

LAPORAN TUGAS AKHIR

Automatic Quickly System Fermentasi Tempe Gambus berbasis Atmega2560 pada Mitra UMKM di Sugihmanik Grobogan



Penyusun:

Fahrur Rozi	(30602100020)
Riyanti Santika	(30602100004)
Ahmad Syamsudin	(30602100007)

**Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Sultan Agung
Semarang
2025**

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Riyanti Santika

NIM : 30602100004

Jurusan : Teknik Elektro

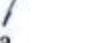
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri

Dengan ini saya menyatakan bahwa Tugas Akhir yang diajukan dengan judul **“AUTOMATIC QUICKLY SYSTEM FERMENTASI TEMPE GAMBUS BERBASIS ATMEGA2560 PADA MITRA UMKM DI SUGIHMANIK GROBOGAN”** adalah hasil karya sendiri, tidak pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di Perguruan Tinggi lain maupun ditulis dan diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam daftar pustaka. Tugas Akhir ini adalah milik saya segala bentuk kesalahan dan kekeliruan dalam Tugas Akhir ini adalah tanggung jawab saya.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sadar dan penuh tanggung jawab.

Semarang, 14 Agustus 2025

Yang Menyatakan



 74289AMX443686499
 Riyanti Santika

LEMBAR PENGESAHAN

**Automatic Quickly System Fermentasi Tempe Gambus berbasis
Atmega2560 pada Mitra UMKM di Sugihmanik Grobogan**

Penyusun:

**Fahrur Rozi (30602100020)
Riyanti Santika (30602100004)
Ahmad Syamsudin (30602100007)**

Semarang, 14 Agustus 2025

Dosen Pembimbing



**Dedi Nugroho, S.T., M.T.
NIDN. 0617126602**

Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Elektro



**Jenny Putri Hapsari, S.T., M.T.
NIDN. 0607018501**



260825

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul “AUTOMATIC QUICKLY SYSTEM FERMENTASI TEMPE GAMBUS BERBASIS ATMEGA2560 PADA MITRA UMKM DI SUGIHMNIK GROBOGAN” ini telah dipertahankan di depan Penguji sidang Tugas Akhir pada:

Hari : Kamis
Tanggal : 14 Agustus 2025

Tim Penguji

Tanda Tangan

Jenny Putri Hapsari, S.T., M.T.
NIDN : 0607018501
Ketua dan Penguji I



26083

Ir. Ida Widiastuti, M.T.
NIDN : 06xx
Penguji II



Dedi Nugroho, S.T., M.T.
NIDN : 0617126602
Penguji III



PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Riyanti Santika
NIM : 30602100004
Jurusan : Teknik Elektro
Fakultas : Teknologi Industri

Dengan ini saya menyerahkan karya ilmiah berupa Tugas Akhir dengan judul **“AUTOMATIC QUICKLY SYSTEM FERMENTASI TEMPE GAMBUS BERBASIS ATMEGA2560 PADA MITRA UMKM DI SUGIHMANIK GROBOGAN”** dan menyetujui menjadi hak milik Universitas Islam Sultan Agung serta memberikan hak bebas royalti non-eksklusif untuk disimpan, dialih mediakan, dikelola dalam pangkalan data dan publikasinya di internet atau media lain untuk kepentingan akademis selama tetap mencantumkan nama penulis sebagai pemilik Hak Cipta.

Pernyataan ini saya buat dengan sungguh-sungguh. Apabila dikemudian hari terbukti ada pelanggaran Hak Cipta/ Plagiarisme dalam karya ilmiah ini, maka segala bentuk tuntutan hukum yang timbul akan saya tanggung secara pribadi tanpa melibatkan pihak Universitas Islam Sultan Agung.

Semarang, 14 Agustus 2025

Yang Menyatakan



Riyanti Santika

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
SURAT PERNYATAAN	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI	iv
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH	v
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	ix
RINGKASAN	x
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar belakang dan Identifikasi Masalah	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Tujuan.....	4
1.4. Batasan Masalah	4
1.5. Batasan Realistis Aspek Keteknikan	5
BAB 2. IDENTIFIKASI KEBUTUHAN SISTEM	6
2.1. Studi Literatur dan Observasi	6
2.2. Dasar Teori	9
2.3. Analisis <i>Stakeholder</i>	15
2.4. Analisis Aspek yang mempengaruhi Sistem.....	16
2.5. Spesifikasi Sistem	17
BAB 3. USULAN SOLUSI	19
3.1. Usulan Solusi 1	19
3.2. Usulan Solusi 2	23
3.3. Analisis dan Penentuan Usulan Solusi/Desain Terbaik	27
3.4. <i>Gantt Chart</i>	28
3.5. Realisasi Pelaksanaan Tugas Akhir 1	29
BAB 4. HASIL RANCANGAN DAN METODE PENGUKURAN	31
4.1. Hasil Rancangan Sistem	31
4.2. Metode Pengukuran Kinerja Hasil Perancangan	37
BAB 5. HASIL PENGUKURAN DAN ANALISIS	39

5.1.	Hasil Perancangan Sistem Fermentasi Tempe Gambus Otomatis berbasis Arduino.....	39
5.2.	Pengujian dan Validasi Sensor DHT22.....	45
5.3.	Pengujian Konekta Alat dan Evaluasi Sistem Pengendalian	51
5.4.	Dampak Implementasi Sistem	62
BAB 6. KESIMPULAN DAN SARAN		65
6.1.	Kesimpulan.....	65
6.2.	Saran.....	66
DAFTAR PUSTAKA		67
LAMPIRAN		69

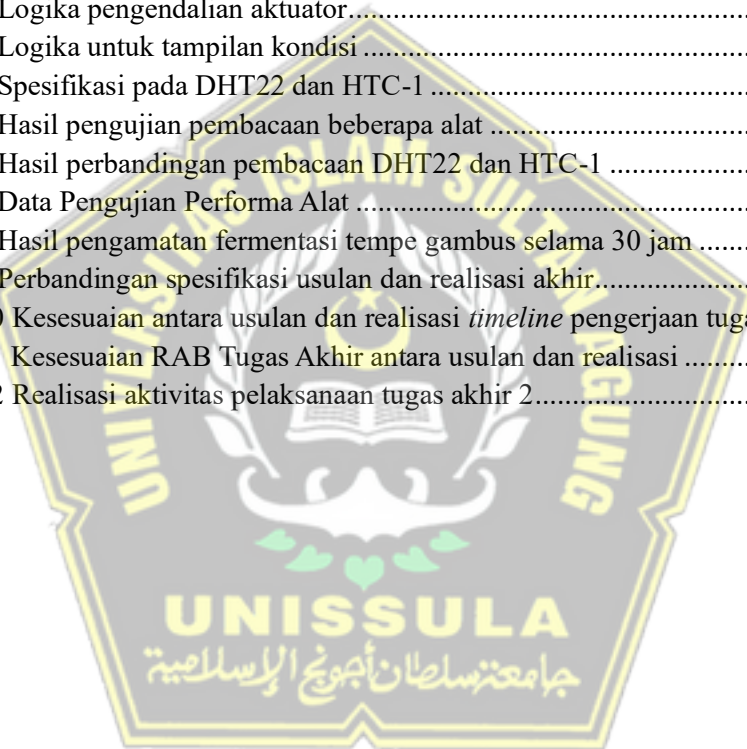


DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Proses pembuatan tempe gambus	1
Gambar 1. 2 Produksi tempe gambus.....	2
Gambar 1. 3 Proses fermentasi.....	2
Gambar 2. 1 Arduino Mega2560.....	11
Gambar 2. 2 Sensor DHT22.....	12
Gambar 2. 3 Heater Air PTC.....	12
Gambar 2. 4 <i>Relay Module 4 Channel</i>	13
Gambar 2. 5 <i>Mini Fan</i>	13
Gambar 2. 6 <i>Humidifier</i>	14
Gambar 2. 7 LCD 20x4.....	15
Gambar 2. 8 LCD 20x4.....	15
Gambar 3. 1 Diagram blok usulan desain sistem 1.....	20
Gambar 3. 2 <i>Flow chart</i> usulan desain sistem 1	20
Gambar 3. 3 Diagram blok usulan desain sistem 2.....	24
Gambar 3. 4 <i>Flow chart</i> usulan desain sistem 2	24
Gambar 4. 1 Skema rangkaian elektronik sistem	31
Gambar 4. 2 Desain 3D sistem.....	33
Gambar 4. 3 Program sistem secara keseluruhan	36
Gambar 5. 1 Hasil jadi alat fermentasi otomatis tempe gambus.....	40
Gambar 5. 2 Panel kontrol sistem	40
Gambar 5. 3 Pengujian Sensor DHT22	45
Gambar 5. 4 Grafik perbandingan pengujian komparatif sensor DHT22	47
Gambar 5. 5 Grafik perbandingan pembacaan DHT22 dan HTC-1	49
Gambar 5. 6 Pengujian suhu luar dan dalam alat	52
Gambar 5. 7 Foto bersama dengan mitra sebelum implementasi alat.....	59

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Hasil survei antara pengembang dan pengguna	3
Tabel 2. 1 Hasil Studi Literatur Solusi Sejenis	6
Tabel 3. 1 Fungsi dan Kegunaan Komponen Desain 1	21
Tabel 3. 2 Rencana anggaran pengembangan sistem	22
Tabel 3. 3 Fungsi dan Kegunaan Komponen Desain 2	25
Tabel 3. 4 Rencana anggaran pengembangan sistem	26
Tabel 3. 5 Gantt Chart	28
Tabel 3. 6 Realisasi aktivitas pelaksanaan Tugas Akhir 1	29
Tabel 4. 1 Komponen rangkaian elektronik sistem	32
Tabel 5. 1 Rangkaian elektronik, spesifikasi, dan fungsinya	41
Tabel 5. 2 Logika pengendalian aktuator	43
Tabel 5. 3 Logika untuk tampilan kondisi	44
Tabel 5. 4 Spesifikasi pada DHT22 dan HTC-1	46
Tabel 5. 5 Hasil pengujian pembacaan beberapa alat	46
Tabel 5. 6 Hasil perbandingan pembacaan DHT22 dan HTC-1	48
Tabel 5. 7 Data Pengujian Performa Alat	52
Tabel 5. 8 Hasil pengamatan fermentasi tempe gabus selama 30 jam	54
Tabel 5. 9 Perbandingan spesifikasi usulan dan realisasi akhir	57
Tabel 5. 10 Kesesuaian antara usulan dan realisasi <i>timeline</i> pengerjaan tugas akhir2	59
Tabel 5. 11 Kesesuaian RAB Tugas Akhir antara usulan dan realisasi	60
Tabel 5. 12 Realisasi aktivitas pelaksanaan tugas akhir 2	61



RINGKASAN

Rancangan Tempe gambus adalah produk makanan fermentasi berbahan dasar ampas tahu yang proses produksinya masih dilakukan secara konvensional. Proses ini memakan waktu 36 hingga 48 jam dan sering terganggu oleh faktor lingkungan, seperti suhu dingin pada musim hujan, yang menghambat kestabilan suhu dan kelembaban selama fermentasi. Metode konvensional dengan kain penutup juga kurang efektif dalam menjaga kondisi ideal untuk tempe secara merata di setiap rak nya.

Untuk mengatasi kendala tersebut, dikembangkan alat kontrol otomatis berbasis Arduino Mega dengan sensor DHT22, yang mampu mengatur suhu (30-37°C) dan kelembaban (65-75%) secara konsisten. Sistem ini dilengkapi heater, humidifier, dan mini fan, serta tampilan LCD 20x4 untuk memantau kondisi fermentasi secara real-time. Desain alat sederhana dan efisien ini memungkinkan proses fermentasi menjadi lebih cepat dan stabil daripada cara konvensional.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa alat ini mampu menjaga kestabilan suhu dan kelembaban, dengan respons <2 detik terhadap perubahan lingkungan. Alat bekerja sesuai tujuan dan mempercepat waktu fermentasi dengan efisiensi waktu 6 jam, Pengendalian berbasis histeresis menjaga lingkungan fermentasi tetap ideal, menghasilkan kualitas tempe yang merata. Alat ini menjadi solusi praktis dan ekonomis untuk mendukung sektor UMKM, meningkatkan efisiensi produksi, dan memanfaatkan teknologi kontrol otomatis yang mudah digunakan dan diaplikasikan.

Kata kunci: Tempe, Fermentasi Tempe, Kontrol Fermentasi

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1. Latar belakang dan Identifikasi Masalah

Tempe gambus merupakan salah satu produk makanan fermentasi yakni varian tempe yang berbahan dasar ampas tahu, berbeda dengan tempe kedelai biasa yang menggunakan kedelai utuh [1]. Produk ini memiliki tekstur lebih lunak dan ringan, serta tetap mengandung protein nabati untuk konsumsi harian. Tempe gambus banyak diproduksi oleh pelaku UMKM di berbagai daerah di Indonesia. Produk ini memiliki peran penting dalam mendukung perekonomian lokal, terutama karena banyak diminati masyarakat. Selain harganya yang terjangkau, tempe gambus juga memiliki kandungan gizi yang cukup baik bagi tubuh [2]. Namun demikian, proses produksi tempe gambus yang masih mengandalkan metode tradisional cenderung tidak efisien, terutama pada tahap fermentasi. Ketidakstabilan suhu dan kelembaban lingkungan menjadi tantangan utama yang memperpanjang waktu fermentasi dan berdampak pada keterbatasan kapasitas produksi harian [3].

Pada proses fermentasi tempe gambus, kondisi suhu dan kelembaban yang stabil sangat diperlukan agar fermentasi berlangsung secara optimal dan menghasilkan produk berkualitas. Sayangnya, metode konvensional yang digunakan oleh sebagian besar pelaku UMKM tidak mampu menjaga kondisi tersebut secara konsisten, terutama saat terjadi perubahan suhu udara dan kelembaban, seperti pada musim hujan [3]. Hal ini dapat menyebabkan durasi fermentasi menjadi lebih lama, bahkan mencapai 48 jam lebih, serta meningkatkan risiko kegagalan produk akibat lingkungan fermentasi yang tidak ideal. Minimnya pemantauan dan penyesuaian kondisi secara manual juga menjadikan proses ini kurang responsif terhadap perubahan lingkungan.



Gambar 1. 1 Proses pembuatan tempe gambus

Penelitian ini berfokus pada salah satu UMKM mitra yang berada di Desa Sugihmanik, Kabupaten Grobogan, Jawa Tengah, yang dikelola oleh Ibu Erna. Usaha ini memproduksi tempe gambus dengan metode konvensional, yaitu dengan hanya meletakkannya di rak-rak terbuka tanpa bantuan alat pengendali suhu dan

kelembaban. Dalam satu hari, mitra mampu memproduksi sekitar 42 kg tempe gambus melalui tujuh kali proses pemasakan, atau sekitar 300 pcs produk. Namun, proses ini kerap terkendala oleh suhu lingkungan yang rendah, terutama saat musim hujan, sehingga waktu fermentasi menjadi lebih lama dan risiko kegagalan meningkat sebesar 5% hingga 10% (sekitar 15–30 pcs produk per hari).



Gambar 1. 2 Produksi tempe gambus

Suhu yang terlalu rendah akan memperlambat pertumbuhan jamur *Rhizopus oligosporus* yang menjadi agen fermentasi utama, sedangkan suhu yang terlalu tinggi dapat mempercepat pembusukan dan menyebabkan perubahan warna pada jamur menjadi kehitaman [1]. Untuk itu, diperlukan solusi teknologi yang mampu menjaga suhu dan kelembaban secara otomatis agar proses fermentasi lebih stabil, efisien, dan menghasilkan produk dengan kualitas yang lebih baik.



Gambar 1. 3 Proses fermentasi

Untuk menjawab permasalahan tersebut, dikembangkanlah sistem kontrol otomatis berbasis mikrokontroler Atmega2560. Sistem ini menggunakan sensor DHT22 untuk mengukur suhu dan kelembaban secara *real-time*, serta dilengkapi dengan aktuator seperti *heater*, *humidifier*, dan 2 buah mini fan untuk menyesuaikan kondisi lingkungan fermentasi secara otomatis. Pengaturan ini ditampilkan melalui LCD 20x4 agar pengguna dapat memantau kondisi fermentasi secara langsung dan mudah dipahami. Sistem dirancang untuk menjaga suhu pada

rentang 30–37°C dan kelembaban pada 65–75%, yang merupakan kondisi optimal untuk fermentasi tempe gambus. Dengan sistem ini, waktu fermentasi diharapkan dapat dipersingkat menjadi 24–28 jam, atau lebih cepat sekitar 20–30%, sehingga kegagalan produksi harian memungkinkan untuk dapat diturunkan.

Keunggulan dari sistem kontrol otomatis ini terletak pada kemampuannya menjaga kondisi fermentasi secara presisi dan responsif terhadap perubahan lingkungan. Dibandingkan metode konvensional, sistem ini lebih andal dan efisien dalam meningkatkan keberhasilan produksi. Selain memberikan manfaat praktis bagi pelaku UMKM, inovasi ini juga menjadi bentuk penerapan keilmuan teknik elektro, khususnya pada bidang sistem kendali otomatis dan mikrokontroler, dalam menyelesaikan permasalahan nyata di masyarakat. Dengan demikian, diharapkan alat ini dapat meningkatkan produktivitas, kualitas produk, dan daya saing UMKM tempe gambus di tingkat lokal maupun nasional.

Tabel 1. 1 Hasil survei antara pengembang dan pengguna

Pertanyaan	Jawaban/tanggapan
Berapa kapasitas produksi tempe gambus Anda per hari?	Produksi harian mencapai 42 kg, terbagi dalam tujuh kali pemasakan atau sekitar 300 pcs tempe gambus.
Apa kendala utama yang sering Anda hadapi selama proses fermentasi?	Ketidakstabilan suhu dan kelembaban, terutama saat cuaca dingin pada musim hujan.
Berapa lama waktu fermentasi secara konvensional?	Fermentasi membutuhkan waktu sekitar 36 jam, bahkan bisa lebih dari 48 jam untuk mencapai kematangan ideal.
Bagaimana cara untuk menjaga suhu dan kelembaban selama fermentasi?	Menggunakan kain sebagai penutup, tetapi hasilnya sering tidak merata, terutama pada tempe yang ada di rak bawah.
Bagaimana pengaruh suhu terhadap proses fermentasi?	Suhu terlalu dingin memperlambat pertumbuhan jamur, sedangkan suhu terlalu panas menyebabkan pembusukan.
Apakah kualitas tempe dipengaruhi oleh ketidakseimbangan suhu?	Ya, suhu tidak stabil dapat menghasilkan tekstur yang tidak merata dan risiko pembusukan lebih tinggi.
Apa pengaruh cuaca terhadap fermentasi tempe?	Cuaca dingin pada musim hujan memperpanjang waktu fermentasi dan meningkatkan risiko kegagalan.
Apakah pernah mencoba menggunakan alat otomatis untuk fermentasi?	Belum, metode yang digunakan masih konvensional dengan alat bantu sederhana seperti kain.

1.2. Rumusan Masalah

1. Bagaimana merancang dan membangun sistem otomatis berbasis mikrokontroler Atmega2560 untuk mengatur suhu dan kelembaban pada proses fermentasi tempe gambus?
2. Sejauh mana kestabilan suhu dan kelembaban dapat mempengaruhi efisiensi waktu dan hasil akhir pada proses fermentasi tempe gambus?
3. Bagaimana efektivitas penerapan alat otomatis ini dalam membantu pelaku UMKM tempe gambus mengatasi kendala produksi akibat keterbatasan metode konvensional?

1.3. Tujuan

1. Merancang dan mengimplementasikan alat sistem kontrol suhu dan kelembaban otomatis berbasis mikrokontroler Atmega2560 untuk proses fermentasi tempe gambus.
2. Menganalisis pengaruh kestabilan suhu dan kelembaban terhadap efisiensi waktu fermentasi dan hasil produk akhir tempe gambus.
3. Mengevaluasi efektivitas sistem kontrol otomatis dalam meningkatkan kestabilan lingkungan selama proses fermentasi tempe gambus
4. Memberikan solusi alternatif bagi UMKM tempe gambus untuk mengurangi ketergantungan terhadap metode fermentasi konvensional yang kurang efektif dan sulit dikendalikan.

1.4. Batasan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah yang telah dilakukan, terdapat beberapa batasan masalah yang diterapkan dalam proyek capstone design ini, yaitu:

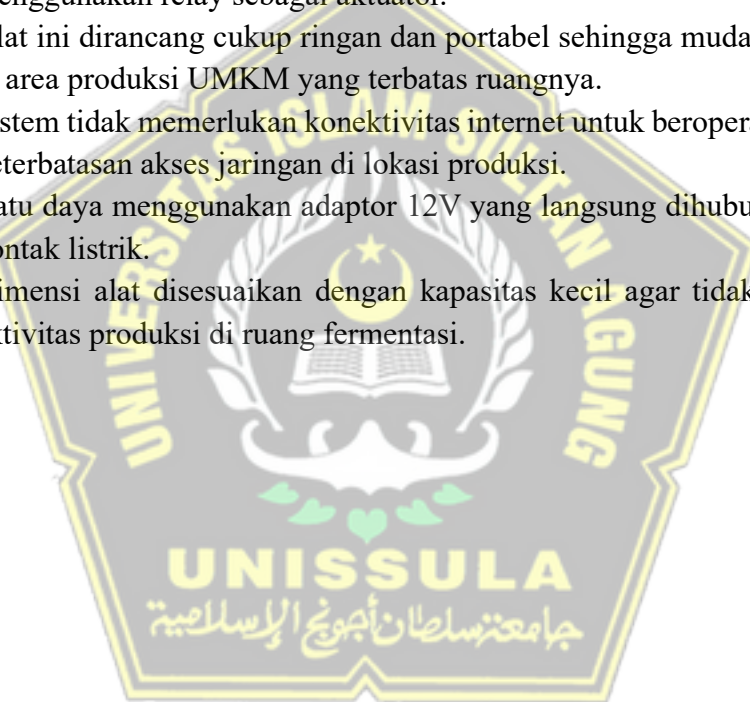
1. Proyek difokuskan pada proses fermentasi tempe gambus yang diproduksi oleh UMKM di Desa Sugihmanik, Kabupaten Grobogan.
2. Alat ini dirancang untuk kebutuhan skala kecil, sebagai solusi otomatisasi fermentasi yang sesuai dengan kapasitas dan kondisi operasional UMKM.
3. Sistem yang dikembangkan hanya mencakup pengendalian suhu dan kelembaban ruang fermentasi untuk mempercepat proses fermentasi, tanpa intervensi manual.
4. Pengujian dan implementasi dilakukan dalam ruang fermentasi terbatas, tidak mencakup desain untuk produksi massal berskala industri.
5. Fokus alat hanya terbatas pada tahap fermentasi, tidak termasuk proses awal seperti perebusan maupun proses akhir seperti pengemasan.
6. Sistem menggunakan mikrokontroler Arduino Mega 2560 dengan perangkat pendukung seperti sensor DHT22, tampilan LCD 20x4 I2C, serta aktuator berupa pemanas (heater), pelembap (humidifier), dan *mini fan*.
7. Aspek pemrograman difokuskan pada bahasa C++ dengan logika kendali dasar yang dapat dikembangkan lebih lanjut.

8. Studi ini tidak mencakup aspek mikrobiologis fermentasi, penilaian kualitas gizi, maupun analisis pasar produk tempe gambus.

1.5. Batasan Realistis Aspek Keteknikan

Dari identifikasi masalah, terdapat beberapa batasan realistis aspek keteknikan yang diterapkan dalam proyek capstone design ini, yaitu:

1. Alat ini menggunakan sensor DHT22 untuk mengukur suhu dan kelembaban dengan tingkat akurasi sesuai batas kemampuan sensor komersial yang terjangkau.
2. Mikrokontroler Arduino Atmega2560 digunakan sebagai pengendali utama untuk pemrosesan data dan pengontrolan aktuator.
3. Sistem ini mengendalikan heater, humidifier, dan dua *fan* (in dan out) menggunakan relay sebagai aktuator.
4. Alat ini dirancang cukup ringan dan portabel sehingga mudah dipindahkan di area produksi UMKM yang terbatas ruangnya.
5. Sistem tidak memerlukan konektivitas internet untuk beroperasi, mengingat keterbatasan akses jaringan di lokasi produksi.
6. Catu daya menggunakan adaptor 12V yang langsung dihubungkan ke stop kontak listrik.
7. Dimensi alat disesuaikan dengan kapasitas kecil agar tidak mengganggu aktivitas produksi di ruang fermentasi.



