

PERAMALAN KELEMBABAN TANAH BERBASIS IOT MENGUNAKAN PENDEKATAN *MACHINE LEARNING* DAN *DEEP LEARNING*

Iin Darmiyati^{1*}, Fitri Oktafiani¹, Ain Sahara¹, Dawi Yanti¹, Ranjiv Maulana¹, Hamsir¹, Nurjannah¹

¹Teknik Instrumentasi dan Elektronika Migas, Sekolah
Tinggi Teknologi Migas, Balikpapan

*Email: iindarmiyati2594@gmail.com

ABSTRACT

Soil moisture plays an important role in determining crop productivity and irrigation efficiency in plantation systems. This study proposes an Internet of Things (IoT)-based soil moisture forecasting system using machine learning and deep learning approaches. The sensors were connected to an ESP32 microcontroller which transmitted real-time data to cloud storage. The collected dataset containing thousands of records was processed using Python through data cleaning, normalization, and model training. Several predictive models were implemented including Linear Regression, Random Forest Regression, Support Vector Regression (SVR), and Long Short-Term Memory (LSTM). The dataset was divided into training and testing sets with a ratio of 80:20. Model performance was evaluated using Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Squared Error (RMSE), and the coefficient of determination (R^2). Experimental results show that the LSTM model achieved the best prediction performance due to its ability to capture temporal patterns in time-series sensor data. The developed system can support smart irrigation decision-making by forecasting soil moisture conditions before reaching critical levels, thereby improving water efficiency and supporting sustainable plantation management.

Keywords: *Soil moisture forecasting; Internet of Things; Machine learning; Deep learning; Precision agriculture.*

ABSTRAK

Kelembaban tanah merupakan parameter penting yang mempengaruhi produktivitas tanaman serta efisiensi penggunaan air dalam sistem pertanian dan perkebunan. Penelitian ini mengembangkan sistem peramalan kelembaban tanah berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan pendekatan *machine learning* dan *deep learning*. Sensor dihubungkan dengan mikrokontroler ESP32 yang mengirimkan data secara *real time* ke penyimpanan *cloud*. Dataset yang diperoleh terdiri dari ribuan entri dan diolah menggunakan Python melalui proses pembersihan data, normalisasi serta pelatihan model. Beberapa model prediksi yang digunakan meliputi *Linear Regression*, *Random Forest Regression*, *Support Vector Regression* (SVR), dan *Long Short-Term Memory* (LSTM). Dataset dibagi menjadi data pelatihan dan data pengujian dengan rasio 80:20. Evaluasi kinerja model dilakukan menggunakan *Mean Absolute Error* (MAE), *Root Mean Squared Error* (RMSE), dan koefisien determinasi (R^2). Hasil penelitian menunjukkan bahwa model LSTM memberikan performa prediksi terbaik karena mampu menangkap pola temporal pada data deret waktu sensor IoT. Sistem ini berpotensi mendukung pengembangan irigasi cerdas untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air dan pengelolaan perkebunan yang berkelanjutan.

Kata kunci: Kelembaban tanah; *Internet of Things*; *Machine Learning*; *Deep Learning*; Pertanian presisi.

PENDAHULUAN

Kelembaban tanah merupakan salah satu faktor utama yang menentukan keberhasilan produksi tanaman dalam sistem pertanian dan perkebunan (Shalini Patel and Kumar, 2022). Tanaman memerlukan kondisi kelembaban tanah yang optimal untuk mendukung proses fisiologis seperti penyerapan nutrisi, fotosintesis, dan pertumbuhan akar (Kumar, Kumar and Palaparthy, 2021). Kekurangan air dapat menyebabkan stres tanaman dan menurunkan produktivitas, sementara kelebihan air dapat menyebabkan pembusukan akar serta penurunan kualitas tanah. Konduktivitas listrik tanah sering digunakan sebagai indikator cepat untuk mengetahui konsentrasi ion terlarut dalam tanah yang berkaitan dengan kandungan nutrisi (Satheeshkumar, Paolini and Sarkar, 2023). Unsur hara makro seperti nitrogen, fosfor, dan kalium juga menjadi faktor penting dalam menentukan produktivitas tanaman karena berperan dalam berbagai proses fisiologis tanaman. Dalam praktik pertanian konvensional, pengelolaan irigasi biasanya dilakukan berdasarkan pengalaman petani atau menggunakan sistem berbasis ambang batas kelembaban tertentu (Raju *et al.*, 2024). Pendekatan tersebut bersifat reaktif karena hanya merespons kondisi tanah pada saat pengukuran tanpa mempertimbangkan kondisi di masa mendatang. Hal ini sering menyebabkan penggunaan air yang tidak efisien dan pengelolaan irigasi yang kurang optimal (Jasmine *et al.*, 2022).

