

POLA *TRAJECTORY* LINTAS BATAS PM_{2.5} DI LAPISAN TROPOSFER BAWAH (STUDI KASUS: JABODETABEK)

SIFA ISTIQOMAH



**PROGRAM STUDI KLIMATOLOGI TERAPAN
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2025**



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University

PERNYATAAN MENGENAI TESIS DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis dengan judul “Pola *Trajectory* Lintas Batas PM_{2.5} di Lapisan Troposfer Bawah (Studi Kasus: Jabodetabek)” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir tesis ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Desember 2025

Sifa Istiqomah
G2501241021



RINGKASAN

SIFA ISTIQOMAH. Pola *Trajectory* Lintas Batas PM_{2.5} di Lapisan Troposfer Bawah (Studi Kasus: Jabodetabek). Dibimbing oleh I PUTU SANTIKAYASA dan ANA TURYANTI.

PM_{2.5} merupakan jenis polutan yang dijadikan indikator kualitas udara yang memiliki ukuran $<2,5 \mu\text{m}$ dan dapat bergerak melewati batas-batas administrasi suatu wilayah tertentu. Sumber emisi PM_{2.5} dapat berasal dari sumber emisi lokal maupun sumber emisi lintas batas. Hal ini dipengaruhi oleh ketinggian sumber emisi dan faktor meteorologi. DKI Jakarta menjadi wilayah yang sering mendapat isu pencemaran udara. Oleh karena itu, diperlukan pengelolaan kualitas udara di daerah tersebut. Namun, informasi mengenai kontribusi sumber emisi antar wilayah masih terbatas. Oleh karena itu, perlu dilakukan pemodelan *trajectory* polutan yang dapat membantu menganalisis potensi kontribusi sumber emisi antar wilayah pada berbagai lapisan udara. Penelitian ini bertujuan untuk 1) menganalisis pola *trajectory* lintas batas (*transboundary*) polutan PM_{2.5} dan 2) melakukan estimasi kontribusi emisi terhadap kualitas udara wilayah DKI Jakarta tahun 2024 pada berbagai ketinggian udara di lapisan troposfer bawah.

Analisis fluktuasi konsentrasi PM_{2.5} DKI Jakarta tahun 2024 dilakukan menggunakan Microsoft Excel. Analisis konsentrasi PM_{2.5} juga dilakukan pada periode tidak ada hujan (curah hujan kurang dari 1 mm). Data konsentrasi PM_{2.5} pada periode tidak ada hujan dianalisis lebih lanjut pada musim hujan (Januari dan Februari), musim kemarau (Juli dan Agustus), dan musim peralihan (September). Analisis potensi sumber emisi lokal dilakukan menggunakan data arah dan kecepatan angin serta konsentrasi PM_{2.5} menggunakan *polar plot* di RStudio. Analisis potensi sumber emisi antar wilayah dilakukan menggunakan data konsentrasi PM_{2.5} periode tidak ada hujan dan data meteorologi GDAS1. Analisis ini dilakukan menggunakan pemodelan *Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Concentration Weighted Trajectory* (HYSPLIT CWT) untuk menunjukkan daerah yang berkontribusi terhadap konsentrasi PM_{2.5} di DKI Jakarta.

Hasil analisis menunjukkan saat terjadi angin muson barat, aliran udara yang bergerak menuju DKI1-DKI5 cenderung bergerak lurus dari arah barat. Sementara saat terjadi angin muson timur, aliran udara yang bergerak menuju DKI1-DKI5 cenderung memiliki lengkungan di arah utara Jakarta. Pada saat terjadi angin muson barat, aliran udara yang bergerak menuju DKI1-DKI5 pada ketinggian 15, 50, 100, dan 200 magl memiliki arah dominan yang sama antar lapisan. Sementara pada saat terjadi angin muson timur, aliran udara yang bergerak menuju DKI1-DKI5 memiliki arah dominan yang sama pada ketinggian 15, 50, dan 100 magl, tetapi terdapat perbedaan arah lintasan pada lapisan 200 magl. Estimasi kontribusi emisi PM_{2.5} antar wilayah di musim hujan berada dikisaran $5\text{-}40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sementara estimasi kontribusi emisi PM_{2.5} antar wilayah di musim kemarau berada dikisaran $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ hingga lebih dari $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Kata kunci: aliran udara, kualitas udara, HYSPLIT, PM_{2.5}, potensi kontribusi sumber emisi

SUMMARY

SIFA ISTIQOMAH. Transboundary Trajectory Patterns of Particulate Matter (PM_{2.5}) in the Lower Troposphere (Case Study: Jabodetabek). Supervised by I PUTU SANTIKAYASA and ANA TURYANTI.

