

Identifikasi Potensi Daerah Terdampak Pencemaran Udara di Indonesia Menggunakan Pendekatan Model WRF-Chem

Alvin Pratama

Program Studi Sains Atmosfer dan Keplanetan, Institut Teknologi Sumatera, Lampung

Koresponden email: alvin.pratama@sap.itera.ac.id

Diterima: 12 Februari 2025

Disetujui: 17 Februari 2025

Abstract

Air pollution is a major environmental problem in Indonesia, especially in urban and industrial areas. This study aims to identify regions potentially affected by air pollution using the WRFChem model. Simulations were conducted to analyze the distribution of PM10 pollutants in July, during the Australian monsoon. The simulation results show that most regions in Indonesia remain within safe limits, with PM10 concentrations below the threshold of $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$. However, several major cities on the island of Java, such as Jakarta, Tangerang, Yogyakarta and Surabaya, experienced elevated concentrations exceeding the air quality standard. In addition, monsoon wind patterns caused pollutants to spread northward, increasing concentrations in the provinces of Lampung and South Sumatra. These findings highlight the importance of monitoring air quality and implementing mitigation strategies to reduce the impact of air pollution on public health and the environment.

Keywords: *air pollution, WRFChem, PM10, australian monsoon, pollutant transport*

Abstrak

Pencemaran udara menjadi permasalahan lingkungan yang signifikan di Indonesia, terutama di daerah perkotaan dan industri. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi daerah yang berpotensi terdampak pencemaran udara menggunakan model WRFChem. Simulasi dilakukan untuk menganalisis distribusi polutan PM10 pada bulan Juli, saat Indonesia mengalami Monsun Australia. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah Indonesia masih berada dalam kategori aman dengan konsentrasi PM10 di bawah ambang batas $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Namun, beberapa kota besar di Pulau Jawa, seperti Jakarta, Tangerang, Yogyakarta, dan Surabaya, mengalami peningkatan konsentrasi yang melampaui batas baku mutu. Selain itu, pergerakan angin monsun menyebabkan polutan terdispersi ke arah utara, meningkatkan konsentrasi di Provinsi Lampung dan Sumatera Selatan. Hasil penelitian ini menegaskan pentingnya pemantauan kualitas udara serta penerapan strategi mitigasi guna mengurangi dampak pencemaran udara terhadap kesehatan masyarakat dan lingkungan.

Kata Kunci: *pencemaran udara, WRFChem, PM10, monsun australia, transport polutan*

1. Pendahuluan

Pencemaran udara merupakan permasalahan lingkungan yang semakin kompleks di Indonesia, terutama di daerah perkotaan dan industri. Polusi udara berkontribusi terhadap berbagai masalah kesehatan, degradasi lingkungan, serta perubahan iklim akibat meningkatnya konsentrasi partikel dan gas pencemar di atmosfer [1], [2]. Beberapa sumber utama pencemaran udara berasal dari emisi kendaraan bermotor, aktivitas industri, pembakaran biomassa, serta kebakaran hutan dan lahan [3]. Untuk memahami dinamika pencemaran udara serta menentukan strategi pengelolaan yang efektif, diperlukan pemodelan atmosfer yang mampu mensimulasikan interaksi antara faktor meteorologi dan polutan. Salah satu model yang banyak digunakan dalam studi atmosfer adalah *Weather Research and Forecasting model coupled with Chemistry* (WRF-Chem), yang mampu mengasimilasi data emisi serta memperhitungkan transportasi dan transformasi kimiawi polutan di atmosfer [4], [5].

Di Indonesia, studi mengenai pencemaran udara berbasis model WRF-Chem masih terbatas dibandingkan dengan negara lain seperti China, Amerika Serikat, dan India [6]. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa WRF-Chem dapat digunakan untuk memprediksi pola distribusi polutan udara, termasuk partikel halus seperti PM2.5 dan PM10, serta gas pencemar seperti CO, NO₂, dan O₃ [7]. Dalam skala regional, beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa daerah dengan beban pencemaran udara tinggi cenderung berada di wilayah dengan aktivitas industri dan kepadatan kendaraan bermotor yang tinggi [3], [7]. Misalnya, penelitian yang dilakukan oleh Kombara, dkk (2023) menunjukkan bahwa daerah dengan emisi tinggi, seperti kawasan industri dan perkotaan di Sumatra dan Jawa, memiliki konsentrasi

PM2.5 yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan daerah pedesaan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi potensi awal daerah terdampak akibat pencemaran udara berdasarkan hasil simulasi WRF-Chem di Indonesia.

