

ANALISIS PENGARUH ANGIN MUSON TERHADAP DISTRIBUSI PM_{2.5} DAN IMPLIKASINYA PADA PENYAKIT TUBERKULOSIS DI JABODETABEK

Rajwa Ganesya Atallah¹, Nadiya Sabila Hasanah², Dinda Alisa Sopiana³, Faridzatul Azna⁴,
Aisah Nurcahya⁵, Tania Septi Anggraini⁶

¹Sains Informasi Geografi, Universitas Pendidikan Indonesia

rajwaganesyaa@upi.edu, nadiyash10@upi.edu, dinda01@upi.edu, faridzatulaznaa@upi.edu, aisahncahya@upi.edu,
taniasepti@upi.edu

ABSTRAK

Abstrak: PM_{2.5} adalah polutan berupa partikel halus berukuran mikrometer yang dapat dengan mudah terhirup dan masuk ke dalam sistem pernapasan. Paparan PM_{2.5} dalam jangka panjang diketahui dapat memperburuk berbagai penyakit hingga meningkatkan risiko kematian. Salah satu penyakit yang berpotensi dipengaruhi oleh paparan polusi udara, khususnya PM_{2.5}, adalah tuberkulosis (TBC). Wilayah Jabodetabek sebagai kawasan metropolitan dengan aktivitas antropogenik yang tinggi serta dinamika meteorologi yang kompleks sangat rentan terhadap akumulasi dan transport polutan udara. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi spasial PM_{2.5} di Jabodetabek, mengkaji pengaruh angin muson terhadap pola penyebarannya, serta mengevaluasi implikasi spasialnya terhadap kejadian TBC. Data PM_{2.5} diperoleh dari stasiun pemantauan *World Air Quality Index* (WAQI) dan estimasi berbasis citra Sentinel-5P TROPOMI menggunakan metode regresi Random Forest. Pola transport polutan dianalisis menggunakan model backward trajectory HYSPLIT. Hasil RMSE, MAE, dan akurasi R² menunjukkan bahwa performa model *Random Forest* masih rendah. Nilai RMSE sebesar 14,296 dan MAE sebesar 12,827 mencerminkan kesalahan prediksi yang cukup besar, sedangkan nilai R² (0,179) mengindikasikan bahwa model belum mampu menjelaskan variasi konsentrasi PM_{2.5} di wilayah Jabodetabek pada tahun 2024. Dengan adanya penelitian ini, daerah yang tidak memiliki stasiun pengamatan polusi udara tetap dapat mengetahui sebaran PM_{2.5} dengan data penginderaan jauh yang bersifat kontinu. Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan dapat mendukung Pembangunan berkelanjutan (SDGs) pada tujuan ke-tiga, yaitu kehidupan sehat dan sejahtera.

Kata Kunci: Sentinel-5P TROPOMI, HYSPLIT, Random Forest Regression, Tuberkulosis.

Abstract: PM_{2.5} is a pollutant in the form of fine particles measuring micrometers that can be easily inhaled and enter the respiratory system. Long-term exposure to PM_{2.5} is known to exacerbate various diseases and increase the risk of death. One disease that is potentially affected by exposure to air pollution, particularly PM_{2.5}, is tuberculosis (TB). The Greater Jakarta area, as a metropolitan area with high anthropogenic activity and complex meteorological dynamics, is highly susceptible to the accumulation and transport of air pollutants. This study aims to analyze the spatial distribution of PM_{2.5} in Greater Jakarta, examine the influence of monsoon winds on its distribution patterns, and evaluate its spatial implications for TB incidence. PM_{2.5} data were obtained from the World Air Quality Index (WAQI) monitoring station and Sentinel-5P TROPOMI image-based estimates using the Random Forest regression method. Pollutant transport patterns were analyzed using the HYSPLIT backward trajectory model. The RMSE,

MAE, and R^2 accuracy results indicate that the performance of the Random Forest model is still low. The RMSE value of 14.296 and MAE value of 12.827 reflect a significant prediction error, while the R^2 value (0.179) indicates that the model is not yet able to explain the variation in $PM_{2.5}$ concentrations in the Greater Jakarta area in 2024. With this research, areas that do not have air pollution monitoring stations can still obtain information on the spatial distribution of $PM_{2.5}$ using continuous remote sensing data. Therefore, this study is expected to support sustainable development (SDGs), particularly Goal 3, which focuses on ensuring healthy lives and promoting well-being.

Keywords: Sentinel-5P TROPOMI, HYSPLIT, Random Forest Regression, Tuberculosis.

Article History:

Received: 01-01-2026

Revised : 26-02-2026

Accepted: 02-03-2026

Online : 10-04-2026



This is an open access article under the
[CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license

A. LATAR BELAKANG

Polusi udara adalah masalah global yang disebabkan oleh tercampurnya unsur berbahaya ke dalam udara sehingga dapat mengancam kesehatan manusia, salah satunya $PM_{2.5}$ (Mamić et al., 2023). $PM_{2.5}$ merupakan partikel halus luar ruangan yang sangat berkontribusi dalam polusi udara, ukurannya yang sangat kecil dapat menyebabkan dan memperburuk penyakit pernapasan. Menurut laporan *State of Global Air* (SoGA) pada tahun 2021, lebih dari 90% kematian di seluruh dunia disebabkan oleh polusi udara, dengan 7.8 juta disebabkan oleh polutan $PM_{2.5}$ (UNICEF, 2024). Hal ini disebabkan karena ukurannya yang mencapai micrometer, sehingga $PM_{2.5}$ dapat dengan mudah masuk ke dalam tubuh. *American Heart Association* (AHA) menyimpulkan bahwa menghirup paparan $PM_{2.5}$ dalam jangka panjang terbukti dapat menimbulkan kematian (Alexeeff et al., 2021).

Salah satu penyakit yang dapat diperburuk oleh polusi udara, khususnya $PM_{2.5}$ adalah Tuberkulosis. Tuberkulosis adalah penyakit menular yang disebabkan oleh bakteri *mycobacterium tuberculosis* yang menyerang paru-paru. Berdasarkan hasil eksperimen in vitro, paparan $PM_{2.5}$ terbukti secara langsung meningkatkan kerentanan sel paru terhadap infeksi *mycobacterium tuberculosis*, bakteri penyebab tuberkulosis (Yang et al., 2020). Selain bakteri, $PM_{2.5}$ berperan penting dalam meningkatkan risiko baik infeksi awal maupun reaktivasi penyakit tuberkulosis (TBC) (Min et al., 2023). Tercatat kasus tuberkulosis di Indonesia tahun 2020 menyentuh angka 315.936 kasus, pada tahun 2021 dilaporkan meningkat menjadi 969.000 kasus dan terus meningkat hingga menyentuh angka 1.090.000 kasus pada tahun 2024, yang merupakan kasus kejadian tertinggi ketiga di dunia setelah India dan China (Kemenkes, 2022, 2025) Berdasarkan penelitian (Lau et al., 2023), peningkatan kasus tuberkulosis dari tahun ke tahun menunjukkan keterkaitan dengan paparan polusi $PM_{2.5}$ dalam jangka panjang, yang berpotensi memicu reaktivasi TBC melalui gangguan pada sistem imun.