BAB 2. IDENTIFIKASI KEBUTUHAN SISTEM

2.1. Studi Literatur dan Observasi

Dalam mengembangkan sistem fermentasi otomatis tempe gambus, dilakukan studi literatur terhadap beberapa penelitian sebelumnya yang telah menerapkan sistem kontrol otomatis pada proses fermentasi makanan. Tujuannya adalah untuk memperdalam pemahaman dan pengetahuan terutama tentang metode yang digunakan serta komponen yang dibutuhkan. Dan guna mengetahui pendekatan, kelebihan, dan kelemahan sistem serupa, serta menyesuaikan dengan kondisi dan kebutuhan mitra UMKM.

Tabel 2. 1 Hasil Studi Literatur Solusi Sejenis

Judul	Usulan solusi	Hasil/Evaluasi (Kelebihan/Kekurangan)
Rancang Bangun Alat Sistem Kontrol Otomatis Pada Proses Fermentasi Tempe Berbasis Mikrokontroler [4]	Peneliti mengusulkan sistem fermentasi otomatis menggunakan mikrokontroler Arduino Uno dengan sensor DHT11 untuk membaca suhu dan kelembaban. Sebagai elemen pemanas, digunakan lampu pijar yang dikendalikan oleh relay berdasarkan ambang batas suhu tertentu	Hasil: Sistem berhasil menjaga suhu dan kelembaban ruang fermentasi pada rentang yang ditentukan, dan mempercepat fermentasi dibandingkan metode konvensional. Kelebihan: Mudah dibuat, biaya murah, dan efektif untuk skala kecil seperti rumah tangga atau UMKM. Kekurangan: Penggunaan lampu pijar sebagai pemanas kurang efisien karena menghasilkan panas yang tidak stabil. Sensor DHT11 juga memiliki akurasi rendah, sehingga memengaruhi presisi kendali sistem.
Sistem Kendali Suhu dan Kelembaban pada Proses Fermentasi Tempe [5]	Sistem ini menawarkan penggunaan kontrol suhu dan kelembaban otomatis berbasis PID (Proportional Integral Derivative) untuk peningkatan presisi. Sensor DHT22 digunakan sebagai pengganti DHT11, yang menghasilkan data lebih akurat.	Hasil: Waktu fermentasi tempe dipersingkat dari 36 jam menjadi sekitar 20 jam dengan suhu terjaga stabil di kisaran 32–36°C. Fermentasi berlangsung optimal, dan kualitas produk akhir meningkat. Kelebihan: Algoritma PID menghasilkan kontrol suhu dan kelembaban yang lebih presisi, dan penggunaan DHT22 meningkatkan akurasi data.

Judul	Usulan solusi	Hasil/Evaluasi (Kelebihan/Kekurangan)
		Kekurangan: Algoritma PID relatif kompleks dan sulit diterapkan langsung oleh pelaku UMKM yang tidak memiliki latar belakang teknis.
Pengendali Suhu Fermentasi Tempe Berbasis NodeMCU dan Sensor DHT22 [6]	Peneliti mengembangkan sistem fermentasi menggunakan NodeMCU berbasis WiFi, dengan kontrol suhu dan kelembaban yang ditampilkan secara real-time. DHT22 digunakan sebagai sensor, sedangkan pemanas masih berupa lampu pijar	Hasil: Alat mampu mengendalikan suhu hingga 35°C dan kelembaban mencapai 70%, serta mempercepat fermentasi. Sistem juga dapat diakses dari jarak jauh menggunakan aplikasi seluler. Kelebihan: Memungkinkan monitoring jarak jauh melalui jaringan internet, penggunaan sensor DHT22 meningkatkan presisi, dan sistem cukup ekonomis. Kekurangan: Pemanas menggunakan lampu pijar yang kurang efisien. Selain itu, sistem tergantung koneksi internet yang tidak selalu stabil di lingkungan UMKM pedesaan.
<i>Proposed Design of Incubator for Fermented Soybean Based on Internet of Things [7]</i>	Solusi berbasis Internet of Things menggunakan mikrokontroler ESP32 dan integrasi Firebase sebagai cloud database. Aplikasi Android dikembangkan menggunakan MIT App Inventor untuk memantau dan mengontrol kondisi fermentasi.	Hasil: Sistem dapat menampilkan suhu dan kelembaban secara real-time melalui aplikasi smartphone dan memungkinkan pengguna mengendalikan kondisi ruang fermentasi dari jarak jauh. Kelebihan: Kontrol jarak jauh via internet, dapat menyimpan data fermentasi dalam cloud untuk analisis lebih lanjut, serta sistem sangat fleksibel. Kekurangan: Butuh koneksi internet stabil dan pengguna harus memiliki pemahaman teknis terhadap pemrograman dan integrasi platform IoT.

Judul	Usulan solusi	Hasil/Evaluasi (Kelebihan/Kekurangan)
Rancang Bangun Inkubator Tempe Untuk Mempercepat Waktu Fermentasi [8]	Penelitian ini mengembangkan inkubator tempe otomatis berbasis Arduino Uno dan sensor DHT11. Sistem mengimplementasikan metode histeresis untuk mencegah switching berlebihan pada pemanas. Humidifier untuk menjaga kelembaban, Heater PTC digunakan untuk suhu.	Hasil: Proses fermentasi dapat dipercepat 10–12 jam dibandingkan fermentasi biasa. Parameter lingkungan stabil: suhu $\pm 35^{\circ}\text{C}$ dan kelembaban $\pm 70\%$. Kelebihan: Metode histeresis menghindari kerusakan aktuator, sistem sederhana namun fungsional, cocok untuk UMKM. Kekurangan: Sensor DHT11 kurang akurat (DHT22 disarankan), sistem tidak memiliki fitur pemantauan jarak jauh.
Rancang Bangun Sistem Kontrol Suhu dan Kelembaban Berbasis IoT dengan Fuzzy Logic untuk Optimasi Proses Fermentasi pada Pengolahan Tempe [9]	Sistem menggunakan Arduino Uno, sensor DHT22, humidifier, dan heater. Algoritma kontrol menggunakan logika fuzzy, namun tetap berbasis kontrol terbatas bawah dan atas (mirip dengan prinsip histeresis). Sistem dikendalikan dan dimonitor menggunakan aplikasi IoT (Blynk).	Hasil: Parameter suhu dan kelembaban dapat dipertahankan stabil pada level optimal, dengan respon cepat terhadap fluktuasi. Kualitas tempe meningkat dari sisi warna dan tekstur. Kelebihan: Menggunakan fuzzy logic untuk adaptasi suhu dan kelembaban, sistem dapat dimonitor jarak jauh. Kekurangan: Kompleks dalam pemrograman dan konfigurasi awal, serta bergantung pada koneksi internet.

Berdasarkan hasil studi literatur dan observasi dari enam referensi utama yang ada pada Tabel 2.1, sistem fermentasi tempe otomatis yang ideal untuk diterapkan pada skala UMKM seperti di desa Sugihmanik perlu memenuhi sejumlah kriteria teknis dan praktis yang saling mendukung, yaitu:

Pertama, penggunaan sensor DHT22 secara konsisten memberikan hasil pengukuran suhu dan kelembaban yang lebih akurat dibandingkan DHT11. Hal ini terbukti dari penelitian [5] dan [6], di mana kontrol parameter suhu dan kelembaban yang stabil berkontribusi langsung terhadap keberhasilan pertumbuhan jamur *Rhizopus oligosporus* dan kualitas tekstur tempe. Stabilitas ini sangat penting

mengingat variasi cuaca di daerah dingin atau sering hujan seperti Sugihmanik yang dapat mempengaruhi proses fermentasi alami.

Kedua, komponen pemanas seperti *heater* PTC dipilih karena lebih aman dan efisien dibanding lampu pijar. Penelitian pada [4] menunjukkan bahwa PTC memiliki kemampuan proteksi termal otomatis dan distribusi panas yang lebih stabil, menjadikannya cocok untuk aplikasi skala kecil dan rumah tangga yang tidak memiliki sistem pendingin atau pelindung suhu tambahan. Selain itu, penggunaan *humidifier* sebagai kontrol kelembaban aktif juga terbukti meningkatkan hasil fermentasi, sebagaimana diperlihatkan pada [9].

Ketiga, sistem dengan tingkat kompleksitas tinggi seperti integrasi IoT penuh, *fuzzy logic*, atau kontrol berbasis PID yang ditemukan dalam jurnal [7] dan [9], memang memberikan keunggulan dari sisi presisi dan otomatisasi. Namun, pendekatan tersebut dinilai kurang sesuai dengan kondisi dan kapabilitas teknis pelaku UMKM lokal, terutama di wilayah terpencil tanpa jaringan internet stabil atau pelatihan teknis khusus. Sebaliknya, penelitian [8] justru menunjukkan bahwa sistem sederhana dengan kontrol ambang batas (*threshold*) yang digabungkan dengan metode histeresis sudah cukup efektif dalam menjaga suhu dan kelembaban dalam rentang ideal.

Keempat, sistem yang menggunakan Arduino atau NodeMCU sebagai platform pengendali dianggap sangat tepat karena bersifat open source, terjangkau, dan fleksibel untuk pengembangan. Arduino Mega atau ESP32, seperti dalam penelitian [6] dan [7], memberikan ruang ekspansi lebih besar jika sistem nantinya perlu dikembangkan, misalnya penambahan fitur logging data atau sistem alarm..

2.2. Dasar Teori

2.2.1 Suhu dan Kelembaban

Dalam proses fermentasi tempe, kestabilan suhu dan kelembaban merupakan faktor lingkungan yang sangat krusial karena secara langsung memengaruhi aktivitas metabolik dari jamur *Rhizopus* spp., sebagai mikroorganisme utama dalam proses tersebut. Kelembaban yang berada dalam rentang ideal diperlukan untuk mendukung proses biologis jamur *Rhizopus* selama fermentasi tempe gambus [9]. Suhu ideal yang umumnya digunakan berada pada rentang 30–37 °C, sedangkan kelembaban relatif optimal berkisar antara 65–75% RH. Suhu merupakan indikator energi panas dalam sistem dan diukur dalam satuan derajat Celsius (°C), sedangkan kelembaban relatif adalah ukuran jumlah uap air dalam udara dibandingkan dengan jumlah maksimum yang dapat ditahan udara pada suhu tertentu, dinyatakan dalam persentase [5]. Hubungan antara suhu dan kelembaban relatif bersifat interdependen, artinya peningkatan suhu cenderung menurunkan kelembaban relatif apabila kandungan uap air tetap, dan sebaliknya penurunan suhu dapat meningkatkan kelembaban relatif.

Oleh karena itu, dalam sistem fermentasi tertutup, pengendalian suhu akan otomatis berdampak pada perubahan kelembaban, dan keduanya harus dikontrol secara simultan agar tetap berada dalam rentang optimal. Suhu yang terlalu rendah dapat memperlambat pertumbuhan miselium dan memperpanjang waktu fermentasi, sedangkan suhu yang terlalu tinggi dapat menimbulkan stres termal pada jamur atau bahkan memicu kontaminasi mikroba lain. Demikian pula, kelembaban yang terlalu rendah akan menyebabkan pengeringan permukaan substrat, sementara kelembaban yang terlalu tinggi meningkatkan risiko kondensasi dan pembusukan [5]. Maka dari itu, sistem otomatisasi sangat diperlukan untuk menjaga homeostasis lingkungan selama proses fermentasi, sehingga durasi fermentasi dapat diperpendek tanpa mengorbankan kualitas tempe gambus yang dihasilkan.

2.2.2 Konsep dan algoritma Kontrol Otomatis

Kontrol otomatis merupakan suatu sistem kendali yang dirancang untuk mengatur variabel proses secara mandiri tanpa intervensi langsung dari manusia [9], dengan tujuan menjaga variabel tersebut tetap berada dalam rentang yang diinginkan. Dalam konteks fermentasi tempe, variabel yang dikendalikan adalah suhu dan kelembaban udara di dalam ruang inkubasi. Sistem ini umumnya terdiri atas tiga komponen utama: sensor untuk mendeteksi kondisi lingkungan secara real-time, mikrokontroler sebagai otak sistem yang memproses data sensor dan mengambil keputusan logis, serta aktuator seperti pemanas (*heater*), kipas (*fan*), dan pelembap udara (*humidifier*) untuk mengubah kondisi lingkungan sesuai kebutuhan.

Proses pengambilan keputusan dalam sistem ini menggunakan kombinasi pendekatan algoritmik, antara lain *moving average* untuk menstabilkan pembacaan sensor dan meminimalkan fluktuasi jangka pendek, serta *hysteresis* untuk menetapkan ambang toleransi yang mencegah perangkat bekerja secara berulang terlalu cepat (frekuensi *switching* tinggi). Selain itu, digunakan juga logika pemrograman *if-else* yang sederhana namun efektif, berbasis ambang batas (*threshold*) suhu dan kelembaban yang telah ditentukan [8]. Ketika nilai suhu atau kelembaban berada di luar rentang yang diizinkan, sistem akan memberikan sinyal digital kepada aktuator tertentu untuk menyala atau mati hingga kondisi kembali stabil. Dengan adanya kendali otomatis ini, kestabilan lingkungan fermentasi dapat dipertahankan secara berkelanjutan dan presisi tanpa harus dipantau secara manual, yang pada akhirnya mempercepat proses fermentasi dan meningkatkan kualitas hasil tempe gambus. Berikut algoritma awal dasar yang akan digunakan:

1. Algoritma Pengaturan Suhu:

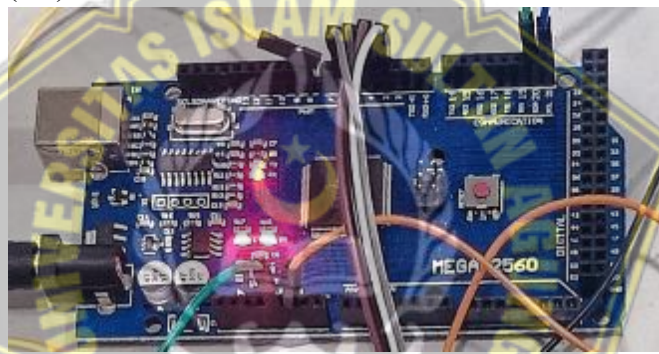
- Jika suhu $< 30^{\circ}\text{C}$, nyalakan *heater* dan *fan in*
- Jika suhu $> 37^{\circ}\text{C}$, matikan *heater* dan nyalakan *fan out* menurunkan suhu.
- Jika suhu berada dalam rentang $30\text{-}37^{\circ}\text{C}$, maka tidak ada yang nyala

2. Algoritma Pengaturan Kelembaban:

- Jika kelembaban $< 65\%$, nyalakan *humidifier* dan *fan in*
- Jika kelembaban $> 75\%$, matikan *humidifier* dan nyalakan *fan out* menurunkan kelembaban.

2.2.3 Mikrokontroler Arduino Mega 2560

Arduino Mega adalah papan mikrokontroler berbasis Atmega2560 yang memiliki keunggulan dalam jumlah pin *input* dan *output* yang banyak serta kapasitas memori yang besar, sehingga sesuai untuk sistem kendali otomatis yang kompleks seperti pengendalian suhu dan kelembaban. Board ini menyediakan 54 pin digital dan 16 pin analog, memungkinkan integrasi berbagai sensor dan aktuator secara bersamaan [10]. Arduino Mega2560 bekerja pada tegangan operasi 5 volt, dengan sumber daya eksternal yang dapat diberikan melalui jack DC dengan rentang 7-12 volt, serta mampu menyuplai *output* digital pada level tegangan *HIGH* (5V) atau *LOW* (0V).



Gambar 2. 1 Arduino Mega2560

Dalam konteks sistem fermentasi tempe gambus, mikrokontroler ini digunakan untuk mengolah data suhu dan kelembaban dari sensor DHT22 [11], lalu memprosesnya menggunakan logika pemrograman berbasis bahasa C/C++ melalui platform Arduino IDE. Hasil pemrosesan berupa sinyal digital digunakan untuk mengontrol perangkat eksekusi seperti *heater*, *fan*, dan *humidifier* secara otomatis sesuai kondisi lingkungan yang terdeteksi. Dengan arsitektur yang stabil dan fleksibel, Arduino Mega memberikan kinerja kendali yang responsif dan andal, serta memungkinkan ekspansi sistem di masa depan.

2.2.4 Sensor DHT22

DHT22 merupakan sensor digital yang mampu mengukur suhu dan kelembaban secara bersamaan, dengan jangkauan pengukuran suhu mulai dari -40°C hingga 80°C dan kelembaban relatif dari 0% hingga 100% RH, serta memiliki tingkat akurasi yang relatif tinggi, yaitu sekitar $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ untuk suhu dan $\pm 2-5\%$ untuk kelembaban [12]. Sensor ini bekerja dengan tegangan operasi 3.3–6 volt, dan secara umum dikendalikan pada level logika 5V yang sesuai dengan mikrokontroler seperti Arduino Mega2560. Komunikasi data antara sensor dan mikrokontroler dilakukan melalui satu pin digital menggunakan protokol komunikasi digital satu

arah (single-wire interface), sehingga mempermudah integrasi dan mengurangi penggunaan pin I/O. Selain pin data, dua pin lainnya yaitu vcc (+) dan ground (-).



Gambar 2. 2 Sensor DHT22

DHT22 dipilih karena memiliki presisi dan stabilitas pembacaan yang lebih baik dibandingkan dengan tipe DHT11, terutama pada rentang suhu dan kelembaban yang dibutuhkan dalam proses fermentasi tempe [13]. Data digital yang dihasilkan oleh sensor akan digunakan sebagai masukan utama dalam sistem kendali, yang selanjutnya menentukan aksi dari aktuator seperti *heater*, *fan*, dan *humidifier* untuk menjaga kondisi lingkungan inkubator tetap dalam batas optimal.

2.2.5 Heater Air PTC (*Positive Temperature Coefficient*)

Heater Air PTC merupakan jenis pemanas yang menggunakan elemen berbahan dasar keramik konduktif yang memiliki karakteristik resistansi listrik meningkat terhadap kenaikan suhu. Ketika suhu elemen masih rendah, resistansinya kecil sehingga arus listrik mengalir lebih besar untuk menghasilkan panas. Namun, saat suhu mulai meningkat, resistansi naik secara signifikan, sehingga arus listrik yang mengalir otomatis berkurang dan mencegah kenaikan suhu yang berlebihan [14]. Sifat ini menjadikan heater PTC sebagai perangkat yang secara alami mampu mengatur daya panas tanpa memerlukan kontrol tambahan, sehingga lebih aman, hemat energi, dan tahan terhadap risiko overheating.



Gambar 2. 3 Heater Air PTC

Dalam sistem pengendalian suhu ruang fermentasi, heater ini diaktifkan oleh mikrokontroler saat suhu lingkungan turun di bawah ambang batas minimum, dan akan berhenti bekerja ketika suhu telah mencapai nilai maksimum yang diinginkan. Dengan desain kerja yang responsif terhadap perubahan suhu dan kemampuan menjaga kestabilan secara mandiri, heater PTC sangat cocok digunakan dalam sistem otomatisasi fermentasi tempe, karena dapat menjaga suhu inkubasi tetap optimal untuk pertumbuhan jamur *Rhizopus* tanpa intervensi manual.

2.2.6 Relay Module

Relay module adalah komponen elektronik yang berfungsi sebagai saklar atau *switch* otomatis yang dikendalikan oleh sinyal logika dari mikrokontroler seperti

arduino, yang bertugas mengatur aliran listrik untuk perangkat eksternal [15]. Dalam sistem kontrol suhu dan kelembaban, relay digunakan untuk menghubungkan atau memutus aliran listrik pada perangkat eksternal berdaya tinggi seperti heater, kipas (fan), dan humidifier. Modul relay tipe SRD-05VDC-SL-C, bekerja pada tegangan pemicu 5 VDC dan mampu mengontrol beban AC hingga 250V 10A atau DC hingga 30V 10A, sehingga aman untuk mengendalikan perangkat listrik rumah tangga atau industri kecil.



Gambar 2. 4 Relay Module 4 Channel

Relay bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetik: ketika sinyal logika *LOW* atau *HIGH* (tergantung konfigurasi trigger) diberikan dari Arduino ke *input* modul, maka arus kecil akan mengaktifkan kumparan elektromagnet di dalam *relay*, sehingga menarik saklar internal untuk menutup atau membuka sirkuit utama [16]. Modul ini dilengkapi dengan indikator LED, opto-isolator (untuk isolasi optik antara sinyal dan arus tinggi), serta *jumper* pengatur mode (*HIGH/LOW trigger*), yang semuanya berfungsi untuk memastikan operasi yang stabil dan aman. Dengan menggunakan *relay module*, mikrokontroler dapat mengontrol perangkat berdaya tinggi secara tidak langsung, tanpa membebani pin *output* secara langsung, sekaligus menjaga keamanan sirkuit dan pengguna dari risiko korsleting atau lonjakan arus.

2.2.7 Mini Fan

Kipas DC (*Mini Fan*) adalah perangkat aktuator berukuran kecil untuk menghasilkan aliran uadar, yang umumnya digunakan sebagai pendinginan perangkat elektronik atau sirkulasi udara dalam ruang tertutup [17]. Fan ini bekerja menggunakan sumber tegangan searah (DC) dan umumnya digunakan dalam aplikasi ruang terbatas seperti inkubator atau ruang fermentasi.



Gambar 2. 5 Mini Fan

Dalam sistem fermentasi tempe otomatis, kipas digunakan untuk membantu mendistribusikan udara panas secara merata, menjaga kestabilan suhu dan kelembaban ruang, serta mempercepat proses penurunan suhu atau kelembaban saat terjadi kenaikan melebihi ambang batas maksimum. Penggunaan *fan* dibagi menjadi dua jenis berdasarkan arah aliran udara, yaitu *fan in* untuk membantu sirkulasi *heater* juga *humidifier*, dan *fan out* untuk mengeluarkan udara panas atau lembap berlebih dari dalam ruang fermentasi. Kedua *fan* dikendalikan secara otomatis oleh mikrokontroler berdasarkan data dari sensor suhu dan kelembaban, melalui logika pemrograman yang telah dirancang, sehingga mampu menjaga kondisi lingkungan tetap stabil tanpa perlu intervensi manual.

2.2.8 Humidifier

Humidifier ultrasonic (mist maker) adalah perangkat yang digunakan untuk meningkatkan kelembaban udara dalam ruang tertutup dengan cara menghasilkan kabut halus melalui getaran frekuensi tinggi [18]. Teknologi ini bekerja dengan memanfaatkan elemen piezoelektrik yang bergetar pada frekuensi ultrasonik, menyebabkan air di permukaan berubah menjadi partikel mikro (kabut) yang kemudian tersebar ke udara [19].



Gambar 2. 6 Humidifier

Dalam sistem fermentasi tempe otomatis, humidifier berfungsi sebagai aktuator kelembaban, yang akan diaktifkan oleh mikrokontroler saat sensor mendeteksi nilai kelembaban relatif lebih rendah dari ambang batas minimum. Kabut yang dihasilkan akan menaikkan kelembaban udara hingga kembali ke kondisi optimal yang diperlukan untuk mendukung aktivitas biologis jamur *Rhizopus*. Ketika kelembaban telah mendekati ambang maksimum, humidifier akan dimatikan untuk mencegah kelebihan uap air yang bisa menyebabkan kondensasi atau pembusukan. Dengan pengendalian otomatis ini, humidifier berperan penting dalam menjaga kestabilan lingkungan inkubator dan mempercepat proses fermentasi tempe gambus secara efisien dan konsisten.

2.2.9 LCD 20x4

LCD (*Liquid Crystal Display*) adalah perangkat tampilan elektronik yang memanfaatkan sifat optik dari kristal cair untuk mengatur cahaya dan menghasilkan tampilan visual berupa teks, angka, atau grafik [20]. LCD ini biasanya dikendalikan melalui komunikasi parallel (4-bit atau 8-bit mode) menggunakan *library* seperti *LiquidCrystal.h* dalam Arduino IDE, dan dapat dihubungkan lebih efisien dengan

I2C *converter* untuk menghemat penggunaan pin *input* atau *output* pada mikrokontroler [21].



Gambar 2. 7 LCD 20x4

Dalam sistem fermentasi tempe otomatis, LCD ini digunakan sebagai media output visual untuk menampilkan data suhu dan kelembaban yang dibaca oleh sensor secara real-time, serta menampilkan status logika sistem seperti kondisi "dingin", "panas", atau "lembap". Informasi ini memberikan umpan balik langsung kepada pengguna, memungkinkan pemantauan kondisi inkubator secara terus-menerus tanpa perlu perangkat tambahan seperti komputer atau smartphone. Dengan integrasi LCD, sistem menjadi lebih informatif, interaktif, dan mudah dipantau oleh operator lapangan.

