

## **PREDIKSI *FINE FUEL MOISTURE CODE* MENGGUNAKAN ALGORITMA *RANDOM FOREST* UNTUK SISTEM PERINGATAN DINI KEBAKARAN HUTAN**

**Sri Mulyaningsih<sup>1</sup>, Wahyu Hardyanto<sup>2</sup>, Alpon Sepriando<sup>3</sup>, Djuniadi Djuniadi<sup>4</sup>,**  
Universitas Negeri Semarang, Semarang<sup>1,2,4</sup>  
Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jakarta<sup>3</sup>  
[srimulyaningsih@students.unnes.ac.id](mailto:srimulyaningsih@students.unnes.ac.id)<sup>1</sup>

### **ABSTRAK**

Penelitian ini bertujuan untuk memprediksi *Fine Fuel Moisture Code* (FFMC) sebagai indikator tingkat kemudahan terbakar pada bahan bakar alami menggunakan algoritma *Random Forest*. FFMC merupakan komponen penting dalam sistem penilaian bahaya kebakaran yang digunakan untuk menggambarkan kondisi kekeringan bahan bakar ringan, sehingga prediksi yang akurat sangat dibutuhkan dalam upaya mitigasi kebakaran hutan dan lahan. Metode penelitian memanfaatkan variabel meteorologi berupa suhu maksimum, kelembaban relatif, kecepatan angin, dan curah hujan sebagai parameter input. Implementasi model dilakukan di Google Colab menggunakan bahasa pemrograman Python, disertai proses tuning hyperparameter melalui GridSearchCV untuk memperoleh konfigurasi model yang paling optimal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kelembaban relatif dan curah hujan merupakan fitur meteorologi yang paling berpengaruh dalam memprediksi nilai FFMC. Model *Random Forest* yang dikembangkan menunjukkan performa yang sangat baik, ditunjukkan oleh nilai *Mean Squared Error* sebesar 8,875 dan nilai *R-squared* sebesar 0,974, yang mengindikasikan kemampuan prediksi yang sangat tinggi. Temuan ini menegaskan bahwa pendekatan pembelajaran mesin berbasis *Random Forest* mampu menghasilkan estimasi FFMC yang presisi, sehingga model ini memiliki potensi besar untuk diintegrasikan ke dalam sistem peringatan dini kebakaran hutan dan lahan, mendukung proses pengambilan keputusan, meningkatkan efektivitas strategi mitigasi, serta memperkuat kesiapsiagaan dalam pengelolaan risiko kebakaran.

**Kata Kunci:** *Fine Fuel Moisture Code*, *Random Forest*, Fitur Meteorologi, Prediksi Bahaya, Kebakaran, *Machine Learning*.

### **ABSTRACT**

*This study aims to predict the Fine Fuel Moisture Code (FFMC) as an indicator of the ignitability level of natural fuels using the Random Forest algorithm. FFMC is an essential component of fire danger rating systems, used to describe the dryness level of fine fuels; therefore, accurate prediction is crucial for forest and land fire mitigation efforts. The research utilizes meteorological variables—including maximum temperature, relative humidity, wind speed, and rainfall—as input parameters. The model implementation is carried out in Google Colab using the Python programming language, accompanied by hyperparameter tuning through GridSearchCV to obtain*

*the most optimal model configuration. The results indicate that relative humidity and rainfall are the most influential meteorological features in predicting FFMC. The developed Random Forest model demonstrates excellent performance, as reflected by a Mean Squared Error of 8,875 and an R-squared value of 0,974, which signifies a very high predictive capability. These findings confirm that the machine-learning approach based on Random Forest is able to produce precise FFMC estimations, thereby giving the model strong potential for integration into early warning systems for forest and land fires. Such integration would support decision-making processes, enhance the effectiveness of mitigation strategies, and strengthen preparedness in managing fire-related risks.*

**Keywords:** *Fine Fuel Moisture Code, Fire Danger Prediction, Meteorological Features, Machine Learning, Random Forest.*

## **PENDAHULUAN**

Kebakaran hutan dan lahan (karhutla) merupakan permasalahan lingkungan yang terus berulang dan menjadi ancaman serius terhadap keberlanjutan dan keberlangsungan ekosistem, keanekaragaman hayati, serta kualitas hidup manusia. Dampak karhutla tidak hanya bersifat lokal, tetapi juga meluas secara regional dan global, terutama melalui degradasi lingkungan, gangguan kesehatan masyarakat, serta kerugian sosial dan ekonomi yang signifikan. Dalam konteks global, peningkatan frekuensi dan intensitas kebakaran hutan juga dikaitkan dengan perubahan iklim dan peningkatan kejadian cuaca ekstrem (Maulia, 2024).

