

RANCANG BANGUN INKUBATOR TEMPE BERBASIS IOT DENGAN ANALISIS KARAKTERISTIK SENSOR DHT11 UNTUK MONITORING SUHU FERMENTASI

Faisal Akbar Wibowo, Lela Nurpulaela

Teknik Elektro, Universitas Singaperbangsa Karawang

Jl. HS. Ronggo Waluyo, Desa Puseurjaya, Kecamatan Telukjambe Timur, Karawang.

2210631160036@student.unsika.ac.id

ABSTRAK

Proses fermentasi tempe memerlukan kondisi suhu yang stabil agar menghasilkan produk dengan kualitas yang baik. Pada metode konvensional, pengendalian suhu masih dilakukan secara manual sehingga berpotensi menyebabkan proses fermentasi yang kurang optimal, waktu produksi yang lebih lama, dan kualitas tempe yang tidak konsisten. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem inkubator tempe berbasis Internet of Things (IoT) untuk memantau dan mengendalikan suhu fermentasi secara otomatis. Sistem dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32, sensor DHT11, relay, kipas DC, LCD, dan platform Arduino IoT Cloud. Metode penelitian meliputi perancangan sistem, implementasi perangkat keras dan perangkat lunak, serta pengujian karakteristik sensor yang mencakup range, non-linearitas, sensitivitas, resolusi, akurasi, dan presisi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor DHT11 memiliki rentang pengukuran 31,3°C–55°C, tingkat akurasi rata-rata di atas 98%, serta nilai presisi antara 99,36% hingga 99,79%. Sistem yang dikembangkan mampu mengendalikan suhu ruang fermentasi secara otomatis berdasarkan nilai set point yang ditentukan serta memungkinkan monitoring secara real-time melalui Arduino IoT Cloud. Implementasi sistem juga berhasil mempercepat waktu fermentasi dari 36–47 jam pada metode konvensional menjadi sekitar 20 jam. Dengan demikian, sistem inkubator tempe berbasis IoT dapat meningkatkan efisiensi proses fermentasi, memudahkan monitoring, dan menjaga kestabilan kondisi fermentasi.

Kata kunci : Inkubator Tempe, Internet of Things (IoT), ESP32, DHT11, Fermentasi Tempe, Monitoring Suhu, Arduino IoT Cloud.

1. PENDAHULUAN

Tempe merupakan produk pangan fermentasi khas Indonesia yang proses pembuatannya dipengaruhi oleh suhu dan kelembapan lingkungan. Ketidakstabilan kedua parameter tersebut dapat menghambat pertumbuhan jamur *Rhizopus oligosporus*, memperpanjang waktu fermentasi, serta menurunkan kualitas tempe. Pada metode konvensional, pengawasan kondisi fermentasi masih dilakukan secara manual sehingga hasil produksi sering kali kurang konsisten dan berisiko mengalami kegagalan fermentasi [1].

Perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) memungkinkan proses monitoring dan pengendalian fermentasi dilakukan secara otomatis dan real-time. Salah satu perangkat yang banyak digunakan adalah ESP32 karena memiliki modul Wi-Fi terintegrasi dan mudah dihubungkan dengan sensor lingkungan. Sensor DHT11 digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan karena memiliki biaya rendah, mudah diintegrasikan, serta mampu memberikan data digital secara langsung [2][3].

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini merancang sistem inkubator tempe berbasis IoT menggunakan ESP32, sensor DHT11, relay, lampu pemanas, kipas DC, dan Arduino IoT Cloud. Sistem yang dikembangkan mampu melakukan monitoring dan pengendalian suhu secara otomatis serta menganalisis karakteristik sensor DHT11 yang meliputi range, non-linearitas, sensitivitas, resolusi, akurasi, dan presisi. Dengan sistem ini diharapkan

proses fermentasi menjadi lebih stabil, efisien, dan menghasilkan kualitas tempe yang lebih baik [4].

Berdasarkan latar belakang tersebut, permasalahan yang diangkat dalam penelitian ini adalah Pengendalian suhu dan kelembapan pada proses fermentasi tempe masih dilakukan secara manual sehingga kondisi fermentasi kurang stabil. Waktu fermentasi tempe dengan metode konvensional relatif lama, yaitu sekitar 36–47 jam. Belum adanya sistem monitoring dan pengendalian fermentasi yang dapat diakses secara real-time dari jarak jauh. Perlu diketahui karakteristik sensor DHT11 yang digunakan sebagai sensor utama dalam sistem inkubator tempe.