2.2.10 Power Supply

Power supply merupakan komponen penting dalam sistem elektronik yang berfungsi untuk menyuplai tegangan dan arus listrik yang stabil sesuai kebutuhan perangkat [22]. Adaptor 12V DC, mengonversi sumber listrik AC 220V menjadi tegangan searah. Tegangan 12V tersebut dialirkan langsung ke modul relay untuk mengendalikan perangkat aktuator seperti heater, humidifier, dan kipas. Selain itu, jalur tegangan juga digunakan untuk memberi daya ke Arduino Mega 2560, baik melalui pin Vin maupun jack DC, yang kemudian diregulasi internal menjadi 5V untuk keperluan mikrokontroler, sensor, dan perangkat berdaya rendah lainnya. Dengan konfigurasi ini, sistem dapat bekerja secara otomatis dan efisien tanpa memerlukan sumber daya tambahan, karena satu power supply telah cukup untuk menyuplai semua kebutuhan listrik baik komponen kontrol maupun aktuator berdaya menengah hingga tinggi secara terpusat.



Gambar 2. 8 LCD 20x4

2.3. Analisis Stakeholder

Dalam penelitian ini, sistem dirancang untuk membantu mempercepat dan menstabilkan proses fermentasi tempe gambus melalui pengendalian suhu dan

kelembaban secara otomatis. Alat ini ditujukan untuk memberikan solusi yang praktis dan berkelanjutan bagi proses produksi mitra UMKM.

Stakeholder utama dari produk ini adalah Mitra UMKM tempe gambus, yang akan secara langsung menggunakan alat tersebut dalam proses produksi. Dengan hadirnya sistem otomatis yang mudah dioperasikan, UMKM dapat memperoleh sejumlah manfaat seperti peningkatan efisiensi waktu, stabilitas mutu produk, juga pengurangan risiko kegagalan produksi.

Kemudian karyawan UMKM, sebagai pengguna operasional juga menjadi *stakeholder* penting. Sistem ini dilengkapi antarmuka yang sederhana, sehingga memudahkan karyawan dalam pemantauan suhu dan kelembaban secara *real time* tanpa memerlukan keahlian teknis khusus. Selain itu juga termasuk P\pelanggan akhir, meskipun tidak secara langsung dalam penggunaan alat. Produk tempe gambus yang dihasilkan akan memiliki kualitas yang lebih konsisten dan ketersediaan yang lebih terjamin, sehingga berdampak positif terhadap kepuasan konsumen dan keberlanjutan bisnis.

2.4. Analisis Aspek yang mempengaruhi Sistem

Aspek-aspek yang mempengaruhi sistem ini meliputi:

1. **Ekonomi:** Aspek ekonomi menjadi pertimbangan utama dalam perancangan sistem ini. Biaya pembuatan alat dirancang agar tetap terjangkau oleh pelaku UMKM yang umumnya memiliki keterbatasan modal. Selain itu, sistem ini menggunakan komponen dengan harga terjangkau dan hemat energi untuk mengurangi biaya operasional secara keseluruhan. Dengan efisiensi dalam aspek pembiayaan, alat ini diharapkan menjadi solusi yang ekonomis namun tetap mampu mempertahankan kualitas proses fermentasi secara konsisten.
2. **Sosial:** Secara sosial, sistem ini dirancang untuk mendukung aktivitas produksi UMKM tempe gambus dengan cara memberikan kemudahan operasional, mempersingkat durasi waktu, juga kestabilan mutu produk. Dengan fermentasi yang lebih terkontrol, kualitas tempe yang dihasilkan menjadi lebih konsisten, sehingga dapat meningkatkan kepercayaan konsumen terhadap produk yang ditawarkan.
3. **Budaya:** Produksi tempe gambus merupakan bagian dari budaya lokal yang telah diwariskan secara turun-temurun. Oleh karena itu, sistem ini tidak dimaksudkan untuk menggantikan tradisi, melainkan menjadi sarana untuk memperkuat dan melestarikan praktik budaya melalui sentuhan teknologi. Dengan menggabungkan pendekatan modern dalam proses tradisional, sistem ini menjadi jembatan antara pelestarian budaya dan peningkatan kualitas produksi secara terukur, sehingga tradisi tetap hidup dan relevan di era industri yang modern.
4. **Teknologi:** Aspek teknologi mencakup pemilihan dan integrasi komponen sistem seperti sensor, mikrokontroler, dan aktuator. Komponen yang

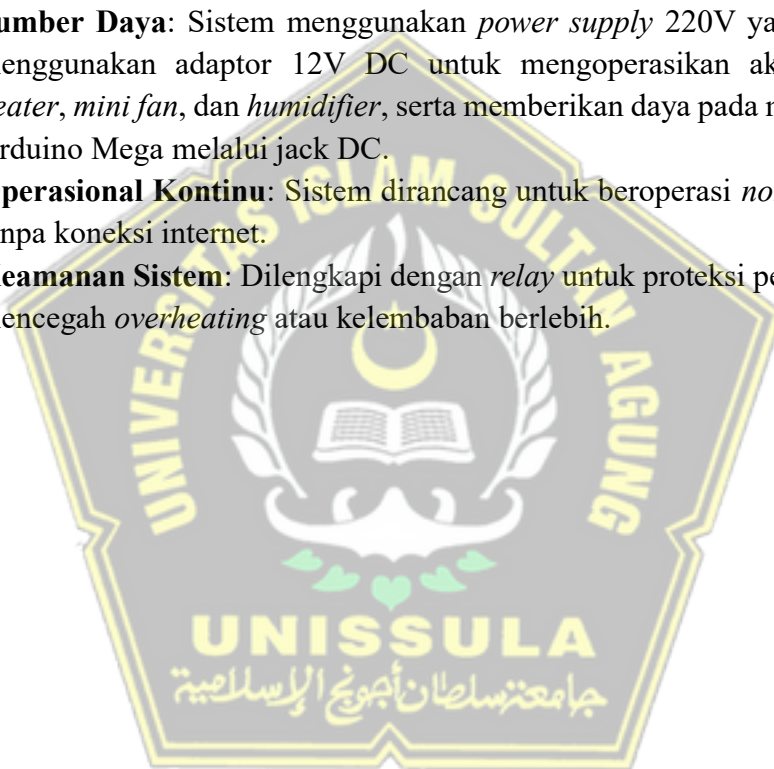
digunakan bersifat mudah diakses, mudah dirawat, dan kompatibel dengan kebutuhan sistem, sehingga mendukung kestabilan sistem dalam jangka panjang. Pendekatan berbasis teknologi ini tidak hanya meningkatkan akurasi dan responsivitas dalam pengendalian suhu dan kelembaban, tetapi juga memungkinkan sistem bekerja secara otomatis dan efisien tanpa pengawasan terus-menerus.

5. **Lingkungan:** Aspek lingkungan menjadi tantangan yang harus diatasi untuk mendukung produksi tempe gambus yang optimal. Lingkungan tempat produksi yang tidak selalu stabil, terutama di wilayah tropis seperti Indonesia, menimbulkan tantangan tersendiri dalam menjaga parameter fermentasi. Sistem ini dirancang agar mampu beradaptasi terhadap fluktuasi suhu dan kelembaban lingkungan, sehingga proses fermentasi tetap berjalan optimal meskipun kondisi eksternal tidak ideal. Dengan kemampuan menyesuaikan diri terhadap perubahan cuaca atau musim, sistem ini membantu menciptakan kondisi inkubasi yang stabil, sehingga kualitas produk tetap konsisten dari waktu ke waktu.

2.5. Spesifikasi Sistem

1. **Fungsi:** Mengontrol suhu dan kelembaban otomatis pada proses fermentasi tempe gambus yang diharapkan dapat lebih cepat dan optimal.
2. **Dimensi Alat:** Alat dirancang dengan dimensi utama sebesar 60x40x50 cm, dengan struktur utama terbuat dari bahan *Aluminium Composite Panel* (ACP) untuk menjaga suhu dan kelembaban optimal, serta rangka *hollow* yang kokoh sebagai penopang; sementara kotak kontrol dirancang terpisah untuk memudahkan pengoperasian dan pemeliharaan.
3. **Mikrokontroler:** Menggunakan Arduino Mega2560 sebagai pengendali utama untuk mengelola proses fermentasi secara otomatis, memastikan sistem berjalan stabil dan efisien. Arduino Mega memungkinkan pengelolaan banyak perangkat *input* dan *output*.
4. **Sensor Input:** Menggunakan sensor DHT22 untuk membaca suhu (-40°C hingga 80°C dengan akurasi $\pm 0.5^\circ\text{C}$) dan kelembaban (0-100% RH dengan akurasi $\pm 2-5\%$), dengan tegangan inputnya 5V.
5. **Komponen Output:**
 - **Display:** Menggunakan LCD 20x4 untuk menampilkan informasi suhu dan kelembaban secara real-time.
 - **Heater PTC:** Mengatur suhu agar tetap berada dalam rentang optimal selama proses fermentasi tempe gambus dengan cara menghasilkan panas yang stabil dan aman,
 - **Humidifier:** Meningkatkan kelembaban udara dalam ruang fermentasi saat di bawah nilai yang diinginkan.

- **Mini Fan:** Kedua *fan* bekerja untuk menjaga suhu dan sirkulasi udara; *fan in* mendistribusikan udara panas dan kelembaban secara merata, sementara *fan out* menurunkan suhu dan kelembaban ketika terdeteksi lebih tinggi dari batas yang ditentukan.
6. **Metode Kontrol:** Sistem menggunakan metode *Moving Average* untuk meratakan pembacaan suhu dan kelembaban guna mengurangi fluktuasi data yang bersifat sementara. Metode ini dikombinasikan dengan pendekatan histeresis sebagai batas toleransi, agar perangkat tidak sering menyala dan mati secara berulang. Proses Kontrol dilakukan menggunakan logika pemrograman *if else* sederhana.
 7. **Sumber Daya:** Sistem menggunakan *power supply* 220V yang diturunkan menggunakan adaptor 12V DC untuk mengoperasikan aktuator seperti *heater*, *mini fan*, dan *humidifier*, serta memberikan daya pada mikrokontroler Arduino Mega melalui jack DC.
 8. **Operasional Kontinu:** Sistem dirancang untuk beroperasi *non-stop* 24 jam, tanpa koneksi internet.
 9. **Keamanan Sistem:** Dilengkapi dengan *relay* untuk proteksi perangkat untuk mencegah *overheating* atau kelembaban berlebih.



BAB 3. USULAN SOLUSI

3.1. Usulan Solusi 1

Solusi pertama yang diusulkan adalah sistem kontrol otomatis berbasis mikrokontroler Arduino Mega2560 untuk mengatur suhu dan kelembaban secara *real time* dalam proses fermentasi tempe gambus. Sistem ini dirancang untuk mengatasi permasalahan fermentasi konvensional yang rentan terhadap ketidakstabilan lingkungan. Sistem ini memanfaatkan sensor DHT22, yang digunakan sebagai input untuk mengukur suhu dan kelembaban secara bersamaan. Data yang diperoleh diproses oleh Arduino sebagai pusat kendali sistem, untuk mengendalikan konerja aktuator seperti *heater*, *humidifier*, *fan in*, dan *fan out* secara otomatis sesuai logika pengendalian yang telah diprogram.

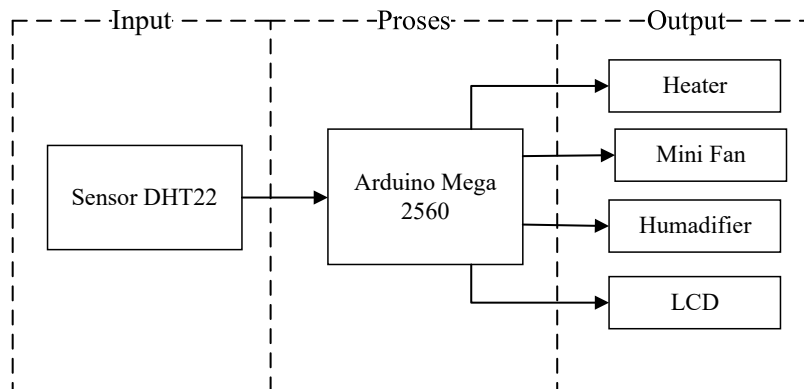
Kemudian LCD 20x4 digunakan sebagai tampilan output yang memberikan informasi suhu, kelembaban, dan status aktuator kepada pengguna secara langsung. Algoritma kontrol sistem menggabungkan logika pemrograman *if-else*, metode *moving average* untuk meredam fluktuasi pembacaan sensor, serta histeresis sebagai batas toleransi kerja aktuator agar tidak sering menyala dan mati secara berulang.

3.1.1 Desain Sistem 1

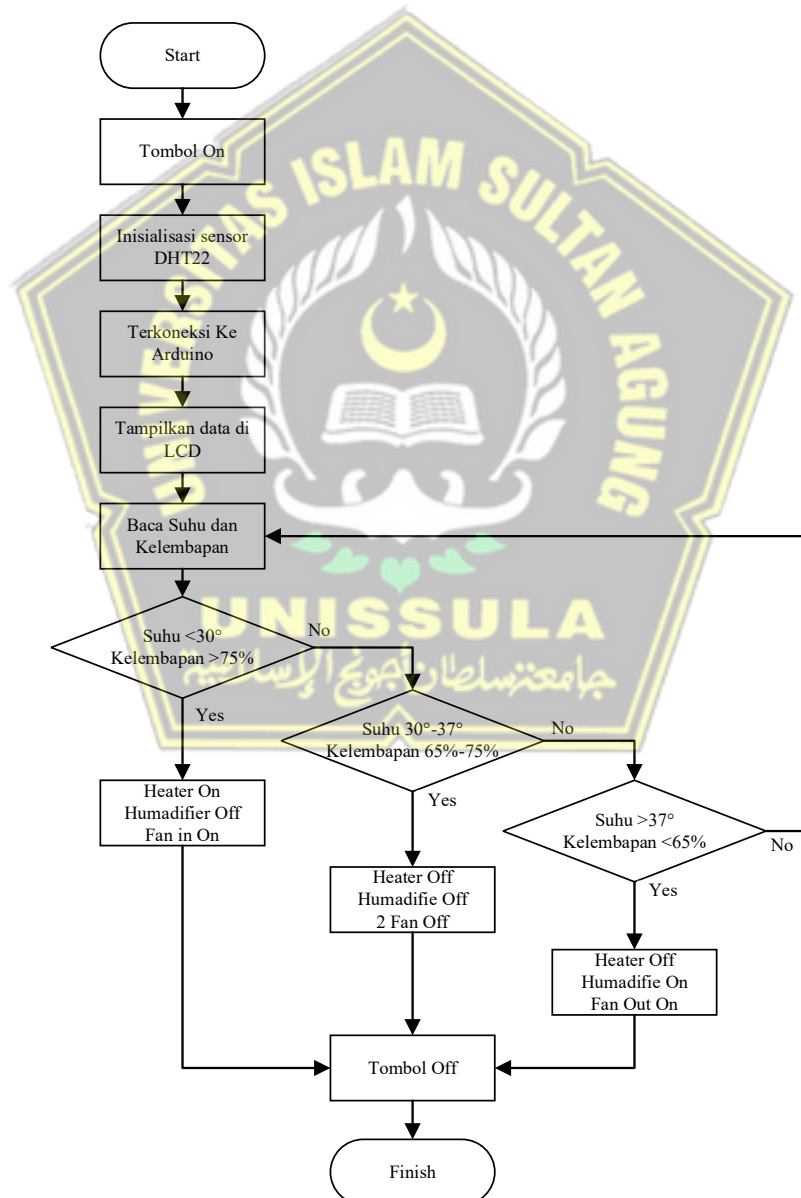
Desain sistem ini terdiri dari tiga blok utama: *input*, pemrosesan, dan *output*. Sensor DHT22 bertindak sebagai *input* yang akan membaca suhu dan kelembaban ruang fermentasi secara berkala. Arduino Mega2560 kemudian memproses data tersebut untuk mengambil keputusan aktivasi aktuator. Misalnya, saat suhu dibawah 30°C, *heater* dan *fan in* akan aktif. Ketika suhu melebihi 37°C, *heater* dimatikan dan *fan out* diaktifkan untuk menurunkan suhu. Logika serupa diterapkan untuk pengaturan kelembaban.

Output dari sistem yaitu pengaktifan aktuator itu sendiri yang akan bekerja sesuai kondisi aktual suhu dan kelembaban untuk menjaga rentang ideal fermentasi (30–37°C dan 65–75% RH). *Output* juga termasuk LCD 20x4 yang menampilkan informasi aktual dari alat agar dapat dipantau langsung oleh pengguna. Seluruh sistem dirancang dengan kemudahan operasional, agar dapat digunakan oleh pelaku UMKM yang tidak memiliki latar belakang teknis.

Flowchart menggambarkan alur kerja sistem yang dimulai dengan inisialisasi, pembacaan data oleh sensor, pemrosesan logika kendal, hingga monitoring guna mencapai tujuan kontrol otomatis. Seluruh proses ditampilkan pada diagram blok (Gambar 3.1) dan flowchart sistem kerja (Gambar 3.2 untuk memeberikan visualisasi alur kerja sistem.



Gambar 3. 1 Diagram blok usulan desain sistem 1



Gambar 3. 2 Flow chart usulan desain sistem 1

Tabel 3. 1 Fungsi dan Kegunaan Komponen Desain 1

No	Komponen	Fungsi
1	Arduino Mega2560	Komponen utama, sebagai pusat kendali sistem. Bertugas mengolah data sensor dan mengaktifkan aktuator agar bekerja sesuai kebutuhan. Dengan kapasitas memori yang besar, mikrokontroler ini sangat cocok untuk mengelola sistem yang kompleks.
2	Sensor DHT22	Digunakan untuk membaca atau mendeteksi suhu dan kelembaban di dalam ruang fermentasi. Sensor ini memiliki tingkat akurasi yang tinggi sehingga dapat memastikan kestabilan kondisi lingkungan fermentasi.
3	Heater Air PTC	Sebagai pemanas untuk menjaga suhu udara dalam ruang fermentasi agar tetap berada dalam rentang ideal, yaitu 30-37°C. Heater jenis PTC (Positive Temperature Coefficient) memiliki karakteristik pemanasan yang stabil dan aman karena daya pemanasannya berkurang secara otomatis saat suhu mencapai batas tertentu.
4	Mini Fan 12V	Digunakan untuk mendistribusikan panas dari heater secara merata di seluruh ruang fermentasi. Selain itu, fan ini membantu menjaga sirkulasi udara, juga membuang udara panas/lembab berlebih didalam ruang fermentasi.
5	Humidifier/Mist Maker	Bertugas mengubah air menjadi uap udara, berfungsi untuk meningkatkan kelembaban udara di dalam ruang fermentasi saat nilai dibawah batas minimum agar tetap berada dalam kisaran 65-75%.
6	LCD 20x4	Menampilkan data suhu, kelembaban, dan status alat kepada pengguna secara langsung. Dengan adanya tampilan ini, pengguna dapat memantau kondisi fermentasi secara real-time tanpa harus menggunakan perangkat tambahan lainnya.
7	Relay 4 Channel	Sebagai penghubung mikrokontoler, digunakan untuk mengontrol komponen seperti heater, fan, dan humidifier. Relay bekerja dengan membuka dan menutup aliran listrik menuju aktuator berdasarkan perintah dari Arduino.

3.1.2 Rencana Anggaran Desain Sistem 1

Rincian komponen beserta total estimasi biaya yang dibutuhkan, yaitu sebesar Rp 1.245.000. Biaya ini tergolong ekonomis dan sesuai dengan daya beli UMKM untuk jangka panjang.

Tabel 3. 2 Rencana anggaran pengembangan sistem

No	Item/Pengeluaran	Harga Satuan	Jumlah	Harga Total
1	ACP	190.000	1	190.000
2	<i>Hollow</i>	60.000	1	60.000
3	Sensor DHT22	100.000	1	100.000
4	<i>Heater</i>	140.000	1	140.000
5	<i>Fan</i>	90.000	2	180.000
6	Engsel	15.000	1	15.000
7	Paku Rivet	70.000	1	70.000
8	Plat Aluminium	60.000	1	60.000
9	Arduino Mega	250.000	1	250.000
10	<i>Humidifier</i>	70.000	1	70.000
11	<i>Relay Module</i>	25.000	1	25.000
12	LCD 20x4	50.000	1	50.000
13	Adaptor 12V	20.000	1	20.000
14	2 Way Splitter DC Kabel	15.000	1	15.000
	Total			1.245.000

3.1.3 Analisa Risiko Desain 1

1. Teknis: Sistem ini hanya mengandalkan parameter suhu dan kelembaban tanpa sensor oksigen. Resiko kegagalan fermentasi akibat ketidaksesuaian kadar oksigen diminimalkan melalui sirkulasi udara alami dari fan out. Potensi gangguan data karena fluktuasi sensor ditangani dengan *moving average*.
2. Ekonomi: Biaya sistem relatif lebih rendah, dan lebih terjangkau karena menggunakan komponen umum yang tersedia di pasaran, sehingga lebih cocok untuk UMKM dengan anggaran terbatas. Selain itu kerugian dapat ditekan dengan perawatan berkala dan suku cadang dengan biaya yang rendah. Penghematan biaya ini juga memberikan ruang bagi UMKM untuk mengalokasikan dana untuk pengembangan lain yang mendukung pertumbuhan bisnis mereka.
3. Implementasi: Sistem cukup sederhana untuk proses instalasi atau diprogram ulang jika diperlukan, karena tidak memerlukan kalibrasi kompleks dengan tambahan seperti pada sensor O₂. Dengan risiko keterlambatan implementasi sangat kecil.
4. Sosial dan Budaya: Sistem tetap mempertahankan metode tradisional, hanya menambahkan kontrol otomatis suhu dan kelembaban. Risiko penolakan budaya minim karena alat tidak menggantikan proses produksi, hanya membantu mengondisikan lingkungan fermentasi.

3.1.4 Pengukuran Performa

Pengukuran performa sistem pada desain 1 akan diukur berdasarkan kemampuan alat dalam mendukung efektivitas dengan menjaga suhu dan kelembaban ruang fermentasi dalam rentang optimal selama proses fermentasi tempe gambus. Performa difokuskan pada kestabilan parameter lingkungan, kecepatan respons sistem, dan efisiensi kerja aktuator, serta pengamatan terhadap tempe yang dihasilkan dari sistem otomatis dibandingkan dengan metode konvensional, dengan menilai aspek visual tempe dan durasi kematangan. Sistem diuji selama ± 36 jam dalam kondisi pengujian awal dan fermentasi aktif, untuk memastikan suhu dan kelembaban berada dalam rentang $30\text{--}37^\circ\text{C}$ dan $65\text{--}75\%$ RH.

Data sensor dibaca dan diolah menggunakan metode moving average atau dicatat saat ditampilkan pada LCD untuk mengamati kestabilannya. Respons sistem diuji dengan melihat apakah aktuator dapat aktif dalam waktu kurang dari 2 detik setelah deteksi sensor. Selain itu, efisiensi juga dinilai dari jumlah siklus ON/OFF aktuator, karena switching yang terlalu sering dapat menunjukkan ketidakefisienan logika kontrol atau sensitivitas sensor yang berlebihan. Tampilan LCD juga diuji kestabilan dan kejelasan informasinya untuk memastikan bahwa pengguna selalu mendapatkan informasi *real-time* yang akurat. Konsistensi performa diuji melalui pengamatan berulang beberapa kali siklus fermentasi, memastikan alat bekerja sesuai tujuan yang dirancang yaitu stabilitas suhu dan kelembaban harus terjaga dalam rentang yang ideal, yakni $30\text{--}37^\circ\text{C}$ untuk suhu dan $65\text{--}75\%$ untuk kelembaban dengan harapan durasi fermentasi dapat dipercepat.

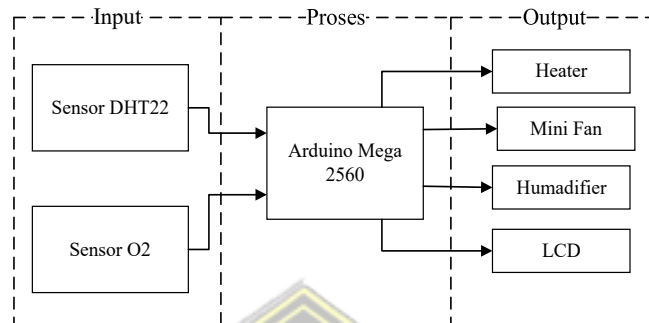
3.2. Usulan Solusi 2

Usulan solusi 2 merupakan pengembangan dari desain pertama dengan penambahan sensor oksigen (O_2) untuk mengontrol kadar oksigen dalam ruang fermentasi. Komponen utama lainnya tetap dipertahankan, yaitu sensor DHT22, mikrokontroler Arduino Mega2560, *heater*, *humidifier*, dan dua *mini fan*. Tambahan sensor O_2 memungkinkan sistem untuk mengukur dan mengatur parameter oksigen agar tetap dalam rentang optimal ($20\text{--}21\%$) yang diperlukan bagi aktivitas jamur fermentasi. Sistem ini tetap menampilkan informasi suhu, kelembaban, dan kadar oksigen melalui LCD 20×4 . Logika kontrol menggunakan prinsip yang serupa dengan solusi pertama, namun ditambahkan pengaturan fan berdasarkan kadar oksigen yang terdeteksi.

