

Sistem Pemantauan Fermentasi Eco Enzyme Berbasis Internet of Things untuk Standardisasi Mutu pada Komunitas Pengelola Sampah

Sely Novita Sari^{1*}, Bagus Gilang Pratama², Rizal Maulana³, Nanda Ramadhani⁴, Sophia Anwar Fayyal Jannah⁵

Institut Teknologi Nasional Yogyakarta¹²³

E-mail: sely.novita@itny.ac.id^{1*}, bagusgilangp@itny.ac.id², rizalmaulana@itny.ac.id³, 3100230008@students.itny.ac.id⁴, 1100250026@students.itny.ac.id⁵

Abstrak

Rumah Sampah Ringas Trengginas merupakan komunitas pengelola sampah organik di Baturetno, Banguntapan, Bantul, yang memproduksi eco enzyme dari limbah dapur. Sebelum kegiatan ini, proses fermentasi dijalankan sepenuhnya secara manual tanpa instrumen pengukuran, tanpa pencatatan, dan tanpa prosedur baku, sehingga mutu produk tidak seragam antar-batch dan kegagalan fermentasi sulit dideteksi lebih awal. Berbeda dari pengabdian terdahulu yang berhenti pada edukasi pembuatan produk, kegiatan ini membangun model standardisasi mutu fermentasi berbasis data bagi komunitas pengelola sampah. Kegiatan melibatkan empat anggota inti mitra beserta warga sekitar, dan dilaksanakan melalui lima tahap yaitu sosialisasi dan asesmen kebutuhan, perancangan dan perakitan perangkat, pengembangan sistem pencatatan dan notifikasi, instalasi serta pelatihan mitra, dan evaluasi. Perangkat dibangun menggunakan mikrokontroler ESP32 dengan sensor pH, TDS, NPK, dan suhu DS18B20, transmisi data melalui protokol MQTT terenkripsi TLS/SSL, *buzzer* peringatan dini, serta antarmuka web dan mobile. Keberhasilan dievaluasi melalui tiga instrument adalah uji akurasi sensor terhadap alat ukur portabel terkalibrasi (sepuluh pengukuran berpasangan per parameter tiap batch), pengukuran waktu pemantauan harian sebelum dan sesudah intervensi, serta daftar cek kompetensi mitra. Luaran utama meliputi satu unit alat pemantau berbasis IoT yang telah diserahkan, sistem pencatatan berbasis web dan mobile, dokumen SOP produksi bersertifikat Hak Cipta, dan permohonan Desain Industri. Hasil uji awal pada tiga batch menunjukkan rerata akurasi 95% dengan pH 3,5–3,7 dan suhu 28,5–29,0 °C pada kondisi fermentasi normal; waktu pemantauan harian turun dari 60 menjadi 18 menit (efisiensi 70%); dan seluruh anggota inti mampu mengoperasikan sistem secara mandiri. Hasil ini

36

Sari, S. N., Pratama, B. G., Maulana, R., Ramadhani, N., & Jannah, S. A. F. (2026). SISTEM PEMANTAUAN FERMENTASI ECO ENZYME BERBASIS INTERNET OF THINGS UNTUK STANDARDISASI MUTU PADA KOMUNITAS PENGELOLA SAMPAH. *Jurnal Gerakan Edukasi dan Masyarakat Nusantara (GEMANUSA)*, 1(2), 36-50. <https://doi.org/10.65841/gemanusa.v1i2.226>

<https://ejournal.denusantara.id/index.php/gm/>

menunjukkan sistem berpotensi mendukung standarisasi proses fermentasi pada skala komunitas, meskipun validasi pada jumlah batch yang lebih besar masih diperlukan.

Kata Kunci: *Eco enzyme; Internet of Things; Pemantauan Fermentasi; Sampah Organik; Standardisasi Mutu.*

Abstract

Rumah Sampah Ringas Trengginas is a community-based organic waste management group in Baturetno, Banguntapan, Bantul, that produces eco enzyme from kitchen waste. Before this programme, fermentation was conducted manually without measurement instruments, systematic records, or standard operating procedures, so product quality varied between batches and fermentation failure was difficult to detect early. Unlike previous community service programmes that focused on production training, this programme developed a data-driven fermentation quality standardisation model for waste management communities. The programme involved four core partner members and surrounding residents, and was carried out in five stages are socialisation and needs assessment, device design and assembly, development of the recording and notification system, on-site installation and partner training, and evaluation. The device used an ESP32 microcontroller integrated with pH, TDS, NPK, and DS18B20 temperature sensors, TLS/SSL-encrypted MQTT data transmission, an early-warning buzzer, and web- and mobile-based interfaces. Success was evaluated through three instruments sensor accuracy testing against calibrated portable meters (ten paired measurements per parameter per batch), measurement of daily monitoring time before and after the intervention, and a partner competency checklist. The main outputs were an installed IoT monitoring device, a web- and mobile-based recording system, a copyright-registered production SOP, and an industrial design application. Preliminary testing of three batches showed a mean accuracy of 95% with pH of 3.5–3.7 and temperature of 28.5–29.0 °C under normal fermentation conditions; daily monitoring time fell from 60 to 18 minutes (70% efficiency); and all core members operated the system independently. The findings indicate that the system can support community-scale fermentation standardisation, although validation on a larger number of batches is still required.

Keywords: *Eco enzyme; Internet of Things; Fermentation Monitoring; Organic Waste; Quality Standardization.*

Submitted: 2026-05-03. **Revision:** 2026-05-17. **Accepted:** 2026-03-21. **Publish:** 2026-05-31.

PENDAHULUAN

Sampah organik masih menjadi persoalan lingkungan yang terus meningkat di Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta. Berdasarkan data Pemerintah Kabupaten Bantul (2025), produksi sampah harian di wilayah tersebut mencapai sekitar 95 ton, dengan sekitar 35,6 ton di antaranya berupa sampah organik rumah tangga. Meskipun jumlah bank sampah aktif meningkat menjadi 534 unit pada tahun 2024 (Hasanudin, 2024), kapasitas pengolahan yang tersedia masih jauh dari memadai, sehingga sebagian besar sampah organik tetap berakhir di tempat pemrosesan akhir tanpa memberikan nilai tambah ekonomi bagi masyarakat penghasilnya (rahayu, 2022).