Tujuan dari penelitian ini adalah Merancang dan mengimplementasikan sistem inkubator tempe berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan mikrokontroler ESP32 dan sensor DHT11. Mengembangkan sistem monitoring suhu dan kelembapan ruang fermentasi secara real-time melalui Arduino IoT Cloud. Mengembangkan sistem pengendalian suhu otomatis menggunakan lampu pemanas dan kipas berdasarkan nilai set point yang ditentukan. Menganalisis karakteristik sensor DHT11 yang meliputi range, non-linearitas, sensitivitas, resolusi, akurasi, dan presisi. Mengevaluasi kinerja sistem dalam menjaga kestabilan kondisi fermentasi tempe. Meningkatkan efisiensi proses fermentasi serta menghasilkan kualitas tempe yang lebih baik dan konsisten dibandingkan metode konvensional.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Sebelumnya

Penelitian oleh I Wayan Bayu AW mengembangkan sistem kontrol otomatis untuk fermentasi tempe menggunakan mikrokontroler. Sistem mampu menjaga kondisi fermentasi secara lebih stabil dibandingkan metode konvensional sehingga kualitas hasil fermentasi menjadi lebih baik [5].

Penelitian oleh Siti Putri Maghfira menggunakan ESP32, sensor DHT22, dan metode Fuzzy Logic untuk mengendalikan suhu dan kelembapan fermentasi tempe. Sistem berhasil menjaga suhu pada rentang 30–35°C dan kelembapan 60–80% sehingga kondisi fermentasi menjadi lebih optimal [4].

Penelitian oleh GM Aji merancang inkubator tempe dengan pengendalian suhu dan kelembapan untuk mempercepat proses fermentasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengendalian lingkungan fermentasi mampu mengurangi ketergantungan terhadap kondisi cuaca dan menghasilkan waktu fermentasi yang lebih singkat [6].

2.2. Fermentasi Tempe

Fermentasi tempe merupakan proses bioteknologi yang memanfaatkan jamur *Rhizopus oligosporus* untuk mengubah kedelai menjadi produk pangan dengan nilai gizi yang lebih tinggi. Proses fermentasi dipengaruhi oleh suhu, kelembapan, dan waktu fermentasi. Suhu yang tidak stabil dapat menyebabkan pertumbuhan jamur menjadi tidak optimal sehingga memengaruhi kualitas tempe yang dihasilkan. Penelitian menunjukkan bahwa kondisi fermentasi yang terkontrol mampu meningkatkan kualitas tempe dari segi tekstur, aroma, dan kandungan nutrisi [7].

2.3. Sensor DHT11

Sensor DHT11 merupakan sensor digital yang mampu mengukur suhu dan kelembapan udara secara bersamaan. Sensor ini memiliki rentang pengukuran suhu 0–50°C dengan akurasi sekitar $\pm 2^\circ\text{C}$ serta rentang kelembapan 20–90% RH. DHT11 banyak digunakan pada sistem monitoring lingkungan karena mudah diintegrasikan dengan mikrokontroler seperti ESP32 dan Arduino [8].

2.4. ESP32

ESP32 merupakan mikrokontroler yang memiliki fitur Wi-Fi dan Bluetooth terintegrasi sehingga sangat sesuai digunakan dalam sistem Internet of Things. ESP32 memiliki kemampuan pemrosesan data yang baik, konsumsi daya rendah, serta mendukung berbagai sensor dan aktuator. Karena keunggulan tersebut, ESP32 banyak digunakan pada sistem monitoring suhu dan kelembapan berbasis IoT [9].

2.5. Karakteristik Sensor

Karakteristik sensor merupakan parameter yang digunakan untuk mengevaluasi performa sensor dalam

mengukur suatu besaran fisik. Karakteristik tersebut meliputi range, sensitivitas, resolusi, akurasi, presisi, dan non-linearitas. Analisis karakteristik sensor diperlukan untuk mengetahui kemampuan sensor dalam menghasilkan data yang sesuai dengan kondisi sebenarnya. Penelitian mengenai evaluasi performa sensor DHT11 menunjukkan bahwa sensor memiliki hubungan linier yang cukup baik terhadap suhu referensi dan dapat digunakan untuk sistem monitoring berbasis IoT [3][10].

2.6. Non-linieritas

Non-linearitas menunjukkan tingkat penyimpangan keluaran sensor terhadap karakteristik ideal berbentuk garis lurus. Semakin kecil nilai non-linearitas maka semakin baik kemampuan sensor dalam mengikuti perubahan besaran yang diukur. Pengujian non-linearitas dilakukan dengan membandingkan data hasil pengukuran sensor terhadap nilai referensi pada rentang pengukuran tertentu [10][11].

Persamaan Non-Linearitas

$$NL(\%) = \frac{|Y_i - Y_L|}{FS} \times 100\% \quad (1)$$

2.7. Resolusi

Resolusi merupakan perubahan terkecil yang masih dapat dideteksi oleh sensor. Pada sensor digital, resolusi dipengaruhi oleh jumlah bit data keluaran yang digunakan untuk merepresentasikan nilai pengukuran. Semakin kecil nilai resolusi maka semakin baik kemampuan sensor dalam mendeteksi perubahan kecil pada besaran yang diukur. Berdasarkan datasheet DHT11, sensor memiliki resolusi suhu sebesar 1°C dan menggunakan keluaran data digital 8-bit sehingga mampu memberikan hasil pengukuran secara langsung tanpa memerlukan konversi analog ke digital tambahan [12].

