Prediksi Suhu dan Kecepatan Angin di Area Camping Gunung Putri Lembang Menggunakan Algoritma Random Forest

Rizky Yohan Butarbutar
Fakultas Informatika
Universitas Telkom
Bandung
riskyyohan@students.telkomuniversity.ac.id

Aji Gautama Putrada
Fakultas Informatika
Universitas Telkom
Bandung
ajigps@telkomuniversity.ac.id

Utami Kusuma Dewi
Fakultas Informatika
Universitas Telkom
Bandung
utamikusdew@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Aktivitas camping dan pendakian di kawasan pegunungan sangat dipengaruhi oleh dinamika mikroklimat yang berubah cepat, khususnya suhu dan kecepatan angin, sementara informasi cuaca yang tersedia umumnya berskala makro dan kurang merepresentasikan kondisi lokal. Penelitian ini memanfaatkan data suhu dan kecepatan angin sebagai masukan dan menghasilkan prediksi kondisi 30 menit ke depan sebagai keluaran.Perubahan mikroklimat yang cepat meningkatkan risiko keselamatan pengunjung. Diperlukan sistem pemantauan dan prediksi lokal yang presisi dan berfrekuensi tinggi untuk mitigasi risiko di area camping.Sistem IoT dirancang menggunakan sensor DHT22 dan anemometer yang terhubung ke ESP32 untuk pencatatan data setiap satu menit. Data diproses melalui pembersihan, feature engineering (lag, rolling window, dan fitur waktu), lalu dimodelkan menggunakan Random Forest untuk dua target yaitu suhu dan kecepatan angin dengan horizon prediksi 30 menit.Model suhu dan angin menunjukkan akurasi sangat tinggi pada data uji, sehingga sistem layak digunakan untuk pemantauan dan prediksi mikroklimat jangka pendek.

Kata kunci: internet of things, random forest, prediksi cuaca, suhu, kecepatan angin, time-series forecasting.

Abstract

Outdoor activities in mountainous areas are strongly affected by rapidly changing microclimates, while available weather information is mostly macro-scale. This study uses temperature and wind speed as inputs to predict conditions 30 minutes ahead.Rapid microclimate changes increase safety risks, motivating the need for high-frequency local monitoring and prediction. An IoT system using DHT22 and anemometer connected to ESP32 records data every minute. After data cleaning and feature engineering (lags, rolling windows, time features), Random Forest models are trained to predict temperature and wind speed with a 30-minute horizon.Both models achieve very high accuracy on the test set, indicating suitability for short-term microclimate monitoring.

Keywords: internet of things, random forest, weather prediction, temperature, wind speed, time-series forecasting.

1.Pendahuluan Latar Belakang

Peningkatan aktivitas wisata alam dan pendakian gunung di Indonesia dalam beberapa tahun terakhir diikuti oleh meningkatnya risiko keselamatan akibat kondisi cuaca ekstrem yang sulit diprediksi. Data nasional mencatat lebih dari 60 kasus kematian pendaki sepanjang 2021–2025, dengan penyebab utama meliputi hipotermia, terpaan angin kencang, dan kecelakaan akibat kondisi cuaca buruk. Fenomena ini sejalan dengan temuan Leng et al. [1] yang menunjukkan bahwa kawasan pegunungan mengalami perubahan mikroklimat yang semakin dinamis akibat perubahan iklim, terutama pada parameter suhu dan kecepatan angin.

Gunung Putri Lembang merupakan salah satu destinasi camping populer di Kabupaten Bandung Barat dengan karakteristik mikroklimat yang berbeda dari wilayah sekitarnya. Perbedaan topografi menyebabkan fluktuasi suhu yang signifikan, khususnya pada malam hari, serta kemunculan angin kencang secara tiba-tiba di area terbuka. Informasi cuaca dari lembaga resmi seperti BMKG bersifat makroskal sehingga belum mampu merepresentasikan kondisi mikroklimat pada titik camping secara presisi. Kesenjangan informasi ini meningkatkan risiko keselamatan bagi pengunjung dan pengelola kawasan.