Kebakaran hutan dan lahan menghasilkan emisi gas rumah kaca dan berbagai polutan udara, seperti karbon dioksida, karbon monoksida, dan nitrogen oksida, yang berkontribusi terhadap penurunan kualitas udara dan percepatan perubahan iklim. Emisi tersebut menciptakan ancaman serius bagi lingkungan dan keberlanjutan sumber daya alam (Jones et al., 2020). Secara umum, karhutla dipicu oleh dua

faktor utama, yaitu faktor alam dan faktor antropogenik, dengan dominasi faktor manusia. Berdasarkan laporan Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) tahun 2019, sekitar 99% kejadian karhutla disebabkan oleh aktivitas manusia, dan sekitar 80% lahan yang terbakar kemudian mengalami alih fungsi menjadi lahan perkebunan (Maulia, 2024).

Di Indonesia, khususnya di Kalimantan Tengah, kebakaran hutan dan lahan telah menjadi peristiwa yang berulang setiap tahun. Wangke (2011), sebagaimana dikutip dalam Turnip (2021), menyatakan bahwa aktivitas manusia, seperti pembukaan lahan untuk perkebunan industri dan pengembangan proyek lahan gambut dengan luasan lebih dari satu juta hektar, merupakan faktor utama yang menyebabkan kebakaran hutan di wilayah tersebut sulit dikendalikan. Besarnya kerugian lingkungan, sosial, dan ekonomi yang ditimbulkan oleh karhutla menunjukkan urgensi pengembangan sistem peringatan dini yang andal dan berbasis ilmiah.

Salah satu pendekatan yang banyak digunakan dalam sistem peringatan dini

kebakaran hutan adalah *Fire Weather Index* (FWI), khususnya komponen *Fine Fuel Moisture Code* (FFMC). Indeks ini merepresentasikan tingkat kelembapan bahan bakar halus yang telah mati dan sangat sensitif terhadap kondisi cuaca, seperti suhu udara, kelembapan relatif, kecepatan angin, dan curah hujan (Ellis et al., 2022; Ferrer Palomino et al., 2022). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa FFMC efektif digunakan sebagai indikator awal potensi kebakaran hutan karena mampu mencerminkan perubahan kondisi bahan bakar dalam waktu yang relatif singkat (Fan & He, 2021; Lee et al., 2020; Lei et al., 2022).

Perkembangan teknologi komputasi dan *machine learning* mendorong penggunaan algoritma berbasis data untuk meningkatkan akurasi prediksi kebakaran hutan. *Random Forest* merupakan salah satu algoritma yang banyak digunakan karena mampu menangani hubungan non-linier antar variabel, data berdimensi besar, serta relatif tahan terhadap *overfitting*. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa *Random Forest* memberikan kinerja yang baik dalam memprediksi kejadian kebakaran maupun indeks kebakaran berbasis data meteorologi (Fan & He, 2021; Lee et al., 2020).

Meskipun demikian, penelitian mengenai prediksi FFMC di Indonesia masih relatif terbatas, khususnya yang memanfaatkan data deret waktu (*time series*) berskala besar serta mengintegrasikan proses optimasi hyperparameter dan analisis sensitivitas model. Sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada pemetaan risiko kebakaran atau klasifikasi kejadian kebakaran, sementara

kajian prediktif berbasis regresi terhadap indeks kebakaran, terutama FFMC, belum banyak dikembangkan. Kondisi ini menunjukkan adanya celah penelitian yang perlu diisi untuk mendukung penguatan sistem peringatan dini kebakaran hutan yang berbasis data dan kondisi lokal Indonesia..