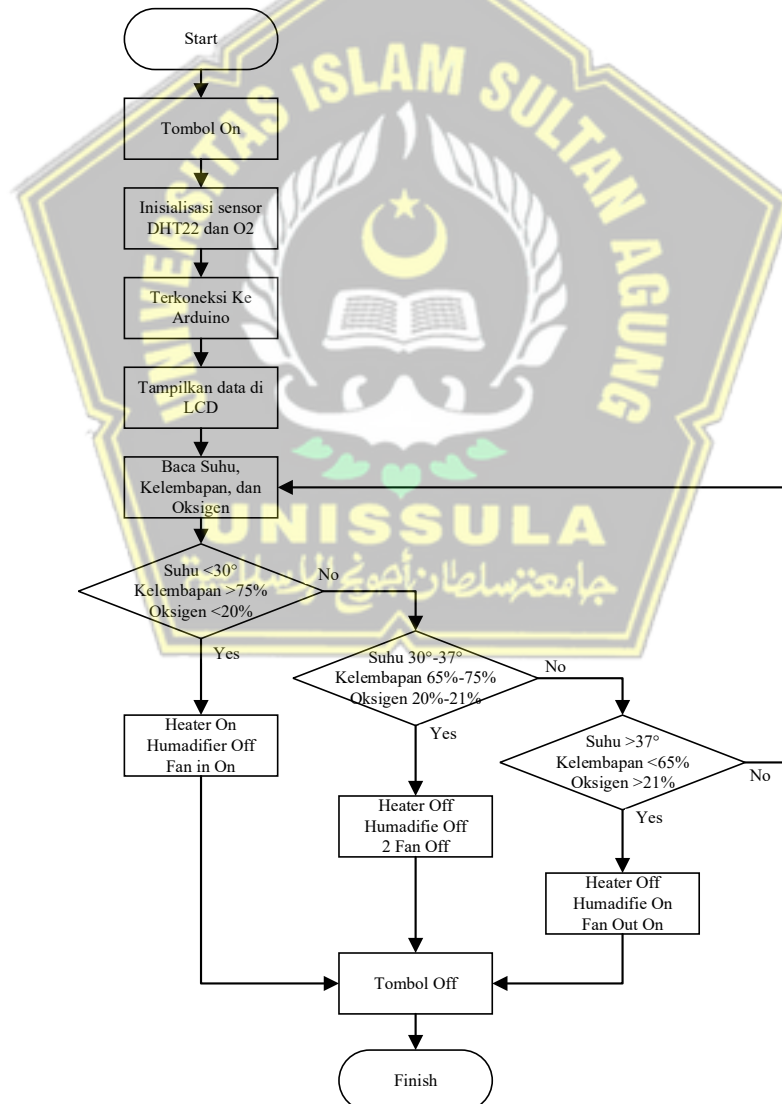
3.2.1 Desain Sistem 2

Desain sistem ini terdiri juga dari tiga blok utama: input, pemrosesan, dan output. Sama halnya dengan desain sistem 1, sensor DHT22 bertindak sebagai input yang akan membaca suhu dan kelembaban ruang fermentasi secara berkala. Namun input pada desain 2 ditambahkan dengan sensor O_2 yang akan membaca kadar oksigen didalam alat fermentasi. Arduino Mega2560 bertugas memproses ketiga data tersebut dan mengatur kinerja aktuator. Jika oksigen terlalu rendah, fan out

diaktifkan untuk meningkatkan pertukaran udara. Data ditampilkan di LCD secara real-time agar operator dapat memantau kondisi fermentasi secara menyeluruh. Seluruh proses ditunjukkan pada diagram blok (Gambar 3.1) dan flowchart sistem kerja (Gambar 3.2 untuk memeberikan visualisasi alur kerja sistem.



Gambar 3. 3 Diagram blok usulan desain sistem 2



Gambar 3. 4 Flow chart usulan desain sistem 2

Tabel 3. 3 Fungsi dan Kegunaan Komponen Desain 2

No	Komponen	Fungsi
1	Arduino Mega2560	Komponen utama, sebagai pusat kendali sistem. Bertugas mengolah data sensor dan mengaktifkan aktuator agar bekerja sesuai kebutuhan. Dengan kapasitas memori yang besar, mikrokontroler ini sangat cocok untuk mengelola sistem yang kompleks.
2	Sensor DHT22	Digunakan untuk membaca atau mendeteksi suhu dan kelembaban di dalam ruang fermentasi. Sensor ini memiliki tingkat akurasi yang tinggi sehingga dapat memastikan kestabilan kondisi lingkungan fermentasi.
3	Sensor O ₂	Digunakan untuk memantau kadar oksigen dalam ruang fermentasi untuk memastikan sirkulasi udara yang memadai, sehingga proses fermentasi berjalan optimal tanpa kekurangan oksigen.
4	Heater Air PTC	Sebagai pemanas untuk menjaga suhu udara dalam ruang fermentasi agar tetap berada dalam rentang ideal, yaitu 30-37°C. Heater jenis PTC (Positive Temperature Coefficient) memiliki karakteristik pemanasan yang stabil dan aman karena daya pemanasannya berkurang secara otomatis saat suhu mencapai batas tertentu.
5	Mini Fan 12V	Digunakan untuk mendistribusikan panas dari heater secara merata di seluruh ruang fermentasi. Selain itu, fan ini membantu menjaga sirkulasi udara, juga membuang udara panas/lembab berlebih didalam ruang fermentasi.
6	Humidifier/Mist Maker	Bertugas mengubah air menjadi uap udara, berfungsi untuk meningkatkan kelembaban udara di dalam ruang fermentasi saat nilai dibawah batas minimum agar tetap berada dalam kisaran 65-75%.
7	LCD 20x4	Menampilkan data suhu, kelembaban, dan status alat kepada pengguna secara langsung. Dengan adanya tampilan ini, pengguna dapat memantau kondisi fermentasi secara real-time tanpa harus menggunakan perangkat tambahan lainnya.
8	Relay 4 Channel	Sebagai penghubung mikrokontoler, digunakan untuk mengontrol komponen seperti heater, fan, dan humidifier. Relay bekerja dengan membuka dan menutup aliran listrik menuju aktuator berdasarkan perintah dari Arduino.

3.2.2 Rencana Anggaran Desain Sistem 2

Dengan penambahan sensor O₂, estimasi total biaya yang dibutuhkan menjadi Rp 1.945.000. Harga sensor O₂ yang cukup tinggi menjadi salah satu faktor pembeda yang signifikan. Rincian biaya disajikan pada Tabel 3.4 berikut.

Tabel 3. 4 Rencana anggaran pengembangan sistem

No	Item/Pengeluaran	Harga Satuan	Jumlah	Harga Total
1	ACP	190.000	1	190.000
2	<i>Hollow</i>	60.000	1	60.000
3	Sensor DHT22	100.000	1	100.000
4	Sensor O ₂	700.000	1	700.000
5	<i>Heater</i>	140.000	1	140.000
6	<i>Fan</i>	90.000	2	180.000
7	Engsel	15.000	1	15.000
8	Paku Rivet	70.000	1	70.000
9	Plat Aluminium	60.000	1	60.000
10	Arduino Mega	250.000	1	250.000
11	<i>Humidifier</i>	70.000	1	70.000
12	<i>Relay Module</i>	25.000	1	25.000
13	LCD 20x4	50.000	1	50.000
14	Adaptor 12V	20.000	1	20.000
15	2 Way Splitter DC Kabel	15.000	1	15.000
Total				1.945.000

3.2.3 Analisa Risiko Desain 2

1. Teknis: Sistem ini menggunakan tambahan sensor O₂, meski akurasi kontrol lingkungan menjadi lebih baik namun kompleksitas sistem meningkat. Resiko kesalahan pembacaan oksigen harus diantisipasi dengan kalibrasi berkala. Kompleksitas yang lebih tinggi juga berarti sistem memerlukan perawatan yang lebih sering untuk menjaga kinerja optimal.
2. Ekonomi: Dengan adanya penambahan sensor, membuat biaya pengadaan dan perawatan sistem lebih tinggi dan meningkat secara signifikan. Meskipun biaya tambahan ini dapat dibenarkan oleh manfaat yang diberikan, namun kurang cocok bagi UMKM dengan anggaran terbatas yang mungkin enggan untuk mengadopsi desain ini. Resiko pengeluaran tak terduga dapat terjadi bila sensor oksigen rusak.
3. Implementasi: Meskipun penambahan sensor O₂ memberikan kontrol lingkungan yang lebih baik, proses instalasi dan pengaturan awal sistem memerlukan waktu lebih lama kalibrasi tambahan untuk sensor O₂. Hal ini

dapat menjadi kendala dalam implementasi cepat, karena proses instalasi membutuhkan keahlian atau pelatihan khusus untuk operator.

4. Sosial dan Budaya: Sistem dengan sensor O₂ memberikan kepercayaan lebih besar kepada pengguna dalam mengontrol fermentasi tempe gembus. Kompleksitas sistem memerlukan pelatihan tambahan bagi mitra dengan latar belakang non teknis sehingga dapat menimbulkan resistensi awal karena penggunaan teknologi yang lebih canggih ini.

3.2.4 Pengukuran Performa

Performa Pengukuran performa sistem pada desain 2 dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas dengan tambahan sensor oksigen dalam menjaga kualitas lingkungan fermentasi secara lebih presisi. Performa sistem dinilai berdasarkan kemampuan alat dalam mempertahankan tiga parameter penting—suhu, kelembaban, dan kadar oksigen agar tetap berada dalam rentang optimal sepanjang proses fermentasi. Penambahan sensor O₂ memungkinkan sistem mendeteksi penurunan kadar oksigen dan merespons secara adaptif melalui aktivasi *fan out*. Fokus pengukuran ditujukan pada kestabilan kadar O₂ yang harus berada di kisaran 20–21%, sinkronisasi kerja aktuator terhadap perubahan nilai lingkungan, serta pengaruh keseluruhan sistem terhadap kualitas tempe yang dihasilkan, baik dari aspek visual, maupun durasi kematangan dibandingkan metode konvensional.

Selama pengujian berlangsung selama ± 36 jam, data sensor dibaca dan dicatat pada tampilan LCD, memastikan keterpaduan informasi suhu, kelembaban, dan kadar oksigen dapat ditampilkan secara bersamaan dan *real-time*. Evaluasi juga dilakukan terhadap respons sistem, terutama dalam menghadapi perubahan mendadak kadar O₂, dengan waktu aktivasi aktuator yang diharapkan kurang dari 2 detik. Selain itu, efisiensi kerja aktuator diamati dari akktuator agar tidak terjadi *switching* berlebih yang berpotensi merusak kestabilan suhu dan kelembaban. Konsistensi sistem ini juga diuji melalui pengamatan berulang pada beberapa siklus fermentasi

3.3. Analisis dan Penentuan Usulan Solusi/Desain Terbaik

Setelah dilakukan analisis terhadap kedua usulan solusi yang diajukan, yaitu Desain 1 dan Desain 2, dapat disimpulkan bahwa kedua solusi tersebut memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. Desain 1 dipilih sebagai solusi terbaik untuk diimplementasikan dalam sistem fermentasi otomatis tempe gembus. Alasan pemilihan ini didasarkan pada pertimbangan biaya, kemudahan penggunaan, dan kesesuaian dengan kondisi UMKM mitra.

Desain 1 mampu menjaga suhu dan kelembaban dalam rentang optimal menggunakan pengendalian suhu yang sederhana namun tetap akurat dan stabil, meski tanpa adanya sensor oksigen. Sistem ini juga lebih ekonomis dengan total biaya yang lebih rendah yaitu Rp 1.245.000, dibandingkan dengan desain 2 yang melibatkan biaya tambahan untuk sensor O₂ dengan total biaya Rp 1.945.000. Juga

lebih praktis dibandingkan desain 2 yang memerlukan pelatihan tambahan untuk mitra karena sistem yang lebih kompleks. Dengan mempertimbangkan anggaran dan sumber daya manusia di UMKM, maka solusi berbasis sensor suhu dan kelembaban saja dinilai sudah cukup untuk meningkatkan produktivitas dan efisiensi proses fermentasi. Desain 1 juga terbukti lebih mudah dalam hal pemasangan, pengoperasian, dan pemeliharaan. Fitur-fitur seperti tampilan LCD dan logika kontrol sederhana memudahkan pengguna dari latar belakang non-teknis untuk mengoperasikan sistem secara mandiri.

3.4. Gantt Chart

Untuk mendukung kelancaran proses penyusunan sistem pada Tugas Akhir 1 dan 2, diperlukan perencanaan dan manajemen waktu yang terstruktur agar seluruh tahapan pekerjaan dapat terselesaikan tepat waktu. Perencanaan ini disusun dalam bentuk Gantt Chart sebagaimana ditampilkan pada Tabel 3.5. Gantt Chart memuat pembagian waktu, aktivitas selama dua semester, dengan penjadwalan yang disusun secara realistis serta menghindari penumpukan tugas pada periode yang sama. Penyusunan diagram ini bertujuan untuk memastikan distribusi tugas yang proporsional dan efisien sepanjang proses pelaksanaan.

Tabel 3. 5 Gantt Chart

No	Kegiatan/ Capaian	Bulan Ke-											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Penentuan topik	S											
2	Survei dan Identifikasi Masalah	IO	IO										
3	Mencari literatur	I	I										
4	Penentuan solusi 1		S										
5	Penentuan solusi 2		IU	IU									
6	Penentuan spesifikasi			S									
7	Perancangan sistem				S								
8	Mengumpulkan seluruh ide solusi dan finalisasi sistem				S	S							
9	Pengumpulan proposal Tugas Akhir 1/ Capstone Project dan Seminar					S							
10	Pembelian alat dan bahan						OU	OU					
11	Perencanaan sistem sesuai proposal							S	S	S			
12	Testing dan validasi										S	S	
13	Expo dan pengumpulan laporan akhir												S

Keterangan I=Riyanti, O=Rozi, U=Udin, S=semua

3.5. Realisasi Pelaksanaan Tugas Akhir 1

Tabel 3. 6 Realisasi aktivitas pelaksanaan Tugas Akhir 1

No	Hari, Tanggal, Durasi (jam atau hari)	Aktivitas	Pelaksana
1	Jumat, 20 September 2024	Pembentukan kelompok untuk proyek capstone	Fakultas
2	Jumat, 27 September 2024	Melakukan diskusi dan menetapkan topik proyek capstone design	Semua Anggota
3	Jumat, 04 Oktober 2024	Identifikasi masalah dan penentuan solusi awal sementara	Riyanti, Rozi
4	Kamis, 10 Oktober 2024	Melakukan pencarian referensi penelitian yang sudah ada	Riyanti
5	Jumat, 11 Oktober 2024	Penentuan Solusi 1 dan menentukan spesifikasi alat yang akan digunakan	Semua Anggota
6	Jumat, 18 Oktober 2024	Mencari mitra terkait dan menyusun pertanyaan untuk wawancara	Rozi, Udin
7	Kamis, 24 Oktober 2024	Melakukan wawancara dengan mitra dan mulai menyusun laporan proposal	Rozi, Riyanti
8	Jumat, 25 Oktober 2024	Memulai penyusunan laporan berdasarkan hasil dari wawancara	Riyanti
9	Jumat, 01 November 2024	Menyusun kebutuhan sistem dan Bimbingan laporan Bab 1	Semua Anggota
10	Jumat, 08 November 2024	Pengumpulan ide dan menentukan solusi 2	Semua Anggota
11	Jumat, 15 November 2024	Menentukan spesifikasi rancang bangun alat keseluruhan	Semua Anggota
12	Senin, 26 November 2024	Bimbingan laporan Bab 1-2	Semua Anggota
13	Jumat, 06 Desember 2024	Bimbingan revisi Bab 2	Semua Anggota
14	Selasa, 17 Desember 2024	Bimbingan Laporan Bab 3 dan menentukan desain	Semua Anggota
15	Rabu, 18 Desember 2024	Pembuatan desain dan anggaran dana yang dibutuhkan	Riyanti, Udin
16	Jumat, 20 Desember 2024	Bimbingan laporan revisi Bab 3	Semua Anggota

No	Hari, Tanggal, Durasi (jam atau hari)	Aktivitas	Pelaksana
17	Rabu, 25 Desember	Membuat rancangan rangkaian elektronik	Semua Anggota
18	Jumat, 03 Januari 2025	Menyusun Bab 4	Riyanti
19	Selasa, 07 Januari 2025	Bimbingan Laporan Bab 4	Semua Anggota
20	Kamis, 09 Januari 2025	Finalisasi laporan dan persiapan presentasi proposal, serta Pendaftaran untuk seminar proposal	Semua Anggota
21	Jumat, 10 Januari 2025	Pelaksanaan seminar proposal	Semua Anggota



BAB 4. HASIL RANCANGAN DAN METODE PENGUKURAN

4.1. Hasil Rancangan Sistem

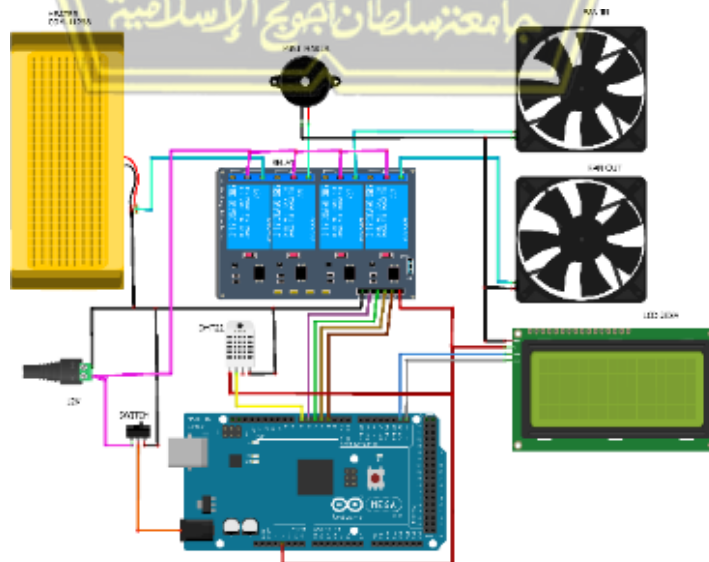
Pada bagian ini, proses perancangan sistem ini mencakup tiga bagian utama, yaitu rangkaian elektronik, desain tiga dimensi (3D), dan antarmuka *software* yang digunakan. Disusun untuk mendukung proses pembuatan alat fermentasi tempe gambus otomatis dengan mempertimbangkan aspek fungsionalitas, kestabilan lingkungan, kemudahan pengoperasian, serta kompatibilitas untuk pengembangan lebih lanjut. Sistem ini dirancang dengan pendekatan terintegrasi antara perangkat keras dan lunak untuk mengontrol suhu dan kelembaban selama proses fermentasi secara *rel-time*.

4.1.1 Rangkaian elektronik

Rangkaian elektronik yang dikembangkan terdiri atas sub sistem *input*, proses, dan *output*. Sensor DHT22 sebagai *input* utama digunakan untuk membaca parameter suhu dan kelembaban udara dalam ruang fermentasi. Sensor ini terhubung ke pin digital Arduino Mega2560 dan menerima catu daya dari pin 5V Arduino. Mikrokontroler akan memproses data digital dari sensor untuk menentukan kendali terhadap aktuator.

Aktuator yang digunakan meliputi *heater* PTC, *humidifier*, *fan in*, dan *fan out*. Seluruh aktuator dikendalikan menggunakan *relay* 4 channel yang dikontrol oleh Arduino melalui sinyal logika *HIGH* dan *LOW*. LCD 20x4 berkomunikasi dengan Arduino melalui antarmuka I2C dan digunakan untuk menampilkan nilai suhu, kelembaban, dan status aktuator secara *real time*.

Gambar 4.1 merupakan rancangan elektronik sistem pengendalian suhu dan kelembaban otomatis yang dirancang menggunakan *software* *Fritzing* untuk menggambarkan hubungan antara komponen elektronika, dengan rincian disajikan pada Tabel 4.1.



Gambar 4. 1 Skema rangkaian elektronik sistem

Tabel 4. 1 Komponen rangkaian elektronik sistem

No	Item/Pengeluaran
1	Arduino Mega2560
2	Sensor DHT22
3	Adaptor 12 V
4	<i>Switch on-off</i>
5	<i>Relay 4 Channel</i>
6	LCD 20x4
7	<i>Heater</i>
8	<i>2 Mini fan</i>
9	<i>Humadifier</i>

Sistem menggunakan Arduino Mega 2560 sebagai mikrokontroler atau pusat kendal memiliki banyak pin dengan beberapa macam pin didalamnya mulai dari analog hingga digital. Terdapat jalur dengan warna pink terhubung tegangan 12V, Jalur merah terhubung tegangan 5V, jalur hitam sebagai ground, dan warna lainnya sebagai jalur sinyal data atau kontrol. Berikut adalah penjelasan komponen yang ada pada sistem, dimana seluruh sistem dirancang dengan konfigurasi sebagai berikut:

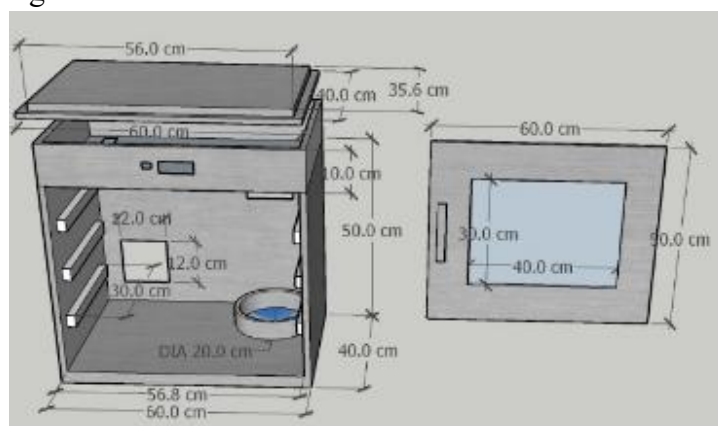
1. Sensor HDT22 (Sensor Suhu dan Kelembaban)
 - Vcc: Terhubung ke pin +5V keluaran dari Arduino Mega 2560
 - Data: Terhubung ke pin 7 digital Arduino
 - Gnd: Terhubung ke pin GND
2. Modul *Relay 4-Channel*
 - Relay ini digunakan untuk mengontrol 4 aktuator, Masing-masing relay terhubung ke perangkat eksternal melalui pin NO (*Normally Open*) dan COM (*Common*) untuk tegangan eksternal
 - *Relay 1 (Heater)*: Terhubung ke pin 6 digital Arduino
 - *Relay 2 (Humadifier)*: Terhubung ke pin 5 digital Arduino
 - *Relay 3 (Fan IN)*: Terhubung ke pin 4 digital Arduino
 - *Relay 4 (Fan Out)*: Terhubung ke pin 3 digital Arduino
3. Aktuator
 - *Vcc Heater*: Terhubung ke NO *relay 1* (Dengan *power supply* eksternal 12V di COM *Relay*)
 - *Vcc Humadifier*: Terhubung ke NO *relay 2* (Dengan *power supply* eksternal 12V di COM *Relay*)
 - *Vcc Fan IN*: Terhubung ke NO *relay 3* (Dengan *power supply* eksternal 12V di COM *Relay*)
 - *Vcc Fan Out*: Terhubung ke NO *relay 4* (Dengan *power supply* eksternal 12V di COM *Relay*)

- Semua Gnd: Terhubung ke satu jalur hitam untuk Ground
4. LCD 20x4 dengan Modul I2C
 - SDA: Terhubung ke pin 20 (SDA) Arduino
 - SCL: Terhubung ke pin 21 (SCL) Arduino
 - Vcc: Terhubung ke pin 5V Arduino (Jalur Merah)
 - Gnd: Terhubung ke pin Gnd Arduino (Jalur Hitam)
 5. *Power Supply* (Adaptor 12V)
 - Vcc: Terhubung ke *input* saklar *switch* untuk menghidupkan dan mematikan sistem
 - Gnd: Penyedia ground yang terhubung ke seluruh ground sistem
 6. *Switch*
 - *Input* (Vcc): Terhubung ke *power supply* dari adaptor 12V
 - *Output*: Terhubung ke *jack* arduino dan tegangan eksternal pada *relay* untuk distribusi ke sistem
 - Gnd: Terhubung ke jalur hitam ground.

4.1.2 Desain tiga dimensi (3D)

Desain fisik sistem berupa desain 3D yang dibuat dengan mempertimbangkan efisiensi ruang, kemudahan perawatan, dan ketahanan perangkat dan jangka waktu operasi yang panjang. Desain 3D sistem pada gambar 4.2, dapat dilihat dimana dimensi fisik inkubator utama adalah 60cm x 40cm x 50 cm, dengan pintu depan yang dilengkapi jendela transparan berukuran 40cm x 30cm untuk memantau kondisi di dalam tanpa mengganggu kestabilan suhu dan kelembaban.

