TRIGONOMETRI
ISSN 3030-8496

Jurnal Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Vol 6 No 2 Tahun 2025
Prefix DOI : 10.8734/trigo.v1i2.365

ANALISIS PROSES FISIKA KIMIA DIATMOSFER YANG MEMPENGARUHI PEMBENTUKAN DAN DISPERSI POLUTAN UDARA

Danu Dwi Arya[1], Dhiah Ayu Agustina[2], Dimas Suriatama[3], Suci Dwi Kartika[4], Rajo Hasim Lubis[5]
Universitas Negeri Medan
Email : danudwiarya.4223121006@mhs.unimed.ac.id[1], dhiah.4221121002@mhs.unimed.ac.id[2], dimas.suriatama@mhs.unimed.ac.id[3], sucidwi.4221121016@mhs.unimed.ac.id[4], rajohasimlbs@unimed.ac.id[5]

ABSTRAK

Polusi udara merupakan tantangan lingkungan global yang berdampak pada kesehatan manusia, ekosistem, dan perubahan iklim. Proses fisika-kimia di atmosfer, seperti reaksi fotokimia, dinamika lapisan atmosfer, dan interaksi aerosol dengan awan, berperan penting dalam pembentukan dan dispersi polutan udara. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis interaksi antara proses fisika dan kimia yang menentukan nasib polutan di atmosfer, mengidentifikasi faktor dominan yang mempengaruhi dispersi polutan, serta menyusun kerangka konseptual untuk memprediksi pola distribusi polutan dalam berbagai skala. Berdasarkan studi literatur, ditemukan bahwa reaksi fotokimia memainkan peran utama dalam pembentukan ozon troposferik, sedangkan aerosol dapat mempengaruhi keseimbangan energi bumi melalui efek pendinginan atau pemanasan. Variabilitas harian dan musiman polutan udara dipengaruhi oleh kondisi atmosfer dan fenomena seperti urban heat island (UHI). Selain itu, kondisi meteorologi ekstrem seperti gelombang panas dapat memperburuk kualitas udara, sementara vegetasi dan permukaan reflektif memiliki dampak signifikan terhadap suhu dan konsentrasi polutan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan lebih dalam tentang mekanisme atmosfer yang mempengaruhi polusi udara serta membantu perancangan kebijakan pengendalian polusi yang lebih efektif.

Article History
Received: March 2025
Reviewed: March 2025
Published: March 2025

Plagirism Checker No 223
DOI : 10.8734/Trigo.v1i2.365
Copyright : Author
Publish by : Trigonometri

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

PENDAHULUAN

Polusi udara merupakan salah satu tantangan lingkungan global yang berdampak serius pada kesehatan manusia, ekosistem, dan perubahan iklim. Proses kimia-fisika di atmosfer, seperti reaksi fotokimia, dinamika lapisan atmosfer, dan interaksi aerosol awan, memainkan peran krusial dalam menentukan pola pembentukan, transformasi, dan dispersi polutan (misalnya, PM2.5, O_3, NO_3, dan SO_2). Pemahaman mendalam tentang mekanisme ini diperlukan untuk merancang kebijakan pengendalian polusi yang efektif. Namun, kompleksitas interaksi antara faktor meteorologi, kimia atmosfer, dan sumber emisi seringkali menghambat prediksi

Jurnal Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Vol 6 No 2 Tahun 2025
Prefix DOI : 10.8734/trigo.v1i2.365

akurat terhadap dinamika polutan.