Mengingat dampak buruknya $PM_{2.5}$ bagi kesehatan hingga dapat menyebabkan kematian, maka diperlukan kajian mengenai analisis distribusi $PM_{2.5}$. Salah satu analisis yang dapat dilakukan adalah melihat pengaruh angin muson yang melintas di Indonesia, khususnya Jabodetabek. Beberapa studi telah melakukan penelitian

mengenai pengaruh angin terhadap distribusi $PM_{2.5}$. Salah satu studi yang dilakukan oleh (Wang et al., 2022) meneliti mengenai pola khas transportasi polusi udara di Tiongkok. Hasil penelitian tersebut menunjukkan polutan $PM_{2.5}$ dapat berpindah dari satu wilayah ke wilayah lainnya akibat pengaruh pola angin yang mendorong polutan ke wilayah tertentu di Tiongkok. (Singh et al., 2023) menggunakan metode *backward trajectories* yang dihitung menggunakan HYSPLIT untuk memantau polusi udara selama musim pasca-muson 2022. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa arah angin sangat berpengaruh pada tinggi rendahnya konsentrasi $PM_{2.5}$ yang ada di India. (Mustaqiman et al., 2025) menggunakan data polusi di Bandar Lampung pada tahun 2023 yang diperoleh dari basis data aqicn.org dan IQair.com yang digunakan untuk pemantauan kualitas udara secara *real time*. Data dari sumber ini mencakup pengukuran $PM_{2.5}$, polutan kritis yang mempengaruhi kesehatan manusia dan indeks kualitas udara lainnya.

Tujuan utama dari penelitian ini, yaitu mengembangkan metode dalam memperkirakan pola distribusi $PM_{2.5}$ oleh angin muson dan dampaknya terhadap penyakit TBC di Jabodetabek. Penelitian ini memanfaatkan data penginderaan jauh dan metode *machine learning* untuk memprediksi sebaran indeks kualitas udara (AQI) $PM_{2.5}$ pada wilayah yang tidak memiliki stasiun pemantauan kualitas udara. Untuk mencapai hal ini, kami memanfaatkan data harian dari *World Air Quality Index* (WAQI), data citra Sentinel-5P TROPOMI dan data arah angin yang didapatkan dari *website* HYSPLIT. Keterbaruan dari penelitian ini terletak pada topik yang dibahas, di mana mengaitkan antara distribusi $PM_{2.5}$ dan angin muson, serta implikasinya terhadap penyakit tuberkulosis di Jabodetabek. Meskipun telah banyak penelitian yang membahas mengenai distribusi $PM_{2.5}$ tetapi penelitian yang secara khusus membahas mengenai bagaimana distribusi $PM_{2.5}$ di Jabodetabek yang disebabkan oleh angin muson masih sangat terbatas. Penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan kesadaran masyarakat terhadap bahaya polusi udara, khususnya $PM_{2.5}$, serta membantu dalam memperkirakan kualitas udara melalui teknologi penginderaan jauh. Dengan demikian, penelitian ini dapat membantu dalam menangani masalah terkait penyakit tuberkulosis di Indonesia, khususnya Jabodetabek.

B. METODE PELAKSANAAN

1. Area Penelitian

Analisis pengaruh angin muson terhadap distribusi $PM_{2.5}$ serta implikasinya terhadap penyebaran penyakit tuberkulosis di wilayah Jabodetabek dilakukan pada tahun 2024. Wilayah Jabodetabek dipilih karena memiliki permasalahan polusi udara yang kompleks dengan tingkat pengendalian yang masih rendah. Karakteristik $PM_{2.5}$ memungkinkan partikel ini menyebar dalam jangkauan yang luas, sehingga dampak polusi tidak terbatas pada satu wilayah administrasi. Kondisi perkotaan dan meteorologi Jabodetabek semakin memperkuat efek transportasi $PM_{2.5}$ antar kota, seiring dengan tingginya aktivitas perkotaan dan mobilitas penduduk.



Gambar 1 Peta area penelitian A) Indonesia, B) Pulau Jawa, C) Jabodetabek

Secara Klimatologis, Jabodetabek dipengaruhi oleh iklim Muson tropis yang ditandai oleh pergantian Muson Barat dan Muson Timur setiap tahunnya. Muson Barat membawa massa udara lembap dari Samudra Hindia dan menyebabkan curah hujan tinggi pada Periode Desember hingga Maret, sedangkan Muson Timur membawa udara yang lebih kering dari daratan Australia dan memicu musim kemarau pada periode juni hingga september. Pola musim ini juga mempengaruhi distribusi parameter atmosfer seperti curah hujan, kelembapan, dan penyebaran polutan udara termasuk aerosol dan gas pencemar. Selain itu, pertumbuhan urbanisasi yang sangat pesat terutama di kawasan Jabodetabek (Jakarta, Bogor, Depok, Tangerang, Bekasi) memicu peningkatan emisi antropogenik dari sektor transportasi, industri, serta pemukiman.

2. Data

Data yang digunakan untuk melihat pengaruh angin muson terhadap distribusi $pm_{2.5}$ dan implikasinya pada penyebaran penyakit tuberkulosis di Jabodetabek dapat dilihat pada Tabel 1. Terdapat beberapa data yang digunakan, yaitu data nilai $PM_{2.5}$ yang didapatkan dari *World's Air Pollution: Real-time Air Quality Index (WAQI)*, data pengidap TBC pada setiap kabupaten/kota di Jabodetabek data trajectory udara backward dan data Sentinel-5P TROPOMI.