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja algoritma *Random Forest Regressor* dalam memprediksi nilai FFMC menggunakan parameter cuaca, meliputi temperatur maksimum, kelembapan relatif, kecepatan angin, dan curah hujan. Selain itu, penelitian ini menerapkan metode GridSearchCV untuk melakukan tuning hyperparameter guna memperoleh kombinasi parameter yang optimal dan meningkatkan performa model (Shekar & Dagnev, 2019). Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem peringatan dini kebakaran hutan yang lebih akurat dan andal, serta menjadi dasar dalam pengambilan langkah mitigasi yang lebih tepat sasaran, khususnya di wilayah yang rentan terhadap dampak perubahan iklim ekstrem.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan penerapan *machine learning* untuk memprediksi tingkat kemudahan terbakar kebakaran hutan dan lahan di Indonesia. Data yang digunakan berupa data *time series* yang mencakup variabel meteorologi dan lingkungan. Tahap awal penelitian meliputi pengumpulan dan pembersihan data untuk menangani nilai hilang dan *outlier*, dilanjutkan dengan analisis statistik deskriptif serta visualisasi data

guna memahami karakteristik dan pola hubungan antar variabel.

Data yang telah diproses selanjutnya dibagi menjadi data latih dan data uji untuk pengembangan model prediksi menggunakan algoritma *Random Forest*. Optimasi model dilakukan melalui penyesuaian hyperparameter dan seleksi fitur untuk memperoleh kinerja yang optimal. Evaluasi model dilakukan menggunakan *Mean Squared Error* dan koefisien determinasi ( $R^2$ ), serta analisis sensitivitas untuk menguji stabilitas dan keandalan model terhadap perubahan data. Seluruh proses pengolahan data, analisis, pemodelan, dan evaluasi dilakukan menggunakan bahasa pemrograman Python pada platform Google Colab.

## HASIL PENELITIAN

### Evaluasi Model Awal

Penelitian ini dimulai dengan mengevaluasi hasil eksplorasi data untuk memastikan kelayakan data sebagai dasar pengembangan model serta memberikan gambaran umum mengenai kondisi

meteorologi dan nilai FFMC yang dianalisis

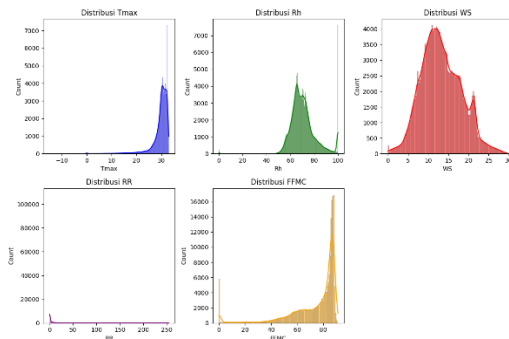
Data yang diperoleh dari proses pengumpulan berjumlah 202.926 data. Selanjutnya dilakukan proses pembersihan data terhadap nilai yang hilang (*missing values*) dan *outlier*, sehingga jumlah data yang digunakan dalam analisis menjadi 202.925 data. Selanjutnya, dilakukan analisis statistik deskriptif untuk memperoleh gambaran umum karakteristik data penelitian.

Hasil statistik deskriptif menunjukkan bahwa secara umum data merepresentasikan kondisi iklim tropis. Rata-rata suhu maksimum 29,66 °C, kelembapan relatif 70,72%, dan FFMC sebesar 73,38 yang mengindikasikan tingkat potensi kebakaran yang cukup tinggi. Variabilitas data tercermin dari nilai standar deviasi pada setiap variabel, sedangkan rentang nilai minimum dan maksimum menunjukkan adanya perbedaan kondisi cuaca dan lingkungan antarwilayah pengamatan. Rangkuman statistik deskriptif seluruh variabel disajikan pada Tabel 1.

