



MODEL RISIKO KESEHATAN DARI PM2.5 BERBASIS *AEROSOL OPTICAL DEPTH* DENGAN MENGGUNAKAN PENDEKATAN *DEEP LEARNING*

ILHAM RIZKI HIDAYAT



**PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU KOMPUTER
SEKOLAH SAINS DATA, MATEMATIKA, DAN INFORMATIKA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**

PERNYATAAN MENGENAI TESIS DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis dengan judul “Model Risiko Kesehatan dari PM2.5 Berbasis *Aerosol Optical Depth* dengan Menggunakan Pendekatan *Deep Learning*” 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, Juli 2026

Ilham Rizki Hidayat
M0503241022

- 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 menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



RINGKASAN

ILHAM RIZKI HIDAYAT. Model Risiko Kesehatan dari PM2.5 Berbasis *Aerosol Optical Depth* dengan Menggunakan Pendekatan *Deep Learning*. Dibimbing oleh IMAS SUKAESIH SITANGGANG dan HENDRA RAHMAWAN.

Paparan *Particulate Matter 2.5* (PM2.5) di wilayah metropolitan seperti Provinsi DKI Jakarta memicu lonjakan kasus Infeksi Saluran Pernapasan Akut (ISPA), namun upaya mitigasi seringkali terkendala oleh terbatasnya jangkauan spasial stasiun pemantau kualitas udara darat. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model prediksi PM2.5 spasial berbasis penginderaan jauh, memetakan Indeks Risiko Paparan Relatif (RER), dan memvalidasi keandalan model risiko tersebut menggunakan rekam medis pasien di dunia nyata. Pemodelan komputasi dieksekusi dengan membandingkan performa algoritma *Extreme Gradient Boosting* (XGBoost) dan *Bidirectional Long Short-Term Memory* (Bi-LSTM). Model dilatih menggunakan variabel prediktor berupa *Aerosol Optical Depth* dari satelit MODIS serta parameter meteorologi dari dataset ERA5, dengan variabel target yang difilter ketat dari tiga stasiun pemantau dengan integritas data tertinggi selama periode tahun 2024. Prediksi PM2.5 spasial dari model terbaik kemudian diintegrasikan dengan data kepadatan penduduk beresolusi tinggi untuk mengalkulasi indeks kerentanan wilayah tingkat kecamatan, yang selanjutnya diuji korelasinya terhadap data insiden ISPA menggunakan metode korelasi Pearson.

Hasil evaluasi komputasi membuktikan bahwa arsitektur Bi-LSTM secara signifikan mengungguli XGBoost dalam memprediksi konsentrasi polutan, dengan pencapaian tingkat *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) terbaik sebesar 12,94% di wilayah Kebon Jeruk. Kemampuan Bi-LSTM dalam memproses memori sekuensial dua arah terbukti sangat efektif untuk menangkap dinamika cuaca historis. Transformasi peta hasil prediksi menjadi Indeks RER berhasil mengidentifikasi zona merah kerentanan spasial (nilai RER > 1) yang secara signifikan terpusat di kawasan padat penduduk seperti Kecamatan Cakung, Kalideres, dan Cengkareng. Sebagai kebaruan utama penelitian, validasi epidemiologi secara empiris mengonfirmasi adanya korelasi positif yang signifikan antara nilai RER komputasi dengan jumlah pasien ISPA aktual di lapangan, di mana kekuatan korelasi tertinggi tercatat memuncak pada fase transisi musim Pancaroba, yaitu Periode SON ($r = +0,483$) dan MAM ($r = +0,479$). Hasil penelitian ini menegaskan bahwa sistem tata ruang komputasi yang dikembangkan menunjukkan tingkat validitas yang memadai, sehingga berpotensi untuk dijadikan landasan bagi pemerintah daerah sebagai purwarupa sistem peringatan dini untuk memprioritaskan alokasi sumber daya medis secara presisi pada wilayah dengan beban polusi tertinggi.

Kata kunci : Bi-LSTM, ISPA, Penginderaan jauh, PM2.5, Risiko paparan



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 menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

SUMMARY

ILHAM RIZKI HIDAYAT. A Health Risk Model for PM2.5 Based on Aerosol Optical Depth Using a Deep Learning Approach. Supervised by IMAS SUKAESIH SITANGGANG and HENDRA RAHMAWAN.