Sensor DHT22 diposisikan di dalam kotak utama ruang fermentasi pada titik tertentu untuk mendeteksi suhu dan kelembaban lingkungan. *Heater* diletakkan dibagian atas dan *humidifier* diletakkan di bagian bawah untuk membantu penyebaran panas dan kelembaban ke seluruh ruang. *Fan in* diletakkan di sisi atas dan fan out di sisi bawah untuk membantu sirkulasi agar tidak bertabrakan. LCD diletakkan pada bagian luar box kendali agar pengguna dapat memantau sistem secara langsung.



Gambar 4. 2 Desain 3D sistem

Kemudian pada bagian atasnya terdapat ruang kontrol berukuran 60x40x10 cm dengan tutup di atasnya sehingga memudahkan proses pemeliharaan nantinya, dan bagian depan terdapat LCD dan *switch*, serta satu lubang di belakang untuk kabel yang terhubung ke *power supply*. Bagian dalam inkubator terdiri dari 3 rak yang mudah dicopot pasang untuk menempatkan bahan, serta wadah air atau *humidifier* dengan diameter 20 cm untuk menjaga tingkat kelembaban. Terdapat 2 lubang di atas untuk jalur keluar kabel dari *heater*, dan dua lubang di belakang untuk *fan in* dan *out* sebagai ventilator untuk membantu sirkulasi udara, Desain ini masih dalam tahap pengembangan, dimana dibuat dengan rancangan fisik seperti halnya inkubator otomatis yang dirancang untuk mengatur suhu dan kelembaban.

4.1.3 Software atau interface

Software sitem dikembangkan dengan menggunakan Arduino IDE dan ditulis dalam bahasa C++. Program terdiri dari bagian inisialisasi, pembacaan data sensor, pemrosesan logika kontrol, dan update tampilan LCD. Pengolahan data sensor dilakukan dengan metode *moving average* untuk mengurangi noise dan fluktuasi ekstrem. Logika pengendalian berbasis metode *if-else* untuk mengontrol kapan aktuator seperti aktif atau nonaktif berdasarkan batas suhu dan kelembaban yang telah ditentukan. Metode *moving average* yang dipadukan dengan konsep histeresis digunakan untuk mengurangi fluktuasi, meningkatkan akurasi pembacaan, dan untuk menghindari *switching* berlebih yang bisa merusak komponen. Pendekatan ini memastikan bahwa sistem dapat merespons perubahan lingkungan dengan cepat sekaligus menjaga kestabilan kondisi di dalam inkubator, mendukung keberhasilan proses fermentasi tempe gambus sehingga memungkinkan untuk dapat mempercepat durasi proses fermentasinya.

LCD 20x4 ini menampilkan informasi data berupa suhu, kelembaban, dan status aktuator secara real-time dan jelas untuk mempermudah pengguna atau operator dalam melakukan pengawasan dan pengaturan sistem, dimana data diperbarui setiap interval 2 detik. Antarmuka ini dirancang sederhana tanpa koneksi *WiFi* atau aplikasi tambahan, sehingga seluruh pengendalian dan pemantauan dilakukan langsung melalui layar LCD. Program keseluruhan sistem seperti pada Gambar 4.3 berikut.

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <DHT.h>

#define DHTPIN 8
#define DHTTYPE DHT22

DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);

const int PIN_HEATER = 6;
const int PIN_HUMIDIFIER = 5;
const int PIN_FAN_IN = 4;
const int PIN_FAN_OUT = 3;
```



```

// Koreksi Sensor
const float SUHU_OFFSET = 1.5;
const float RH_OFFSET = 7.0;

// Moving Average Window
const int WINDOW_SIZE = 5;
float suhuWindow[WINDOW_SIZE];
float rhWindow[WINDOW_SIZE];
int windowIndex = 0;

const float SUHU_BAWAH = 30.0;
const float SUHU_ATAS = 37.0;
const float RH_BAWAH = 65.0;
const float RH_ATAS = 75.0;

// Batas Kontrol & Histeresis
const float SUHU_MIN = 33.0;
const float SUHU_MAX = 38.0;
const float RH_MIN = 64.0;
const float RH_MAX = 70.0;
const float H_S = 1.0;
const float H_RH = 3.0;

// Status Aktuator
bool heater_on = false;
bool humidifier_on = false;
bool fanIn_on = false;
bool fanOut_on = false;

String statusSystem = "";

void printCenter(int row, String text) {
    int padding = (20 - text.length()) / 2;
    if (padding < 0) padding = 0;
    lcd.setCursor(padding, row);
    lcd.print(text);
}

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    dht.begin();
    lcd.init();
    lcd.backlight();

    for (int i = 0; i < WINDOW_SIZE; i++) {
        suhuWindow[i] = 0;
        rhWindow[i] = 0;
    }

    pinMode(PIN_HEATER, OUTPUT);
    pinMode(PIN_HUMIDIFIER, OUTPUT);
    pinMode(PIN_FAN_IN, OUTPUT);
    pinMode(PIN_FAN_OUT, OUTPUT);

    digitalWrite(PIN_HEATER, LOW);
    digitalWrite(PIN_HUMIDIFIER, LOW);
    digitalWrite(PIN_FAN_IN, LOW);
    digitalWrite(PIN_FAN_OUT, LOW);

    lcd.clear();
    printCenter(0, "SISTEM PENGENDALI");
    printCenter(1, "SUHU & KELEMBAPAN");
    printCenter(2, "Fermentasi");
    printCenter(3, "Tempe Gembus");
    delay(3000);
}

void loop() {
    float suhu_raw = dht.readTemperature();
    float rh_raw = dht.readHumidity();
    float suhu = suhu_raw - SUHU_OFFSET;
    float rh = rh_raw - RH_OFFSET;

    if (isnan(suhu) || isnan(rh)) return;

    suhuWindow[windowIndex] = suhu;

```

```

rhWindow[windowIndex] = rh;
windowIndex = (windowIndex + 1) % WINDOW_SIZE;

float avg_suhu = 0, avg_rh = 0;
for (int i = 0; i < WINDOW_SIZE; i++) {
    avg_suhu += suhuWindow[i];
    avg_rh += rhWindow[i];
}
avg_suhu /= WINDOW_SIZE;
avg_rh /= WINDOW_SIZE;

// FirstRun (logika awal saat alat dinyalakan pertama kali)
static bool firstRun = true;
if (firstRun) {
    if (avg_suhu > (SUHU_MIN + H_S)) heater_on = false;
    if (avg_rh > (RH_MIN + H_RH)) humidifier_on = false;
    if (avg_suhu < (SUHU_MAX - H_S) && avg_rh < (RH_MAX - H_RH)) fanOut_on = false;
    firstRun = false;
}

// Logika Aktuator Revisi
if (!heater_on && avg_suhu < (SUHU_MIN - H_S)) heater_on = true;
else if (heater_on && avg_suhu > (SUHU_MAX - H_S)) heater_on = false;

if (!humidifier_on && avg_rh < (RH_MIN - H_RH)) humidifier_on = true;
else if (humidifier_on && (avg_rh > (RH_MIN + H_RH))) humidifier_on = false;

if (!fanOut_on && (avg_suhu > (SUHU_MAX + H_S) || avg_rh > (RH_MAX + H_RH))) fanOut_on = true;
else if (fanOut_on && avg_suhu < (SUHU_MAX - H_S) && avg_rh < (RH_MAX - H_RH)) fanOut_on = false;

fanIn_on = heater_on || humidifier_on;

// Eksekusi Aktuator (Relay aktif: HIGH)
digitalWrite(PIN_HEATER, heater_on ? HIGH : LOW);
digitalWrite(PIN_HUMIDIFIER, humidifier_on ? HIGH : LOW);
digitalWrite(PIN_FAN_IN, fanIn_on ? HIGH : LOW);
digitalWrite(PIN_FAN_OUT, fanOut_on ? HIGH : LOW);

// --- [Status Sistem] ---
if (avg_suhu < SUHU_BAWAH && avg_rh < RH_BAWAH)
    statusSystem = "DINGIN & KERING";
else if (avg_suhu < SUHU_BAWAH && avg_rh > RH_ATAS)
    statusSystem = "DINGIN & LEMBAB";
else if (avg_suhu < SUHU_BAWAH)
    statusSystem = "DINGIN";
else if (avg_suhu > SUHU_ATAS && avg_rh < RH_BAWAH)
    statusSystem = "PANAS & KERING";
else if (avg_suhu > SUHU_ATAS && avg_rh > RH_ATAS)
    statusSystem = "PANAS & LEMBAB";
else if (avg_suhu > SUHU_ATAS)
    statusSystem = "PANAS";
else if (avg_rh < RH_BAWAH)
    statusSystem = "KERING";
else if (avg_rh > RH_ATAS)
    statusSystem = "LEMBAB";
else
    statusSystem = "IDEAL";

Serial.print("Rata-rata Suhu: ");
Serial.print(avg_suhu);
Serial.print(" C, RH: ");
Serial.print(avg_rh);
Serial.print("% -> Status: ");
Serial.println(statusSystem);

lcd.clear();
printCenter(0, "Temp: " + String(avg_suhu, 1) + (char)223 + "C");
printCenter(1, "Humidity: " + String(avg_rh, 1) + "%");
printCenter(2, "-- STATUS --");
printCenter(3, statusSystem);

