

Bab X

Model Polusi Udara

Prawira Yudha Kombara dan Amalia Nurlatifah

Polusi udara merupakan kondisi udara yang tercemar oleh zat atau benda asing seperti partikel debu atau gas sehingga udara menjadi tidak layak dihirup oleh makhluk hidup. Udara yang tercemar sangat berbahaya bagi kelangsungan hidup manusia sehingga perlu ditanggulangi secara saksama.

Penanggulangan polusi udara dilakukan dengan beberapa hal mulai dari tahap penelitian secara ilmiah hingga pelaksanaan di lapangan. Dalam tahap penelitian, penanggulangan polusi udara dimulai dari pengumpulan data untuk mengetahui bagaimana pola dari polusi udara yang terjadi. Pengumpulan data dapat dilakukan dengan menempatkan alat pemantau atau pengukur polusi udara di titik-titik yang biasanya terjadi polusi udara. Hanya saja, untuk menempatkan alat pengukur di banyak titik masih menjadi masalah

P. Y. Kombara & A. Nurlatifah

Badan Riset dan Inovasi Nasional, e-mail: praw005@brin.go.id

© 2026 Editor & Penulis

Kombara, P. Y., & Nurlatifah, A. (2026). Model Polusi Udara. Dalam Sumaryati & L. S. Supriatin (Ed.), *Fenomena Polusi Udara dan Dampaknya* (213–226). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1375.c1814
E-ISBN: 978-634-7933-34-8

karena mahalnnya harga alat pemantau dan kurangnya sumber daya manusia untuk melakukan pemasangan dan perawatan. Selain pemasangan alat pemantau, penelitian untuk mempelajari polusi udara dapat juga memanfaatkan aplikasi atau perangkat lunak yang disebut model polusi udara.

Model polusi udara merupakan aplikasi atau perangkat lunak komputer yang berfungsi untuk menyimulasikan polusi udara, baik itu pergerakan maupun reaksinya ketika berada di atmosfer. Simulasi yang dihasilkan dapat berupa proses terjadinya polusi udara, pola penyebarannya, dan sumber polusi udara tersebut. Model polusi udara ini berisikan program-program komputer yang tersusun dari persamaan-persamaan matematis, fisika, dan kimia. Selain itu, karena polusi udara sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca, model polusi udara yang kompleks biasanya turut memanfaatkan perhitungan kondisi cuaca untuk menyimulasikan proses penyebarannya di atmosfer. Pemodelan polusi udara dapat memberikan deskripsi hubungan kausal antara emisi, kondisi cuaca, konsentrasi polutan di atmosfer, deposisi, dan faktor lainnya sehingga dampaknya terhadap lingkungan dapat diperkirakan, dikuantifikasi, dan diprediksi.

Berdasarkan data masukan kondisi cuaca dan informasi sumber seperti kecepatan emisi dan ketinggian cerobong, model polusi udara memberikan karakterisasi polutan primer yang teremisi secara langsung ke atmosfer, dan untuk beberapa kasus, polutan sekunder yang terbentuk akibat hasil reaksi tersebut juga dapat diperkirakan. Model ini sangat penting untuk keperluan manajemen kualitas udara karena dapat digunakan oleh badan atau lembaga yang memiliki wewenang dan tugas dalam mengendalikan polusi udara.

Aplikasi dari model polusi udara di antaranya adalah untuk memperkirakan kontribusi sumber emisi secara langsung. Selain itu, model ini juga digunakan untuk memperkirakan strategi efektif guna mengurangi polusi udara tersebut. Dengan penggunaan model polusi udara, biaya perawatan dan pengadaan alat dapat ditekan sehingga wilayah-wilayah yang tidak memungkinkan pemasangan

alat pengamatan dapat dijangkau dan diketahui kondisi polusi udaranya.

Model polusi udara saat ini ada yang berbayar dan ada juga yang gratis. Baik yang berbayar maupun yang gratis, masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan. Hanya saja secara umum, model polusi udara terdiri atas dua jenis pendekatan, yakni pendekatan Lagrangian dan pendekatan Eulerian.

