

Implementasi Sistem Monitoring Berbasis IoT dan AI Untuk Optimasi Proses Fermentasi Kopi Arabika Dalam Meningkatkan Kualitas Produksi Pasca Panen

1st Gita Epriliana

Universitas Telkom Purwokerto

Fakultas Teknik Elektro

Purwokerto, Indonesia

gitaepriiana@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Rafif Athalla Trisandy

Universitas Telkom Purwokerto

Fakultas Teknik Elektro

Purwokerto, Indonesia

rafifathalla@student.telkomuniversity.ac.id

3rd Risali Fatiha

Universitas Telkom Purwokerto

Fakultas Teknik Elektro

Purwokerto, Indonesia

risalifatiha@student.telkomuniversity.ac.id

4th Brainadi Zaidan Tra Anandi

Universitas Telkom Purwokerto

Fakultas Teknik Elektro

Purwokerto, Indonesia

brainadizaidan@student.telkomuniversity.ac.id

Abstrak—Fermentasi anaerob pada kopi Arabika merupakan metode pascapanen yang menjanjikan untuk meningkatkan kompleksitas cita rasa. Namun, proses ini masih sering dilakukan tanpa pemantauan suhu dan pH secara akurat, sehingga berisiko menurunkan mutu dan menyebabkan kegagalan fermentasi. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT) dan Artificial Intelligence (AI) untuk mengoptimalkan proses fermentasi. Sistem menggunakan NodeMCU ESP8266, sensor suhu DS18B20, sensor pH 4502C, dan sensor kelembaban DHT22, serta diintegrasikan dengan aplikasi Blynk untuk pemantauan jarak jauh melalui smartphone. Sistem dilengkapi dengan solenoid valve dan buzzer yang dikendalikan otomatis oleh logika AI berbasis ambang batas. Hasil pengujian menunjukkan sistem mampu memantau suhu dalam rentang fermentasi ideal, mendeteksi penurunan pH dari 6,0 ke 3,7, dan mencatat kelembaban lingkungan pada kisaran 76–87%. Saat pH turun di bawah 3, solenoid valve aktif otomatis untuk mengatur kondisi fermentasi. Sistem juga berhasil mengirimkan data secara real-time ke aplikasi Blynk tanpa gangguan. Uji sensorik menunjukkan 95% panelis lebih menyukai hasil fermentasi otomatis. Penelitian ini membuktikan bahwa sistem berbasis IoT-AI dapat meningkatkan konsistensi dan kualitas fermentasi kopi Arabika..

Kata kunci— Kopi Arabika, fermentasi anaerob, Internet of Things (IoT), suhu, pH

I. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu produsen kopi terbesar dunia, dengan kopi arabika sebagai salah satu komoditas unggulan yang diminati pasar domestik dan internasional. Kopi Arabika dikenal karena karakteristik rasanya yang lembut, tingkat keasaman yang seimbang, serta aroma yang khas. Karakteristik kopi arabika sangat dipengaruhi oleh perlakuan proses pascapanen yang sangat teliti, terutama dalam tahap fermentasi [1]. Dalam proses pasca panen, selain proses yang umum yaitu natural dan fullwash, fermentasi

anaerob menjadi metode yang semakin populer karena menghasilkan cita rasa "funky" dengan keasaman tinggi dan kompleksitas rasa khas. Namun, praktik fermentasi anaerob di Indonesia masih banyak dilakukan secara tradisional tanpa pengawasan suhu dan pH yang akurat, sehingga sering terjadi inkonsistensi mutu, pertumbuhan mikroba tidak diinginkan, hingga kegagalan fermentasi [2].

Tahap fermentasi dalam proses pascapanen kopi berperan dalam menghilangkan lendir (mucilage) yang melapisi biji kopi serta mempengaruhi aktivitas mikroorganisme yang bertanggung jawab terhadap pembentukan senyawa volatil penting dalam aroma dan rasa kopi. Fermentasi yang tidak terkontrol dapat menimbulkan dampak negatif seperti overfermentasi, pertumbuhan mikroba patogen, dan kerusakan sensori yang fatal pada kopi [3]. Keterbatasan metode monitoring tradisional menyebabkan sulitnya menjaga kestabilan fermentasi dan berdampak pada menurunnya kualitas serta produktivitas kopi. Pengawasan yang bergantung pada pengalaman dan pengamatan langsung yang sangat rentan terhadap kesalahan manusia dan tidak mampu memberikan data secara real time yang dibutuhkan untuk pengambilan keputusan cepat dalam proses fermentasi. Berbagai solusi konvensional yang diterapkan belum mampu mengatasi masalah efektivitas dan akurasi. Kemajuan teknologi digital dalam dua dekade terakhir telah menghadirkan peluang besar untuk mengatasi permasalahan klasik dalam sektor pertanian, salah satunya melalui integrasi teknologi Internet of Things (IoT) dan Artificial Intelligence (AI). Penggunaan teknologi IoT menawarkan berbagai keunggulan dibandingkan metode tradisional. Monitoring suhu dan pH dapat dilakukan secara real time dan otomatis, mengurangi ketergantungan terhadap pengawasan manual dan risiko human error. Data yang diperoleh lebih akurat, dapat dianalisis lebih lanjut, dan memberikan peluang untuk mengambil keputusan lebih cepat dalam proses fermentasi. Selain itu, IoT memungkinkan pengawasan jarak jauh melalui aplikasi smartphone, sehingga menghemat waktu dan tenaga [4]. Apabila sistem IoT

dipadukan dengan algoritma AI, maka data yang diperoleh dapat diproses untuk menghasilkan model prediktif guna menentukan waktu optimal fermentasi secara akurat.