Kondisi meteorologi memainkan peran penting dalam transportasi dan akumulasi polutan di atmosfer [8]. Studi tentang dampak El Niño dan La Niña menunjukkan bahwa perubahan pola angin dan curah hujan dapat mempengaruhi konsentrasi polutan di berbagai wilayah Indonesia [9]. Pada tahun 2015, fenomena El Niño yang kuat menyebabkan penurunan curah hujan yang signifikan, meningkatkan kebakaran hutan dan lahan serta meningkatkan konsentrasi PM2.5 di beberapa wilayah, terutama Sumatra dan Kalimantan [10]. Sebaliknya, selama La Niña tahun 2016, peningkatan curah hujan membantu membersihkan atmosfer dari partikel polutan, menurunkan konsentrasi PM2.5 dan meningkatkan kualitas udara. Oleh karena itu, dalam menggunakan model WRF-Chem untuk analisis pencemaran udara, faktor meteorologi seperti pola angin dan curah hujan harus dipertimbangkan untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat.

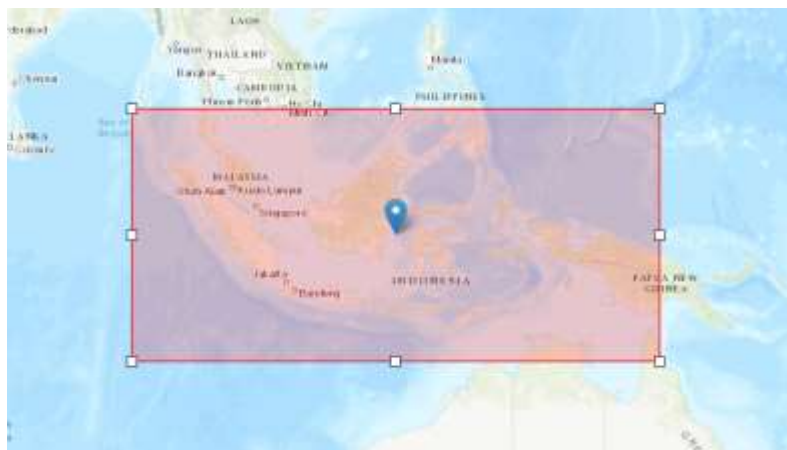
Dalam konteks kebijakan lingkungan, hasil pemodelan WRF-Chem dapat digunakan sebagai dasar ilmiah untuk merancang strategi mitigasi pencemaran udara. Misalnya, kombinasi data model dengan hasil observasi dapat membantu dalam menetapkan zona pengendalian emisi serta menentukan periode kritis dengan tingkat polusi tertinggi yang memerlukan intervensi lebih lanjut [2]. Selain itu, dengan mempertimbangkan faktor meteorologi dan tren perubahan iklim, kebijakan yang lebih adaptif dapat dirancang untuk mengantisipasi peningkatan polusi udara di masa depan. Oleh karena itu, penelitian ini juga bertujuan untuk memberikan rekomendasi berbasis sains bagi pengambil kebijakan dalam merancang langkah-langkah pengelolaan kualitas udara yang lebih efektif di Indonesia.

Secara keseluruhan, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi potensi daerah terdampak akibat pencemaran udara berdasarkan hasil simulasi model WRF-Chem di Indonesia. Dengan mempertimbangkan emisi dari WRFChem dan kondisi meteorologi, penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang lebih mendalam mengenai distribusi pencemaran udara serta strategi mitigasi yang dapat diterapkan. Selain itu, hasil penelitian ini dapat menjadi acuan bagi pengembangan sistem peringatan dini pencemaran udara serta penguatan regulasi terkait pengelolaan kualitas udara di tingkat nasional maupun regional.