A. Pendekatan yang Digunakan Pemodelan Polusi Udara

Terdapat dua macam pendekatan pemodelan polusi udara yaitu pendekatan Lagrangian dan pemodelan Eulerian. Tiap-tiap pendekatan memiliki kelebihan dan kekurangannya, sehingga pemilihannya bergantung pada kebutuhan pengguna.

1. Pendekatan Lagrangian

Pendekatan Lagrangian dalam model polusi udara sudah digunakan sejak lama. Dalam pendekatan Lagrangian, parsel udara (atau *puff*) bergerak dan dilihat di sepanjang lintasan. Parsel udara merupakan cara melihat sekumpulan udara yang dibayangkan dalam bentuk kotak agar mudah dipahami. Akan tetapi, pada dasarnya parsel udara ini tersusun atas sekumpulan volume udara yang terdiri atas banyak molekul udara. Selanjutnya, pada kondisi ini, *puff* diasumsikan mempertahankan kondisinya selama jalur pergerakannya (Leel et al., 2016). Dengan demikian, perspektif Lagrangian adalah cara alami untuk menggambarkan gerak benda padat. Sebagai contoh, sebuah apel jatuh dari pohonnya.

Model dengan pendekatan Lagrangian membutuhkan sumber daya yang tidak terlalu besar sehingga cocok digunakan pada perangkat dengan kemampuan terbatas seperti laptop atau komputer sehari-hari. Karena terbatasnya persamaan yang digunakan, metode perhitungannya lebih sederhana, dan waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan perhitungannya pun tergolong cukup cepat (Hu, 2015). Biasanya, model-model yang menggunakan pendekatan

Lagrangian hanya membutuhkan data masukan kondisi cuaca berupa parameter angin, baik itu arah maupun kecepatannya.

Saat ini, sudah ada beberapa model polusi udara yang memanfaatkan pendekatan Lagrangian untuk menyimulasikan bagaimana polusi udara menyebar di atmosfer.

a. Model AERMOD

AERMOD adalah *Gaussian plume* model yang menerapkan kondisi *steady-state*. Model ini menggunakan medan angin tunggal untuk menyimulasikan pergerakan emisi di udara. Medan angin berasal dari permukaan, udara atas, dan data observasi meteorologi. AERMOD juga mengombinasikan data geofisika seperti data elevasi dan tata guna lahan dengan data meteorologi untuk memperoleh parameter lapisan batas seperti ketinggian lapisan pencampuran, tingkat stabilitas atmosfer, dan turbulensi.

AERMOD ini merupakan jenis model polusi udara yang berbayar, sehingga untuk mendapatkan fitur secara lengkap kita harus berlangganan lisensi dari model ini. Untuk penjelasan dan tempat mengunduh aplikasi model ini dapat diakses pada laman berikut: <https://www.weblakes.com/software/air-dispersion/aermod-view/>. Aplikasi AERMOD ini merupakan aplikasi yang umum digunakan oleh lembaga pemerintah untuk bidang lingkungan hidup di Amerika Serikat (US EPA).

b. CALPUFF

CALPUFF adalah *Gaussian plume* model yang menerapkan kondisi *non-steady-state*. Keuntungan dari penggunaan model ini dibandingkan model *Gaussian* yang lain adalah model ini dapat secara realistis menyimulasikan perpindahan substransi pada kondisi *calm* ataupun, topografi yang kompleks, dan di area pantai dengan kondisi adanya angin darat dan laut.

CALPUFF direkomendasikan untuk simulasi *long-range transport* dan studi yang melibatkan asesmen dampak *plume*. Dengan pengembangan VISTAS Versi 6, CALPUFF dapat digunakan untuk keperluan simulasi, baik *long-range* maupun *short-range*.

Seperti halnya model AERMOD, model CALPUFF ini juga sering digunakan oleh US EPA. Aplikasi ini diunduh dengan mengaksesnya pada laman berikut: <https://www.src.com/>.

c. *The Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory* (HYSPLIT) Model

HYSPLIT merupakan satu unit model yang lengkap untuk menyimulasikan trajektori parsel udara khususnya polutan, baik itu arah penyebarannya, perubahan kimia, maupun perpindahannya di atmosfer. Pada versi-versi awal, model HYSPLIT ini hanya murni menggunakan pendekatan Lagrangian sebagai inti perhitungan simulasinya, tetapi pada versi yang terbaru seperti sekarang ini, HYSPLIT sudah mengadopsi pendekatan Eulerian untuk melengkapi perhitungan simulasinya. Oleh karena itu, selain menampilkan hasil simulasi trajektori polutan, kini trajektori polutan tersebut dapat disajikan dalam bentuk grid atau pixel. Penyajian tampilan dalam bentuk grid atau pixel akan menambah informasi akurasi dari hasil simulasi yang diperoleh.