Berdasarkan observasi lapangan pada tahap survei pendahuluan, seluruh proses fermentasi di lokasi mitra masih dijalankan secara manual menggunakan wadah daur ulang tanpa instrumen pengukuran parameter kritis (Gambar 1). Parameter kunci fermentasi, yakni derajat keasaman (pH), suhu, total zat terlarut (*Total Dissolved Solids/TDS*), dan kandungan hara (nitrogen, fosfor, kalium/NPK), tidak pernah diukur secara konsisten. Ketidadaan data ini berimplikasi pada tiga hal yaitu hasil fermentasi tidak seragam antar-batch, tidak tersedia mekanisme peringatan dini ketika terjadi penyimpangan proses, dan pengecekan kondisi fermentasi hanya dapat dilakukan dengan membuka wadah sehingga meningkatkan risiko kontaminasi. Mitra juga belum memiliki prosedur baku produksi maupun sistem pencatatan riwayat batch.



Gambar 1. Kondisi Awal Mitra Pembuatan *Eco enzyme* Secara Manual

Kegiatan pengabdian terdahulu telah menyoroti pemanfaatan *eco enzyme* sebagai upaya reduksi limbah organik (Nurliah et al., 2022; Syaiful et al., 2023) maupun sebagai rekayasa teknologi pengolahan air limbah (Wikaningrum & El Dabo, 2022). Namun sebagian besar program tersebut menekankan edukasi pembuatan dan pemanfaatan produk, tanpa menyentuh kendali mutu proses fermentasi secara terukur. Padahal mutu *eco enzyme* sangat ditentukan oleh kestabilan parameter proses seperti pH, suhu, dan kepekatan larutan (Illahi et al., 2023; Widiani & Novitasari, 2023).

Di sisi lain, penerapan *Internet of Things* (IoT) dalam pemantauan proses fermentasi telah berkembang pesat pada berbagai industri pangan. Pemanfaatan IoT untuk pemantauan fermentasi jarak jauh mengalami pertumbuhan yang signifikan, terutama pada industri bir dan anggur, dengan fokus pada akuisisi data secara real-time dan deteksi dini kegagalan proses (Adeleke et al., 2023). Perangkat IoT berbiaya rendah juga telah dikembangkan untuk memantau fermentasi anggur secara real-time melalui pengukuran emisi CO₂ dan terbukti membantu mendeteksi fermentasi yang terhenti (Canete-Carmona et al., 2020). Dalam konteks Indonesia, sistem pemantauan suhu dan pH berbasis Android telah diterapkan pada fermentasi biji kakao untuk menjaga konsistensi mutu produk (Pratopo et al., 2022). Pada bidang pengabdian dan riset terapan lokal, teknologi IoT sebelumnya telah dimanfaatkan untuk pemantauan limbah cair industri batik serta pengendalian kualitas kolam bioflok (Permana et al., 2024; Pratama & Qodri, 2023; Qodri et al., 2024).

Perbandingan dengan berbagai program tersebut memperjelas posisi kebaruan kegiatan ini. Sebagian besar sistem pemantauan fermentasi berbasis IoT masih dikembangkan pada skala industri atau laboratorium dan dioperasikan oleh tenaga teknis, sedangkan penerapannya pada produksi *eco enzyme* berbasis komunitas yang dikelola oleh masyarakat non-teknis masih terbatas (Pratama et al., 2025).

Kontribusi kegiatan ini tidak hanya berupa perancangan dan penyerahan perangkat, tetapi juga pembangunan model standardisasi mutu fermentasi berbasis data secara terpadu. Model tersebut mengintegrasikan instrumentasi IoT berbiaya terjangkau, prosedur operasional baku tertulis, format pencatatan untuk setiap batch, serta alih kompetensi kepada pengelola non-teknis. Melalui pendekatan tersebut, pengambilan keputusan produksi yang sebelumnya berbasis intuisi diarahkan menjadi berbasis data dan bukti yang terdokumentasi, sekaligus mendorong pelebagaan teknologi dalam praktik kerja mitra.

Tujuan kegiatan ini adalah (1) merancang dan menerapkan sistem pemantauan parameter fermentasi *eco enzyme* berbasis IoT yang dapat dioperasikan mandiri oleh mitra; (2) menyusun SOP produksi *eco enzyme* beserta ambang batas parameter yang berdasar pada rujukan ilmiah dan hasil pemantauan lapangan; serta (3) meningkatkan kapasitas teknis mitra dalam membaca, mencatat, dan menindaklanjuti data fermentasi secara terukur.

METODE

Kegiatan dilaksanakan di Rumah Sampah Ringas Trengginas, Gg. Rambutan III, Kalangan, Baturetno, Kecamatan Banguntapan, Kabupaten Bantul, dengan penanggung jawab mitra Dwi Wantoro, S.T., M.T. Pelaksanaan berlangsung sejak Juni hingga Desember 2025 dan melibatkan empat anggota inti mitra beserta warga sekitar. Pendekatan yang digunakan adalah difusi ipteks partisipatif yaitu mitra dilibatkan sejak perancangan hingga uji coba lapangan sehingga alih pengetahuan berlangsung sepanjang proses. Kegiatan dilaksanakan melalui lima tahap yang alurnya disajikan pada Gambar 2.