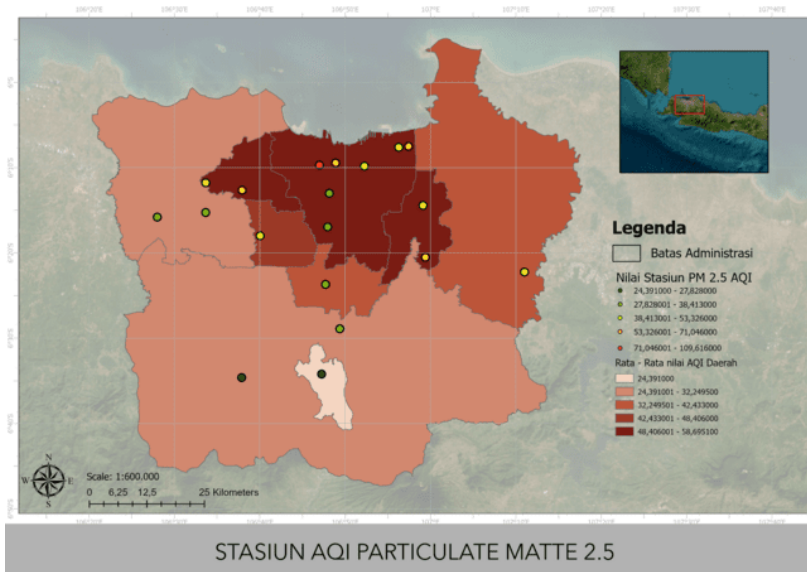
Tabel 1 Data yang digunakan

No	Data	Resolusi Spasial	Temporal	Sumber
1	Nilai $PM_{2.5}$ (AQI)	Titik (Lokasi Stasiun)	2024	(WAQI, 2024)
2	Data Pengidap TBC Per-Kabupaten /Kota	Jabodetabek	2024	(BPS, 2025)
3	Data Trajektori Udara Backward (HYSPLIT)	$0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$	2024	(NOAA, 2024)
4	Sentinel-5P TROPOMI	$7 \text{ km} \times 3,5 \text{ km}$	2024	(ESA, 2018)
5	Rata-rata Kecepatan Angin	Jabodetabek	2024	(BMKG, 2024)
6	Curah Hujan	Jabodetabek	2024	(CHIRPS, 2024)
7	Data Shapefile JABODETABEK	Jabodetabek	2019	(BIG, 2019)
8	Data Shapefile Permukiman	Jabodetabek	2021	OpenStreetMap

Selanjutnya data *shapefile* Jabodetabek sebagai batas area dilakukannya penelitian. semua data yang digunakan dalam analisis ini memiliki fungsi yang berbeda. Perbedaan tersebut memengaruhi bagaimana cara data diolah dan perannya dalam mendukung hasil analisis.

a. Data PM_{2.5} (WAQI)

Kualitas udara di wilayah Jabodetabek dianalisis berdasarkan nilai PM_{2.5} yang diperoleh dari *World's Air Pollution: Real-time Air Quality Index (WAQI)*. Data indeks PM_{2.5} diambil dalam bentuk nilai rata-rata tahunan pada tahun 2024 dengan menggunakan 19 titik stasiun pengamatan seperti pada Gambar 2. Berdasarkan data kualitas udara PM_{2.5} di wilayah Jabodetabek tahun 2024 yang bersumber dari WAQI, terlihat bahwa Stasiun Grogol menjadi satu-satunya stasiun yang berada pada kategori indeks tidak sehat untuk kelompok rentan. Beberapa stasiun lainnya, yaitu Krukut, Cilincing, Marunda, Bantar Gebang, dan Cisauk, termasuk dalam kategori sedang. Sementara itu, stasiun Jakarta GBK, Jalan BDN II, Tanah Sereal, Curug, Tigaraksa, Sukamahi, Tegar Beriman, Serpong, Pancoran Mas, Leuwiliang, Kayuringin, Pasir Jaya, dan Sumur Batu berada pada kategori indeks baik. Variasi nilai indeks PM_{2.5} tersebut menunjukkan bahwa kualitas udara di Jabodetabek bersifat beragam antarwilayah.



Gambar 2 Persebaran stasiun dan rata-rata PM_{2.5} wilayah Jabodetabek

Titik stasiun pengamatan yang digunakan dalam analisis pengaruh angin muson terhadap distribusi PM_{2.5} serta implikasinya terhadap penyebaran penyakit tuberkulosis di wilayah Jabodetabek berjumlah 19 titik. Stasiun-stasiun tersebut tersebar di setiap kabupaten dan kota di Jabodetabek. Lokasi stasiun ini selanjutnya digunakan sebagai titik sampel untuk pengamatan dan pengolahan data lebih lanjut berdasarkan citra Sentinel-5P TROPOMI.

b. Data Arah Angin HYSPLIT

Berdasarkan konsentrasi PM_{2.5} di wilayah Jabodetabek, analisis dilakukan dengan mengambil empat titik waktu pengamatan lintasan arah angin menggunakan *backward trajectory model*, yaitu pada 15 Mei, 5 Juni, 22 Oktober,

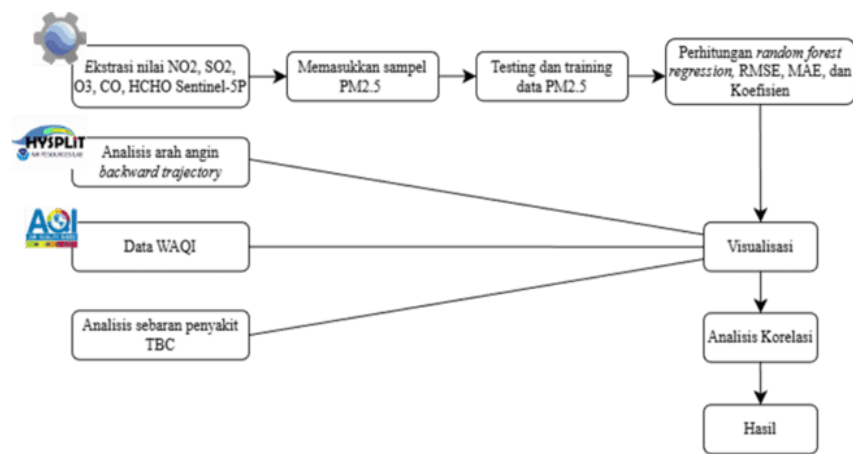
dan 29 Desember 2024. Pemilihan waktu ini bertujuan untuk melihat perbedaan pola lintasan angin pada periode muson timur dan muson barat. Muson timur dengan dominasi angin tenggara umumnya terjadi pada bulan Juni hingga September, sedangkan muson barat yang didominasi angin barat daya berlangsung pada bulan Desember hingga Maret (Suhery et al., 2023). Di antara kedua musim utama tersebut terdapat musim peralihan, yakni pada bulan April-Mei dan Oktober-November, pola angin pada musim ini cenderung lebih beragam (Ma'rufatin et al., 2024).

c. Sentinel-5P TROPOMI

Sentinel-5P TROPOMI dimanfaatkan dalam penelitian ini sebagai sumber utama data gas jejak atmosfer untuk mendukung estimasi konsentrasi PM_{2.5} permukaan. Lima parameter TROPOMI digunakan sebagai kovariat, yaitu kolom NO₂ troposferik, kolom vertikal SO₂, kolom total O₃, kolom terintegrasi CO, dan kolom HCHO troposferik. Data kelima gas tersebut diunduh dalam bentuk citra harian melalui Google Earth Engine, kemudian dipotong sesuai batas wilayah Jabodetabek dan disesuaikan sistem koordinatnya dengan data lain.

Setelah tahap pra-pengolahan, nilai masing-masing parameter TROPOMI diekstrak pada lokasi titik stasiun kualitas udara sehingga terbentuk dataset tabular yang berisi pasangan kovariat gas jejak dan nilai observasi PM_{2.5} dari WAQI. Dataset ini selanjutnya digunakan untuk melatih model Random Forest regresi.

3. Metode



Gambar 3 Diagram Alir Penelitian

a. Random Forest Regression

PM_{2.5} permukaan diestimasi menggunakan algoritma Random Forest regresi berbasis data satelit Sentinel-5P TROPOMI dan data stasiun pemantau kualitas udara, yang telah terbukti kompetitif dalam studi berbasis gas TROPOMI untuk estimasi PM_{2.5} permukaan di Thailand (Son et al., 2023).

