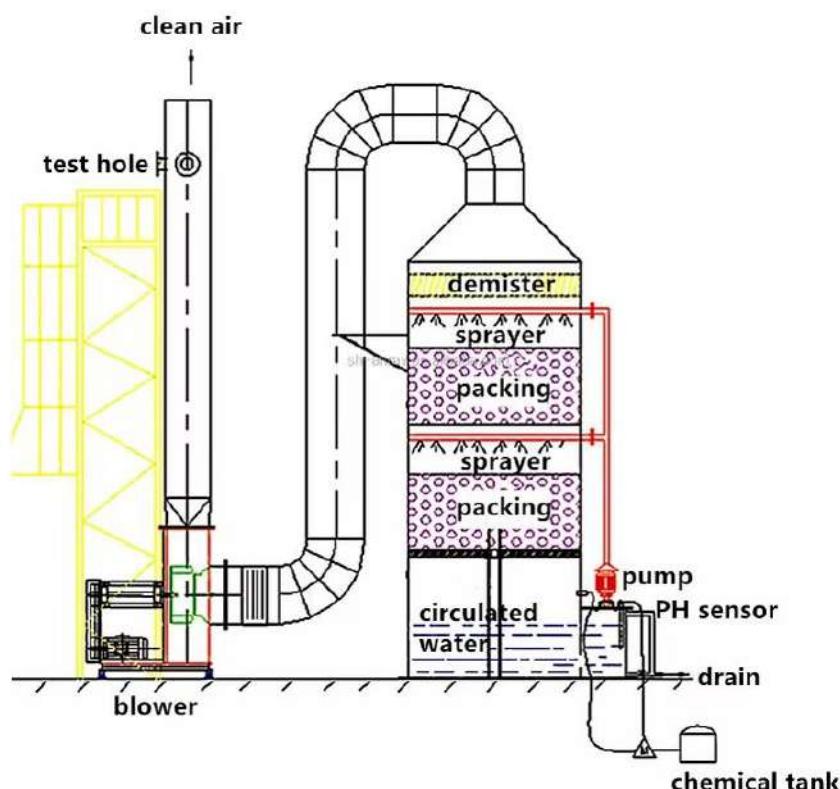


dari proses peleburan. Kelebihan dari prinsip ini adalah efektif untuk gas yang larut pada air, dapat menangani gas bersuhu tinggi, dan cocok untuk alat pengendalian berbagai industri. Efisiensi akan berkurang untuk gas yang sulit larut dan biaya operasi cukup tinggi karena penggunaan pompa dan sirkulasi cairan. Proses ini akan menghasilkan limbah cair yang harus diolah.

Prinsip Kerja

Umumnya prinsip kerjanya adalah gas pencemar larut dalam cairan penyerap (misalnya air atau larutan alkali).

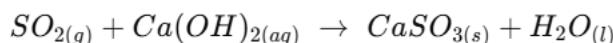
- Gas buang dialirkan melalui menara penyerap (*absorber column*) yang diisi dengan cairan penyerap.
- Gas pencemar larut atau bereaksi dengan cairan tersebut.
- Gas yang telah bersih dilepaskan ke atmosfer, sementara cairan yang mengandung polutan dikumpulkan untuk diolah lebih lanjut.



Gambar 5 Wet scrubber



Contoh reaksi kimia pada pengendalian SO₂:



3. Jenis-jenis Scrubber Basah

- **Packed Tower Scrubber**

- Menggunakan media pengisi (*packing*) untuk memperluas permukaan kontak gas-cair.
- Efektif untuk gas yang mudah larut dalam cairan.

- **Spray Tower Scrubber**

- Cairan disemprotkan ke dalam gas buang.
- Lebih sederhana, namun efisiensi lebih rendah dibanding packed tower.

- **Venturi Scrubber**

- Gas dipercepat melalui leher sempit (*venturi*), lalu bercampur dengan cairan.
- Efektif untuk menangkap partikel halus sekaligus gas.