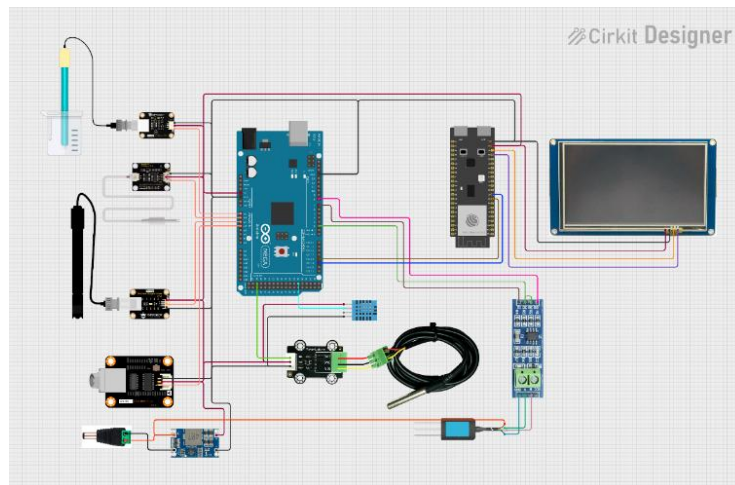
Gambar 2. Diagram alur lima tahap pelaksanaan kegiatan

Tahap 1. Sosialisasi dan Asesmen Kebutuhan Mitra

Survei pendahuluan dilakukan pada 6 Juni 2025 melalui kunjungan langsung. Tim mengamati praktik fermentasi eksisting, memetakan sarana yang tersedia, dan mendiskusikan kebutuhan spesifik bersama pengelola. Pada tahap ini disepakati parameter yang akan dipantau serta titik penempatan perangkat pada wadah fermentasi.

Tahap 2. Perancangan dan Perakitan Perangkat

Pengadaan dan perakitan dimulai pada 9 Juni 2025. Sistem dirancang berbasis mikrokontroler ESP32 yang mengintegrasikan empat sensor utama dan modul pendukung (Gambar 3). Spesifikasi teknis perangkat disajikan pada Tabel 1.



Gambar 3. Diagram Arsitektur dan Rangkaian Sistem Pemantauan Fermentasi

Tabel 1. Spesifikasi Teknis Sistem Pemantauan Fermentasi

Komponen	Fungsi	Keterangan
ESP32	Pusat kendali dan akuisisi data	Membaca seluruh sensor tanpa modul tambahan
Sensor pH industrial	Mengukur derajat keasaman larutan	Ambang peringatan pH > 4
Sensor TDS	Mengukur total zat terlarut	Parameter pemantauan tren kepekatan larutan
Sensor NPK	Mengukur kandungan nitrogen, fosfor, kalium	Indikator nilai hara produk akhir (bukan kriteria kelulusan)
Sensor suhu DS18B20	Memantau temperatur fermentasi	Ambang peringatan suhu > 30 °C
Buzzer alarm	Peringatan dini di lokasi	Aktif saat parameter melampaui ambang
Modul komunikasi	Transmisi data ke server	MQTT dengan enkripsi TLS/SSL dan DNS Cloudflare
Casing ABS IP54	Pelindung rangkaian	Tahan lembap, dilengkapi indikator LED dan tombol reset
Modul proteksi & catu daya	Pengamanan arus dan tegangan	Mendukung powerbank atau solar cell

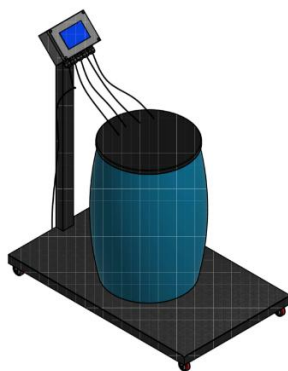
Sumber: hasil perancangan tim pengabd, 2025

Tahap 3. Pengembangan Sistem Pencatatan dan Notifikasi

Pada 1 Juli 2025 dikembangkan lapisan pemrosesan dan penyimpanan data. Sistem berbasis web dan aplikasi mobile dibangun untuk menampilkan pembacaan parameter secara real-time, menyimpan histori per batch, menampilkan tren mutu berdasarkan waktu, serta mengirimkan notifikasi otomatis apabila parameter keluar dari ambang batas. Antarmuka dirancang responsif sehingga dapat diakses melalui peramban pada telepon pintar maupun komputer mitra tanpa instalasi khusus.

Tahap 4. Instalasi, Uji Coba, dan Pelatihan

Perakitan unit final dilakukan pada 7 Juli 2025, dilanjutkan pengujian batch fermentasi pertama. Penyempurnaan rangkaian elektronik, termasuk optimalisasi koneksi internet, proteksi lonjakan daya, dan desain casing ergonomis, diselesaikan pada 15 Juli 2025 (Gambar 4). Pelatihan mitra mencakup pengenalan perangkat, demonstrasi pembacaan sensor, praktik pencatatan data per batch, serta prosedur mitigasi ketika notifikasi peringatan muncul. Pelatihan diikuti empat anggota inti mitra beserta warga sekitar, meliputi ibu rumah tangga dan pemuda karang taruna (Gambar 5).



Gambar 4. Rancangan Alat Pemantau Kualitas *Eco enzyme* pada Wadah Fermentasi



Gambar 5. Pelatihan Penerapan SOP dan Pengoperasian Perangkat Bersama Mitra

Tahap 5. Evaluasi dan Prosedur Pengukuran

Evaluasi dilakukan melalui tiga instrumen dengan prosedur sebagai berikut.

a. Uji akurasi pembacaan sensor. Pembacaan sensor sistem dibandingkan dengan alat ukur portabel terkalibrasi sebagai pembanding yaitu pH meter digital portabel (kalibrasi dua titik dengan larutan *buffer* pH 4,01 dan 7,00), TDS meter genggam terkalibrasi larutan standar 1.413 $\mu\text{S}/\text{cm}$, dan termometer digital laboratorium. Pengukuran berpasangan (sensor sistem dan alat pembanding secara simultan pada titik yang sama) dilakukan sepuluh kali pada setiap batch, yaitu pada hari ke-1, 7, 14, 21, 30, 45, 60, 75, 85, dan 90

fermentasi, dan dilaksanakan oleh dua mahasiswa anggota tim disaksikan pengelola mitra. Akurasi tiap parameter dihitung dengan persamaan (1):

$$Akurasi (\%) = [1 - |X_{sensor} - X_{pembanding}| / X_{pembanding}] \times 100\% \quad \dots (1)$$