2. Metode Penelitian

Simulasi dilakukan menggunakan model WRFChem pada tanggal 26 – 30 Juli 2019. Sumber emisi utama pada model tersebut berasal dari sumber emisi global, yaitu EDGAR-HTAP. Data ini merupakan kumpulan hasil laporan emisi nasional dari berbagai negara dan regional yang berasal dari sumber energi, transportasi, agrikultur, dan sebagainya [11]. Data EDGAR-HTAP ini digunakan sebagai kondisi awal (*initial condition*) beban emisi pada model WRFChem. Adapun *initial condition* untuk kondisi meteorologi yang digunakan dalam simulasi ini adalah data *global forecast system* (GFS) yang dapat diunduh melalui tautan berikut: <https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/>. Data ini memiliki resolusi spasial 0,25° x 0,25°. Jenis polutan yang digunakan untuk identifikasi besaran dampak adalah PM10, *particulate matter* dengan ukuran kurang dari 10 µm.

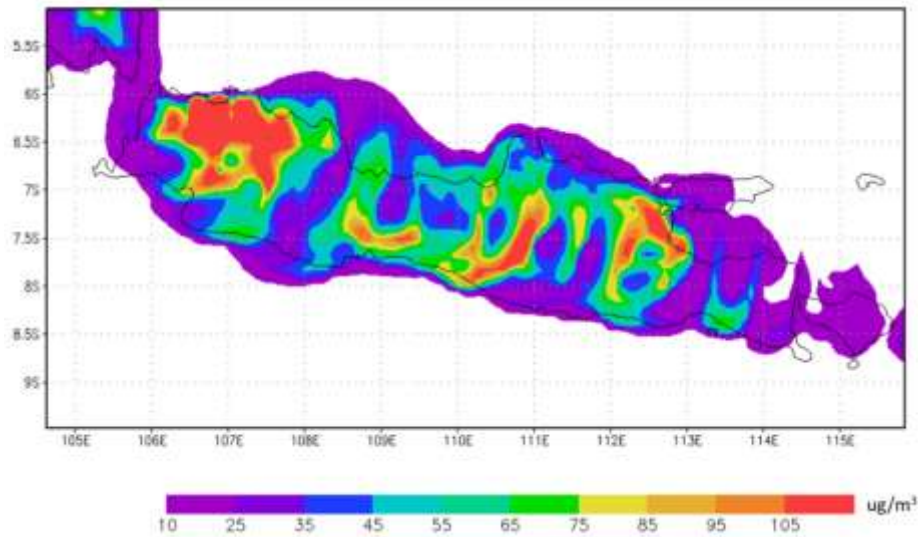
Simulasi konsentrasi PM10 dilakukan memanfaatkan sistem multigrad dengan resolusi spasial 5 km (lihat **Gambar 1**). Pada dasarnya, WRFChem dalam mensimulasikan persebaran polutan juga mempertimbangkan berbagai kondisi lainnya seperti meteorologi (vertikal maupun horizontal) dan geografi (topografi, tutupan lahan, jenis tanah, dsb) [12].



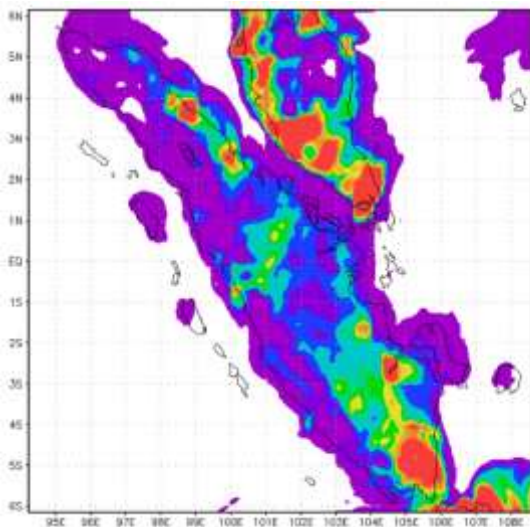
Gambar 1. Pengaturan domain model WRFChem. Kotak merah memiliki resolusi 5 km

