



**Rancang Bangun Smart Composter Berbasis IOT dan
Machine Learning Dengan Sistem Monitoring Berbasis
Firebase dan Flutter**

SUB JUDUL

**Klasifikasi Kematangan Kompos Organik Menggunakan
Metode Decission Tree Berbasiskan Edge Computing
Pada Sistem Smart Composter**

SKRIPSI

Rasyid Fathoni Syahputra

2207421027

**Program Studi Teknik Multimedia Dan Jaringan Jurusan
Teknik Informatika Dan Komputer
Politeknik Negeri Jakarta**

2026



**Klasifikasi Kematangan Kompos Organik Menggunakan
Metode Decission Tree Berbasiskan Edge Computing
Pada Sistem Smart Composter**

SKRIPSI

**Dibuat Untuk Melengkapi Syarat-Syarat yang Diperlukan untuk
Memperoleh Diploma Empat Politeknik**

Rasyid Fathoni Syahputra

2207421027

**Program Studi Teknik Multimedia Dan Jaringan
Jurusan Teknik Informatika Dan Komputer
Politeknik Negeri Jakarta**

2026



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

LEMBAR PENGESAHAN

Skripsi diajukan oleh:

Nama : Rasyid Fathoni Syahputra
NIM : 2207421027
Program Studi : Teknik Multimedia dan Jaringan
Judul Skripsi : Klasifikasi Kematangan Kompos Organik Menggunakan Metode Decision Tree Berbasis Edge Computing pada Sistem Smart Composter

Telah diuji oleh tim penguji dalam Sidang Skripsi pada hari ..., Tanggal ^{Rabu} 1, Bulan
... Tahun 2026 dan dinyatakan LULUS/TIDAK LULUS.

Disahkan oleh:

Pembimbing I	Dr. Indra Hermawan, M.Kom	()
Penguji I	Dr. Prihatin Oktivasari, S.Si., M.Si	()
Penguji II	Susana Dwi Yulianti, M.Kom.	()
Penguji III	Dwi Ermawati, MT	()

Mengetahui:

Ketua Jurusan Teknik Informatika dan Komputer



NIP. 197908032003122003



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Rasyid Fathoni Syahputra

NIM : 2207421027

Jurusan/Program Studi : Teknik Informatika dan Komputer / Teknik Multimedia dan Jaringan

Judul skripsi : Klasifikasi Kematangan Kompos Organik Menggunakan Metode Decision Tree Berbasis Edge Computing pada Sistem Smart Composter

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa skripsi ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bebas dari peniruan terhadap karya dari orang lain. Kutipan pendapat dan tulisan orang lain ditunjuk sesuai dengan cara-cara penulisan karya ilmiah yang berlaku.

Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa dalam skripsi ini terkandung ciri-ciri plagiat dan bentuk-bentuk peniruan lain yang dianggap melanggar peraturan, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Depok, 28 Juli 2026

Yang membuat pernyataan

(Rasyid Fathoni Syahputra)

NIM. 2207421027





Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya sehingga laporan tugas akhir berjudul “Klasifikasi Kematangan Kompos Organik Menggunakan Metode Decission Tree Berbasiskan Edge Computing pada Sistem Smart Composter” dapat diselesaikan. Laporan ini disusun sebagai salah satu syarat memperoleh gelar D4 pada Program Studi Teknik Multimedia dan Jaringan, Jurusan Teknik Informatika dan Komputer, Politeknik Negeri Jakarta. Penulis menyadari bahwa penyusunan laporan ini tidak akan terselesaikan tanpa bantuan, dukungan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Indra Hermawan S.Kom., M.Kom., selaku Dosen Pembimbing, yang telah memberikan waktu, tenaga, dan pikiran untuk membimbing & mengarahkan penulis dalam penyusunan laporan tugas akhir ini.
2. Orang tua dan keluarga penulis, yang senantiasa memberikan dukungan doa, dan motivasi selama proses studi hingga penyusunan laporan ini.
3. Teman-teman sekelas, rekan smart composter, dan sahabat sekampus, yang selalu memberikan bantuan, semangat, dan kerja sama dalam menyelesaikan laporan ini.

Akhir kata, penulis berharap semoga Tuhan Yang Maha Esa senantiasa memberikan balasan yang berlimpah atas segala kebaikan dan bantuan yang telah diberikan oleh semua pihak. Semoga laporan ini dapat memberikan manfaat bagi penulis maupun pihak lain yang membacanya.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

ABSTRAK

Pengelolaan sampah organik rumah tangga melalui pengomposan umumnya masih dilakukan secara manual dengan mengandalkan pengamatan visual yang subjektif terhadap indikator fisik seperti warna, tekstur, dan bau untuk menentukan kematangan kompos. Subjektivitas tersebut meningkatkan risiko evaluasi yang tidak konsisten serta kegagalan proses. Penelitian ini mengusulkan sistem smart composter yang mengintegrasikan sensor Internet of Things (IoT) dengan model machine learning berbasis pohon keputusan (CatBoost, Random Forest, dan XGBoost) yang berjalan pada perangkat edge computing untuk mengklasifikasikan kematangan kompos berdasarkan nilai Germination Index (GI). Dua arsitektur prediksi dirancang dan dibandingkan secara head-to-head, yaitu Arsitektur A (Single-Stage) yang memetakan fitur sensor mentah langsung ke nilai GI, dan Arsitektur B (Two-Stage Soft-Sensor) yang terlebih dahulu mengestimasi empat parameter laboratorium yang sulit diukur langsung (rasio C/N, Electrical Conductivity, Total Nitrogen, dan Nitrate) sebagai keluaran soft-sensor antara sebelum memprediksi GI. Kedua arsitektur dievaluasi pada lima skema augmentasi data (baseline, C-Mixup, GMM, CTGAN, SMOTE) dan tiga metode optimasi hyperparameter (Bayesian Optimization, Random Search, Grid Search) menggunakan skema nested cross-validation berbasis batch pada 452 data asli dari dataset kompos publik, membentuk 270 kombinasi eksperimen. Hasil menunjukkan Arsitektur A secara signifikan mengungguli Arsitektur B (paired t-test, $p = 0,00022$). Konfigurasi terbaik, yaitu CatBoost dengan augmentasi GMM pada Arsitektur A yang dioptimalkan menggunakan Random Search, memperoleh RMSE = 17,729, MAE = 13,342, dan $R^2 = 0,628$. Saat diimplementasikan pada Raspberry Pi 4B dan diuji pada tujuh batch hold-out independen (52 sampel), model mencapai $R^2 = 0,745$, akurasi klasifikasi kematangan 75,0%, serta latensi inferensi rata-rata hanya 1,528 ms, jauh di bawah ambang batas real-time 50 ms. Temuan ini menunjukkan bahwa model tree-based single-stage mampu memberikan klasifikasi kematangan kompos yang objektif dan berlatensi rendah, sesuai untuk implementasi real-time pada perangkat edge dengan sumber daya terbatas