Perkembangan Internet of Things (IoT) memungkinkan pemantauan kondisi lingkungan secara real-time menggunakan sensor mikro seperti DHT dan anemometer. Namun, data sensor yang bersifat fluktuatif dan non-linier memerlukan pemodelan cerdas agar dapat menghasilkan prediksi yang akurat. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa algoritma ensemble, khususnya Random Forest, efektif dalam memodelkan fenomena cuaca di wilayah bertopografi kompleks [2]. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada skala wilayah yang luas atau hanya memprediksi satu parameter lingkungan. Integrasi pemantauan IoT berbasis mikro-lokasi dengan prediksi suhu dan kecepatan angin secara simultan menggunakan Random Forest masih terbatas [3].

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini mengembangkan sistem prediksi suhu dan kecepatan angin berbasis IoT dan algoritma Random Forest pada area camping Gunung Putri Lembang sebagai upaya penyediaan informasi cuaca presisi untuk mitigasi risiko dan peningkatan keselamatan wisata

alam.

Topik dan Batasannya

Penelitian ini berfokus pada prediksi mikroklimat di area camping Gunung Putri Lembang dengan lingkup dan batasan sebagai berikut. Lokasi penelitian dibatasi pada kawasan camping Gunung Putri yang terletak di Kabupaten Bandung Barat, dengan pertimbangan karakteristik cuaca yang fluktuatif dan tingginya aktivitas wisata alam. Data penelitian berupa suhu udara dan kecepatan angin yang dikumpulkan secara berkala menggunakan sensor DHT22 dan anemometer yang terintegrasi dengan sistem IoT.

Pengambilan data dilakukan dengan interval satu menit selama periode pengamatan tujuh hari berturut-turut. Penelitian ini hanya memfokuskan pada dua parameter lingkungan, yaitu suhu udara dan kecepatan angin, tanpa mempertimbangkan variabel meteorologis lain seperti kelembaban, tekanan udara, maupun curah hujan. Selain itu, penelitian tidak mencakup pengembangan aplikasi antarmuka pengguna, melainkan difokuskan pada proses pemodelan dan evaluasi kinerja prediksi.

Metode pemodelan yang digunakan adalah algoritma Random Forest dalam bentuk regresi, dengan evaluasi performa menggunakan metrik statistik Mean Absolute Error (MAE) dan Root Mean Square Error (RMSE)

Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang sistem pemantauan dan pengumpulan data mikroklimat menggunakan sensor DHT22 dan anemometer berbasis IoT untuk memperoleh data suhu udara dan kecepatan angin secara real-time di area camping Gunung Putri Lembang.
2. Membangun dan mengevaluasi model prediksi suhu udara dan kecepatan angin menggunakan algoritma Random Forest berdasarkan data sensor yang dikumpulkan, serta mengukur tingkat akurasi model menggunakan metrik MAE dan RMSE.

2. Studi Terkait

Prediksi parameter cuaca pada wilayah dengan topografi kompleks, khususnya daerah pegunungan, merupakan tantangan signifikan karena tingginya variabilitas mikroklimat dan sifat data yang non-linear. Leng et al. [1] menunjukkan bahwa perubahan iklim global telah memperkuat dinamika mikroklimat pegunungan, terutama pada fluktuasi suhu dan pola angin, sehingga pendekatan prediksi berbasis skala makro menjadi kurang representatif. Studi ini menegaskan urgensi pemodelan mikroklimat, meskipun belum menyediakan model prediktif operasional berbasis data lapangan.

