

KECERDASAN BUATAN UNTUK PERTANIAN BERKELANJUTAN: PREDIKSI KUALITAS TANAH DAN MITIGASI DAMPAK LINGKUNGAN MENGGUNAKAN DATA KOMPREHENSIF MULTIDIMENSI: IMPLEMENTASI DAN EVALUASI

Bambang Siswoyo¹, Muhammad Abdurrahman Arrody^{2*}

¹Universitas Komputer Indonesia, Kota Bandung, Indonesia
email abdurrahman.10123462@mahasiswa.unikom.ac.id

Abstrak: Kualitas tanah yang terus menurun menjadi salah satu tantangan utama dalam pembangunan pertanian berkelanjutan. Perubahan iklim, penggunaan pupuk kimia berlebih, dan praktik budidaya yang tidak ramah lingkungan memperparah degradasi tanah. Untuk menjawab tantangan ini, teknologi kecerdasan buatan (AI) muncul sebagai solusi inovatif dalam memantau dan memprediksi kualitas tanah secara presisi dan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk menerapkan model AI berbasis machine learning untuk memprediksi parameter kualitas tanah seperti pH, kelembapan, karbon organik, dan jenis tekstur tanah, serta mengkaji peran teknologi ini dalam mitigasi dampak lingkungan. Studi dilakukan menggunakan dua dataset terbuka dari Kaggle yang mencakup lebih dari 10.000 entri data tanah pertanian. Tiga algoritma AI diterapkan, yaitu Random Forest, Support Vector Machine, dan Gradient Boosting. Evaluasi performa model dilakukan menggunakan metrik akurasi, MAE (Mean Absolute Error), dan RMSE (Root Mean Square Error). Hasil menunjukkan bahwa model Random Forest memberikan performa terbaik dengan akurasi 92% dalam klasifikasi tekstur tanah serta RMSE 0.12 dalam prediksi pH. Analisis fitur juga mengungkap bahwa kelembapan dan karbon organik memiliki pengaruh terbesar dalam menentukan kualitas tanah. Temuan ini menegaskan bahwa AI berpotensi besar dalam mendukung sistem pertanian presisi, pengambilan keputusan berbasis data, serta pengelolaan lahan yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Dengan demikian, integrasi teknologi AI dalam pengelolaan tanah dapat menjadi strategi kunci dalam mewujudkan pertanian yang lebih adaptif dan berkelanjutan di masa depan.

Kata Kunci: kecerdasan buatan, pertanian berkelanjutan, kualitas tanah, machine learning, mitigasi lingkungan

Abstract: The continuous decline in soil quality is one of the main challenges in sustainable agricultural development. Climate change, excessive use of chemical fertilizers, and environmentally unfriendly cultivation practices exacerbate soil degradation. To address this challenge, artificial intelligence (AI) technology has emerged as an innovative solution for monitoring and predicting soil quality with precision and sustainability. This study aims to apply machine learning-based AI models to predict soil quality parameters such as pH, moisture, organic carbon, and soil texture type, and to examine the role of this technology in mitigating environmental impacts. The study was conducted using two open datasets from Kaggle covering more than 10,000 entries of agricultural soil data. Three AI algorithms were applied, namely Random Forest, Support Vector Machine, and Gradient Boosting. Model performance was evaluated using accuracy, MAE (Mean Absolute Error), and RMSE (Root Mean Square Error) metrics. The results showed that the Random Forest model performed best with 92% accuracy in soil texture classification and an RMSE of 0.12 in pH prediction. Feature analysis also revealed that moisture and organic carbon had the greatest influence on determining soil quality. These findings confirm that AI has great potential in supporting precision farming systems, data-driven decision-making, and more efficient and environmentally friendly land management. Thus, the integration of AI technology in land management can be a key strategy in realizing more adaptive and sustainable agriculture in the future.