Perubahan iklim juga dapat mengubah pola sirkulasi atmosfer, yang berpotensi meningkatkan frekuensi dan durasi kondisi udara stagnan di daerah perkotaan. Stagnasi terjadi ketika ada sedikit angin, yang menyebabkan berkurangnya penyebaran polutan udara dan menyebabkannya terakumulasi di daerah lokal. Hal ini dapat mengakibatkan peningkatan konsentrasi polutan seperti PM dan O di permukaan tanah. Dampak perubahan iklim terhadap pola curah hujan dapat menyebabkan perubahan frekuensi dan intensitas kejadian hujan. Peningkatan curah hujan dapat membantu menghilangkan polutan udara melalui pengendapan basah. Sebaliknya, periode kering yang berkepanjangan dapat menyebabkan berkurangnya pembersihan polutan dan meningkatnya konsentrasi polutan udara di wilayah perkotaan. Selain itu, perubahan curah hujan dapat memengaruhi distribusi dan kelimpahan VOC biogenik, yang dapat memengaruhi tingkat polusi udara.

Tujuan Penelitian

1. Menganalisis interaksi proses fisika (misalnya, turbulensi, inversi suhu) dan kimia (reaksi oksidasi, pembentukan partikel sekunder) dalam menentukan nasib polutan di atmosfer.
2. Mengidentifikasi faktor dominan yang mempengaruhi efisiensi dispersi polutan berdasarkan studi literatur terkait dinamika atmosfer.
3. Menyusun kerangka konseptual integratif untuk memprediksi pola distribusi polutan udara dalam skala waktu dan ruang yang berbeda.

Rumusan Masalah

1. Bagaimana proses fisika atmosfer (seperti kecepatan angin, stabilitas lapisan batas atmosfer) mempengaruhi dispersi polutan?
2. Reaksi kimia apa yang dominan dalam pembentukan polutan sekunder (misalnya, sulfat, nitrat) di berbagai kondisi atmosfer?
3. Bagaimana interaksi antara faktor fisika dan kimia menentukan variabilitas temporal dan spasial konsentrasi polutan udara?

DATA HASIL PENGAMATAN

Data hasil pengamatan yang disajikan dalam studi literatur menunjukkan bahwa proses fisika-kimia di atmosfer, seperti reaksi fotokimia, kondensasi, koagulasi, dan deposisi basah/kering, memainkan peran penting dalam pembentukan dan dispersi polutan udara. Beberapa temuan kunci dari data pengamatan adalah:

1. Reaksi Fotokimia dan Pembentukan Ozon:

   Reaksi fotokimia antara NOx (nitrogen oksida) dan senyawa organik volatil (VOCs) di bawah sinar matahari dapat menghasilkan ozon troposferik (O_3), yang merupakan polutan sekunder yang berbahaya. Data dari berbagai studi menunjukkan bahwa konsentrasi ozon sangat dipengaruhi oleh kondisi meteorologi seperti suhu, kelembaban, kecepatan angin, dan intensitas radiasi matahari.

   Contohnya, di kota Atlanta, AS, ditemukan bahwa suhu pada hari-hari dengan konsentrasi ozon tinggi (melebihi batas 120 ppb) rata-rata 3,1°C lebih tinggi daripada hari-hari tanpa kejadian ozon tinggi. Hal ini menunjukkan hubungan langsung antara suhu dan pembentukan ozon.

TRIGONOMETRI
ISSN 3030-8496
Jurnal Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Vol 6 No 2 Tahun 2025
Prefix DOI : 10.8734/trigo.v1i2.365

2. Pengaruh Aerosol dan Radiasi Matahari:

   Aerosol di atmosfer dapat memengaruhi keseimbangan energi di permukaan bumi dengan menghambat radiasi matahari (efek pendinginan) atau menyerap radiasi panjang gelombang panjang (efek pemanasan). Data dari Toulouse, Prancis, menunjukkan bahwa kota tersebut menerima 30 W/m² lebih sedikit radiasi matahari dan 25 W/m² lebih banyak radiasi panjang gelombang panjang dibandingkan daerah pedesaan pada hari-hari yang tercemar.

   Di Delhi, India, pengamatan menunjukkan bahwa lapisan aerosol yang tebal (disebut "Asian Brown Cloud") dapat mengurangi suhu permukaan pada siang hari karena menghalangi radiasi matahari, tetapi meningkatkan suhu pada malam hari karena menahan radiasi panas yang dipancarkan oleh permukaan bumi.