PM_{2.5} is a type of pollutant used as an indicator of air quality that is $<2.5 \mu\text{m}$ and can move across the administrative boundaries of a particular region. Sources of PM_{2.5} emissions can originate from local sources or cross-border sources.

Meteorological factors, along with the source's emission height, exert an influence on this. DKI Jakarta is an area that often experiences air pollution issues. Therefore, air quality management is needed in this area. However, information on the contribution of emission sources between regions is still limited. Therefore, it is necessary to model pollutant trajectories that can help analyze the potential contribution of emission sources between regions at various air layers. This study aims to 1) analyze the transboundary trajectory patterns of PM_{2.5} pollutants and 2) estimate the contribution of emissions to air quality in DKI Jakarta in 2024 at various heights in the lower troposphere.

The analysis of PM_{2.5} concentration fluctuations in DKI Jakarta in 2024 was conducted using Microsoft Excel. The analysis of PM_{2.5} concentrations was also conducted during non-rainfall periods (rainfall less than 1 mm). PM_{2.5} concentration data during non-rainfall periods were further analyzed during the rainy season (January and February), dry season (July and August), and transition season (September). The analysis of potential local emission sources was conducted using wind direction and wind speed data as well as PM_{2.5} concentration data using polar plots in RStudio. The analysis of potential inter-regional emission sources was conducted using PM_{2.5} concentration data during non-rainfall periods and GDAS1 meteorological data. This analysis was conducted using Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Concentration Weighted Trajectory (HYSPLIT CWT) modeling to identify areas contributing to PM_{2.5} concentrations in DKI Jakarta.

The analysis results show that during the west monsoon, airflow moving towards DKI1-DKI5 tends to move straight from the west. Meanwhile, during the east monsoon, airflow moving towards DKI1-DKI5 tends to curve north of Jakarta. During the west monsoon, airflow moving towards DKI1-DKI5 at altitudes of 15, 50, 100, and 200 magl has the same dominant direction across all layers. Meanwhile, during the east monsoon, airflow moving towards DKI1-DKI5 has the same dominant direction at altitudes of 15, 50, and 100 magl, but there is a difference in the direction of the trajectory at the 200 magl layer. The estimated contribution of PM_{2.5} emissions between regions in the rainy season is in the range of $5\text{-}40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Meanwhile, the estimated contribution of PM_{2.5} emissions between regions in the dry season ranges from $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ to more than $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Keywords: air flow, air quality, HYSPLIT, PM_{2.5}, potential contribution of emission sources



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2025
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University

**POLA *TRAJECTORY* LINTAS BATAS PM_{2.5}
DI LAPISAN TROPOSFER BAWAH
(STUDI KASUS: JABODETABEK)**

SIFA ISTIQOMAH

Tesis
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister Sains pada
Program Studi Klimatologi Terapan

**PROGRAM STUDI KLIMATOLOGI TERAPAN
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2025**



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Tim Penguji pada Ujian Tesis:

1. Dr. Yudith Vega Paramitadevi, S.T., M.Si.

Judul Tesis

: Pola *Trajectory* Lintas Batas PM_{2.5} di Lapisan Troposfer Bawah
(Studi Kasus: Jabodetabek)

Nama

: Sifa Istiqomah

NIM

: G2501241021

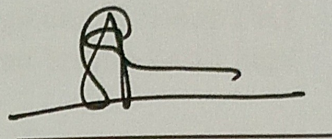
@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Disetujui oleh

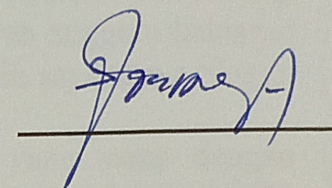
Pembimbing 1:

Dr. I Putu Santikayasa, S.Si., M.Sc.



Pembimbing 2:

Dr. Ana Turyanti, S.Si., M.T.



