

ANALISIS PENGGUNAAN *COUPLED WEATHER-WILDLAND FIRE MODEL* DALAM PREDIKSI PROPAGASI KEBAKARAN LAHAN GAMBUT INDONESIA

MUDRIK HAIKAL



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 —

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.

PERNYATAAN MENGENAI TESIS DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis dengan judul “Analisis Penggunaan *Coupled Weather–Wildland Fire Model* dalam Prediksi Propagasi Kebakaran Lahan Gambut Indonesia” 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, Agustus 2025

Mudrik Haikal
G2501231016



RINGKASAN

MUDRIK HAIKAL. Analisis Penggunaan *Coupled Weather–Wildland Fire Model* dalam Prediksi Propagasi Kebakaran Lahan Gambut Indonesia. Dibimbing oleh MUH. TAUFIK dan YUDI SETIAWAN.

Lahan gambut merupakan ekosistem yang memiliki peran penting dalam penyimpanan karbon dan pengaturan hidrologi, namun sangat rentan terhadap kebakaran yang sulit dipadamkan karena sifat api yang bisa membara di bawah permukaan (*smouldering*). Studi ini mengevaluasi performa model Weather Research and Forecasting–Fire (WRF-Fire) dalam memprediksi penyebaran kebakaran lahan gambut di Indonesia, dengan fokus pada integrasi simulasi meteorologi dan *fire behavior*. Model dijalankan dengan input data Global Forecast System (GFS) dan hasil simulasi divalidasi menggunakan data observasi citra satelit Sentinel-2p serta data dari lima Automatic Weather Station (AWS) milik BMKG. Pendekatan ini bertujuan untuk menguji ketepatan prediksi spasial dan temporal model dalam kondisi lahan gambut tropis yang kompleks.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa WRF-Fire memprediksi area terbakar seluas 138,72 hektar, dibandingkan dengan luasan aktual dari Sentinel-2p sebesar 99,17 hektar, menghasilkan overprediksi sebesar 39,55 hektar. Dari sisi evaluasi akurasi model, nilai Probability of Detection (POD) mencapai 77,27%, sedangkan precision tercatat 68,00%, dengan nilai F1-Score sebesar 72,34% yang mencerminkan keseimbangan yang cukup baik antara deteksi kejadian nyata dan prediksi model. Arah angin dalam simulasi menunjukkan kesesuaian yang baik dengan arah asap pada citra Sentinel-2p, terutama dominasi angin dari Tenggara ke Barat Laut yang mendorong penyebaran asap dan api. Kecepatan angin di area kebakaran mencapai 6 m/s, naik tiga kali lipat dari wilayah di luar area kebakaran, seiring dengan peningkatan temperatur dan perubahan tekanan yang mempercepat penyebaran api.

Evaluasi variabel meteorologi dari model terhadap observasi AWS menunjukkan bahwa WRF-Fire memberikan estimasi yang cukup baik. Untuk curah hujan, model dan observasi sama-sama mencatat nilai 0 mm, dengan MAE dan pBias 0%. Kecepatan angin menunjukkan MAE 0,64 m/s dan pBias -8,24%, sedangkan arah angin menunjukkan MAE 14° dan pBias -9,89%. Suhu udara diprediksi cukup akurat dengan MAE 0,75°C, sedikit lebih tinggi dari studi sebelumnya yang menggunakan data time series. Variasi performa model antar stasiun menunjukkan bahwa model WRF-Fire mampu menangkap kondisi umum dengan cukup baik, meskipun terdapat deviasi yang signifikan di stasiun tertentu seperti Pandih dan Pulang Pisau. Secara umum, ini menunjukkan potensi model dalam aplikasi kebakaran tropis, namun tetap memerlukan kalibrasi lokal.

Meskipun hasilnya menjanjikan, studi ini juga mengidentifikasi keterbatasan penting dari WRF-Fire dalam konteks lahan gambut tropis Indonesia. Salah satunya adalah ketidakmampuan model untuk mempertimbangkan pengaruh kanal-kanal drainase yang umum ditemukan di lahan gambut, yang ternyata menjadi penyebab utama overprediksi area kebakaran dalam simulasi. Kanal yang terdeteksi oleh citra Sentinel-2p pada area overpredicted menegaskan pentingnya mempertimbangkan

aspek lokal dalam *fire behavior*. Karena WRF-Fire awalnya dikembangkan untuk wilayah wildland di Amerika Serikat, maka diperlukan pengembangan lebih lanjut agar asumsi-asumsinya relevan dengan karakteristik tropis dan sistem lahan gambut di Indonesia. Temuan ini membuka peluang untuk kolaborasi internasional dalam mengadaptasi dan mengembangkan model WRF-Fire agar lebih akurat untuk konteks Indonesia, terutama dalam mendukung sistem peringatan dini kebakaran berbasis model.