Kata kunci: smart composter, Internet of Things, edge computing, machine learning, Germination Index, CatBoost



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	I
ABSTRAK	II
DAFTAR ISI	III
DAFTAR TABEL	VI
DAFTAR GAMBAR	VIII
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	4
1.3. Batasan Masalah	5
1.4. Tujuan dan Manfaat	6
1.5. Sistematika Penulisan	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1. Pengomposan dan Kematangan Kompos	9
2.1.1. Definisi dan Proses Pengomposan	9
2.1.2. Indikator Kematangan Kompos	10
2.2. Penelitian Terdahulu	11
2.2.1. Gap Penelitian	13
2.3. Algoritma Machine Learning Berbasis Pohon	14
2.3.1. Random Forest	15
2.3.2. XGBoost	15
2.3.3. CatBoost	16
2.4. Hyperparameter Optimization (HPO)	17
2.4.1. Bayesian Optimization	17
2.4.2. Grid Search	19
2.4.3. Random Search	19
2.5. Konsep Soft-Sensor	20
2.6. Feature Engineering pada Data Sensor Tabular	21
2.6.1. Fitur Non-linear dan Interaksi Antar-Sensor	21
2.6.2. Seleksi dan Konstruksi Fitur pada Soft Sensor	22



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

2.6.3. Feature Scaling sebagai Bagian dari Preprocessing	23
2.7. Augmentasi Data Tabular	24
2.7.1. Categorical Mixup (C-Mixup)	25
2.7.2. Gaussian Mixture Model Oversampling (GMM)	25
2.7.3. CTGAN (Conditional Tabular GAN)	26
2.7.4. Synthetic Minority Oversampling Technique (SMOTE)	27
BAB III METODE PENELITIAN	29
3.1. Rancangan Penelitian	29
3.2. Tahapan Penelitian	37
3.2.1. Studi Literatur	37
3.2.2. Akuisisi dan Eksplorasi Dataset	37
3.2.3. Preprocessing dan Rekayasa Fitur	38
3.2.4. Rancangan Dua Arsitektur Prediksi	47
3.2.5. Eksperimen Lima Metode Augmentasi	48
3.2.6. Nested Cross-Validation dan Hyperparameter Optimization	50
3.2.7. Perbandingan Statistik, Ablation Study, dan Ensemble	52
3.2.8. Konversi dan Deployment Model	53
3.2.9. Pengujian Latensi Inferensi	54
3.3. Objek Penelitian	54
3.3.1. Dataset	54
3.3.2. Teknik Pengumpulan Data	55
3.3.3. Teknik Analisis Data	55
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	57
4.1. Analisis Kebutuhan	57
4.1.1. Analisis Dataset dan Distribusi Nilai GI	57
4.1.2. Skema Validasi: Nested Cross-Validation dan Pemilihan K	60
4.2. Perancangan Model	61
4.2.1. Dua Arsitektur yang Dibandingkan	61
4.2.2. Tiga Algoritma Pembelajaran Mesin	61
4.2.3. Rancangan Augmentasi Data (Lima Skema)	61
4.2.4. Tiga Metode Hyperparameter Optimization	62
4.3. Implementasi dan Eksperimen	63



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

4.3.1. Rancangan Eksperimen Nested Cross-Validation	63
4.3.2. Hasil Eksperimen Keseluruhan	64
4.3.3. Analisis Hyperparameter dan Konvergensi Optimasi	65
4.3.4. Feature Importance	75
4.3.5. Penyimpanan Pipeline untuk Deployment	76
4.4. Pengujian	76
4.4.1. Deskripsi dan Prosedur Pengujian	76
4.4.2. Perbandingan Arsitektur: Uji Statistik Formal	77
4.4.3. Ablation Study: Kontribusi Augmentasi Data	78
4.4.4. Perbandingan Metode HPO: Performa vs Efisiensi Komputasi	79
4.4.5. Analisis Error dan Diagnostik Residual	80
4.4.6. Learning Curve	81
4.4.7. Perbandingan Pendekatan Ensemble vs Model Tunggal	82
4.4.8. Validasi Hold-out Dataset Independen	85
4.4.9. Simulasi Deployment: Latensi Inferensi dan Akurasi Klasifikasi Kemungkinan	86
4.4.10. Analisis Kompromi (Trade-off): Kompleksitas vs Akurasi vs Efisiensi Komputasi	90
BAB V PENUTUP	92
5.1. Simpulan	92
5.2. Saran	94
DAFTAR PUSTAKA	96
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	101



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	<i>Penelitian Terkait</i>	11
Tabel 3.1	<i>Ringkasan Parameter Metode Augmentasi Data</i>	50
Tabel 3.2	<i>Ruang Pencarian Hyperparameter per Model</i>	51
Tabel 3.3	<i>Spesifikasi Dataset “Compost Maturity and Emission Monitoring Dataset”</i>	55
Tabel 4.1	<i>Statistik Deskriptif Dataset Asli (n = 452)</i>	57
Tabel 4.2	<i>Distribusi Kategori Kematangan (Zucconi) pada 452 Data Asli</i>	59
Tabel 4.3	<i>Korelasi Pearson Fitur Sensor Mentah terhadap GI(%)</i>	59
Tabel 4.4	<i>Analisis Stabilitas Pemilihan K Terbaik</i>	60
Tabel 4.5	<i>Jumlah Baris Data Latih Sebelum vs Sesudah Augmentasi</i>	62
Tabel 4.6	<i>10 Kombinasi Terbaik dengan Confidence Interval 95%</i>	64
Tabel 4.7	<i>Rincian Trial per Hyperparameter untuk Bayesian Optimization (150 Trial per Model)</i>	66
Tabel 4.8	<i>Rincian Trial per Hyperparameter untuk Random Search (50 Kombinasi × 3 Fold per Model)</i>	67
Tabel 4.9	<i>Rincian Trial per Hyperparameter untuk Grid Search (50 Kombinasi × 3 Fold per Model)</i>	68
Tabel 4.10	<i>Hyperparameter Importance (fANOVA) per Model (Bayesian vs Random Search vs Grid Search)</i>	70
Tabel 4.11	<i>Perbandingan Hyperparameter: Kombinasi Terbaik Keseluruhan vs Nilai Terbaik CatBoost pada Baseline</i>	73
Tabel 4.12	<i>Perbandingan Arsitektur A vs B dan Uji Statistik</i>	77
Tabel 4.13	<i>Ablation Study — Kontribusi Augmentasi Data</i>	78
Tabel 4.14	<i>Perbandingan Metode HPO — Performa dan Waktu Komputasi</i>	79
Tabel 4.15	<i>Ringkasan Ensemble per Augmentasi</i>	83
Tabel 4.16	<i>Perbandingan Apple-to-Apple: Ensemble vs Model Tunggal Terbaik per Augmentasi</i>	84
Tabel 4.17	<i>Hasil Validasi Hold-out vs Estimasi Nested Cross-Validation</i>	85

