ESTIMASI KONSENTRASI NO_2 PERMUKAAN BERBASIS DATA SATELIT MENGGUNAKAN METODE *RANDOM FOREST*

NAZMA DHARAYANI MALAU

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

IPB University
Bogor Indonesia
@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
Perpustakaan IPB University

@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

IPB University
Bogor Indonesia

@Hak cipta milik IPB University

PERNYATAAN MENGENAI LAPORAN TESIS DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa laporan tesis dengan judul "Estimasi Konsentrasi NO_2 Permukaan Berbasis Data Satelit menggunakan Metode *Random Forest*" 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, Oktober 2025

Nazma Dharayani Malau
G2501212012

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.

Perpustakaan IPB University

IPB University
Bogor Indonesia

RINGKASAN

NAZMA DHARAYANI MALAU. Estimasi Konsentrasi NO_2 Permukaan Berbasis Data Satelit menggunakan Metode *Random Forest*. Dibimbing oleh RAHMAT HIDAYAT dan ANA TURYANTI.

Pemanfaatan metode pembelajaran mesin *Random Forest* yang mengintegrasikan data satelit, meteorologi, dan topografi ditujukan untuk pemantauan konsentrasi NO_2 ketika instrumen pengamatan permukaan terbatas. Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik data satelit Sentinel-5P TROPOMI, memetakan variasi spasial dan temporal konsentrasi NO_2 permukaan, serta mengevaluasi hasil estimasi terhadap pengamatan lapangan. Data utama berupa kolom troposfer NO_2 Sentinel-5P periode 2019–2023 dikombinasikan dengan parameter meteorologi ERA5/ERA5-Land (tekanan permukaan, suhu udara 2 m, kecepatan dan arah angin, curah hujan, *boundary layer height*) dan data ketinggian DEMNAS. Semua data diseragamkan ke resolusi 0,1° dan dikaitkan dengan pengamatan NO_2 permukaan di Stasiun Pemantauan Kualitas Udara (SPKU) DKI Jakarta dan Jawa Barat. Estimasi konsentrasi permukaan dilakukan menggunakan metode *Random Forest* dengan skema validasi silang 10-*fold* dan evaluasi performa pada data latih dan uji.

Analisis karakteristik Sentinel-5P menunjukkan pola musiman yang jelas, konsentrasi tinggi pada musim kemarau dan peralihan kemarau-hujan, menurun signifikan pada musim hujan akibat proses *wet scavenging*. Konsentrasi kolom tertinggi teramati di Jakarta dan koridor industri pesisir utara Jawa Barat, sedangkan nilai terendah terdapat di wilayah selatan yang didominasi hutan dan lahan pertanian. Hasil pemodelan menunjukkan kinerja tinggi pada data latih ($R^2 \approx 0{,}95$) dan cukup baik pada data uji ($R^2 \approx 0{,}64$) dengan error rendah. Secara spasial, konsentrasi tinggi NO_2 permukaan hasil estimasi terjadi di DKI Jakarta, Bekasi, Karawang, Subang, Indramayu, dan Cirebon, serta nilai terendah di kawasan dataran tinggi seperti Puncak. Secara temporal, konsentrasi meningkat pada puncak kemarau dan awal musim hujan, kemudian menurun pada akhir musim hujan.

Perbandingan hasil estimasi dengan pengamatan di SPKU menunjukkan kesesuaian pola bulanan yang baik di sebagian besar lokasi urban seperti DKI I–III, DKI V, GBK, dan Bekasi, dengan R^2 umumnya di atas 0,65. Walaupun model cenderung rendah pada polusi ekstrem. Di beberapa stasiun dengan topografi kompleks atau ventilasi atmosfer tinggi, seperti Bogor, Puncak, dan sebagian titik Bandung, kinerja model lebih rendah karena dinamika udara lokal tidak sepenuhnya tertangkap oleh variabel meteorologi berskala menengah. Temuan ini menegaskan pentingnya kombinasi data satelit dan pembelajaran mesin untuk pemantauan polusi udara, sekaligus menunjukkan perlunya perluasan jaringan stasiun dan verifikasi lapangan untuk meningkatkan keandalan estimasi.

Kata kunci: DKI Jakarta, Jawa Barat, NO_2 permukaan, *Random Forest*, Sentinel-5P

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 University
IPB University
Perpustakaan IPB University

IPB University
Bogor Indonesia
@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
Perpustakaan IPB University

SUMMARY

NAZMA DHARAYANI MALAU. Satellite-Based Estimation of Surface NO_2 Concentration Using Random Forest Method. Supervised by RAHMAT HIDAYAT and ANA TURYANTI.

The application of the Random Forest machine-learning method, integrating satellite, meteorological, and topographic data, was aimed at monitoring surface NO_2 concentrations where ground-based instruments are limited. This study sought to analyze the characteristics of Sentinel-5P TROPOMI satellite data, map the spatial and temporal variation of surface NO_2 concentrations, and evaluate the model estimates against ground observations.