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) memberikan peluang baru dalam pemantauan kondisi tanah secara real time. Dengan memanfaatkan sensor lingkungan yang terhubung dengan jaringan internet, berbagai parameter tanah seperti suhu, kelembaban, pH, konduktivitas listrik, serta kandungan unsur hara makro dapat dipantau secara kontinu (Bavana *et al.*, 2024). Data yang diperoleh kemudian dapat disimpan dalam basis data digital dan dianalisis menggunakan teknik analisis data dan kecerdasan buatan. *Internet of Things* (IoT) telah menjadi teknologi penting dalam pengembangan pertanian presisi (Gorji, Tanik and Sertel, 2015). Sistem IoT memungkinkan integrasi antara sensor lingkungan, perangkat komunikasi, dan sistem analisis data untuk memantau kondisi lahan secara real time (Prabavathi and Chelliah, 2022). Dalam sistem pertanian modern, sensor tanah digunakan untuk mengukur berbagai parameter penting seperti suhu tanah, kelembaban tanah, pH, dan konduktivitas listrik (Temlioglu, Erer and Kumlu, 2017).

Dalam beberapa tahun terakhir, metode *machine learning* dan *deep learning* telah banyak digunakan dalam sistem pertanian presisi (Tanna *et al.*, 2023; Dash and Sharaff, 2024). Metode *machine learning* seperti *Random Forest* dan *Support Vector Regression* mampu memodelkan hubungan kompleks antar variabel lingkungan. Sementara itu, metode *deep learning* seperti *Long Short-Term Memory* (LSTM) memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menganalisis data deret

waktu karena mampu menangkap pola temporal yang tidak dapat dideteksi oleh metode konvensional. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem peramalan kelembaban tanah berbasis IoT menggunakan pendekatan machine learning dan deep learning. Sistem ini diharapkan mampu memprediksi kondisi kelembaban tanah jangka pendek sehingga dapat mendukung pengambilan keputusan dalam sistem irigasi cerdas.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dengan memanfaatkan sistem pemantauan tanah berbasis *Internet of Things* (IoT) yang terintegrasi dengan analisis data menggunakan metode Machine Learning dan Deep Learning. Proses penelitian dimulai dengan pengambilan data secara langsung di lapangan pada lahan perkebunan milik Kelompok Tani Tunas Harapan yang terletak di Balikpapan Utara. Pengambilan data dilakukan menggunakan sensor tanah multi-parameter yang dipasang pada beberapa titik lahan untuk merepresentasikan kondisi tanah secara menyeluruh. Gambar 1 menunjukkan proses pengambilan data secara langsung