Exposure to Particulate Matter 2.5 (PM2.5) in metropolitan areas such as the Special Capital Region of Jakarta triggers a surge in cases of Acute Respiratory Infections (ARI), yet mitigation efforts are often hampered by the limited spatial coverage of ground-based air quality monitoring stations. This study aims to develop a spatial PM2.5 prediction model based on remote sensing, map the Relative Exposure Risk Index (RER), and validate the reliability of this risk model using real-world patient medical records. Computational modelling was carried out by comparing the performance of the Extreme Gradient Boosting (XGBoost) and Bidirectional Long Short-Term Memory (Bi-LSTM) algorithms. The model was trained using predictor variables comprising Aerosol Optical Depth from the MODIS satellite and meteorological parameters from the ERA5 dataset, with target variables rigorously filtered from three monitoring stations with the highest data integrity during the 2024 period. Spatial PM2.5 predictions from the best model were then integrated with high-resolution population density data to calculate sub-district-level vulnerability indices, which were subsequently tested for correlation with ARI incidence data using the Pearson correlation method.

The results of the computational evaluation demonstrate that the Bi-LSTM architecture significantly outperforms XGBoost in predicting pollutant concentrations, achieving the best Mean Absolute Percentage Error (MAPE) of 12.94% in the Kebon Jeruk area. The Bi-LSTM's ability to process bidirectional sequential memory proved highly effective in capturing historical weather dynamics. The transformation of the prediction map into a RER Index successfully identified red zones of spatial vulnerability (RER values > 1), which were extremely concentrated in densely populated areas such as the sub-districts of Cakung, Kalideres, and Cengkareng. As the primary innovation of this research, empirical epidemiological validation confirmed a significant positive correlation between computed RER values and the actual number of ARI patients in the field, with the strongest correlation recorded during the transitional phase of the changing seasons, namely the SON period ($r = +0,483$) and the MAM period ($r = +0,479$). These findings confirm that the computational spatial system developed has been proven to be factually valid, and is therefore ready for implementation by local governments as a prototype early warning system to prioritise the precise allocation of medical resources in areas with the highest pollution burden.

Keywords : Bi-LSTM, Exposure risk, ISPA, PM2.5, Remote sensing

MODEL RISIKO KESEHATAN DARI PM2.5 BERBASIS *AEROSOL OPTICAL DEPTH* DENGAN MENGGUNAKAN PENDEKATAN *DEEP LEARNING*

ILHAM RIZKI HIDAYAT

Tesis
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister pada
Program Studi Magister Ilmu Komputer

**PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU KOMPUTER
SEKOLAH SAINS DATA, MATEMATIKA, DAN INFORMATIKA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



@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.

IPB University

Penguji pada Ujian Tesis:
Hari Agung Adrianto S.Kom. M.Si., Ph.D.





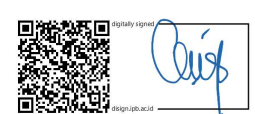
Judul Tesis : Model Risiko Kesehatan dari PM2.5 Berbasis *Aerosol Optical Depth* dengan Menggunakan Pendekatan *Deep Learning*
Nama : Ilham Rizki Hidayat
NIM : M0503241022

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Prof. Dr. Imas Sukaesih Sitanggang, S.Si., M.Kom.



Pembimbing 2:
Dr. Hendra Rahmawan, S.Kom., M.T.



Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Irman Hermadi, S.Kom, M.S., Ph.D.
NIP 197503112006041009



Dekan Sekolah Sains Data, Matematika, dan Informatika
Prof. Dr. Ir. Agus Buono, M.Si., M.Kom.
196607021993011001



Tanggal Ujian:
29 Juni 2026

Tanggal Lulus:

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 menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



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 Maret 2026 ini ialah polusi udara, dengan judul “Model Risiko Kesehatan dari PM2.5 Berbasis *Aerosol Optical Depth* dengan Menggunakan Pendekatan *Deep Learning*”.