Seperti kedua model sebelumnya, model HYSPLIT ini juga membutuhkan *input* data kondisi cuaca khususnya kecepatan dan arah angin di permukaan. Sumber data angin ini dapat menggunakan data prediksi global atau regional. Model HYSPLIT dikembangkan oleh tim laboratorium *National Oceanic and Atmosphere Administration* (NOAA) di Amerika Serikat. Saat ini, model HYSPLIT disediakan dalam bentuk aplikasi sendiri yang dapat diunduh dan diinstal di perangkat pengguna atau menjalankannya di versi *web*. Untuk mengunduh atau menjalankannya pada versi *web*, laman berikut dapat dikunjungi <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>.

Model HYSPLIT ini dapat digunakan untuk menyimulasikan atau memprediksi trajektori polutan seperti dari kebakaran hutan dan lahan, letusan gunung api, atau kebakaran di satu titik tertentu. Selain data arah dan kecepatan angin, model HYSPLIT juga membutuhkan data koordinat dari lokasi atau titik yang ingin disimulasikan oleh trajektori polutan. Contoh dari penggunaan

model HYSPLIT dapat dilihat pada Keterangan: (a) pukul 07 WIB, (b) pukul 19 WIB, tanggal 01 Maret 2021 (c) pukul 07 WIB, (d) pukul 19 WIB, tanggal 02 Maret 2021 (e) pukul 07 WIB, dan (f) pukul 19 WIB

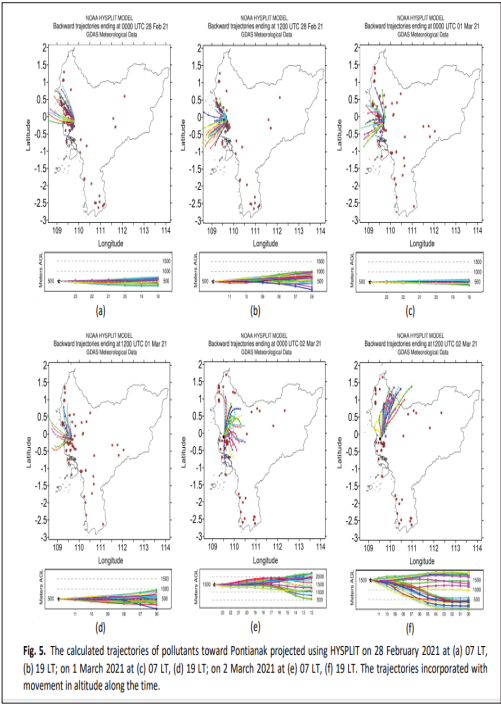


Fig. 5. The calculated trajectories of pollutants toward Pontianak projected using HYSPLIT on 28 February 2021 at (a) 07 LT, (b) 19 LT; on 1 March 2021 at (c) 07 LT, (d) 19 LT; on 2 March 2021 at (e) 07 LT, (f) 19 LT. The trajectories incorporated with movement in altitude along the time.

Keterangan: (a) pukul 07 WIB, (b) pukul 19 WIB, tanggal 01 Maret 2021 (c) pukul 07 WIB, (d) pukul 19 WIB, tanggal 02 Maret 2021 (e) pukul 07 WIB, dan (f) pukul 19 WIB
Sumber: Cholianawati et al. (2024)

Gambar 10.1 Contoh Hasil Simulasi Trajektori Polutan dengan Menggunakan Model HYSPLIT di Wilayah Pontianak, Kalimantan Barat pada tanggal 28 Februari 2021

2. Pendekatan Eulerian

Model polusi yang menggunakan pendekatan Eulerian mengadopsi sistem grid dalam satu set koordinat ortogonal untuk mendefinisikan atau menjelaskan proses atmosfer (adveksi dan difusi), sumber

emisi, dan proses kimia, serta destruksi. Dalam pemodelan Eulerian, area yang diteliti dan dilihat dibagi menjadi sel-sel grid atau pixel, baik dalam arah vertikal maupun horizontal.