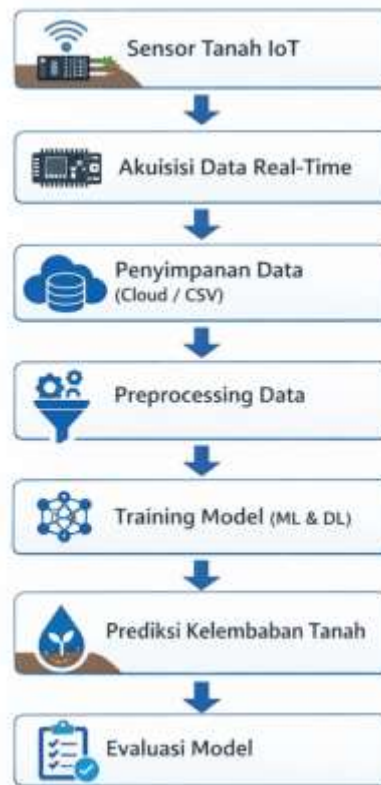


Gambar 1. Pengambilan data lapangan dengan menggunakan IoT

Sensor yang digunakan meliputi sensor suhu tanah (DS18B20), sensor kelembaban tanah (YL-69), sensor pH tanah, sensor konduktivitas listrik tanah (EC sensor), serta sensor unsur hara makro nitrogen, fosfor, dan kalium (NPK). Seluruh sensor dihubungkan dengan mikrokontroler ESP32 yang berfungsi sebagai pusat pengolahan data dan perangkat komunikasi. Mikrokontroler ini membaca nilai sensor secara periodik kemudian mengirimkan data melalui jaringan Wi-Fi atau GSM ke penyimpanan berbasis *cloud*. Kinerja model dievaluasi menggunakan metrik evaluasi seperti *Mean Absolute Error* (MAE) dan *Root Mean Squared Error* (RMSE). Nilai error yang lebih kecil menunjukkan performa model yang lebih baik dalam memprediksi kelembaban tanah. Setelah

Artikel diterima 10 Maret 2026. Online 30 Maret 2026.

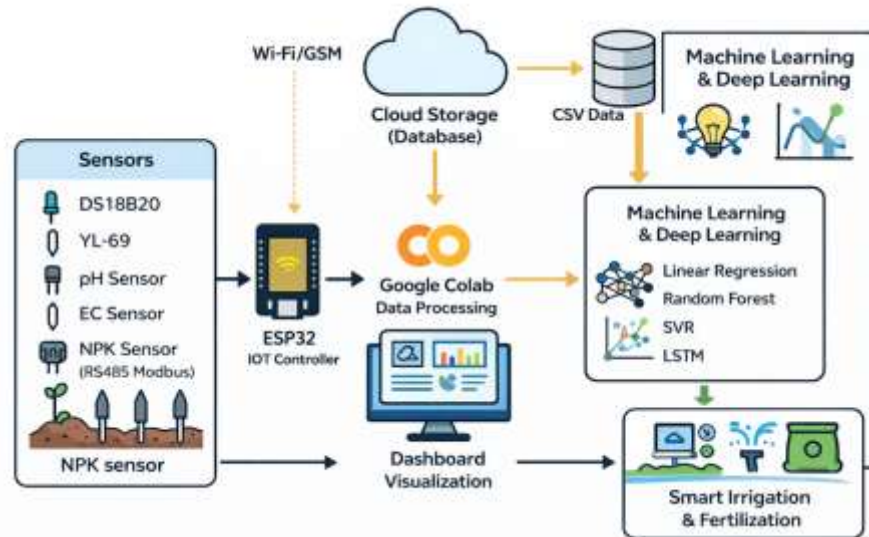
proses preprocessing, data digunakan untuk membangun beberapa model prediksi kelembaban tanah. Model yang digunakan dalam penelitian ini meliputi *Linear Regression*, *Random Forest Regression*, *Support Vector Regression*, dan *Long Short-Term Memory (LSTM)*. Dataset kemudian dibagi menjadi data pelatihan dan data pengujian dengan rasio 80% untuk pelatihan dan 20% untuk pengujian. Kinerja model dievaluasi menggunakan metrik evaluasi seperti *Mean Absolute Error (MAE)* dan *Root Mean Squared Error (RMSE)*. Nilai error yang lebih kecil menunjukkan performa model yang lebih baik dalam memprediksi kelembaban tanah. Adapun langkah kerja yang dilakukan terdapat dalam Gambar 2.



Gambar 2. Langkah kerja penelitian

Kinerja setiap model kemudian dievaluasi menggunakan beberapa metrik evaluasi regresi, yaitu *Mean Squared Error (MSE)*, *Root Mean Squared Error (RMSE)*, *Mean Absolute Error (MAE)*, serta koefisien determinasi (R^2 Score). Nilai error yang lebih kecil menunjukkan kemampuan model yang lebih baik dalam memprediksi kelembaban tanah. Selain itu, analisis korelasi antar fitur juga dilakukan menggunakan heatmap korelasi untuk memahami hubungan antar parameter tanah yang diukur oleh sensor IoT. Seluruh tahapan penelitian mulai dari

pengumpulan data lapangan, pengiriman data melalui sistem IoT, penyimpanan cloud, preprocessing data, hingga pemodelan *machine learning* dan *deep learning* digambarkan secara ringkas dalam bentuk flowchart penelitian pada Gambar 3.