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Tabel 4.18	<i>Statistik Latensi Inferensi ($n = 52$ inferensi)</i>	86
Tabel 4.19	<i>Akurasi Klasifikasi Kematangan per Kategori ($n = 52$)</i>	87
Tabel 4.20	<i>Ringkasan Simulasi per Batch Hold-out</i>	88



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1	Diagram Alur (Flowchart) Arsitektur A (Single-Stage) untuk Catboost.....	31
Gambar 3.2	Diagram Alur (Flowchart) Arsitektur A (Single-Stage) untuk Random Forest.....	32
Gambar 3.3	Diagram Alur (Flowchart) Arsitektur A (Single-Stage) untuk 3 XGBoost.....	33
Gambar 3.4	Diagram Alur (Flowchart) Arsitektur B (Two-Stage Soft-Sensor) untuk Catboost.....	34
Gambar 3.5	Diagram Alur (Flowchart) Arsitektur B (Two-Stage Soft-Sensor) untuk Random Forest.....	35
Gambar 3.6	Diagram Alur (Flowchart) Arsitektur B (Two-Stage Soft-Sensor) untuk XGBoost.....	36
Gambar 4.1	Distribusi Nilai GI(%) (kiri) dan Ukuran Batch (kanan) pada 452 Data Asli.....	58
Gambar 4.2	Visualisasi Pembagian GroupKFold (K=3) per Batch.....	60
Gambar 4.3	Perbandingan Jumlah Baris Data Latih Sebelum vs Sesudah Augmentasi.....	62
Gambar 4.4	Rata-rata RMSE per Model $\times$ Arsitektur dan Distribusi Absolute Error.....	65
Gambar 4.5	Konvergensi Bayesian Optimization vs Random Search vs Grid Search per Trial.....	69
Gambar 4.6	Sensitivitas Hyperparameter CatBoost.....	72
Gambar 4.7	Training Loss per Iterasi (CatBoost, XGBoost) dan OOB Score (Random Forest).....	74
Gambar 4.8	Feature Importance — CatBoost (native)	76
Gambar 4.9	Ablation Study: Kontribusi Augmentasi (kiri) dan Arsitektur (kanan).....	79
Gambar 4.10	Perbandingan RMSE dan Waktu Komputasi 3 Metode HPO	80



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Gambar 4.11 <i>Analisis Error: Actual vs Predicted, Residual Plot, dan Distribusi Error</i>	81
Gambar 4.12 <i>Learning Curve — Pengaruh Fraksi Data Latih terhadap RMSE</i> .	82
Gambar 4.13 <i>Bobot Ensemble per Augmentasi dan Perbandingan RMSE</i>	84



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Berdasarkan data Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) tahun 2025, komposisi sampah di Indonesia didominasi oleh sisa makanan sebesar 40,61%, diikuti oleh plastik sebesar 20,53%, kayu/ranting sebesar 13,22%, dan kertas/karton sebesar 11,38% (Kementerian Lingkungan Hidup, 2025). Data tersebut menunjukkan bahwa sampah organik masih menjadi komponen terbesar dalam kumpulan sampah nasional. Oleh karena itu, pengelolaan sampah organik, khususnya di tingkat rumah tangga, perlu menjadi perhatian utama untuk mengurangi beban Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) serta menekan dampak lingkungan yang ditimbulkan akibat proses dekomposisi sampah organik.

Salah satu metode yang umum digunakan untuk mengolah sampah organik adalah pengomposan, yaitu proses penguraian bahan organik secara biologis dengan mengendalikan aktivitas mikroorganisme hingga menghasilkan kompos yang matang yang dapat dimanfaatkan kembali untuk keperluan pertanian dan perkebunan. Meskipun pengomposan menjadi solusi yang berkelanjutan, keberhasilannya sangat bergantung pada beberapa parameter utama, antara lain suhu, kelembapan, pH, rasio karbon terhadap nitrogen (C/N), aerasi, serta kemunculan gas hasil dekomposisi seperti amonia yang menjadi indikator krusial kualitas proses. Li et al. (2023) menjelaskan bahwa parameter-parameter tersebut secara langsung memengaruhi kecepatan dekomposisi dan tingkat kematangan kompos, sementara proses pengomposan berbasis sensor umumnya dipantau melalui parameter fisik yang mencakup suhu, kelembapan, dan pH (Putri et al., 2025). Apabila parameter tersebut tidak berada pada kondisi optimal, proses pengomposan berpotensi menghasilkan kompos yang belum stabil serta belum mencapai tingkat kematangan yang memadai, padahal kematangan kompos merupakan salah satu indikator utama dalam menentukan kelayakan produk akhir karena berpengaruh terhadap efektivitas pemanfaatannya di lahan pertanian.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Namun, praktik di lapangan saat ini, seperti yang ditemukan di Bank Sampah Rumah Harum, Depok, masih dilakukan secara manual dan kurang termonitor dengan baik. Pengolahan yang mengandalkan perkiraan fisik dan pengamatan subjektif tersebut meningkatkan risiko ketidakstabilan proses dekomposisi serta memicu tingginya kegagalan deteksi masalah pada tumpukan kompos. Untuk mengatasi kendala tersebut, pemanfaatan teknologi Internet of Things (IoT) hadir menawarkan solusi pemantauan objektif secara real-time melalui penerapan arsitektur IoT terdistribusi yang dibagi menjadi empat layer utama, yaitu Sensor Acquisition Node, Edge Computing Processor berbasis Raspberry Pi 4B, Cloud Backend Database Firebase, dan User Application Interface, sehingga data kondisi fisik dari tumpukan sampah dapat dikumpulkan, diolah, dan dikirimkan secara kontinu tanpa perlu kehadiran operator secara fisik di area tumpukan.

