

Analisis Kinerja Perangkat Instrumentasi dan Kontrol Bioreaktor *Cascara* Berbasis Raspberry Pi

Duwi Hariyanto ^{1*}, Afit Miranto ¹, Daffa Naufal ¹, Muhammad Nur Rafif ¹, Muhammad Pramudhitya Hernanda ¹, Ilham Marvie ¹, Jabosar Ronggur Hamonangan Panjaitan ¹

¹ Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera
Jl. Terusan Ryacudu Way Hui, Kecamatan Jati Agung, Lampung Selatan 35365
*E-mail: duwi.hariyanto@el.itera.ac.id

Naskah Masuk: 04 Februari 2025; Diterima: 12 Maret 2025; Terbit: 31 Maret 2025

ABSTRAK

Abstrak - Kemajuan teknologi saat ini mendorong pengembangan perangkat yang dapat meningkatkan efisiensi dan efektivitas berbagai proses produksi, termasuk dalam industri fermentasi. Salah satu produk bernilai tinggi yang dapat dihasilkan dari kulit kopi (*cascara*) adalah asam cuka, yang tidak hanya memperpanjang masa simpan *cascara* tetapi juga meningkatkan nilai ekonomisnya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja perangkat instrumentasi dan kontrol bioreaktor *cascara* berbasis mini komputer Raspberry Pi yang didukung mikrokontroler Arduino Nano secara serial. Sistem ini dirancang untuk memantau dan mengendalikan parameter kritis fermentasi, seperti suhu, pH, dan kadar oksigen. Perangkat ini menggunakan sensor DS18B20 untuk mendeteksi suhu, sensor pH SKU: SEN0169 untuk mengukur tingkat keasaman, serta sensor oksigen SKU: SEN0322 untuk memantau tingkat oksigen. Raspberry Pi berfungsi sebagai pusat pemrosesan data, kontrol perangkat keras, dan antarmuka pengguna, sementara Arduino Nano berfungsi dalam menangani pembacaan sensor. Pemrograman mikrokontroler dilakukan melalui Arduino *Integrated Development Environment* (IDE). Hasil memberikan bahwa sensor suhu memiliki akurasi 99,27%, sensor pH memiliki akurasi 98,3%, serta sensor oksigen mampu mendeteksi kadar hingga 25% vol. Kontribusi utama penelitian ini adalah sistem otomatisasi yang menjaga stabilitas fermentasi, meningkatkan efisiensi, dan mengurangi ketergantungan pada pemantauan manual. Implementasi antarmuka berbasis ponsel pintar memungkinkan pemantauan *real-time*, mendukung inovasi industri fermentasi berbasis teknologi.

Kata kunci: Arduino Nano, Bioreaktor, *Cascara*, Kontrol Fermentasi, Raspberry Pi, Sensor Oksigen, Sensor pH, Sensor Suhu

ABSTRACT

Abstract - The rapid advancement of technology drives the development of devices that enhance the efficiency and effectiveness of various production processes, including fermentation industries. One of the high-value products that can be derived from coffee husks (*cascara*) is vinegar, which not only extends the shelf life of *cascara* but also increases its economic value. This study aimed to analyze the performance of an instrumentation and control device for a bioreactor based on a Raspberry Pi mini-computer, supported by an Arduino Nano microcontroller in a serial configuration. The system was designed to monitor and control critical fermentation parameters, including temperature, pH, and oxygen levels. The device utilized a DS18B20 sensor for temperature detection, a pH SKU: SEN0169 sensor for acidity measurement, and an oxygen SKU: SEN0322 sensor for oxygen level monitoring. The Raspberry Pi served as the data processing center, hardware controller, and user interface, while the Arduino Nano managed the sensor readings. The microcontroller programming was conducted using the Arduino *Integrated Development Environment* (IDE). Results indicated that the temperature sensor's accuracy was 99.27%, the pH sensor's accuracy was 98.3%, and the oxygen sensor detection reached up to 25% vol. The primary contribution of this research is an automation system that maintains fermentation stability, enhances efficiency, and reduces dependence on manual monitoring. The implementation of a smartphone-based interface enables real-time monitoring, supporting technological innovation in the fermentation industry.

Keywords: Arduino Nano, Bioreactor, *Cascara*, Fermentation Control, Raspberry Pi, Oxygen Sensor, pH Sensor, Temperature Sensor

Copyright © 2025 Jurnal Teknik Elektro dan Komputasi (ELKOM)

1. PENDAHULUAN

Sebagai negara yang dianugrahi iklim tropis, Indonesia memiliki keunggulan di bidang hasil perkebunan terutama kopi. Produksi kopi di Indonesia pada tahun 2020 mencapai 762,38 ribu ton dengan

provinsi penghasil terbesar yaitu Sumatera Selatan sebanyak 198,94 ton [1]. Utamanya, kopi dimanfaatkan bijinya sementara kulit kopi dianggap sebagai limbah dari produksi [2]. Limbah kulit kopi dapat diolah untuk dijadikan produk minuman kesehatan *cascara* [3]. Namun, minuman *cascara* memiliki kadar air yang cukup tinggi sehingga masa simpannya singkat [4]. Pengolahan lebih lanjut diperlukan agar minuman *cascara* dapat menjadi bahan pangan yang memiliki masa simpan lebih panjang. Salah satu pengolahan yang menarik perhatian akhir-akhir ini adalah pengolahan limbah kulit kopi menjadi asam asetat.

Asam asetat (CH_3COOH) atau yang lebih dikenal dengan nama asam cuka merupakan suatu senyawa kimia asam organik yang mudah terlarut dalam air, alkohol, gliserol, dan eter [5]. Asam asetat memiliki banyak kegunaan diantaranya, dapat sebagai penambah kadar keasaman pada bidang industri pangan, sebagai pelunak air pada rumah tangga, dan sebagai bahan baku pembuatan vinil asetat, selulosa asetat, asetat anhidrit, dan garam asetat pada bidang industri kimia [6]. Asam asetat dapat diproduksi dari kulit kopi melalui proses fermentasi biologis.