Gambar 3. Ringkasan kerja penelitian

Penelitian ini menerapkan beberapa algoritma, yaitu Linear Regression, XGBoost, Gradient Boosting, Decision Tree, serta K-Nearest Neighbors (KNN). Metode XGBoost dan Gradient Boosting dimanfaatkan untuk mengakomodasi hubungan data yang kompleks, sementara Decision Tree digunakan dalam mengidentifikasi pola klasifikasi yang bersifat non-linear. Adapun KNN berperan dalam mengenali pola spasial-temporal (Islam, 2022). Kinerja model dievaluasi menggunakan Mean Squared Error (MSE), Root Mean Squared Error (RMSE), dan R² Score pada tugas regresi, sedangkan untuk klasifikasi digunakan metrik Accuracy, Precision, Recall, dan F1-score. Selanjutnya, hasil pemodelan dan evaluasi tersebut akan disajikan dalam bentuk visualisasi, seperti peta distribusi emisi metana, grafik tren emisi, serta heatmap korelasi untuk menganalisis pola emisi berdasarkan variasi lokasi dan kondisi lingkungan.

Untuk perhitungan akurasi dalam metode *machine learning* menggunakan rumus presisi, recall dan F1-score (Jasmine, 2014):

$$Precision (P) = \frac{TP}{TP+FP} \quad (1)$$

$$Recall (R) = \frac{TN}{TN+FN} \quad (2)$$

$$F1 - Score = 2 \times \frac{P \times R}{P+R} \quad (3)$$

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa seluruh model yang digunakan mampu memprediksi kelembaban tanah dengan tingkat akurasi yang berbeda. Dataset yang digunakan berasal dari sistem pemantauan tanah berbasis Internet of Things (IoT) yang mengukur beberapa parameter lingkungan seperti suhu tanah, kelembaban tanah, pH tanah, konduktivitas listrik tanah, serta kandungan unsur hara makro nitrogen, fosfor, dan kalium (NPK). Data yang diperoleh dari sensor kemudian dianalisis menggunakan beberapa metode machine learning dan deep learning untuk memprediksi kelembaban tanah dalam jangka pendek. Tabel 1 menunjukkan karakteristik rata-rata parameter tanah yang diperoleh dari hasil pengukuran sensor pada lokasi penelitian.

Tabel 1. Rata-rata parameter tanah pada lokasi penelitian

Kategori	Temperature (°C)	Mouisture (%)	pH	Fertility Score
Muda	26.16	40.23	5.23	124.82
Sangat Muda	25.69	41.51	6.59	97.52
Sedang	26.36	55.30	5.91	289.92

Berdasarkan data tersebut terlihat bahwa kelembaban tanah memiliki variasi yang cukup signifikan pada setiap kategori kondisi tanah. Tanah dengan tingkat kesuburan sedang menunjukkan nilai kelembaban yang lebih tinggi dibandingkan kategori lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi kesuburan tanah dan kandungan unsur hara dapat mempengaruhi tingkat kelembaban tanah. Selanjutnya dilakukan proses pemodelan menggunakan beberapa algoritma machine learning dan deep learning untuk memprediksi kelembaban tanah. Tabel 2 menunjukkan hasil perbandingan kinerja model yang digunakan dalam penelitian ini.