3. Hasil dan Pembahasan

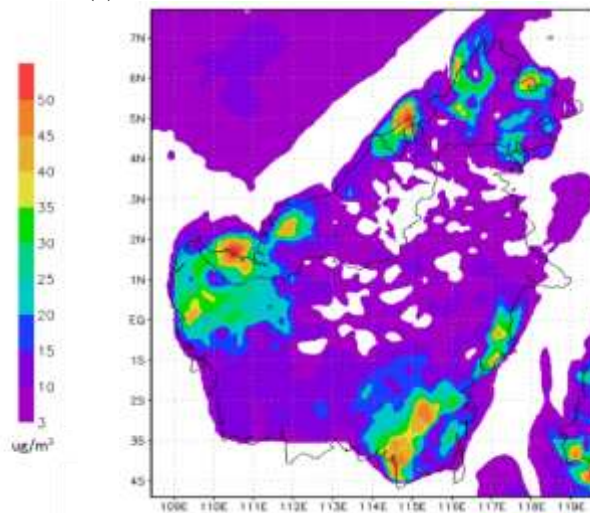
Hasil simulasi penyebaran polutan menggunakan model merupakan parameter penting dalam menentukan potensi dampak pencemaran udara di berbagai wilayah Indonesia. Selain itu, berbagai faktor lingkungan juga mempengaruhi indeks dispersi polutan. Kondisi lokal, seperti pola angin laut-darat dan angin gunung-lembah, berperan dalam distribusi polutan. Pengaruh iklim, termasuk monsun, angin ekuatorial, dan angin lokal, turut menentukan pola penyebaran. Faktor topografi, seperti pegunungan dan lembah, serta tutupan lahan, juga berkontribusi terhadap akumulasi atau dispersi polutan. Selain itu, parameter meteorologi seperti arah dan kecepatan angin, ketinggian mixing layer, lapisan inversi, dan temperatur menjadi faktor utama dalam analisis dispersi. **Gambar 2** merupakan hasil simulasi PM10 di beberapa pulau besar di Indonesia.



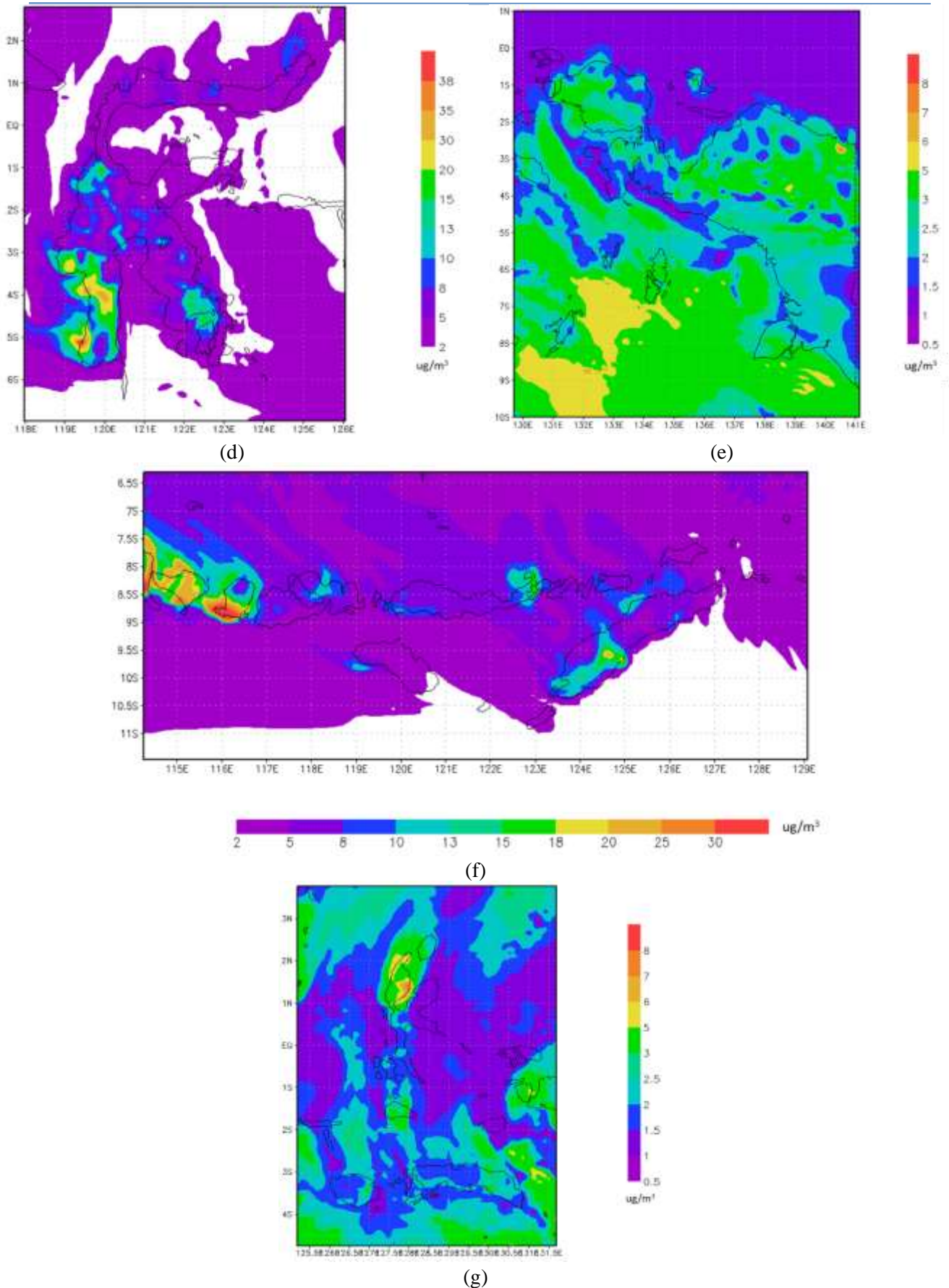
(a)