Persamaan Resolusi

$$\text{Resolusi} = \frac{\text{Rentang Pengukuran}}{2^n} \quad (2)$$

2.8. Sensitivitas

Sensitivitas merupakan kemampuan sensor dalam merespons perubahan input yang diberikan. Nilai sensitivitas diperoleh dari perbandingan perubahan output terhadap perubahan input. Sensor yang memiliki sensitivitas tinggi akan memberikan perubahan keluaran yang signifikan ketika terjadi perubahan nilai yang diukur [10].

Persamaan Sensitivitas

$$S = \frac{\Delta \text{Output}}{\Delta \text{Input}} \quad (3)$$

2.9. Akurasi

Akurasi merupakan tingkat kedekatan hasil pengukuran sensor terhadap nilai sebenarnya atau nilai referensi. Pengukuran akurasi dilakukan dengan menghitung persentase error antara nilai hasil pembacaan sensor dan nilai referensi. Sensor DHT11

pada berbagai penelitian menunjukkan tingkat akurasi yang cukup baik untuk aplikasi monitoring suhu dan kelembapan berbasis IoT [3].

Persamaan Error

$$Error(\%) = \frac{|X_r - X_m|}{X_r} \times 100\% \quad (4)$$

Persamaan Akurasi

$$Akurasi(\%) = 100\% - Error(\%) \quad (5)$$

2.10. Presisi

Presisi menunjukkan tingkat konsistensi hasil pengukuran ketika sensor digunakan berulang kali pada kondisi yang sama. Presisi biasanya dihitung menggunakan nilai rata-rata dan standar deviasi dari sejumlah data pengukuran. Sensor dengan nilai standar deviasi yang kecil menunjukkan hasil pengukuran yang lebih konsisten [10].

Persamaan Mean

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (6)$$

Persamaan Standar Deviasi

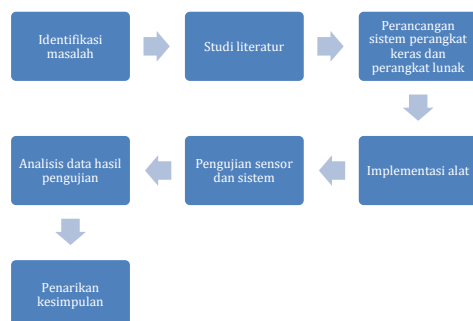
$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (7)$$

Persamaan Presisi

$$Presisi(\%) = \left(1 - \frac{s}{\bar{x}}\right) \times 100\% \quad (8)$$

3. METODE PENELITIAN

Pada bagian ini memuat metode yang digunakan pada pembuatan skripsi. Penelitian ini menggunakan metode *Research and Development* (R&D) yang bertujuan untuk merancang, mengembangkan, dan menguji sistem inkubator tempe berbasis *Internet of Things* (IoT). Metode ini dipilih karena penelitian tidak hanya berfokus pada analisis, tetapi juga menghasilkan produk berupa sistem instrumentasi yang mampu melakukan monitoring dan pengendalian suhu fermentasi secara otomatis. Tahapan penelitian meliputi:



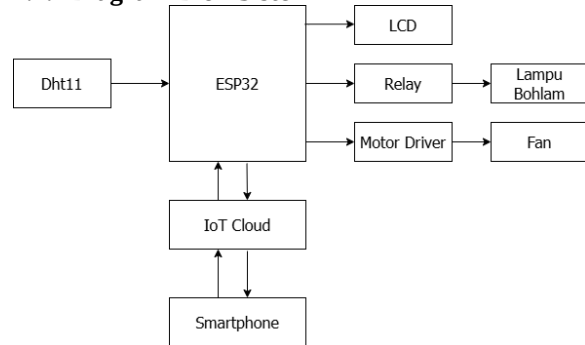
Gambar 1. Alur penelitian

Alur penelitian dimulai dengan identifikasi masalah dan studi literatur sebagai dasar perancangan sistem. Selanjutnya dilakukan perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, kemudian dilanjutkan

dengan implementasi alat. Setelah sistem selesai dibuat, dilakukan pengujian sensor dan keseluruhan sistem untuk memperoleh data kinerja. Data hasil pengujian kemudian dianalisis untuk mengevaluasi performa sistem, dan tahap akhir penelitian dilakukan dengan penarikan kesimpulan berdasarkan hasil yang diperoleh.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