Pendekatan machine learning, khususnya metode ensemble, banyak dilaporkan efektif dalam menangani kompleksitas fenomena atmosfer. Khattak et al. [2] membuktikan bahwa model ensemble mampu meningkatkan akurasi prediksi wind shear yang bersifat non-linear, sementara Kim et al. [4] menunjukkan keunggulan machine learning adaptif dalam memodelkan fenomena lingkungan pada wilayah bertopografi tidak beraturan. Walaupun domain aplikasinya berbeda, temuan tersebut memperkuat relevansi penggunaan machine learning pada lingkungan pegunungan yang memiliki dinamika spasial dan temporal yang kompleks.

Sejumlah penelitian secara khusus mengevaluasi kinerja Random Forest dalam prediksi parameter cuaca. Ho et al. [5] serta Sathyaraj dan Sankardoss [6] melaporkan bahwa Random Forest Regression menghasilkan prediksi kecepatan angin jangka pendek dengan akurasi dan stabilitas yang tinggi. Meenal et al.

[7] juga menunjukkan bahwa Random Forest efektif dalam memodelkan hubungan non-linear pada prediksi cuaca multivariabel. Selain itu, studi perbandingan oleh Indrasari dan Suhendar [3] mengonfirmasi bahwa Random Forest memiliki performa kompetitif dibandingkan algoritma machine learning lainnya. Namun, sebagian besar penelitian tersebut masih dilakukan pada skala wilayah yang luas atau pada lingkungan pesisir dan perkotaan, sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi mikroklimat dataran tinggi.

Dari perspektif sistem pemantauan lingkungan, Bamal et al. [8] menegaskan potensi besar machine learning dalam memahami dinamika lingkungan terkait perubahan iklim, meskipun kajiannya bersifat konseptual dan belum berfokus pada aplikasi mikro-lokasi. Ramadan et al. [9] menunjukkan bahwa integrasi IoT dan kecerdasan buatan memungkinkan monitoring lingkungan secara real-time dengan respons cepat, namun implementasinya masih terbatas pada deteksi kejadian, bukan pada prediksi mikroklimat. Hal ini menunjukkan bahwa pemanfaatan data sensor IoT berfrekuensi tinggi untuk pemodelan prediktif jangka pendek masih relatif terbatas.

Dalam hal evaluasi model, Deb et al. [10] menekankan pentingnya penggunaan metrik MAE dan RMSE untuk menilai kinerja model regresi non-linear secara objektif dan kuantitatif. Metrik ini menjadi standar evaluasi yang relevan untuk mengukur akurasi prediksi suhu dan kecepatan angin pada penelitian ini. Berdasarkan keseluruhan kajian tersebut, dapat disimpulkan bahwa meskipun efektivitas Random Forest dan metode ensemble dalam memprediksi fenomena cuaca telah banyak dibuktikan, masih terdapat kesenjangan penelitian yang jelas. Mayoritas studi belum mengintegrasikan pemantauan mikroklimat berbasis IoT dengan pemodelan prediktif berbasis data mikro-lokasi berfrekuensi tinggi, serta cenderung mengkaji parameter lingkungan secara terpisah. Oleh karena itu, penelitian ini mengisi celah tersebut dengan

mengembangkan sistem terintegrasi berbasis IoT dan algoritma Random Forest untuk memprediksi suhu dan kecepatan angin secara simultan pada interval satu menit dengan horizon prediksi jangka pendek di area camping dataran tinggi. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada penerapan prediksi mikroklimat jangka pendek pada konteks wisata alam pegunugan yang memiliki dinamika cuaca cepat dan risiko keselamatan tinggi.

3. Sistem Prediksi Mikroklimat Berbasis IoT dan Random Forest

3.1 Arsitektur Sistem Pemantauan Mikroklimat

Sistem yang dibangun pada penelitian ini merupakan sistem prediksi mikroklimat jangka pendek yang mengintegrasikan pemantauan berbasis Internet of Things (IoT) dengan pemodelan machine learning. Sistem dirancang untuk mengumpulkan data suhu udara dan kecepatan angin secara real-time di area camping Gunung Putri Lembang dan menghasilkan prediksi kondisi lingkungan 30 menit ke depan.