**Tabel 1.**  
Statistik Deskriptif

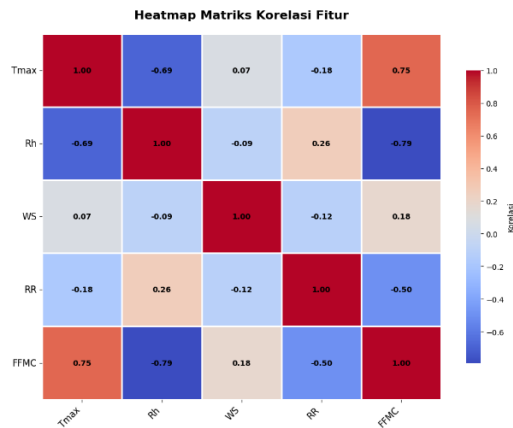
	Lat	Lon	Tmax	Rh	WS	RR	FFMC
Count	202925	202925	202925	202925	202925	202925	202925
Mean	-0.613194	117.506723	29.662373	70.721717	13.246540	5.750517	73.376198
Std	2.993173	15.893154	3.813745	10.165801	4.943403	13.292850	19.759522
Min	-7.374648	90.000000	-14.911475	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
25%	-2.965795	103.800000	29.194706	64.393238	9.731683	0.000000	65.901398
50%	-0.661167	117.500000	30.496243	69.128843	12.762883	0.000000	81.883724
75%	2.044266	131.300000	31.628212	74.764870	16.669011	4.800521	86.648580
Max	4.649497	145.000000	33.000000	100.000000	29.589388	254.050362	91.299489

Selain analisis statistik deskriptif, analisis visual dilakukan untuk menggambarkan distribusi masing-masing fitur, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.



**Gambar 1.**  
Visualisasi Distribusi Fitur

Data selanjutnya dianalisis menggunakan *heatmap* matriks korelasi untuk memvisualisasikan hubungan antar variabel, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.

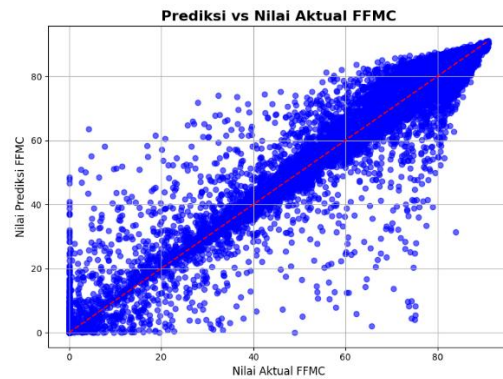


**Gambar 2.**  
Heatmap Matriks Korelasi Fitur

Setelah tahap eksplorasi data, dataset dibagi menjadi data pelatihan dan data pengujian. Model *Random Forest* Regressor kemudian dilatih

menggunakan data pelatihan untuk memprediksi nilai FFMC.

Perbandingan antara nilai prediksi dan nilai aktual FFMC pada data pengujian ditampilkan pada Gambar 3. Sebagian besar titik data berada di sekitar garis diagonal, yang menunjukkan tingkat kesesuaian yang baik antara hasil prediksi model dan nilai aktual, meskipun masih terdapat penyebaran pada beberapa rentang nilai FFMC.



**Gambar 3.**  
Grafik Hasil Prediksi dan Aktual Nilai FFMC

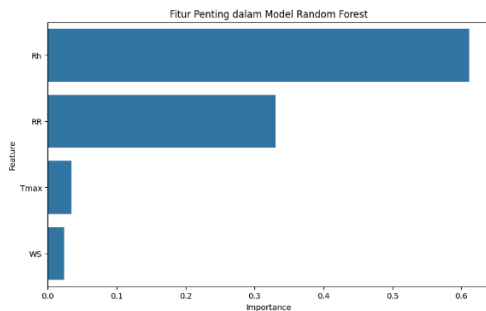
Tahap selanjutnya dilakukan evaluasi terhadap model sehingga diperoleh nilai *mean squared error* (MSE) yang dihasilkan adalah 8,875, yang menunjukkan kesalahan rata-rata kuadrat antara nilai prediksi dan nilai sebenarnya. Makin kecil nilai MSE, makin baik kemampuan model dalam memprediksi nilai target dengan tingkat kesalahan minimal.