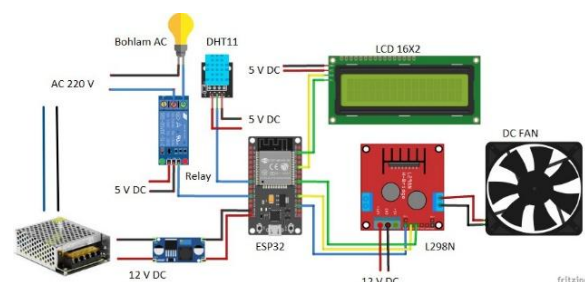
4.1. Diagram Blok Sistem



Gambar 2. Diagram Blok Sistem

Ketika inkubator dinyalakan, sensor DHT11 membaca suhu dan kelembapan ruang fermentasi secara berkala, kemudian data diproses oleh ESP32 untuk mengendalikan lampu pemanas melalui relay dan kipas melalui motor driver agar kondisi fermentasi tetap optimal. Informasi suhu, kelembapan, serta status perangkat ditampilkan pada LCD dan dikirim secara real-time ke Arduino IoT Cloud sehingga dapat dipantau melalui smartphone. Selain mengirim data, ESP32 juga menerima pengaturan dari pengguna, seperti perubahan suhu target, sehingga sistem mampu menjaga kondisi inkubator secara otomatis dan mendukung proses fermentasi tempe yang lebih optimal.

4.2. Skematik Rangkaian



Gambar 3. Skematik Rangkaian

Berdasarkan rancangan elektronik yang dibuat, sistem menggunakan power supply 12V sebagai sumber daya utama yang berasal dari tegangan AC 220V. Tegangan ini kemudian disesuaikan menggunakan DC step-down converter untuk memenuhi kebutuhan ESP32 dan sensor DHT11. Sensor DHT11 berfungsi mengukur suhu dan kelembapan yang kemudian diproses oleh ESP32 serta ditampilkan pada LCD 16x2 melalui komunikasi I2C.

ESP32 juga mengendalikan relay untuk menyalakan atau mematikan lampu pemanas dan mengontrol kipas melalui motor driver guna menjaga suhu ruang fermentasi. Selain itu, ESP32 berperan sebagai pusat kendali utama yang mengatur seluruh komponen sistem serta berkomunikasi dengan Arduino IoT Cloud untuk kebutuhan monitoring dan pengendalian jarak jauh.

4.3. Perancangan Alat

Berikut merupakan rancangan inkubator tempe berbasis IoT dengan ukuran panjang 35 cm, lebar 25 cm, dan tinggi 30 cm. Alat ini terdiri dari ruang fermentasi sebagai tempat proses fermentasi tempe serta dua kotak plastik yang dipasang di bagian luar alat. Kotak plastik tersebut digunakan untuk menyimpan komponen elektronik seperti mikrokontroler ESP32, sensor, aktuator, dan rangkaian pendukung lainnya. Ruang fermentasi dilengkapi dengan sensor suhu dan kelembapan, lampu pemanas, serta kipas untuk menjaga kondisi fermentasi tetap optimal. Dengan desain ini, proses fermentasi tempe dapat berlangsung secara otomatis dan dapat dipantau melalui sistem IoT.



Gambar 4. Perancangan alat

4.4. Pengoperasian Alat

Berikut adalah dokumentasi pengoperasian alat tanpa menggunakan tempe. Dokumentasi menampilkan suhu yang terukur oleh sensor DHT11 pada LCD serta status kipas dan lampu bohlam. Terdapat dua kondisi pengujian, yaitu saat suhu aktual lebih rendah dari suhu target sehingga lampu menyala dan kipas mati, serta saat suhu aktual lebih tinggi dari suhu target sehingga kipas menyala dan lampu mati.



Gambar 5. Tampilan LCD



Gambar 6. Dua kondisi fermentasi

4.5. Pengimplementasian Alat

Berikut merupakan implementasi dan pengujian inkubator tempe untuk mempercepat proses fermentasi. Tempe ditempatkan di dalam ruang fermentasi, kemudian inkubator ditutup rapat agar suhu tetap stabil dan tidak terpengaruh oleh kondisi lingkungan luar selama proses fermentasi berlangsung.



Gambar 7. Implementasi inkubator fermentasi

4.6. Pengujian Alat

Sensor DHT11 digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan udara serta menghasilkan data digital berupa nilai suhu ($^{\circ}\text{C}$) dan kelembapan (%RH). Pengujian sensor dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran DHT11 terhadap suhu referensi untuk mengetahui karakteristik instrumentasinya. Suhu referensi diperoleh dari rata-rata pembacaan tiga sensor DHT11 pada perangkat pembanding yang digunakan secara bersamaan. Melalui pengujian ini dapat dianalisis kepekaan, akurasi, dan karakteristik sensor dalam mengukur suhu pada ruang fermentasi.



Gambar 8. Alat pengujian

4.7. Pengujian pertama

Pengujian pertama dilakukan dengan memberikan variasi suhu pada ruang fermentasi, mulai dari sekitar 30°C hingga 55°C. Pengukuran dilakukan menggunakan dua alat, yaitu sensor DHT11 pada inkubator dan alat pembanding sebagai suhu referensi. Kedua alat mengukur suhu pada kondisi yang sama untuk membandingkan hasil pembacaannya. Berikut merupakan dokumentasi dan data hasil pengujian yang diperoleh.