Diketahui oleh

Ketua Program Studi:

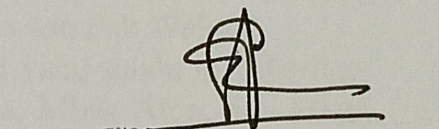
Dr. I Putu Santikayasa, M.Sc.

NIP 197902242005011002

Dekan Fakultas Matematika dan
Ilmu Pengetahuan Alam:

Dr. Berry Juliandi, S.Si., M.Si.

NIP 197807232007011001







PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanaahu wa ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak bulan Januari 2025 sampai bulan Agustus 2025 ini ialah Pola *Trajectory* PM_{2.5} di Lapisan Troposfer Bawah.

Terima kasih penulis ucapkan kepada para pembimbing, Bapak Dr. I Putu Santikayasa, S.Si., M.Sc. dan Ibu Dr. Ana Turyanti, S.Si., M.T. yang telah membimbing dan banyak memberi saran. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada moderator, seminar, dan penguji luar komisi pembimbing. Di samping itu, penghargaan penulis sampaikan kepada Dinas Lingkungan Hidup DKI Jakarta yang telah berkenan menyediakan data riset. Ungkapan terima kasih juga disampaikan kepada:

1. Bapak, Ibu, Kakak Khaerul Akmal Muttaqin, Adik Nizam Amirul Haq, dan Kakak Ipar Kakak Devi Sulistiawati serta seluruh anggota keluarga yang telah memberikan dukungan serta doa dan kasih sayangnya hingga saat ini.
2. Teman-teman sinergi yang memiliki perjuangan yang sama dengan penulis, yaitu Neisya, Sri Wahyuni, Silvia, Azzahra, Khairani, Ariffa, Fathin, Wewen, Rendy, Sapaat, Radyan, dan Rifky.
3. Teman-teman yang kebersamaian penulis sejak menempuh pendidikan di Geofisika dan Meteorologi Terapan FMIPA IPB hingga saat ini, yaitu Neisya, Sri Wahyuni, Deden, Iqbal Maulana.
4. Teman-teman dari prodi Klimatologi Terapan yang selalu memberikan bantuan dan dukungan kepada penulis, yaitu Mbak Nisa, Mbak Tika, Mbak Lina, Mbak Iin, Bang Imam, Kak Khansa dan Pak Wahyu.
5. Teman-teman Pascasarjana dari berbagai prodi yang selalu memberikan dukungan kepada penulis, yaitu Farisha, Azwa, Mbak Atun, dan Mbak Azza.
6. Teman-teman penulis yang menjadi tempat berkeluh kesah penulis dan selalu memberikan semangat kepada penulis, yaitu Siti Rahma, Fatimah Azzahra, Serin, Dibet, Rifyal, Rara.
7. Teman-teman penulis yang sudah menambah pengalaman baru yang menyenangkan bagi penulis, yaitu Hayya, Nisa, Teh Hanna, Teh Ami.
8. Semua pihak lainnya yang telah berkontribusi selama pengerjaan penelitian ini yang tidak dapat disebutkan satu-persatu.
9. Sifa Istiqomah, diri saya sendiri karena telah bertahan dan tetap melangkah walaupun sempat ingin menyerah.

Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, Desember 2025
Sifa Istiqomah



DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat	3
TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Karakteristik PM _{2.5}	5
2.2 Karakteristik <i>Trajectory</i>	6
2.3 Lapisan Troposfer Bawah	6
2.4 Stabilitas Atmosfer	7
METODE	9
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	9
3.2 Alat dan Bahan	9
3.3 Analisis data	10
HASIL DAN PEMBAHASAN	15
4.1 Fluktuasi Konsentrasi PM _{2.5} di DKI Jakarta Tahun 2024	15
4.2 Konsentrasi PM _{2.5} pada Periode Hari Tanpa Hujan	16
4.3 Potensi Sumber Emisi Lokal	17
4.4 Potensi Sumber Emisi Lintas Batas	19
SIMPULAN DAN SARAN	43
5.1 Simpulan	43
5.2 Saran	43
DAFTAR PUSTAKA	45
LAMPIRAN	53
RIWAYAT HIDUP	67