Karena memanfaatkan sistem grid dan koordinat bumi, model polusi yang menggunakan pendekatan Eulerian memungkinkan untuk melakukan perhitungan proses fisis dan kimia yang terjadi pada parsel udara karena polusi. Secara umum, pendekatan Eulerian mengadopsi penyelesaian persamaan-persamaan fisika dan kimia secara numerik (Leel et al., 2016).

Model polusi yang menggunakan pendekatan Eulerian membutuhkan sumber daya komputasi yang banyak. Hal itu karena banyaknya persamaan yang harus dihitung dan diselesaikan. Biasanya, model-model tersebut diinstal pada komputer yang besar seperti superkomputer atau *server*. Area yang menjadi kajian biasanya mulai dari skala global hingga skala perkotaan. Umumnya, model polusi dengan pendekatan Eulerian memiliki komunitas untuk pengembangan modelnya sehingga banyak dari model tersebut yang tidak berbayar.

Model polusi dengan pendekatan Eulerian tetap membutuhkan data masukan kondisi atmosfer, tetapi biasanya selain parameter arah dan kecepatan angin, parameter lain seperti temperatur, kelembapan, tekanan, dan curah hujan dapat dijadikan sebagai data masukan juga. Biasanya, model polusi dengan pendekatan Eulerian terbagi menjadi dua jenis, yakni tipe *offline*, yaitu model yang berdiri sendiri dan terpisah dari model atmosfernya, dan tipe *online*, yaitu model yang menjadi satu kesatuan dengan model cuacanya (Hu, 2015).

Baik tipe *offline* maupun tipe *online*, keduanya membutuhkan sumber daya komputasi yang besar. Hanya saja, untuk menentukan tipe model yang terbaik merupakan sesuatu yang sulit karena banyaknya faktor yang memengaruhi akurasi dari setiap model. Beberapa contoh model polusi dengan pendekatan Eulerian ialah model WRF-Chem, CAMx, CMAQ, dan model lainnya.

a. Model WRF-Chem

Model *Weather Research and Forecast-Chemistry* (WRF-Chem) merupakan salah satu pengembangan dari model WRF yang merupakan model numerik untuk memprediksi dan meneliti cuaca yang dikembangkan oleh beberapa lembaga riset di Amerika Serikat seperti NOAA, *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), dan lembaga riset lainnya. Model WRF-Chem ini merupakan pengembangan dari model WRF dengan penambahan modul perhitungan kimia atmosfer di dalam komponen modelnya. Dengan adanya komponen modul perhitungan kimia atmosfer, model ini mampu melakukan perhitungan penyebaran dan reaksi kimia dari polusi di udara. Model WRF-Chem telah digunakan secara luas oleh banyak lembaga riset dan akademisi di seluruh dunia (Fast et al., 2006; Grell et al., 2005; Powers et al., 2017).

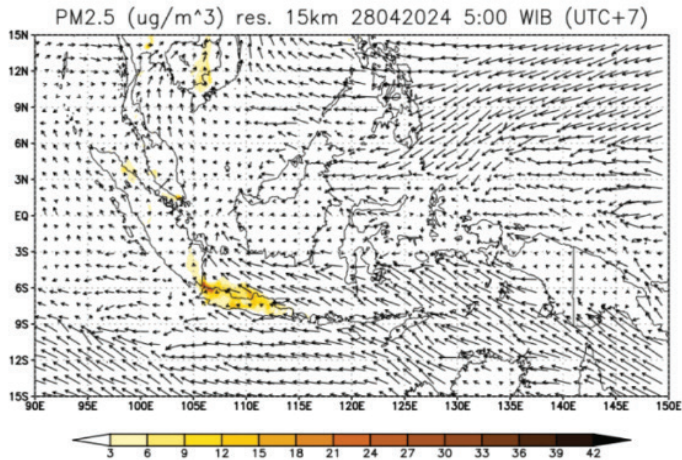
Pemanfaatan model WRF-Chem tidak hanya untuk menyimulasikan penyebaran polusi udara saja, tetapi juga untuk memprediksi kondisi polusi, menyimulasikan penyebaran kabut asap karena kebakaran hutan dan lahan, serta menghitung penyebaran konsentrasi gas sulfur dioksida (SO_2) akibat letusan gunung api. Selain itu, model WRF-Chem ini digunakan secara luas untuk kepentingan penelitian interaksi kimia atmosfer terhadap cuaca, iklim, dan juga kualitas udara. Pemanfaatan lainnya, model WRF-Chem telah digunakan secara operasional untuk memprediksi kondisi polusi udara ke depannya oleh beberapa lembaga di seluruh dunia (Powers et al., 2017).