Gambar 9. Pegujian secara acak ke-1



Gambar 10. Pegujian secara acak ke-2



Gambar 11. Pegujian secara acak ke-3



Gambar 12. Pegujian secara acak ke-4



Gambar 13. Pegujian secara acak ke-5

Tabel 1. Data hasil pengujian sensor dht11 dan suhu referensi

Pengujian ke-	Suhu DHT11 (°C)	Suhu Referensi (°C)
1	31,3	29,7
2	30,8	31,17
3	31,6	31,83
4	32,0	32,8
5	37,4	34,7
6	36,9	36,73
7	37,0	36,87
8	38,0	37,7
9	39,93	39,6
10	42,8	43,37
11	44,9	43,45
12	45,0	44,73
13	45,4	45,1
14	45,7	45,17
15	46,9	47,3
16	49,2	49,87
17	51,5	52,23
18	53,8	54,1
19	55,0	54,13

a. Range

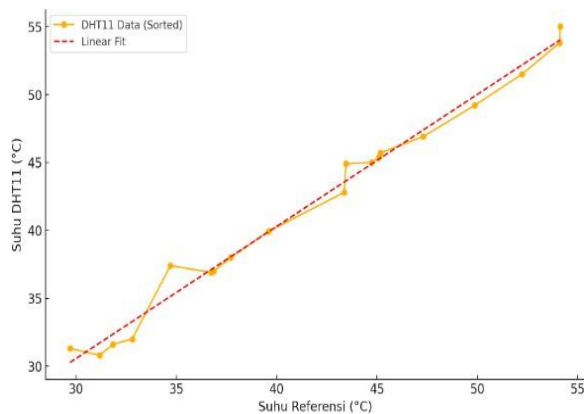
Sensor DHT11 yang diuji memiliki rentang pengukuran dari 31,3°C hingga 55°C, sedangkan suhu referensi berada pada rentang 29,7°C hingga 54,13°C. Berdasarkan datasheet, DHT11 memiliki rentang pengukuran 0°C–50°C. Namun, hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor masih mampu membaca suhu di atas batas spesifikasi tersebut, yaitu hingga 55°C.

b. Non-Linearitas

Pengujian non-linearitas dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor DHT11 terhadap suhu referensi. Non-linearitas menunjukkan tingkat penyimpangan keluaran sensor terhadap karakteristik ideal (linier) pada rentang pengukuran tertentu. Nilai non-linearitas dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Non-Linearitas (\%)} = \frac{|\text{Suhu DHT11} - \text{Suhu Referensi}|}{\text{Rentang Referensi}} \times 100$$

Untuk melihat hubungan antara suhu DHT11 dan suhu referensi, data hasil pengujian kemudian diplot dalam bentuk grafik menggunakan Microsoft Excel.



Gambar 12. Grafik hubungan suhu dht11 dengan suhu referensi

Berikut merupakan persentase non-linearitas pada setiap pengujian sensor DHT11 yang dihitung menggunakan rentang suhu referensi sebesar:

Rentang Referensi = $54,13 - 29,7 = 24,43^{\circ}\text{C}$
 Pengujian 1:

$$\text{Non-Linearitas (\%)} = \frac{|31,3 - 29,7|}{24,43} \times 100 = 6,55\%$$

Tabel 2. Hasil Perhitungan Non-Linearitas Sensor DHT11

Pengujian ke-	Non-Linearitas (%)
1	6,55
2	1,51
3	0,94
4	3,27
5	11,05
6	0,70
7	0,53
8	1,23
9	1,35
10	2,33
11	5,94
12	1,11
13	1,23
14	2,17
15	1,64
16	2,74
17	2,99
18	1,23
19	3,56

Berdasarkan grafik, suhu DHT11 memiliki hubungan yang cukup linear dengan suhu referensi, di mana kenaikan suhu referensi diikuti oleh kenaikan suhu yang terbaca pada sensor. Hal ini menunjukkan bahwa DHT11 mampu mengikuti tren perubahan suhu dengan baik, meskipun masih terdapat beberapa penyimpangan yang menunjukkan adanya non-linearitas. Penyimpangan terbesar terjadi pada suhu referensi $34,7^{\circ}\text{C}$ dengan deviasi $2,7^{\circ}\text{C}$ atau $11,05\%$, sedangkan penyimpangan terkecil terjadi pada suhu referensi sekitar $45,1^{\circ}\text{C}$ dengan deviasi $0,3^{\circ}\text{C}$ atau $1,23\%$. Datasheet DHT11 tidak mencantumkan nilai non-linearitas sehingga hasil pengujian ini tidak dapat dibandingkan dengan spesifikasi pabrikan.