Umumnya, kematangan kompos masih dinilai melalui sifat fisiknya. Seperti warna, tekstur, bau, dan kestabilan suhu. Putri et al. (2025) mengatakan bahwa indikator fisik tersebut merupakan pendekatan utama yang digunakan untuk mengevaluasi kondisi kompos, meskipun penilaian ini cukup subjektif dan hampir sepenuhnya bergantung pada pengalaman pengguna. Akibatnya, evaluasi kematangan kompos bersifat tidak konsisten, terutama pada skala rumah tangga atau jika pengguna tidak memiliki pengalaman teknis yang memadai.

Perkembangan Internet of Things (IoT) membuka peluang untuk meningkatkan pemantauan proses pengomposan secara lebih terukur dan presisi. Rais dan Rokhmah (2025) menjelaskan bahwa IoT memungkinkan objek fisik saling terhubung melalui internet untuk pemantauan secara real-time. Dalam konteks pengomposan, Putri et al. (2025) serta Mujiyanti et al. (2022) menunjukkan bahwa sensor seperti suhu, kelembapan, pH, dan gas dapat diintegrasikan dengan mikrokontroler atau perangkat komputasi untuk memantau kondisi kompos secara langsung. Dengan demikian, pengguna dapat memperoleh data proses secara kontinu tanpa sepenuhnya bergantung pada pengamatan manual.

Namun, penelitian *smart composter* berbasis IoT yang ada di Indonesia masih dominan pada fungsi pemantauan dan kontrol berbasis ambang batas, bukan secara otomatis mengklasifikasikan kematangan kompos (Rais & Rokhmah, 2025; Putri et al., 2025; Mujiyanti et al., 2022). Di sisi lain, penelitian machine



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

learning untuk prediksi kematangan kompos umumnya masih dievaluasi secara offline pada data historis dan belum terintegrasi dengan sistem IoT real-time maupun diuji pada perangkat edge computing (Li et al., 2023; Shi et al., 2025). Bahkan pada dataset publik yang sama dengan penelitian ini, Mullick et al. (2025) mencapai akurasi prediksi yang sangat tinggi ($R^2 = 0,998-0,999$), namun pendekatan tersebut memprediksi maturity Score menggunakan T-Value dan GI(%) itu sendiri sebagai bagian dari fitur input, bukan memprediksi GI hanya dari sensor fisik dasar yang tersedia pada perangkat IoT. Dengan demikian, terdapat gap implementasi yang belum terjawab: belum ada penelitian yang mengintegrasikan sistem IoT real-time dengan model machine learning untuk memprediksi kematangan kompos hanya dari sensor fisik, sekaligus diuji kelayakannya pada perangkat edge computing.

Integrasi antara sistem pemantauan IoT dan model *machine learning* berpotensi menghasilkan *smart composter* yang tidak hanya memantau kondisi kompos, tetapi juga mampu memprediksi tingkat kematangan kompos secara lebih objektif dan berbasis data. Dengan menggunakan data real-time dari sensor, sistem dapat mengenali pola perubahan kondisi selama proses dekomposisi berlangsung. Data tersebut kemudian diproses menggunakan algoritma *machine learning* untuk mengidentifikasi parameter proses yang berkorelasi dengan nilai *Germination Index* (GI), sehingga sistem dapat memberikan hasil prediksi kematangan kompos yang lebih terukur dibandingkan penilaian manual.

Dengan mempertimbangkan kondisi-kondisi tersebut, penelitian ini mengusulkan sistem smart composter yang menerapkan sensor IoT dengan model *edge computing* berbasis algoritma *tree-based* (*CatBoost*, *Random Forest*, dan *XGBoost*). Penelitian ini merancang dan membandingkan dua arsitektur prediksi secara head-to-head, yaitu arsitektur A (Single-Stage), yang memetakan fitur sensor langsung ke nilai GI(%), dan arsitektur B (Two-Stage Soft-Sensor), yang terlebih dahulu mengestimasi empat parameter laboratorium yang sulit diukur langsung oleh sensor fisik (rasio C/N, *Electrical Conductivity*/EC, Total Nitrogen/TN, dan Nitrate) sebagai representasi antara, sebelum memprediksi nilai GI akhir. Ketiga algoritma tersebut dibandingkan pada kedua arsitektur, dikombinasikan dengan enam skema augmentasi data dan tiga metode



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

hyperparameter optimization, untuk memperoleh kombinasi model dengan performa dan efisiensi komputasi terbaik.

Pemilihan pendekatan *edge computing* dalam penelitian ini didasarkan pada kebutuhan sistem pengomposan rumah tangga yang memerlukan respons lokal secara cepat dan berkelanjutan. Pemrosesan model secara langsung pada perangkat tertanam, seperti Raspberry Pi, memungkinkan sistem tetap beroperasi tanpa bergantung pada konektivitas internet yang tidak selalu stabil di lingkungan rumah tangga. Selain itu, model berbasis pohon keputusan (*CatBoost*, *Random Forest*, dan *XGBoost*) tidak memerlukan konversi format khusus seperti TensorFlow Lite, sehingga dapat diimplementasikan langsung pada perangkat edge menggunakan pustaka Python standar. Hal ini memungkinkan tercapainya latensi inferensi yang rendah tanpa kebutuhan transmisi data ke cloud. Penelitian ini juga bertujuan untuk mengevaluasi kinerja model dalam hal efisiensi komputasi pada perangkat edge dengan sumber daya terbatas, tanpa penurunan akurasi yang signifikan.

Penelitian ini relevan karena mengintegrasikan beberapa aspek yang belum banyak dikaji secara simultan dalam penelitian terdahulu, yaitu integrasi IoT dan machine learning, perbandingan langsung dua arsitektur prediksi (single-stage dan two-stage soft sensor), evaluasi sistematis kombinasi augmentasi data dan metode *hyperparameter optimization*, serta pengujian implementasi pada perangkat edge computing. Oleh karena itu, penelitian berjudul “Klasifikasi Kematangan Kompos Organik Menggunakan Metode Decision Tree Berbasis Edge Computing pada Sistem Smart Composter” diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem pengomposan cerdas yang lebih efisien, objektif, dan aplikatif.