Nilai akurasi yang dilaporkan merupakan rerata seluruh titik pengukuran untuk parameter pH, suhu, dan TDS. Sensor NPK tidak diikuti dalam perhitungan akurasi karena belum tersedia alat pembanding lapangan yang setara untuk medium cair asam.

b. Pengukuran efisiensi waktu pemantauan. Waktu pemantauan dihitung sebagai rata-rata durasi yang dibutuhkan mitra untuk memeriksa tiga wadah fermentasi, dicatat melalui observasi langsung dan lembar catatan harian mitra selama tujuh hari pengamatan sebelum intervensi dan tujuh hari pengamatan setelah sistem beroperasi. Efisiensi waktu dihitung dengan persamaan (2):

$$Efisiensi (\%) = [(t_{manual} - t_{otomatis}) / t_{manual}] \times 100\% \quad \dots (2)$$

c. Evaluasi kapasitas mitra. Kegiatan ini tidak menggunakan pre-test dan post-test tertulis; peningkatan kapasitas dinilai melalui daftar cek observasi terhadap empat anggota inti mitra pada akhir masa pendampingan. Anggota dinyatakan mampu apabila dapat menyelesaikan tugas tanpa bantuan tim dalam dua kali pengamatan berturut-turut. Lima butir kompetensi yang diamati adalah (i) menyalakan dan menyambungkan perangkat ke jaringan; (ii) membaca nilai keempat parameter pada dasbor; (iii) menafsirkan status notifikasi dan tindakan lanjutannya; (iv) mengisi format pencatatan produksi per batch secara lengkap; dan (v) menjalankan langkah SOP fermentasi tanpa pendampingan.

Indikator keberhasilan program beserta targetnya ditetapkan sebagaimana Tabel 2.

Tabel 2. Indikator dan Target Keberhasilan Kegiatan

Aspek	Indikator	Target
Teknis	Sistem membaca dan mengirim data secara real-time tanpa terputus	Sistem berjalan stabil pada 3 batch uji
Akurasi	Rerata kesesuaian pembacaan sensor terhadap alat pembanding terkalibrasi	Akurasi rerata minimal 90%
Efisiensi	Penurunan waktu pemantauan manual harian	Turun minimal 50%
Kapasitas mitra	Jumlah anggota inti yang memenuhi lima butir daftar cek kompetensi	4 dari 4 anggota inti
Tata kelola	Ketersediaan SOP produksi tertulis dan diterapkan	SOP tersusun, dibakukan, dan dijalankan mitra

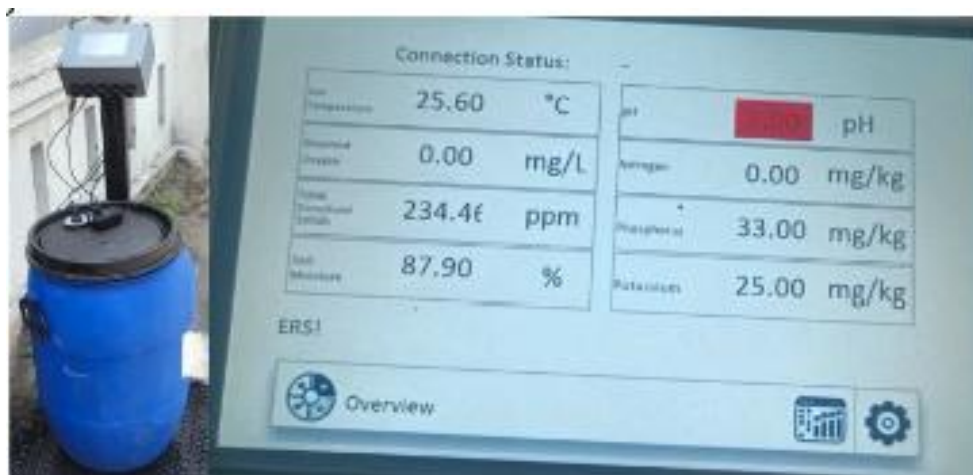
HASIL DAN PEMBAHASAN

Rancang Bangun Perangkat Pemantau

Luaran utama kegiatan berupa unit pemantauan fermentasi *eco enzyme* berbasis IoT yang bekerja otomatis dan real-time (Gambar 6). Seluruh komponen ditempatkan pada casing ABS tahan lembap berstandar IP54 yang ringan dan mudah dipindahkan, dilengkapi indikator LED dan tombol reset. Perangkat

dipasang padaudukan beroda sehingga wadah fermentasi berkapasitas drum dapat dipindahkan tanpa melepas instrumentasi. Rancangan bersifat modular sehingga tiap sensor dapat diganti terpisah apabila mengalami degradasi, sebuah pertimbangan penting mengingat sensor pH dan TDS memiliki masa pakai terbatas pada larutan asam.

