

MODEL PREDIKSI KONSENTRASI PM_{2.5} MENGGUNAKAN ALGORITMA ORCHARD LSTM DENGAN *SPATIAL-GAP FILLING AOD*

AHMAD FATIHIN



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.

PERNYATAAN MENGENAI TESIS DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis dengan judul “Model Prediksi Konsentrasi PM2.5 Menggunakan Algoritma Orchard LSTM dengan *Spatial Gap-Filling* AOD” 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

Ahmad Fathin
M0503241045



@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



RINGKASAN

AHMAD FATIHIN. Model Prediksi Konsentrasi PM2.5 Menggunakan Algoritma Orchard LSTM dengan *Spatial Gap-Filling* AOD. Dibimbing oleh IMAS SUKAESIH SITANGGANG dan HENDRA RAHMAWAN.

Pencemaran udara akibat konsentrasi partikulat halus (PM2.5) merupakan salah satu permasalahan lingkungan utama di wilayah perkotaan yang berdampak terhadap kesehatan masyarakat. Pemanfaatan *Aerosol Optical Depth* (AOD) berbasis satelit memberikan cakupan spasial yang luas untuk pemantauan kualitas udara, namun ketersediaannya sering terhambat oleh *missing value* akibat tutupan awan dan keterbatasan pengamatan satelit. Penelitian ini bertujuan mengembangkan model prediksi konsentrasi PM2.5 melalui integrasi *spatial gap-filling* AOD Himawari-8 dan optimasi model *Long Short-Term Memory* (LSTM) menggunakan *Orchard Algorithm*. Data yang digunakan meliputi AOD Himawari-8, AOD *reanalysis* MERRA-2, parameter meteorologi ERA5, serta data PM2.5 dari lima stasiun pemantauan kualitas udara Dinas Lingkungan Hidup DKI Jakarta selama periode Januari–Desember 2024. Proses *spatial gap-filling* menggunakan algoritma Random Forest dan Extreme Gradient Boosting (XGBoost), sedangkan prediksi PM2.5 dilakukan menggunakan *Standard LSTM* dan *Orchard Algorithm-LSTM* (OA-LSTM). Hasil penelitian menunjukkan bahwa XGBoost menghasilkan performa terbaik pada proses *spatial gap-filling* dengan nilai R^2 sebesar 0,986, RMSE sebesar 0,0281, MAE sebesar 0,0173, dan MAPE sebesar 5,51%, sehingga mampu merekonstruksi data AOD secara lebih akurat. Pada tahap prediksi PM2.5, model OA-LSTM memberikan performa terbaik dengan nilai R^2 sebesar 0,698, RMSE sebesar 0,067, NSE sebesar 0,656, dan *Pearson Correlation* sebesar 0,837. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan data AOD hasil *spatial gap-filling* yang dipadukan dengan optimasi *hyperparameter* menggunakan *Orchard Algorithm* mampu meningkatkan akurasi prediksi dibandingkan pendekatan konvensional. Kontribusi utama penelitian ini adalah pengembangan kerangka prediksi PM2.5 yang mengintegrasikan rekonstruksi AOD berbasis *machine learning* dan optimasi *deep learning*, sehingga menghasilkan model yang lebih akurat serta berpotensi diterapkan pada sistem pemantauan kualitas udara berbasis satelit di wilayah dengan keterbatasan stasiun pengamatan.

Kata kunci: *Aerosol Optical Depth*, Himawari-8, OA-LSTM, PM2.5, *spatial gap-filling*.



@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.



SUMMARY

AHMAD FATIHIN. PM2.5 Concentration Prediction Model using Orchard Algorithm-Optimized LSTM with AOD Spatial gap-filling. Supervised by IMAS SUKAESIH SITANGGANG and HENDRA RAHMAWAN.

Fine particulate matter (PM2.5) air pollution is one of the major environmental challenges in urban areas due to its significant impact on public health. Satellite-derived Aerosol Optical Depth (AOD) provides broad spatial coverage for air quality monitoring; however, its application is often limited by missing observations caused by cloud cover and satellite retrieval constraints. This study aims to develop an hourly PM2.5 prediction model by integrating Himawari-8 AOD spatial gap-filling with Long Short-Term Memory (LSTM) optimized using the Orchard Algorithm. The datasets include Himawari-8 AOD, MERRA-2 reanalysis AOD, ERA5 meteorological variables, and hourly PM2.5 observations collected from five air quality monitoring stations operated by the Jakarta Environmental Agency during January–December 2024. The spatial gap-filling performance was evaluated using Random Forest and Extreme Gradient Boosting (XGBoost), while PM2.5 prediction performance was compared between Standard LSTM and Orchard Algorithm-LSTM (OA-LSTM). The results demonstrate that XGBoost achieved the best spatial gap-filling performance, with an R^2 of 0.986, RMSE of 0.0281, MAE of 0.0173, and MAPE of 5.51%, producing a more accurate reconstruction of missing AOD observations. For PM2.5 prediction, OA-LSTM outperformed the baseline models, achieving an R^2 of 0.698, RMSE of 0.067, NSE of 0.656, and a Pearson Correlation of 0.837. These findings indicate that integrating spatial gap-filled AOD data with Orchard Algorithm-based hyperparameter optimization substantially improves PM2.5 prediction accuracy compared with conventional approaches. The main contribution of this study is the development of an integrated framework that combines machine learning-based AOD reconstruction with deep learning optimization, providing a more accurate satellite-based PM2.5 prediction model for regions with limited ground-based air quality monitoring stations.