Misalkan $\chi=(X_1, \dots, X_p)$ adalah vektor kovariat (NO₂, SO₂, O₃, CO, HCHO.). dan y adalah konsentrasi PM_{2.5} terukur di stasiun. Random Forest membangun himpunan T pohon keputusan $\{ft\}_{t=1}^T$ dan prediksi PM_{2.5} Particulat diberikan oleh rata - rata output semua pohon:

$$\hat{Y}(X) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T Ft(X)$$

Setiap pohon dilatih pada bootstrap sample berbeda dari data stasiun serta subset acak kovariat pada tiap pemisahan cabang, sehingga model lebih robust terhadap overfitting dan mampu menangkap hubungan non-linier antara parameter gas jejak dan PM_{2.5} (Son et al., 2023).

Kinerja model dievaluasi menggunakan MAE, RMSE, dan koefisien determinasi R^2 antara PM_{2.5} terukur (y_i) dan terestimasi (\hat{y}_i) pada data uji :

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

Di mana n adalah jumlah sampel dan \bar{y} adalah rata-rata observasi PM_{2.5}. MAE dan RMSE menggambarkan besarnya kesalahan absolut dan kuadrat rata-rata sedangkan R^2 menunjukkan variasi PM_{2.5} yang dapat dijelaskan oleh model.

Pemilihan NO₂, SO₂, O₃, CO, dan HCHO sebagai variabel utama didasarkan pada keterkaitan kimia dan sumber emisi yang kuat dengan pembentukan dan distribusi PM_{2.5}, seperti yang juga diterapkan oleh Son et al. yang mengestimasi PM_{2.5} hanya dari lima produk gas TROPOMI tersebut. NO₂ merepresentasikan emisi dari lalu lintas dan pembakaran bahan bakar fosil yang berkontribusi pada pembentukan aerosol nitrat, sedangkan SO₂ dari pembakaran batubara dan bahan bakar bersulfur mengalami oksidasi membentuk aerosol sulfat sebagai komponen penting partikulat halus. O₃ troposferik mencerminkan intensitas proses fotokimia yang berkaitan dengan pembentukan aerosol organik sekunder, CO berperan sebagai penjejak pembakaran tidak sempurna (Son et al., 2023). menjadi kontributor kimia paling dominan bagi variasi PM_{2.5}, dan HCHO dipilih sebagai proxy aktivitas VOC (*Volatile Organic Compounds*) serta reaksi fotokimia yang terkait dengan pembentukan ozon dan aerosol organik sekunder. VOC dan reaksi fotokimia, yang diketahui berkontribusi terhadap pembentukan ozon dan aerosol organik sekunder (Son et al., 2023).

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

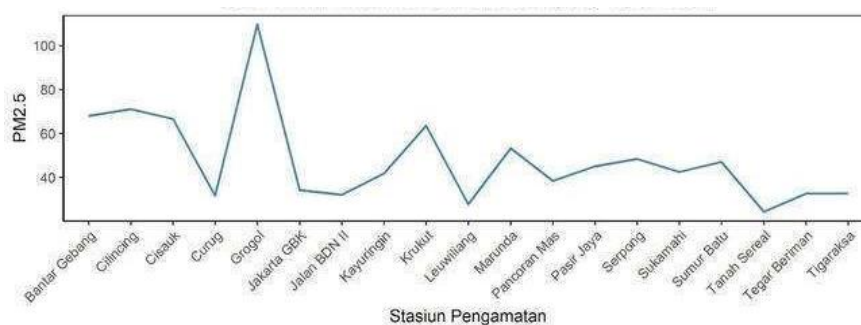
1. Analisis Data PM_{2.5} dari Data WAQI dan Sentinel-5P di Jabodetabek

a. Distribusi PM_{2.5} dari Data Sebaran Stasiun Pengamatan di Jabodetabek

Berdasarkan data yang diperoleh dari stasiun pengamatan *World Air Quality Index* (WAQI), dilakukan analisis terhadap konsentrasi PM_{2.5} di wilayah Jabodetabek untuk mengetahui tingkat kualitas udara di setiap lokasi. Nilai rata-rata PM_{2.5} yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar 4. Data tersebut adalah gambaran dari kondisi kualitas udara yang dipengaruhi oleh aktivitas perkotaan.

Berdasarkan grafik pada Gambar 4, rata-rata konsentrasi PM_{2.5} tertinggi pada tahun 2024 tercatat di stasiun pengamatan Grogol, Jakarta Barat, dengan nilai

indeks sebesar 109,61. Sebaliknya, nilai terendah terdapat di stasiun Tanah Sereal, Kota Bogor, dengan rata-rata indeks 24,39. Mengacu pada skala Indeks Kualitas Udara (AQI) US-EPA tahun 2016, kondisi di Grogol termasuk dalam kategori tidak sehat bagi kelompok sensitif. Pada tingkat ini, anak-anak, orang dewasa yang aktif, serta individu dengan gangguan pernapasan seperti asma berisiko mengalami dampak kesehatan, sehingga disarankan untuk mengurangi aktivitas fisik di luar ruangan dalam waktu lama. Sementara itu, kualitas udara di Tanah Sereal tergolong baik, yang menunjukkan kondisi udara relatif bersih dan tidak menimbulkan risiko kesehatan bagi masyarakat. Secara umum rata-rata nilai indeks kualitas udara di setiap stasiun pengamatan di wilayah Jabodetabek berada pada skala baik. Meskipun demikian, terdapat beberapa stasiun yang telah masuk ke dalam skala sedang, serta satu stasiun yang menunjukkan skala kondisi tidak sehat bagi kelompok rentan.



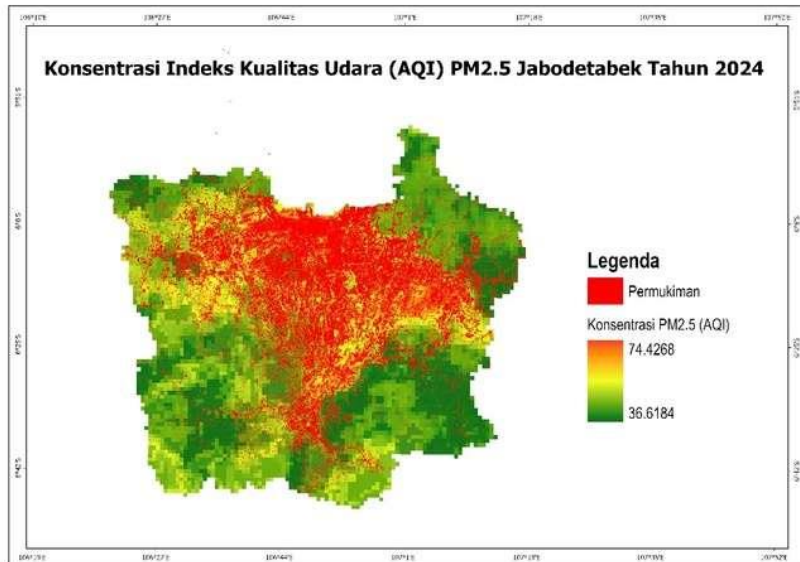
Gambar 4 Rata-rata PM_{2.5} (dalam AQI) di Jabodetabek Tahun 2024

b. Konsentrasi PM_{2.5} di Jabodetabek Berbasis Sentinel-5P

Berdasarkan peta sebaran PM_{2.5} di wilayah Jabodetabek, terlihat adanya variasi konsentrasi PM_{2.5} di antarwilayah, di mana konsentrasi PM_{2.5} yang relatif tinggi ditunjukkan oleh warna kuning hingga merah. Peta ini dihasilkan dari model Regresi Random Forest yang mengintegrasikan produk gas dari Sentinel-5P dengan data stasiun kualitas udara (AQI), sehingga mampu menggambarkan distribusi PM_{2.5} secara spasial dengan lebih baik di seluruh wilayah Jabodetabek.