The main dataset consisted of tropospheric NO_2 columns from Sentinel-5P spanning 2019–2023, combined with meteorological parameters from ERA5/ERA5-Land (surface pressure, 2-m air temperature, wind speed and direction, precipitation, and boundary layer height) and elevation data from DEMNAS. All datasets were harmonized to a 0.1° resolution and matched with surface NO_2 measurements from Air Quality Monitoring Stations (SPKU) in Jakarta and West Java. Surface concentrations were estimated using the Random Forest method with 10-fold cross-validation and performance evaluation on both training and testing data.

Analysis of Sentinel-5P characteristics revealed a distinct seasonal pattern, with higher concentrations during the dry season and the dry-to-wet transition, followed by a significant decline in the wet season due to wet scavenging processes. The highest tropospheric column concentrations were observed over Jakarta and the northern coastal industrial corridor of West Java, while the lowest values occurred in the southern regions dominated by forests and agricultural land. Model performance showed high accuracy for the training data ($R^2 \approx 0.95$) and good agreement for the testing data ($R^2 \approx 0.64$) with low errors. Spatially, elevated surface NO_2 concentrations were estimated in DKI Jakarta, Bekasi, Karawang, Subang, Indramayu, and Cirebon, while the lowest values appeared in highland areas such as Puncak. Temporally, concentrations increased during the peak of the dry season and the onset of the wet season, then declined toward the end of the wet season.

Comparison with ground-based monitoring stations (SPKU) demonstrated good agreement in monthly patterns at most urban sites such as DKI I–III, DKI V, GBK, and Bekasi, with R^2 generally above 0.65, although the model tended to underestimate during extreme pollution events. At several stations with complex topography or strong atmospheric ventilation, such as Bogor, Puncak, and parts of Bandung, model performance was lower due to local dynamics not fully captured by mesoscale meteorological variables. These findings highlight the value of combining satellite data with machine learning for air pollution monitoring, while also underscoring the need for expanded ground networks and field verification to enhance estimation reliability.

Keywords: Jakarta, Random Forest, Sentinel-5P, Surface NO_2, West Java

IPB University
Bogor Indonesia
@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.

© 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.

IPB University
Perpustakaan IPB University

ESTIMASI KONSENTRASI NO_2 PERMUKAAN BERBASIS DATA SATELIT MENGGUNAKAN METODE *RANDOM FOREST*

NAZMA DHARAYANI MALAU

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

IPB University
Bogor Indonesia
@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
Perpustakaan 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 University
IPB University
Perpustakaan IPB University

Penguji Luar Komisi pada Ujian Tesis:
Dr. Idung Risdyanto, S.Si., M.Sc

Judul Tesis : Estimasi Konsentrasi NO_2 Permukaan Berbasis Data Satelit Menggunakan Metode *Random Forest*
Nama : Nazma Dharayani Malau
NIM : G2501212012

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Dr. Rahmat Hidayat, S.Si., M.Si

Pembimbing 2:
Dr. Ana Turyanti, S.Si., M.T

Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Dr. I. Putu Santikayasa, S.Si., M.Sc
NIP 197902242005011002

Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam:
Dr. Berry Juliandi, S.Si., M.Si
NIP 197807232007011001

Tanggal Ujian: 25 September 2025

Tanggal Lulus:

IPB University
Bogor Indonesia
@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
Perpustakaan 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 milik IPB University
IPB University

PRAKATA

Alhamdulillah, penulis panjatkan kepada Allah subhanaahu wa ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Karya ilmiah dengan judul "Estimasi Konsentrasi NO_2 Permukaan Berbasis Data Satelit Menggunakan Metode *Random Forest*" merupakan sebuah perjalanan panjang dan luarbiasa bagi penulis dengan berbagai macam rintangannya.

Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Dr. Rahmat Hidayat, S.Si., M.Si selaku Ketua Komisi Pembimbing dan Ibu Dr. Ana Turyanti, S.Si., M.T selaku anggota komisi pembimbing atas kritik dan saran kepada penulis selama proses penulisan karya ini berlangsung.
2. Moderator seminar hasil Ibu Prof. Dr. Ika Amalia Kartika, S.TP., M.T, Penguji luar komisi pembimbing Bapak Dr. Idung Risdyanto, S.Si., M.Sc serta Bapak Dr. I Putu Santikayasa, M.Sc selaku Kaprodi yang telah memberikan banyak arahan dan masukan dalam seminar dan ujian tesis.
3. Pemerintah Kabupaten Labuhanbatu Selatan atas kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk melanjutkan Pendidikan ke jenjang yang lebih tinggi
4. Kementrian Lingkungan Hidup, Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika, Dinas Lingkungan Hidup DKI Jakarta serta *Center for Climate Risk and Opportunity Management in Southeast Asia and Pacific* (CCROM-SEAP) IPB University atas data-data yang telah disediakan
5. Seluruh dosen dan staf Prodi Klimatologi Terapan Departemen GFM Pascasarjana IPB atas ilmu, motivasi, dan bantuan selama penulis menjalani studi.
6. Ayah Nazwardi Malau, Ibu Hotma Sinaga, Amangboru Hamlet Tanjung, Bou Nurlela Ritonga serta seluruh keluarga besar yang tak pernah berhenti untuk mendoakan penulis. Semoga selalu dalam keadaan sehat dan bahagia disisa usianya.
7. Ahmad Kodir Jailani Tanjung, Nur Madinah Assyifa Tanjung dan Ahmad Ausy Hasayangan Tanjung yang telah menemani perjalanan penulis. Semoga Allah karuniai kebaikan dan perlindungan terbaikNya
8. Mbak Dara, Mbak Nastiti, Dinda, Sulis, Tya, Bang Ben, Bang Steven, Nizar, Bang Ronald dan seluruh Keluruh keluarga besar Klimatologi Terapan atas saran dan dukungan terhadap penulis.
9. Serta seluruh pihak terlibat yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Semoga karya ilmiah ini dapat menjadi amal jariyah penulis serta bermanfaat bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, Oktober 2025
Nazma Dharayani Malau

IPB University
Bogor Indonesia
@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
Perpustakaan IPB University

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xii
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Manfaat	3
II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Nitrogen dioksida (NO_2)	4
2.2 Sentinel-5 Precursor (S5P)	6
2.3 *Random Forest* (RF)	8
2.4 Variabel dalam Pemodelan *Random Forest*	10
2.5 Tinjauan Wilayah Kajian	12
III METODOLOGI PENELITIAN	13
3.1. Waktu dan Lokasi Penelitian	13
3.2. Alat dan Bahan	13
3.3 Tahapan Penelitian	14
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	20
4.1. Karakteristik Data TROPOMI NO_2	20
4.2. Evaluasi Performa Model *Random Forest* dalam Estimasi NO_2	24
4.3. Distribusi NO_2 Hasil Estimasi Model	29
V SIMPULAN DAN SARAN	40
5.1 Simpulan	40
5.2 Saran	41
DAFTAR PUSTAKA	42
LAMPIRAN	49
RIWAYAT HIDUP	53

IPB University
Bogor Indonesia

DAFTAR TABEL

1 Karakteristik spektrometer tropomi 7
2 Daftar sumber data yang digunakan untuk menyusun penelitian 13
3 Letak geografis SPKU 16
4 Kepadatan kolom troposfer NO_2 berdasarkan karakteristik wilayah 22
5 Ringkasan metrik evaluasi model pada masing-masing SPKU 28

DAFTAR GAMBAR

1 Reaksi kimia fase gas nitrogen oksida di troposfer (Logan 1983) 5
2 Siklus NO_2 (Nguyen *et al.* 2022) 5
3 Pengindraan jauh oleh tropomi (Eskes *et al.* 2022) 8
4 Algoritma *random forest regression* 9
5 Lokasi sebaran SPKU di wilayah kajian 15
6 Konsentrasi rata-rata bulanan kolom NO_2 periode 2019 – 2023 20
7 Konsentrasi rata rata musim kolom NO_2 periode 2019 – 2023 21
8 Konsentrasi rata rata tahunan periode 2019 – 2023 23
9 Matriks korelasi musiman antara variabel prediktor dan konsentrasi NO_2 permukaan di wilayah studi (2019–2023) 25
10 Diagram kepentingan variabel yang digunakan dalam model 26
11 *Scatter plot* NO_2 observasi dan estimasi : (a) Data latih, (b) Data uji 27
12 Estimasi konsentrasi NO_2 bulanan tahun 2019 31
13 Estimasi konsentrasi NO_2 bulanan tahun 2020 32
14 Estimasi konsentrasi NO_2 bulanan tahun 2021 33
15 Estimasi konsentrasi NO_2 bulanan tahun 2022 34
16 Estimasi konsentrasi NO_2 bulanan tahun 2023 35
17 Fluktuasi konsentrasi NO_2 rata-rata bulanan observasi dan estimasi 36
18 Fluktuasi konsentrasi NO_2 rata-rata musiman observasi dan estimasi 37
19 Fluktuasi konsentrasi NO_2 rata-rata tahunan observasi dan estimasi 38

DAFTAR LAMPIRAN

1 Sebaran spasial variabel dalam pemodelan *random forest* 50
2 *Scatter plot* data latih SPKU 51
3 *Scatter plot* data uji SPKU 52

© Hak cipta milik IPB University
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.
Perpustakaan IPB University