Keywords: Aerosol Optical Depth, Himawari-8, OA-LSTM, PM2.5, spatial gap-filling.



@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.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2026
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.

MODEL PREDIKSI KONSENTRASI PM_{2.5} MENGGUNAKAN ALGORITMA ORCHARD LSTM DENGAN SPATIAL-GAP FILLING AOD

AHMAD FATIHIN

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

IPB University





@Hak cipta milik IPB University

IPB University

Penguji pada Ujian Tesis:
Dr. Toto Haryanto, S.Kom., M.Si



- 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.



Judul Tesis : Model Prediksi Konsentrasi PM2.5 Menggunakan Algoritma Orchard LSTM dengan *Spatial Gap-Filling* AOD
Nama : Ahmad Fatihin
NIM : M0503241045

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
NIP. 196607021993021001

Tanggal Ujian:
13 Juli 2026

Tanggal Lulus:



@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



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 Juli 2026 ini ialah prediksi polutan dan pengisian celah data *aerosol optical density*, dengan judul “Model Prediksi Konsentrasi PM2.5 Menggunakan Algoritma Orchard LSTM dengan *Spatial Gap-Filling AOD*”.

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

1. Bapak Ahmad Fauzi dan Ibu Elis Mulyani 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. Dr. Toto Haryanto, S.Kom., M.Si. 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 Magister Ilmu Komputer IPB serta semua pihak yang telah banyak membantu yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.
6. Seseorang yang kelak akan menjadi pendamping hidup penulis, yang meskipun belum dipertemukan hingga karya ilmiah ini selesai disusun, penulis percaya bahwa setiap usaha hari ini adalah jalan menuju pertemuan yang telah ditakdirkan.
7. 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

Ahmad Fatihin

DAFTAR ISI

RINGKASAN	i
SUMMARY	iii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Ruang Lingkup Penelitian	4
II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 PM2.5 (<i>Particulate Matter 2.5</i>)	5
2.2 <i>Aerosol Optical Depth</i> (AOD)	5
2.3 Satelit Himawari-8	6
2.4 Reanalisis ERA5	6
2.5 Reanalisis MERRA-2	7
2.6 <i>Spatial Gap-Filling</i> AOD	7
2.7. Random Forest	12
2.8 XGBoost	12
2.9 Penerapan <i>Machine Learning</i> untuk Prediksi PM2.5	13
2.10 Long Short-Term Memory (LSTM)	21
2.11 Orchard Algorithm	23
2.12 LSTM berbasis Algoritma Orchard (OA-LSTM)	25
III METODE PENELITIAN	26
3.1 Alur Penelitian	26
3.2 Metode Pengumpulan Data	26
3.3 Praproses Data	30
3.4 Metrik Evaluasi Model	32
3.5 Pemodelan <i>Downscaling</i> dan <i>Spatial Gap-Filling</i> AOD	33
3.6 Pemodelan Orchard Algorithm - Long Short Term Memory	36
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	40
4.1 Praproses Data AOD Himawari-8, MERRA-2 dan ERA5	40
4.2 <i>Spatial Gap-Filling</i> dengan Random Forest dan XGBoost	42
4.3 Pemodelan Orchard Algorithm - Long Short Term Memory	48
V SIMPULAN DAN SARAN	57
5.1 Simpulan	57
5.2 Saran	57
DAFTAR PUSTAKA	59
RIWAYAT HIDUP	63



DAFTAR TABEL

1	Penelitian terkait <i>downscaling</i> dan <i>spatial gap-filling</i> AOD	9
2	Penelitian prediksi PM2.5 dengan <i>machine learning</i>	16
3	Data yang digunakan dalam penelitian	27
4	Data stasiun pemantauan PM2.5	28
5	Atribut data Himawari-8 yang digunakan dalam penelitian	28
6	Atribut data ERA5	29
7	Atribut data MERRA-2	30
8	Parameter <i>Hyperparameter Tuning</i> Random Forest dan XGBoost	35
9	<i>Grid Search</i> untuk <i>Hyperparameter Tuning</i> model LSTM dan OA-LSTM	38
10	Availabilitas data AOD Himawari	42
11	Analisis <i>variable importance</i>	43
12	Perbandingan performa model Random Forest dan XGBoost	48
13	<i>Missing value</i> dari data PM2.5	50
14	Statistik deskriptif data PM2.5 sebelum praproses	50
15	Statistik deskriptif data PM2.5 setelah praproses	50
16	Hasil optimasi <i>hyperparameter</i> model <i>Standard</i> LSTM dan OA-LSTM	51
17	Hasil evaluasi model prediksi PM2.5	52
18	Perbandingan waktu komputasi model	55
19	Perbandingan konvergensi pelatihan model	55



DAFTAR GAMBAR

1	Diagram model <i>spatial gap-filling</i> Himawari-8 AOD per jam menggunakan Random Forest	8
2	Alur RNN	21
3	Proses dalam <i>neuron</i> LSTM	21
4	Mekanisme optimasi Orchard Algorithm	24
5	Arsitektur OA-LSTM	25
6	Alur penelitian	26
7	Histogram distribusi variabel masukan untuk <i>proses spatial gap-filling</i> .	37
8	Perbandingan spasial AOD Himawari sebelum dan sesudah <i>gap-filling</i> pada kondisi data hilang ekstrem	47
9	Visualisasi spasial AOD Himawari sesudah <i>gap-filling</i>	47
10	Histogram distribusi variabel pada dataset prediksi PM2.5	45
11	<i>Scatter plot</i> hasil prediksi PM2.5 menggunakan model OA-LSTM	53