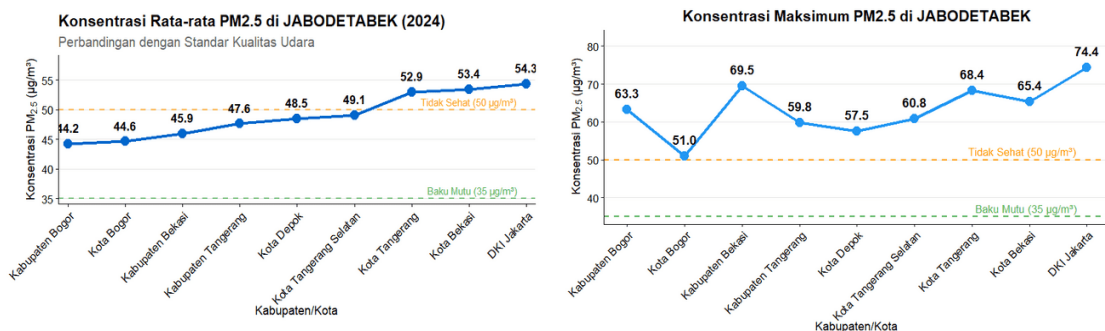
Berdasarkan Gambar 5, peta PM_{2.5} yang bersumber dari AQI menunjukkan bahwa konsentrasi tertinggi secara dominan berada di kawasan permukiman padat serta koridor transportasi utama. Zona berwarna kuning hingga merah di DKI Jakarta yang memanjang ke arah timur menuju Kota Bekasi mengindikasikan tingginya paparan PM_{2.5} pada area hunian perkotaan, yang erat kaitannya dengan aktivitas lalu lintas harian, kawasan industri, pelabuhan, serta kepadatan penduduk yang tinggi. Sebaliknya, wilayah non-permukiman seperti area dengan tutupan vegetasi yang lebih luas menunjukkan konsentrasi PM_{2.5} yang relatif lebih rendah. Pola ini berkesinambungan dengan konsep yang dikemukakan oleh (Son et al., 2023) bahwa kombinasi emisi transportasi, industri, dan pembakaran bahan bakar fosil tercermin pada tingginya konsentrasi gas jejak NO₂ dan CO, yang selanjutnya mendorong pembentukan aerosol sekunder, sehingga wilayah metropolitan dan area permukiman padat berperan sebagai hotspot PM_{2.5} dibandingkan wilayah di sekitarnya. Di bagian selatan dan barat, seperti Kabupaten Bogor dan beberapa bagian Tangerang, gradasi warna yang lebih hijau

menunjukkan konsentrasi PM_{2.5} yang lebih rendah, yang dapat dikaitkan dengan dominasi tutupan lahan vegetasi dan intensitas aktivitas antropogenik yang lebih kecil. Perbedaan kontras antara pusat permukiman perkotaan dan wilayah pinggiran ini juga dimungkinkan dipengaruhi oleh dinamika angin muson yang melintasi Jabodetabek, yang berperan dalam proses transport dan redistribusi PM_{2.5}, sehingga meningkatkan risiko paparan terutama pada kawasan permukiman padat.



Gambar 5 Konsentrasi Indeks Kualitas Udara (AQI) PM_{2.5} Jabodetabek Tahun 2024

Berdasarkan Gambar 6, puncak konsentrasi terlihat di Kota Tangerang, Kota Bekasi, dan terutama DKI Jakarta, yang pada analisis spasial sebelumnya juga muncul sebagai hotspot pada peta PM_{2.5} hasil Random Forest regresi berbasis TROPOMI. Kenaikan tajam di tiga wilayah ini konsisten dengan dominasi emisi antropogenik dari koridor jalan utama, kawasan industri dan logistik, serta kepadatan penduduk yang tinggi yang tercermin pada tingginya gas jejak NO₂ dan CO sebagai kovariat utama model.



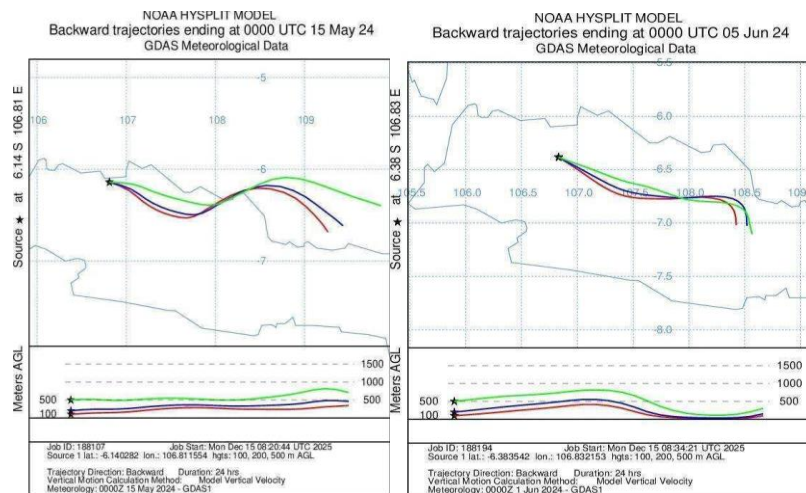
Gambar 6 Konsentrasi PM_{2.5} di Wilayah Jabodetabek

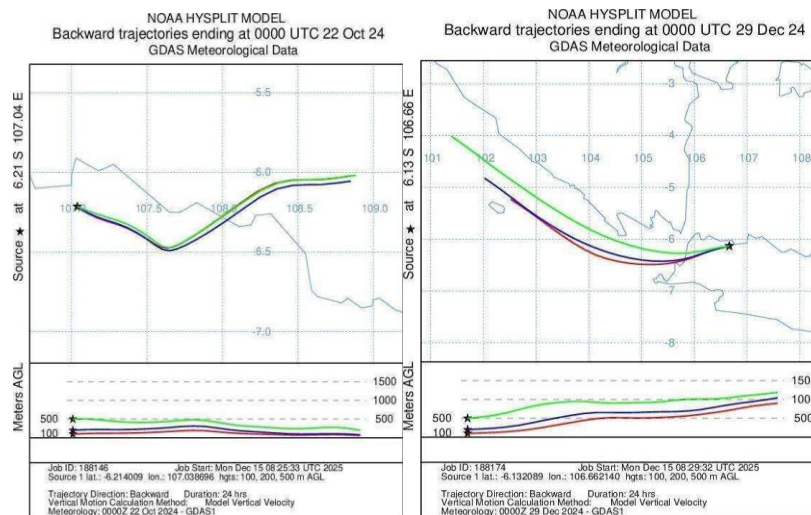
2. Analisis Angin Muson terhadap Distribusi PM_{2.5}