Selain itu, R-squared ( $R^2$ ) tercatat sebesar 0,974, yang mendekati nilai maksimum 1. Nilai  $R^2$  yang tinggi ini menandakan bahwa model mampu menjelaskan sekitar 97% variasi dalam data target (FFMC) berdasarkan variabel input yang digunakan. Dengan demikian, model ini sangat efektif dalam melakukan

prediksi terhadap FFMC dan menunjukkan kapabilitas yang tinggi dalam mengakomodasi data yang tersedia.

**Analisis Fitur Penting**

Setelah pelatihan model selesai, dilakukan analisis terhadap tingkat kepentingan masing-masing fitur untuk mengidentifikasi variabel yang paling berpengaruh dalam prediksi FFMC. Adapun grafik fitur penting dalam model *Random Forest* ditunjukkan pada Gambar 4.



**Gambar 4.**

Grafik Fitur Penting dalam Model *Random Forest*

Selain itu, analisis dilakukan untuk mengidentifikasi kontribusi masing-masing variabel terhadap prediksi FFMC, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.

**Tabel 2.**

Nilai Prediksi Fitur Penting dalam Model *Random Forest*

Feature	Importance
Rh	0.611421
RR	0.330371
Tmax	0.034288
WS	0.023920

Berdasarkan hasil pada Tabel 2 *feature importance* dari model *random forest*, terlihat bahwa kelembapan relatif

(Rh) memiliki kontribusi terbesar dengan nilai 0,611. Hal ini menunjukkan bahwa kelembapan relatif secara signifikan mempengaruhi tingkat kelembapan bahan bakar dan, pada akhirnya, kemudahan terbakar.

Fitur kedua dengan kontribusi tertinggi adalah curah hujan (RR) dengan nilai 0,330, yang menunjukkan bahwa hujan memainkan peran besar dalam meningkatkan kelembapan bahan bakar di lapisan tanah atas, sehingga mengurangi risiko kebakaran.

Selanjutnya, temperatur maksimum (Tmax) memiliki nilai sebesar 0,034, yang menunjukkan kontribusi lebih kecil dalam prediksi FFMC, meskipun tetap memengaruhi kondisi kekeringan bahan bakar permukaan. Kecepatan angin (WS) memiliki kontribusi terkecil, dengan nilai sebesar 0,023, yang menunjukkan bahwa kecepatan angin mungkin lebih relevan untuk penyebaran api dibandingkan dengan kondisi kelembapan bahan bakar.

Secara keseluruhan, analisis ini memberikan wawasan penting bahwa kelembapan relatif dan curah hujan adalah faktor lingkungan utama yang memengaruhi kemungkinan terjadinya kebakaran.

**PEMBAHASAN**

Hasil evaluasi model *Random Forest Regressor* menunjukkan kinerja yang sangat baik dalam memprediksi nilai FFMC, dengan nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebesar 0,974 dan MSE yang relatif rendah. Nilai  $R^2$  yang tinggi mengindikasikan bahwa sebagian besar variasi FFMC dapat dijelaskan oleh variabel meteorologis yang digunakan dalam penelitian ini. Hal ini memperkuat bahwa pendekatan berbasis *machine*

*learning*, khususnya random forest, efektif dalam memodelkan hubungan nonlinier antara kondisi cuaca dan kelembapan bahan bakar halus, sebagaimana juga dilaporkan dalam berbagai studi sebelumnya terkait pemodelan kelembapan bahan bakar menggunakan metode berbasis data (Fan & He, 2021; Lee et al., 2020).

Kinerja model yang tinggi dalam penelitian ini juga searah dengan temuan Ellis et al. (2022) yang menyatakan bahwa indeks FFMC sangat responsif terhadap variasi kondisi atmosfer, terutama pada wilayah beriklim tropis dan subtropis. FFMC merepresentasikan tingkat kelembapan bahan bakar halus yang telah mati dan sangat cepat berubah akibat fluktuasi cuaca harian. Oleh karena itu, penggunaan data meteorologis harian sebagai input model dinilai tepat dan relevan dalam konteks prediksi potensi kebakaran hutan. Ferrer Palomino et al. (2022) juga menegaskan bahwa integrasi data cuaca dengan pendekatan komputasi mampu meningkatkan akurasi sistem peringatan dini kebakaran dibandingkan metode konvensional berbasis ambang batas statis.