Akuisisi data dilakukan menggunakan sensor DHT22 untuk suhu udara dan cup anemometer untuk kecepatan angin yang terhubung ke mikrokontroler ESP32. ESP32 membaca data sensor setiap satu menit dan mengirimkannya melalui koneksi Wi-Fi ke penyimpanan cloud. Data disimpan pada Google Spreadsheet menggunakan Google Apps Script sebagai endpoint API. Setiap entri data terdiri dari timestamp, suhu (°C), dan kecepatan angin (m/s), membentuk data deret waktu berfrekuensi tinggi yang merepresentasikan dinamika mikroklimat lokasi penelitian.

3.2 Data yang Digunakan

Dataset yang digunakan merupakan data mikroklimat hasil pengukuran langsung di lapangan selama tujuh hari berturut-turut dengan interval pengambilan satu menit. Dengan konfigurasi tersebut, diperoleh sekitar 10.080 baris data untuk setiap variabel. Struktur data disusun dalam format time-series dengan kolom utama berupa timestamp, suhu udara, dan kecepatan angin.

Sebagai contoh, satu baris data merepresentasikan kondisi lingkungan pada satu titik waktu tertentu, misalnya suhu 17,8 °C dan kecepatan angin 2,4 m/s pada waktu tertentu. Data ini menjadi dasar pembentukan fitur historis dan target prediksi jangka pendek.

3.3 Praproses Data dan Rekayasa Fitur

Sebelum digunakan dalam pemodelan, data melalui tahap praproses untuk memastikan kualitas dan konsistensi. Timestamp dikonversi ke format datetime dan seluruh data diurutkan berdasarkan urutan waktu untuk menjaga validitas temporal. Nilai hilang yang muncul akibat gangguan jaringan atau keterlambatan transmisi ditangani menggunakan kombinasi metode forward-fill dan backward-fill, yang sesuai untuk data sensor lingkungan dengan perubahan gradual.

Untuk mengurangi pengaruh noise dan nilai ekstrem yang tidak merepresentasikan kondisi aktual, dilakukan deteksi outlier menggunakan metode Interquartile Range (IQR). Nilai di luar batas statistik wajar diperlakukan dengan clipping agar stabilitas model tetap terjaga.

Rekayasa fitur dilakukan untuk mengekstraksi informasi temporal dan historis dari data. Fitur waktu diekstraksi dari timestamp dan dikodekan menggunakan transformasi sine dan cosine untuk merepresentasikan pola siklus harian. Selain itu, fitur lag digunakan untuk menangkap ketergantungan historis data dengan memasukkan nilai suhu dan kecepatan angin pada rentang 1–60 menit sebelumnya. Fitur statistik bergerak berupa rolling mean dan rolling standard deviation dengan jendela 5, 15, dan 30 menit juga digunakan untuk merepresentasikan tren lokal dan volatilitas jangka pendek.

Target prediksi dibentuk dengan melakukan pergeseran (shift) data sebesar 30 menit ke depan, sehingga sistem memprediksi suhu dan kecepatan angin pada horizon waktu yang relevan untuk kebutuhan mitigasi risiko di area camping.

3.4 Model Prediksi yang Dibangun

Pemodelan dilakukan menggunakan algoritma Random Forest Regression. Dua model independen dibangun, masing-masing untuk prediksi suhu dan kecepatan angin 30 menit ke depan. Pemisahan model dilakukan untuk mengakomodasi perbedaan karakteristik distribusi dan dinamika kedua variabel.

Model dikonfigurasi dengan jumlah pohon (n_estimators) sebanyak 300 dan kedalaman maksimum 20 untuk menjaga keseimbangan antara kemampuan menangkap pola kompleks dan stabilitas model. Dataset dibagi menggunakan pendekatan time-based split, dengan 80% data awal sebagai data latih dan 20% data akhir sebagai data uji, sehingga skenario evaluasi mencerminkan kondisi prediksi nyata tanpa kebocoran data.