Berdasarkan hasil pemodelan *Backward trajectory* menggunakan NOAA HYSPLIT, analisis ini bertujuan untuk mengkaji peran angin muson timur dan angin muson barat terhadap konsentrasi PM_{2.5} di wilayah Jabodetabek. Model ini digunakan untuk menelusuri asal massa udara yang mencapai lokasi pengamatan

pada waktu tertentu sehingga dapat diidentifikasi kemungkinan sumber dan arah transport polutan. Analisis arah dan pola angin dilakukan melalui pemodelan pada empat tanggal berbeda, yaitu 15 Mei 2024 dengan titik awal di wilayah DKI Jakarta, 5 Juni 2024 di wilayah Depok, 22 Oktober 2024 di wilayah Bekasi, dan 29 Desember 2024 di wilayah Tangerang. Pemilihan lokasi tersebut didasarkan pada pertimbangan bahwa wilayah-wilayah tersebut menunjukkan konsentrasi $PM_{2.5}$ yang relatif tinggi. Sementara itu, pemilihan waktu dilakukan karena pada tanggal-tanggal tersebut konsentrasi $PM_{2.5}$ berada pada kondisi tinggi serta telah mewakili periode angin muson timur dan muson barat, sehingga memungkinkan analisis pengaruh variasi pola angin musiman terhadap distribusi polutan udara.

Berdasarkan Gambar 7, arah angin pada tanggal 5 Juni termasuk dalam periode muson timur, tanggal 29 Desember termasuk muson barat, sedangkan tanggal 15 Mei dan 22 Oktober berada pada periode muson peralihan. Arah angin pada tanggal 15 Mei, 5 Juni, dan 22 Oktober menunjukkan pola yang relatif sama, yaitu berasal dari benua Australia. Pada tanggal 5 Juni, arah angin sesuai dengan karakteristik muson timur yang umumnya membawa massa udara dari benua Australia. Sementara itu, pada tanggal 15 Mei dan 22 Oktober yang merupakan periode muson peralihan, arah angin cenderung lebih bervariasi karena dipengaruhi oleh perubahan sistem angin musiman, yang dapat berasal dari benua Australia maupun benua Asia. Namun, pada kedua tanggal tersebut, arah angin yang dominan tetap berasal dari benua Australia. Berbeda dengan periode sebelumnya, pada tanggal 29 Desember arah angin termasuk dalam muson barat yang berasal dari benua Asia.





Gambar 7 Arah angin menggunakan *backward trajectory* HYSPLIT di sekitar Jabodetabek

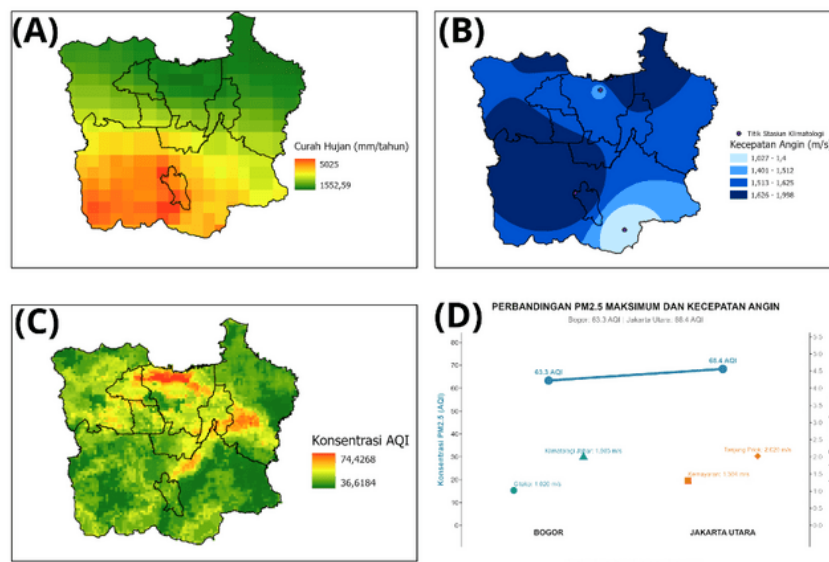
Analisis pola angin ini dilakukan untuk mengetahui sumber dan arah transport polutan $PM_{2.5}$. Pada tahun 2024, tingginya konsentrasi $PM_{2.5}$ di Jabodetabek lebih banyak dipengaruhi oleh angin muson timur yang berasal dari Benua Australia. Namun, kontribusi dari wilayah sekitar juga berperan dalam membawa polutan $PM_{2.5}$ melalui proses transport regional. Pola angin ini menunjukkan bahwa angin muson berperan penting dalam mengarahkan pergerakan polutan dari wilayah dengan aktivitas manusia yang tinggi, seperti kawasan industri, daerah perkotaan, dan jalur transportasi padat. Kecepatan angin yang relatif lemah serta lintasan angin yang cenderung mendatar menyebabkan proses penyebaran polutan tidak berlangsung secara optimal, sehingga $PM_{2.5}$ mudah terakumulasi di lapisan udara dekat permukaan.

Kondisi tersebut sejalan dengan data kualitas udara dari berbagai sumber yang mencatat tingginya konsentrasi $PM_{2.5}$ dan buruknya kualitas udara di masing-masing wilayah yang menjadi titik pengamatan pada tanggal tersebut. Tingginya konsentrasi $PM_{2.5}$ tidak hanya dipengaruhi oleh emisi lokal tetapi juga dapat dipengaruhi oleh proses transport polutan yang dikendalikan oleh pola angin muson barat dan timur serta kondisi atmosfer yang relatif stabil, dimana hal tersebut justru memperburuk kualitas udara di wilayah Jabodetabek sepanjang tahun 2024.

3. Analisis Kecepatan Angin dan Curah Hujan terhadap Distribusi $PM_{2.5}$

Kondisi kualitas udara, khususnya konsentrasi $PM_{2.5}$, dipengaruhi oleh berbagai faktor meteorologis seperti kecepatan angin dan curah hujan. Kecepatan angin berperan dalam proses dispersi polutan di atmosfer, di mana angin yang lebih kuat cenderung menyebarkan partikel sehingga menurunkan konsentrasi $PM_{2.5}$ pada suatu wilayah. Sebaliknya, kondisi angin yang lemah dapat menyebabkan akumulasi partikel di dekat permukaan. Hubungan antara variasi kecepatan angin dan distribusi konsentrasu $PM_{2.5}$ tersebut dapat dilihat pada Gambar 8. Oleh karena itu, variasi spasial $PM_{2.5}$ tidak dapat dilepaskan dari dinamika kedua parameter meteorologis tersebut yang umumnya dipantau oleh BMKG.