delay(2000);
}

```

Gambar 4. 3 Program sistem secara keseluruhan

4.2. Metode Pengukuran Kinerja Hasil Perancangan

Metode pengukuran kinerja sistem dilakukan dengan pendekatan eksperimental menggunakan dua tahap uji yaitu pengujian awal dan pengujian penuh dengan bahan fermentasi tempe gabus selama ± 36 jam. Tujuan utama dari pengujian ini adalah untuk mengamati kestabilan sistem dalam menjaga suhu dan kelembaban kotak ruang fermentasi agar tetap berada dalam rentang ideal yang ditentukan guna mendukung proses fermentasi tempe gabus. Dimana alat fermentasi suhu ini berfokus pada dua parameter utama yang diukur yaitu suhu dan kelembaban yang diukur melalui satu sensor yang sama DHT22. Kriteria pengukuran kinerja dari alat yang dibuat ini mencakup beberapa aspek penting yaitu meliputi:

1. Akurasi

Akurasi sistem alat dievaluasi dengan membandingkan hasil pembacaan suhu dan kelembaban oleh DHT22 dengan parameter alat ukur pabrik. Tingkat kesalahan sistem dihitung berdasarkan selisih antara suhu dan kelembaban yang dihasilkan sensor dengan yang dihasilkan alat ukur. Tingkat kesalahan dianalisis dengan batas toleransi maksimal $\pm 2-5\%$ untuk kelembaban dan $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ untuk suhu, nilai ini sesuai dengan data sheet DHT22 atau spesifikasi alat dan kondisi operasional sensor.

2. Respon Sistem

Respon sistem diukur berdasarkan waktu yang dibutuhkan alat untuk mendeteksi setiap perubahan kondisi parameter dan mengaktifkan aktuator (*heater, humidifier, fan*). Selain itu, respon alat dalam mengembalikan suhu dan kelembaban ke kondisi stabil juga dianalisis untuk memastikan efisiensi dan efektivitas pengendalian.

3. Stabilitas Sistem

Stabilitas suhu dan kelembaban dalam ruang fermentasi dievaluasi dengan memantau fluktuasi parameter selama jangka waktu tertentu, Memastikan bahwa suhu ($30-37^{\circ}\text{C}$) dan kelembaban ($65-75\%$) dapat dipertahankan dalam waktu tertentu tanpa fluktuasi berlebihan. Pengukuran ini bertujuan untuk memastikan bahwa sistem mampu menjaga kondisi lingkungan yang sesuai tanpa perubahan drastis, yang dapat memengaruhi proses fermentasi.

Langkah pengukuran dilakukan dengan menjalankan sistem dalam lingkungan terkendali selama 24 jam non-stop dan mencatat data secara berkala berdasarkan data suhu dan kelembaban yang ditampilkan pada layar LCD, berserta dengan kondisi dari tempe gabus yang didapatkan. Berikut langkah-langkah dalam pengukuran kinerja hasil perancangan agar sesuai dengan tujuan awal pembuatan alat yaitu:

1. Persiapan Sistem: Menyiapkan alat lengkap dengan desain *full* nya, lalu tetapkan batas parameter suhu ($30-37^{\circ}\text{C}$) dan kelembaban ($65-75\%$) pada program.

2. Pengujian dan Pemantauan Sistem, serta Pengumpulan Data: Menjalankan sistem selama 24-36 jam lalu dicatat hasilnya berkala setiap 6 jam sekali, juga kondisi dari tempe gambus yang didalam kotak dan juga yang diluar kotak fermentasi (konvensional).
3. Pengujian Perbandingan: Membandingkan hasil fermentasi tempe gambus dari alat otomatis dengan fermentasi konvensional.
4. Analisis Data: Analisis akurasi, stabilitas, keandalan aktuator, dan efisiensi berdasarkan data yang diperoleh.
5. Evaluasi Kinerja Alat: Menggunakan hasil analisis untuk mengevaluasi alat agar lebih baik secara berulang-ulang.
6. Penyempurnaan Sistem: Data keseluruhan digunakan untuk menyempurnakan alat agar memenuhi kebutuhan fermentasi secara optimal.



BAB 5. HASIL PENGUKURAN DAN ANALISIS

Bab ini menyajikan hasil pengujian dan analisis terhadap sistem fermentasi tempe gambus otomatis berbasis Arduino Mega2560 yang telah dibuat berdasarkan kebutuhan dan solusi teknis pada bab sebelumnya. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem dalam mempertahankan parameter suhu dan kelembaban pada rentang ideal fermentasi yang dibutuhkan yakni suhu antara 30–37°C dan 65–75%. Evaluasi difokuskan pada beberapa aspek utama yaitu akurasi dan konsistensi sensor DHT22, efektivitas serta keandalan aktuator seperti *heater*, *humidifier*, dan kipas (*fan in* dan *fan out*), serta kestabilan sistem secara keseluruhan dalam menjaga kondisi lingkungan fermentasi. Selain itu, hasil pengujian dibandingkan dengan metode fermentasi konvensional guna mengukur sejauh mana sistem otomatis mampu meningkatkan efisiensi waktu fermentasi tempe gambus.

5.1. Hasil Perancangan Sistem Fermentasi Tempe Gambus Otomatis berbasis Arduino

Subbab ini menjelaskan hasil implementasi dari sistem fermentasi tempe gambus otomatis yang berbasis mikrokontroler Arduino Mega2560. Perancangan sistem melibatkan integrasi berbagai perangkat keras, termasuk sensor suhu dan kelembaban DHT22, heater PTC, humidifier, serta dua buah kipas mini (*fan in* dan *fan out*). Pengendalian sistem dilakukan melalui pemrograman berbasis logika *if-else* sederhana, yang dikombinasikan dengan metode *moving average* untuk mereduksi fluktuasi data, koreksi *offset* untuk mengurangi bias pembacaan sensor, serta logika histeresis untuk menghindari frekuensi *switching* yang berlebihan. Perangkat keras dan perangkat lunak yang dikembangkan disesuaikan dengan spesifikasi teknis sebagaimana telah dijelaskan pada Bab 2 dan Bab 3.

Tujuan utama dari perancangan ini adalah memastikan bahwa seluruh komponen dapat bekerja secara terintegrasi untuk mempertahankan suhu dan kelembaban ruang fermentasi dalam batas optimal secara otomatis dan berkelanjutan. Hasil realisasi sistem ini menjadi dasar dalam pelaksanaan pengujian performa pada subbab selanjutnya.

5.1.1 Desain Fisik dan Tampilan Alat

Desain fisik alat fermentasi tempe gambus otomatis terdiri atas dua bagian utama, yaitu ruang fermentasi (kotak utama) dan kotak kontrol yang dirancang secara terintegrasi namun terpisah secara fisik. Desain ini dibuat untuk mendukung kebutuhan fungsional alat dalam menjaga suhu dan kelembaban, sekaligus mempertimbangkan aspek ergonomis dan kemudahan operasional di lingkungan produksi skala UMKM.

Kotak utama berfungsi sebagai ruang tempat fermentasi berlangsung, memiliki struktur berbentuk kotak tertutup berdimensi sekitar 72×62×62 cm, dilengkapi dengan empat kaki penyangga setinggi 15 cm dengan berat hanya sekitar 15 kg, dimana ukuran ini sedikit lebih besar dibanding desain awal yaitu 60×40×50

cm. Struktur rangka menggunakan bahan besi *hollow* sebagai kerangka mekanis utama yang kokoh namun tetap ringan dan ekonomis, sementara bagian dinding menggunakan material *Aluminium Composite Panel* (ACP) untuk menjaga suhu dan kelembaban didalam ruang fermentasi. ACP dipilih karena sifatnya yang tahan terhadap panas, ringan, dan mudah dibersihkan.

Didalamnya terdapat tiga rak yang digunakan untuk meletakkan bahan fermentasi. Komponen utama seperti *heater* PTC, *humidifier*, dan dua buah *mini fan* ditempatkan di posisi strategis: *heater* di bagian atas, *humidifier* di bawah, *fan in* di kiri atas, dan *fan out* di kanan bawah. Sensor suhu dan kelembaban DHT22 diposisikan di tengah ruang fermentasi untuk mendapatkan nilai yang representatif terhadap seluruh kondisi inkubasi.



Gambar 5. 1 Hasil jadi alat fermentasi otomatis tempe gabus

Pada bagian atas kotak utama terdapat panel kontrol tertutup berupa panel kontrol, yang dirancang terpisah untuk memudahkan akses dan mencegah paparan langsung terhadap panas dan kelembaban ruang fermentasi. Panel ini berbentuk kotak berdimensi 20x12x5 cm, terbuat dari bahan *ABS plastic* (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*), yang dikenal tahan terhadap panas, lembab, serta memiliki kekuatan mekanis yang baik. Bahan ABS dipilih karena ringan, kuat, serta mudah dalam proses pelubangan dan pemasangan komponen elektronik. Panel ini dilengkapi dengan layar LCD 20×4 berantarmuka I2C dibagian luar yang berfungsi untuk menampilkan data suhu, kelembaban, dan status aktuator secara real-time.



Gambar 5. 2 Panel kontrol sistem

Didalam kotak kontrol ini terdapat rangkaian elektronik yang terpasang, seperti *switching mode power supply* (SIMPS) 12V, mikrokontroler Arduino Mega2560 sebagai otak sistem, *modul relay 4 channel*, dan LCD 20x4 dibagian luar sebagai tampilan parameter suhu dan kelembaban secara real-time. Penempatan panel kontrol di bagian atas bertujuan mempermudah pengguna dalam melakukan pemantauan, pengaturan, dan pemeliharaan sistem tanpa harus mengakses langsung ruang fermentasi.

Sistem ini menggunakan adaptor 24V dan 12V yang dihubungkan ke sumber listrik rumah tangga 220V, dan dirancang portabel serta tidak memerlukan koneksi internet. Secara keseluruhan, desain fisik alat tidak hanya dirancang untuk mendukung kestabilan fermentasi secara otomatis, tetapi juga menekankan aspek kepraktisan, daya tahan, serta kesesuaian terhadap keterbatasan di lingkungan kerja UMKM.

5.1.2 Rangkaian Elektronik, dan Koneksi Komponen Akhir

Rangkaian elektronik sistem terdiri dari tiga bagian utama: input sensor, pemrosesan mikrokontroler, dan output aktuator. Seluruh komponen telah dikonfigurasi dan dirangkai sesuai dengan skema yang dirancang menggunakan perangkat lunak Fritzing pada bab sebelumnya. Meski dengan sedikit perubahan namun rangkain dasarnya adalah sama.

Tabel 5. 1 Rangkaian elektronik, spesifikasi, dan fungsinya

Komponen	Spesifikasi	Fungsi
Arduino Mega2560	Input: 5VDC & 7-12VDC	Sebagai pusat pemrosesan sistem dan pengendali logika
Sensor DHT22	5VDC	Membaca suhu dan kelembaban ruang fermentasi
Relay 4Channel	Input: 5VDC Output: 125-250VAC, 10A 28-30VDC, 10A	Mengendalikan aktuator (heater, humidifier, fan in, fan out)
LCD 20x4 + I2C	5VDC	Menampilkan suhu dan kelembaban secara real-time
Heater PTC	12VDC, 50W	Meningkatkan suhu ruang fermentasi
Mini Fan (IN & OUT)	24VDC, 0.25A, 6W	Menjaga sirkulasi udara dan mengurangi suhu serta kelembaban yang berlebih
Humidifier	24VDC, 0.5A, 12W	Meningkatkan kelembaban saat berada di bawah ambang minimum
Adaptor 24V	Input: 220VAC Output: 24VDC	Menyediakan catu daya untuk kontrol Fan dan Humidifier

Komponen	Spesifikasi	Fungsi
Adaptor 12V	Input:110-220VDC Output: 12V, 10A, 120W	Menyediakan caty daya untuk arduino dan heater

Skema koneksi:

- **DHT22:**
 - VCC → 5V Arduino
 - DATA → Pin 8 Arduino
 - GND → GND
- **Relay Module:**
 - Relay 1 (Humidifier) → Pin 5 Arduino
 - Relay 2 (Fan In) → Pin 4 Arduino
 - Relay 3 (Heater) → Pin 6 Arduino
 - Relay 4 (Fan Out) → Pin 3 Arduino
 - VCC → 5V Arduino
 - GND → GND
- **LCD 12C:**
 - SDA → Pin 20 Arduino
 - SCL → Pin 21 Arduino
 - VCC → 5V Arduino
 - GND → GND
- **Power Supply:**
 - Input 220V → Adaptor 24V → Relay (COM 1,2,4)
 - Input 220V → Adaptor 12V → Relay (COM 3) + Jack Arduino

5.1.3 Algoritma dan Logika Pemrograman Sistem

Sistem kendali otomatis suhu dan kelembaban pada proses fermentasi tempe gambus dikendalikan oleh mikrokontroler Arduino Mega2560 yang diprogram menggunakan bahasa C++ melalui platform Arduino IDE. Logika pengendalian yang diterapkan menggabungkan metode *moving average* untuk menghaluskan pembacaan sensor, serta *logika histeresis* untuk mencegah aktivasi aktuator secara berulang-ulang akibat fluktuasi yang tidak stabil.

1. Struktur Kendali dan Koreksi Data

Sensor DHT22 digunakan sebagai input utama untuk membaca parameter suhu dan kelembaban didalam ruang fermentasi. Pembacaan sensor kemudian dikoreksi berdasarkan offset empiris yang diperoleh dari hasil perbandingan dengan alat ukur referensi berupa termohygrometer HTC-1. Nilai kpreksi yang diterapkan adalah sebagai berikut:

- Koreksi suhu: dikurangi 1.5°C
- Koreksi kelembaban: dikurangi 7.0%RH

Setelah koreksi, data sensor disimpan dalam buffer bergerak (*moving window*) sebanyak lima data terakhir. Rata-rata (*average*) dari lima data tersebut dihitung untuk menghasilkan nilai yang lebih stabil dan digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan pengendalian.

2. Batas Pengendalian dan Logika Histeresis

Rentang pengendalian ideal parameter untuk proses fermentasi ditetapkan pada suhu 30–37°C dan kelembaban 65–75% RH, digunakan untuk kondisi didalam inkubator apakah kering atau dingin dan lainnya. Namun, untuk keperluan kontrol yang lebih akurat dan efisien, digunakan batas kendali kerja yang lebih sempit yaitu 34–38°C untuk suhu dan 64–70% RH untuk kelembaban.

Rentang ini dipersempit karena adanya keterbatasan karakteristik dari heater yang memerlukan waktu untuk menaikkan suhu secara bertahap, serta efek inerti dari humidifier, di mana kelembaban dapat terus meningkat meskipun perangkat telah dimatikan. Oleh karena itu, diterapkan histeresis sebesar $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ untuk suhu dan $\pm 3.0\%$ RH untuk kelembaban. Kemudian penggunaan logika histeresis ini untuk mencegah sistem melakukan *switching ON/OFF* secara terus-menerus, yang berpotensi merusak aktuator dan menurunkan efisiensi sistem.

3. Logika Kendali Aktuator

Pengendalian aktuator didasarkan pada nilai rata-rata pengukuran suhu dan kelembaban yang telah dikoreksi, dirancang untuk menjaga agar suhu di dalam inkubator tetap ideal untuk fermentasi tempe gambus. Tabel 5.2 berikut merangkum logika *ON/OFF* untuk setiap aktuator berdasarkan parameter suhu dan kelembaban.

Tabel 5. 2 Logika pengendalian aktuator

First Run	$< 35.0^{\circ}\text{C}$	Heater ON
	$< 67.0\% \text{ RH}$	Humidifier ON
	$> 37.0^{\circ}\text{C} \ \& \ > 67.0\% \text{ RH}$	Fan Out ON
Kendali Suhu	$< 33.0^{\circ}\text{C}$	Heater ON
	$> 37.0^{\circ}\text{C}$	Heater OFF
	$> 39.0^{\circ}\text{C}$	Fan Out ON
	$< 38.0^{\circ}\text{C}$	Fan Out OFF
Kendali Kelembaban	$< 61.0\% \text{ RH}$	Humidifier ON
	$> 67.0\% \text{ RH}$	Humidifier OFF
	$> 73\%$	Fan Out ON
	$< 67\%$	Fan Out OFF
Distribusi Udara	<i>Heater/ Humidifier ON</i>	<i>Fan Sirkulasi ON</i>

Pada saat *first run*, logika awal dijalankan satu kali setelah sistem aktif, dengan tujuan mempercepat pencapaian kondisi ideal, dimana *heater* akan *ON* jika suhu awal $\leq 35.0^{\circ}\text{C}$, *humidifier ON* jika $\text{RH} \leq 67.0\%$, dan *fan out ON* jika suhu $> 37.0^{\circ}\text{C}$ serta $\text{RH} > 67.0\%$.

Selanjutnya, kontrol utama bekerja secara berkelanjutan dengan ketentuan sebagai berikut: heater menyala jika suhu $< 33.0^{\circ}\text{C}$ dan mati saat $> 37.0^{\circ}\text{C}$; humidifier menyala saat kelembaban $< 61.0\%$ RH dan mati saat $> 67.0\%$ RH. Fan out hanya aktif pada kondisi ekstrem, yaitu jika suhu $> 39.0^{\circ}\text{C}$ atau RH $> 73.0\%$, dan mati ketika suhu turun $< 38.0^{\circ}\text{C}$ serta RH $< 67.0\%$. Hal ini menunjukkan bahwa *fan out* hanya aktif saat terjadi panas atau lembap berlebih, dan akan *OFF* jika suhu serta kelembaban turun dari ambang. Fan sirkulasi internal (*fan in*) menyala secara otomatis setiap kali *heater* atau *humidifier* dalam keadaan *ON*, untuk membantu distribusi panas atau uap air secara merata di seluruh ruang fermentasi.

Logika histeresis ini penting perannya karena aktuator hanya akan berubah status jika kondisi benar-benar melewati ambang batas tertentu, sehingga tidak akan bolak-balik *ON/OFF* meskipun terjadi fluktuasi kecil. Dimana *ON/OFF* dari aktuator ini bergantung pada kondisi aktuator tersebut sebelumnya. Status *ON/OFF* dipertahankan hingga benar-benar melewati ambang batas. Sebagai contoh, jika suhu sebelumnya tinggi dan heater dalam keadaan *OFF*, maka heater tidak akan menyala kembali sampai suhu turun di bawah batas bawah histeresis, dan sebaliknya. Pendekatan ini menjaga kestabilan sistem dan memperpanjang umur komponen aktuator.

4. Tampilan dan Interface

Interface pengguna berupa LCD 20x4, digunakan untuk menampilkan informasi utama sistem secara *real-time*. Format tampilan mencakup:

- Baris 1: Suhu $\rightarrow$ Temp: xx.xx $^{\circ}\text{C}$
- Baris 2: Kelembaban $\rightarrow$ Humidity: xx.xx % RH
- Baris 3: Status Sistem $\rightarrow$ —STATUS—
- Baris 4: Kondisi ruang $\rightarrow$ IDEAL, DINGIN, LEMBAB, dll

Sistem menganalisis kemudian penentuan kondisi ruang fermentasi ditentukan berdasarkan kombinasi suhu dan kelembaban sesuai logika seperti yang ditunjukkan pada tabel 5.3 berikut.

Tabel 5. 3 Logika untuk tampilan kondisi

Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	Kelembaban (%RH)	Kondisi
<30	<65	DINGIN & KERING
	65-75	DINGIN
	>75	DINGIN & LEMBAB
30-37	<65	KERING
	65-75	IDEAL
	>75	LEMBAB
>37	<65	PANAS & KERING
	65-75	PANAS
	>75	PANAS & LEMBAB

5. Penanganan Kesalahan

Sistem dirancang untuk mengabaikan data yang tidak valid dari sensor. Apabila pembacaan suhu atau kelembapan bernilai NaN (Not a Number), maka siklus kendali akan dilewati dan status aktuator tidak diubah. Pendekatan ini bertujuan mencegah sistem bereaksi terhadap pembacaan yang tidak valid, sekaligus menjaga kestabilan dan keamanan operasi.

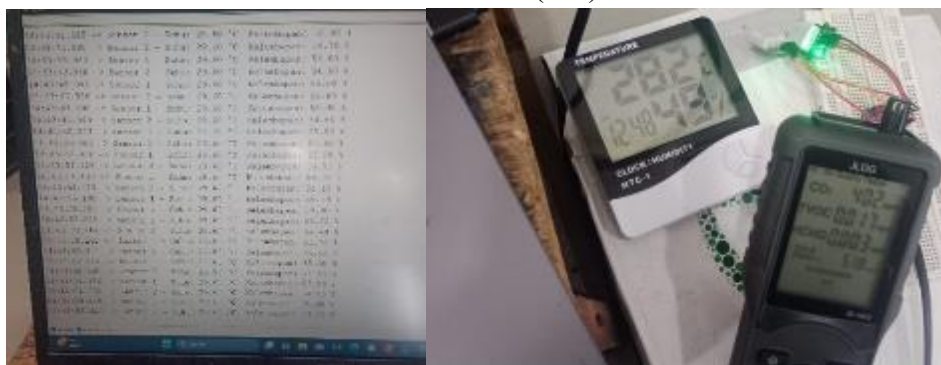
5.2. Pengujian dan Validasi Sensor DHT22

Langkah pengujian ini merupakan pengujian awal alat untuk mengevaluasi performa dari sensor DHT22 yang digunakan dalam sistem fermentasi otomatis tempe gambus. Sensor DHT22 berperan penting dalam sistem yang menjadi komponen utama pengukuran indikator suhu dan kelembaban ruang fermentasi sebagai dasar pengambilan keputusan oleh sistem kendali. Dilakukan dalam dua tahap, yaitu pengujian komparatif terhadap alat lain serta analisis deviasi pembacaan terhadap alat pembanding. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memastikan akurasi, kestabilan, dan keandalan sensor sebelum digunakan menyeluruh dalam sistem fermentasi otomatis.

5.2.1 Metode Pengujian dan Karakteristik Alat

Metode pengujian sensor suhu dan kelembaban dilakukan dengan menempatkan sensor DHT22 dan HTC-1 secara berdekatan dalam ruang yang sama dan stabil, tanpa pengaruh pemanas atau pelembab selama proses berjalan untuk mengetahui kestabilan pembacaan sensor. Sensor DHT22 diuji secara bersamaan dengan satu buah sensor lainnya juga dengan dua alat ukur pabrik yaitu termohygrometer HTC-1 dan JD3002.

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memperoleh pembanding atas pembacaan suhu dan kelembaban yang dihasilkan oleh sensor DHT22, serta mengevaluasi apakah hasil yang ditampilkan sesuai dengan karakteristik umum lingkungan ruang pengujian. Dengan adanya dua alat pembanding, diharapkan diperoleh gambaran objektif terkait akurasi relatif DHT22 terhadap peralatan lain yang tersedia. Data pembacaan dikumpulkan selama ± 32 menit dan dicatat setiap interval waktu tertentu dengan membandingkan 2 parameter utama yaitu nilai suhu dalam satuan $^{\circ}\text{C}$ dan nilai kelembaban relatif (RH) dalam satuan %.



Gambar 5. 3 Pengujian Sensor DHT22

Tabel 5. 4 Spesifikasi pada DHT22 dan HTC-1

Parameter	DHT22	HTC-1	JD3002
Rentang Suhu	-40 s.d 80 °C	-10 s.d 50 °C	0 s.d 90 °C
Akurasi Suhu	±0.5°C	±1.0°C	±1.0°C
Resolusi Suhu	0.1°C	0.1°C	0.1°C
Rentang Kelembaban	0 s.d 100% RH	10 s.d 90% RH	10 s.d 95% RH
Akurasi Kelembaban	±2-5% RH	±5% RH	±5% RH
Resolusi Kelembaban	0.1% RH	1% RH	0.1% RH
Sertifikasi	Tidak	Tidak	Tidak

Ketiga jenis alat bukan merupakan alat ukur bersertifikasi resmi maupun alat uji standard laboratorium, sehingga data yang diperoleh adalah bersifat komparatif antar alat, bukan terhadap nilai absolut yang tervalidasi secara industri. Berdasarkan tabel, DHT22 memiliki rentang pengukuran suhu yang lebih luas yaitu -40 hingga 80 °C dengan resolusi 0.1 °C, dibandingkan dengan HTC-1 yang hanya mampu mengukur suhu -10 hingga 50 °C, dan JD3002 dari 0 hingga 50 °C. Dari sisi kelembaban, DHT22 juga lebih sensitif dengan rentang penuh 0–100 % RH dengan resolusi sama dengan JD3002 yaitu 0.1 % RH, sementara HTC-1 terbatas pada 10–90 % RH dengan resolusi 1 % RH, dan JD3002 memiliki karakteristik yang hampir serupa. Meskipun tidak diperuntukkan untuk pengujian presisi tinggi, ketiga alat tersebut masih cukup andal untuk pemantauan tren suhu dan kelembaban dalam skala aplikasi praktis seperti sistem fermentasi.

5.2.2 Pengujian Komparatif Sensor DHT22 Terhadap JD3002 dan HTC-1

Pengujian bertujuan untuk mengetahui kesesuaian hasil pembacaan dari dua sensor DHT22 terhadap dua alat pembanding, yaitu JD3002 dan HTC-1. Seluruh alat diletakkan dalam ruang yang sama tanpa pemanas atau pelembap aktif, dan pencatatan data suhu serta kelembaban dilakukan secara manual pada interval waktu tertentu selama ±32 menit. Hasil pengujian ditampilkan dalam Tabel 5.5, sedangkan tren pembacaannya disajikan pada gambar 5.4 berikut

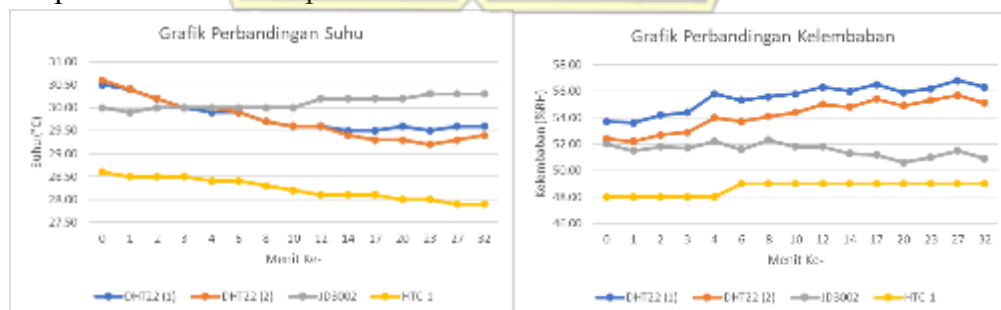
Tabel 5. 5 Hasil pengujian pembacaan beberapa alat

Waktu (menit)	Nilai Suhu (°C)				Nilai Kelembaban (% RH)			
	DHT22 (1)	DHT22 (2)	JD3002	HTC-1	DHT22 (1)	DHT22 (2)	JD3002	HTC-1
0	30.50	30.60	30.00	28.60	53.70	52.40	52.00	48.00
1	30.40	30.40	29.90	28.50	53.60	52.20	51.50	48.00
2	30.20	30.20	30.00	28.50	54.20	52.70	51.80	48.00
3	30.00	30.00	30.00	28.50	54.40	52.90	51.70	48.00
4	29.90	30.00	30.00	28.40	55.80	54.00	52.20	48.00
6	29.90	29.90	30.00	28.40	55.30	53.70	51.60	49.00

Waktu (menit)	Nilai Suhu (°C)				Nilai Kelembaban (% RH)			
	DHT22 (1)	DHT22 (2)	JD3002	HTC- 1	DHT22 (1)	DHT22 (2)	JD3002	HTC- 1
8	29.70	29.70	30.00	28.30	55.60	54.10	52.30	49.00
10	29.60	29.60	30.00	28.20	55.80	54.40	51.80	49.00
12	29.60	29.60	30.20	28.10	56.30	55.00	51.80	49.00
14	29.50	29.40	30.20	28.10	56.00	54.80	51.30	49.00
17	29.50	29.30	30.20	28.10	56.50	55.40	51.20	49.00
20	29.60	29.30	30.20	28.00	55.90	54.90	50.60	49.00
23	29.50	29.20	30.30	28.00	56.20	55.30	51.00	49.00
27	29.60	29.30	30.30	27.90	56.80	55.70	51.50	49.00
32	29.60	29.40	30.30	27.90	56.30	55.10	50.90	49.00
AVG	29.81	29.73	30.11	28.23	55.49	54.17	51.55	48.67

Tabel 5.5 menampilkan data suhu dan kelembapan dari keempat alat selama periode pengamatan. Rata-rata suhu yang dicatat oleh DHT22 (1) dan DHT22 (2) masing-masing adalah 29.81 °C dan 29.73 °C, menunjukkan konsistensi antar sensor. HTC-1 mencatat suhu rata-rata terendah sebesar 27.90 °C, sedangkan JD3002 menunjukkan suhu tertinggi dengan rata-rata 30.30 °C. Nilai suhu HTC-1 cenderung menurun perlahan seiring waktu, sejalan dengan tren dari kedua DHT22, sedangkan JD3002 justru menunjukkan arah tren yang berlawanan, yaitu peningkatan suhu yang terus-menerus.

Untuk parameter kelembapan, DHT22 (1) mencatat rata-rata 55.49% RH dan DHT22 (2) sebesar 54.17% RH. JD3002 mencatat 51.55% RH, dan HTC-1 mencatat kelembapan terendah sebesar 49.00% RH. Pola pembacaan dari kedua DHT22 memperlihatkan keselarasan yang konsisten, sedangkan JD3002 dan HTC-1 menunjukkan nilai yang lebih rendah. Berbeda dengan suhu, nilai kelembapan HTC-1 cenderung naik perlahan seiring waktu, sejalan dengan tren dari kedua DHT22, sedangkan JD3002 justru menunjukkan arah tren yang berlawanan juga, yaitu penurunan kelembapan.



Gambar 5. 4 Grafik perbandingan pengujian komparatif sensor DHT22

- Keterangan:
- a. DHT22 (1) = Transduser suhu dan kelembapan
 - b. DHT22 (2) = Transduser suhu dan kelembapan
 - c. JD3002 = Alat ukur suhu dan kelembapan
 - d. HTC-1 = Alat ukur suhu dan kelembapan

Gambar 5.4 menunjukkan grafik perbandingan pembacaan suhu dan kelembapan dari empat alat ukur selama rentang waktu pengamatan hingga menit ke-32. Pada grafik suhu (kiri), sensor DHT22 (1) dan DHT22 (2) menunjukkan tren penurunan bertahap dan konsisten satu sama lain. HTC-1 menampilkan suhu yang lebih rendah dan stabil, tanpa fluktuasi signifikan. Berbeda dengan itu, JD3002 menunjukkan suhu yang cenderung meningkat sepanjang waktu, tanpa mengikuti pola penurunan seperti sensor lainnya. Kemudian pada grafik kelembapan (kanan), sensor DHT22 menunjukkan peningkatan kelembapan secara bertahap, dengan rentang nilai antara 52% hingga 57% RH. JD3002 memperlihatkan fluktuasi kecil namun datar, sementara HTC-1 menunjukkan kelembapan paling rendah dan sangat stabil di sekitar 49% RH.