Keywords: artificial intelligence, sustainable agriculture, soil quality, machine learning, environmental mitigation

Pendahuluan

Pertanian merupakan sektor strategis yang memainkan peran penting dalam memenuhi kebutuhan pangan global sekaligus menjaga keseimbangan ekosistem. Namun, dalam beberapa dekade terakhir, pertanian menghadapi tantangan serius terkait penurunan kualitas tanah akibat intensifikasi pertanian, penggunaan pestisida dan pupuk kimia secara berlebihan, serta dampak perubahan iklim. Penurunan kualitas tanah ini menyebabkan penurunan produktivitas lahan, degradasi lingkungan, dan kerugian ekonomi yang signifikan (Mahala et al., 2024). Oleh

karena itu, diperlukan pendekatan baru yang lebih adaptif dan berkelanjutan untuk mengelola sumber daya tanah.

Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah penerapan teknologi kecerdasan buatan (Artificial Intelligence/AI) dalam pertanian. AI memungkinkan pengolahan dan analisis data dalam skala besar dengan efisiensi tinggi. Dalam konteks prediksi kualitas tanah, AI mampu mengenali pola yang kompleks dari data tanah seperti pH, kelembapan, tekstur, dan kandungan karbon organik yang berasal dari berbagai sumber seperti sensor IoT, citra satelit, dan pengukuran langsung di lapangan (Saki et al., 2024; Capetz et al., 2024).

Penelitian-penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa algoritma machine learning seperti Random Forest (RF), Gradient Boosting (GBM), dan Support Vector Machine (SVM) dapat digunakan untuk memodelkan dan memprediksi parameter kualitas tanah secara akurat (Mohan et al., 2025; Malashin et al., 2024; Delfani et al., 2024). Namun demikian, masih terdapat kesenjangan dalam integrasi berbagai parameter tanah secara multidimensi dan dalam mengevaluasi kontribusi AI terhadap mitigasi dampak lingkungan secara menyeluruh.

Dengan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan mengevaluasi model prediksi kualitas tanah berbasis AI dengan memanfaatkan dataset terbuka dari Kaggle yang mencakup parameter-parameter utama tanah. Fokus penelitian mencakup: (1) klasifikasi jenis tanah berdasarkan fitur lingkungan; (2) prediksi parameter kualitas tanah seperti pH dan kelembapan; serta (3) analisis dampak prediksi tersebut dalam mendukung pertanian berkelanjutan dan mitigasi kerusakan lingkungan. Diharapkan hasil penelitian ini dapat menjadi dasar ilmiah dalam penerapan teknologi AI pada sistem pertanian presisi dan manajemen lahan berkelanjutan.

Metode

Pengumpulan Data: Dataset yang digunakan diambil dari Kaggle dengan nama "Crop and Soil Dataset" dan "Soil and Environmental Monitoring" yang memuat fitur: pH tanah, kelembapan, tekstur tanah (loam, clay, sand), dan kadar karbon organik. Dataset berjumlah 10.000 entri dan bersifat terbuka.

Pra-pemrosesan Data. Proses awal meliputi: Penanganan missing value dengan imputasi rata-rata; Normalisasi fitur numerik.; One-hot encoding pada fitur kategori seperti jenis tanah; Split data menjadi 70% training dan 30% testing.

Pengembangan Model. Tiga model Machine Learning digunakan: Random Forest (RF); Support Vector Machine (SVM); Gradient Boosting (GBM).

Pemilihan model didasarkan pada studi terdahulu (Delfani et al., 2024; Giannarakis et al., 2022). Hyperparameter tuning dilakukan menggunakan GridSearchCV dan validasi silang 5-fold.



Gambar 1. Kerangka Pemecahan Masalah dalam Prediksi Kualitas Tanah dan Mitigasi Dampak Lingkungan Berbasis Kecerdasan Buatan

Evaluasi dilakukan menggunakan: Akurasi (klasifikasi jenis tanah); MAE dan RMSE (prediksi pH dan kelembapan).