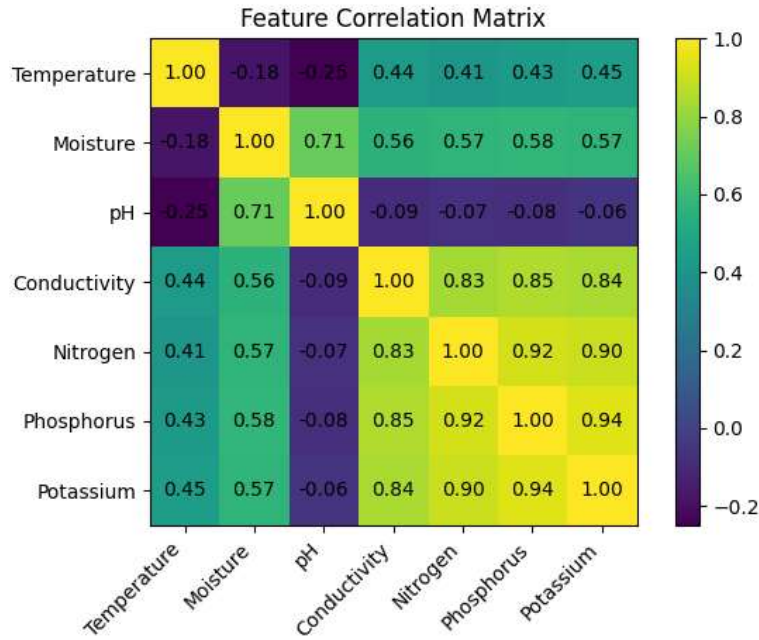
Tabel 2. Perbandingan kinerja model prediksi kelembaban tanah

Model	Jenis Metode	MAE	RMSE	R ² Score	Akurasi Prediksi
Linear Regression	Machine Learning	3.85	5.21	0.71	78%
Random Forest	Machine Learning	2.64	3.87	0.83	86%
Support Vector Regression	Machine Learning	2.48	3.64	0.85	88%
LSTM	Deep Learning	1.72	2.91	0.92	93%

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa model Linear Regression memberikan performa dasar yang cukup baik, namun memiliki keterbatasan dalam memodelkan hubungan non-linear antar variabel lingkungan. Model ini hanya mampu menangkap hubungan linier antara parameter input dengan kelembaban tanah sehingga akurasi prediksinya relatif lebih rendah dibandingkan model lainnya. Model Random Forest menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan Linear Regression karena mampu menangani hubungan non-linear antara parameter lingkungan dengan kelembaban tanah. Metode ini menggunakan pendekatan ensemble learning dengan menggabungkan banyak pohon keputusan sehingga mampu menangkap pola yang lebih kompleks pada dataset. Model Support Vector Regression memberikan hasil yang cukup stabil dalam memodelkan hubungan antar variabel. Metode ini mampu menangani hubungan non-linear melalui penggunaan kernel function. Namun proses tuning parameter pada model SVR cukup kompleks sehingga memerlukan optimasi yang lebih intensif untuk memperoleh performa terbaik.

Model deep learning Long Short-Term Memory (LSTM) memberikan performa prediksi terbaik dalam penelitian ini dengan nilai MAE dan RMSE yang paling rendah serta nilai koefisien determinasi (R^2) tertinggi. Hal ini disebabkan karena model LSTM mampu mempelajari pola temporal pada data deret waktu yang dihasilkan oleh sensor IoT. Kemampuan ini memungkinkan model untuk menangkap pola perubahan kelembaban tanah dari waktu ke waktu dengan lebih akurat dibandingkan metode machine learning konvensional. Hasil prediksi menunjukkan bahwa model LSTM mampu mengikuti pola fluktuasi kelembaban tanah dengan deviasi yang relatif kecil dibandingkan model lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa metode deep learning lebih efektif dalam menangani data time-series yang dihasilkan oleh sistem sensor IoT. Integrasi model prediksi dengan sistem pemantauan berbasis IoT memungkinkan pengembangan sistem irigasi cerdas yang mampu memprediksi kondisi kelembaban tanah beberapa waktu ke depan.

Dengan adanya sistem ini, irigasi dapat dilakukan secara lebih efisien karena sistem dapat mengaktifkan penyiraman sebelum kondisi tanah mencapai tingkat kekeringan yang dapat mengganggu pertumbuhan tanaman. Pendekatan ini berpotensi meningkatkan efisiensi penggunaan air serta mendukung penerapan pertanian presisi yang lebih berkelanjutan