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

DAFTAR TABEL

1	Lokasi Stasiun Pemantau Kualitas Udara Ambien DKI Jakarta	9
2	Data yang digunakan dalam penelitian	10
3	Data periode tanpa hujan DKI Jakarta tahun 2024	16
4	Ringkasan polar plot menunjukkan sumber emisi lokal wilayah DKI	19
5	Ringkasan aliran udara saat terjadi angin muson barat dan angin muson	27
6	Daerah yang dilalui aliran udara pada bulan Januari 2024	27
7	Daerah yang dilalui aliran udara pada bulan Februari 2024	27
8	Daerah yang dilalui aliran udara pada bulan Juli 2024	28
9	Daerah yang dilalui aliran udara pada bulan Agustus 2024	28
10	Daerah yang dilalui aliran udara pada bulan September 2024	28
11	Potensi sumber emisi antar wilayah DKI Jakarta tahun 2024	40
12	Perbandingan nilai rata-rata PM _{2.5} observasi dengan estimasi kontribusi	42
13	Perbandingan nilai rata-rata PM _{2.5} observasi dengan estimasi kontribusi	42

DAFTAR GAMBAR

1	Peta administrasi lokasi penelitian	9
2	Diagram alir penelitian	14
3	Fluktuasi konsentrasi PM _{2.5} harian DKI Jakarta tahun 2024	16
4	Kisaran nilai konsentrasi PM _{2.5} wilayah DKI Jakarta tahun 2024	17
5	Polar plot wilayah DKI Jakarta tahun 2024 pada periode tanpa hujan	19
6	Aliran udara saat terjadi angin muson barat bulan Januari tahun 2024	22
7	Aliran udara saat terjadi angin muson barat bulan Februari tahun 2024	23
8	Aliran udara saat terjadi angin muson barat bulan Juli tahun 2024	24
9	Aliran udara saat terjadi angin muson barat bulan Agustus tahun 2024	25
10	Aliran udara saat terjadi angin muson barat bulan September tahun 2024 DKI Jakarta	26
11	Estimasi kontribusi sumber emisi PM _{2.5} wilayah DKI1 bulan Januari	30
12	Estimasi kontribusi sumber emisi PM _{2.5} wilayah DKI2 bulan Januari	31
13	Estimasi kontribusi sumber emisi PM _{2.5} wilayah DKI3 bulan Januari	32
14	Estimasi kontribusi sumber emisi PM _{2.5} wilayah DKI4 bulan Januari	33
15	Estimasi kontribusi sumber emisi PM _{2.5} wilayah DKI5 bulan Januari	34
16	Estimasi kontribusi sumber emisi PM _{2.5} wilayah DKI1 bulan Agustus	35
17	Estimasi kontribusi sumber emisi PM _{2.5} wilayah DKI2 bulan Agustus	36
18	Estimasi kontribusi sumber emisi PM _{2.5} wilayah DKI3 bulan Agustus	37
19	Estimasi kontribusi sumber emisi PM _{2.5} wilayah DKI4 bulan Agustus	38
20	Estimasi kontribusi sumber emisi PM _{2.5} wilayah DKI5 bulan Agustus	39

DAFTAR LAMPIRAN

1	Windrose wilayah DKI Jakarta tahun 2024 pada periode tanpa hujan	54
2	Aliran udara pada bulan Maret 2024 di DKI1	55



3	Aliran udara pada bulan Juni 2024 di DKI1	55
4	Aliran udara pada bulan Oktober 2024 di DKI1	56
5	Estimasi kontribusi sumber emisi PM _{2.5} wilayah DKI1 bulan Januari	57
6	Estimasi kontribusi sumber emisi PM _{2.5} wilayah DKI2 bulan Januari	58
7	Estimasi kontribusi sumber emisi PM _{2.5} wilayah DKI3 bulan Januari	59
8	Estimasi kontribusi sumber emisi PM _{2.5} wilayah DKI4 bulan Januari	60
9	Estimasi kontribusi sumber emisi PM _{2.5} wilayah DKI5 bulan Januari	61
10	Estimasi kontribusi sumber emisi PM _{2.5} wilayah DKI1 bulan Agustus	62
11	Estimasi kontribusi sumber emisi PM _{2.5} wilayah DKI2 bulan Agustus	63
12	Estimasi kontribusi sumber emisi PM _{2.5} wilayah DKI3 bulan Agustus	64
13	Estimasi kontribusi sumber emisi PM _{2.5} wilayah DKI4 bulan Agustus	65
14	Estimasi kontribusi sumber emisi PM _{2.5} wilayah DKI5 bulan Agustus	66