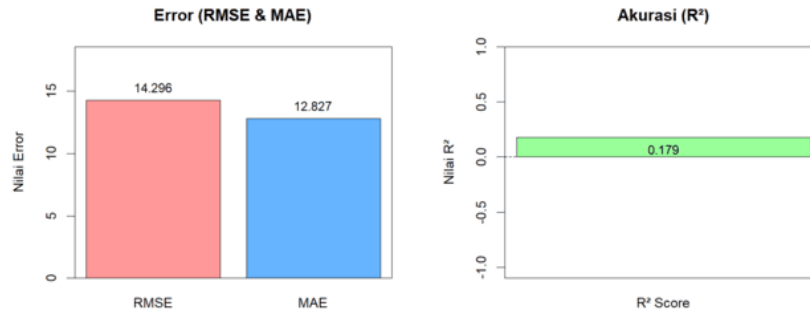
Hubungan antara curah hujan, kecepatan angin, dan distribusi PM_{2.5} menunjukkan kecenderungan yang tidak sepenuhnya linier. Secara umum, wilayah dengan curah hujan lebih tinggi dan sirkulasi angin yang lebih baik cenderung memperlihatkan konsentrasi PM_{2.5} yang relatif lebih rendah karena adanya proses pencucian atmosfer dan dispersi partikel. Namun demikian, pada beberapa lokasi masih dijumpai konsentrasi PM_{2.5} yang tinggi meskipun kondisi meteorologisnya mendukung penurunan polutan, yang mengindikasikan kuatnya pengaruh sumber emisi lokal dan aktivitas perkotaan.



Gambar 8 (A) Curah Hujan, (B) Kecepatan Rata - Rata Angin, (C) Konsentrasi PM_{2.5}, (D) Perbandingan Kecepatan Angin dan Konsentrasi PM_{2.5}

4. Nilai Akurasi Paparan PM_{2.5} di Jabodetabek

Hasil evaluasi performa model Random Forest berdasarkan nilai RMSE, MAE, dan koefisien determinasi (R^2) seperti pada Gambar 9 menunjukkan bahwa model memiliki kinerja yang rendah dalam memprediksi konsentrasi PM_{2.5}. Nilai RMSE sebesar 14,296 dan MAE sebesar 12,827 mengindikasikan besarnya kesalahan prediksi model. Sementara itu, nilai R^2 sebesar 0,179 menunjukkan bahwa model belum mampu menjelaskan variasi data PM_{2.5} dengan baik, bahkan memiliki performa yang lebih buruk dibandingkan dengan prediksi rata-rata. Hal ini mengindikasikan bahwa model Random Forest belum mampu menangkap hubungan yang signifikan antara variabel prediktor dan konsentrasi PM_{2.5} di wilayah Jabodetabek pada tahun 2024. Persebaran stasiun AQI yang berpusat di DKI Jakarta dan hanya sebagian kecil di kota lainnya akan menyebabkan sehingga akan menyebabkan AQI di DKI Jakarta lebih representative hasil pemodelannya serta ketidakpastian di DKI Jakarta lebih kecil dibandingkan wilayah lainnya.



Gambar 9 Uji Akurasi RMSE, MAE dan nilai Akurasi R²

5. Analisis Spasial Korelasi PM_{2.5} terhadap Kejadian TBC di Jabodetabek

a. Distribusi Spasial Penyakit TBC di Jabodetabek

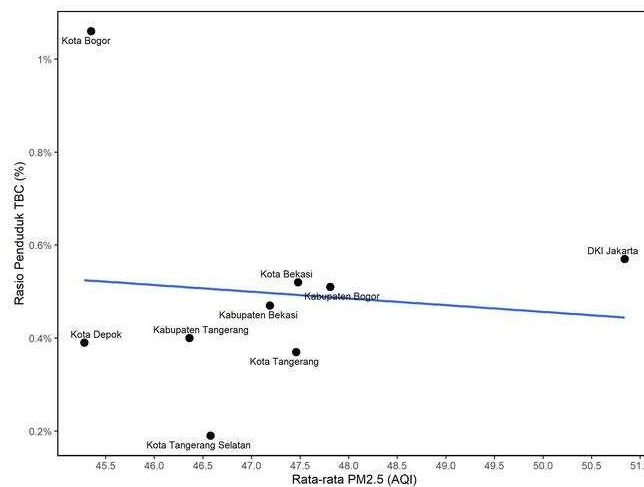
Data pengidap penyakit TBC didapatkan dari Badan Pusat Statistik Provinsi Jawa Barat, Provinsi DKI Jakarta dan Provinsi Banten. visualisasi yang digunakan untuk pengolahan data TBC ini adalah *Gradient* warna seperti pada Gambar 10, ini digunakan untuk memudahkan pembaca membaca informasi yang akan disampaikan melalui peta. visualisasi dimulai dengan warna kuning hingga warna merah, yang masing masing mewakili daerah dengan jumlah pengidap paling rendah atau paling banyak.



Gambar 10 Perbaran pengidap TBC di Jabodetabek tahun 2024

Dari hasil pengolahan, peta sebaran pengidap TBC selama tahun 2024 ini divisualisasikan dengan daerah terbanyak pengidap berwarna merah dan pengidap yang lebih rendah divisualisasikan berwarna kuning. Dari visualisasi peta tersebut dapat dilihat bahwa DKI Jakarta menjadi wilayah dengan warna merah yang paling menonjol dan disusul oleh Kabupaten Bogor. Sedangkan, Kota Tangerang, Kota Tangerang Selatan dan Kota Depok yang menunjukkan wilayah dengan kasus TBC terendah. Dari pola distribusi ini menunjukkan bahwa kepadatan penduduk dan aspek mobilitas antar wilayah ini dapat menjadi area konsentrasi sebaran penyakit TBC di jabodetabek.

Berdasarkan Gambar 11, hubungan antara rasio penduduk pengidap TBC dengan rata-rata $PM_{2.5}$ menunjukkan keterkaitan yang lemah. Ditunjukkan pada grafik yang menampilkan garis regresi menurun. Kota Bogor, memiliki rasio penduduk TBC tertinggi, yaitu 1,06%, tetapi nilai $PM_{2.5}$ relatif lebih rendah dibandingkan wilayah lainnya. Kemudian DKI Jakarta yang memiliki rata-rata $PM_{2.5}$ tertinggi, tetapi rasio penduduk TBC berada pada tingkat sedang. Sementara itu, Kota Tangerang Selatan memiliki rasio penduduk TBC terendah walaupun nilai rata-rata $PM_{2.5}$ berada pada kategori menengah. Pola tersebut menunjukkan bahwa variasi rasio penduduk TBC antar wilayah tidak sepenuhnya berhubungan dengan tingkat paparan $PM_{2.5}$. Hal ini mengindikasikan bahwa $PM_{2.5}$ bukan merupakan faktor tunggal yang mempengaruhi terjadinya TBC, melainkan dapat dipengaruhi oleh faktor lainnya, seperti kondisi sosial ekonomi ataupun akses terhadap layanan kesehatan.



