



**DARI ONTOLOGI KE INFERENSI: KERANGKA FILOSOFIS
KOMPUTASIONAL IoT-ML UNTUK MEMBACA KEMATANGAN DAN
VOLUME MINYAK KELAPA SAWIT**

***FROM ONTOLOGY TO INFERENCE: A COMPUTATIONAL PHILOSOPHICAL
FRAMEWORK OF IoT-ML FOR READING THE MATURITY AND VOLUME OF
PALM OIL***

Ratu Mutiara Siregar^{1*}, Andi Prayogi², Mahyuddin KM Nasution³

^{1,2}Sistem Teknologi Informasi, Fakultas Sains dan Teknologi Informasi, Institut Teknologi
Sawit Indonesia, Indonesia

³Ilmu Komputer, Fakultas Ilmu Komputer dan Teknologi Informasi, Universitas Sumatera
Utara, Indonesia

*Corresponding Email : ratu_ms@itsi.ac.id

Abstract

The timing of harvesting in oil palm plantations necessitates objective and rapid ripeness assessment, coupled with an estimation of extractable oil volume. This paper presents a philosophical-computational framework with an end-to-end architecture integrating Internet of Things (IoT) sensors and machine learning (ML) for the classification of fresh fruit bunch (FFB) ripeness levels and oil volume regression. The approach rests on explicit ontological and epistemological foundations, operationalizes latent targets through standardized field protocols, and implements reproducible ML practices. We delineate a multimodal pipeline (RGB imagery + environmental sensors + weight), a late fusion modeling strategy (CNN embeddings + tabular features), and an evaluation design that emphasizes cross-block generalization, model explainability, and drift monitoring. Performance targets include an F1-macro ≥ 0.88 for ripeness classification and a Mean Absolute Error (MAE) ≤ 4 ml/kg for oil volume regression on out-of-block data. Discussions also encompass the ethics and axiology of transparency, data governance, and economic impacts, along with future directions such as federated learning and portable hyperspectral integration.

Keywords: *IoT; machine learning; ripeness detection; oil yield prediction; philosophy of computation.*

How to Cite: Siregar, R.M., Prayogi, A., & Nasution, M.K.M (2025). Dari Ontologi ke Inferensi: Kerangka Filosofis Komputasional IoT-ML untuk Membaca Kematangan dan Volume Minyak Kelapa Sawit. Jurnal Agro Fabrica Vol.7 (2) : 134 – 140.

PENDAHULUAN

Kesalahan dalam penentuan waktu panen baik terlalu dini maupun terlambat dapat secara langsung menurunkan kualitas *Crude Palm Oil* (CPO), meningkatkan kadar asam lemak bebas *Free Fatty Acid* (FFA),

serta mengurangi potensi perolehan minyak per hektar.

Kemajuan dalam sensor berbiaya rendah, komputasi tepi (*edge computing*), dan pembelajaran mesin berbasis data menawarkan sebuah paradigma baru untuk

inferensi yang objektif, dapat diaudit, dan bahkan bersifat real-time, dengan lanskap pertanian yang semakin mengedepankan teknologi. Belum adanya sistem ujung-ke-ujung (end-to-end) yang secara simultan mampu menginferensi baik tingkat kematangan maupun estimasi volume minyak dari beragam sumber data IoT menjadi salah satu kesenjangan. Ketiadaan prosedur ground truth yang terstandarisasi dan dapat direplikasi untuk validasi estimasi volume minyak juga menjadi masalah. Evaluasi ketahanan (robustness) model terhadap perubahan domain (domain shift) yang terjadi antar-blok perkebunan atau bahkan antar-estate yang masih terbatas merupakan kesenjangan ketiga. Namun demikian, kesenjangan signifikan masih terdapat dalam ekosistem pengembangan solusi berbasis teknologi ini.

Penelitian ini mengusulkan sebuah kerangka kerja terprinsip, yang menggabungkan landasan filosofis ilmu pengetahuan dengan sebuah pipeline komputasional *Internet of Things and Machine Learning* (IoT-ML) yang dirancang untuk pengujian lapangan, serta metode evaluasi yang ketat. Penggunaan teknik visi komputer, khususnya Convolutional Neural Network (CNN), telah menunjukkan potensi tinggi dalam klasifikasi tingkat kematangan buah sawit melalui analisis citra, dengan akurasi yang menjanjikan, berdasarkan literatur terkini. Studi perbandingan algoritma machine learning (ML) juga mengindikasikan

bahwa metode seperti Random Forest dan Gradient Boosting memiliki kapabilitas yang baik dalam memprediksi kandungan minyak dalam buah sawit. Pendekatan ini bertujuan untuk menyediakan solusi yang lebih objektif dan andal dalam mendukung pengambilan keputusan krusial terkait panen kelapa sawit. Banyak studi yang ada cenderung berfokus pada satu jenis modalitas data (misalnya, citra *Red Green Blue*) atau hanya satu target prediksi (misalnya, kematangan), serta belum banyak yang secara komprehensif mengintegrasikan sensor IoT, modalitas data yang beragam, dan algoritma pembelajaran mesin komparatif untuk kedua target prediktif: kematangan dan volume minyak. Oleh karena itu, penelitian ini dirancang untuk mengisi celah tersebut dengan mengembangkan dan mengevaluasi model pembelajaran mesin berbasis IoT yang secara holistik mendukung presisi keputusan panen.