- **Adsorpsi**

Adsorpsi adalah salah satu metode pengendalian pencemaran udara yang bekerja dengan cara menangkap molekul polutan gas atau uap di permukaan padatan berpori (adsorben). Proses ini terjadi karena adanya gaya tarik-menarik antara molekul polutan dengan permukaan adsorben. Metode adsorpsi sangat efektif untuk mengendalikan gas pencemar dalam konsentrasi rendah hingga sedang, khususnya senyawa organik volatil (VOC), uap pelarut, bau, serta beberapa gas beracun seperti hidrogen sulfida (H₂S), merkuri (Hg), dan amonia (NH₃). Hal ini cocok diaplikasikan untuk pengendalian di industri cat, pelarut, atau kimia. Pada industri petrokimia, adsorpsi biasanya digunakan untuk menyerap uap hidrokarbon. Selain itu kerap digunakan untuk menangkap emisi merkuri pada pembangkit listrik batubara. Aplikasi pada pengolahan limbah padat dan cair dapat digunakan untuk mengurangi bau dan gas berbahaya. Kelebihan adsorpsi adalah memiliki efisiensi tinggi untuk polutan organik, bahkan untuk polutan dalam konsentrasi rendah. Adsorpsi dapat diaplikasikan pada polutan yang sulit dikendalikan dengan metode lain.





Beberapa adsorben bisa diregenerasi, sehingga lebih ekonomis. Adsorpsi tidak cocok digunakan untuk gas bersuhu tinggi atau kelembaban berlebih karena dapat merusak adsorben. Efektivitasnya akan menurun jika konsentrasi polutan sangat tinggi. Adsorpsi Membutuhkan biaya tambahan untuk regenerasi atau penggantian adsorben.

Material yang umum digunakan sebagai adsorben antara lain:

- Karbon aktif : paling banyak digunakan karena memiliki luas permukaan sangat besar dan efektif menyerap VOC serta bau.
- Zeolit : dapat menyerap molekul gas tertentu secara selektif.
- Silika gel : banyak digunakan untuk menyerap kelembaban, tetapi juga bisa menangkap polutan organik tertentu.

Proses adsorpsi memiliki beberapa tahapan:

1. Gas tercemar dialirkkan ke unit adsorber.
2. Molekul pencemar menempel pada permukaan pori-pori adsorben.
3. Gas yang sudah bersih keluar menuju atmosfer.
4. Bila adsorben jenuh, dilakukan regenerasi (misalnya dengan pemanasan atau aliran gas inert) atau penggantian adsorben baru.

- **Katalitik (*Catalytic Converter*)**

Catalytic Converter adalah perangkat pengendalian pencemaran udara yang digunakan terutama pada kendaraan bermotor atau industri proses. *Catalytic converter* dipasang pada hampir semua kendaraan bermotor modern untuk memenuhi standar emisi gas buang. Alat ini bekerja dengan mempercepat reaksi oksidasi dan reduksi menggunakan katalis logam mulia, sehingga polutan berbahaya diubah menjadi senyawa yang lebih aman. Menurut U.S. EPA (2020). Alat ini sangat efektif dalam menurunkan emisi kendaraan, namun sensitif terhadap





kualitas bahan bakar (misalnya sulfur tinggi dapat merusak katalis).

Prinsip Kerja

Gas berbahaya (CO, NO_x, HC) diubah menjadi senyawa yang lebih aman (CO₂, N₂, H₂O) dengan bantuan katalis (Pt, Pd, Rh). Gas buang dari mesin pembakaran mengandung polutan utama seperti karbon monoksida (CO), hidrokarbon (HC), dan oksida nitrogen (NO_x). Saat melewati *catalytic converter*, terjadi reaksi:

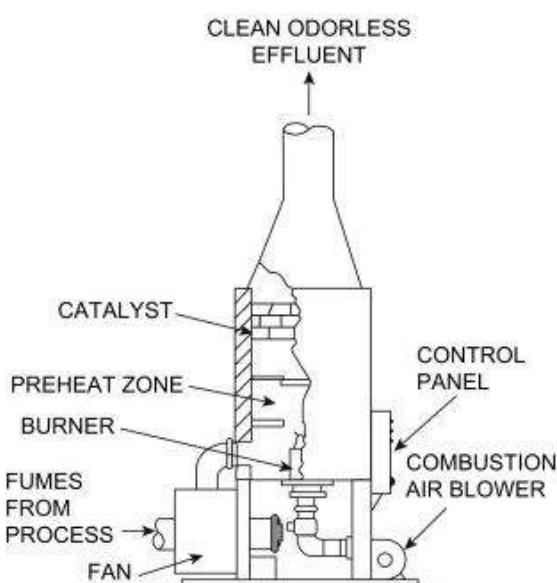
1. Oksidasi CO → CO₂ (Heywood, 2018).
2. Oksidasi HC → CO₂ + H₂O (Cooper & Alley, 2011).
3. Reduksi NO_x → N₂ + O₂ (U.S. EPA, 2020).

Jenis Catalytic Converter

- *Two-way catalytic converter*: hanya mengoksidasi CO dan HC.
- *Three-way catalytic converter*: mengoksidasi CO & HC sekaligus mereduksi NO_x. Heywood (2018) menjelaskan bahwa keberadaan *three-way catalyst* merupakan teknologi kunci dalam menurunkan konsentrasi CO, HC, dan NO_x pada kendaraan berbahan bakar bensin.

• Pembakaran Termal (*Incineration/Flare*)

Pembakaran termal merupakan salah satu metode pengendalian pencemaran udara yang bekerja dengan cara membakar gas buang yang mengandung polutan organik atau senyawa mudah terbakar pada suhu tinggi, sehingga diubah menjadi senyawa yang lebih stabil dan relatif tidak berbahaya. Teknologi ini banyak



Gambar 6 Insenerator



digunakan untuk mengendalikan emisi Volatile Organic Compounds (VOC) di berbagai industri, seperti industri cat, pelarut, farmasi, serta pada pembakaran gas buang (*flare gas*) di sektor petrokimia dan migas. Selain itu, metode ini juga diaplikasikan dalam pengolahan limbah berbahaya, misalnya pada insinerator medis dan limbah B3. Proses pembakaran termal efektif menghancurkan senyawa organik yang mudah terbakar, namun memiliki kelemahan berupa kebutuhan energi yang tinggi, terutama pada sistem *thermal oxidizer*. Jika tidak dikendalikan dengan baik, proses ini juga berpotensi menghasilkan polutan baru, seperti CO₂, yang berkontribusi terhadap peningkatan emisi gas rumah kaca. Oleh karena itu, teknologi ini umumnya diterapkan pada industri berskala besar, tetapi kurang efisien untuk gas buang dengan konsentrasi polutan yang sangat rendah.

Prinsip Kerja

Pada prinsipnya gas pencemar dibakar pada suhu tinggi sehingga terurai menjadi senyawa sederhana

- Gas buang yang mengandung volatile organic compounds (VOC), hidrokarbon, atau gas mudah terbakar lainnya dialirkkan ke ruang pembakaran.
- Di dalam ruang tersebut, gas dipanaskan hingga 760–1.200 °C dengan suplai oksigen yang cukup.
- Reaksi utama adalah oksidasi, misalnya:

$$\text{CxHy} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$$
 Hasil akhirnya berupa karbon dioksida (CO₂), uap air (H₂O), serta energi panas.

Jenis Teknologi

1. ***Direct Flame Incineration (Flare System)***
 - Umum digunakan di industri minyak dan gas.
 - Gas buang dibakar langsung di ujung flare stack.
2. ***Thermal Oxidizer***
 - Menggunakan ruang bakar tertutup dengan kontrol suhu dan waktu tinggal gas.
 - Efisiensi penghancuran VOC bisa mencapai > 98%.