3.5 Evaluasi Kinerja Sistem

Evaluasi kinerja sistem dilakukan menggunakan dua metrik regresi, yaitu Mean Absolute Error (MAE) dan Root Mean Square Error (RMSE). MAE digunakan karena memberikan interpretasi langsung terhadap rata-rata kesalahan prediksi dalam satuan yang sama dengan variabel yang diprediksi, sehingga mudah dipahami secara praktis. RMSE digunakan untuk memberikan penalti lebih besar pada kesalahan ekstrem, yang penting dalam konteks data sensor lingkungan yang rentan terhadap lonjakan nilai.

Hasil evaluasi dianalisis melalui nilai MAE dan RMSE pada data uji serta visualisasi perbandingan antara nilai aktual dan hasil prediksi dalam bentuk grafik time-series. Evaluasi ini digunakan untuk menilai sejauh mana sistem mampu mengikuti dinamika mikroklimat secara temporal dan menghasilkan prediksi yang stabil serta akurat.

4. Hasil Pengujian dan Analisis Hasil Pengujian

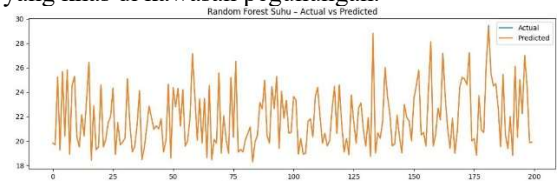
Bagian ini berisi dua sub-bagian, yaitu Hasil Pengujian dan Analisis Hasil Pengujian. Pengujian dan analisis yang dilakukan selaras dengan tujuan TA sebagaimana dinyatakan dalam Pendahuluan.

4.1 Hasil Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem prediksi suhu udara dan kecepatan angin berbasis IoT dan algoritma Random Forest pada area camping Gunung Putri Lembang. Data pengujian diperoleh dari hasil pengukuran langsung sensor DHT22 dan anemometer selama tujuh hari dengan interval satu menit, sehingga menghasilkan dataset time-series berfrekuensi tinggi yang merepresentasikan dinamika mikroklimat lapangan.

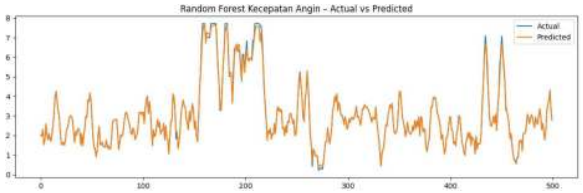
Pengujian utama difokuskan pada akurasi prediksi suhu dan kecepatan angin dengan horizon prediksi 30 menit ke depan. Model Random Forest dievaluasi menggunakan data uji yang mencakup 20% segmen terakhir dataset, sehingga skenario pengujian merepresentasikan kondisi prediksi nyata di lapangan.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa model prediksi suhu memiliki performa yang sangat baik dengan nilai Mean Absolute Error (MAE) sebesar **0,1105** dan Root Mean Square Error (RMSE) sebesar **0,03649**. Nilai error yang rendah ini mengindikasikan bahwa model mampu mengikuti pola fluktuasi suhu harian secara akurat, termasuk transisi suhu malam–pagi yang khas di kawasan pegunungan.



GAMBAR 1
Hasil model prediksi suhu

Sementara itu, model prediksi kecepatan angin menghasilkan nilai MAE sebesar **0,2281** dan RMSE sebesar **0,06569**. Meskipun nilai error lebih besar dibandingkan prediksi suhu, hasil ini masih menunjukkan kemampuan model dalam mengikuti tren pergerakan angin jangka pendek dengan cukup baik, terutama pada kondisi angin stabil dan moderat.