Gambar 4. Korelasi Antar Fitur

Gambar 4 menunjukkan heatmap korelasi antar parameter tanah yang diukur oleh sensor IoT, meliputi suhu (temperature), kelembaban (moisture), pH, konduktivitas listrik (conductivity), serta kandungan unsur hara nitrogen, fosfor, dan kalium. Nilai korelasi menunjukkan tingkat hubungan antara setiap parameter dengan rentang -1 hingga 1 . Hasil analisis menunjukkan bahwa kelembaban tanah memiliki korelasi positif yang cukup kuat dengan pH ($r = 0.71$), yang mengindikasikan bahwa peningkatan kelembaban tanah cenderung diikuti oleh peningkatan nilai pH. Selain itu, kelembaban juga memiliki korelasi moderat dengan unsur hara nitrogen, fosfor, dan kalium ($r \approx 0.56-0.58$), yang menunjukkan bahwa kondisi tanah yang lebih lembab cenderung memiliki ketersediaan nutrisi yang lebih baik. Konduktivitas listrik tanah memiliki korelasi yang sangat kuat dengan unsur hara nitrogen, fosfor, dan kalium ($r \approx 0.83-0.94$). Hal ini menunjukkan bahwa konduktivitas listrik dapat digunakan sebagai indikator cepat untuk memperkirakan kandungan nutrisi dalam tanah karena meningkatnya konsentrasi ion terlarut akan meningkatkan nilai konduktivitas.

Sementara itu, suhu tanah menunjukkan korelasi moderat terhadap beberapa parameter nutrisi ($r \approx 0.41-0.45$), namun memiliki korelasi negatif yang lemah terhadap kelembaban dan pH. Hal ini menunjukkan bahwa suhu tanah bukan faktor utama dalam menentukan kondisi kesuburan tanah dibandingkan dengan kandungan nutrisi dan kelembaban tanah. Secara keseluruhan, hasil korelasi ini menunjukkan bahwa parameter konduktivitas dan unsur hara makro memiliki hubungan yang sangat kuat satu sama lain, sedangkan kelembaban tanah memiliki hubungan yang cukup signifikan dengan beberapa parameter lingkungan lainnya. Temuan ini mendukung penggunaan parameter-

Artikel diterima 10 Maret 2026. Online 30 Maret 2026.

parameter tersebut sebagai fitur penting dalam proses pemodelan prediksi kelembaban tanah menggunakan metode machine learning dan deep learning.

Model Random Forest menunjukkan performa yang lebih baik karena mampu menangani hubungan non-linear antara parameter lingkungan dengan kelembaban tanah. Model ini juga memiliki kemampuan yang baik dalam mengatasi variasi data yang kompleks. Model Support Vector Regression memberikan hasil yang cukup stabil dalam memodelkan hubungan antar variabel. Namun model ini memerlukan proses tuning parameter yang lebih kompleks untuk mendapatkan performa optimal. Model deep learning LSTM memberikan performa prediksi terbaik dalam penelitian ini. Hal ini disebabkan karena model LSTM mampu mempelajari pola temporal dalam data deret waktu yang tidak dapat ditangkap oleh model machine learning konvensional. Grafik hasil prediksi menunjukkan bahwa model LSTM mampu mengikuti pola fluktuasi kelembaban tanah dengan deviasi yang relatif kecil dibandingkan model lainnya. Integrasi model prediksi dengan sistem IoT memungkinkan pengembangan sistem irigasi cerdas yang mampu memprediksi kondisi kelembaban tanah beberapa waktu ke depan. Dengan demikian, sistem dapat mengaktifkan irigasi sebelum kondisi tanah mencapai tingkat kekeringan yang berpotensi merusak tanaman.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem peramalan kelembaban tanah berbasis Internet of Things dengan pendekatan machine learning dan deep learning. Sistem yang dikembangkan mampu mengumpulkan data lingkungan secara real time menggunakan sensor tanah multi-parameter dan menyimpannya dalam basis data digital untuk dianalisis lebih lanjut. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa model deep learning LSTM memberikan performa prediksi terbaik dibandingkan model machine learning lainnya seperti Linear Regression, Random Forest, dan Support Vector Regression. Kemampuan LSTM dalam memodelkan data deret waktu memungkinkan model ini menangkap pola perubahan kelembaban tanah dengan lebih akurat. Integrasi model prediksi dengan sistem IoT memungkinkan pengembangan sistem irigasi cerdas yang mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air dan mendukung pengelolaan pertanian yang lebih berkelanjutan.