Berdasarkan tren yang ditunjukkan dalam grafik maupun data tabel, terlihat bahwa pembacaan dari JD3002 tidak sepenuhnya merefleksikan dinamika lingkungan sebagaimana ditangkap oleh sensor lainnya. Perbedaan pola ini menandakan ketidaksesuaian fungsi JD3002, terutama setelah dilakukan pengujian tambahan beberapa kali, hasilnya menunjukkan bahwa suhu dari JD3002 terus meningkat meskipun kondisi lingkungan relatif stabil, dan kelembapan justru semakin menurun. Selain itu, permukaan fisik JD3002 terasa hangat saat disentuh, yang mengindikasikan kemungkinan adanya pemanasan internal dari perangkat itu sendiri.

Dengan mempertimbangkan seluruh data, tren grafik, dan gejala fisik alat, disimpulkan bahwa JD3002 kemungkinan mengalami kerusakan atau gangguan internal. Oleh karena itu, alat ini tidak lagi digunakan dalam pengujian lanjutan. Untuk keperluan evaluasi dan validasi sistem, pembandingan utama yang digunakan selanjutnya adalah dua sensor DHT22 dan alat HTC-1.

5.2.3 Hasil Pengujian dan Deviasi Pembacaan Sensor DHT22

Analisis ini dilakukan untuk mengevaluasi sejauh mana deviasi antara pembacaan sensor DHT22 terhadap alat ukur HTC-1, khususnya dalam konteks akurasi dan konsistensi data yang dibutuhkan untuk sistem pengendalian. Fokus pengamatan ditekankan pada pola selisih nilai yang tercatat antar kedua alat, guna menilai apakah deviasi tersebut bersifat tetap dan dapat dikompensasi melalui perangkat lunak. Hasil perbandingan ditampilkan pada Tabel 5.6, yang menunjukkan data suhu dan kelembapan dari sensor DHT22 dan HTC-1 dalam rentang waktu ± 32 menit. Kemudian visualisasi tren nilai antar waktu ditampilkan dalam Gambar 5.5.

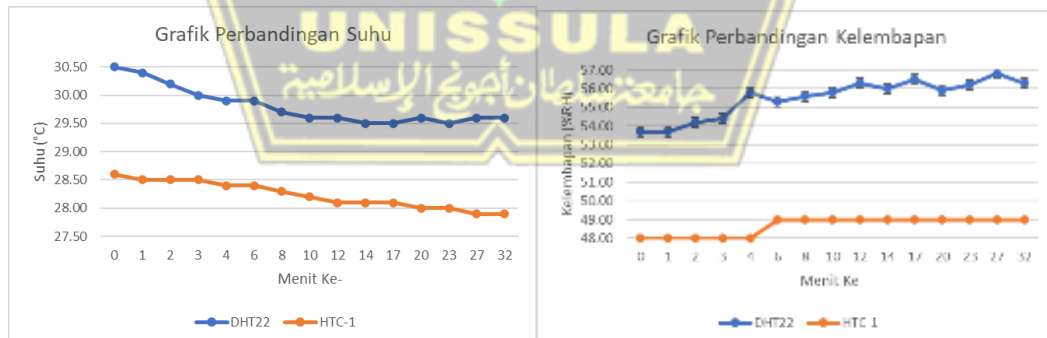
Tabel 5. 6 Hasil perbandingan pembacaan DHT22 dan HTC-1

Waktu (menit)	Nilai Suhu (°C)			Error (%)	Nilai RH (%)			Error (%)
	DHT22	HTC-1	Selisih		DHT22	HTC-1	Selisih	
0	30.50	28.60	1.90	6.64	53.70	48.00	5.70	10.61
1	30.40	28.50	1.90	6.67	53.60	48.00	5.60	10.45

Waktu (menit)	Nilai Suhu (°C)			Error (%)	Nilai RH (%)			Error (%)
	DHT22	HTC-1	Selisih		DHT22	HTC-1	Selisih	
2	30.20	28.50	1.70	5.96	54.20	48.00	6.20	11.44
3	30.00	28.50	1.50	5.26	54.40	48.00	6.40	11.76
4	29.90	28.40	1.50	5.28	55.80	48.00	7.80	13.98
6	29.90	28.40	1.50	5.28	55.30	49.00	6.30	11.39
8	29.70	28.30	1.40	4.95	55.60	49.00	6.60	11.87
10	29.60	28.20	1.40	4.96	55.80	49.00	6.80	12.19
12	29.60	28.10	1.50	5.34	56.30	49.00	7.30	12.97
14	29.50	28.10	1.40	4.98	56.00	49.00	7.00	12.50
17	29.50	28.10	1.40	4.98	56.50	49.00	7.50	13.27
20	29.60	28.00	1.60	5.71	55.90	49.00	6.90	12.34
23	29.50	28.00	1.50	5.36	56.20	49.00	7.20	12.81
27	29.60	27.90	1.70	6.09	56.80	49.00	7.80	13.73
32	29.60	27.90	1.70	6.09	56.30	49.00	7.30	12.97
Rata-rata			1.57	5.57	Rata-rata			6.83
								12.29

Dari data tersebut, terlihat bahwa sensor DHT22 secara konsisten mencatat nilai lebih tinggi dibandingkan HTC-1 pada kedua parameter. Deviasi suhu berkisar antara 1.4 °C hingga 1.9 °C dengan rata-rata selisih 1.57 °C, sedangkan deviasi kelembapan berada dalam rentang 5.7% hingga 7.8% RH dengan rata-rata 6.83% RH. Selisih ini bersifat stabil antar waktu pengamatan, tidak menunjukkan fluktuasi ekstrem maupun anomali nilai yang acak.

Untuk memperjelas perbandingan pembacaan antara sensor DHT22 dan alat ukur HTC-1, grafik berikut disusun berdasarkan 15 titik data hasil pengujian suhu dan kelembapan.



Gambar 5. 5 Grafik perbandingan pembacaan DHT22 dan HTC-1

Gambar 5.5 memperlihatkan grafik perbandingan suhu dan kelembapan antara sensor DHT22 dan HTC-1. Pada grafik suhu (kiri), garis DHT22 secara konsisten berada di atas HTC-1 dengan jarak antar garis yang relatif konstan. Hal serupa juga tampak pada grafik kelembapan (kanan), di mana pola tren naik atau turun dari kedua alat mengikuti arah perubahan yang sama, meskipun dengan perbedaan nilai. Konsistensi deviasi ini menandakan bahwa pembacaan sensor DHT22 memiliki karakter *offset* tetap terhadap pembandingan, dalam hal ini HTC-1.

Dengan demikian, koreksi nilai melalui pemrograman *offset* dapat diterapkan untuk menyesuaikan pembacaan aktual terhadap kondisi referensi. Hasil ini menjadi pertimbangan penting dalam perencanaan logika kompensasi sistem, khususnya dalam mengoptimalkan akurasi pembacaan sensor tanpa perlu mengganti perangkat keras.

5.2.4 Analisis Kesesuaian dan Implikasi terhadap Sistem

Perbedaan pembacaan antara DHT22 dan HTC-1 tidak serta-merta menandakan kesalahan pada salah satu alat. Meskipun digunakan sebagai alat referensi, namun HTC-1 secara teknis bukan merupakan alat ukur presisi bersertifikat resmi atau kalibrasi laboratorium. Berdasarkan spesifikasinya, HTC-1 memiliki toleransi *error* sebesar $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ untuk suhu dan $\pm 5\%$ RH untuk kelembaban. Sebaliknya, DHT22 menawarkan akurasi lebih tinggi berdasarkan *datasheet*, yakni $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ dan $\pm 2-5\%$ RH, serta resolusi pembacaan yang lebih halus. Oleh karena itu, selisih pembacaan yang diperoleh tidak mengindikasikan deviasi terhadap nilai absolut, melainkan deviasi relatif antar alat dengan karakteristik pengukuran yang berbeda. Untuk mengevaluasi kelayakan sensor DHT22 dalam sistem pengendalian suhu dan kelembaban, dilakukan pendekatan evaluasi berlapis.

1. Pertama, dilakukan analisis terhadap batas toleransi gabungan yaitu didapatkan $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ untuk suhu dan $\pm 10\%$ RH untuk kelembaban. Hasil pengujian menunjukkan bahwa rata-rata deviasi suhu antara DHT22 dan HTC-1 sebesar 1.57°C dengan *error* relatif 5.57%, dan rata-rata deviasi kelembaban sebesar 6.83% RH dengan *error* relatif 12.30%. Meskipun deviasi kelembaban sedikit melebihi batas toleransi gabungan, nilai-nilai tersebut masih tergolong kecil dan konsisten. Mengingat sistem ini bekerja dalam aplikasi non-kritis berbasis rentang, nilai deviasi tersebut dapat diterima secara praktis.
2. Kedua, ditinjau kestabilan data melalui perhitungan standar deviasi dari selisih pembacaan antar alat. Hasilnya menunjukkan standar deviasi sebesar $\pm 0.171^{\circ}\text{C}$ untuk suhu dan $\pm 0.689\%$ RH untuk kelembaban. Nilai yang rendah ini mengindikasikan bahwa deviasi bersifat konsisten dan tidak acak, sehingga karakter pembacaan sensor dapat diandalkan.
3. Ketiga, dilakukan identifikasi terhadap kemungkinan adanya bias sistematis. Dari data yang ada, menunjukkan bahwa sensor DHT22 secara konsisten mencatat nilai lebih tinggi dibanding HTC-1 pada kedua parameter. Pola ini menunjukkan keberadaan bias positif yang bersifat tetap. Namun karena bias ini stabil, maka dapat dikoreksi secara lunak menggunakan penyesuaian *offset*.

Sebagai tindak lanjut, kompensasi sistem dilakukan dengan menetapkan *offset* koreksi sebesar -1.5°C untuk suhu dan -7.0% RH untuk kelembaban pada pembacaan sensor DHT22. Koreksi ini diterapkan melalui pemrograman di

mikrokontroler melalui platform Arduino IDE. Selain itu, penggunaan metode *moving average* dan logika histeresis membantu meredam fluktuasi kecil agar sistem tidak merespons perubahan nilai sesaat yang tidak signifikan.

Dalam konteks aplikasi sistem fermentasi tempe gembus, presisi setingkat laboratorium tidak menjadi kebutuhan utama. Yang lebih penting adalah kestabilan dan keandalan sistem dalam menjaga kondisi suhu pada rentang 30–37 °C dan kelembapan 65–75% RH. Berdasarkan hasil pengujian dan evaluasi, deviasi sebesar ± 1.5 °C dan $\pm 7.0\%$ RH tidak memengaruhi efektivitas proses fermentasi secara signifikan. Dengan mempertimbangkan faktor biaya, kemudahan integrasi, dan performa sensor yang stabil, maka sensor DHT22 dinilai layak dan sesuai untuk digunakan dalam sistem otomatisasi skala UMKM.

5.3. Pengujian Kinerja Alat dan Evaluasi Sistem Pengendalian

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem pengendalian suhu dan kelembapan otomatis berbasis Atmega2560 dalam mendukung proses fermentasi tempe gembus. Rangkaian pengujian melibatkan beberapa tahap, dimulai dari pengujian awal tanpa bahan untuk menilai kestabilan sistem dalam kondisi lingkungan kosong, hingga pengujian fermentasi penuh selama ± 36 jam menggunakan bahan baku tempe gembus.

Tahap awal bertujuan mengamati kemampuan sistem menjaga kestabilan suhu dan kelembapan dalam batas ideal tanpa intervensi bahan biologis. Selanjutnya dilakukan fermentasi otomatis untuk mengevaluasi efektivitas kendali terhadap proses biologis nyata dan membandingkannya dengan metode fermentasi konvensional. Setiap tahapan diuji berdasarkan parameter suhu, kelembapan, keaktifan aktuator (*heater, humidifier, dua mini fan*), respons sistem terhadap lingkungan sekitar, serta keberhasilan fermentasi secara visual. Analisis pengujian didukung oleh grafik pembacaan sensor, dokumentasi visual, yang secara keseluruhan digunakan untuk menilai kelayakan dan keandalan sistem dalam skenario aplikasi nyata pada skala UMKM.

5.3.1 Pengujian Awal Kestabilan Suhu dan Kelembapan

Pengujian awal dilakukan selama ± 5 jam dengan interval pencatatan setiap 30 menit, untuk memastikan sistem pengendali suhu dan kelembapan bekerja dengan baik sesuai rancangan, sebelum digunakan dalam proses fermentasi tempe gembus. Dalam pengujian ini, ruang inkubator dikondisikan kosong (tanpa bahan biologis) untuk menilai stabilitas sistem dalam menjaga suhu dan kelembapan dalam rentang kerja ideal yaitu 30–37 °C untuk suhu dan 65–75% RH untuk kelembapan.

Sebagai pembanding, sensor HTC-1 diletakkan di luar inkubator untuk mencatat kondisi suhu dan kelembapan lingkungan. Tujuannya adalah mengevaluasi efektivitas sistem dalam menciptakan perbedaan kondisi internal

terhadap lingkungan luar, serta menilai pola aktivasi aktuator sesuai dengan logika pengendalian yang telah diprogram.



Gambar 5. 6 Pengujian suhu luar dan dalam alat

Hasil pengujian selama 5 jam penuh pada alat fermentasi tempe gambus di sajikan pada Tabel 5.7 berikut ini.

Tabel 5. 7 Data Pengujian Performa Alat

Waktu (Jam ke-)	Luar	Dalam	Aktuator				Status LCD	Keterangan
			Hum	Fan In	Heater	Fan Out		
0	29.6°C 61.0%	28.5°C 66.1%	ON	ON	ON	OFF	DINGIN	Berhasil
0.5	29.6°C 59.0%	31.2°C 67.4%	OFF	ON	ON	OFF	IDEAL	Berhasil
1	28.5°C 60.0%	31.9°C 64.1%	OFF	ON	ON	OFF	KERING	Berhasil
1.5	28.6°C 61.0%	32.2°C 64.5%	OFF	ON	ON	OFF	KERING	Berhasil
2	28.8°C 60.0%	32.5°C 63.5%	OFF	ON	ON	OFF	KERING	Berhasil
2.5	29.0°C 59.0%	32.7°C 61.5%	OFF	ON	ON	OFF	KERING	Berhasil
3	29.4°C 58.0%	32.9°C 66.2%	OFF	ON	ON	OFF	IDEAL	Berhasil
3.5	29.4°C 58.0%	32.9°C 64.8%	OFF	ON	ON	OFF	KERING	Berhasil
4	29.7°C 56.0%	33.0°C 64.7%	OFF	ON	ON	OFF	KERING	Berhasil
4.5	29.7°C 56.0%	33.0°C 60.9%	ON	ON	ON	OFF	KERING	Berhasil
5	30.0°C 55.0%	33.1°C 63.5%	OFF	ON	ON	OFF	KERING	Berhasil

Dari hasil yang ditampilkan pada Tabel 5.5, suhu dalam kotak selalu lebih tinggi dibandingkan suhu luar yang fluktuatif dan cenderung berada di bawah 30 °C. Suhu awal di dalam ruang sebesar 28.5 °C meningkat secara bertahap hingga mencapai 33.1 °C pada akhir pengujian (jam ke-5), menunjukkan kinerja pemanasan yang stabil dan bertahap. Sementara itu, nilai kelembaban relatif (RH)

di awal berada 66.1% sehingga mengaktifkan humidifier karena nilainya <67%, dan membuat kelembaban naik hingga 67.4% pada menit ke-30, kemudian menurun perlahan seiring naiknya suhu dalam waktu sekita 1.5 jam hingga mencapai 61.5 di jam ke-2.5, kemudian nilainya naik dan turun lagi secara berulang. Penurunan ini bersifat alami karena kenaikan suhu meningkatkan kapasitas udara dalam menyimpan uap air, sehingga nilai RH relatif menurun meskipun kelembaban mutlak tetap.

Aktuator menunjukkan respon logis sesuai program. *Heater* dan *fan* sirkulasi (*fan IN*) aktif sejak awal karena suhu berada di bawah batas minimal kendali. *Humidifier* aktif hanya pada awal (jam ke-0), kemudian mati saat RH mencapai ambang atas kendali (67%). *Fan in* bekerja secara paralel atau bersamaan dengan *heater* maupun *humidifier*, sesuai logika sistem, sehingga menyala selama salah satu atau keduanya aktif. Sementara itu, *Fan out* tidak pernah aktif selama pengujian karena tidak tercapai kondisi suhu >39 °C maupun RH >73%, sesuai dengan batas aktivasi logika yang telah ditentukan di program.

Secara keseluruhan, sistem berhasil menjaga suhu dan kelembaban dalam rentang ideal selama durasi pengujian. Dibandingkan dengan lingkungan luar atau terbuka, suhu dalam alat lebih lebih dan RH lebih stabil, membuktikan sistem kontrol bekerja secara efektif dan akurat. Tidak ditemukan fluktuasi ekstrem atau ketidaksesuaian aktivasi aktuator. Ini membuktikan bahwa sistem otomatis yang dirancang mampu merespons kondisi dengan cepat dan tepat, berdasarkan logika kontrol suhu dan kelembaban.

5.3.2 Evaluasi Respons Sistem terhadap Lingkungan Sekitar

Berdasarkan hasil pengamatan awal selama ± 5 jam, sistem fermentasi otomatis menunjukkan kemampuan adaptif yang baik dalam merespons dinamika suhu dan kelembaban lingkungan sekitar dan menjaga kestabilan kondisi internal ruang fermentasi. Meskipun suhu lingkungan luar mengalami fluktuasi dalam rentang 28.5°C hingga 30.0°C, sistem berhasil menjaga suhu internal ruang fermentasi tetap lebih tinggi dan relatif stabil, dengan peningkatan bertahap dari 28.5°C menjadi 33.1°C dalam kurun waktu lima jam. Hal ini menunjukkan bahwa sistem pengendalian yang dirancang mampu mengisolasi pengaruh lingkungan dan menciptakan kondisi internal yang lebih terkendali.

Respon terhadap kelembapan juga menunjukkan performa yang akurat. Nilai RH awal yang cukup tinggi (66.1%) sempat naik hingga 67.4%, sebelum kemudian menurun perlahan ke angka 60.9% seiring kenaikan suhu. Aktivasi humidifier terekam pada awal pengujian (jam ke-0), sebelum jam ke-3, serta kembali aktif pada jam ke-4.5. Beberapa aktivasi tidak tercatat dalam tabel karena saat pencatatan dilakukan, humidifier sudah dalam kondisi mati. Meski demikian, pola kelembapan menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga RH tetap berada dalam rentang yang

aman tanpa intervensi berlebihan, serta merespons kebutuhan kelembapan secara otomatis sesuai logika kontrol.

Aktuator lainnya, seperti *heater* dan *fan internal*, juga menunjukkan konsistensi kerja sesuai kondisi lingkungan aktual. *Heater* aktif stabil sejak awal pengujian karena suhu berada di bawah ambang target, sementara *fan internal* menyala mengikuti status heater atau humidifier sebagaimana diprogram. *Fan out* tidak pernah aktif karena suhu dan kelembapan tidak pernah melewati ambang batas atas. Tidak ditemukan *switching* berulang pada pola kerja aktuator, menandakan kestabilan program dan keandalan logika pengendali.

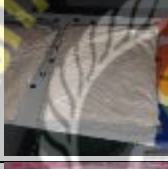
Dengan mempertimbangkan kestabilan suhu dan kelembapan di dalam alat dibandingkan kondisi luar yang lebih fluktuatif, serta respons aktuator yang presisi terhadap kondisi aktual, dapat disimpulkan bahwa sistem mampu menyesuaikan diri terhadap lingkungan sekitarnya secara efektif. Hal ini menunjukkan kesiapan sistem untuk diterapkan pada proses fermentasi penuh yang melibatkan bahan biologis, dengan harapan dapat mempertahankan kondisi mikro ideal secara berkelanjutan.

5.3.3 Pengujian Fermentasi Tempe Gambus Otomatis

Pengujian fermentasi dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas sistem otomatis dalam menciptakan kondisi lingkungan yang ideal dan stabil bagi pertumbuhan jamur *rhizopus* pada bahan tempe gambus. Proses fermentasi dilakukan selama ± 30 jam di dalam ruang fermentasi yang dikendalikan secara otomatis, kemudian dibandingkan dengan hasil dari tempe yang diletakkan di ruang terbuka tanpa kendali suhu dan kelembapan (cara konvensional). Data suhu dan kelembapan dicatat setiap tiga jam, bersamaan dengan pengamatan visual terhadap pertumbuhan jamur *rhizopus oligosporus*, perubahan tekstur, serta tingkat kematangan tempe. Berikut adalah hasil pengamatan disajikan dalam Tabel 5.8.

Tabel 5. 8 Hasil pengamatan fermentasi tempe gambus selama 30 jam

Jam	Otomatis			Konvensional	
	LCD	Gambar	Keterangan	Gambar	Keterangan
0	Suhu 33.6°C Kelembaban 62.6% Status: Kering		Ragi belum aktif		Ragi belum aktif
3	Suhu 33.3°C Kelembaban 64.9% Status: Kering		Embun banyak, hangat		Mulai berembun

Jam	Otomatis			Konvensional	
	LCD	Gambar	Keterangan	Gambar	Keterangan
6	Suhu 34.6°C Kelembaban 64.1% Status: Kering		Menggumpal mulai terlihat pertumbuhan jamur		Embun meningkat, sedikit hangat
9	Suhu 34.4°C Kelembaban 65.7% Status: Ideal		Jamur tumbuh banyak, tekstur memadat		Sedikit menggumpal dan belum muncul jamur
24	Suhu 31.2°C Kelembaban 67.4% Status: Ideal		Jamur tebal dan merata putih, berbau khas, hampir matang		Jamur belum merata, tekstur memadat
27			Matang		Jamur merata putih
30			Matang, tekstur sedikit keras		Hampir matang, tektur padat

Berdasarkan hasil pengamatan pada tabel 5.6, terlihat bahwa suhu dan kelembaban dalam alat otomatis berhasil menjaga agar suhu tetap mendekati atau dalam rentang ideal (30–37°C dan 65–75% RH), tanpa fluktuasi ekstrem selama proses. Dimana selama pengujian berlangsung, suhu dan kelembapan yang tercatat dalam ruang fermentasi berhasil dijaga dalam kisaran yang sesuai kebutuhan fermentasi, yaitu antara 31.2 °C hingga 34.6 °C dan kelembapan relatif antara 61.5% hingga 67.4%. Sistem secara aktif menyesuaikan kerja aktuator untuk mempertahankan parameter ini, yang ditampilkan secara langsung pada LCD sistem. Sementara itu, lingkungan di ruang terbuka cenderung mengalami fluktuasi kondisi yang tidak terkontrol, serta dibawah nilai ideal untuk fermentasi.

Dengan suhu awal yang mencapai 33.6°C dengan kelembaban 62.6% RH, hal ini dikarenakan alat dinyalakan lebih awal sebelumnya dimana kondisi awal adalah dingin dan kering. Pada jam ke-0, baik di ruang fermentasi maupun ruang terbuka, bahan belum menunjukkan tanda-tanda fermentasi karena proses aktivasi ragi belum berlangsung. Berdasarkan pengamatan visual terhadap kondisi bahan, perbedaan respon lingkungan mulai terlihat sejak jam ke-3. Di ruang fermentasi,

kondisi hangat dan lembap ditunjukkan oleh terbentuknya embun pada permukaan, sedangkan di ruang terbuka baru mulai menunjukkan gejala berembun. Pada jam ke-6, mulai terlihat penggumpalan dan pertumbuhan awal jamur pada bahan dalam inkubator. Di sisi lain, bahan di ruang terbuka masih menunjukkan perkembangan yang lebih lambat.

Perbedaan ini semakin mencolok pada jam ke-9, di mana ruang fermentasi menunjukkan pertumbuhan jamur yang sudah banyak dan tekstur substrat mulai memadat, sedangkan di ruang terbuka hanya terlihat penggumpalan tanpa pertumbuhan jamur. Kemudian pada jam ke-24, tempe dalam ruang fermentasi sudah menampilkan ciri khas fermentasi matang, yaitu jamur putih yang merata, bau khas, dan tekstur yang kokoh namun tidak keras. Sementara itu, tempe di ruang terbuka baru menunjukkan pertumbuhan jamur yang belum merata dan tekstur masih belum sepenuhnya memadat. Artinya, pertumbuhan jamur di ruang fermentasi berlangsung konsisten dari jam ke-9 hingga jam ke-24, ditandai dengan perubahan warna permukaan dan struktur bahan. Sedangkan pada ruang terbuka, meskipun terjadi pertumbuhan, prosesnya lebih lambat dan tidak secepat yang terjadi di ruang fermentasi otomatis. Pada jam ke-27 hingga ke-30, permukaan bahan dalam ruang fermentasi telah tertutup oleh pertumbuhan jamur secara merata, sementara di ruang terbuka proses fermentasi belum sepenuhnya selesai.

Hasil pengamatan ini menunjukkan bahwa sistem fermentasi otomatis berbasis kendali suhu dan kelembapan mampu menjaga kondisi lingkungan internal secara stabil dan responsif terhadap perubahan. Parameter lingkungan tetap berada dalam kisaran ideal tanpa fluktuasi ekstrem, dan semua aktuator beroperasi sesuai dengan logika kontrol yang telah diprogram. Keandalan ini berkontribusi langsung terhadap keberhasilan proses fermentasi yang berlangsung lebih cepat, konsisten, dan efisien. Jika dibandingkan dengan metode konvensional tanpa pengendalian lingkungan, sistem otomatis memberikan keunggulan yang nyata, baik dari segi kestabilan proses maupun waktu pencapaian kematangan.

5.3.4 Analisis Respons dan Performa Sistem Secara Keseluruhan

Sistem pengendalian suhu dan kelembapan otomatis berbasis mikrokontroler ATmega2560 yang dikembangkan menunjukkan performa yang responsif dan stabil selama seluruh rangkaian pengujian. Seluruh fungsi utama, mulai dari proses pembacaan data sensor, pemrosesan logika kontrol, hingga aktivasi aktuator berjalan sesuai spesifikasi rancangan tanpa indikasi *malfunction*, *delay* berlebihan, atau kesalahan logika sistem. Respons sistem terhadap perubahan parameter suhu dan kelembapan berlangsung secara *real-time* dan terpantau cepat, dengan *latency* rata-rata sekitar 2 detik. Setiap aktuator seperti *heater*, *humidifier*, maupun *fan* beroperasi sesuai skema kendali *IF-ELSE* dengan kondisi logika berdasarkan parameter *input* sensor yang telah ditentukan. Tidak ditemukan gejala *over-*

switching, *error logic*, atau pembacaan sensor yang tidak valid yang berpotensi mengganggu kestabilan sistem.

Algoritma pengolahan data pada sisi *software* terbukti mendukung stabilitas kontrol sistem. Metode *moving average* berhasil mereduksi *noise* atau fluktuasi data sesaat pada pembacaan sensor, sementara penyesuaian nilai melalui kompensasi *offset* kalibrasi (-1.5°C untuk suhu dan -7.0% RH untuk kelembapan) mampu mengatasi deviasi tetap terhadap alat pembanding. Selain itu, penerapan *hysteresis control* mencegah *switching* aktuator yang terlalu sering akibat fluktuasi yang tidak signifikan. Suhu dan kelembapan di dalam ruang fermentasi berhasil dijaga dalam batas kerja ideal sistem yaitu $30\text{--}37^{\circ}\text{C}$ dan $65\text{--}75\%$ RH selama proses fermentasi berlangsung. Hal ini menunjukkan bahwa *closed-loop control system* yang diterapkan memiliki kestabilan (*stability*), akurasi (*accuracy*), dan responsivitas yang sesuai dengan kebutuhan sistem fermentasi non-kritis berbasis interval.

Dari sisi *user interface*, sistem dilengkapi LCD *display* sebagai indikator kondisi operasional secara langsung, mencakup suhu, kelembapan, serta kondisi ruang secara *real time*. Tampilan ini berfungsi sebagai *visual feedback* yang penting dalam sistem otomatis, di mana pengguna tetap dapat melakukan intervensi terbatas, seperti menambah air ketika pelembap aktif namun kelembapan tidak meningkat. Secara keseluruhan, sistem yang dirancang telah memenuhi seluruh tujuan fungsional dan operasional. sistem kontrol yang dikembangkan berhasil mengintegrasikan sensor input, algoritma kendali, dan aktuator output dalam sebuah embedded system yang presisi, stabil, dan siap untuk implementasi di lingkungan produksi skala kecil seperti UMKM sebagai solusi pengolahan tempe gembus yang efisien dan modern.

5.3.5 Pemenuhan Spesifikasi Sistem

Berdasarkan hasil pengujian, analisis dan evaluasi performa sistem yang telah dilakukan, alat fermentasi tempe gembus otomatis berbasis mikrokontroler Arduino ATmega2560 sebagian besar telah memenuhi spesifikasi teknis yang ditetapkan pada tahap perancangan awal. Seluruh komponen utama, baik perangkat keras maupun perangkat lunak, telah berhasil diimplementasikan dan dioperasikan, selaras sesuai fungsi dan kriteria yang ditentukan, serta mampu mendukung proses fermentasi secara otomatis, presisi, dan stabil. Tabel 5.9 berikut menunjukkan kesesuaian antara spesifikasi awal yang dirancang dengan hasil realisasi setelah pengujian.