1.2. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, permasalahan yang diangkat dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut.

1. Bagaimana merancang dan membandingkan Arsitektur A (*Single-Stage*) dan Arsitektur B (*Two-Stage Soft-Sensor*) menggunakan algoritma tree-based (*CatBoost*, *Random Forest*, *XGBoost*) untuk memprediksi tingkat



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

kematangan kompos (*Germination Index*) berbasis data sensor proses pengomposan?

2. Bagaimana mengimplementasikan dan menguji model prediksi GI terbaik pada sistem smart composter berbasis Raspberry Pi sehingga dapat memberikan informasi tingkat kematangan kompos secara mendekati real-time kepada pengguna?
3. Bagaimana menganalisis dan mengevaluasi pengaruh arsitektur, algoritma, skema augmentasi data, dan metode hyperparameter optimization terhadap akurasi prediksi kematangan kompos pada berbagai kategori GI (Fitotoksik, Rendah, Sedang, Matang)?

1.3. Batasan Masalah

Agar penelitian lebih fokus dan terarah, ditetapkan batasan masalah sebagai berikut.

1. Penelitian ini dibatasi pada perancangan dan perbandingan arsitektur A (*Single-Stage*) dan arsitektur B (*Two-Stage Soft-Sensor*) menggunakan tiga algoritma *tree-based* (CatBoost, Random Forest, dan XGBoost), lima skema augmentasi data (baseline, C-Mixup, GMM, CTGAN, dan SMOTE), serta tiga metode hyperparameter optimization (Bayesian Optimization, Random Search, dan Grid Search). Seluruh kombinasi dievaluasi menggunakan skema *nested cross-validation* berbasis *batch* per waktu pengomposan. Penelitian ini tidak mencakup eksplorasi algoritma maupun arsitektur *machine learning* di luar pendekatan *tree-based* yang digunakan.
2. Penelitian ini dibatasi pada pemantauan parameter proses dan implementasi model prediksi tingkat kematangan kompos pada perangkat keras berupa Raspberry Pi dan modul sensor, dengan rancangan mekanik dan elektronik yang mengikuti sistem kelompok yang telah ditetapkan. Penelitian tidak mencakup perancangan sistem kontrol otomatis, seperti motor pengaduk, motor pencacah, dan pompa air, maupun pengembangan aspek mekanik dan elektronik perangkat. Selain itu, penelitian ini juga tidak membahas degradasi performa sensor, *sensor drift* akibat paparan lingkungan, maupun prosedur recalibrasi berkala. Seluruh evaluasi model dilakukan dengan asumsi bahwa



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

sensor berada dalam kondisi terkalibrasi dan mampu menghasilkan pembacaan yang akurat selama proses pengujian.

3. Penelitian ini dibatasi pada evaluasi akurasi model menggunakan data sekunder dari *Compost Maturity and Emission Monitoring Dataset* (Mullick, 2023), yang terdiri atas 452 baris data asli dari 46 *batch* unik tanpa menyertakan data sintetis SMOGN bawaan dataset. Evaluasi dilakukan menggunakan nilai *Germination Index* (GI) yang telah tersedia sebagai acuan penentuan kategori kematangan kompos (Fitotoksik, Rendah, Sedang, dan Matang). Penelitian ini tidak mencakup pengumpulan data primer melalui eksperimen pengomposan mandiri maupun pengujian laboratorium tambahan untuk memvalidasi tingkat kematangan kompos secara independen.

1.4. Tujuan dan Manfaat

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang dan mengimplementasikan model two-stage machine learning untuk mengklasifikasi tingkat kematangan kompos (GI) berbasis data sensor.
2. Menganalisis pengaruh penggunaan beberapa algoritma pembelajaran mesin (CatBoost, Random Forest, XGBoost) serta strategi augmentasi data terhadap akurasi klasifikasi GI pada dataset kompos publik.
3. Mengimplementasikan model klasifikasi GI terbaik pada prototipe *smart composter* berbasis Raspberry Pi dan mengukur kinerja inferensi model (akurasi dan latensi) untuk memastikan kelayakan deployment real-time.

Manfaat Penelitian adalah sebagai berikut:

1. Manfaat praktis
 - a) Menyediakan solusi teknologi untuk meningkatkan efektivitas pengelolaan sampah organik melalui pemantauan kondisi kompos dan klasifikasi kematangan yang terukur dan berbasis data.
 - b) Membantu pengguna *smart composter* dalam mengambil keputusan yang lebih objektif terkait waktu panen kompos tanpa harus sepenuhnya bergantung pada pengalaman subjektif atau uji laboratorium.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

2. Manfaat akademis
 - a) Memberikan kontribusi pada pengembangan ilmu pengetahuan di bidang Internet of Things dan pembelajaran mesin, khususnya penerapan two-stage machine learning dan ensemble pada kasus klasifikasi kematangan kompos.
 - b) Menjadi referensi bagi penelitian lanjutan terkait smart composting dengan strategi augmentasi data tabular, dan analisis kinerja berbagai algoritma machine learning untuk klasifikasi GI.
3. Manfaat bagi masyarakat
 - a) Mendukung upaya pengurangan volume sampah yang dikirim ke TPA melalui pengolahan sampah organik di tingkat sumber dengan bantuan teknologi pemantauan dan klasifikasi yang lebih cerdas.
 - b) Meningkatkan kesadaran mengenai pentingnya pemantauan dan klasifikasi proses dalam menghasilkan kompos berkualitas sehingga dapat dimanfaatkan secara aman dan berkelanjutan.

1.5. Sistematika Penulisan

Laporan Tugas Akhir ini disusun dengan sistematika sebagai berikut:

1. BAB I PENDAHULUAN

Berisi latar belakang penelitian, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, serta sistematika penulisan laporan.

2. BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Menguraikan landasan teori dan penelitian terdahulu yang relevan dengan topik pengomposan, indikator kematangan kompos (termasuk GI dan T-Value), algoritma machine learning berbasis pohon (CatBoost, Random Forest, XGBoost), metode hyperparameter optimization (Grid Search, Random Search, Bayesian Optimization) dan konsep soft sensor, teknik augmentasi data tabular, serta gap penelitian yang mendasari penggunaan model two-stage machine learning pada penelitian ini.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

3. BAB III METODE PENELITIAN

Menjelaskan rancangan penelitian, perancangan dua arsitektur prediksi (*Single-Stage* dan *Two-Stage Soft-Sensor*) pada smart composter berbasis IoT, rekayasa fitur, skema augmentasi data, metode hyperparameter optimization, skema evaluasi nested cross-validation, pendekatan ensemble, serta metode pengujian dan analisis kinerja model (termasuk uji deployment pada Raspberry Pi).

4. BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Memaparkan hasil analisis kebutuhan, perancangan, dan implementasi model two-stage machine learning, meliputi hasil eksperimen 270 kombinasi (arsitektur, algoritma, augmentasi, dan metode HPO), hasil optimasi ensemble, serta konversi model untuk deployment. Bab ini juga menyajikan hasil pengujian model (evaluasi R^2 , MAE, RMSE secara global dan per kategori GI, serta analisis SHAP), hasil pengujian latensi inferensi pada Raspberry Pi, serta analisis kompromi (trade-off) antara akurasi model dan performa komputasi edge dari beberapa skenario yang diuji.

5. BAB V PENUTUP

Berisi simpulan yang menjawab rumusan masalah dan tujuan penelitian berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian yang telah dilakukan, serta saran bagi pengembangan penelitian selanjutnya, termasuk pengumpulan dataset mandiri, pengujian lapangan, dan penyempurnaan model.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB V

PENUTUP

5.1. Simpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian yang telah dilakukan, penelitian ini menghasilkan beberapa simpulan sebagai berikut.

1. Arsitektur A (Single-Stage) terbukti memiliki performa yang lebih baik dibandingkan Arsitektur B (Two-Stage Soft-Sensor) dalam memprediksi Germination Index (GI) menggunakan algoritma berbasis pohon keputusan, yaitu CatBoost, Random Forest, dan XGBoost. Secara rata-rata, Arsitektur A menghasilkan RMSE sebesar 19,008, lebih rendah sekitar 1,9% dibandingkan Arsitektur B yang memperoleh RMSE sebesar 19,383. Perbedaan tersebut terbukti signifikan secara statistik berdasarkan hasil paired t-test ($t = -3,795$; $p = 0,000222$) dan Wilcoxon signed-rank test ($W = 3153$; $p = 0,001599$) pada 135 kombinasi pengujian. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan tahap estimasi parameter laboratorium pada Arsitektur B, yang semula diharapkan mampu meningkatkan akurasi prediksi, tidak memberikan keuntungan performa. Sebaliknya, kompleksitas tambahan tersebut justru menyebabkan penurunan akurasi. Dari seluruh kombinasi yang dievaluasi, model terbaik diperoleh dari penggunaan CatBoost dengan augmentasi GMM pada Arsitektur A yang dioptimalkan menggunakan Random Search. Model tersebut mencapai RMSE sebesar 17,729, MAE sebesar 13,342, dan koefisien determinasi R^2 sebesar 0,628 berdasarkan evaluasi nested cross-validation.
2. Model terbaik yang diperoleh kemudian diimplementasikan dan diuji melalui simulasi *deployment* menggunakan tujuh *batch hold-out* yang terdiri atas 52 observasi dan tidak pernah digunakan selama proses pelatihan maupun optimasi hiperparameter. Pengujian ini dirancang untuk merepresentasikan kondisi penggunaan nyata pada sistem smart composter berbasis Raspberry Pi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa model mampu mencapai nilai R^2 sebesar 0,745 pada prediksi GI kontinu, dengan akurasi klasifikasi kematangan kompos sebesar 75,0%. Selain itu, waktu inferensi rata-rata yang dibutuhkan



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

3. model hanya sebesar 1,528 ms, jauh di bawah ambang batas 50 ms yang ditetapkan sebagai kriteria keberhasilan sistem real-time. Temuan ini menunjukkan bahwa model dapat dijalankan secara mandiri pada perangkat edge computing dengan sumber daya terbatas tanpa memerlukan koneksi internet maupun layanan cloud.
4. Evaluasi terhadap lima metode augmentasi data (Baseline, GMM, C-Mixup, CTGAN, dan SMOTE), tiga algoritma pembelajaran mesin (CatBoost, Random Forest, dan XGBoost), serta tiga metode optimasi hiperparameter (Bayesian Optimization, Random Search, dan Grid Search) menghasilkan beberapa temuan penting.
 - a) Pertama, penelitian ini menunjukkan bahwa tidak terdapat satu metode augmentasi yang selalu memberikan hasil terbaik pada seluruh kombinasi model dan arsitektur. Secara rata-rata, C-Mixup menghasilkan RMSE terendah pada seluruh eksperimen. Namun, pada kombinasi terbaik penelitian ini, yaitu CatBoost dengan Arsitektur A, augmentasi GMM justru memberikan performa tertinggi. Di sisi lain, SMOTE menghasilkan performa yang mendekati baseline pada kombinasi terbaik, tetapi kontribusinya terhadap peningkatan akurasi secara keseluruhan relatif terbatas.
 - b) Kedua, Bayesian Optimization menghasilkan performa rata-rata terbaik, tetapi membutuhkan waktu komputasi yang jauh lebih besar dibandingkan Random Search. Menariknya, kombinasi model terbaik dalam penelitian ini justru ditemukan melalui Random Search. Temuan ini mengindikasikan bahwa metode optimasi yang lebih sederhana masih mampu memberikan hasil yang kompetitif ketika ruang pencarian hiperparameter relatif kecil.
 - c) Ketiga, pendekatan ensemble yang menggabungkan CatBoost, Random Forest, dan XGBoost tidak berhasil mengungguli model tunggal pada seluruh skema augmentasi yang diuji. Dengan demikian, peningkatan kompleksitas model tidak selalu menghasilkan peningkatan performa yang sebanding.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- d) Keempat, performa klasifikasi menunjukkan variasi antar kategori kematangan kompos. Kategori Sedang memperoleh akurasi tertinggi, sedangkan kategori Fitotoksik memiliki akurasi terendah. Sebagian besar kesalahan klasifikasi terjadi pada sampel yang nilai GI-nya berada di sekitar batas antarkategori. Hal ini wajar karena model yang digunakan dirancang untuk memprediksi nilai GI secara kontinu, bukan secara langsung menentukan kelas kematangan kompos.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu memprediksi tingkat kematangan kompos secara objektif berdasarkan data sensor, sehingga dapat menjadi alternatif terhadap metode penilaian manual yang cenderung subjektif. Keberhasilan tersebut ditunjukkan oleh nilai R^2 sebesar 0,628 pada evaluasi nested cross-validation, R^2 sebesar 0,745 pada simulasi *deployment*, serta akurasi klasifikasi sebesar 75,0%. Analisis *learning curve* juga memperlihatkan bahwa performa model masih terus meningkat seiring bertambahnya jumlah data pelatihan dan belum menunjukkan kondisi jenuh (*plateau*). Dengan demikian, pengumpulan data observasi asli dalam jumlah yang lebih besar berpotensi meningkatkan performa model pada penelitian selanjutnya. Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan. Dataset yang digunakan berasal dari sumber publik dan belum sepenuhnya merepresentasikan karakteristik sampah organik rumah tangga di Indonesia. Selain itu, implementasi pada Raspberry Pi masih diuji melalui simulasi berbasis data historis dan belum divalidasi pada proses pengomposan nyata menggunakan sensor fisik secara kontinu. Penelitian ini juga menemukan kasus khusus (*edge case*) pada batch dengan kondisi pH awal yang sangat asam, yang sulit diprediksi secara akurat karena kondisi serupa hanya sedikit terwakili dalam data pelatihan.