Hasil dan Pembahasan

Karakteristik Dataset: Sebaran data: pH (5.2–8.4), kelembapan (10%–48%), karbon organik (1.1–5.4%). Komposisi jenis tanah: clay (38%), loam (34%), sand (28%).

Analisis Pentingnya Fitur: Fitur kelembapan dan karbon organik memiliki kontribusi tinggi terhadap prediksi pH dan klasifikasi tekstur. Hasil penting ini sejalan dengan hasil Capetz et al. (2024) yang mengintegrasikan fitur karbon dalam model prediksi tanah berkelanjutan.

Evaluasi Kinerja Model

Tabel 1. Evaluasi Kinerja Model Prediksi

| Model | Accuracy | Tekstur | MAE (pH) | RMSE (pH) | MAE (Kelembapan) | RMSE (Kelembapan) |
|-------|----------|---------|----------|-----------|------------------|-------------------|
| RF | 0.92 | | 0.11 | 0.12 | 1.7 | 2.2 |
| SVM | 0.89 | | 0.15 | 0.18 | 2.6 | 3.1 |
| GBM | 0.90 | | 0.13 | 0.15 | 2.0 | 2.5 |

Model RF unggul dalam semua metrik dibanding dua model lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa RF cocok untuk klasifikasi berbasis fitur campuran seperti numerik dan kategori. Penemuan ini konsisten dengan studi Phapale & Shiledar (2024) dan Diaz Gonzalez et al. (2022). Implementasi prediksi kualitas tanah berbasis AI mampu mengoptimalkan intervensi pertanian serta mitigasi kerusakan lahan.

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa kecerdasan buatan, khususnya algoritma Random Forest, memberikan hasil terbaik dalam klasifikasi jenis tanah dan prediksi kualitas tanah seperti pH dan kelembapan. Akurasi tinggi dan kesesuaian prediksi dengan data aktual membuktikan potensi AI dalam mendukung pertanian presisi yang berkelanjutan. Integrasi AI dengan data lingkungan multidimensi memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih akurat dalam pengelolaan lahan, penentuan kebutuhan pupuk, serta mitigasi dampak lingkungan seperti degradasi tanah dan kehilangan kesuburan. Temuan ini memperkuat urgensi penerapan teknologi AI sebagai komponen inti dalam pengembangan sistem pertanian masa depan yang lebih adaptif, efisien, dan ramah lingkungan.

Referensi

Saki, M., Keshavarz, R., Franklin, D., Abolhasan, M., Lipman, J., & Shariati, N. (2024a, October 24). A Data-Driven Review of Remote Sensing-Based Data Fusion in Agriculture from Foundational to Transformer-Based Techniques. Retrieved from https://arxiv.org/abs/2410.18353?utm_source=chatgpt.com Precision from

Pace, R., Di Cola, V. S., Monti, M. M., Affinito, A., Cuomo, S., Loreto, F., & Ruocco, M. (2025). Artificial intelligence in soil microbiome analysis: a potential application in predicting and enhancing soil health—a review. *Deleted Journal*, 7(2). <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06381-4>

Li, J., Chen, D., Qi, X., Li, Z., Huang, Y., Morris, D., & Tan, X. (2023, May 24). Label-efficient learning in Agriculture: A Comprehensive review. Retrieved from https://arxiv.org/abs/2305.14691?utm_source=chatgpt.com Efficient

Phapale, A., & Shiledar, A. (2024). AI for Sustainable Soil Health: Predicting Nutrient Deficiencies & Recommendations. *journal.multitechpublisher.com*. <https://doi.org/10.59890/ijaamr.v2i6.1722>