Penelitian ini mengembangkan alat monitoring fermentasi berbasis IoT dan AI menggunakan NodeMCU ESP8266, sensor suhu DS18B20, sensor pH 4502C, sensor kelembaban DHT22, LCD 20x4, Solenoid valve, Buzzer dan aplikasi Blynk. Sistem ini tidak hanya mampu menampilkan data secara real time, sistem ini juga menerapkan bentuk Artificial Intelligence (AI) sederhana berbasis logika keputusan (decision rule) yang mengatur aktuator, khususnya solenoid valve, berdasarkan data sensor pH dan suhu secara otomatis. AI berfungsi sebagai fitur kontrol otomatis seperti penambahan oksigen ke dalam tong fermentasi menggunakan solenoid valve ketika parameter pH mencapai batas yang telah ditentukan untuk mencegah terjadinya overfermen. Selain itu, penelitian ini juga menyoroti pentingnya pengendalian pH dan suhu secara real time dalam fermentasi kopi, karena kedua parameter ini sangat memengaruhi metabolisme mikroorganisme yang berperan dalam proses fermentasi dan kualitas hasil akhir kopi. Pengembangan sistem monitoring real time dengan sensor yang akurat dan penggunaan platform digital untuk pengolahan data fermentasi menjadi kunci dalam meningkatkan kualitas dan produktivitas kopi Arabika di Indonesia. Inovasi ini diharapkan menjadi solusi praktis yang mampu meningkatkan efisiensi proses produksi, menjaga konsistensi mutu rasa kopi, serta mendukung modernisasi industri kopi nasional menuju daya saing kopi specialty Indonesia di pasar global [5].

Dengan menggabungkan teknologi IoT dan AI, sistem tidak hanya mampu melakukan pemantauan secara real time, tetapi juga dapat meningkatkan efisiensi dan akurasi dalam pengambilan keputusan selama proses fermentasi. Hal ini diharapkan dapat menghasilkan produk kopi dengan kualitas yang lebih konsisten dan unggul, sekaligus mendukung upaya modernisasi serta peningkatan daya saing kopi Arabika Indonesia di pasar pasca panen global. Oleh karena itu, judul penelitian ini adalah "Implementasi Sistem Monitoring Berbasis IoT dan AI untuk Optimasi Proses Fermentasi Kopi Arabika dalam Meningkatkan Kualitas Produksi Pasca Panen," yang mencerminkan fokus pada inovasi teknologi sebagai solusi peningkatan mutu dan produktivitas kopi.

II. KAJIAN TEORI

A. Internet of Things

Internet of Things (IoT) merupakan konsep teknologi yang mengacu pada sistem jaringan yang menghubungkan perangkat-perangkat fisik seperti sensor, aktuator, dan mikrokontroler dengan internet, sehingga mampu saling berkomunikasi, mengumpulkan data, dan melakukan tindakan berdasarkan perintah yang telah diprogram secara otomatis [6].

B. Artificial Intelligence

Artificial Intelligence (AI) adalah suatu bidang dalam ilmu komputer yang berfokus pada penciptaan sistem yang mampu meniru, menampilkan, dan bahkan mengembangkan perilaku cerdas sebagaimana halnya manusia. Teknologi ini

tidak hanya bekerja berdasarkan serangkaian instruksi tetap seperti yang ditemukan dalam pemrograman konvensional, melainkan memiliki kemampuan untuk belajar dari pengalaman, mengenali pola, menganalisis data dalam skala besar, serta membuat keputusan secara otomatis berdasarkan proses logika yang kompleks [7].

C. Ceri Arabika

Indonesia saat ini merupakan salah satu negara penghasil kopi terbesar di dunia, dengan kopi Arabika menjadi komoditas penting yang terus dikembangkan untuk memenuhi permintaan pasar domestik dan internasional.



Gambar 1 Ceri Kopi

Kopi ceri Arabika adalah buah dari tanaman *Coffea arabica* yang berbentuk kecil dan bulat menyerupai buah ceri, sehingga sering disebut "ceri kopi". Buah ini berukuran sekitar 10–15 mm dan berwarna hijau saat masih muda, kemudian berubah menjadi merah cerah saat matang sempurna [8].

D. Proses Fermentasi Kopi Arabika

Fermentasi adalah salah satu cara dalam proses pengolahan kopi. Secara umum, fermentasi terjadi ketika mikroorganisme berinteraksi dengan kopi, memicu reaksi kimia yang mengubahnya menjadi sesuatu yang berbeda. Mikroorganisme ini membantu proses perkembangan kopi dengan menghasilkan berbagai zat, enzim, dan kadang-kadang juga gula [9].