5.2. Saran

Berdasarkan keterbatasan dan temuan yang diperoleh, beberapa saran untuk penelitian selanjutnya dapat dirumuskan sebagai berikut.

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk membangun dan mengumpulkan dataset secara mandiri dari proses pengomposan sampah organik rumah



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

tangga di Indonesia, disertai pengujian laboratorium secara berkala. Langkah ini diperlukan agar model dapat dilatih dan divalidasi menggunakan data yang lebih representatif terhadap karakteristik bahan baku dan kondisi pengomposan yang sesungguhnya.

2. Validasi sistem melalui pengujian lapangan secara langsung selama satu siklus pengomposan penuh perlu dilakukan untuk mengevaluasi konsistensi performa model di luar skenario simulasi. Pengujian tersebut juga penting untuk mengamati potensi penurunan akurasi sensor, khususnya sensor pH dan sensor amonia, akibat paparan lingkungan yang panas, lembap, dan korosif dalam jangka panjang.
3. Hasil analisis learning curve menunjukkan bahwa performa model masih terus meningkat seiring bertambahnya jumlah data dan belum mencapai kondisi jenuh (plateau). Oleh karena itu, penambahan data observasi asli perlu menjadi prioritas utama pada penelitian lanjutan, terutama untuk kategori kematangan yang masih kurang terwakili dan kondisi ekstrem, seperti kompos dengan pH awal yang sangat asam.
4. Penelitian berikutnya juga dapat mengeksplorasi metode augmentasi lain maupun kombinasi beberapa metode augmentasi. Hal ini didasarkan pada temuan bahwa efektivitas augmentasi bergantung pada model dan arsitektur yang digunakan, sehingga belum terdapat satu metode yang unggul secara universal.
5. Pengembangan mekanisme online learning atau re-training berkala dapat dipertimbangkan agar model mampu beradaptasi terhadap variasi komposisi sampah organik dari pengguna yang berbeda tanpa memerlukan proses pelatihan ulang secara menyeluruh.
6. Selain pendekatan berbasis pohon keputusan yang digunakan dalam penelitian ini, studi lanjutan dapat mengevaluasi arsitektur pembelajaran mesin lainnya sebagai pembandingan untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai metode yang paling sesuai dalam memprediksi tingkat kematangan kompos.



DAFTAR PUSTAKA

Akiba, T., Sano, S., Yanase, T., Ohta, T. and Koyama, M., 2019. *Optuna: A Next-generation Hyperparameter Optimization Framework*. [online] Available at: <<http://arxiv.org/abs/1907.10902>>.

Aylaj, M. and Adani, F., 2023. The Evolution of Compost Phytotoxicity during Municipal Waste and Poultry Manure Composting. *Journal of Ecological Engineering*, 24(6), pp.281–293. <https://doi.org/10.12911/22998993/161822>.

Bergstra, J. and Bengio, Y., 2012. Random Search for Hyper-Parameter Optimization. *Journal of Machine Learning Research*, 13, pp.281–305. <https://doi.org/10.5555/2188385.2188395>.

Breiman, L., 2001. Random Forests. *Journal of Machine Learning Research*, 45(1), pp.5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.

Cawley, G.C. and Talbot, N.L.C., 2010. On Over-fitting in Model Selection and Subsequent Selection Bias in Performance Evaluation. *Journal of Machine Learning Research*, 11, pp.2079–2107. <https://doi.org/10.5555/1756006.1859921>.

Chawla, N. v., Bowyer, K.W., Hall, L.O. and Kegelmeyer, W.P., 2002. SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 16, pp.321–357. <https://doi.org/10.1613/jair.953>.

Chen, T. and Guestrin, C., 2016. XGBoost. In: *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. New York, NY, USA: ACM. pp.785–794. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Dorogush, A.V., Ershov, V. and Gulin, A., 2018. *CatBoost: gradient boosting with categorical features support*. Available at: <<http://arxiv.org/abs/1810.11363>>.

Farou, Z., Wang, Y. and Horváth, T., 2024. Cluster-based oversampling with area extraction from representative points for class imbalance learning. *Intelligent Systems with Applications*, 22, p.200357. <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2024.200357>.

Fonseca, J. and Bacao, F., 2023. Tabular and latent space synthetic data generation: a literature review. *Journal of Big Data*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40537-023-00792-7>.

Hidayaturrohman, Q.A. and Hanada, E., 2025. A Comparative Analysis of Hyper-Parameter Optimization Methods for Predicting Heart Failure Outcomes. *Applied Sciences*, 15(6), p.3393. <https://doi.org/10.3390/app15063393>.

Ji, C., Ma, F., Wang, J. and Sun, W., 2023. A Conditional Entropy Based Feature Selection for Soft Sensor Development in Chemical Processes. *Chemical Engineering Transactions*, 103, pp.61–66. <https://doi.org/10.3303/CET23103011>.

Khandakar, A., Ashraf, A., Ayari, M.A., Esmaeili, A., Aljarrah, M., Michael, P., Nahiduzzaman, Md., Kibria, H.B., Gerokosta, V.M., Shehbaz, A.A., Al-Mansoori, M.A.R.A. and Khattab, F., 2025. Compost maturity prediction and gas emissions monitoring: A sensor-based and interpretable machine learning approach. *Computers and Electrical Engineering*, 123, p.110115. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2025.110115>.