3. **Catalytic Incinerator**

- Menggunakan katalis untuk menurunkan suhu operasi (sekitar 300–500 °C).
- Lebih hemat energi dibanding thermal oxidizer konvensional.

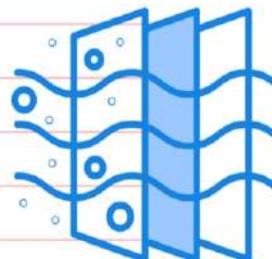

Notes

DATE / /

Teknologi Pengendalian Pencemaran Udara

WET SCRUBBER

<https://www.youtube.com/watch?v=hyFpj9bSw8>



FILTERBAG

<https://www.youtube.com/watch?v=bbXZCzgZh4w>

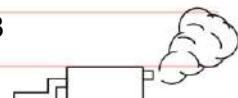


ESP

<https://www.youtube.com/watch?v=0QWMHxZdPQk>

Catalytic Converter

<https://www.youtube.com/watch?v=PG7NI-bAt-8>



Adsorpsi

<https://www.youtube.com/watch?v=CgCGWx5v3EI>



Insenerator

<https://www.youtube.com/shorts/DaO2Z-q33ro>

3. Pemilihan Teknologi

Pemilihan teknologi pengendalian pencemaran udara harus mempertimbangkan berbagai kondisi dan faktor pendukung. Pemilihan teknologi pengendalian pencemaran tidak dapat dilakukan secara sembarangan, melainkan harus mempertimbangkan berbagai aspek agar teknologi yang dipilih benar-benar efektif, efisien, dan sesuai dengan kondisi yang ada. Pertimbangan utama meliputi jenis dan karakteristik pencemar, baik berupa gas, debu,





maupun partikel lain yang dihasilkan dari suatu proses kegiatan. Selain itu, Konsentrasi dan karakteristik polutan yang dikeluarkan juga menentukan ukuran dan spesifikasi teknologi yang diperlukan. Misalnya partikel kasar cocok dikendalikan dengan *cyclone*, partikel halus lebih baik dengan ESP atau filter kain. Kondisi operasi seperti suhu, tekanan, kelembaban, dan kandungan kimia gas buang juga sangat penting diketahui untuk pemilihan teknologi yang tepat.

Faktor ekonomi menjadi pertimbangan penting, karena biaya investasi, operasi, dan pemeliharaan teknologi pengendalian harus sebanding dengan manfaat yang dihasilkan, tanpa menimbulkan beban yang berlebihan bagi industri atau masyarakat. Pertimbangan lain adalah ketersediaan sumber daya, baik dalam bentuk tenaga kerja terampil, material, maupun energi yang dibutuhkan agar teknologi dapat dioperasikan secara berkelanjutan.

Aspek lingkungan dan regulasi juga tidak boleh diabaikan. Teknologi yang dipilih harus memenuhi standar baku mutu lingkungan serta sejalan dengan peraturan yang berlaku. Selain itu, pemilihan teknologi sebaiknya mempertimbangkan dampak lanjutan, misalnya potensi pencemaran sekunder akibat limbah dari teknologi pengendalian itu sendiri. Misalnya limbah cair dari *scrubber* atau residu karbon aktif dari adsorpsi.

Dengan demikian, pemilihan teknologi pengendalian harus dilihat secara holistik, mencakup aspek teknis, ekonomi, lingkungan, dan sosial, sehingga solusi yang diambil dapat benar-benar menjawab permasalahan pencemaran secara berkelanjutan.