GAMBAR 2
Hasil model prediksi kecepatan angin

4.2 Analisis Hasil Pengujian

Analisis hasil pengujian menunjukkan perbedaan karakteristik performa antara prediksi suhu dan kecepatan angin yang dipengaruhi oleh sifat fisis masing-masing variabel. Suhu udara memiliki pola yang relatif stabil dan periodik, terutama dipengaruhi oleh siklus radiasi harian. Kondisi ini memudahkan model Random Forest dalam mempelajari keterkaitan antara fitur historis, fitur waktu, dan target prediksi, sehingga menghasilkan error yang rendah dan konsisten.

Sebaliknya, kecepatan angin menunjukkan variabilitas yang jauh lebih tinggi dengan fluktuasi tajam dan lonjakan ekstrem (spike) yang dapat terjadi dalam durasi sangat singkat. Analisis visual dan statistik menunjukkan bahwa lonjakan ini sebagian besar disebabkan oleh turbulensi angin lokal, gangguan topografi, serta potensi noise pembacaan sensor anemometer. Meskipun proses praproses telah menerapkan IQR clipping untuk mengurangi outlier ekstrem, karakteristik angin yang sangat dinamis tetap membatasi tingkat akurasi prediksi jangka pendek.

Pengaruh rekayasa fitur terhadap performa model juga terlihat jelas. Fitur lag hingga 60 menit dan fitur rolling statistics terbukti membantu model menangkap tren dan volatilitas jangka pendek, terutama pada suhu. Pada kecepatan angin, fitur-fitur tersebut lebih efektif dalam menangkap kecenderungan umum dibandingkan lonjakan sesaat, yang menjelaskan mengapa prediksi terlihat lebih halus dibandingkan data aktual.

Horizon prediksi 30 menit memberikan keseimbangan antara relevansi operasional dan tingkat kesulitan prediksi. Untuk suhu, horizon ini masih berada dalam rentang yang mudah dipelajari oleh model berbasis data historis. Namun, untuk kecepatan angin, horizon 30 menit berada pada batas prediksi jangka pendek yang menantang karena perubahan angin dapat terjadi dalam hitungan menit. Hal ini menjelaskan mengapa error prediksi angin lebih tinggi dibandingkan suhu.

Secara keseluruhan, hasil pengujian dan analisis menunjukkan bahwa sistem yang dibangun telah memenuhi tujuan penelitian, yaitu menghasilkan prediksi mikroklimat jangka pendek yang akurat dan relevan secara lokal. Sistem ini lebih andal untuk prediksi suhu, namun tetap memberikan informasi prediktif yang berguna untuk kecepatan angin sebagai indikator dini potensi kondisi berisiko di area camping dataran tinggi.

5. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan dan menguji sistem prediksi mikroklimat berbasis Internet of Things (IoT) dan algoritma Random Forest untuk memprediksi suhu udara dan kecepatan angin di area camping Gunung Putri Lembang. Sistem yang dibangun mampu melakukan akuisisi data lingkungan secara real-time menggunakan sensor DHT22 dan anemometer yang terintegrasi dengan mikrokontroler ESP32, menghasilkan data time-series berfrekuensi tinggi yang representatif terhadap dinamika mikroklimat lokal.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa model Random Forest memiliki kinerja prediksi yang sangat baik untuk prediksi suhu dengan horizon 30 menit, ditunjukkan oleh nilai MAE sebesar 0,1105 dan RMSE sebesar 0,03649. Untuk prediksi

kecepatan angin, model juga menunjukkan performa yang baik dengan MAE sebesar 0,2281 dan RMSE sebesar 0,06569, meskipun variabel angin memiliki karakteristik fluktuatif dan non-linear yang lebih kompleks. Perbedaan performa ini mengonfirmasi bahwa stabilitas pola suhu lebih mudah dipelajari dibandingkan dinamika angin yang dipengaruhi oleh turbulensi lokal dan kondisi topografi.