- Riaza33de8cab2a. (2025, July 4). A review of machine learning techniques for precision agriculture and crop yield Prediction - Premier Science. Retrieved from https://premierscience.com/pjpb-24-460/?utm_source=chatgpt.com
- Dm, M., Sl, J., Ak, S., & Hs, J. (2024, December 13). Artificial Intelligence in Soil Science: Advancing soil health and quality assessment. Retrieved from https://crimsonpublishers.com/boj/fulltext/BOJ.000605.php?utm_source=chatgpt.com
- Giannarakis, G., Sitokonstantinou, V., Lorilla, R. S., & Kontoes, C. (2022, November 6). Personalizing Sustainable Agriculture with Causal Machine Learning. Retrieved from https://arxiv.org/abs/2211.03179?utm_source=chatgpt.com
- Capetz, M., Sharma, S., Padilha, R., Olsen, P., Wolk, J., Kiciman, E., & Chandra, R. (2024, November 25). Enabling Adoption of Regenerative Agriculture through Soil Carbon Copilots. Retrieved from https://arxiv.org/abs/2411.16872?utm_source=chatgpt.com
- Gupta, G., & Pal, S. K. (2025). Applications of AI in precision agriculture. *Discover Agriculture*, 3(1). <https://doi.org/10.1007/s44279-025-00220-9>
- Delfani, P., Thuraga, V., Banerjee, B., & Chawade, A. (2024). Integrative approaches in modern agriculture: IoT, ML and AI for disease forecasting amidst climate change. *Precision Agriculture*, 25, 2589–2613.
- Malashin, I., Tynchenko, V., Gantimurov, A., Nelyub, V., Borodulin, A., & Tynchenko, Y. (2024). Predicting sustainable crop yields: deep learning and explainable AI tools. *Sustainability*, 16, 9437. Sciencedirect. (2024). Sustainable AI-based production agriculture: Exploring AI applications.
- Neethirajan, S., Scott, S., Mancini, C., Boivin, X., & Strand, E. (2024). Human-computer interactions with farm animals—enhancing welfare through precision livestock farming and AI. *Frontiers in Veterinary Science*, 11, 1490851.
- Awais, M., Naqvi, S. M. Z. A., Zhang, H., Li, L., Zhang, W., Awwad, F. A., . . . Hu, J. (2023). AI and machine learning for soil analysis: an assessment of sustainable agricultural practices. *Bioresources and Bioprocessing*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40643-023-00710-y>
- Anifowose, B., & Anifowose, F. (2024). Artificial intelligence and machine learning in environmental impact prediction for soil pollution management – case for EIA process. *Environmental Advances*, 17, 100554. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100554>
- Warrender, E. (2024, April 9). Agriculture: Harnessing AI for healthier soils. Retrieved from https://www.openaccessgovernment.org/article/agriculture-harnessing-ai-for-healthier-soils/173895/?utm_source=chatgpt.com
- Botero-Valencia, J., García-Pineda, V., Valencia-Arias, A., Valencia, J., Reyes-Vera, E., Mejia-Herrera, M., & Hernández-García, R. (2025). Machine Learning in Sustainable agriculture: Systematic Review and Research Perspectives. *Agriculture*, 15(4), 377. <https://doi.org/10.3390/agriculture15040377>
- Benos, L., Tagarakis, A. C., Dolias, G., Berruto, R., Kateris, D., & Bochtis, D. (2021). Machine Learning in Agriculture: A Comprehensive Updated review. *Sensors*, 21(11), 3758. <https://doi.org/10.3390/s21113758>
- Liakos, K., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Machine Learning in Agriculture: A review. *Sensors*, 18(8), 2674. <https://doi.org/10.3390/s18082674>
- Riaza33de8cab2a. (2025b, July 4). A review of machine learning techniques for precision agriculture and crop yield Prediction - Premier Science. Retrieved from https://premierscience.com/pjpb-24-460/?utm_source=chatgpt.com
- Wang, X., Chi, Y., & Song, S. (2024). Important soil microbiota's effects on plants and soils: a comprehensive 30-year systematic literature review. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1347745.