LANDASAN FILOSOFIS DAN METODOLOGI KOMPUTASIONAL

Dalam Penelitian ini dibangun di atas fondasi filosofis yang kuat untuk memastikan validitas konseptual dan metodologis dari kerangka kerja yang dikembangkan. Pendekatan ini tidak hanya berfokus pada aspek teknis implementasi, tetapi juga pada pemahaman mendalam mengenai hakikat pengetahuan dan cara memperolehnya dalam konteks ilmu komputasi terapan.

A. Ontologi dan Operasionalisasi Konstruk Laten

Konstruk "kematangan" dan "volume minyak" pada tandan buah segar kelapa sawit bersifat laten, artinya tidak dapat diobservasi secara langsung tanpa interpretasi atau pengukuran. Untuk mengatasi hal ini, penelitian mengadopsi pandangan realisme ilmiah yang dikombinasikan dengan prinsip operasionalisme. Konstruk laten tersebut dioperasionalkan melalui indikator-indikator yang terukur dan dapat diobservasi di lapangan, yang meliputi karakteristik visual dari citra (seperti warna dan tekstur mesokarp), jumlah brondolan yang telah matang, data sensor lingkungan (suhu, kelembaban), bobot tandan, serta hasil ekstraksi minyak yang diperoleh melalui proses bench-press atau laboratorium sebagai data ground truth. Hubungan antara objek fisik yang diamati dan representasi datanya dibingkai secara cermat untuk menjaga validitas ontologis, yaitu kesesuaian antara bagaimana realitas itu ada dan bagaimana ia direpresentasikan dalam data.

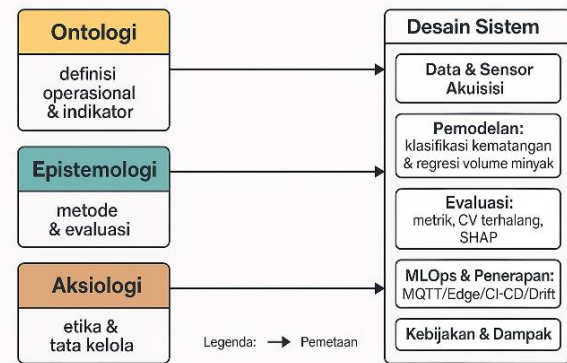
B. Epistemologi dan Validitas

Kami mengadopsi falsifikasiisme (Popper) dengan pengujian out-of-sample dan lintas domain sebagai upaya pembantahan. Kepekaan terhadap pergeseran paradigma (Kuhn) penting

ketika inovasi sensor/algoritme mengubah praktik. Inferensi disusun sebagai siklus empiris–komputasional: hipotesis, akuisisi data, pemodelan, analisis galat, revisi.

C. Metodologi Ilmiah Komputasional

Kerangka berpijak pada tiga level Marr: tujuan komputasional (pemetaan observasi ke keputusan panen), representasi/algoritme (fitur multimodal, arsitektur ML), dan implementasi (edge device, MQTT, penyimpanan). Levels of abstraction (Floridi) menjaga pemisahan pengukuran–keputusan dan auditabilitas. Keterangan model menggunakan SHAP dan dokumentasi model card untuk akuntabilitas.



Gambar 1. Pemetaan filosofis ke desain sistem ditampilkan sebagai placeholder.

PEKERJAAN TERKAIT

Visi komputer untuk kematangan telah berkembang melalui CNN/YOLO dengan hasil kuat pada pengaturan terkontrol. Penelitian terkini mengeksplorasi pipeline video dan

platform geospasial skala estate. Imaging hiperspektral memberi peningkatan inferensi agronomis. Celah yang tersisa: integrasi kematangan dan volume minyak secara multimodal dengan MLOps dan evaluasi robust lintas domain.