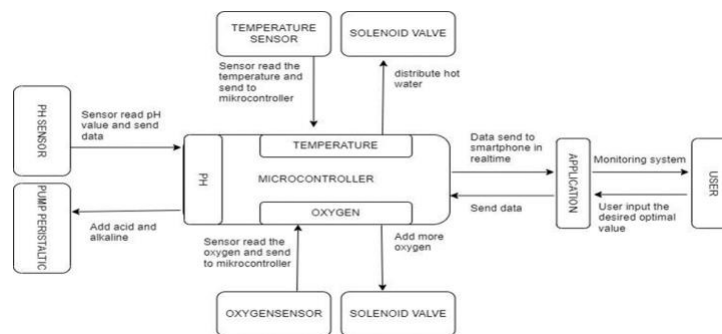
Secara umum, proses fermentasi biologis untuk menghasilkan asam asetat melalui dua proses yaitu anaerob dan aerob. Proses anaerob sangat membutuhkan mikroorganisme *Saccharomyces cerevisiae* untuk menguraikan glukosa/gula menjadi etanol [7]. *Saccharomyces cerevisiae* akan secara aktif mendukung proses fermentasi pada suhu dan pH optimum berturut-turut diantara 30°C hingga 35°C dan 4,5 hingga 5,5 [8]. Proses aerob membutuhkan peranan mikroorganisme *Acetobacter aceti* untuk mengubah etanol menjadi asam asetat [9]. Pertumbuhan mikroorganisme *Acetobacter aceti* dalam mendukung produksi asam asetat akan optimum pada suhu dan pH berturut-turut berkisar antara 15°C hingga 34°C dan 3,0 hingga 4,0 [10].

Berdasarkan hal tersebut, parameter suhu, pH, dan tingkat oksigen dalam proses fermentasi biologis menjadi sangat penting. Akhir-akhir ini banyak peneliti mulai mengembangkan alat yang dapat memonitoring parameter-parameter tersebut untuk mengoptimalkan proses fermentasi. Riza dkk. [11] merancang sistem pengendalian suhu pada fermentor yogurt menggunakan mikrokontroler, sensor LM35, dan algoritma Fuzzy. Haryuaditya dkk. [12] memanfaatkan sensor pH SEN0161-V2, sensor suhu DHT11, dan mikrokontroler ESP32 Devkit untuk memonitor kondisi pH dan suhu pada proses fermentasi kimchi. Namun, penelitian terkait perangkat otomatis untuk fermentasi asam cuka masih terbatas, terutama yang mampu mengintegrasikan pemantauan suhu, pH, dan kadar oksigen secara bersamaan.

Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan alat yang dapat memonitoring dan mengendalikan suhu, pH, dan tingkat oksigen agar asam cuka yang dihasilkan berkualitas. Alat tersebut menggunakan teknologi otomatisasi yang dapat mengatur dan membaca keadaan larutan secara *real-time*. Dengan demikian, penelitian ini difokuskan untuk mengeksplorasi karakteristik sensor yang memainkan peran penting dalam pengendalian suhu, pH, dan kadar oksigen, guna memastikan proses produksi asam cuka dari kulit kopi berjalan optimal.

2. METODE PENELITIAN

Pada sistem ini, mini komputer Raspberry Pi berfungsi sebagai pusat pemrosesan data, pengendali perangkat keras, dan antarmuka pengguna, sementara mikrokontroler Arduino Nano digunakan untuk membaca data dari sensor. Arduino Nano dihubungkan secara serial ke Raspberry Pi, sehingga hasil pembacaan sensor dapat diteruskan untuk diproses lebih lanjut dan dijadikan dasar dalam mengendalikan aktuator. Parameter fisika utama yang dipantau dalam proses fermentasi kulit kopi meliputi temperatur, pH, dan kadar oksigen. Pengguna hanya perlu memasukkan nilai optimal dari setiap parameter agar fermentasi berlangsung dalam kondisi yang sesuai dan menghasilkan asam cuka dengan kualitas tinggi. Sistem ini dirancang agar mudah dioperasikan, dengan antarmuka pengguna yang memungkinkan pemantauan kondisi bioreaktor secara *real-time* melalui aplikasi di ponsel pintar. Skema sistem ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Sistem instrumentasi dan kontrol bioreaktor

Pengendalian temperatur dilakukan dengan mempertahankan suhu bioreaktor dalam rentang optimal. Jika terjadi penyimpangan suhu, Raspberry Pi akan mengaktifkan *solenoid valve* untuk mengalirkan air ke dalam selimut bioreaktor, sehingga temperatur dapat dikendalikan secara otomatis. Sistem pengendalian kadar oksigen bekerja sesuai dengan jenis fermentasi yang berlangsung. Pada fermentasi aerob, *solenoid valve* yang terhubung ke tabung oksigen akan diaktifkan guna memastikan kadar oksigen tetap optimal. Sebaliknya, pada fermentasi anaerob, *solenoid valve* yang terhubung ke pompa pembuangan akan diaktifkan untuk menurunkan kadar oksigen, sehingga kondisi yang mendukung pembentukan asam cuka dapat tercapai. Pengendalian pH dilakukan dengan mengatur pompa peristaltik yang terhubung ke larutan asam dan larutan basa. Jika pH menyimpang dari nilai optimal, pompa peristaltik akan menambahkan larutan asam atau basa ke dalam bioreaktor untuk menjaga keseimbangan pH yang mendukung proses fermentasi. Seluruh sistem instrumentasi dan pengendalian bioreaktor dirancang agar bekerja secara otomatis dan presisi dalam menjaga kondisi optimal fermentasi. Dengan integrasi sensor, aktuator, dan pemrosesan data berbasis Raspberry Pi, sistem ini mampu meningkatkan efisiensi dan konsistensi dalam produksi asam cuka.

2.1. Perancangan Perangkat Keras

Mini komputer Raspberry Pi digunakan sebagai komponen utama dalam sistem pemantauan dan kendali bioreaktor. Perangkat ini, yang dilengkapi prosesor Broadcom dan 40 pin GPIO, mampu menangani lebih banyak masukan dibandingkan dengan pengendali lainnya [13]. Raspberry Pi berfungsi sebagai pusat pemrosesan data, pengendali perangkat keras, dan antarmuka pengguna. Untuk membaca data sensor, sistem ini juga menggunakan mikrokontroler Arduino Nano, yang terhubung secara serial ke Raspberry Pi. Hasil pembacaan sensor dari Arduino Nano akan diteruskan ke Raspberry Pi untuk diproses dan digunakan sebagai dasar dalam mengendalikan aktuator.