(b)



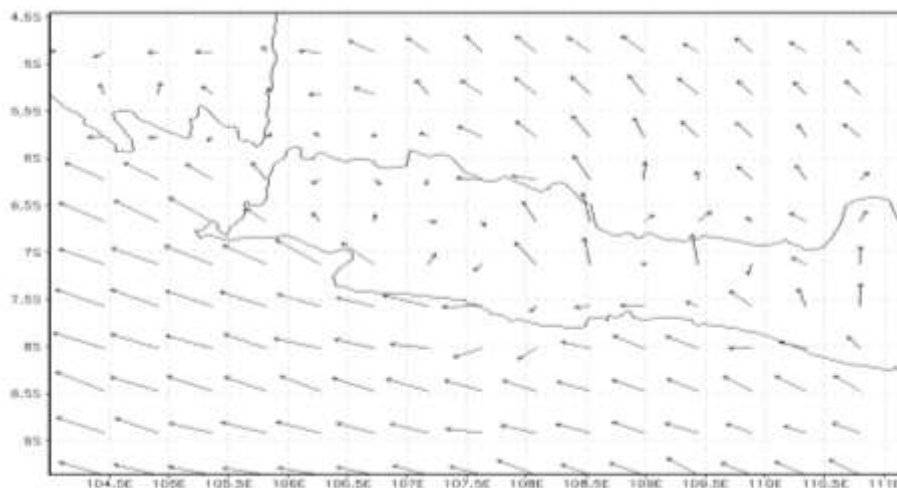
(c)



Gambar 2. Hasil sebaran parameter PM10 di Indonesia. (a) Pulau Jawa, (b) Pulau Sumatera, (c) Pulau Kalimantan, (d) Pulau Sulawesi, (e) Pulau Papua, (f) Pulau Bali, Nusa Tenggara & Sekitarnya, dan (g) Pulau Maluku & Sekitarnya

Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 22 Tahun 2021 Lampiran VII, ambang batas konsentrasi PM10 di lingkungan ditetapkan sebesar $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Parameter ini digunakan sebagai standar kualitas udara untuk memastikan bahwa kondisi udara tetap dalam kategori aman bagi kesehatan manusia dan lingkungan. Hasil simulasi (lihat gambar 2) menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah di Indonesia masih berada dalam kategori aman dengan konsentrasi PM10 yang berada di bawah ambang batas yang ditetapkan. Daerah yang berada di Pulau Kalimantan, Pulau Sulawesi, Pulau Maluku dan Pulau Papua memiliki tingkat konsentrasi dalam kategori baik. Namun, sebagian besar ibu kota provinsi di Indonesia memiliki tingkat konsentrasi yang lebih tinggi dibandingkan daerah sekitarnya. Hal ini disebabkan karena ibu kota provinsi merupakan pusat perekonomian, sehingga aktivitas seperti transportasi dan industri lebih dominan dibandingkan daerah sekitarnya [13].