Kata kunci: Dinamika Angin, Mitigasi Kebakaran, QGIS, Sentinel-2p, WRF-Fire

SUMMARY

MUDRIK HAIKAL. The Analysis of Coupled Weather-Wildland Fire Model Application in Predicting Indonesian Peatland Fire Propagation. Supervised by MUH. TAUFIK and YUDI SETIAWAN.

Peatlands are critical tropical ecosystems that play a vital role in carbon storage and hydrological regulation, yet they are extremely vulnerable to fires, especially due to their smouldering characteristics beneath the surface. This study evaluates the performance of the Weather Research and Forecasting–Fire (WRF–Fire) model in simulating peatland fire propagation in Indonesia by integrating meteorological modeling and fire behavior simulation. The model was driven by GFS input data and validated using both Sentinel-2p satellite imagery and ground-based observations from five Automatic Weather Stations (AWS) operated by the Indonesian Meteorological, Climatological, and Geophysical Agency (BMKG). This integrated approach assesses the spatial and temporal accuracy of WRF–Fire under tropical peatland conditions, which are inherently complex and distinct from typical wildland environments.

The simulation results showed that WRF–Fire predicted a total burned area of 138.72 hectares, while Sentinel-2p observations reported 99.17 hectares, resulting in an overprediction of 39.55 hectares. The model achieved a Probability of Detection (POD) of 77.27%, a precision of 68.00%, and an F1-score of 72.34%, indicating a balanced capability between detection accuracy and overestimation. The model also accurately simulated wind direction and speed that aligned with the observed smoke plume in Sentinel-2p imagery, showing dominant southeasterly winds pushing the fire northwestward. Wind speeds reached 6 m/s within the fire area, tripling from the ambient 2 m/s, driven by increased temperature tendency and local pressure changes that accelerated fire spread.

Meteorological validation against AWS data demonstrated that WRF–Fire performed reasonably well across key variables. For precipitation, both observations and the model reported 0 mm, yielding 0% bias and 0 mm MAE. Wind speed showed an MAE of 0.64 m/s and a bias of -8.24%, while wind direction had an MAE of 14° and a bias of -9.89%, suggesting a slight leftward deviation in wind direction prediction. Air temperature simulations were also accurate, with an MAE of 0.75°C, slightly higher than a previous time-series-based study, which reported 0.68°C. While the model captured general meteorological trends well, discrepancies at specific stations such as Pandih and Pulang Pisau highlighted areas for potential local calibration and refinement.

Despite promising results, this study also highlights key limitations of WRF–Fire in representing tropical peatland fire dynamics. Notably, the model does not account for drainage canals, which are common in Indonesian peatlands and were shown in Sentinel-2p imagery to influence fire spread. The presence of canals corresponded with overpredicted fire areas, revealing a structural limitation in WRF–Fire’s assumptions, which were originally developed for wildland fires in the United States. This finding emphasizes the need for further development of WRF–Fire to incorporate peatland-specific fire behavior parameters. It also opens opportunities for collaboration with the model’s developers to improve its

applicability in Indonesia, particularly for operational early warning systems and landscape-level fire management under changing climate conditions.

Keywords: Fire Mitigation, QGIS, Sentinel-2p, Wind Dynamics, WRF-Fire

@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.



@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 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.

**ANALISIS PENGGUNAAN *COUPLED WEATHER-WILDLAND
FIRE MODEL* DALAM PREDIKSI PROPAGASI
KEBAKARAN LAHAN GAMBUT INDONESIA**

MUDRIK HAIKAL

Tesis
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister 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





@Hak cipta milik IPB University

IPB University

Tim Penguji pada Ujian Tesis:
Dr. Albertus Sulaiman



IPB University
— Bogor Indonesia —

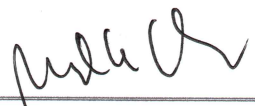
- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan 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.

Judul Tesis : Analisis Penggunaan *Coupled Weather-Wildland Fire Model*
dalam Prediksi Propagasi Kebakaran Lahan Gambut Indonesia
Nama : Mudrik Haikal
NIM : G2501231016

Disetujui oleh

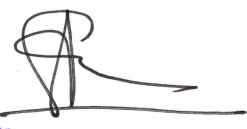
Pembimbing 1:
Prof. Dr. Muh. Taufik, S.Si., M.Si.

Pembimbing 2:
Dr. Yudi Setiawan, S.P., M.Env.Sc.




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






Tanggal Ujian: 21 Agustus 2025

Tanggal Lulus:

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 November 2024 sampai bulan Juni 2025 ini ialah Ilmu Keteknikan, Teknologi Informasi, dan Perencanaan, dengan judul “Analisis Penggunaan *Coupled Weather-Wildland Fire Model* dalam Prediksi Propagasi Kebakaran Lahan Gambut Indonesia”.