Analisis *feature importance* pada model *Random Forest* menunjukkan bahwa  $R_h$  merupakan variabel paling dominan dalam mempengaruhi nilai FFMC, diikuti oleh  $RR$ ,  $T_{max}$ , dan  $WS$ . Dominasi kelembapan relatif ini konsisten dengan teori dasar dalam sistem Fire Weather Index yang menyatakan bahwa kadar air dalam bahan bakar halus sangat dipengaruhi oleh keseimbangan antara kelembapan udara dan proses evaporasi (Masinda et al., 2021; Wagner et al., 1974). Hasil ini juga sejalan dengan penelitian Zhang et al.

(2024) yang menemukan bahwa kelembapan relatif memiliki korelasi negatif yang kuat terhadap potensi kebakaran, terutama pada periode kering yang berkepanjangan.

Peran curah hujan sebagai faktor kedua paling berpengaruh menunjukkan bahwa presipitasi memiliki dampak langsung terhadap peningkatan kelembapan bahan bakar permukaan. Hujan, meskipun dalam jumlah kecil, dapat secara signifikan menurunkan nilai FFMC dalam waktu singkat. Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian sebelumnya bahwa curah hujan merupakan variabel kunci dalam menurunkan tingkat kekeringan bahan bakar, khususnya pada bahan bakar berukuran kecil hingga menengah (Lee et al., 2020). Dengan demikian, model yang mampu menangkap variabilitas curah hujan akan lebih andal dalam memprediksi dinamika FFMC.

Kontribusi temperatur maksimum yang relatif lebih kecil dibandingkan kelembapan dan curah hujan menunjukkan bahwa suhu berperan secara tidak langsung dalam mempengaruhi FFMC, terutama melalui peningkatan laju evaporasi. Suhu tinggi mempercepat pengeringan bahan bakar, namun dampaknya sangat bergantung pada kondisi kelembapan udara dan ketersediaan air di lingkungan sekitar. Hal ini sejalan dengan temuan dalam penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa suhu memiliki pengaruh signifikan terhadap kelembapan bahan bakar ketika dikombinasikan dengan variabel atmosfer lainnya, tetapi jarang menjadi faktor dominan secara tunggal (Lei et al., 2022).

Kecepatan angin menunjukkan kontribusi paling kecil dalam prediksi FFMC pada penelitian ini. Temuan tersebut dapat dijelaskan karena angin lebih berperan dalam proses penyebaran api dibandingkan dalam menentukan tingkat kelembapan bahan bakar halus (Sadeghi et al., 2025). Studi sebelumnya juga menyatakan bahwa kecepatan angin memiliki pengaruh terbatas terhadap nilai FFMC, tetapi sangat krusial dalam menentukan perilaku api setelah kebakaran terjadi (Ellis et al., 2022; Hayajneh & Naser, 2025).

Penerapan tuning hyperparameter menggunakan GridSearchCV terbukti berkontribusi dalam meningkatkan performa model. Optimasi parameter seperti jumlah pohon dan kedalaman maksimum memungkinkan model untuk menangkap pola kompleks dalam data tanpa meningkatkan risiko *overfitting* secara signifikan. Temuan ini sejalan dengan Probst et al. (2019) yang menekankan pentingnya optimasi hyperparameter dalam meningkatkan akurasi model random forest. Dengan konfigurasi parameter yang optimal, model mampu menyeimbangkan bias dan varians secara lebih efektif.