Selanjutnya, hasil simulasi juga mengindikasikan bahwa terdapat beberapa daerah, khususnya di Pulau Jawa dan Pulau Sumatera, yang mengalami peningkatan konsentrasi PM10 secara signifikan. Kota-kota besar seperti Jakarta, Tangerang, Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY), Surabaya, Lampung, Medan, dan Palembang menunjukkan nilai PM10 yang melebihi batas $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Konsentrasi yang tinggi ini diduga disebabkan oleh faktor-faktor seperti tingginya aktivitas transportasi, industri, serta kondisi meteorologi yang mendukung akumulasi polutan di wilayah tersebut. Selain itu, faktor geografis dan pola cuaca turut berperan dalam meningkatkan kadar PM10 di beberapa kota besar [14].



Gambar 3. Vektor angin pada bulan kering (saat simulasi)

Indonesia merupakan wilayah yang dipengaruhi oleh fenomena monsun, yaitu perubahan arah angin secara periodik akibat perbedaan tekanan udara antara daratan dan lautan [15]. Pada bulan Juli, Indonesia mengalami Monsun Australia, yang ditandai dengan pergerakan massa udara dari Benua Australia menuju ke wilayah Asia (lihat **Gambar 3**). Fenomena ini menyebabkan angin bertiup dominan dari arah selatan ke utara, melintasi wilayah Indonesia, termasuk Pulau Jawa dan Sumatera.

Dalam penelitian ini, simulasi dilakukan pada bulan Juli untuk melihat pola pergerakan angin serta dampaknya terhadap penyebaran polutan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa angin monsun membawa polutan dari Pulau Jawa ke arah utara, sehingga berpotensi menyebabkan peningkatan konsentrasi polutan di wilayah-wilayah tertentu. Salah satu daerah yang terdampak adalah Pulau Sumatera, terutama di Provinsi Lampung dan Sumatera Selatan. Konsentrasi polutan di wilayah ini mengalami peningkatan dibandingkan daerah lainnya, yang diduga akibat akumulasi polutan yang terbawa dari Pulau Jawa oleh pergerakan angin. Pola pergerakan angin pada bulan Juli, sebagaimana ditampilkan dalam **Gambar 3**, menunjukkan bahwa angin cenderung bergerak secara konsisten ke arah utara.

Hal ini menyebabkan daerah-daerah yang berada di jalur pergerakan angin mengalami peningkatan kadar polutan di atmosfer. Selain itu, kondisi atmosfer dan topografi wilayah juga berkontribusi dalam menentukan seberapa besar polutan dapat bertahan di suatu wilayah sebelum akhirnya terdilusi atau mengendap. Hasil ini menunjukkan bahwa fenomena monsun tidak hanya berpengaruh pada pola cuaca dan curah hujan, tetapi juga berdampak pada penyebaran polutan antarwilayah. Oleh karena itu, pemantauan kualitas udara secara berkala dan penerapan strategi pengendalian emisi sangat diperlukan untuk meminimalkan dampak pencemaran udara terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat.

4. Kesimpulan

Hasil simulasi menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah Indonesia masih berada dalam kategori aman dengan konsentrasi PM10 di bawah ambang batas 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Namun, beberapa kota besar di Pulau Jawa, seperti Jakarta, Tangerang, Yogyakarta, dan Surabaya, mengalami konsentrasi PM10 yang melampaui standar baku mutu.

Selain itu, pola angin akibat Monsun Australia yang terjadi pada bulan Juli menyebabkan polutan dari Pulau Jawa terdorong ke arah utara, sehingga meningkatkan konsentrasi polutan di wilayah Sumatera, terutama di Provinsi Lampung dan Sumatera Selatan. Faktor meteorologi seperti kecepatan dan arah angin berperan penting dalam penyebaran polutan antarwilayah.

Hasil ini menunjukkan bahwa pencemaran udara di Indonesia dipengaruhi oleh aktivitas manusia, seperti transportasi dan industri, serta faktor alami seperti pola angin musiman. Oleh karena itu, pemantauan kualitas udara secara berkala dan penerapan strategi mitigasi, seperti pengendalian emisi dan penghijauan, menjadi langkah penting dalam mengurangi dampak pencemaran udara terhadap kesehatan masyarakat dan lingkungan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan bagi kebijakan pengelolaan kualitas udara yang lebih efektif.