Secara metodologis, integrasi praproses data, rekayasa fitur time-series (lag, rolling statistics, dan fitur temporal), serta pendekatan ensemble Random Forest terbukti efektif dalam memodelkan data lingkungan berfrekuensi tinggi. Pendekatan time-based split juga memastikan bahwa evaluasi model mencerminkan kondisi prediksi operasional yang realistis tanpa kebocoran data.

Kontribusi utama penelitian ini terletak pada penerapan sistem prediksi mikroklimat berbasis data mikro-lokasi di kawasan wisata dataran tinggi, yang masih jarang dibahas pada penelitian sebelumnya. Secara praktis, sistem yang dikembangkan berpotensi digunakan sebagai alat bantu mitigasi risiko cuaca dan pendukung pengambilan keputusan bagi pengelola kawasan dan pengunjung, khususnya dalam meningkatkan keselamatan aktivitas camping dan wisata alam.

Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan, terutama pada durasi pengambilan data yang relatif singkat dan fokus pada dua parameter lingkungan. Oleh karena itu, pengembangan lanjutan dengan durasi data yang lebih panjang, penambahan variabel lingkungan, serta eksplorasi model prediksi alternatif diharapkan dapat meningkatkan generalisasi dan ketahanan sistem dalam menghadapi kondisi cuaca ekstrem.

REFERENSI

[1] R. Leng, S. Harrison, and K. Anderson, “Himalayan alpine ecohydrology: An urgent scientific concern in a changing climate,” *Ambio*, vol. 52, no. 2, pp. 390–410, 2023, doi: 10.1007/s13280-022-01792-2.

[2] A. Khattak, P. W. Chan, F. Chen, and H. Peng, “Prediction and Interpretation of Low-Level Wind Shear Criticality Based on Its Altitude above Runway Level: Application of Bayesian Optimization–Ensemble Learning Classifiers and SHapley Additive exPlanations,” *Atmosphere (Basel).*, vol. 13, no. 12, 2022, doi: 10.3390/atmos13122102.

[3] W. Indrasari and H. Suhendar, “ANALISIS MODEL PREDIKSI CUACA MENGGUNAKAN SUPPORT VECTOR MACHINE , GRADIENT BOOSTING , RANDOM FOREST , DAN,” vol. XII, pp. 119–128, 2024.

[4] J. Kim, J. Ahn, and J. Kang, “Adaptive wildfire spread prediction for complex terrain: modeling the effectiveness of sprinkler systems,” *Fire Ecol.*, vol. 20, no. 1, 2024, doi: 10.1186/s42408-024-00306-7.

[5] C. Ho, K. Cheng, and C. Ang, “Utilizing the Random Forest Method for Short-Term Wind Speed Forecasting in the Coastal Area of Central Taiwan,” 2026.

[6] J. Sathyaraj and V. Sankardoss, “A novel analysis of random forest regression model for wind speed forecasting,” *Cogent Eng.*, vol. 11, no. 1, p., 2024, doi: 10.1080/23311916.2024.2434617.

[7] R. Meenal, P. A. Michael, D. Pamela, and E. Rajasekaran, “Weather prediction using random forest machine learning model,” *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 22, no. 2, pp. 1208–1215, 2021, doi: 10.11591/ijeecs.v22.i2.pp1208-1215.

[8] A. Bamal, M. G. Uddin, and A. I. Olbert, “Harnessing machine learning for assessing climate change influences on groundwater resources: A comprehensive review,” *Heliyon*, vol. 10, no. 17, p. e37073, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e37073.

[9] M. N. A. Ramadan *et al.*, “Towards early forest fire detection and prevention using AI-powered drones and the IoT,” *Internet of Things (Netherlands)*, vol. 27, no. May, p. 101248, 2024, doi: 10.1016/j.iot.2024.101248.

[10] J. B. Deb, C. Varela, F. Faysal, Y. Wang, and C. Maiti, “Deep Artificial Neural Network Modeling of the Ablation Performance of Ceramic Matrix Composites in the Hydrogen Torch Test,” 2025.