PENGAKUAN DAN UCAPAN TERIMA KASIH

Kami bersyukur penelitian dan paper ini dapat dituntaskan dengan tepat waktu, hal ini tidak lepas dari dukungan Lembaga dalam memberikan kesempatan untuk mengambil dan mengolah data di Laboratorium STT Migas Balikpapan.

DAFTAR PUSTAKA

- Bavana, H.S. *et al.* (2024) “An Investigation of the Utilizations of Machine Learning Methods in Precision Agriculture,” *2nd IEEE International Conference on IoT, Communication and Automation Technology, ICICAT 2024*, pp. 880–887. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICICAT62666.2024.10922951>.
- Dash, S. and Sharaff, A. (2024) “Empowering Soil Science: Harnessing the Potential of Deep Learning for Accurate Soil Classification,” *2024 IEEE Silchar Subsection Conference, SILCON 2024*, pp. 1–6. Available at: <https://doi.org/10.1109/SILCON63976.2024.10910819>.
- Gorji, T., Tanik, A. and Sertel, E. (2015) “Soil Salinity Prediction, Monitoring and Mapping Using Modern Technologies,” *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, pp. 507–512. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.08.062>.
- Islam, M.R. *et al.* (2022) “A Review on Current Technologies and Future Direction of Water Leakage Detection in Water Distribution Network,” *IEEE Access*, 10(August), pp. 107177–107201. Available at: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3212769>.
- Jasmine, J.S.L. *et al.* (2022) “An Innovative Approach for Leaf-based Disease Detection in Crops and Soil Analyzer using Machine Learning for Smart Agriculture,” *Proceedings of International Conference on Technological Advancements in Computational Sciences, ICTACS 2022*, pp. 514–519. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICTACS56270.2022.9987759>.
- JASMINE, K. (2014) “濟無No Title No Title No Title,” *Penambahan Natrium Benzoat Dan Kalium Sorbat (Antiinversi) Dan Kecepatan Pengadukan Sebagai Upaya Penghambatan Reaksi Inversi Pada Nira Tebu* [Preprint].
- Kumar, M., Kumar, A. and Palaparthi, V.S. (2021) “Soil Sensors-Based Prediction System for Plant Diseases Using Exploratory Data Analysis and Machine Learning,” *IEEE Sensors Journal*, 21(16), pp. 17455–17468. Available at: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3046295>.
- Prabavathi, R. and Chelliah, B.J. (2022) “An Optimized Gaussian Extreme Learning Machine (GELM) for Predicting the Crop Yield using Soil Factors,” *Proceedings of the 2022 International Conference on Electronic Systems and Intelligent Computing, ICESIC 2022*, pp. 219–222. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICESIC53714.2022.9783578>.
- Raju, N.S. *et al.* (2024) “AI-Powered Crop Suggestion, Yield Prediction, Disease Detection, and Soil Monitoring,” *3rd International Conference on Automation, Computing and Renewable Systems, ICACRS 2024 - Proceedings*, pp. 1120–1124. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICACRS62842.2024.10841754>.

- Satheeshkumar, S.K., Paolini, C. and Sarkar, M. (2023) “Subsurface Heat stress detection in plants using machine learning regression models,” *2023 International Conference on Intelligent Computing, Communication, Networking and Services, ICCNS 2023*, pp. 57–64. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICCNS58795.2023.10193174>.
- Shalini Patel, N. and Kumar, H.P.M. (2022) “Soil Quality Identifying and Monitoring Approach for Sugarcane Using Machine Learning Techniques,” *4th International Conference on Emerging Research in Electronics, Computer Science and Technology, ICERECT 2022*, pp. 1–5. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICERECT56837.2022.10059793>.
- Tanna, J. *et al.* (2023) “Heat Pulse Probe-Based Smart Soil Moisture Detection System,” *IEEE Sensors Journal*, 23(11), pp. 11428–11436. Available at: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3266070>.
- Temlioglu, E., Erer, I. and Kumlu, D. (2017) “A least mean square approach to buried object detection in ground penetrating radar,” *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2017-July, pp. 4833–4836. Available at: <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2017.8128084>.