3. Variabilitas Harian dan Musiman:

   Pengamatan di Shanghai, Tiongkok, selama delapan tahun (2000-2008) menunjukkan bahwa ketebalan optis aerosol (AOT) di daerah urban lebih tinggi daripada di daerah pedesaan, baik pada skala bulanan maupun harian. AOT meningkat dari Januari hingga Juni, kemudian turun drastis saat musim hujan tiba. Hal ini menunjukkan bahwa curah hujan memiliki efek pembersihan pada aerosol di atmosfer.

   Di Berlin, Jerman, pengamatan menunjukkan bahwa suhu udara dan konsentrasi polutan (seperti PM10) memiliki korelasi negatif, di mana suhu yang lebih tinggi meningkatkan turbulensi dan dispersi polutan, sehingga mengurangi konsentrasi polutan di dekat permukaan.

4. Pengaruh Urban Heat Island (UHI) dan Urban Pollution Island (UPI):

   Studi di berbagai kota seperti Paris, Athena, dan Tokyo menunjukkan bahwa UHI (pulau panas perkotaan) dapat memperburuk kualitas udara dengan meningkatkan suhu dan mempercepat reaksi kimia di atmosfer. UHI juga dapat memengaruhi pola angin lokal, yang pada gilirannya memengaruhi dispersi polutan.

   Di Tokyo, misalnya, angin laut yang bertemu dengan UHI menciptakan zona konvergensi yang memerangkap polutan di atas kota, terutama pada musim dingin. Hal ini menyebabkan peningkatan konsentrasi ozon dan partikulat (PM).

5. Pengaruh Kondisi Meteorologi Ekstrem:

   Data dari Athena, Yunani, menunjukkan bahwa selama gelombang panas, konsentrasi PM10 meningkat hingga 25-38%, sementara konsentrasi NO_2 meningkat 14-29%. Ozon juga meningkat, meskipun dengan persentase yang lebih kecil (12%). Ini menunjukkan bahwa kondisi meteorologi ekstrem, seperti gelombang panas, dapat memperburuk kualitas udara dengan meningkatkan konsentrasi polutan.

6. Pengaruh Vegetasi dan Permukaan Reflektif:

   Studi di Bangalore, India, menunjukkan bahwa pohon jalanan dapat mengurangi suhu udara hingga 5,6°C dan suhu permukaan jalan hingga 27,5°C. Selain itu, vegetasi juga mengurangi konsentrasi SO_2 hingga 65% dan menjaga konsentrasi partikulat (PM) dalam batas yang aman.

   Di sisi lain, penggunaan material reflektif (seperti atap dan permukaan jalan yang reflektif) dapat mengurangi suhu permukaan, tetapi juga dapat meningkatkan produksi ozon karena peningkatan radiasi UV yang dipantulkan.

TRIGONOMETRI
ISSN 3030-8496
Jurnal Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Vol 6 No 2 Tahun 2025
Prefix DOI : 10.8734/trigo.v1i2.365

Proses Fisika dalam Pembentukan dan Dispersi Polutan Udara

1. Transpor dan Dispersi Polutan

   Polutan di atmosfer mengalami pergerakan dan penyebaran melalui beberapa mekanisme utama, yaitu:

   - Adveksi: Perpindahan polutan secara horizontal akibat pergerakan massa udara yang dikendalikan oleh kecepatan dan arah angin (Jacob, 1999). Adveksi sangat menentukan seberapa jauh polutan dapat menyebar dari sumber emisinya.
   - Difusi Molekuler: Proses pergerakan partikel dari daerah berkonsentrasi tinggi ke daerah berkonsentrasi rendah akibat tumbukan molekuler (Seinfeld & Pandis, 2016). Difusi ini berperan dalam skala mikroskopik tetapi tidak dominan dalam skala atmosfer.
   - Turbulensi Atmosfer: Arus udara yang tidak beraturan mencampurkan polutan ke berbagai lapisan atmosfer. Turbulensi yang tinggi meningkatkan pencampuran polutan dan mengurangi konsentrasi lokalnya (Arya, 1999).
   - Konveksi: Pergerakan vertikal massa udara akibat perbedaan suhu, di mana udara panas naik dan udara dingin turun, membawa serta polutan ke lapisan atmosfer yang lebih tinggi (Stull, 1988).