Gambar 11 Grafik korelasi rasio penduduk TBC dan rata-rata $PM_{2.5}$ tahun 2024

D. SIMPULAN DAN SARAN

Pada akhir tahapan penelitian ini menunjukkan bahwa kualitas udara di Jabodetabek tahun 2024 bersifat heterogen, stasiun Grogol di Jakarta Barat mencatat indeks $PM_{2.5}$ tertinggi hingga menyentuh kategori *Unhealthy For Sensitive Group* (WAQI, 2024). Pemodelan Random Forest regresi berbasis lima parameter gas Sentinel-5P TROPOMI dan data AQI dapat menghasilkan peta $PM_{2.5}$ permukaan yang menghasilkan konsentrasi tertinggi di wilayah DKI Jakarta, Kota Bekasi, dan Kota Tangerang sebagai pusat aktivitas transportasi, industri serta pemukiman padat.

Analisis *Backward Trajectory* yang digunakan di HYSPLIT dapat membantu asal massa udara yang mencapai Jabodetabek pada waktu tertentu sehingga sumber potensial dan jalur transport polutan $PM_{2.5}$ dapat diidentifikasi secara lebih jelas. Lintasan yang relatif mendatar dan kecepatan angin yang lemah mengindikasikan proses pencampuran vertikal dan dispersi horizontal yang terbatas, sehingga partikel yang berasal dari kawasan industri, koridor transportasi, dan pusat permukiman di sekitar Jabodetabek cenderung bertahan lebih lama di lapisan dekat permukaan.

Distribusi spasial kasus TBC menunjukkan konsentrasi pengidap tertinggi berada di DKI Jakarta, diikuti oleh Kabupaten Bekasi, Kota Bekasi, dan Kabupaten Bogor. Meskipun demikian, hasil uji akurasi mengindikasikan bahwa model

Random Forest belum mampu merepresentasikan hubungan yang signifikan antara variabel prediktor dan konsentrasi PM_{2.5}, sehingga keterkaitan spasial antara kedua variabel tersebut belum dapat dijelaskan secara optimal pada wilayah Jabodetabek tahun 2024.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh dosen pengampu mata kuliah Penginderaan Jauh untuk Atmosfer yang telah membimbing selama melakukan penelitian ini. Kami berharap studi ini dapat memberikan wawasan yang lebih mendalam mengenai pengaruh angin muson terhadap distribusi PM_{2.5}.

DAFTAR RUJUKAN

- Alexeeff, S. E., Liao, N. S., Liu, X., Van Den Eeden, S. K., & Sidney, S. (2021). Long-term PM_{2.5} exposure and risks of ischemic heart disease and stroke events: Review and meta-analysis. *Journal of the American Heart Association*, *10*(1), 1–22. <https://doi.org/10.1161/JAHA.120.016890>
- Kemkes. (2022). *Laporan Program Penanggulangan Tuberkulosis*.
- Kemkes. (2025). *Gerakan Indonesia Akhiri TBC*. Kementerian Kesehatan Republik Indonesia.
- Lau, L. H. W., Wong, N. S., Leung, C. C., Chan, C. K., Tai, L. bun, Lau, A. K. H., Lin, C., & Shan Lee, S. (2023). Association of ambient PM_{2.5} concentration with tuberculosis reactivation diseases—an integrated spatio-temporal analysis. *IJID Regions*, *8*, 145–152. <https://doi.org/10.1016/j.ijregi.2023.08.001>
- Mamić, L., Gašparović, M., & Kaplan, G. (2023). Developing PM_{2.5} and PM₁₀ prediction models on a national and regional scale using open-source remote sensing data. *Environmental Monitoring and Assessment*, *195*(6). <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11212-x>
- Ma'rufatin, Yananto, & Pandoe, W. W. (2024). *Wind Characteristics of the North Coastal Region of Java Island According to Monsoon Variability ANIES MA'RUFATIN*, ARDILA YANANTO, WAHYU WIDODO PANDOE*. *25*(1), 20. <http://www.meteomanz.com>.
- Min, K. D., Kim, S. Y., & Cho, S. Il. (2023). Ambient PM_{2.5} exposures could increase risk of tuberculosis recurrence. *Environmental Health and Preventive Medicine*, *28*(1), 28–48. <https://doi.org/10.1265/ehpm.23-00131>
- Mustaqiman, A. N., Palaguna Umar, Y., Gustinasari, K., Dwi Irawandani, T., & Prayogo, W. (2025). Ambient PM_{2.5} Transport in Bandar Lampung City: HYSPLIT Model and Meteorological Profile. *Jurnal Sumberdaya Alam Dan Lingkungan*, *11*, 102–109. <https://doi.org/10.21776/ub.jsal.2024.011.03.1>
- Singh, T., Matsumi, Y., Nakayama, T., Hayashida, S., Patra, P. K., Yasutomi, N., Kajino, M., Yamaji, K., Khatri, P., Takigawa, M., Araki, H., Kurogi, Y., Kuji, M., Muramatsu, K., Imasu, R., Ananda, A., Arbain, A. A., Ravindra, K., Bhardwaj, S., ... Mor, S. (2023). Very high particulate pollution over northwest India captured by a high-density in situ sensor network. *Scientific Reports*, *13*(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39471-1>
- Son, R., Stratoulis, D., Kim, H. C., & Yoon, J. H. (2023). Estimation of surface PM_{2.5} concentrations from atmospheric gas species retrieved from TROPOMI using deep learning: Impacts of fire on air pollution over Thailand. *Atmospheric Pollution Research*, *14*(10). <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101875>
- Suhery, N., Mahendra Jaya, M., Tri Khikmawati, L., Sarasati, W., Estmirar Tanjov, Y., Fitria Larasati, R., Arkam Azis, M., Purwanto, A., Purnama Sari, I., Mainnah, M.,

- & Muda Satyawan, N. (2023). *The Relationship of Rainy and Wind Season With Lemuru Fishing Season Based on Pengembangan Fishing Port Oleh*. 14(1).
- UNICEF. (2024). *Air pollution accounted for 8.1 million deaths globally in 2021, becoming the second leading risk factor for death, including for children under five years*. UNICEF.
- Wang, Y., Bai, Y., Zhi, X., Wu, K., Zhao, T., Zhou, Y., Xiong, J., Zhu, S., Zhou, W., Hu, W., Zhang, L., & Meng, K. (2022). Two Typical Patterns of Regional PM2.5 Transport for Heavy Air Pollution Over Central China: Rapid Transit Transport and Stationary Accumulation Transport. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.890514>
- Yang, L., Li, C., & Tang, X. (2020). The Impact of PM2.5 on the Host Defense of Respiratory System. In *Frontiers in Cell and Developmental Biology* (Vol. 8). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fcell.2020.00091>