Keberhasilan penelitian ini tidak lepas dari bimbingan, petunjuk, dan saran dari berbagai pihak. Terima kasih penulis ucapkan kepada:

1. Bapak Djuhana Hidayat dan Ibu Risnawati selaku kedua orang tua, serta seluruh keluarga besar yang tak henti-hentinya memberikan dukungan moril, materiil, serta melimpahkan doa dan kasih sayang yang tulus kepada penulis.
2. Prof. Dr. Imas Sukaesih Sitanggang, S.Si., M.Kom. dan Dr. Hendra Rahmawan, S.Kom., M.T. yang telah membimbing dan banyak memberi saran dalam menyelesaikan penelitian ini.
3. Hari Agung Adrianto S.Kom. M.Si., Ph.D. selaku dosen penguji pada sidang akhir tesis yang telah memberikan masukan berharga.
4. Seluruh dosen beserta staf Sekolah Sains Data, Matematika dan Informatika IPB atas ilmu, bantuan, dan kerjasamanya selama perkuliahan.
5. Teman-teman seperjuangan di Program Studi Ilmu Komputer IPB serta semua pihak yang telah banyak membantu yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.
6. Terakhir penulis ucapkan kepada diri sendiri yang telah berhasil melalui proses panjang perkuliahan, penelitian, dan menyelesaikan program magister ini dengan sebaik-baiknya.

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

Bogor, Juli 2026

Ilham Rizki Hidayat



DAFTAR ISI

@Hak cipta milik IPB University

DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
I PENDAHULUAN	9
1.1 Latar Belakang	9
1.2 Perumusan Masalah	11
1.3 Tujuan Penelitian	11
1.4 Manfaat Penelitian	11
1.5 Ruang Lingkup	12
II TINJAUAN PUSTAKA	13
2.1 Polusi Udara PM2.5 dan Dampak Kesehatan	13
2.2 AOD Satelit dan Parameter Meteorologi	14
2.3 XGBoost dan Bi-LSTM	14
2.4 Indeks Risiko Paparan Relatif (<i>Relative Exposure Risk</i> / RER)	16
2.5 Penelitian Terdahulu	17
III METODE	21
3.1 Data Penelitian	21
3.2 Kerangka Kerja Penelitian	22
3.3 Pengumpulan dan Praproses Data	22
3.4 Skenario Pemodelan Prediksi Kualitas Udara	28
3.5 Pemetaan Indeks Risiko Paparan Relatif (RER)	30
3.6 Skenario Evaluasi dan Validasi Empiris	31
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	33
4.1 Kinerja Model <i>Machine Learning</i> untuk Prediksi PM2.5	33
4.2 Distribusi Spasial dan Temporal Konsentrasi PM2.5 di DKI Jakarta	34
4.3 Analisis Indeks Risiko Paparan Relatif (<i>Relative Exposure Risk</i> / RER)	36
4.4 Validasi Model Risiko dengan Data Kejadian ISPA Aktual	39
V SIMPULAN DAN SARAN	43
5.1 Simpulan	43
5.2 Saran	43
DAFTAR PUSTAKA	45
LAMPIRAN	48
RIWAYAT HIDUP	52

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 menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



DAFTAR TABEL

1	Ringkasan penelitian terdahulu	18
2	Atribut data meteorologi ERA5	24
3	Ringkasan statistik konsentrasi PM2.5 Stasiun DLH DKI Jakarta	26
4	Konfigurasi <i>hyperparameter</i> final model XGBoost	29
5	Konfigurasi <i>hyperparameter</i> final model Bi-LSTM	30
6	Perbandingan kinerja model prediksi PM2.5	33
7	Sepuluh kecamatan dengan indeks RER tertinggi di musim kemarau	36



DAFTAR GAMBAR

1	Ilustrasi arsitektur algoritma XGBoost (Chen dan Guestrin 2016)	15
2	Struktur aliran pemrosesan Bi-LSTM (Ihianle <i>et al.</i> 2020)	16
3	Kerangka kerja penelitian	21
4	Dinamika spasial harian <i>Aerosol Optical Depth</i> (AOD) di DKI Jakarta	23
5	Dinamika spasial <i>boundary layer height</i> (BLH)	24
6	Matriks korelasi Pearson konsentrasi PM2.5 antar stasiun	25
7	Tren mingguan PM2.5 pada tiga stasiun utama	26
8	Tren harian PM2.5 pada Tiga Stasiun Utama	26
9	Distribusi kasus ISPA per kecamatan (tahun 2024)	27
10	Prediksi rata-rata konsentrasi PM2.5 per musim pada 2024	34
11	Peta distribusi kepadatan penduduk DKI Jakarta	36
12	Prediksi indeks RER per musim pada 2024	37
13	Prediksi indeks RER grid 1x1 km per musim pada 2024	38
14	Sebaran kasus ISPA aktual per musim (tahun 2024)	40
15	Grafik <i>scatter plot</i> dan regresi linier antara indeks RER dan kasus ISPA	41