Keterangan :

- A. Motor DC
- B. Sensor BMP
- C. Sensor Oksigen
- D. Sensor Ultrasonik
- E. Kotak Panel Sistem Utama
- F. Pompa air
- G. Sensor Water Flow
- H. Sensor Suhu
- I. Sensor pH

- J. Bilah Pengaduk
- K. Solenoid Oksigen
- L. Pompa Peristaltik Asam
- M. Pompa Peristaltik Basa
- N. Air yang berada di Selimut Tabung
- O. Tabung Cairan Basa
- P. Tabung Cairan Asam
- Q. Tabung Oksigen
- R. Tabung Air

Gambar 2. Desain bioreaktor

Sensor DS18B20 digunakan untuk mengukur suhu. Sensor ini memiliki ujung berbahan tahan air (*waterproof*), sehingga dapat digunakan dalam zat cair. DS18B20 dilengkapi ADC internal 12-bit dan memiliki tiga pin, yaitu GND (ground), DQ (data), dan VDD (daya) [14]. Sensor ini memiliki rentang pengukuran suhu dari -55°C hingga 125°C . Sensor pH meter Pro dari DFRobot digunakan untuk mengukur tingkat keasaman dengan rentang 0–14 pH dan akurasi $\pm 0,1$ pH pada suhu ruangan

(25°C)[15]. Sensor pH dapat mendeteksi kadar asam dan basa pada air [16]. Sensor Gravity I2C Oxygen digunakan untuk mengukur konsentrasi oksigen dalam suatu lingkungan. Sensor produksi DFRobot ini telah dikalibrasi dan kompatibel dengan mikrokontroler, sehingga dapat diterapkan untuk berbagai kebutuhan. Sensor ini memiliki rentang pengukuran efektif 0–25% volume oksigen dengan resolusi 0,15% volume [17].

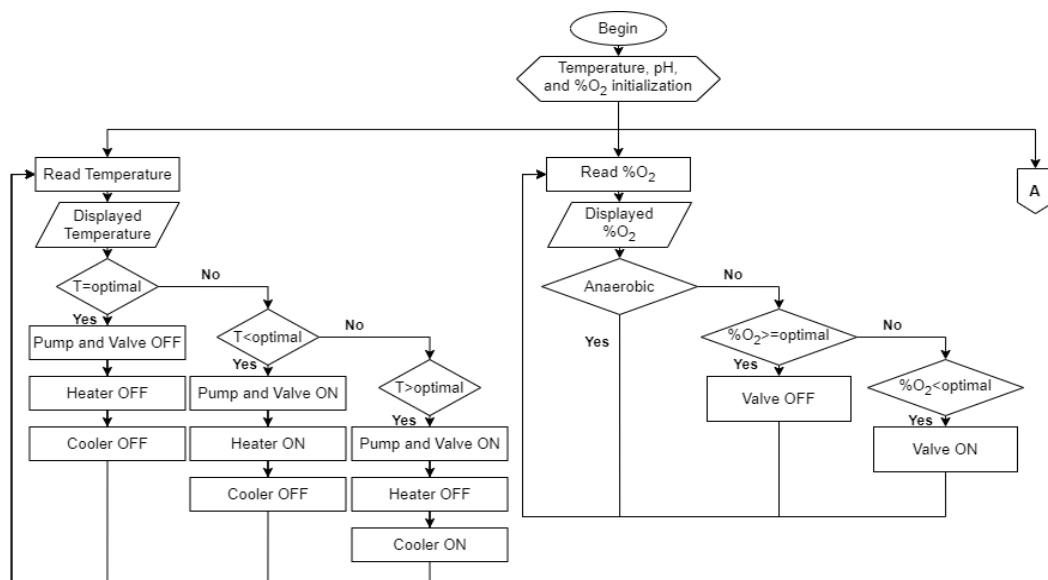
Gambar 2 menunjukkan desain bioreaktor yang dibuat dari baja tahan karat tipe 314. Bioreaktor memiliki tinggi 70 cm dan volume inti 20 liter. Inti bioreaktor diselubungi ruang setebal 5,4 cm yang dialiri air untuk mengendalikan suhu di dalamnya. Panel kendali yang berisi sistem mikrokontroler ditempatkan di bagian luar bioreaktor. Selain itu, bioreaktor dilengkapi pengaduk yang digerakkan oleh motor DC untuk menjaga homogenitas campuran dalam proses fermentasi asam cuka.

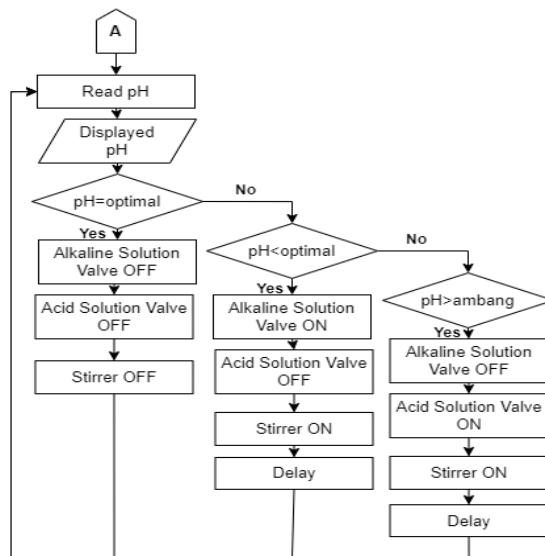
2.2. Perancangan Perangkat Lunak

Perangkat lunak Arduino *Integrated Development Environment* (IDE) digunakan untuk menulis, mengedit, dan mengunggah program ke mikrokontroler [18,19]. Arduino Nano digunakan untuk menangani pembacaan sensor, sedangkan Raspberry Pi berfungsi sebagai pusat pemrosesan data, kontrol aktuatur, dan antarmuka pengguna. Bahasa pemrograman yang digunakan dalam sistem ini adalah C++ untuk Arduino dan Python untuk Raspberry Pi. Diagram alir cara kerja sistem ditunjukkan pada Gambar 3. Pada tahap awal sebelum sistem beroperasi, pengguna memasukkan nilai suhu, pH, dan kadar oksigen optimal melalui ponsel pintar. Sistem secara otomatis akan mempertahankan parameter tersebut agar tetap dalam rentang optimal.

Sensor DS18B20 membaca suhu di dalam bioreaktor. Berdasarkan Gambar 3, jika suhu berada di bawah nilai optimal, Raspberry Pi akan membuka *solenoid valve*, mengaktifkan pemanas dan pompa, sehingga air hangat disirkulasikan di dalam selimut bioreaktor. Sebaliknya, jika suhu melebihi batas optimal, *solenoid valve* akan terbuka untuk mengaktifkan pendingin dan pompa guna mensirkulasikan air dingin. Ketika suhu berada dalam rentang optimal, *solenoid valve* akan ditutup, dan seluruh perangkat pengendali suhu dinonaktifkan.