2. Deposisi Polutan

   Polutan di atmosfer akhirnya mengalami deposisi, baik secara kering maupun basah:

   - Deposisi Kering: Proses di mana polutan menempel langsung pada permukaan tanah, air, atau vegetasi tanpa bantuan hujan. Efisiensi deposisi kering bergantung pada ukuran partikel dan sifat kimia polutan (Seinfeld & Pandis, 2016).
   - Deposisi Basah (Wet Deposition): Polutan terlarut dalam tetesan air hujan dan terbawa turun ke permukaan bumi. Proses ini berperan dalam membersihkan atmosfer dari gas-gas asam seperti SO_2 dan NOx yang membentuk hujan asam (Jacob, 1999).

3. Inversi Termal

   Inversi termal terjadi ketika lapisan udara hangat berada di atas lapisan udara dingin, menyebabkan polutan terperangkap di dekat permukaan bumi. Fenomena ini sering terjadi pada pagi hari atau di daerah perkotaan dengan topografi cekungan (Holzworth, 1972). Akibatnya, kualitas udara memburuk karena polutan tidak dapat menyebar ke lapisan atmosfer yang lebih tinggi.

Proses Kimia dalam Pembentukan Polutan Udara

1. Reaksi Fotokimia dan Pembentukan Ozon Troposfer

   Polutan primer seperti nitrogen dioksida (NO_2) mengalami reaksi fotokimia di bawah paparan sinar matahari, menghasilkan polutan sekunder seperti ozon (O_3). Reaksi utama yang terjadi adalah:

   $$NO_2 + hv \rightarrow NO + O$$
   $$O + O_2 \rightarrow O_3$$

   Ozon troposfer berperan sebagai polutan berbahaya karena dapat menyebabkan gangguan pernapasan dan merusak tanaman serta material bangunan (Finlayson-Pitts & Pitts, 2000).

2. Oksidasi dan Pembentukan Hujan Asam

   Gas SO_2 dan NOx di atmosfer mengalami oksidasi dan bereaksi dengan uap air, membentuk asam sulfat (H_2SO_4) dan asam nitrat (HNO_3) yang kemudian turun dalam bentuk

TRIGONOMETRI
ISSN 3030-8496
Jurnal Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Vol 6 No 2 Tahun 2025
Prefix DOI : 10.8734/trigo.v1i2.365

hujan asam:

$$SO_2 + OH \rightarrow HOSO_2$$
$$HOSO_2 + O_2 \rightarrow HO_2 + SO_3$$
$$SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$$

Hujan asam berdampak negatif terhadap ekosistem perairan, tanah, serta infrastruktur bangunan (Jacob, 1999).

3. Pembentukan Partikulat Sekunder (Secondary Aerosols)

   Gas-gas seperti SO_2, NH_3, dan VOC (Volatile Organic Compounds) dapat bereaksi membentuk partikulat sekunder yang berkontribusi terhadap polusi udara berupa PM2.5 dan PM10. Misalnya, amonia (NH_3) bereaksi dengan asam sulfat membentuk amonium sulfat $(NH_4)_2SO_4$ yang merupakan komponen utama partikulat halus (Seinfeld & Pandis, 2016).