Model WRF-Chem hingga saat ini masih terus dikembangkan dan dapat diunduh pada laman <https://github.com/wrf-model/WRF/releases>. Model WRF-Chem termasuk tipe model *online* karena secara struktur model ini menggabungkan komponen cuaca dan kimia atmosfer menjadi satu model. Oleh karena itu, sumber daya komputasi yang dibutuhkan oleh model ini akan lebih besar dibandingkan model WRF pada umumnya.

Saat ini, model WRF-Chem juga sudah digunakan oleh Pusat Riset Iklim dan Atmosfer (PRIA), Badan Riset dan Inovasi Nasional

(BRIN) untuk memprediksi kondisi polusi udara di Indonesia secara operasional.

Gambar 10.2. Untuk melihat hasil prediksi tersebut dapat mengunjungi laman <https://srikandi-prototype.brin.go.id>.



Sumber: Brin (2024)

Gambar 10.2 Contoh Hasil Prediksi $PM_{2.5}$ dari Luaran Model WRF-Chem

b. Model CAMx

Model *Comprehensive Air Quality Model with Extensions* (CAMx) mensimulasikan kualitas udara dalam skala geografis yang beragam. Model ini dapat mensimulasikan berbagai macam polutan termasuk partikulat, ozon, senyawa toksik, dan polutan lainnya. Model ini merupakan model numerik untuk melakukan perhitungan kimia atmosfer dan polusi udara yang dikembangkan oleh perusahaan konsultan multinasional asal Denmark bernama Ramboll. Model ini tidak berbayar dan dapat diunduh secara gratis pada laman www.camx.com.

Model CAMx merupakan model tipe *offline* karena model ini terpisah dari model cuaca pada saat pemasangan dan menjalankannya. Model ini tetap membutuhkan data masukan

kondisi cuaca dari model lain. Namun, data masukan model cuaca yang biasa digunakan berasal dari model WRF. Model ini telah dimanfaatkan secara luas oleh beberapa lembaga dan peneliti di seluruh dunia untuk kebutuhan penelitian ataupun layanan prediksi operasional.

c. Model CMAQ

Seperti halnya model WRF-Chem dan model CAMx, model *Community Multiscale Air Quality* (CMAQ) juga merupakan model numerik yang digunakan untuk menyimulasikan polusi atau kimia atmosfer. Model CMAQ ini dikembangkan oleh badan perlindungan lingkungan di Amerika Serikat (U.S. EPA) melalui proyek *Clean Air Act*. Walaupun begitu, model ini tidak berbayar dan dapat diunduh serta digunakan secara gratis. Untuk mengunduh model ini, laman berikut dapat diakses: <https://github.com/USEPA/CMAQ/wiki/CMAQ-Release-Notes>.

Seperti halnya model CAMx, model CMAQ merupakan tipe model *offline*, yaitu model yang dipasang dan dijalankan secara terpisah dari model cuaca. Meskipun demikian, tetap saja model ini membutuhkan data model cuaca sebagai data masukan. Data cuaca yang digunakan dapat berasal dari model WRF atau model cuaca lainnya (Li et al., 2022). Model ini pun telah secara luas digunakan untuk kepentingan penelitian ataupun sistem prediksi operasional terutama di wilayah Amerika Serikat. Versi terbaru dari model ini adalah versi 5.4 dan versi ini biasanya digabungkan dengan model WRF versi 4.4.