Sensor pH berfungsi untuk memantau tingkat keasaman produk asam cuka di dalam bioreaktor. Pada Gambar 3, jika nilai pH berada dalam rentang optimal, Raspberry Pi akan menonaktifkan pompa peristaltik dan motor pengaduk. Jika pH lebih rendah dari nilai optimal, pompa peristaltik untuk larutan basa serta motor pengaduk akan diaktifkan. Sebaliknya, jika pH lebih tinggi dari nilai optimal, pompa peristaltik untuk larutan asam akan diaktifkan bersama motor pengaduk. Untuk memastikan pencampuran yang merata, setiap operasi dilengkapi dengan jeda waktu (*delay*), dan volume larutan yang ditambahkan dibatasi sebanyak 5 ml per operasi.





Gambar 3. Diagram alir cara kerja sistem

Sistem pengendalian kadar oksigen di dalam bioreaktor disesuaikan dengan dua tahap fermentasi asam cuka, yaitu fermentasi anaerob dan aerob, seperti ditunjukkan Gambar 3. Pada tahap anaerob, kadar oksigen dalam bioreaktor menurun secara alami akibat aktivitas mikroorganisme, yang berlangsung dari hari pertama hingga hari kelima. Sensor Gravity I2C Oxygen mengukur kadar oksigen dan Raspberry Pi menampilkan data pemantauan secara *real-time*. Tahap aerob dimulai pada hari keenam hingga hari kedua belas, di mana proses fermentasi memerlukan pasokan oksigen. Jika hasil pembacaan sensor menunjukkan kadar oksigen di bawah nilai optimal, Raspberry Pi akan membuka *solenoid valve* untuk memasukkan oksigen dari tabung ke dalam bioreaktor. Setelah kadar oksigen mencapai nilai yang diinginkan, mikrokontroler akan menutup *solenoid valve* untuk menghentikan aliran oksigen.

2.3. Prosedur Pengujian Sistem

Prosedur pengujian sistem dilakukan untuk menilai kinerja perangkat instrumentasi dan kontrol bioreaktor *cascara* berbasis Raspberry Pi. Pengujian dilakukan dengan tahapan sebagai berikut

1. Sensor suhu DS18B20 diuji dengan membandingkan hasil pembacaannya dengan termokopel tipe-K sebagai alat referensi. Data yang diperoleh ditampilkan pada serial monitor IDE dan divalidasi untuk memastikan akurasi pengukuran.
2. Sensor pH SKU SEN0169 diuji menggunakan larutan serbuk pH yang dicampur dengan akuades. Kalibrasi dilakukan dengan menyesuaikan potensio pada modul sensor hingga hasil pengukuran sesuai dengan alat tes pH standar.
3. Sensor oksigen SKU SEN0322 diuji dengan mengukur kadar oksigen dalam ruangan yang diberi suplai oksigen, kemudian diuji kembali dalam kondisi tertutup menggunakan lilin sebagai indikator perubahan kadar oksigen.
4. Semua sensor diuji secara bersamaan dalam tabung bioreaktor *cascara* untuk mengevaluasi akurasi pembacaan data, memastikan integrasi sistem berjalan dengan baik, dan menilai tampilan hasil pemantauan pada aplikasi.

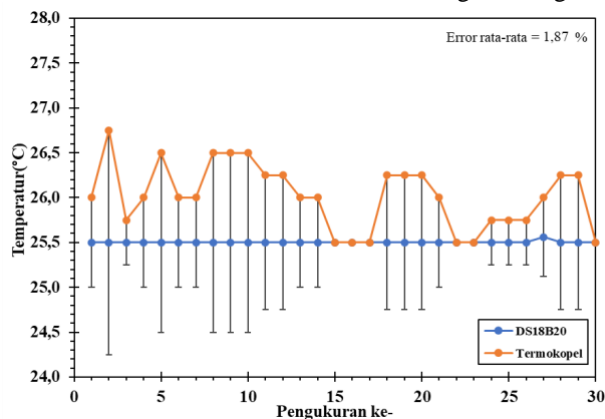
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem ini dirancang untuk memantau dan mengendalikan proses fermentasi asam cuka dari kulit kopi (*cascara*) secara otomatis. Proses fermentasi berlangsung dalam dua tahap, yaitu anaerob dan aerob, yang masing-masing memerlukan kondisi suhu dan pH optimal untuk mendukung pertumbuhan mikroorganisme. Pada tahap anaerob, mikroorganisme *Saccharomyces cerevisiae* menguraikan glukosa menjadi etanol. Pertumbuhan optimal *S. cerevisiae* terjadi pada suhu 28°C hingga 30°C, dengan batas toleransi 35°C – 47°C [6]. Selain itu, pH fermentasi pada tahap ini dipertahankan dalam rentang 3,5 – 6,0 agar proses konversi gula berlangsung secara efisien [3]. Tahap berikutnya adalah fermentasi aerob, di mana etanol diubah menjadi asam cuka oleh bakteri *Acetobacter aceti*. Bakteri ini tumbuh optimal pada suhu 25°C – 30°C, dengan batas toleransi 5°C – 42°C [6]. Selama proses ini, pH secara bertahap menurun dan dijaga dalam kisaran 3,0 – 4,0 [4] untuk memastikan pembentukan asam cuka yang maksimal.

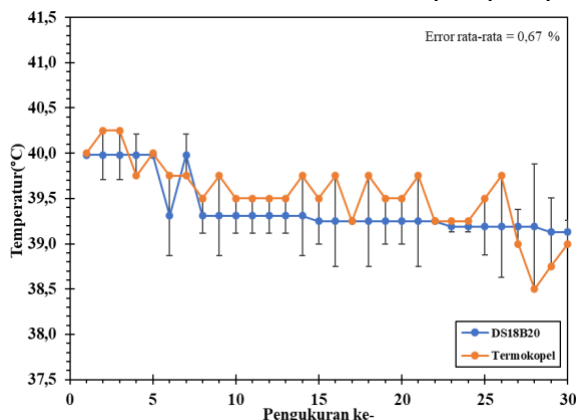
3.1. Karakteristik Sensor Suhu

Sensor suhu DS18B20 berperan penting dalam mengukur suhu di dalam tabung bioreaktor. Hasil pembacaan sensor ini digunakan sebagai masukan untuk mengaktifkan aktuator pada subsistem kendali. Sensor ditempatkan langsung di dalam bioreaktor untuk memastikan pemantauan suhu yang akurat. Dalam penelitian ini, dilakukan pengujian untuk mengevaluasi akurasi sensor DS18B20 dalam mengukur suhu, sehingga dapat memastikan keandalan dan konsistensi pembacaannya.