c. Sensitivitas

Sensitivitas sensor DHT11 menunjukkan seberapa besar perubahan output sensor terhadap perubahan input. Pada pengujian ini, sensitivitas dihitung sebagai perbandingan perubahan suhu yang terbaca oleh sensor DHT11 terhadap perubahan suhu referensi menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Sensitivitas} = \frac{\Delta \text{Output}}{\Delta \text{Input}}$$

dengan:

- ΔOutput = perubahan suhu yang diukur oleh sensor DHT11
- ΔInput = perubahan suhu yang diukur oleh alat pengujian (suhu referensi)

Contoh perhitungan sensitivitas adalah sebagai berikut:

Pengujian ke 1–2

$$\text{Sensitivitas} = \frac{31,3 - 30,8}{(31,17 - 29,7)} = 0,34^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$$

Tabel 3. Hasil Perhitungan Sensitivitas Sensor DHT11

Pengujian	Sensitivitas ($^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$)
1–2	0,34
2–3	1,21
3–4	0,41
4–5	2,84
5–6	0,25
6–7	0,71
7–8	1,20
8–9	1,02
9–10	0,76
10–11	26,25
11–12	0,08
12–13	1,08
13–14	4,29
14–15	0,56
15–16	0,89
16–17	0,97

Berdasarkan hasil perhitungan, nilai sensitivitas sensor DHT11 bervariasi pada setiap rentang pengujian. Sebagian besar nilai sensitivitas berada di sekitar $1^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$, yang menunjukkan bahwa perubahan suhu referensi diikuti oleh perubahan pembacaan sensor. Namun, terdapat beberapa nilai yang menyimpang cukup besar akibat perbedaan suhu yang sangat kecil pada data referensi. Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa sensor DHT11 mampu merespons perubahan suhu dengan cukup baik, meskipun masih dipengaruhi oleh faktor seperti kondisi ruang fermentasi, noise, resolusi sensor, dan kesalahan pengukuran.

d. Resolusi

Resolusi DHT11 menunjukkan kemampuan sensor dalam mendeteksi perubahan suhu terkecil yang masih dapat dibedakan pada keluarannya. Karena DHT11 menghasilkan data digital, resolusi dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{Resolusi} = \frac{\text{Rentang Pengukuran}}{2^N}$$

dengan:

- Rentang Pengukuran = $50^{\circ}\text{C} - 0^{\circ}\text{C} = 50^{\circ}\text{C}$
 - N = jumlah bit data keluaran = 8 bit
- Sehingga:

$$\text{Resolusi} = \frac{50 - 0}{2^8}$$

$$\text{Resolusi} = \frac{50}{256}$$

$$\text{Resolusi} = 0,1953^{\circ}\text{C}$$

Dengan demikian, secara teoritis sensor DHT11 memiliki resolusi sebesar $0,1953^{\circ}\text{C}$, yang berarti sensor dapat mendeteksi perubahan suhu sekecil nilai tersebut. Namun, berdasarkan datasheet DHT11, nilai suhu yang ditampilkan dibulatkan ke kelipatan 1°C , sehingga resolusi praktis sensor adalah 1°C .

4.8. Pengujian kedua

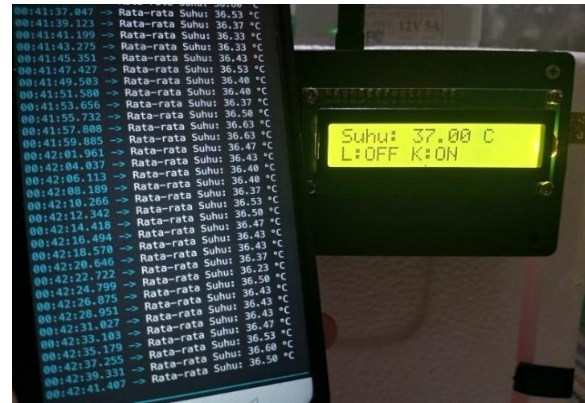
Pengujian kedua dilakukan dengan mengambil data pada dht11 secara berulang pada suhu referensi/kondisi yang sama. Pengujian ini dilakukan untuk menentukan akurasi dan presisi dari sensor DHT11 yang digunakan pada alat ini. Berikut merupakan dokumentasi pengambilan data, dan tabel data pengujian.



Gambar 13. Pegukuran secara berulang ke-1



Gambar 14. Pegukuran secara berulang ke-2



Gambar 15. Pegukuran secara berulang ke-3

Tabel 4. Data pengujian berulang sensor dht11 pada beberapa suhu referensi.