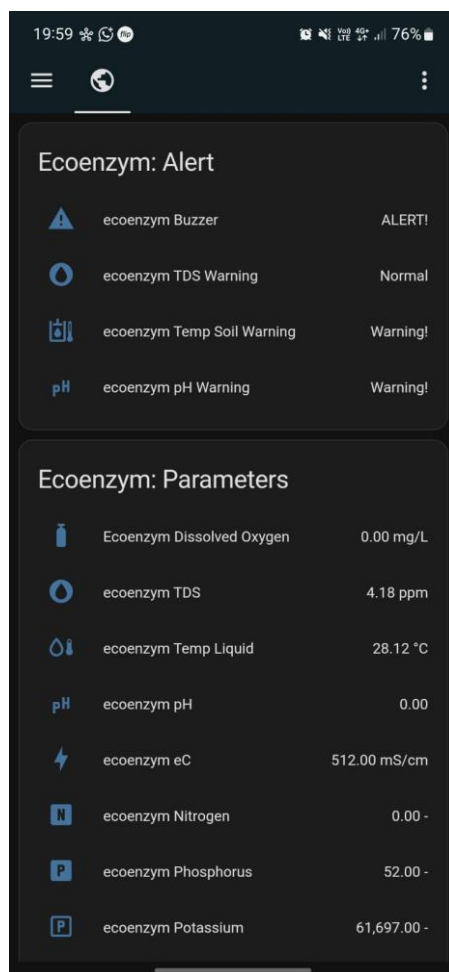
Aspek keamanan transmisi data menjadi perhatian khusus. Data sensor dikirim melalui protokol MQTT terenkripsi TLS/SSL dengan resolusi DNS Cloudflare, sehingga jalur komunikasi antara perangkat dan server terlindungi dari penyadapan maupun manipulasi data. Pilihan ini membedakan sistem yang dibangun dari implementasi IoT komunitas pada umumnya yang kerap mengabaikan lapisan keamanan transport. Dukungan catu daya alternatif berupa powerbank atau solar cell disediakan untuk mengantisipasi keterbatasan listrik di lokasi produksi.



Gambar 6. Alat Pemantau Kualitas *Eco enzyme* Terpasang

Sistem Pencatatan dan Peringatan Dini

Perangkat lunak pendamping memungkinkan mitra memantau kondisi fermentasi (suhu, pH, TDS, NPK) secara real-time, mencatat histori data, dan menerima notifikasi otomatis saat parameter keluar dari ambang batas (Gambar 6). Notifikasi ditampilkan pada dasbor web maupun aplikasi mobile, dan diperkuat oleh buzzer di lokasi. Fitur pencatatan per batch memungkinkan mitra menelusuri riwayat setiap produksi, sehingga penyimpangan mutu dapat ditelusuri kembali ke kondisi proses yang menyebabkannya. Kemampuan ini menjawab persoalan paling mendasar mitra sebelum program berjalan, yaitu ketidakmampuan mendeteksi kegagalan fermentasi tanpa membuka wadah atau mencium bau cairan, praktik yang justru berisiko menimbulkan kontaminasi.



Gambar 6. Tampilan aplikasi mobile

Penetapan Ambang Mutu dan Penyusunan SOP

Ambang batas mutu yang digunakan dalam SOP ditetapkan dengan menggabungkan rujukan ilmiah dan kesepakatan lapangan bersama mitra. Nilai pH < 4 mengacu pada karakteristik *eco enzyme* matang yang bersifat asam kuat sebagai hasil aktivitas fermentasi asam organik; Widiani dan Novitasari (2023) melaporkan pH *eco enzyme* dari limbah dapur berada pada kisaran 3–4, sementara (Illahi et al., 2023) memperoleh rentang serupa pada beragam bahan dasar kulit buah. Batas suhu < 30 °C ditetapkan karena fermentasi *eco enzyme* berlangsung pada suhu ruang tropis; suhu di atas ambang tersebut mengindikasikan aktivitas mikroba anomali atau paparan panas berlebih yang berisiko menggagalkan proses (Wikaningrum & El Dabo, 2022). Durasi fermentasi minimal tiga bulan merujuk pada praktik baku yang lazim digunakan pada literatur *eco enzyme* untuk memastikan proses hidrolisis berjalan tuntas.

Adapun TDS dan NPK belum memiliki standar baku pada produk *eco enzyme*. Karena itu keduanya diposisikan sebagai parameter pemantauan, bukan kriteria kelulusan mutu. Nilai TDS digunakan untuk mengamati tren kepekatan larutan antar-batch antara lain nilai yang stabil pada rentang yang sama mengindikasikan rasio bahan baku, gula, dan air yang konsisten, sedangkan lonjakan atau penurunan tajam

menjadi sinyal bagi mitra untuk memeriksa proporsi bahan. Nilai NPK dibaca pada akhir masa fermentasi sebagai indikator potensi nilai hara produk ketika digunakan sebagai pupuk cair. Pembacaan NPK pada kegiatan ini belum disajikan sebagai data kuantitatif pembandingan karena sensor NPK dirancang untuk medium tanah dan memerlukan validasi laboratorium sebelum angkanya dapat dipertanggungjawabkan pada medium cair asam. Keterbatasan ini menjadi agenda pengembangan lanjutan.

Berdasarkan pertimbangan tersebut, tim bersama mitra menyusun Template SOP Produksi *Eco enzyme* yang memuat panduan fermentasi, ambang mutu, prosedur penggunaan alat, format pencatatan batch, serta langkah mitigasi kegagalan. SOP disusun dalam dua tahap dengan pelibatan langsung mitra agar prosedur dapat dijalankan pada kondisi lapangan sesungguhnya, kemudian dibakukan dan didaftarkan sebagai Hak Cipta.

Kinerja Sistem pada Tiga Batch Fermentasi

Pengujian awal dilakukan pada tiga batch fermentasi berturut-turut. Hasil pembacaan parameter dan rerata akurasi disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pembacaan Parameter Fermentasi dan Rerata Akurasi Sensor

Batch	pH	Suhu (°C)	TDS (ppm)	NPK	Rerata akurasi pH, suhu, TDS (%)
Batch 1	3,5	28,5	2.750	Dipantau, tidak dikuantifikasi	95
Batch 2	3,7	29,0	2.820	Dipantau, tidak dikuantifikasi	95
Batch 3	3,6	28,7	2.795	Dipantau, tidak dikuantifikasi	95

Keterangan: nilai pH, suhu, dan TDS merupakan pembacaan pada akhir masa fermentasi (hari ke-90). Akurasi dihitung dengan persamaan (1) atas sepuluh pengukuran berpasangan per parameter per batch. Pembacaan NPK dicatat sistem namun tidak dikuantifikasi sebagai data hasil karena sensor belum divalidasi untuk medium cair asam.