## SIMPULAN

Algoritma *Random Forest* Regressor mampu memprediksi nilai FFMC dengan akurasi yang tinggi, ditunjukkan oleh nilai  $R^2$  sebesar 0,974 dan MSE yang rendah sebesar 8,874. Hasil analisis menunjukkan bahwa kelembapan relatif dan curah hujan merupakan variabel meteorologi yang paling memengaruhi nilai FFMC, sedangkan temperatur maksimum dan kecepatan angin memberikan kontribusi

yang lebih kecil. Penerapan optimasi hyperparameter melalui GridSearchCV terbukti meningkatkan kinerja model.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ellis, T. M., Bowman, D. M. J. S., Jain, P., Flannigan, M. D., & Williamson, G. J. (2022). Global Increase in Wildfire Risk Due to Climate-Driven Declines in Fuel Moisture. *Global Change Biology*, 28(4), 1544–1559. <https://doi.org/10.1111/gcb.16006>
- Fan, C., & He, B. (2021). A Physics-Guided Deep Learning Model for 10-h Dead Fuel Moisture Content Estimation. *Forests*, 12(7), 933. <https://doi.org/10.3390/f12070933>
- Ferrer Palomino, A., Sánchez Espino, P., Borrego Reyes, C., Jiménez Rojas, J. A., & Rodríguez y Silva, F. (2022). Estimation of moisture in Live Fuels in The Mediterranean: Linear Regressions And Random Forests. *Journal of Environmental Management*, 322, 116069. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116069>
- Hayajneh, S. M., & Naser, J. (2025). Wind and Slope Influence on Wildland Fire Spread, a Numerical Study. *Fire*, 8(6), 217. <https://doi.org/10.3390/fire8060217>
- Jones, M. W., Smith, A., Betts, R., Canadell, J. G., Prentice, I. C., & Le Qu'ere, C. (2020). *Climate Change Increases the Risk of Wildfires*. <http://www.jstor.org/stable/resrep51248>
- Lee, H., Won, M., Yoon, S., & Jang, K. (2020). Estimation of 10-Hour Fuel Moisture Content Using Meteorological Data: A Model



- Inter-Comparison Study. *Forests*, 11(9), 982. <https://doi.org/10.3390/f11090982>
- Lei, W.-D., Yu, Y., Li, X.-H., & Xing, J. (2022). Estimating dead Fine Fuel Moisture Content of Forest Surface, Based on Wireless Sensor Network and Back-Propagation Neural Network. *International Journal of Wildland Fire*, 31(4), 369–378. <https://doi.org/10.1071/WF21066>
- Masinda, M. M., Li, F., Liu, Q., Sun, L., & Hu, T. (2021). Prediction Model of Moisture Content of Dead Fine Fuel in Forest Plantations on Maoer Mountain, Northeast China. *Journal of Forestry Research*, 32(5), 2023–2035. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01280-x>
- Maulia, S. T. (2024). Analisis Dampak Polusi Udara Akibat Kebakaran Hutan dan Lahan Serta Upaya Pengurangannya dalam Mempertahankan Ketahanan Energi. *Jurnal Ketahanan Nasional*, 29(3). <https://doi.org/10.22146/jkn.92761>
- Probst, P., Wright, M. N., & Boulesteix, A. (2019). Hyperparameters and Tuning Strategies for Random Forest. *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*, 9(3). <https://doi.org/10.1002/widm.1301>
- Sadeghi, M. S., Ghodrat, M., Sutherland, D., Simeoni, A., Sharples, J., & Kleine, H. (2025). Numerical Investigation of The Effect of Wind, Slope and Fuel Moisture on The Radiative and Convective Heating of Excelsior Fuels. *International Journal of Wildland Fire*, 34(4). <https://doi.org/10.1071/WF24115>
- Shekar, B. H., & Dagnev, G. (2019). Grid Search-Based Hyperparameter Tuning and Classification of Microarray Cancer Data. *2019 2nd International Conference on Advanced Computational and Communication Paradigms, ICACCP 2019, February*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/ICACCP.2019.8882943>
- Turnip, H. A. (2021). Collaborative Governance dalam Penanganan Masalah Kebakaran Hutan dan Lahan di Provinsi Riau. *Suparyanto Dan Rosad (2015)*, 5(3), 248–253.
- Wagner, C. E. Van, Forest, P., & Station, E. (1974). Structure of the Canadian. *Canadian Forestry Service Publication*, 1333.
- Zhang, Z., Tan, L., & Tiong, R. (2024). Research on Fire Accident Prediction and Risk Assessment Algorithm Based on Data Mining and Machine Learning. *Advances in Continuous and Discrete Models*, 2024(1). <https://doi.org/10.1186/s13662-024-03845-0>