Suhu Referensi ($^{\circ}\text{C}$)	Suhu DHT11 ($^{\circ}\text{C}$)
29,7	29,2
	29,3
	29,4
	29,6
	29,63
36,5	36,9
	36,9
	37,0
	37,1
	37,13
44,3	44,9
	45,0
	45,13
	45,3
54,03	45,7
	55,03
	55,0
	54,8
	55,0
	54,8

a. Akurasi

Akurasi menunjukkan seberapa dekat hasil pengukuran sensor terhadap nilai sebenarnya atau nilai referensi. Pada penelitian ini, akurasi sensor DHT11 dihitung menggunakan persentase error berdasarkan data pengukuran berulang pada suhu referensi yang sama.

Sebagai contoh perhitungan:

- Suhu Referensi $29,7^{\circ}\text{C}$

$$\text{Akurasi} = \left(1 - \frac{|29,2 - 29,7|}{29,7}\right) \times 100 = 98,32\%$$

Tabel 5. Hasil perhitungan akurasi sensor dht11 pada berbagai suhu referensi

Suhu Referensi ($^{\circ}\text{C}$)	Pengukuran ke-	Akurasi (%)
29,7	1	98,32
29,7	2	98,65
29,7	3	98,99
29,7	4	99,66
29,7	5	99,76
Rata-rata		99,08
36,5	1	98,90

Suhu Referensi (°C)	Pengukuran ke-	Akurasi (%)
36,5	2	98,90
36,5	3	98,63
36,5	4	98,36
36,5	5	98,27
Rata-rata		98,61
44,3	1	98,65
44,3	2	98,42
44,3	3	98,13
44,3	4	97,74
44,3	5	96,84
Rata-rata		97,95
54,03	1	98,15
54,03	2	98,20
54,03	3	98,57
54,03	4	98,20
54,03	5	98,57
Rata-rata		98,33

Berdasarkan hasil perhitungan, rata-rata akurasi sensor DHT11 pada setiap variasi suhu berada di atas 97%, menunjukkan bahwa sensor memiliki tingkat akurasi yang baik. Sesuai datasheet, DHT11 memiliki akurasi sekitar $\pm 1^\circ\text{C}$ hingga $\pm 2^\circ\text{C}$, sedangkan pada pengujian ini rata-rata penyimpangan masih berada di bawah 1°C sehingga hasil pengukuran masih memenuhi spesifikasi sensor. Sebagai perbandingan, penyimpangan sebesar 2°C dan 1°C pada suhu referensi $36,5^\circ\text{C}$ menghasilkan akurasi masing-masing 94,52% dan 97,26%, yang lebih rendah dibandingkan hasil pengujian. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa akurasi sensor DHT11 pada sistem inkubator masih sesuai dengan spesifikasi yang tercantum pada datasheet.

b. Presisi

Presisi menunjukkan tingkat konsistensi hasil pengukuran sensor ketika dilakukan pengukuran berulang pada kondisi yang sama. Perhitungan presisi dilakukan menggunakan nilai rata-rata ($\bar{x}$) dan standar deviasi (std) dari data pengujian berulang. Persentase presisi dihitung menggunakan persamaan: Rata-rata (Mean)

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Keterangan:

- $\bar{x}$ = rata-rata data
- x_i = data pengukuran ke-i
- n = jumlah data

Standar Deviasi

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Keterangan:

- s = standar deviasi
- x_i = data pengukuran ke-i
- $\bar{x}$ = rata-rata data
- n = jumlah data

Presisi

$$\text{Presisi}(\%) = \left(1 - \frac{s}{\bar{x}}\right) \times 100$$

atau dapat ditulis

$$\text{Presisi}(\%) = \left(1 - \frac{\text{Standar Deviasi}}{\text{Rata-rata}}\right) \times 100$$

Sebagai contoh perhitungan:

- Suhu Referensi $29,7^\circ\text{C}$

$$\text{Presisi} = \left(1 - \frac{0,1588}{29,48}\right) \times 100 = 99,46\%$$

Tabel 6. Hasil perhitungan presisi sensor dht11 pada berbagai suhu referensi

Suhu Referensi (°C)	Rata-rata (°C)	Standar Deviasi (°C)	Presisi (%)
29,7	29,48	0,1588	99,46
36,5	37,03	0,1044	99,72
44,3	45,37	0,2926	99,36
54,03	54,86	0,1155	99,79

Nilai presisi sensor DHT11 berkisar antara 99,36% hingga 99,79%, yang menunjukkan bahwa hasil pengukurannya sangat konsisten pada berbagai kondisi suhu. Presisi tertinggi diperoleh pada suhu referensi $54,03^\circ\text{C}$ sebesar 99,79%, sedangkan presisi terendah terjadi pada suhu referensi $44,3^\circ\text{C}$ sebesar 99,36%. Datasheet DHT11 tidak mencantumkan nilai presisi secara eksplisit sehingga hasil ini tidak dapat dibandingkan langsung dengan spesifikasi pabrik.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian, sistem inkubator tempe berbasis Internet of Things (IoT) berhasil mengatasi permasalahan ketidakstabilan suhu selama proses fermentasi. Sistem mampu mempercepat waktu fermentasi dari metode konvensional yang membutuhkan 36–47 jam menjadi sekitar 20 jam dengan tetap mempertahankan kualitas tempe. Pengujian sensor DHT11 menunjukkan kinerja yang baik dengan tingkat akurasi di atas 97% dan presisi antara 99,36% hingga 99,79%. Selain itu, penerapan teknologi IoT memungkinkan monitoring dan pengendalian kondisi fermentasi secara real-time, sehingga mengurangi risiko kesalahan manusia, meningkatkan konsistensi hasil produksi, serta berpotensi menekan biaya operasional dalam jangka panjang.