Tabel 5. 9 Perbandingan spesifikasi usulan dan realisasi akhir

No	Spesifikasi	Target/ Usulan	Realisasi
1	Dimensi	60x40x50 cm	72×62×62 cm (penambahan dimensi luar dan kaki penyangga)
2	Rentang suhu ideal	30-37°C	Sesuai, tercapai dan stbail selama pengujian

No	Spesifikasi	Target/ Usulan	Realisasi
3	Rentang kelembaban ideal	65-75%	Sesuai, stabil dalam waktu lama
4	Power Supply	12V	12V dan 24V (sesuai dengan kebutuhan perangkat)
5	Mini Fan, Humidifier	12V	24V
6	Heater	12	Sesuai 12V
7	Kendali Otomatis Aktuator	Aktuator <i>on-off</i> logika	Sesuai, berjalan akurat dan stabil
8	Respon Sistem	<2 detik	Sesuai, berdasarkan <i>delay loop</i> dan observasi visual
9	Pemantauan pada LCD	Ya	Realtime, 4 baris informasi: suhu, RH, Status, dan Kondisi
10	Operasi tanpa internet	Ya	Sesuai, cocok untuk UMKM desa

Dari tabel di atas dapat disimpulkan bahwa sistem telah berhasil memenuhi seluruh parameter spesifikasi fungsional, dengan beberapa penyesuaian teknis minor pada dimensi fisik dan tegangan aktuator (mini fan dan humidifier). Penyesuaian tersebut tidak memengaruhi fungsi inti sistem, dan justru meningkatkan efisiensi serta stabilitas perangkat selama beroperasi dalam jangka waktu lama. Secara umum, sistem ini mampu:

1. Menjaga suhu dan kelembapan dalam rentang optimal selama proses fermentasi tanpa fluktuasi ekstrem.
2. Memberikan respons cepat dan stabil terhadap perubahan lingkungan internal.
3. Menyediakan antarmuka pemantauan yang informatif dan mudah dipahami melalui LCD 20×4.
4. Bekerja secara offline, tanpa ketergantungan pada koneksi internet, sehingga sesuai diterapkan untuk UMKM skala desa.

Dengan demikian, alat ini dinilai layak diimplementasikan sebagai sistem fermentasi otomatis skala kecil dan telah memenuhi seluruh aspek spesifikasi teknis yang ditetapkan dalam rencana awal perancangan.

5.3.6 Implementasi dan Pengalaman Pengguna

Setelah seluruh rangkaian perancangan dan pengujian sistem fermentasi tempe gembus otomatis diselesaikan, dilakukan evaluasi berbasis pengalaman pengguna yaitu dari mitra untuk menilai aspek kenyamanan, kemudahan operasional, dan kelayakan sistem dalam konteks penggunaan nyata di lingkungan mitra UMKM.



Gambar 5. 7 Foto bersama dengan mitra sebelum implementasi alat

Berdasarkan observasi langsung dan masukan dari pengguna, sistem dinilai telah bekerja dengan baik dan sesuai harapan. Fungsi kendali suhu dan kelembaban berjalan stabil, tampilan LCD memberikan informasi yang jelas dan *real time*, serta keseluruhan proses fermentasi berlangsung tanpa hambatan teknis yang signifikan.

Namun demikian, terdapat beberapa saran perbaikan dari sisi praktikalitas dan ergonomi desain. Pertama, pengguna menyarankan agar sistem ke depannya menggunakan hanya satu sumber daya listrik terpusat. Sumber daya yang lebih dari 1 ini dianggap kurang praktis dalam lingkungan UMKM yang terbatas sumber colokan listriknya. Kedua, pengguna menyarankan agar tutup ruang fermentasi dilengkapi dengan jendela transparan dari bahan akrilik atau mika untuk memungkinkan pemantauan visual kondisi tempe selama proses berlangsung tanpa harus membuka tutup inkubator. Hal ini akan membantu menjaga kestabilan suhu dan kelembaban internal serta meningkatkan efisiensi pemantauan.

Secara keseluruhan, sistem telah memenuhi fungsi utama secara teknis dengan baik. Masukan yang diberikan bersifat penyempurnaan untuk meningkatkan aspek kepraktisan dan kenyamanan pengguna. Dengan melakukan penyesuaian minor pada aspek fisik dan integrasi daya, sistem ini dinilai sudah layak untuk diterapkan dalam skala UMKM secara berkelanjutan

5.3.7 Kesesuaian Perencanaan dalam Manajemen Tim dan Realisasinya

Perencanaan manajemen kerja tim pada tugas akhir ini telah disusun sejak tahap awal dalam bentuk *Gantt Chart* dan Rencana Anggaran Belanja (RAB), dengan tujuan untuk memastikan seluruh tahapan kegiatan dapat berjalan secara sistematis dan terarah. Selama pelaksanaan, realisasi kegiatan dan alokasi sumber daya dievaluasi untuk melihat kesesuaian terhadap rencana awal

Tabel 5. 10 Kesesuaian antara usulan dan realisasi *timeline* pengerjaan tugas akhir2

No	Kegiatan	Usulan Waktu	Realisasi Pelaksanaan
1	Pembelian alat dan bahan	Februari – Maret	April – Mei
2	Perancangan Sistem	Maret-Mei	Mei
3	Testing dan validasi	Juni-Juli	Juni-Juli

4	Expo dan pengumpulan laporan akhir	Agustus	Agustus
---	------------------------------------	---------	---------

Pada tabel 5.10 ditunjukkan perbandingan aktivitas berdasarkan Gantt Chart perencanaan dengan pelaksanaan aktual. Sebagian besar kegiatan berhasil diselesaikan sesuai waktu yang ditetapkan, seperti perancangan perangkat keras dan lunak, hingga pengujian sistem. Aktivitas diawal mengalami sedikit pergeseran jadwal, khususnya pada tahap pembelian alat dan bahan. Hal ini dikarenakan adanya beberapa kendala sehingga membutuhkan penyesuaian waktu. Namun hal ini tidak menyebabkan keterlambatan keseluruhan karena masih dalam batas waktu yang direncanakan.

Tabel 5. 11 Kesesuaian RAB Tugas Akhir antara usulan dan realisasi

No	Jenis Pengeluaran	Usulan Biaya		Realisasi Biaya	
		Kuantitas	Total Harga	Kuantitas	Total Harga
1	Sensor DHT22	1	100.000	1	30.000
2	Heater	1	140.000	2	174.000
3	Fan	2	180.000	2	25.000
4	Humidifier	1	70.000	1	95.000
5	Arduino Mega2560	1	250.000	1	195.000
6	Relay Modul	1	25.000	1	36.000
7	LCD 20x4	1	50.000	1	62.000
8	Adaptor 12V	1	20.000	1	120.000
9	ACP	1	190.000	1	225.000
10	Hollow	1	60.000	5	250.000
11	Engsel	1	15.000	2	12.000
12	Paku Rivet	1	70.000	100	15.000
13	Plat Aluminium	1	60.000	-	-
14	2 Way Splitter DC Kabel	1	15.000	-	-
15	Adaptor 24V	-	-	1	47.000
16	Switch	-	-	1	10.000
17	Box Control	-	-	1	25.000
18	Kabel	-	-	2	40.000
Total		Rp 1.245.000		Rp 1.361.000	

Tabel 5.11 menyajikan perbandingan antara estimasi awal dan realisasi biaya selama pelaksanaan proyek. Dari total anggaran awal sebesar Rp 1.245.000, realisasi akhir tercatat Rp 1.361.000. Selisih tersebut masih tergolong wajar dan dapat diterima mengingat harga sebagian komponen mengikuti perkembangan harga pasar. Beberapa item seperti humidifier, adaptor 12V, dan material casing mengalami kenaikan biaya karena spesifikasi teknis yang menyesuaikan kebutuhan alat. Selain itu, terdapat penambahan komponen tambahan seperti adaptor 24V, switch, box control, dan kabel yang sebelumnya tidak dianggarkan, namun dibutuhkan untuk mendukung kestabilan sistem.

Sebaliknya, beberapa komponen seperti plat aluminium dan *2-Way Splitter* tidak direalisasikan karena diganti atau tidak diperlukan. Secara umum, manajemen tim mampu menyesuaikan realisasi biaya dengan perencanaan awal tanpa penyimpangan signifikan, dan seluruh komponen tetap berada dalam kisaran harga pasar yang wajar.

Tabel 5. 12 Realisasi aktivitas pelaksanaan tugas akhir 2

No	Hari, Tanggal, Durasi (jam atau hari)	Aktivitas	Pelaksana
1	Senin, 13 januari 2025 (37 hari)	Revisi laporan setelah seminar proposal	Semua Anggota
2	Senin, 7 april 2025 (7 hari)	Pembelian alat dan bahan	Rozi, Udin
3	Kamis, 10 april 2025 (5 hari)	Pengujian sensor DHT22	Rozi
4	Selasa, 20 april 2025 (14 hari)	Pemrograman, dan Pengujian keseluruhan komponen	Riyanti, Rozi
5	Kamis, 15 mei 2025 (8 hari)	Perakitan kotak Fermentasi	Rozi, Udin
6	Jumat, 23 mei 2025 (2 hari)	Pemasangan Komponen	Rozi, Udin
7	Senin, 26 mei 2025 (2 hari)	Pengujian awal fermentasi tempe	Rozi
8	Selasa, 27 mei 2025 (4 hari)	Penyusunan laporan Bab 5 (hasil dan analisis)	Riyanti
9	Rabu, 28 Mei 2025 (2 jam)	Bimbingan Laporan Bab 5	Riyanti, Udin
10	Minggu, 01 June 2025 (2 jam)	Pengujian sensor DHT22 terhadap HTC-1 terhadap DT-8820	Rozi
11	Selasa, 03 Juni 2025 (2 jam)	Bimbingan Laporan Bab 5 ke-2	Riyanti, Udin
12	Kamis, 10 Juli 2025 (2 hari)	Pengujian sensor DHT22 terhadap HTC-1, dan komponen lain	Riyanti
13	Jumat, 11 Juli 2025 (2 jam)	Bimbingan Laporan Bab 5 ke-3	Riyanti, Rozi
14	Jumat, 20 Juli 2025 (3 jam)	Pengujian performa alat	Riyanti, Udin
15	Sabtu, 21 Juli 2025 (1 hari)	Analisis data pengujian dan penyesuaian parameter	Riyanti
16	Senin, 28 Juli 2025 (2 jam)	Perakitan panel kontrol	Semua Anggota

No	Hari, Tanggal, Durasi (jam atau hari)	Aktivitas	Pelaksana
17	Senin, 28 Juli 2025 (4 jam)	Pengujian performa alat lanjut dan evaluasi parameter	Semua Anggota
18	Senin 28 Juli 2025 (5 jam)	Pengujian awal (tanpa bahan tempe ± 5 jam)	Semua Anggota
19	Selasa, 29 Juli 2025 (2 hari)	Pengujian Fermentasi tempe gambus otomatis + Dokumentasi	Semua Anggota
20	Rabu, 30 Juli 2025 (1 minggu)	Penulisan laporan Bab 5	Riyanti
21	Selasa, 05 Juli 2025 (2 jam)	Bimbingan Laporan Bab 5 ke-4	Semua Anggota
21	Rabu, 06 Juli 2025 (1 hari)	Finalisasi laporan	Semua Anggota
22	Kamis, 14 Juli 2025	Sidang Tugas Akhir	Semua Anggota

Setiap tahapan, mulai dari pembelian bahan, perancangan sistem, hingga pengujian dan dokumentasi berhasil dilakukan secara bertahap dan sistematis. Pekerjaan dibagi rata antar anggota tim dan didokumentasikan dengan baik. Pada Tabel 5.12 diperlihatkan evaluasi kontribusi anggota tim terhadap pelaksanaan proyek. Seluruh anggota tim telah menjalankan tugasnya sesuai dengan peran masing-masing, dengan pembagian yang proporsional antara penanggung jawab perangkat keras, perangkat lunak, dokumentasi, dan pengujian. Proses koordinasi dan eksekusi lapangan dilakukan secara kolaboratif, disertai dengan evaluasi rutin terhadap progres dan permasalahan teknis yang dihadapi.

Secara keseluruhan, perencanaan manajemen tim dan realisasinya dinilai berjalan cukup baik dan efektif. Penyimpangan waktu maupun biaya yang terjadi masih dalam batas yang wajar dan dapat diterima. Kegiatan proyek tetap berlangsung sesuai target yang telah ditetapkan, serta menunjukkan kemampuan tim dalam mengelola waktu, sumber daya, dan tanggung jawab dengan baik.

5.4. Dampak Implementasi Sistem

Implementasi sistem fermentasi otomatis tempe gambus otomatis berbasis mikrokontroler Atmega2560 memberikan berbagai dampak positif yang signifikan bagi aspek teknologi, ekonomi, sosial, budaya, dan lingkungan. Sistem ini tidak hanya menghadirkan efisiensi teknis, tetapi juga memberikan transformasi nyata dalam praktik produksi tradisional bagi UMKM tempe gambus.

1. Secara teknologi, sistem ini menghadirkan solusi otomatisasi yang sederhana namun efektif untuk mengatur suhu dan kelembaban secara presisi tanpa intervensi manual. Penggunaan sensor DHT22 yang terintegrasi dengan logika pemrograman mikrokontroler memungkinkan kontrol lingkungan yang stabil sepanjang proses fermentasi. Hal ini menunjukkan bahwa inovasi

berbasis teknologi tepat guna dapat diterapkan secara nyata dalam meningkatkan efisiensi proses produksi pangan lokal tanpa memerlukan infrastruktur kompleks seperti jaringan internet atau operator teknis terlatih.

2. Secara ekonomi, sistem ini secara langsung mengurangi durasi fermentasi dari 36–48 jam menjadi sekitar 24 jam, sehingga memungkinkan untuk meningkatkan kapasitas produksi harian. Selain itu, alat ini menurunkan tingkat kegagalan akibat ketidakterkendalian suhu dan kelembaban, yang sebelumnya menyumbang 5–10% produk gagal per hari. Dengan total biaya pengembangan alat sekitar Rp 1.361.000, investasi ini relatif terjangkau dan dapat kembali dalam waktu singkat melalui peningkatan produktivitas dan pengurangan kerugian bahan baku. Sistem juga termasuk hemat daya dan tidak memerlukan koneksi internet, menjadikannya efisien dalam jangka panjang.
3. Dampak sosial juga terasa, terutama pada beban kerja operator produksi. Sebelum menggunakan sistem ini, pemberian ragi (starter) sering kali disesuaikan dengan prediksi cuaca yang tidak pasti, karena suhu lingkungan sangat memengaruhi laju fermentasi. Akibatnya, jumlah dan waktu pemberian ragi bisa berubah-ubah dan tidak konsisten antar hari. Namun dengan alat otomatis ini, fermentasi menjadi lebih konsisten walaupun ragi yang digunakan sama, karena suhu dan kelembaban dijaga tetap stabil. Hal ini tidak hanya meringankan pekerjaan operator, tetapi juga meningkatkan kepercayaan dan kenyamanan dalam proses produksi.
4. Dari perspektif budaya, sistem ini tidak menggantikan proses pembuatan tempe secara menyeluruh, melainkan memperkuat proses tradisional dengan pendekatan teknologi. Proses pengolahan bahan, pembungkusan, dan penanganan masih tetap dilakukan secara konvensional. Sistem otomatisasi hanya diterapkan pada fase fermentasi, menjadikannya sebagai bentuk inovasi yang selaras dengan pelestarian kearifan lokal dan nilai-nilai budaya produksi pangan tradisional.
5. Secara lingkungan, Sistem ini mampu mengatasi fluktuasi suhu dan kelembaban musiman yang menjadi kendala utama bagi UMKM, terutama saat musim hujan. Dengan menjaga kestabilan lingkungan secara otomatis, sistem ini mengurangi ketergantungan terhadap alat bantu tradisional seperti tumpukan kain penutup atau penghangat manual berbahan bakar, yang cenderung kurang efisien dan berisiko. Penggunaan energi listrik juga dioptimalkan melalui logika kendali yang meminimalkan switching berlebih, sehingga tidak boros daya.
6. Dari segi kenyamanan dan keselamatan, sistem dilengkapi dengan relay sebagai pemutus arus otomatis untuk mencegah overheating dan kelembaban berlebih. Tampilan LCD 20x4 yang informatif dan sistem kontrol sederhana

membuat alat ini aman dan mudah dipantau oleh operator UMKM secara langsung tanpa perangkat tambahan.

Secara umum, sistem ini memberikan dampak positif yang menyeluruh, mendorong efisiensi dan produktivitas, meminimalkan durasi fermentasi, menjaga keberlanjutan budaya lokal, serta memfasilitasi transformasi digital skala mikro pada sektor pangan tradisional. Dengan demikian, sistem fermentasi otomatis ini tidak hanya menjadi alat bantu teknis, melainkan juga menjadi bagian dari solusi strategis dalam peningkatan daya saing UMKM di era modern.



BAB 6. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, pengujian terhadap sistem otomatisasi fermentasi tempe gambus berbasis mikrokontroler Atmega2560, dapat disimpulkan hal-hal berikut:

1. **Kesesuaian Sistem dengan Spesifikasi Usulan**
Sistem fermentasi otomatis yang dirancang berhasil memenuhi spesifikasi teknis yang diusulkan, yaitu mampu menjaga suhu dalam rentang 30–37°C dan kelembaban 65–75% secara otomatis. Integrasi sensor DHT22, heater PTC, humidifier, dua mini fan, dan LCD 20x4 telah berjalan sesuai fungsi masing-masing dengan logika pengendalian berbasis metode moving average dan histeresis.
2. **Pencapaian Tujuan Proyek**
Seluruh tujuan utama proyek telah tercapai, mencakup perancangan alat, stabilisasi suhu dan kelembaban selama fermentasi, percepatan waktu fermentasi, serta evaluasi efektivitas sistem dalam menjaga lingkungan ideal. Alat yang dikembangkan terbukti mampu menurunkan waktu fermentasi tempe gambus dari ± 36 –48 jam menjadi hanya perlu 24 jam dengan hasil produk yang matang merata dan kualitas tetap baik.
3. **Efektivitas Sistem terhadap proses fermentasi**
Sistem menunjukkan performa yang stabil dan responsif dengan waktu aktivasi aktuator kurang dari 2 detik setelah perubahan suhu/kelembaban terdeteksi. Alat mampu bekerja secara kontinu selama ± 36 jam tanpa gangguan, dan hasil fermentasi menunjukkan tingkat keberhasilan lebih tinggi dibandingkan metode konvensional, terutama pada kondisi cuaca dingin yang sebelumnya menjadi kendala utama.
4. **Kesesuaian dengan Kebutuhan Mitra UMKM**
Desain alat telah disesuaikan dengan kapasitas produksi skala kecil, tidak memerlukan koneksi internet, hemat daya, serta mudah dioperasikan oleh operator tanpa latar belakang teknis. Hal ini menjadikan sistem ini relevan dan aplikatif untuk diterapkan secara nyata di lingkungan produksi UMKM pangan lokal.
5. **Keterbatasan dan Evaluasi**
Meskipun sistem telah bekerja efektif, alat ini masih terbatas dalam pembacaan parameter yang tidak bisa dipastikan keakuratan absolutnya. Namun demikian, dalam lingkup implementasi saat ini, keterbatasan tersebut tidak mengganggu pencapaian utama sistem dan tidak mengurangi manfaat yang ditawarkan bagi pengguna.

6.2. Saran

Sebagai tindak lanjut dari pelaksanaan tugas akhir ini, berdasarkan hasil implementasi dan evaluasi sistem, berikut beberapa saran untuk pengembangan dan peningkatan ke depan:

1. Peningkatan Fitur Tambahan

Sistem dapat dikembangkan lebih lanjut dengan menambahkan sensor oksigen (O_2) untuk mengontrol kualitas udara atau sensor pH dalam ruang fermentasi. Atau penambahan fitur pencatatan data suhu dan kelembaban secara otomatis menggunakan penyimpanan eksternal seperti SD card module atau data logger. Hal ini akan memudahkan evaluasi performa fermentasi dari waktu ke waktu dan memberikan dokumentasi historis yang bermanfaat untuk proses kontrol mutu.

2. Penyempurnaan *Interface* dan Aksesibilitas

Sistem dapat ditambah dengan sistem *interface* yang lebih interaktif, seperti tampilan berbasis OLED, tombol navigasi menu, atau bahkan antarmuka nirkabel (misalnya Bluetooth atau Wifi) agar pengguna dapat memantau atau mengubah parameter fermentasi tanpa harus membuka kontrol fisik secara langsung juga dapat dipantau dari jarak jauh untuk skala yang lebih besar.

3. Kalibrasi dan Validasi Lebih Lanjut

Diperlukan kalibrasi berkala terhadap sensor DHT22 dan validasi menggunakan alat ukur laboratorium bersertifikasi untuk meningkatkan akurasi dan kredibilitas data, khususnya bila alat akan digunakan untuk skala produksi yang lebih besar atau keperluan sertifikasi mutu produk.

4. Optimalisasi Desain Fisik

Rancangan fisik alat dapat disempurnakan dengan desain yang lebih kokoh dan baik lagi, atau sistem rak fleksibel yang mudah dibersihkan dan diganti. Serta bagian panel kontrol yang mudah dirakit ulang atau lepas pasang. Serta memiliki bagian seperti kaca transparan dibagian pintu agar bisa dipantau tanpa perlu membuka tutup terlebih dahulu.

5. Pengurangan Konsumsi Energi dan Efisiensi Aktuator

Penggunaan komponen yang lebih hemat energi, seperti *heater* dengan efisiensi termal tinggi, dapat menjadi prioritas untuk pengembangan berikutnya. Selain itu, pemrograman lebih lanjut seperti pengaturan PWM (Pulse Width Modulation) atau pengaturan siklus kerja dapat diimplementasikan untuk mengurangi beban listrik saat suhu atau kelembaban sudah mendekati batas target.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Sunarti *et al.*, “Pengaruh suhu penguapan ekstrak terhadap aktivitas antoksidan dan antiglikasi ekstrak tempe kedelai dan tempe gembus,” *Ilmu Gizi Indones.*, vol. 6, no. 1, p. 77, 2022, doi: 10.35842/ilgi.v6i1.255.
- [2] S. S. Rosjadi, M. Andini, and F. A. Setiawan, “Transformasi Desa Trosemi: Digitalisasi UMKM dan Program Pencegahan Stunting Berbasis Masyarakat,” *Pros. Semin. Nas. LPPM UMJ*, vol. 5, no. 1, 2024.
- [3] W. Musa, I. Hidayat, T. I. Yusuf, S. Alam, B. P. Asmara, and A. I. Tolago, “PENGONTROLAN ENERGI PANAS DAN KELEMBABAN MENGGUNAKAN SENSOR DHT22 DAN ESP32 PADA PROSES FERMENTASI TEMPE GEMBUS,” *J. Renew. Energy Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 50–55, 2024, doi: 10.56190/jree.v2i1.31.
- [4] I. W. Bayu AW and T. D. Purwanto, “Rancang Bangun Alat Sistem Kontrol Otomatis Pada Proses Fermentasi Tempe Berbasis Mikrokontroler,” *Angkasa J. Ilm. Bid. Teknol.*, vol. 16, no. 1, p. 1, 2024, doi: 10.28989/angkasa.v16i1.1865.
- [5] R. Yunas and A. Basrah, “Sistem Kendali Suhu dan Kelembaban pada Proses Fermentasi Tempe,” *JTEV (Jurnal Tek. Elektro dan Vokasional)*, vol. 6, p. 103, 2020, doi: 10.24036/jtev.v6i1.106943.
- [6] A. Setiawan, Y. Apriani, Z. Saleh, and F. Ardianto, “Pengendali Suhu Fermentasi Tempe Berbasis NodeMCU Dan Sensor DHT 22,” *Electr. J. Rekayasa dan Teknol. Elektro*, vol. 18, no. 2, pp. 128–138, 2024, doi: 10.23960/elc.v18n2.2566.
- [7] N. P. Novani, D. Yolanda, R. Hadelina, and L. Rahmadani, “Proposed Design of Incubator for Fermented Soybean Based on Internet of Things,” in *2024 2nd International Symposium on Information Technology and Digital Innovation (ISITDI)*, 2024, pp. 264–269, doi: 10.1109/ISITDI62380.2024.10796397.
- [8] G. M. Aji, A. F. Pratiwi, and S. W. Utami, “Rancang Bangun Inkubator Tempe Untuk Mempercepat Waktu Fermentasi,” *Agroteknika*, vol. 7, no. 4, pp. 488–497, 2024.
- [9] S. P. Maghfira, B. Suprianto, L. Rakhmawati, and R. Firmansyah, “Rancang Bangun Sistem Kontrol Suhu dan Kelembapan Berbasis IOT dengan Fuzzy Logic untuk Optimasi Proses Fermentasi pada Pengolahan Tempe,” *J. Tek. ELEKTRO*, vol. 14, no. 3, pp. 257–263, 2025.
- [10] I. R. Gultom, N. H. Azhari, T. T. Gultoms, D. P. Angin, and others, “Desain Sistem Infant Warmer Otomatis Menggunakan Pemanas Inframerah & Blue Light sebagai Therapy Bayi,” *J. Media Elektro*, pp. 488–497, 2025.
- [11] A. Ridwan, “Oven Listrik Keripik Buah Berbasis Arduino dengan Menggunakan Metode Fuzzy Logic dan Sensor DHT22,” *Indones. J. Comput. Sci.*, vol. 13, no. 5, 2024.
- [12] T. Y. Nainggolan, “Penggunaan Sensor DHT22 pada Rancang Bangun Sistem Monitoring TALENTA Conference Series Penggunaan Sensor DHT22 pada Rancang Bangun Sistem Monitoring dan Kontrol Otomatis Temperatur Kandang Ayam,” *Talent. Conf. Ser. Energy Eng.*, vol. 7, no. 1, p. 10, 2024, doi: 10.32734/ee.v7i1.2172.

- [13] M. I. Hakiki, U. Darusalam, and N. D. Nathasia, "Konfigurasi Arduino IDE Untuk Monitoring Pendeteksi Suhu dan Kelembapan Pada Ruang Data Center Menggunakan Sensor DHT11," *J. Media Inform. Budidarma*, vol. 4, no. 1, p. 150, 2020, doi: 10.30865/mib.v4i1.1876.
- [14] N. B. Wicaksono, S. M. Effendi, and A. M. A. Jiwatami, "Pilot Study: Pemanas Untuk Thermal Cyclor," *Silampari J. Pendidik. Ilmu Fis.*, vol. 5, no. 1, pp. 14–23, 2023, doi: 10.31540/sjpif.v5i1.1895.
- [15] R. Inggi and J. Pangala, "Perancangan Alat Pendeteksi Kebocoran Gas LPG Menggunakan Sensor MQ-2 Berbasis Arduino," *Simkom*, vol. 6, no. 1, pp. 12–22, 2021, doi: 10.51717/simkom.v6i1.51.
- [16] F. Padma, S. Riyadi, and others, "DESAIN SISTEM ELEKTROMAGNETIK PADA MINIATUR CRANE BERBASIS PLC," *JMeka*, vol. 1, no. 2, pp. 38–44, 2024.
- [17] R. Aulia, R. A. Fauzan, and I. Lubis, "Pengendalian Suhu Ruangan Menggunakan Menggunakan FAN dan DHT11 Berbasis Arduino," *CESS (Journal Comput. Eng. Syst. Sci.)*, vol. 6, no. 1, p. 30, 2021, doi: 10.24114/cess.v6i1.21113.
- [18] A. N. Fitri and D. Yendri, "Rancang Bangun Pelembab Udara Ruangan (Humidifier) berbasis Mikrokontroler," *J. Comput. Hardware, Signal Process. Embed. Syst. Netw.*, vol. 04, no. 01, pp. 61–70, 2023.
- [19] I. D. G. A. T. Putra *et al.*, "Kajian dan penerapan teknologi atomisasi ultrasonik dalam proses pemurnian air laut skala kecil," *J. Appl. Mech. Eng. Green Technol.*, vol. 11, no. 1, pp. 31–35, 2021, doi: 10.31940/jametechn.v2i1.2465.
- [20] A. Y. Arsayli, "Implementasi Penggunaan LCD Sebagai Penunjang Proses Pembelajaran bagi Peserta Didik Kelas IV SDIT Persaudaraan," *Kalam Cendekia J. Ilm. Kependidikan*, vol. 10, no. 2, p. 320, 2022, doi: 10.20961/jkc.v10i2.65641.
- [21] D. Kusumawati and B. A. Wiryanto, "Perancangan Bel Sekolah Otomatis Menggunakan Mikrokontroler Avr Atmega 328 Dan Real Time Clock Ds3231," *J. Elektron. Sist. Inf. dan Komput.*, vol. 4, no. 1, pp. 13–22, 2020.
- [22] K. Effendi, J. Junaidi, and S. W. Suciati, "Rancang Bangun Sistem Catu Daya dengan Metode Switching Mode Power Supply (SMPS) Berbasis Arduino untuk Aplikasi Electrospinner," *J. Teor. dan Apl. Fis.*, vol. 8, no. 1, pp. 25–34, 2020, doi: 10.23960/jtaf.v8i1.2315.