Penulisan tesis ini tidak terlepas dari dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penghargaan dan ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada:

1. Ketua komisi pembimbing Bapak Prof. Dr. Muh. Taufik, S.Si., M.Si. dan pembimbing 2 Bapak Dr. Yudi Setiawan, S.P., M.Env.Sc. yang telah membimbing, mendukung, memotivasi serta banyak memberi saran dalam menyelesaikan tesis ini.
2. Moderator seminar hasil Ibu Dr. Ir. Nora Herdiana Pandjaitan, DEA., penguji luar komisi pembimbing Dr. Albertus Sulaiman serta Bapak Dr. I Putu Santikayasa, M.Sc selaku Kaprodi yang telah memberikan banyak arahan dan masukan dalam seminar dan ujian tesis.
3. IPB University dan Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi (Kemendikbudristek) yang telah membiayai pendidikan penulis dalam menempuh pendidikan S-2 melalui Beasiswa Sinergi (S1-S2) dan Beasiswa Unggulan serta Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN) yang telah memberi kesempatan penulis dalam program *Research Assistant*.
4. Seluruh dosen dan staf Prodi Klimatologi Terapan Departemen GFM IPB pascasarjana atas ilmu, motivasi, dan bantuan selama penulis menjalani studi.
5. Kedua orang tua yaitu Ibunda Khotimatul Khasanah dan Ayahanda Misyadi serta kakak penulis Muhammad Seftian atas dukungan dan doa yang selalu dipanjatkan untuk keberhasilan penulis.
6. Mbak Regina BMKG yang telah memberikan bantuan data observasi dan mbak Nakhil yang ikut mendukung dalam penulis melakukan kegiatan riset.
7. Rekan-rekan mahasiswa Sarjana Prodi Meteorologi Terapan, mahasiswa Pasca Prodi Klimatologi Terapan, mahasiswa *fast track*, serta semua senior yang tidak bisa disebutkan satu-satu yang telah mewarnai masa studi dan selalu membantu setiap penulis mengalami kesulitan.

Tesis ini masih jauh dari kata sempurna, namun diharapkan dapat bermanfaat bagi banyak pihak khususnya dalam manajemen dan mitigasi bencana kebakaran hutan dan lahan, khususnya di lahan gambut Indonesia. Selain itu, semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, Agustus 2025

Mudrik Haikal

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat	3
II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Model Kebakaran Hutan	4
2.2 <i>Weather Reserach and Forecasting – fire</i> (WRF-Fire)	4
2.3 Lahan Gambut	5
2.4 Keterkaitan Variabel Cuaca dan Kebakaran Hutan dan Lahan	5
III METODE	7
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	7
3.2 Alat dan Bahan	7
3.3 Prosedur Kerja dan Analisis Data	7
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	13
4.1 Hasil parameterisasi model WRF	13
4.2 Performa Model WRF-Fire dalam Simulasi Luas Kebakaran Lahan Gambut	14
4.3 Performa Model WRF-Fire dalam Simulasi Variabel Meteorologi	15
4.4 Prediksi Propagasi Kebakaran Lahan Gambut	16
4.5 Limitasi Model WRF-Fire	18
V SIMPULAN DAN SARAN	19
5.1 Simpulan	19
5.2 Saran	19
DAFTAR PUSTAKA	20
LAMPIRAN	26
RIWAYAT HIDUP	28



DAFTAR TABEL

1	Rincian kombinasi skema parameterisasi fisik yang diuji	8
2	Ringkasan hasil evaluasi model parameter Mean Absolute Error dan Probability of Detection.	14
3	Penejelasan Hasil variabel meteorologi dari observasi (obs) <i>Automatic Weather Station</i> (AWS) Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) dan hasil luaran model WRF-Fire pada jam 09:30 WIB.	16

DAFTAR GAMBAR

1	Wilayah kajian penelitian di lahan gambut Kalimantan Tengah	7
2	Diagram Alir Penelitian	9
3	Domain wilayah kajian (https://jiririchter.github.io/WRFDomainWizard)	10
4	Skema <i>Weather Research and Forecasting – Fire</i> (WRF-Fire).	11
5	Skema perhitungan <i>dichotomous metrics</i> spasial	12
6	Boxplot total curah hujan hasil observasi dan simulasi harian WRF pada 1 Juli hingga 31 Oktober 2019	13
7	(a) Luasan kebakaran (warna hitam dari Sentinel-2p dan warna merah dari luaran WRF-Fire), arah angin, dan kecepatan angin di Jam 9.30 WIB hasil luaran model WRF-Fire, (b) Citra <i>true color composite</i> luasan kebakaran dan arah asap kebakaran dari Sentinel-2p.	15
8	Peta Prediksi propagasi kebakaran lahan gambut luaran model WRF-Fire.	17
9	Perbandingan area terbakar dari (a) luaran model WRF-Fire dan (b) Sentinel-2p, sedangkan untuk lingkaran warna biru tua adalah perbandingan area <i>overpredicted</i> model WRF-Fire dan Sentinel-2p.	18

DAFTAR LAMPIRAN

1	Karakteristik <i>Anderson's 13 surface fuel models</i> yang digunakan dalam Community Fire Behavior Model (CFBM) di model WRF-Fire	27
---	--	----