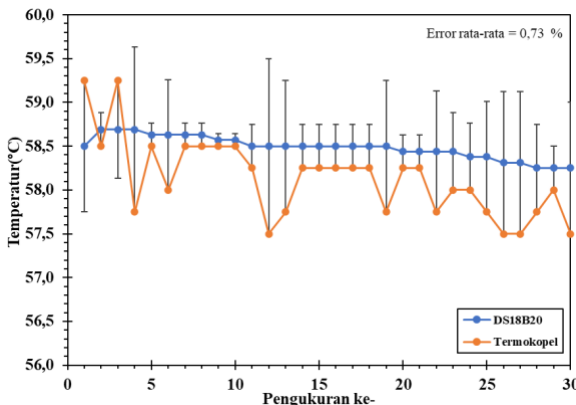
Akurasi sensor DS18B20 dibandingkan dengan termokopel tipe-K sebagai standar referensi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor DS18B20 membaca suhu ruangan 25°C dengan stabil, sedangkan termokopel menunjukkan variasi nilai sekitar 0,25°C, seperti ditunjukkan Gambar 4. Berdasarkan data pengujian pada suhu ruangan, sensor DS18B20 memiliki rata-rata persentase galat (*error*) sebesar 1,87% dan akurasi sebesar 98,13% dibandingkan dengan termokopel.



Gambar 4. Hasil pembacaan sensor DSB18B20 dan termokopel tipe K pada suhu ruangan 25°C



Gambar 5. Hasil pembacaan sensor DSB18B20 dan termokopel tipe K pada suhu air 40°C



Gambar 6. Hasil pembacaan sensor DSB18B20 dan termokopel tipe K pada suhu air 59°C

Pengujian selanjutnya dilakukan dengan mencelupkan termokopel dan sensor DS18B20 ke dalam air hangat bersuhu 40°C. Hasil pembacaan menunjukkan bahwa suhu menurun secara bertahap seiring dengan waktu, seperti ditunjukkan Gambar 5. Namun, termokopel kembali menunjukkan data yang fluktuatif, dengan nilai suhu yang cenderung naik dan turun secara tidak stabil. Sebaliknya, sensor DS18B20 memberikan hasil yang lebih konsisten dalam memantau perubahan suhu. Berdasarkan data yang diperoleh, rata-rata persentase galat (*error*) pada sensor DS18B20 adalah 0,67%, sementara akurasi mencapai 99,33% dibandingkan dengan termokopel.

Percobaan terakhir dilakukan pada air panas bersuhu 59°C. Hasil pengukuran menunjukkan pola serupa, dimana suhu mengalami penurunan bertahap, seperti ditunjukkan Gambar 6. Sensor DS18B20 kembali menunjukkan pembacaan yang lebih stabil dibandingkan termokopel, yang masih mengalami fluktuasi nilai suhu. Dari hasil perhitungan, rata-rata persentase galat sensor DS18B20 sebesar 0,73%, dengan akurasi mencapai 99,27% dibandingkan dengan termokopel.

Berdasarkan hasil keseluruhan pengujian, sensor DS18B20 menunjukkan kinerja yang lebih stabil dan akurat dalam memantau perubahan suhu dibandingkan termokopel tipe-K. Fluktuasi yang terjadi pada termokopel dapat disebabkan oleh sensitivitas tinggi terhadap perubahan lingkungan atau faktor noise dalam sistem pengukuran. Dengan tingkat *error* yang rendah dan akurasi di atas 99%, sensor DS18B20 dapat diandalkan sebagai perangkat pemantauan suhu dalam sistem bioreaktor.

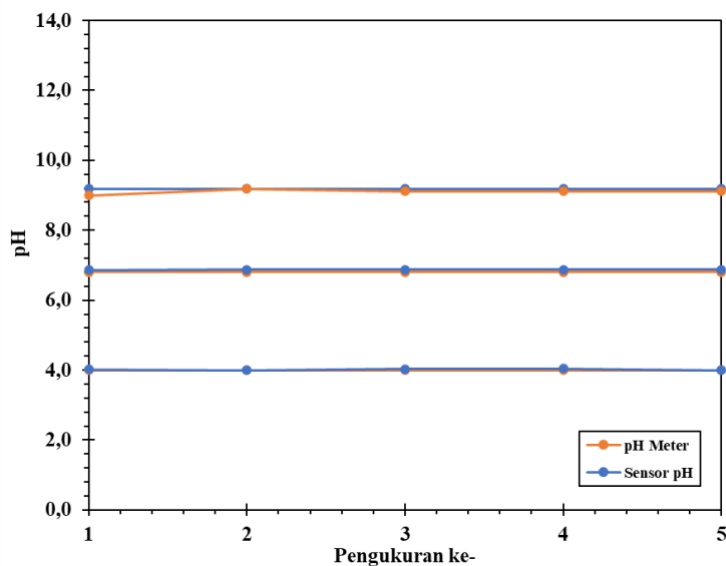
3.2. Karakteristik Sensor pH

Tingkat keasaman (pH) merupakan parameter penting dalam karakterisasi larutan. Larutan dikatakan netral jika memiliki pH 7, bersifat basa jika $\text{pH} > 7$, dan bersifat asam jika $\text{pH} < 7$. Pengukuran pH yang akurat diperlukan untuk memastikan kontrol kualitas fermentasi asam cuka di dalam bioreaktor. Gambar 7 menunjukkan hasil pengujian sensor pH DFRobot dan pH meter digital yang telah terkalibrasi sebagai alat pembanding. Setiap pengambilan data dilakukan sebanyak 5 kali dengan selang waktu 1 menit antar pengukuran.

Percobaan pertama menggunakan sampel larutan dengan pH 4,00. Sensor pH dibandingkan dengan pH meter digital, menghasilkan rata-rata akurasi 99,4% dan persentase galat (*error*) sebesar 1%. Percobaan kedua menggunakan sampel larutan dengan pH 6,86. Setelah lima kali pengambilan data, hasil yang diperoleh menunjukkan nilai yang lebih stabil, dengan rata-rata persentase galat 1% dan rata-rata akurasi 98,6%.

Percobaan terakhir menggunakan larutan dengan pH 9,18, juga dengan 5 kali pengambilan data dan jeda waktu 1 menit antar pengukuran. Pada pengukuran pertama, sensor pH menunjukkan selisih yang cukup besar, menghasilkan persentase galat 5% dan akurasi 94,5%. Diperlukan penyesuaian potensiometer sensor agar hasil pengukuran lebih akurat. Setelah kalibrasi, pengukuran kedua hingga kelima lebih stabil, dengan rata-rata persentase galat 2% dan rata-rata akurasi 98,3%.