4. Peran Radikal Hidroksil (OH•) dalam Degradasi Polutan

   Radikal hidroksil (**OH•**) merupakan agen oksidasi utama di atmosfer yang berperan dalam reaksi degradasi polutan organik dan anorganik. Reaksi utama radikal OH dengan karbon monoksida (CO) adalah:

$$CO + OH \rightarrow CO_2 + H$$

   Reaksi ini membantu membersihkan atmosfer dari polutan gas seperti CO dan metana (CH_4), tetapi juga dapat berkontribusi terhadap pembentukan ozon troposfer (Finlayson-Pitts & Pitts, 2000).

KESIMPULAN

Proses fisika dan kimia di atmosfer berperan penting dalam pembentukan serta penyebaran polutan udara. Secara fisika, faktor seperti turbulensi atmosfer, arus konvektif, dan pola angin memengaruhi pergerakan polutan, baik secara horizontal maupun vertikal. Polutan dapat terbawa angin ke wilayah yang jauh dari sumber emisinya atau terperangkap dalam kondisi atmosfer tertentu, seperti saat terjadi inversi suhu yang menghambat pencampuran udara dan menyebabkan akumulasi polutan di permukaan. Selain itu, proses deposisi kering (penyerapannya oleh permukaan tanah dan tumbuhan) serta deposisi basah (penghilangan melalui hujan) juga berkontribusi dalam mengurangi konsentrasi polutan di udara. Secara kimia, berbagai reaksi atmosfer menentukan transformasi polutan.

Misalnya, reaksi fotokimia yang melibatkan nitrogen oksida (NOx) dan senyawa organik volatil (VOC) dengan bantuan sinar matahari dapat menghasilkan ozon troposfer, yang merupakan polutan sekunder berbahaya bagi kesehatan manusia dan lingkungan. Selain itu, gas seperti sulfur dioksida (SO_2) dan nitrogen dioksida (NO_2) dapat bereaksi dengan uap air di atmosfer membentuk hujan asam, yang dapat merusak ekosistem perairan, tanah, serta bangunan. Interaksi antara proses fisika dan kimia ini menentukan seberapa jauh polutan dapat bertahan di atmosfer serta dampaknya terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Dalam kondisi tertentu, polutan dapat mengalami reaksi lebih lanjut dan membentuk partikel halus (PM2.5 dan PM10) yang berbahaya jika terhirup oleh manusia. Oleh karena itu, pemahaman mendalam tentang mekanisme pembentukan dan dispersi polutan sangat penting dalam merancang strategi pengendalian pencemaran udara dan menjaga kualitas udara yang lebih baik.

Jurnal Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Vol 6 No 2 Tahun 2025
Prefix DOI : 10.8734/trigo.v1i2.365

DAFTAR PUSTAKA

Alvin Pratama dan Asep Sofyan. ANALISIS DISPERSI PENCEMAR UDARA PM10 DI KOTA BANDUNG MENGGUNAKAN WRFCHEM DATA ASIMILASI. *Jurnal Teknik Lingkungan* Volume 26 Nomor 1, April 2020 (Hal 19 – 36)

Ana Turyanti , Edvin Aldrian , Erliza Noor , Tania June.ANALISIS POLA DISPERSI PARTIKULAT DAN SULFURDIOKSIDA MENGGUNAKAN MODEL WRFCHEM DI SEKITAR WILAYAH INDUSTRI TANGERANG DAN JAKARTA. Jurnal Manusia dan Lingkungan.Vol. 23, No.2, Juli 2016: 169-178

Giulia Ulpiani, 2021, On the linkage between urban heat island and urban pollution island: Three-decade literature review towards a conceptual framework, *Journal Science of the Total Environment*, Volume 751.

Jer-Hwa Chang, Yueh-Lun Lee, Li-Te Chang, Ta-Yuan Chang, Ta-Chih Hsiao, Kian Fan Chung, Kin Fai Ho, Han-Pin Kuo, Kang-Yun Lee, Kai-Jen Chuang & Hsiao-Chi Chuang. 2023, Climate change, air quality, and respiratory health: a focus on particle deposition in the lungs, VOL. 55. Annals of Medicine