Untuk penelitian selanjutnya, sistem dapat dikembangkan dengan menggunakan sensor yang memiliki akurasi lebih tinggi, seperti DHT22 atau SHT31, agar hasil pengukuran lebih presisi. Selain itu, kontrol suhu dan kelembapan dapat ditingkatkan menggunakan metode kendali cerdas seperti PID atau fuzzy logic untuk menjaga kondisi fermentasi lebih stabil. Pengembangan fitur pencatatan data otomatis (data logging) dan analisis historis pada platform IoT juga dapat dilakukan guna memudahkan pemantauan performa sistem dan optimasi proses fermentasi dalam jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Y. Firmansyah, P. Studi, S. Komputer, and F. I. Komputer, "Rancang Bangun Sistem Monitoring Suhu Dan Kelembapan Ruangan Tempe Berbasis Internet Of Things (IOT)," 2022.
- [2] C. Austin, M. Mulyadi, and S. Octaviani, "Implementasi IoT dengan ESP 32 Untuk Pemantauan Kondisi Suhu Secara Jarak Jauh Menggunakan MQTT Pada AWS," *J. Teknol. dan Sist. Komput.*, vol. 15, no. 2, pp. 46–55, 2023.
- [3] A. Sudaryanto, Y. Aditya, W. Wisnu, and A. Kridoyono, "Accuracy of DHT11 Temperature and Humidity Sensor in Egg Incubator," *Accuracy DHT11 Temp. Humidity Sens. Egg Incubator*, vol. 4, no. 1, pp. 1–6, 2024.
- [4] S. P. Maghfira, "Rancang Bangun Sistem Kontrol Suhu dan Kelembapan Berbasis IOT dengan Fuzzy Logic untuk Optimasi Proses Fermentasi pada Pengolahan Tempe Rancang Bangun Sistem Kontrol Suhu dan Kelembapan Berbasis IOT dengan Fuzzy Logic untuk Optimasi Proses Fermentasi pad," *J. Tek. Elektro*, vol. 14, no. 3, pp. 257–263, 2025.
- [5] I. W. Bayu, A. Whedana, and T. D. Purwanto, "Rancang Bangun Alat Sistem Kontrol Otomatis Pada Proses Fermentasi Tempe Berbasis Mikrokontroler," *Angkasa J. Ilm. Bid. Teknol.*, vol. 9503, pp. 1–16, 2024.
- [6] S. W. U. Galih Mustiko Aji, Artdhita Fajar Pratiwi, "Rancang Bangun Inkubator Tempe Untuk Mempercepat Waktu Fermentasi," *Agroteknika*, vol. 7, no. November, pp. 488–497, 2024.
- [7] K. Górska and E. Pejcz, "Tempeh and Fermentation — Innovative Substrates in a Classical Microbial Process," *Appl. Sci.*, vol. 15, pp. 1–24, 2025.
- [8] F. Ztt, E. Mashonjowa, and E. Matandirotya, "DHT11 Based Temperature and Humidity Measuring System," *J. Electr. Eng. Electron. Technol.*, vol. 11, pp. 5–7, 2022, doi: 10.4172/jeeet.1000902.Materials.
- [9] A. Ziad and E. Darnila, "Development and Implementation of an ESP32 Microcontroller and Monitoring System for Smart Door Lock Using RFID Sensor for E-KTP ID and Fingerprint Based on the Internet of Things," *Proc. MICoMS*, vol. 00023, pp. 1–11, 2024.
- [10] M. C. Marzuki, U. Ilmi, and A. B. Laksono, "Performance Evaluation of the DHT11 Sensor for MATLAB - Based Temperature and Humidity Measurements," *MALCOM*, vol. 6, no. April, pp. 737–749, 2026.
- [11] D. Yulizar, S. S. B, and N. Ananda, "Performance Analysis Comparison of DHT11 , DHT22 and DS18B20 as Temperature," *Proc. ICSES*, vol. 1, pp. 37–45, 2022, doi: 10.2991/978-94-6463-232-3.
- [12] S. Ethan, "Journal of Electrical Engineering and Electronic Technology Understanding the DHT11 Temperature Sensor: Principles and Applications," *J. Electr. Eng. Electron. Technol.*, no. 2010, pp. 11–12, 2023, doi: 10.4172/2325-9838.1000945.