Seluruh batch menunjukkan pH pada rentang 3,5–3,7, yaitu di bawah ambang SOP pH 4, yang mengindikasikan aktivitas fermentasi asam berlangsung normal. Suhu tercatat stabil pada 28,5–29,0 °C, berada di bawah ambang 30 °C. Simpangan antar-batch yang kecil, yaitu 0,2 satuan pada pH dan 0,5 °C pada suhu, menunjukkan proses produksi mitra bergeser dari kondisi tidak terkendali menuju proses yang lebih reproduktibel. Nilai TDS berada pada rentang sempit 2.750–2.820 ppm atau simpangan sekitar 2,5% terhadap nilai tengah, yang mengindikasikan konsistensi rasio bahan baku, gula, dan air antar-batch. Rerata akurasi pembacaan sebesar 95% melampaui target minimal 90% yang ditetapkan pada Tabel 2, dan sebanding dengan capaian sistem pemantauan fermentasi berbiaya rendah pada studi terdahulu (Canete-Carmona et al., 2020; Pratopo et al., 2022).

Perlu ditegaskan bahwa tiga batch merupakan jumlah yang memadai untuk uji awal kinerja sistem, tetapi belum cukup untuk menyimpulkan bahwa mutu produk telah terstandarisasi. Ketiga batch

diproduksi pada rentang waktu yang berdekatan sehingga belum merepresentasikan variasi komposisi bahan baku, fluktuasi suhu lingkungan antarmusim, maupun perbedaan durasi fermentasi. Dengan demikian, temuan ini lebih tepat dibaca sebagai indikasi bahwa sistem berpotensi mendukung standarisasi proses fermentasi, dan penetapan ambang mutu berbasis bukti memerlukan perluasan basis data pada jumlah batch yang lebih besar dan periode pengamatan yang lebih panjang.

Efisiensi Proses Produksi

Sebelum intervensi, pengecekan kondisi fermentasi dilakukan manual dengan alokasi waktu rata-rata 60 menit per hari untuk tiga wadah. Setelah sistem notifikasi otomatis diterapkan, mitra hanya perlu memverifikasi dasbor dan menindaklanjuti peringatan, sehingga waktu turun menjadi rata-rata 18 menit per hari. Perbandingan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perhitungan Efisiensi Waktu Pemantauan

Aktivitas	Waktu rata-rata per hari (menit)	Efisiensi waktu (%)
Pengecekan manual (baseline)	60	0
Pengecekan otomatis (dengan notifikasi)	18	70

Keterangan: waktu merupakan rata-rata durasi pemeriksaan tiga wadah fermentasi selama tujuh hari pengamatan pada masing-masing kondisi. Efisiensi dihitung dengan persamaan (2): $(60 - 18) / 60 \times 100\% = 70\%$.

Efisiensi 70% melampaui target minimal 50%. Waktu yang dibebaskan dialihkan mitra untuk aktivitas bernilai tambah lain, yakni pengemasan, promosi, dan distribusi produk. Dengan demikian intervensi teknologi tidak hanya memperbaiki keterukuran mutu, tetapi juga membebaskan sumber daya manusia mitra yang jumlahnya terbatas.

Peningkatan Kapasitas Mitra

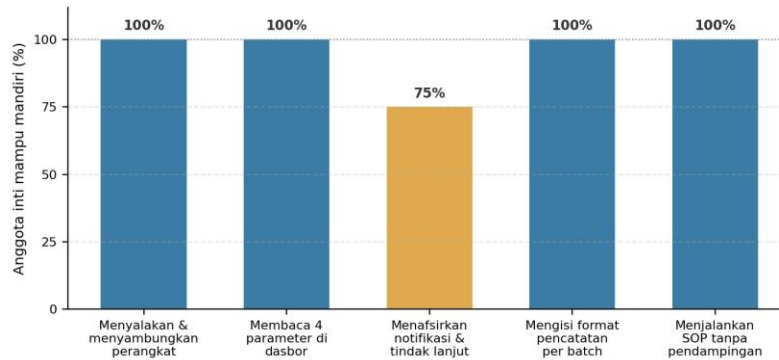
Hasil daftar cek observasi terhadap empat anggota inti mitra pada akhir pendampingan disajikan pada Tabel 5 dan divisualisasikan pada Gambar 8. Seluruh anggota mampu menyalakan dan menyambungkan perangkat, membaca keempat parameter pada dasbor, serta mengisi format pencatatan per batch. Tiga dari empat anggota mampu menafsirkan status notifikasi beserta tindakan lanjutannya secara mandiri, sementara satu anggota masih memerlukan rujukan pada lembar panduan. Butir menjalankan seluruh langkah SOP tanpa pendampingan dipenuhi oleh empat anggota pada pengamatan kedua.

Tabel 5. Hasil Daftar Cek Kompetensi Empat Anggota Inti Mitra

Butir kompetensi	Jumlah anggota mampu mandiri	Capaian
Menyalakan dan menyambungkan perangkat ke jaringan	4 dari 4	100%
Membaca nilai pH, suhu, TDS, dan NPK pada dasbor	4 dari 4	100%
Menafsirkan status notifikasi dan tindakan lanjutannya	3 dari 4	75%
Mengisi format pencatatan produksi per batch	4 dari 4	100%

Butir kompetensi	Jumlah anggota mampu mandiri	Capaian
Menjalankan langkah SOP fermentasi tanpa pendampingan	4 dari 4	100%

Keterangan: anggota dinyatakan mampu apabila menyelesaikan tugas tanpa bantuan tim pada dua pengamatan berturut-turut.