5. Referensi

- [1] E. Della Ertiana, "Dampak Pencemaran Udara Terhadap Kesehatan Masyarakat: Literatur Review," J. Ilm. Permas J. Ilm. STIKES Kendal, vol. 12, no. 2, hal. 287–296, 2022.
- [2] Y. Zhou dkk., "Further development and application of the WRFDA-Chem three-dimensional variational (3DVAR) system: Joint assimilation of satellite AOD retrievals and surface observations," Atmos. Res., vol. 316, no. November 2024, hal. 107942, 2025, doi: 10.1016/j.atmosres.2025.107942.
- [3] A. Yusuf, H. Hapsoh, S. H. Siregar, dan D. R. Nurrochmat, "Analisis Kebakaran Hutan Dan Lahan Di Provinsi Riau," Din. Lingkung. Indones., vol. 6, no. 2, hal. 67–84, 2019.
- [4] P. Sicard dkk., "High spatial resolution WRF-Chem model over Asia: Physics and chemistry evaluation," Atmos. Environ., vol. 244, hal. 118004, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118004>.
- [5] Y. Zhang, X. Zhang, L. Wang, Q. Zhang, F. Duan, dan K. He, "Application of WRF/Chem over East Asia: Part I. Model evaluation and intercomparison with MM5/CMAQ," Atmos. Environ., vol. 124, hal. 285–300, 2016, doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.07.022.
- [6] R. Enhakhoirunnisa dkk., "Performance Analysis of Weather Research and Forecasting Chemistry (WRF-Chem) Model in DKI Jakarta Area (Case Study: July 7–9, 2021)," Springer Proc. Phys., vol. 305, hal. 13–22, 2024, doi: 10.1007/978-981-97-0740-9_2.
- [7] A. Pratama dan A. Sofyan, "Analisis Dispersi Pencemar Udara PM10 di Kota Bandung Menggunakan WRF-CHEM Data Asimilasi," J. Tek. Lingkung., vol. 26, no. 1, hal. 19–36, 2020, doi: 10.5614/j.tl.2020.26.1.2.
- [8] A. D. R. Marhaeni, "Pengaruh Faktor Meteorologi Terhadap Fluktuasi Konsentrasi PM10 dan O3 di DKI Jakarta," 2018.
- [9] I. Athoillah, R. M. Sibarani, dan D. E. Doloksaribu, "Analisis Spasial Pengaruh Kejadian El Nino Kuat Tahun 2015 Dan La Nina Lemah Tahun 2016 Terhadap Kelembapan, Angin Dan Curah Hujan Di Indonesia," J. Sains Teknol. Modif. Cuaca, vol. 18, no. 1, hal. 33, 2017, doi: 10.29122/jstmc.v18i1.2140.
- [10] P. Y. Kombara, W. E. Cahyono, W. Setyawati, H. L. Fitriana, E. Adetya, dan A. Pratama, "Air Pollution Impact During Forest Fire 2019 Over Sumatra, Indonesia," Springer Proc. Phys., vol. 290, hal. 129–139, 2023, doi: 10.1007/978-981-19-9768-6_13.
- [11] M. Crippa dkk., "The HTAP_v3 emission mosaic: merging regional and global monthly emissions (2000-2018) to support air quality modelling and policies," Earth Syst. Sci. Data, vol. 15, no. 6, hal. 2667–2694, 2023, doi: 10.5194/essd-15-2667-2023.
- [12] S. E. Peckham, "WRF/Chem version 3.3 user's guide," 2012.
- [13] M. Greenstone dan Q. C. Fan, "Kualitas udara Indonesia yang memburuk dan dampaknya terhadap harapan hidup," Chicago Energy Policy Inst. Univ. Chicago, 2019.
- [14] A. Pratama, "Investigation of air pollution dispersion from kiln stacks based on seasonal using multi-model integration (WRF/CALPUFF)," in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, vol. 623, no. 1, hal. 12007.
- [15] Y. D. Haryanto, R. Agdialta, dan A. Hartoko, "Analisis Monsun Di Laut Jawa," Berk. Perikan. Terubuk, vol. 48, no. 2, hal. 492–500, 2020, [Daring]. Tersedia pada: <https://terubuk.ejournal.unri.ac.id/index.php/JT/article/view/7924/6830>