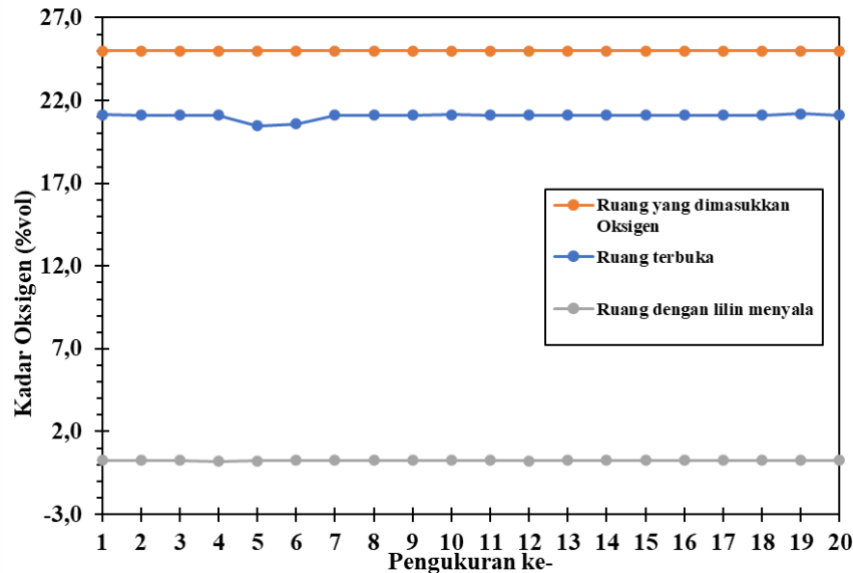
Berdasarkan hasil keseluruhan pengujian, sensor pH DFRobot menunjukkan performa yang cukup baik setelah dilakukan kalibrasi. Grafik hasil pengukuran menunjukkan bahwa setelah kalibrasi, pembacaan sensor dan pH meter digital tidak memiliki selisih yang jauh, membuktikan bahwa sensor telah dikalibrasi dengan baik dan dapat diandalkan untuk pemantauan pH dalam sistem bioreaktor.



Gambar 7. Hasil pengujian sensor pH DFRobot dan pH meter digital

3.3. Karakteristik Sensor Oksigen

Pada percobaan di ruang terbuka, kandungan oksigen di udara bebas mengacu pada penelitian Purba dkk. [20] adalah berkisar antara 20%–23%. Berdasarkan referensi tersebut, dilakukan pengukuran kandungan oksigen di dalam ruangan selama 20 detik, dan hasilnya menunjukkan bahwa kadar oksigen berada dalam rentang 20,47%–21,19%, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Hasil pengujian sensor oksigen DFRobot

Untuk menguji keakuratan sensor oksigen DFRobot yang telah dikalibrasi oleh pihak manufaktur, dilakukan percobaan dengan oksigen dari tabung oksigen murni. Eksperimen ini menggunakan plastik vakum yang kemudian diisi penuh dengan oksigen dari tabung, sehingga lingkungan di dalam plastik mengandung oksigen hampir murni. Setelah dilakukan pengukuran selama 20 detik, hasilnya menunjukkan bahwa sensor bekerja dengan baik, dengan batas pembacaan maksimal sesuai spesifikasi, yaitu 25% vol.

Selanjutnya, dilakukan pengurangan kadar oksigen dalam ruang tertutup menggunakan lilin yang dinyalakan di dalam toples plastik tertutup. Setelah lilin padam dan dilakukan pengukuran selama 20 detik, kadar oksigen yang tersisa di dalam toples berkisar antara 0,21%–0,25%. Hasil ini menunjukkan bahwa lilin tidak langsung mati karena kehabisan oksigen sepenuhnya, tetapi karena kandungan oksigen dalam ruang tertutup telah berada di bawah batas minimum yang diperlukan untuk menopang pembakaran. Dari hasil percobaan, dapat disimpulkan bahwa sensor oksigen DFRobot berfungsi dengan baik dalam berbagai kondisi pengujian, baik dalam lingkungan terbuka, ruang berisi oksigen murni, maupun dalam lingkungan dengan kadar oksigen rendah. Hal ini membuktikan bahwa sensor dapat digunakan sebagai perangkat pemantauan oksigen yang andal dalam sistem fermentasi yang membutuhkan pengendalian kadar oksigen secara presisi.

3.4. Spesifikasi Daya Perangkat

Pengujian konsumsi daya pada sistem instrumentasi dan kontrol bioreaktor dilakukan dengan mengukur tegangan tiap komponen menggunakan multimeter digital, kemudian menghitung daya berdasarkan spesifikasi masing-masing komponen. Dalam hal ini, proses fermentasi asam cuka *casara* membutuhkan waktu selama 12 hari atau 288 jam, seperti ditunjukkan Tabel 1. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa total daya yang dikonsumsi selama 288 jam adalah 19.533,72 Wh, dengan pompa peristaltik sebagai komponen yang paling banyak mengonsumsi daya, yaitu 6.520,32 Wh. Komponen lain dengan konsumsi daya tinggi adalah *solenoid valve* ½ dan ¾ inci, masing-masing 3.225,6 Wh, serta Raspberry Pi 4 dan Arduino Nano yang mengonsumsi 1.036,8 Wh dan 1.103 Wh. Sementara itu, sensor oksigen DFRobot memiliki konsumsi daya terendah, yaitu 13,248 Wh. Hasil ini menunjukkan bahwa sebagian besar daya digunakan oleh aktuator seperti pompa peristaltik dan *solenoid valve*, yang berperan dalam pengaturan aliran cairan dan gas dalam bioreaktor. Oleh karena itu, optimalisasi konsumsi daya dapat difokuskan pada penggunaan aktuator dengan efisiensi energi lebih tinggi atau pengaturan waktu kerja yang lebih efektif.