B. Model Polusi Udara Global

Selain model-model yang telah disebutkan pada subbab sebelumnya, ada juga model untuk menyimulasikan kimia atmosfer atau polusi udara dengan domain wilayah secara global. Biasanya, model polusi udara global menyimulasikan kondisi kimia atmosfer dan merupakan bagian dari model iklim. Walaupun begitu, pendekatan yang digunakan pada model polusi global secara umum masih menggunakan pendekatan Eulearian.

Saat ini, sudah banyak model iklim yang dikembangkan oleh berbagai negara seperti negara-negara Eropa dan Amerika Serikat. Untuk menyimulasikan iklim bumi, model iklim tidak hanya membutuhkan komponen atmosfer saja, tetapi juga membutuhkan komponen-komponen lain, seperti laut, permukaan daratan, dataran es, makhluk hidup, dan kimia atmosfer. Iklim di bumi sangatlah kompleks dan antarkomponen saling memberikan dampak dan berinteraksi satu sama lain.

Contoh dari model polusi udara global adalah model *Copernicus Atmosphere Monitoring Service* (CAMS) yang dikembangkan oleh badan prediksi cuaca Eropa (ECMWF). Model CAMS ini telah dijalankan secara operasional dan datanya dapat kita unduh secara gratis melalui tautan laman berikut: <https://atmosphere.copernicus.eu>. Tampilan dari laman *web* data model CAMS ditunjukkan pada Sumber: <https://atmosphere.copernicus.eu>

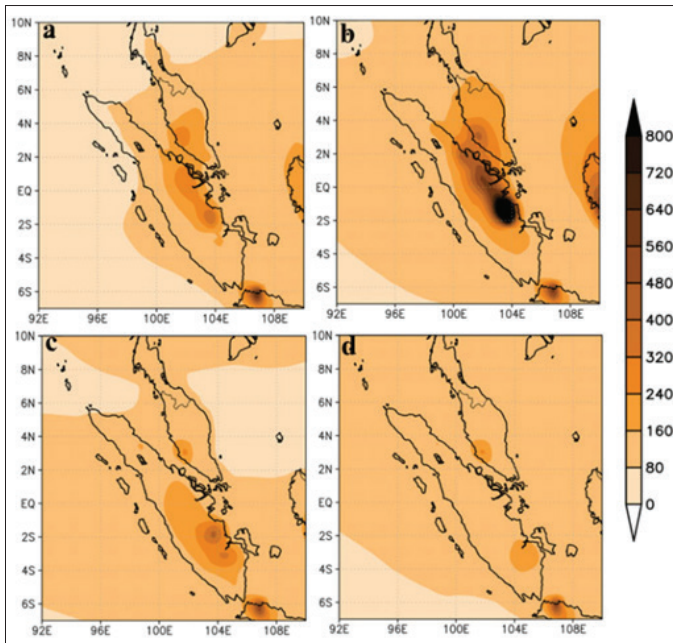


Sumber: CAMS (2025)

Gambar 10.3 Tampilan Website Sumber Data Model CAMS

Model CAMS menyediakan data prediksi polusi udara untuk beberapa polutan seperti $PM_{2.5}$, PM_{10} , karbon monoksida, ozon, dan polutan lainnya. Prediksi yang disediakan memiliki resolusi waktu per 3 jam dan spasial sekitar $40 \text{ km} \times 40 \text{ km}$. Selain menyediakan data prediksi global, model CAMS ini juga menyediakan data reanalisis dalam skala per 3 jam atau bulanan untuk waktu lampau. Data reanalisis merupakan data model yang telah dikoreksi dengan menggunakan data observasi atau data pembanding lainnya. Akan tetapi, resolusi spasial untuk data reanalisis ini jauh lebih kasar, yakni sekitar $75 \text{ km} \times 75 \text{ km}$ (Inness et al., 2019). Salah satu pemanfaatan data model CAMS untuk kebutuhan penelitian ditunjukkan pada

Keterangan: (a) Agustus, (b) September, (c) Oktober, (d) November



Keterangan: (a) Agustus, (b) September, (c) Oktober, (d) November

Sumber: Kombara et al. (2023)

Gambar 10.4 Penyebaran Karbon Monoksida (CO) dari Data Model CAMS saat Kebakaran Hutan dan Lahan Tahun 2019 di Sumatra

Data model CAMS ini dapat dimanfaatkan untuk kepentingan penelitian ataupun untuk penyediaan informasi prediksi polusi udara. Hanya saja, karena data ini dihasilkan dari model global, resolusi spasial yang disediakan tidak akan sebaik dari model-model regional yang telah disebutkan pada subbab sebelumnya. Meskipun begitu, untuk kebutuhan kajian secara multitaraf dan di wilayah yang cukup luas, data ini sudah cukup baik merepresentasikan kondisi yang ada.