Gambar 8. Capaian kompetensi anggota inti mitra pada lima butir pengoperasian sistem

Selain capaian teknis, transformasi paling bermakna terletak pada cara mitra mengambil keputusan. Sebelum program, penentuan waktu panen dan penilaian keberhasilan fermentasi bertumpu pada intuisi dan pengalaman. Setelah program, keputusan didasarkan pada data historis yang tercatat. Perubahan ini menandai peningkatan literasi teknologi dan kemampuan analisis data mitra, yang merupakan prasyarat keberlanjutan penerapan teknologi tepat guna di tingkat komunitas. Rangkuman perubahan kondisi mitra disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Perubahan Kondisi Mitra Sebelum dan Sesudah Intervensi

Aspek	Sebelum intervensi	Sesudah intervensi
Sistem pemantauan fermentasi	Manual tanpa alat ukur	Otomatis berbasis IoT, real-time
Pencatatan data	Tidak ada pencatatan	Pencatatan otomatis berbasis web per batch
Waktu pemantauan harian	± 60 menit/hari	± 18 menit/hari (turun 70%)
Prosedur produksi	Tidak tersedia prosedur standar	SOP fermentasi dan penanganan mutu tersedia
Keterukuran parameter	Tidak terukur secara konsisten	Rerata akurasi 95% (uji awal 3 batch)
Deteksi kegagalan fermentasi	Hanya dengan membuka wadah	Notifikasi otomatis dan buzzer peringatan

Faktor Pendukung dan Penghambat

Faktor pendukung utama meliputi antusiasme dan keterlibatan aktif mitra pada setiap tahap, rancangan perangkat yang modular dan ramah pengguna, serta partisipasi mahasiswa dalam pengembangan perangkat lunak, kalibrasi sensor, dan dokumentasi data. Faktor penghambat yang teridentifikasi adalah sebagian

anggota mitra belum terbiasa menggunakan perangkat digital sehingga memerlukan pendampingan berulang, kebutuhan pemeriksaan dan kalibrasi sensor secara berkala mengingat perendaman jangka panjang pada larutan asam, serta keterbatasan validasi sensor NPK pada medium cair. Untuk memitigasi hal tersebut disusun panduan pemecahan masalah sederhana yang menyertai SOP, serta direncanakan pengembangan modul komunikasi GSM dan panel surya bagi lokasi tanpa akses internet maupun listrik yang stabil.

Implikasi, Replikasi, dan Keberlanjutan

Kegiatan ini menghasilkan luaran berupa (a) satu unit alat pemantau kualitas eco enzyme berbasis IoT yang telah diserahkan kepada mitra melalui Berita Acara Serah Terima Aset; (b) sistem pemantauan dan pencatatan berbasis web dan aplikasi *mobile*; (c) dokumen SOP Produksi Eco Enzyme 2025 yang telah memperoleh Surat Pencatatan Ciptaan; serta (d) permohonan pendaftaran Desain Industri berjudul *Alat Pemantau Kualitas Eco Enzyme* dengan nomor permohonan A00202505592.

Model standardisasi mutu berbasis data yang dibangun pada kegiatan ini memiliki implikasi yang melampaui satu mitra. Karena rancangan perangkat bersifat modular dan berbiaya terjangkau serta prosedur operasinya telah dibakukan dalam SOP dan modul pelatihan, pendekatan ini berpeluang direplikasi pada komunitas pengelola sampah lain, bank sampah, maupun kelompok tani yang memproduksi pupuk cair organik. Potensi replikasi ditopang oleh tiga factor yaitu (1) komponen inti (ESP32 dan sensor) tersedia luas di pasar lokal dengan harga terjangkau; (2) alih kompetensi kepada pengelola non-teknis telah terbukti berhasil, sehingga kurva pembelajaran pada komunitas baru dapat dipersingkat menggunakan modul pelatihan yang sama; dan (3) dokumen SOP dan Desain Industri menyediakan acuan baku yang dapat diadopsi tanpa merancang ulang dari nol. Skema replikasi yang disarankan adalah pola pelatihan berjenjang (*training of trainers*), yakni anggota inti mitra yang telah mahir berperan sebagai fasilitator bagi komunitas berikutnya, sehingga penyebaran teknologi berlangsung secara mandiri dan berkelanjutan.

Keberlanjutan pada mitra saat ini dijaga melalui komitmen merawat dan mengoperasikan sistem secara mandiri, pendampingan teknis berkala luring maupun daring, penyediaan panduan pemecahan masalah, serta rencana pengembangan modul komunikasi GSM dan panel surya bagi lokasi dengan keterbatasan internet dan listrik. Secara lebih luas, program ini berkontribusi pada Tujuan Pembangunan Berkelanjutan, khususnya poin 9 (Infrastruktur, Inovasi, dan Industri) dan poin 12 (Konsumsi dan Produksi yang Bertanggung Jawab).

KESIMPULAN

Implementasi sistem pemantauan fermentasi eco enzyme berbasis Internet of Things di Rumah Sampah Ringas Trengginas mengubah proses produksi yang semula manual dan tidak terukur menjadi proses yang terdokumentasi dan dapat dipantau secara real-time. Sistem berbasis ESP32 dengan sensor pH, TDS, NPK, dan suhu yang terhubung melalui protokol MQTT terenkripsi membaca parameter fermentasi dengan rerata akurasi 95% terhadap alat pembanding terkalibrasi pada uji awal tiga batch, dengan pH 3,5–3,7 dan suhu 28,5–29,0 °C yang konsisten berada dalam ambang mutu yang ditetapkan. Penerapan notifikasi otomatis menurunkan waktu pemantauan harian dari 60 menit menjadi 18 menit atau efisiensi 70%, dan seluruh

anggota inti mitra memenuhi daftar cek kompetensi pengoperasian perangkat, pencatatan batch, serta penerapan SOP secara mandiri.

Dengan demikian kegiatan ini menghasilkan model standarisasi mutu fermentasi berbasis data bagi komunitas pengelola sampah yang berpotensi direplikasi ke komunitas lain melalui modul pelatihan dan pola pelatihan berjenjang. Namun, jumlah batch uji yang terbatas menuntut kehati-hatian dalam menafsirkan hasil yaitu sistem baru dapat dinyatakan berpotensi mendukung standarisasi proses, belum membuktikan tercapainya standarisasi mutu produk. Sebagai tindak lanjut, disarankan agar mitra melakukan kalibrasi dan pemeriksaan sensor secara berkala, memperluas basis data fermentasi lintas musim dan variasi bahan baku, serta memvalidasi pembacaan sensor NPK di laboratorium.