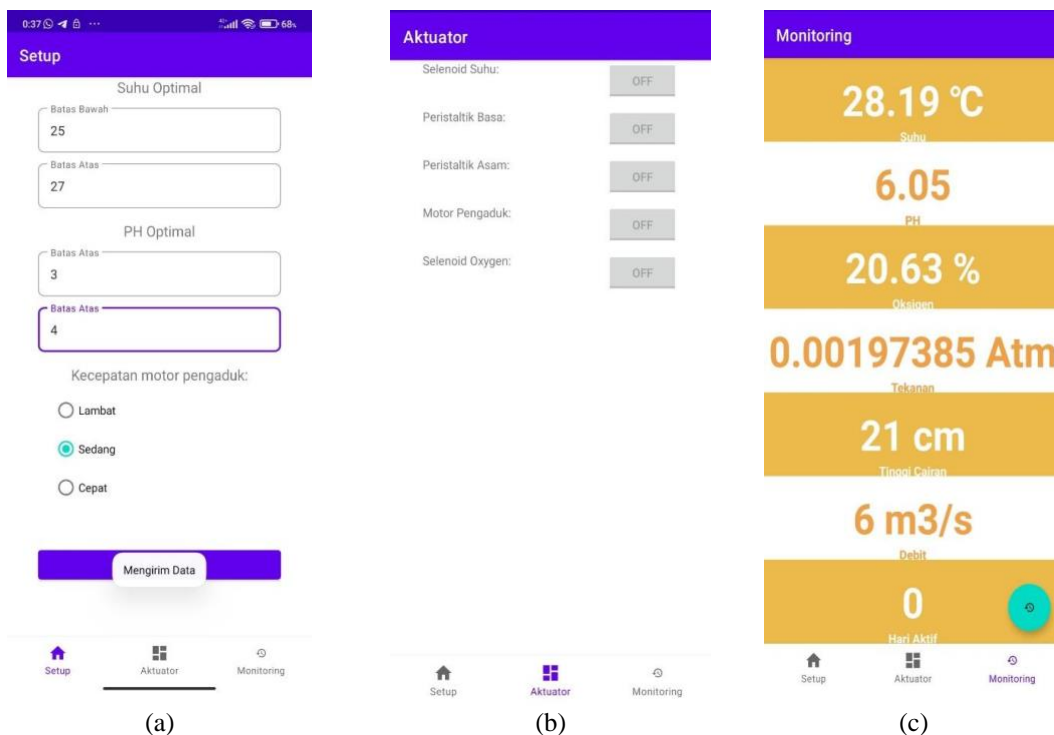
Tabel 1. Hasil pengujian dari subsistem daya

Komponen	Waktu (jam)	Daya (Watt)	Jumlah daya yang digunakan (Watt/Hour)
Raspberry pi 4	288	3,6	1.036,8
Arduino nano	288	3,83	1.103
DF robot oksigen sensor	288	0,046	13,248
Solenoid valve 1/2	288	11,2	3.225,6
Solenoid valve 3/4	288	11,2	3.225,6
Sensor DS18B20	288	3,88	1.117,4
Sensor DFrobot PH meter pro	288	3,80	1.094,4
2 Pompa peristaltik	288	11,32	6.520,32
Water flow	288	3,84	1.105,92
BMP180	288	3,81	1.097,2
Ultrasonik	288	3,79	1.091,5
Total			19.533,72

3.5. Antarmuka Pengguna dari Perangkat

Aplikasi antarmuka pengguna pada ponsel pintar berfungsi untuk mempermudah pengguna dalam memantau dan mengendalikan sistem bioreaktor secara *real-time*. Parameter yang diamati meliputi suhu, pH, kadar oksigen, laju aliran air, ketinggian cairan, serta tekanan dalam sistem. Selain itu, aplikasi ini juga memungkinkan pemantauan kondisi aktuator, termasuk pompa peristaltik asam dan basa, solenoid air dan oksigen, motor pengaduk, serta pompa air. Halaman *setup* digunakan untuk mengatur parameter operasional sistem, seperti rentang suhu dan pH optimal serta kecepatan motor pengaduk, seperti ditunjukkan Gambar 9 (a). Setelah parameter diisi, pengguna dapat mengirimkan data ke sistem agar proses fermentasi berjalan sesuai pengaturan yang telah ditetapkan.

Halaman aktuator pada Gambar 9 (b) menampilkan status komponen kendali, seperti solenoid suhu, pompa peristaltik, motor pengaduk, dan solenoid oksigen. Pompa air akan aktif bersamaan dengan solenoid suhu dan akan mati ketika solenoid suhu tidak aktif. Halaman monitoring pada Gambar 9 (c) berfungsi untuk menampilkan data hasil pembacaan sensor, termasuk suhu, pH, kadar oksigen, tekanan, laju aliran air, dan ketinggian cairan. Dari hasil implementasi, aplikasi ini memungkinkan pemantauan dan pengendalian bioreaktor secara lebih efisien dan akurat, mengurangi intervensi manual dalam proses fermentasi. Integrasi antara sensor dan aktuator dalam sistem ini juga berkontribusi terhadap stabilitas parameter fermentasi, yang berpengaruh langsung terhadap kualitas produk akhir.



Gambar 9. Halaman aplikasi (a) *setup* (b) kontrol aktuator (c) monitoring

4. KESIMPULAN

Perangkat instrumentasi dan kontrol untuk fermentasi asam cuka dari kulit kopi (*cascara*) telah berhasil diimplementasikan dengan tingkat akurasi yang tinggi pada setiap sensor yang digunakan. Sensor suhu DS18B20 menunjukkan akurasi rata-rata 99,27% dengan fluktuasi rendah, menjadikannya andal dalam menjaga suhu fermentasi pada rentang optimal 28°C–30°C untuk tahap anaerob dan 25°C–30°C untuk tahap aerob. Sensor pH SKU: SEN0169 memiliki akurasi 98,3% setelah kalibrasi, memastikan pemantauan pH dalam kisaran 3,5–6,0 pada tahap anaerob dan 3,0–4,0 pada tahap aerob, yang diperlukan untuk aktivitas mikroorganisme *Saccharomyces cerevisiae* dan *Acetobacter aceti*. Sensor oksigen SKU: SEN0322 menunjukkan keandalan tinggi dalam mendeteksi kadar oksigen, dengan batas pembacaan maksimum 25% vol, yang mendukung transisi dari kondisi anaerob ke aerob secara optimal. Konsumsi daya sistem selama 12 hari fermentasi tercatat sebesar 19.533,72 Wh, dengan pompa peristaltik dan *solenoid valve* sebagai penyumbang utama konsumsi energi.

Dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yang hanya berfokus pada pemantauan parameter individu, penelitian ini mengintegrasikan pemantauan suhu, pH, dan oksigen dalam satu sistem otomatis yang dapat dikendalikan secara *real-time* melalui aplikasi ponsel pintar. Namun, faktor lingkungan seperti fluktuasi suhu sekitar dan stabilitas suplai daya dapat mempengaruhi performa sensor dalam jangka panjang, sehingga diperlukan optimasi lebih lanjut. Secara keseluruhan, sistem ini berfungsi sebagai solusi otomatisasi yang efektif dalam menjaga stabilitas parameter fermentasi, meningkatkan efisiensi proses, serta mengurangi ketergantungan pada pemantauan manual. Ke depannya, sistem ini berpotensi dikembangkan dengan algoritma kontrol adaptif dan integrasi kecerdasan buatan untuk meningkatkan presisi dan efisiensi fermentasi asam cuka berbasis *cascara*.