Daftar Pustaka

- Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). (2024). *SRIKANDI* [Prototipe sistem prediksi kualitas udara]. <https://srikandi-prototype.brin.go.id>
- Cholianawati, N., Sinatra, T., Nugroho, G. A., Permadi, D. A., Indrawati, A., Halimurrahman, Kallista, M., Romadhon, M. S., Ma'ruf, I. F., Yudhatama, D., Madethen, T. A. P., & Awaludin, A. (2024). Diurnal and daily variations of PM_{2.5} and its multiple-wavelet coherence with meteorological variables in Indonesia. *Aerosol and Air Quality Research*, 24(3), 1–18. <https://doi.org/10.4209/aaqr.230158>
- Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS). (2025). CAMS. <https://atmosphere.copernicus.eu>
- Fast, J. D., Gustafson, W. I., Easter, R. C., Zaveri, R. A., Barnard, J. C., Chapman, E. G., Grell, G. A., & Peckham, S. E. (2006). Evolution of ozone, particulates, and aerosol direct radiative forcing in the vicinity of Houston using a fully coupled meteorology-chemistry-aerosol model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(21), 1–29. <https://doi.org/10.1029/2005JD006721>
- Grell, G. A., Peckham, S. E., Schmitz, R., McKeen, S. A., Frost, G., Skamarock, W. C., & Eder, B. (2005). Fully coupled “online” chemistry within the WRF model. *Atmospheric Environment*, 39(37), 6957–6975. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.04.027>
- Hu, X. M. (2015). Boundary layer (atmospheric) and air pollution: Air pollution meteorology. In [nama editor belum lengkap — mohon dikonfirmasi] (Ed.), *Encyclopedia of atmospheric sciences* (2nd ed., pp. 227–236). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382225-3.00499-0>

- Inness, A., Ades, M., Agustí-Panareda, A., Barr, J., Benedictow, A., Blechschmidt, A. M., Dominguez, J. J., Engelen, R., Eskes, H., Flemming, J., Huijnen, V., Jones, L., Kipling, Z., Massart, S., Parrington, M., Peuch, V. H., Razinger, M., Remy, S., Schulz, M., & Suttie, M. (2019). The CAMS reanalysis of atmospheric composition. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(6), 3515–3556. <https://doi.org/10.5194/acp-19-3515-2019>
- Kombara, P. Y., Cahyono, W. E., Setyawati, W., Fitriana, H. L., Adetya, E., & Pratama, A. (2023). Air pollution impact during forest fire 2019 over Sumatra, Indonesia. *Springer Proceedings in Physics*, 290, 129–139. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9768-6_13
- Leel, Á., Moná, T., Mészáros, R., Lagzi, I., & Havasi, Á. (2016). *Mathematical problems in meteorological modelling*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-40157-7>
- Li, J., Yu, S., Chen, X., Zhang, Y., Li, M., Li, Z., Song, Z., Liu, W., Li, P., Xie, M., & Xing, J. (2022). Evaluation of the WRF-CMAQ model performances on air quality in China with the impacts of the observation nudging on meteorology. *Aerosol and Air Quality Research*, 22(4), 1–17. <https://doi.org/10.4209/aaqr.220023>
- Powers, J. G., Klemp, J. B., Skamarock, W. C., Davis, C. A., Dudhia, J., Gill, D. O., Coen, J. L., Gochis, D. J., Ahmadov, R., Peckham, S. E., Grell, G. A., Michalakes, J., Trahan, S., Benjamin, S. G., Alexander, C. R., Dimego, G. J., Wang, W., Schwartz, C. S., Romine, G. S., ... Duda, M. G. (2017). The Weather Research and Forecasting model: Overview, system efforts, and future directions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(8), 1717–1737. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00308.1>