PERSANTUNAN

Pelaksana mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat, Direktorat Jenderal Riset dan Pengembangan, Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi atas pendanaan kegiatan ini melalui Program Hibah Pengabdian Tahun 2025 (Kontrak Induk No. 0499.28/LL5-INT/AL/2025 tertanggal 4 Juni 2025). Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada LPPMI Institut Teknologi Nasional Yogyakarta (Kontrak Turunan No. 03/ITNY/LPPMI/Pkm.DPPM/PKM/VI/2025 tertanggal 12 Juni 2025) serta kepada pengelola dan anggota Rumah Sampah Ringas Trengginas atas partisipasi aktif selama pelaksanaan kegiatan.

REFERENSI

- Adeleke, I., Nwulu, N., & Adebo, O. A. (2023). Internet of Things (IoT) in the Food Fermentation Process: A Bibliometric Review. *Journal of Food Process Engineering*, 46(5), e14321. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14321>
- Canete-Carmona, E., Gallego-Martinez, J.-J., Martin, C., Brox, M., Luna-Rodriguez, J.-J., & Moreno, J. (2020). A Low-Cost IoT Device to Monitor in Real-Time Wine Alcoholic Fermentation Evolution Through CO₂ Emissions. *IEEE Sensors Journal*, 20(12), 6692–6700. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2975284>
- Hasanudin, U. (2024, October 11). *Jumlah Bank Sampah Aktif di Bantul Bertambah Jadi 534 Unit*. <https://Jogjapolitan.Harianjogja.Com/Read/2024/10/11/511/1191172/Jumlah-Bank-Sampah-Aktif-Di-Bantul-Bertambah-Jadi-534-Unit>.
- Illahi, A. K., Kurniasih, D., Sari, D. A., & Karmaita, Y. (2023). ANALISIS KUALITAS ECO ENZYM DARI BERBAGAI BAHAN DASAR KULIT BUAH UNTUK PERTANIAN BERKELANJUTAN. *AGRISAINTEFIKA: Jurnal Ilmu-Ilmu Pertanian*, 7(1), 75. <https://doi.org/10.32585/ags.v7i1.3675>
- Nurliah, N., Erika, S., & Sagena, U. W. (2022). Sosialisasi Pengelolaan dan Pemanfaatan Sampah Organik Rumah Tangga Dalam Memproduksi Ekoenzim. *Jurnal Pengabdian Masyarakat Madani (JPMM)*, 2(1), 33–39. <https://doi.org/10.51805/jpmm.v2i1.47>
- Permana, I. A., Handayani, T., & Pratama, B. G. (2024). Sistem Pengendalian dan Pemantauan Kolam Bioflok Berbasis IoT (Internet of Things) dengan Google Firebase. *JMTE (Jurnal Mahasiswa Teknik Elektro)*, 5(1), 18–29.

-
- Pratama, B. G., & Qodri, M. F. (2023). SISTEM PEMANTAUAN LIMBAH CAIR BERBASIS INTERNET OF THINGS DAN TERPROTEKSI WIREGUARD. *KURVATEK*, 8(1), 99–108. <https://doi.org/10.33579/krvtk.v8i1.4028>
- Pratama, B. G., Sari, S. N., Yuliani, O., Ramadhani, N., Nawawi, I., & Putri, S. D. (2025). Uji Pasar Produk Eco enzyme Berbasis IoT sebagai Inovasi Pengelolaan Sampah Organik di Rumah Sampah Ringas Trengginas, Bantul, Yogyakarta. *I-Com: Indonesian Community Journal*, 5(3), 1153–1164. <https://doi.org/10.70609/i-com.v5i3.7687>
- Pratopo, L. H., Thoriq, A., Purwanto, E. H., & Wiradwinanda, D. A. (2022). Temperature and pH Monitoring System Design in the Fermentation of Cocoa Beans Based on Android. *Pelita Perkebunan (a Coffee and Cocoa Research Journal)*, 38(1), 43–53. <https://doi.org/10.22302/iccricri.jur.pelitaperkebunan.v38i1.494>
- Qodri, M. F., Pratama, B. G., Yuliani, O., & Permana, I. A. (2024). Innovative Internet of Things-based Integrated Liquid Waste Monitoring for Sustainable Batik Industry. *SPEKTA (Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat : Teknologi Dan Aplikasi)*, 5(1), 37–50. <https://doi.org/10.12928/spekta.v5i1.9009>
- rahayu, esti. (2022). Analisis Pengelolaan Sampah di Kabupaten Bantul Terkait Rencana Aksi Daerah Untuk Mewujudkan Gerakan Bantul Bersih Sampah Tahun 2025. *Jurnal Riset Daerah Kabupaten Bantul*, 22(3), 4245–4262.
- Syaiful, A. Z., Fikruddin, Muh., & Ridwan, R. (2023). Pembuatan dan Pemanfaatan Larutan Multiguna Eco Enzyme sebagai Upaya Reduksi Limbah Organik di Kampoeng Kuliner Makassar. *PengabdianMu: Jurnal Ilmiah Pengabdian Kepada Masyarakat*, 8(2), 130–139. <https://doi.org/10.33084/pengabdianmu.v8i2.4373>
- Widiani, N., & Novitasari, A. (2023). PRODUKSI DAN KARAKTERISASI ECO-ENZIM DARI LIMBAH ORGANIK DAPUR. *BIOEDUKASI (Jurnal Pendidikan Biologi)*, 14(1), 110. <https://doi.org/10.24127/bioedukasi.v14i1.7779>
- Wikaningrum, T., & El Dabo, M. (2022). ECO-ENZYME SEBAGAI REKAYASA TEKNOLOGI BERKELANJUTAN DALAM PENGOLAHAN AIR LIMBAH. *JURNAL PENELITIAN DAN KARYA ILMIAH LEMBAGA PENELITIAN UNIVERSITAS TRISAKTI*, 7(1), 53–64. <https://doi.org/10.25105/pdk.v7i1.10738>