Tabel 1. Ringkasan Karya Terkait (modalitas, target, metrik,keterbatasan)

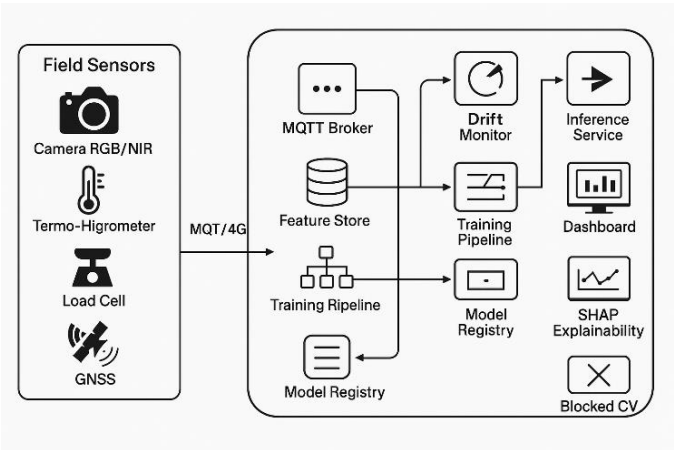
Studi	Modalitas	Target	Metrik	Catatan/Keterbatasan
Junior et al. (2023) [10]	Video RGB	Kematangan (klasifikasi)	—	Pengaturan terkontrol
Puttinaovarat et al. (2024) [11]	Citra+ Geo	Platform klasifikasi	—	Integrasi spasial
García-Vera et al. (2024) [12]	Hiperspektral	Beragam (review)	—	Ulasan luas

METODE / KERANGKA KOMPUTASIONAL

A. Arsitektur IoT–ML

Node lapang: kamera RGB (opsional NIR), termo-higrometer (T, RH), load cell (berat TBS), GNSS, dan edge (Jetson/RPi). Pre-processing di tepi: white balance, denoise,

segmentasi tandan. Data dikirim via MQTT/4G ke data lake dan feature store untuk orkestrasi pelatihan/inferensi MLOps: versioning, CI/CD, monitoring drift.



Gambar 2. Arsitektur end-to-end dan alur data (placeholder).

B. Desain Data & Ground Truth

Target ≥ 2.000 TBS dari ≥ 3 blok berbeda. Paket data: citra multi-sudut, bobot, T/RH, GPS, waktu, kelas kematangan oleh panelis, serta label volume minyak dari subsampel terstratifikasi via mini press. Formulir dan SOP akuisisi menjaga konsistensi pencahayaan dan geometri kamera.

C. Pemodelan & Fusi Multimodal

Prediktor citra: HSV/CIELab, GLCM, embedding CNN (EfficientNet). Prediktor tabel: bobot, T/RH, hujan (opsional), umur blok. Target: kelas kematangan (3–4 tingkat) dan volume minyak (ml/kg). Model klasifikasi: YOLO-tiny/EfficientNet-head dengan transfer learning. Model regresi: Gradient

Boosting/TabNet pada embedding + fitur tabel (late fusion). Pelatihan menggunakan blocked cross-validation per blok/estate, penalaan Bayesian.

DISKUSI

KESIMPULAN DAN ARAH LANJUTAN

Fusi multimodal membantu meredam variabilitas pencahayaan dan noise lapang, memperkuat generalisasi dibanding visi tunggal. Keterbatasan utama meliputi biaya ground truth volume minyak dan domain shift antarestates. Mitigasi yang diusulkan: kalibrasi berkala, active learning pada ketidakpastian tinggi, domain adaptation ringan, serta protokol human-in-the-loop untuk keputusan akhir. Implikasi aksiologis: transparansi, tata kelola data yang adil, dan keberlanjutan energi perangkat.

Penelitian ini menyajikan cetak biru filosofis-komputasional yang komprehensif untuk inferensi objektif mengenai tingkat kematangan dan estimasi volume minyak tandan buah segar kelapa sawit, dengan mengintegrasikan teknologi *Internet of Things* (IoT) dan pembelajaran mesin. Kerangka kerja yang diusulkan menghubungkan fondasi ontologis, epistemologis, dan metodologis dari filsafat ilmu dengan keputusan-keputusan desain sistem yang fundamental, mulai dari akuisisi data hingga evaluasi model. Pendekatan ini mengatasi tantangan teknis

dalam memprediksi kedua target kritis tersebut secara simultan, sekaligus menyediakan dasar teoretis yang kokoh untuk memastikan validitas dan keandalan inferensi yang dihasilkan. Beberapa area penelitian lanjutan yang menjanjikan dapat dieksplorasi, seperti penerapan *federated learning* yang memungkinkan pelatihan model secara kolaboratif antar estate tanpa perlu memindahkan data mentah, sehingga meningkatkan privasi dan efisiensi. Integrasi sensor hiperspektral portabel ke dalam pipeline IoT dapat membuka peluang untuk menangkap informasi spektral yang lebih kaya, yang berpotensi meningkatkan akurasi prediksi secara signifikan. Menghubungkan prediksi kematangan dan volume minyak langsung dengan Oil Extraction Rate (OER) aktual di pabrik pengolahan dapat memungkinkan pengembangan sistem optimasi closed-loop, yang akan menjadi sistem holistik untuk mengoptimalkan seluruh rantai nilai dari kebun hingga produk akhir.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Issa, S. Majed, S. Ameer, and H. M. Al-Jawahry, "Farming in the Digital Age: Smart Agriculture with AI and IoT," *E3S Web Conf.*, vol. 477, p. 81, 2024, doi: 10.1051/e3sconf/202447700081.
- A. Kalbhor, "AI and Machine Learning in Precision Agriculture: The Future of Agricultural Precision Agriculture," *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 13,