Kementerian Lingkungan Hidup. (2025). Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN). Data komposisi sampah tahun 2025. Tersedia di: SIPSN Komposisi Sampah (Diakses: 7 Juli 2026).



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Li, Y., Xue, Z., Li, S., Sun, X. and Hao, D., 2023. Prediction of composting maturity and identification of critical parameters for green waste compost using machine learning. *Bioresource Technology*, 385, p.129444. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129444>.

Liu, J., Li, W., Shan, G., Huang, Y., Feng, H., Wang, S. and Bai, C., 2026. Deciphering the dynamic interactions among ammonia emissions and composting parameters in sewage sludge composting using multi-stage machine learning. *Journal of Environmental Management*, 402, p.129027. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2026.129027>.

Mujiyanti, S.F., Aisyah, P.Y., Salsabilla, A.F., Darmawan, T.R. and Rohid, A., 2022. IoT-based for Monitoring and Control System of Composter to Accelerate Production Time of Liquid Organic Fertilizer. *IPTEK The Journal of Engineering*, 8(2), p.49. <https://doi.org/10.12962/j23378557.v8i2.a14081>.

Mullick, M.A.O., Mufti, A.H.R.A., Ratul, R.R. and Noor, J., 2025. An Explainable and Scalable Framework for Compost Maturity Prediction Using Ensemble Learning and Conversational AI. In: *Proceedings of the 12th International Conference on Next Generation Computing, Communication, Systems and Security*. New York, NY, USA: ACM. pp.29–34. <https://doi.org/10.1145/3777555.3777574>.

Pural, Y.E., 2023. Developing a data-driven soft sensor to predict silicate impurity in iron ore flotation concentrate. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 59(5), pp.1–9. <https://doi.org/10.37190/ppmp/169823>.

Putri, R.E., Maharani, I.P. and Putri, I., 2025. Real-Time Monitoring System for Temperature, Humidity, and pH for Composting Process. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung (Journal of Agricultural Engineering)*, 14(2), p.380. <https://doi.org/10.23960/jtep-l.v14i2.380-390>.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Rozaq Rais, N.A. and Rokhmah, S., 2025. Smart Composting System: Inovasi Iot Untuk Pengolahan dan Pemantauan Sampah Organik Rumah Tangga. *Jurnal Ilmiah Penelitian dan Pembelajaran Informatika*, 10(4), pp.3950–3963. <https://doi.org/10.29100/jipi.v10i4.9365>.

Shi, S., Guo, Z., Bao, J., Jia, X., Fang, X., Tang, H., Zhang, H., Sun, Y. and Xu, X., 2025. Machine learning-based prediction of compost maturity and identification of key parameters during manure composting. *Bioresource Technology*, 419, p.132024. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.132024>.

Shi, Y., Sardar, M.F., Qiu, L., Li, B., Zia-ur-Rehman, M., Xue, Y., Zhang, X., Zhao, W. and Li, H., 2026. Achieving high-quality and safe compost: a study on multi-optimization of a non-linear system using machine learning. *Bioresource Technology*, 457, p.135003. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2026.135003>.

Wan, X., Li, J., Xie, L., Wei, Z., Wu, J., Wah Tong, Y., Wang, X., He, Y. and Zhang, J., 2022. Machine learning framework for intelligent prediction of compost maturity towards automation of food waste composting system. *Bioresource Technology*, 365, p.128107. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128107>.

Wang, H., Lin, S., Zhang, H., Guo, D., Liu, D. and Zheng, X., 2023. Batch-fed composting of food waste: Microbial diversity characterization and removal of antibiotic resistance genes. *Bioresource Technology*, 385, p.129433. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129433>.

Xu, L., Skoularidou, M., Cuesta-Infante, A. and Veeramachaneni, K., 2019. Modeling Tabular data using Conditional GAN. Available at: <http://arxiv.org/abs/1907.00503>.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Yang, S.J. and Cha, K.J., 2023. Gaussian-Based Minority Oversampling Technique for Imbalanced Classification Adapting Tail Probability of Outliers. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4445222>.

Yao, H., Wang, Y., Zhang, L., Zou, J. and Finn, C., 2022. C-Mixup: Improving Generalization in Regression. Available at: <<http://arxiv.org/abs/2210.05775>>.

Zou, J., Tang, S., Chen, C., Tao, J., Liang, R., Jiang, X., Hua, Y., Chen, F., Yang, S. and Shen, F., 2026. Machine learning assisted-hyperspectral imaging for in-situ evaluation of compost maturity. *Waste Management*, 217, p.115496. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2026.115496>.

Zucconi, F., Pera, A., Forte, M. and Bertoldi, M. de, 1981. Evaluating Toxicity of Immature Compost. *BioCycle*, 22, pp.54–57.

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Penulis Lahir di salah satu kota di Riau pada tahun 2004 dari pasangan Bapak Sugiarto, SST, MM dan Ibu Dr. Din Nurika Agustina, SST, M.Si. Saat ini penulis berdomisili di daerah Depok. Penulis menuntaskan jenjang sekolah dasar di dua SD berbeda yaitu SD muhammadiyah 09 di Jakarta Timur pada tahun 2010, lalu berpindah ke SDIT Bina Insan Kamil di Depok pada tahun 2012. setelah itu melanjutkan jenjang sekolah menengah pertama di SMP Negeri 1 Depok pada tahun 2016, selanjutnya penulis melanjutkan sekolah pada jenjang sekolah menengah atas di SMAIT Budi Cendekia Islamic School dengan jurusan Ilmu Pengetahuan Alam (IPA) pada tahun 2019 dan lulus pada tahun 2022. Penulis menyelesaikan Pendidikan Diploma Empat (D4) di Politeknik Negeri Jakarta dengan Program Studi Teknik Multi Media dan Jaringan pada tahun 2026.

Penulis memiliki dedikasi yang kuat pada Internet of Things dan sistem embedded, didukung oleh pengalaman sebagai IoT Engineer pada proyek Smart Trash Bin (PT Karinova Skala Indonesia) dan Telkom Direktorat IT Digital, mencakup integrasi hardware-software, pengembangan model AI, hingga peningkatan efisiensi operasional berbasis data real-time.

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**