REFERENSI

- [1] *Statistik Kopi Indonesia 2020*. BPS – Statistics Indonesia, 2021.
- [2] S. Sisbudi Harsono, D. R., dan M. Mel, "Coffee Husk Biopellet Characteristics as Solid Fuel for Combustion Stove," *ESCR*, vol. 2, no. 1, hlm. 1–6, Apr 2019.
- [3] E. Sholichah, R. Apriani, D. Desnilasari, dan M. A. Karim, "Produk Samping Kulit Kopi Arabika dan Robusta sebagai Sumber Polifenol untuk Antioksidan dan Antibakteri," *Jurnal Industri Hasil Perkebunan*, vol. 14, no. 2, 2019.
- [4] A. N. Ariva, A. Widyasanti, dan S. Nurjanah, "Pengaruh Suhu Pengeringan Terhadap Mutu Teh Cascara dari Kulit Kopi Arabika (*Coffea arabica*)," *J. Tek. Ind. Pert. Ind.*, vol. 12, no. 1, hlm. 21–28, Apr 2020.
- [5] N. M. Naibaho, A. F. Ramadhan, A. Lisnawati, M. Rahman, dan E. G. Popang, "Fermentasi Sistem Aerob dan Anaerob dalam Pembuatan Cuka dari Nira Aren (*Arenga pinnata*)," *Buletin Loupe*, vol. 14, no. 01, 2017.
- [6] R. Rosmiati, M. Yunus, dan R. Raudah, "Pembuatan Asam Asetat dari Limbah Cair Kulit Kopi Arabika (*Coffea arabica*. Sp)," *J.Scien.Techno.Reaction*, vol. 11, no. 2, Jun 2016.
- [7] M. Meriatna dan R. Lestari, "Pembuatan Asam Asetat dari Air Cucian Kopi Robusta dan Arabika dengan Proses Fermentasi," *JTKU*, vol. 7, no. 1, hlm. 61, Jan 2019.
- [8] N. W. Anita, "Optimasi Konsentrasi Enzim Amiloglukosidase dan *Saccharomyces cerevisiae* dalam Pembuatan Bioetanol dari Ubi Jalar (*Ipomoea batatas* L) Varietas Daya dengan Proses Sakarifikasi Fermentasi Simultan (SFS)," *Jurnal Rekayasa dan Manajemen Agroindustri*, vol. 3, no. 2, 2015.
- [9] A. E. Tjahjono dan D. Primarini, "Kondisi Optimum Fermentasi Asam Asetat Menggunakan *Acetobacter aceti* B166," *Jurnal Sains MIPA*, vol. 13, no. 1, 2007.
- [10] N. Andayani, D. Nurhayati, dan M. D. Saing, "Optimalisasi Lama Fermentasi dengan Penambahan Konsentrasi *Acetobacter Aceti* pada Pembuatan Cuka Buah Apel Rhome Beauty Menggunakan Alat Fermentor," dipresentasikan pada Seminar Nasional Hasil Pengabdian Masyarakat dan Penelitian Pranata Laboratorium Pendidikan Politeknik Negeri Jember, 2019.
- [11] D. F. Al Riza, R. Damayanti, dan Y. Hendrawan, "Rancang Bangun Fermentor Yogurt dengan Sistem Kontrol Logika Fuzzy Menggunakan Mikrokontroler ATMEGA 32," *Agritech*, vol. 34, no. 04, hlm. 456, Feb 2015.
- [12] A. R. Haryaditya, M. H. H. Ichsan, dan R. Primananda, "Rancang Bangun Sistem Pendeteksi Kondisi Ideal Fermentasi Kimchi berdasarkan pH dan Suhu menggunakan Metode Fuzzy Mamdani," *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 6, no. 7, 2022.
- [13] S. Ariyani, A. B. Nugroho, dan A. S. T. Mubarak, "Alat Bantu Pendeteksi Objek Untuk Tuna Netra Berbasis AI *MobileNet* Pada Raspberry Pi 3B," *Jurnal Teknik Elektro dan Komputasi (ELKOM)*, vol. 4, no. 1, 2022. hlm.73-90.
- [14] G. A. Pauzi, O. F. Suryadi, G. N. Susanto, dan Junaidi, "Rancang Bangun Sistem Monitoring Kualitas Air Tambak Udang (*Litopenaeus Vannamei*) Menggunakan *Wireless Sensor Sistem* (WSS) yang Terintegrasi dengan PLC CPM1A," *Journal of Energy, Material, and Instrumentation Technology*, vol 1. no. 3, 2020

- [15] DFRobot, "PH Meter Pro," *wiki.dfrobot.com*.
https://wiki.dfrobot.com/Analog_pH_Meter_Pro_SKU_SEN0169 (diakses 18 November 2024).
- [16] I. A. Aziz, H. Setyawan, dan M. A. Auliq, "Desain Prototipe Sistem Filtrasi Limbah Produksi Tahu Dengan Menggunakan Sensor pH dan Sensor Turbidity Berbasis Arduino Mega Jurnal," *Jurnal Teknik Elektro dan Komputasi (ELKOM)*, vol. 5, no. 2, 2023, hlm. 225-237, doi: 10.32528/elkom.v5i2.7188.
- [17] DFRobot, "I2C Oxygen Sensor," *wiki.dfrobot.com*.
https://wiki.dfrobot.com/Gravity_I2C_Oxygen_Sensor_SKU_SEN0322 (diakses 18 November 2024).
- [18] D. Hariyanto, P. I. Sigalingging, dan Hendro, "Rancang Bangun Alat Ukur Panjang Objek di Dalam Air Berbasis Photogate dan Sensor Ultrasonik," dalam PROSIDING SNIPS, Bandung, Indonesia, 2018, hlm. 6.
- [19] D. Hariyanto dan S. Permana, "Studi Intensitas Radiasi Menggunakan Survey Meter Berbasis Tabung Geiger M4011 dan Mikrokontroler Arduino Uno," dalam Prosiding SNIPS, Bandung, 2019, hlm. 7.
- [20] L. S. L. Purba dan N. Harefa, "Pengaruh Kandungan Oksigen Udara Sekolah terhadap Konsentrasi Belajar Siswa SMA N 9 Jakarta Timur," *Seminar Nasional Pendidikan (SENDIKA)*, vol. 3, 2019, hlm. 9-16.