- no. 2, pp. 648–654, 2025, doi: 10.22214/ijraset.2025.66920.
- B. Baranitharan, G. Prabhkar, K. Chandran, D. K. Vairavel, R. Murugesan, and M. Gheisari, “Revolutionizing Agriculture: A Comprehensive Review of IoT Farming Technologies,” 2024. doi: 10.2174/012666255829639424090204 0727.
- F. A. J. Suharjito, “Annotated Datasets of Oil Palm Fruit Bunch Piles for Ripeness Grading,” *Sci. Data*, vol. 10, p. 543, 2023.
- F. A. Junior, “Video-based oil palm ripeness detection model using deep learning (YOLOv4 series),” *Heliyon* (ScienceDirect), 2023.
- G. E. P. Box and N. R. Draper, *Empirical Model-Building and Response Surfaces*. New York: Wiley, 1987.
- H. Basri, “Implementasi Sistem Irigasi Cerdas Berbasis IoT dan Machine Learning pada Pembibitan Pala di Papua Barat,” *J. Ilm. Edutic Pendidik. dan Inform.*, vol. 8, no. 2, pp. 89–96, 2022, doi: 10.21107/edutic.v8i2.12393.
- I. Motta, N. Vuillerme, H. Pham, and F. A. P. de Figueiredo, “Machine learning techniques for coffee classification: a comprehensive review of scientific research,” 2024, Springer Science+Business Media. doi: 10.1007/s10462-024-11004-w.
- M. K. Nasution, *Pembelajaran Linguistik Komputasi: Menaksir Kemampuan Diri*. 2025.
- M. K. Nasution, *Pembelajaran Perolehan Informasi & Penambangan Data: Menaksir Kemampuan Diri*, vol. 1. 2025.
- M. Mitchell, *Artificial Intelligence: A Guide for Thinking Humans*. New York: Farrar, Straus and Giroux, 2019.
- M. Tan and Q. V Le, “EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks,” in *Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning (ICML)*, 2019, pp. 6105–6114.
- N. Khan, B. H. Baharudin, and R. Abdullah, “Oil palm and machine learning: Reviewing one decade of ideas, innovations, applications, and gaps,” *Agriculture*, vol. 11, no. 9, p. 832, 2021, doi: 10.3390/agriculture11090832.
- P. Tropis, R. M. Siregar, M. Akbar, S. Pane, and R. Dian, “Indonesian Journal of Computer Science,” vol. 13, no. 1, pp. 4906–4921, 2024.
- R. M. Siregar, B. Mulyara, R. Dian, M. Maisarah, M. A. S. Pane, and A. Prayogi, “Design of Control System and Temperature in Coffee Dryer Arduino Based Automatic Using Fuzzy,” *JITK (Jurnal Ilmu Pengetah. dan Teknol. Komputer)*, vol. 10, no. 3, pp. 634–642, 2025, doi: 10.33480/jitk.v10i3.6166.
- S. B. Dhal, “Optimizing Biofuel Production: Integrating NIR Imaging and Machine Learning for Corn Stover Characterization,” *OSTI OAI (U.S. Dep. Energy Off. Sci. Tech. Information)*, 2024, [Online]. Available: <https://www.osti.gov/biblio/2478060>
- S. M. Lundberg and S.-I. Lee, “A Unified Approach to Interpreting Model Predictions,” in *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, 2017, pp. 4765–4774.

- S. Puttinaovarat, S. Chai-Arayalert, and W. Saetang, "Oil Palm Bunch Ripeness Classification and Plantation Verification Platform: Leveraging Deep Learning and Geospatial Analysis and Visualization," *ISPRS Int. J. Geo-Information*, vol. 13, no. 5, p. 158, 2024, doi: 10.3390/ijgi13050158.
- V. G. Lekshmy, P. Vishnu, and P. Harikrishnan, "Adaptive IoT System for Precision Agriculture," in *Lecture notes in networks and systems*, Springer International Publishing, 2022, pp. 39–49. doi: 10.1007/978-981-16-6723-7_4.
- Y. E. García-Vera, "Hyperspectral image analysis and machine learning applications in agriculture: A review," *Sustainability*, vol. 16, no. 14, p. 6064, 2024.