Gambar 2 Fermentasi Anaerob

Proses pasca panen adalah tahap kedua setelah budidaya kopi atau manajemen produksi. Tahap ini sangat penting karena pengolahan pasca panen menentukan kualitas akhir dan nilai jual hasil panen. Secara umum, pengolahan kopi dibagi menjadi dua metode utama, yaitu pengolahan basah (*wet processing*) dan pengolahan kering (*dry processing*). Pengolahan basah sendiri terbagi menjadi dua cara, yaitu *wet hulling* (gerbus basah) dan *dry hulling* (gerbus kering). Perbedaan keduanya terletak pada cara pengupasan kulit tanduk atau gabah kopi. Pengolahan basah membutuhkan air dalam jumlah cukup banyak, terutama untuk proses

pengupasan kulit merah dan pencucian setelah fermentasi untuk membersihkan lendir yang menempel di permukaan gabah kopi. Faktor ini sering menjadi pertimbangan dalam penentuan lokasi pulping (penggilingan gelondong merah).

E. Parameter dalam Fermentasi

Keberhasilan proses fermentasi kopi Arabika ditentukan oleh interaksi kompleks antara parameter seperti suhu, pH, kelembaban lingkungan, dan durasi fermentasi.

1. Suhu

Parameter ini berperan dalam mengatur aktivitas enzimatik dan pertumbuhan mikroba fermentatif. Aktivitas mikroorganisme fermentasi mencapai puncaknya pada suhu 25–30°C. Suhu yang terlalu tinggi (>35°C) dapat menyebabkan *overfermentation* dan mempercepat produksi senyawa asam seperti asam asetat, sedangkan suhu rendah (<20°C) memperlambat metabolisme mikroba dan menyebabkan ketidaktercapaian fermentasi sempurna [10].

2. pH

Selama fermentasi berlangsung, pH larutan cenderung menurun karena produksi asam organik seperti asam laktat dan asetat. Nilai pH awal fermentasi berkisar antara 5,5–6,0 dan bisa menurun hingga 3,5–4,0. Penurunan pH yang terlalu cepat dapat menghambat mikroba non-asam laktat dan memperkaya rasa asam berlebih [11].

3. Kelembaban

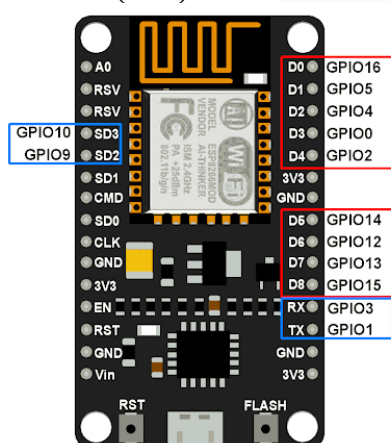
Kelembaban ideal selama fermentasi berada di antara 60–75%. Lingkungan dengan kelembaban tinggi mendukung pertumbuhan mikroba fermentasi namun juga meningkatkan risiko kontaminasi jamur dan mikroba patogen. Kelembaban media harus dijaga agar tidak menciptakan kondisi anaerob yang tidak diinginkan [12].

F. Komponen Sistem Monitoring

Penerapan sistem monitoring fermentasi membutuhkan perangkat keras yang kuat dan tahan terhadap kondisi lingkungan. Beberapa komponen utama yang biasanya digunakan antara lain :

1. NodeMCU

NodeMCU adalah sebuah board elektronik yang berbasis chip ESP8266 dengan kemampuan menjalankan fungsi mikrokontroler dan juga koneksi internet (WiFi).



Gambar 3 Arsitektur NodeMCU ESP8266

Terdapat beberapa pin I/O sehingga dapat dikembangkan menjadi sebuah aplikasi monitoring maupun controlling pada proyek IoT. NodeMCU ESP 8266 dapat diprogram dengan *compilernya* Arduino, menggunakan Arduino IDE [13].

2. Sensor DS18B20

Dalam proses pemantauan suhu selama fermentasi kopi secara anaerob, sensor suhu yang digunakan adalah DS18B20, yang terhubung langsung dengan mikrokontroler ESP8266 melalui komunikasi *One Wire*.



Gambar 4 Sensor DS18B20

Sensor DS18B20 memiliki beberapa keunggulan yang menjadikannya pilihan ideal dalam sistem ini, antara lain akurasi tinggi ($\pm 0.5^\circ\text{C}$), rentang pengukuran yang luas (-55°C hingga 125°C), serta kemampuan untuk berkomunikasi melalui satu jalur data, sehingga menyederhanakan instalasi dan mengurangi kebutuhan kabel. Selain itu, sensor ini dapat digunakan secara paralel (*multi-drop*), memungkinkan beberapa sensor terhubung dalam satu jalur data untuk memantau beberapa titik suhu dalam satu tangki fermentasi [14].

3. Sensor pH 4502C

Dalam proses fermentasi kopi, pH merupakan parameter penting yang mencerminkan aktivitas mikroba dan kemajuan fermentasi. Untuk memantau parameter ini secara *real time*, digunakan sensor pH PH-4502C, yang terhubung dengan mikrokontroler ESP32 melalui antarmuka ADC (*Analog to Digital Converter*).

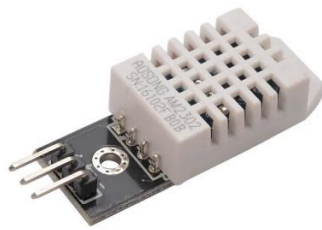


Gambar 5 Sensor pH 4502C

Sensor ini terdiri dari probe elektrokimia dan modul penguat sinyal yang memungkinkan pembacaan tegangan analog setara dengan nilai pH dalam rentang 0 hingga 14 pH. Modul ini juga dilengkapi dengan potensiometer kalibrasi untuk menyelaraskan pembacaan terhadap standar larutan *buffer*, sehingga meningkatkan akurasi sistem [15].

4. Sensor DHT22

Sensor DHT22 merupakan salah satu perangkat elektronik yang dirancang secara khusus untuk melakukan pengukuran terhadap dua variabel lingkungan penting secara bersamaan, yaitu suhu (*temperatur*) dan tingkat kelembaban udara (*humidity*) [16].



Gambar 6 Sensor DHT22

Sensor ini bekerja dengan mengubah perubahan kondisi lingkungan menjadi sinyal listrik dalam bentuk tegangan yang kemudian dapat diinterpretasikan dan diolah lebih lanjut oleh mikrokontroler.

5. LCD I2C 20x4

Dalam sistem fermentasi anaerob yang sedang dikembangkan, digunakan LCD 20x4 sebagai antarmuka visual untuk menampilkan data penting secara *real time*, seperti suhu, tekanan, waktu fermentasi, dan status aktuator.



Gambar 7 LCD 20x4

Modul ini memiliki tampilan 20 karakter dalam 4 baris, memungkinkan penyajian informasi yang lebih lengkap dibandingkan LCD 20x4 standar, sehingga pengguna dapat memantau lebih banyak parameter tanpa perlu scrolling atau navigasi tambahan [17].

6. Solenoid Valve

Dalam sistem fermentasi anaerob yang dirancang, digunakan *solenoid valve* 12V untuk mengatur aliran gas atau cairan secara otomatis berdasarkan kondisi tertentu seperti tekanan internal atau waktu fermentasi.



Gambar 8 Solenoid Valve

Solenoid valve jenis ini bekerja menggunakan prinsip elektromagnetik ketika tegangan 12V DC diberikan, kumparan di dalam *valve* menghasilkan medan magnet yang menarik plunger, sehingga membuka atau menutup jalur aliran [18].

7. Relay 1 Channel

Relay adalah saklar (*switch*) yang dioperasikan secara listrik dan merupakan komponen elektromekanikal yang terdiri dari 2 bagian utama yakni elektromagnet (*coil*) dan mekanikal (seperangkat kontak saklar/*switch*).

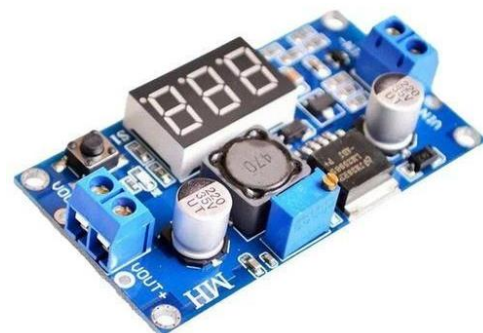


Gambar 9 Relay 1 Channel

Relay menggunakan prinsip elektromagnetik untuk menggerakkan kontak saklar sehingga dengan arus listrik yang kecil (*low power*) dapat menghantarkan listrik yang bertegangan lebih tinggi [19].

8. LM2596

Dalam sistem fermentasi anaerob ini, digunakan modul LM2596 sebagai DC-DC *buck converter* untuk menurunkan tegangan dari sumber daya utama (misalnya adaptor 12V) menjadi tegangan yang lebih rendah dan stabil, seperti 5V atau 3.3V.



Gambar 10 Modul LM2596

Modul ini berbasis chip LM2596, sebuah *voltage regulator switching* tipe *step-down* yang mampu menangani arus hingga 2A–3A dan bekerja pada frekuensi *switching* sekitar 150 kHz [20].

9. Buzzer

Buzzer adalah sebuah komponen elektronika yang dapat mengubah sinyal listrik menjadi getaran suara.

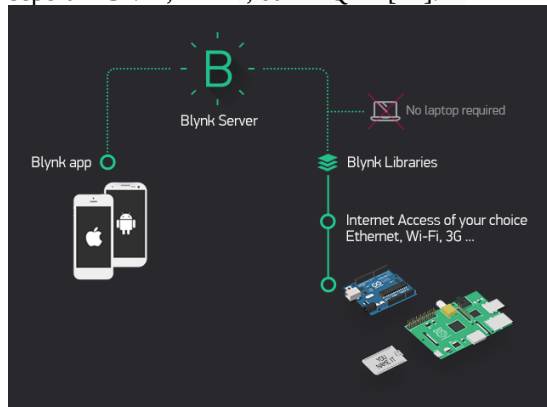


Gambar 11 Buzzer

Dalam sistem fermentasi anaerob ini, digunakan *buzzer* aktif sebagai indikator audio untuk memberikan peringatan atau notifikasi kondisi tertentu, seperti suhu melebihi batas aman, fermentasi selesai, atau kesalahan sistem [21].

10. Blynk

Blynk adalah *platform Internet of Things (IoT)* yang menyediakan solusi mudah dan fleksibel untuk menghubungkan perangkat fisik dengan aplikasi *mobile* secara *real time*. Platform ini memungkinkan pengguna untuk mengontrol dan memantau perangkat seperti mikrokontroler ESP32 dan ESP8266 melalui aplikasi yang dapat diakses di *smartphone*, menggunakan protokol komunikasi seperti TCP/IP, HTTP, dan MQTT [22].



Gambar 12 Blynk IoT

Salah satu aspek penting dalam komunikasi IoT menggunakan Blynk adalah pengaturan Quality of Service (QoS), QoS menentukan keandalan pengiriman pesan antara perangkat dan server. Quality of Service (QoS) adalah istilah dalam jaringan dan teknologi komunikasi yang merujuk pada kemampuan suatu sistem untuk memberikan jaminan terhadap performa layanan data dalam parameter tertentu [23]. Secara umum, terdapat beberapa parameter utama dalam evaluasi QoS pada sistem IoT, antara lain :

1. Delay

Delay adalah waktu yang dibutuhkan oleh data untuk berpindah dari perangkat pengirim (sensor) ke penerima (*server cloud* atau aplikasi pengguna). Dalam konteks *blynk*, *delay* yang rendah sangat penting untuk menjamin akurasi pengambilan keputusan *real time*, terutama ketika kontrol aktuator seperti *solenoid valve* dilakukan berdasarkan data sensor.

2. Throughput

Throughput merujuk pada jumlah data yang berhasil ditransmisikan dalam periode waktu tertentu (bps/Kbps). *Blynk* sebagai *platform cloud-based* mampu menangani data *throughput* dari beberapa perangkat secara simultan, meskipun pada beban jaringan tinggi *throughput* bisa menurun drastis, mempengaruhi kecepatan *update* visualisasi di *dashboard*.

3. Packet Loss

Packet loss terjadi ketika satu atau lebih paket data tidak sampai ke tujuan karena *error* jaringan. Dalam sistem monitoring fermentasi, kehilangan paket data dapat menyebabkan penyimpangan dalam pengambilan keputusan, seperti membuka katup berdasarkan nilai sensor yang sudah kadaluarsa atau tidak *valid*.

4. Jitter

Jitter adalah variasi *delay* antar paket data. Perubahan *delay* dapat mengganggu kestabilan respon sistem, misalnya pembacaan suhu atau pH yang muncul tidak konsisten di *dashboard blynk*, sehingga menyulitkan interpretasi secara *real time*.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Fermentasi pasca panen memiliki peran vital dalam membentuk karakteristik akhir kopi, di mana parameter suhu, pH, dan kelembaban menjadi penentu utama aktivitas mikroorganisme selama proses tersebut. Dalam penelitian ini, dikembangkan sistem pemantauan dan pengendalian fermentasi berbasis Internet of Things (IoT) yang mampu memantau kondisi fermentasi secara *real time* dan melakukan tindakan otomatis. Sistem ini terdiri dari NodeMCU ESP8266, sensor suhu DS18B20, kelembaban DHT22, sensor pH 4502C, LCD 20x4, serta aktuator berupa buzzer dan solenoid valve. Platform Blynk digunakan sebagai antarmuka kontrol dan pemantauan jarak jauh.

Tabel 1. Tabel Data Hasil Uji

Hari, Waktu	Suhu	pH	Kelembaban
Rabu, 14 Mei 2025 Pukul 16.00	26,2	6,55	87,7
	26,0	6,52	87,5
	26,1	6,48	87,6
	26,1	6,44	87,2
	26,2	6,41	87,0
Rabu, 14 Mei 2025 Pukul 22.00	26,8	6,38	86,8
	26,8	6,35	86,7
	26,7	6,32	86,5
	26,9	6,29	86,4
	26,8	6,25	86,0
Kamis, 15 Mei 2025 Pukul 05.00	26,8	6,08	84,3
	26,9	6,04	84,1
	26,8	5,96	83,9
	26,7	5,93	84,0
	26,9	5,87	84,1
Kamis, 15 Mei 2025 Pukul 10.00	27,3	5,45	78,9
	27,4	5,42	78,6
	27,3	5,38	78,7
	27,4	5,35	78,5
	27,5	5,31	78,4
Kamis, 15 Mei 2025 Pukul 16.00	27,9	5,26	76,8
	28,0	5,22	76,9
	28,2	5,18	76,6
	28,1	5,17	76,7
	28,2	5,12	76,8
Kamis, 15 Mei 2025 Pukul 22.00	27,9	4,62	82,6
	28,0	4,57	82,4
	28,2	4,51	82,3
	28,1	4,47	82,4
	28,2	4,42	82,5
Jumat, 16 Mei 2025 Pukul 07.00	28,9	4,11	78,9
	28,8	4,06	78,7
	29,0	4,01	78,4
	29,1	3,95	78,5
	29,0	3,92	78,2
Jumat, 16 Mei 2025 Pukul 15.00	29,7	3,81	78,5
	29,6	3,76	78,3
	29,5	3,72	78,1
	29,7	3,69	78,4
	29,8	3,67	78,3

Suhu menjadi indikator penting dalam fermentasi karena secara langsung memengaruhi laju metabolisme mikroba. Sensor DS18B20 mencatat peningkatan suhu secara bertahap dari 26,0°C hingga 29,7°C selama 72 jam fermentasi. Sensor DHT22 mencatat kelembaban berkisar antara 76–89%, yang mengalami penurunan saat siang hari dan peningkatan kembali di malam hari. Kombinasi suhu tinggi dan kelembaban rendah pada siang hari mempercepat metabolisme mikroorganisme, yang berdampak pada percepatan pembentukan asam organik. Sensor pH 4502C menunjukkan penurunan pH dari 6,5 menjadi 3,67 dalam 72 jam. Penurunan paling signifikan terjadi dalam 24 jam pertama, mengindikasikan aktivitas mikroba yang sangat

tinggi pada fase awal fermentasi. Setelah fase tersebut, laju penurunan pH mulai melambat, diduga akibat penurunan ketersediaan substrat dan akumulasi produk metabolit. Korelasi antara suhu, kelembaban, dan pH menunjukkan bahwa data suhu dan kelembaban dapat digunakan sebagai indikator prediktif terhadap dinamika fermentasi.

Sistem dilengkapi aktuator solenoid valve yang bekerja secara otomatis saat pH mencapai nilai di bawah ambang batas ($< 3,0$). Saat kondisi ini terdeteksi, valve akan terbuka untuk memasukkan oksigen ke dalam tong fermentasi guna memperlambat aktivitas mikroorganisme anaerob dan menstabilkan laju penurunan pH. Fitur ini terbukti efektif menjaga kestabilan fermentasi dan mencegah overfermentasi yang dapat merusak cita rasa kopi. Koordinasi antara pembacaan sensor dan aktuasi otomatis berlangsung cepat dan responsif.

Platform Blynk digunakan untuk menampilkan data sensor secara real time, serta memberikan notifikasi dan kontrol jarak jauh.

Tabel 2. Hasil Pengukuran Pengiriman Data

No	Delay (ms)	Total Data Terkirim	Respons Server Blynk (ms)	Kekuatan Sinyal (dBm)	Packet Loss (%)
1	30	5	136	-72	0
			136	-66	0
			136	-69	0
2	30	8	137	-69	0
			137	-72	0
			136	-69	0
3	106	11	137	-66	0
			137	-65	0
			136	-72	0
4	34	50	138	-69	0
			136	-72	0
			137	-73	0
5	30	113	139	-50	0
			137	-37	0
			138	-36	0
6	30	116	136	-37	0
			137	-38	0
			137	-38	0
7	31	122	136	-37	0
			137	-48	0
			137	-55	0

Sistem mencatat pengiriman data dengan waktu delay 30–106 ms, dan respons server stabil di kisaran 136–139 ms. Setelah dilakukan optimasi posisi perangkat, kekuatan sinyal meningkat dari -72 dBm menjadi -36 dBm, menghasilkan koneksi yang lebih stabil tanpa kehilangan data (packet loss = 0%). Fungsi kontrol buzzer manual dan notifikasi otomatis terhadap nilai pH juga bekerja optimal, memudahkan operator dalam melakukan intervensi saat dibutuhkan.

Analisis Pengujian Rasa Kopi

A. Kompleksitas Rasa



Gambar 13. Hasil Pengujian Kompleksitas Rasa

Berdasarkan uji organoleptik oleh 20 responden, 70% menyatakan bahwa Sample A memiliki rasa paling kompleks dibandingkan dengan Sample B (10%), Sample C (15%), dan yang menyatakan "sama saja" (5%). Sample A merupakan hasil fermentasi dengan sistem IoT dan AI, sementara Sample B dan C melalui metode fermentasi tradisional. Kompleksitas rasa pada Sample A diyakini berasal dari kontrol presisi terhadap suhu dan pH, yang menjaga kestabilan metabolisme mikroorganisme selama fermentasi.

B. Konsistensi dan Clarity



Gambar 14. Hasil Pengujian Konsistensi Rasa

Sebanyak 65% responden menilai bahwa Sample A memiliki rasa paling "terkontrol" (clarity), dibandingkan dengan Sample B (10%), Sample C (5%), dan "sama saja" (20%). Hal ini menunjukkan bahwa integrasi sensor suhu dan pH, serta aktuator (buzzer dan solenoid) dalam sistem fermentasi memberikan dampak positif terhadap kestabilan profil rasa. Sistem alarm dini dan penyesuaian udara otomatis membantu mencegah fermentasi berlebihan dan menjaga kondisi optimal secara berkelanjutan.

C. Stabilitas Rasa



Gambar 15. Hasil Pengujian Stabilitas Rasa

Pada pengujian kestabilan rasa antar gelas dan antar sesapan, 95% responden menilai Sample A sebagai kopi dengan rasa paling stabil. Tidak ditemukan gejala off-taste atau fermentasi berlebih, yang menandakan keberhasilan sistem dalam menjaga konsistensi fermentasi. Kombinasi sensor dan pengendalian otomatis terbukti mampu menjaga profil biokimia fermentasi dalam batas optimal, menghasilkan kopi dengan kualitas rasa yang profesional.

D. Deskripsi Profil Rasa

Responden menggambarkan Sample A memiliki karakter rasa seimbang antara asam, manis, dan pahit, dengan aroma buah seperti jeruk, apel merah, dan leci. Aftertaste-nya bersih dan menyenangkan. Sementara Sample B dinilai lebih pahit dengan body sedang, dan Sample C memiliki rasa manis dengan aroma fermentasi yang lebih kuat namun kurang seimbang. Ini mengonfirmasi bahwa sistem fermentasi berbasis IoT mampu menghasilkan kopi dengan clean cup, flavor clarity, dan aftertaste yang harmonis.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring fermentasi kopi berbasis Internet of Things (IoT) dan Artificial Intelligence (AI) sederhana (rule-based system). Sistem mampu memantau parameter penting fermentasi—suhu, kelembaban, dan pH—secara real-time dengan dukungan perangkat sensor yang terintegrasi dengan mikrokontroler NodeMCU ESP8266. Data sensor ditransmisikan secara kontinu ke platform Blynk untuk pemantauan jarak jauh, dengan kualitas jaringan yang stabil (delay rata-rata 30 ms dan tanpa packet loss). Fitur visualisasi data melalui LCD 20x4 dan aplikasi mobile Blynk memberikan fleksibilitas pemantauan baik di lokasi maupun secara remote. Sistem juga merespons perubahan parameter secara otomatis, di mana buzzer berfungsi sebagai alarm peringatan dini dan solenoid valve mengatur aliran oksigen saat nilai pH melebihi ambang batas yang ditentukan.

Penerapan sistem ini menunjukkan dampak positif terhadap kualitas dan konsistensi hasil fermentasi kopi Arabika. Berdasarkan uji organoleptik oleh panelis, 95% menyatakan preferensi terhadap kopi hasil fermentasi dengan sistem ini, karena menghasilkan karakteristik rasa yang lebih seimbang dan aroma yang kompleks. Hal ini membuktikan bahwa proses fermentasi yang terpantau dan terkendali dapat meningkatkan mutu akhir kopi secara signifikan. Dengan demikian, sistem monitoring fermentasi ini dapat menjadi solusi teknologi tepat guna dalam industri pengolahan kopi untuk menghasilkan produk berkualitas tinggi secara konsisten.

Untuk pengembangan sistem ke depan, perlu dilakukan penguatan dalam identifikasi masalah sejak awal, termasuk penyesuaian parameter tambahan yang relevan. Integrasi dengan teknologi terkini seperti cloud database untuk penyimpanan data historis, AI untuk analisis prediktif, serta notifikasi melalui WhatsApp atau Telegram juga disarankan guna meningkatkan fungsionalitas dan jangkauan sistem. Selain itu, perlu diperhatikan perbaikan pada aspek kelembaban dan efisiensi daya. Dengan pengembangan tersebut, sistem monitoring fermentasi berbasis IoT ini dapat menjadi lebih akurat, adaptif, dan siap diterapkan secara luas dalam industri kopi specialty maupun sektor fermentasi pangan lainnya.

REFERENSI

- [1] H. Hasriani, "Analisis Strategi Pengembangan Agribisnis Kopi Arabika," JIA (Jurnal Ilmiah Agribisnis), vol. 7, no. 2, hlm. 97–104, 2023.
- [2] T. Budiarto, "Pemberdayaan Petani pada Pengolahan Pascapanen Kopi Arabika Proses Full Wash," Jurnal CARE IPB, vol. 7, no. 1, hlm. 61–69, 2023.

- [3] B. I. A. and S. Nugraha R., "Sistem Monitoring pH dan Suhu Pada Fermentasi Kopi Berbasis Internet of Things (IoT)," *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, vol. 6, no. 1, hlm. 10–16, 2024.
- [4] M. Murad, "Teknologi Pascapanen Kopi untuk Pertanian Berkelanjutan," *JOM Pascasarjana UNRAM*, vol. 5, no. 1, 2025.
- [5] D. B. and Y. Magfira F. and Wulan T. D., "Perancangan IoT Sederhana Untuk Sistem Pendeteksi Kemurnian Kopi Bubuk," *Tecnoscienza*, vol. 8, no. 1, hlm. 1–10, 2024.
- [6] M. G. M. J. dan A. I. H. Y. Liu, "IoT-based Real Time Greenhouse Monitoring and Controlling System," *JETIA*, vol. 10, no. 3, hlm. 132–139, 2024.
- [7] M. R. and M. M. Z. Dakhia, "AI-Enabled IoT for Food Computing: Challenges, Opportunities, and Future Directions," *Sensors*, vol. 25, no. 7, hlm. 2147, 2025.
- [8] A. A. dan R. R. N. Nurihandayani, "Viabilitas Benih Kopi Arabika (*Coffea arabica* L.) terhadap Lama Perendaman Air Kelapa pada Media Tanam yang Berbeda Setelah Skarifikasi Mekanis," *Flora: Jurnal Kajian Ilmu Pertanian Dan Perkebunan*, vol. 2, no. 1, hlm. 97–115, 2025.
- [9] M. S. H. dan R. W. D. Prasetyo, "Pengembangan Fermentasi Semi Anaerobik untuk Meningkatkan Kualitas Kopi Arabika di Indonesia," *Jurnal Agritech*, vol. 42, no. 2, hlm. 120–130, 2024.
- [10] M. F. Ramadhan dan A. Yulianto, "Fermentasi Anaerob sebagai Alternatif Pengolahan Kopi Kering untuk Meningkatkan Profil Rasa dan Pengurangan Limbah," *Jurnal Pangan dan Agroindustri*, vol. 10, no. 2, hlm. 150–160, 2024.
- [11] Saripah et al., "Pengaruh Suhu Lingkungan dan Waktu Fermentasi Biji Kopi Arabika Terhadap Kadar Kafein, Etanol, dan pH," *Prosiding The 12th Industrial Research Workshop and National Seminar*, hlm. 124–128, 2021.
- [12] K. M. F. S. dan B. E. S. S. Mulyani, "Pengaruh Lama Fermentasi terhadap Total Asam, Total Bakteri Asam Laktat dan Warna Kefir Belimbing Manis (*Averrhoa carambola*)," *Jurnal Ilmiah Sains*, vol. 21, no. 2, hlm. 113–118, 2021.
- [13] T. P. dan A. H. F. Fasya, "Rancang Bangun Alat Fermentor Kopi Terkendali Menggunakan Elemen Pemanas Berbasis Arduino Uno," *ORBITA: Jurnal Hasil Kajian, Inovasi, dan Aplikasi Pendidikan Fisika*, vol. 8, no. 2, hlm. 307–308, 2022.
- [14] F. S. Budijono, "Smart Temperature Monitoring System Using ESP32 and DS18B20," *OP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci*, vol. 794, no. 1, 2021.
- [15] R. R. Rivana et al., "Sistem Monitoring Nutrisi dan PH Air pada Tanaman Hidroponik Berbasis Internet of Things (IoT)," *Jurnal Elkolin*, vol. 10, no. 3, 2023.
- [16] I. M. S. Wibawa and I. K. Putra, "Design of Air Temperature and Humidity Measurement Based on Arduino ATmega 328P with DHT22 Sensor," *International Journal of Physical Sciences and Engineering*, vol. 6, no. 1, hlm. 9–17, 2022.
- [17] R. R. R. M. Muhammad, "Monitoring Sudut Fasa Menggunakan Mikrokontroler Berbasis Internet of Things (IoT)," *Journal Of Science and Advanced Engineering (JOSAE)*, vol. 5, no. 1, 2023.
- [18] J. J. dan A. A. Roja, "Rancang Bangun Sistem Kendali Proses Produksi Biogas," *Jurnal TekTro*, vol. 8, no. 1, hlm. 1–2, 2024.
- [19] S. P. Santosa dan R. M. W. Nugroho, "Rancang Bangun Alat Pintu Geser Otomatis Menggunakan Motor DC 24V," *Jurnal Ilmiah Elektrokrisna*, vol. 9, no. 1, hlm. 38–39, 2021.
- [20] S. N. dan D. D. R. R. Hidayah, "Implementasi Pengaturan Suhu Menggunakan Mikrokontroler ESP32," *Metrotech*, vol. 3, no. 3, hlm. 106–115, 2024.
- [21] N. Q. A. L. dan W. W. A. R. Sujatmika, "Prototype Sistem Monitoring Tanaman Bayam Menggunakan Sensor Suhu Melalui Aplikasi Blynk Berbasis IoT," *Jurnal Sistem Informasi dan Bisnis Cerdas*, vol. 18, no. 1, hlm. 1–11, 2025.
- [22] N. H. dan D. R. S. A. A. S. Pradana, "Sistem Monitoring Baterai Berbasis IoT Menggunakan Blynk IoT," *e-Proceeding of Applied Science*, vol. 10, no. 3, hlm. 765–766, 2024.
- [23] K. Masykuroh, A. D. Ramadhani, dan N. Iryani, "Analisis QoS dan QoE pada Video Pembelajaran Online di Institut Teknologi Telkom Purwokerto (ITTP)," *TRANSMISI : JURNAL ILMIAH TEKNIK ELEKTRO*, vol. 23, no. 2, hlm. 40–47, Mei 2021, doi: 10.14710/transmisi.23.2.40-47.