Daftar Pustaka

- Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., DeAngelo, B. J., Flanner, M. G., Ghan, S., Kärcher, B., & Koch, D. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(11), 5380–5552.
- Cooper, C. D., & Alley, F. C. (2010). *Air pollution control: A design approach*. Waveland press.
- Field, R. D., Van Der Werf, G. R., & Shen, S. S. P. (2009). Human amplification of drought-induced biomass burning in Indonesia since 1960. *Nature Geoscience*, 2(3), 185–188.
- Finlanson-Pitts, B., & Pitts, J. (2000). *Chemistry of the Upper and lower Atmosphere*. Academic Press, San Diego.
- Heywood, J. (2018). *Internal combustion engine fundamentals*.
- IPPC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Jacobson, M. Z. (2002). *Atmospheric pollution: history, science, and regulation*. Cambridge University Press.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. (2017). *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.19/Menlhk/Setjen/Kum.1/2/2017 tentang Baku Mutu Emisi Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Industri Semen*.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. (2020). Laporan pemantauan kualitas udara nasional 2020. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.



Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. (2020). *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.14/Menlhk/Setjen/Kum.1/7/2020 tentang Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU)*.

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. (2021). *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 11 Tahun 2021 tentang Baku Mutu Emisi Mesin dengan Pembakaran Dalam*.

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. (2023). *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 8 Tahun 2023 tentang Penerapan Baku Mutu Emisi Kendaraan Bermotor Kategori M, Kategori N, Kategori O, dan Kategori L*.

Mukono, H. J. (2008). *Pencemaran udara dan pengaruhnya terhadap gangguan saluran pernapasan*. Airlangga University Press.

NASA. (2022). *2021 continued Earth's warming trend*. NASA Earth Observatory.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2020). *Trends in atmospheric carbon dioxide: Global monthly mean CO₂*. NOAA Earth System Research Laboratories (ESRL).

Pemerintah Provinsi DKI Jakarta. (2020). *Peraturan Gubernur DKI Jakarta Nomor 66 Tahun 2020 tentang Uji Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor*.

Republik Indonesia. (2016). *Undang-Undang Nomor 16 Tahun 2016 tentang Pengesahan Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2016 Nomor 204.

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



Republik Indonesia. (2021). *Strategi Jangka Panjang Rendah Karbon dan Ketahanan Iklim 2050 (LTS-LCCR)*. Pemerintah Republik Indonesia.

Rofandi, M. N., & Irvanto. (2022). Electrostatic Precipitator (ESP) Working System to Capture Ash from Combustion Process at PLTU PT. Dian Swastatica Sentosa Serang Power Plant. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, 6(2), 376–386.

Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. John Wiley & Sons.

Suryana, I. G. P. E. (2022). Analisis Windrose untuk Prediksi Arah & Jangkauan Pencemaran Udara. *Jurnal Sistem Informasi Dan Komputer Terapan Indonesia (JSIKTI)*, 4(3), 132–141.

Tulandi, D. A., Tumangkeng, J. V., & Tumbelaka, F. E. A. (2020). Analisis Data Angin Permukaan Di Bandara Sam Ratulangi Manado Menggunakan Metode Windrose. *JSME (Jurnal Sains, Matematika & Edukasi)*, 8(1), 11–16.

United Nations. (1987). *Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer*. United Nations Environment Programme.

United Nations. (2015). *Paris Agreement*. United Nations Framework Convention on Climate Change. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>

United Nations Environment Programme; World Meteorological Organization. (2011). *Integrated assessment of black carbon and tropospheric ozone*.

U.S. Environmental Protection Agency. (2019). Integrated Science Assessment (ISA) for particulate matter. *Washington, DC: US Environmental Protection Agency*.



- U.S. Environmental Protection Agency. (2020). *Catalytic converters and vehicle emissions control technology*. U.S. Environmental Protection Agency.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2023). *National Emissions Inventory (NEI) Documentation*.
- Wardhana, W. A. (2004). *Dampak Pecemaran Lingkungan*. Yogyakarta. Andi Press.
- World Bank. (2016). *Indonesia forest fires: At least USD 16.1 billion (Rp 221 trillion) in economic losses in 2015 due to fires and haze*.
- World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization.