



**RANCANG BANGUN SISTEM KONTROL DAN MONITORING SUHU DAN
KELEMBAPAN INKUBATOR FERMENTASI TEMPE MENGGUNAKAN
*PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE (PID)***



UNIVERSITAS
Dinamika

Oleh:

Wishnu Haryo Bhimantoro

21410200015

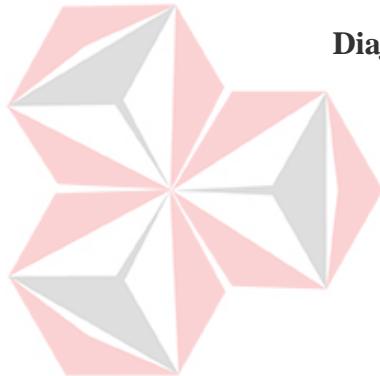
FAKULTAS TEKNOLOGI DAN INFORMATIKA

UNIVERSITAS DINAMIKA

2025

**RANCANG BANGUN SISTEM KONTROL DAN MONITORING SUHU DAN
KELEMBAPAN INKUBATOR FERMENTASI TEMPE MENGGUNAKAN
*PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE (PID)***

TUGAS AKHIR



Diajukan sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan

Program Sarjana

UNIVERSITAS
Dinamika

Oleh :

Nama : WISHNU HARYO BHIMANTORO

NIM : 21410200015

Program Studi : S1 Teknik Komputer

FAKULTAS TEKNOLOGI DAN INFORMATIKA

UNIVERSITAS DINAMIKA

2025

TUGAS AKHIR

RANCANG BANGUN SISTEM KONTROL DAN MONITORING SUHU DAN KELEMBAPAN INKUBATOR FERMENTASI TEMPE MENGGUNAKAN *PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE (PID)*

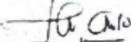
Dipersiapkan dan disusun oleh:
Wishnu Haryo Bhimantoro
NIM : 21410200015

Telah diperiksa, dibahas dan disetujui oleh Dewan Pembahasan
Pada: Rabu, 6 Agustus 2025

Susunan Dewan Pembahasan

Pembimbing:

- I. Hariantto, S.Kom., M.Eng.
NIDN: 0722087701


cn=Hariantto Hariantto,
o=Universitas Dinamika,
ou=Prodi S1 Teknik Komputer,
email=hari@dinamika.ac.id, c=ID
2025.08.07 16:53:36 +07'00'

- II. Weny Indah Kusumawati, S.Kom., M.MT.
NIDN: 0721047201


cn=Weny Indah Kusumawati,
o=Undika, ou=Prodi S1 TK - FTI,
email=weny@dinamika.ac.id, c=ID
2025.08.07 11:48:33 +07'00'

Pembahasan:

- I. Pauladie Susanto, S.Kom., M.T.
NIDN: 0729047501


cn=Pauladie Susanto, o=Universitas
Dinamika, ou=PS S1 Teknik Komputer,
email=pauladie@dinamika.ac.id, c=ID
2025.08.08 12:23:46 +07'00'

Tugas Akhir ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan
Untuk memperoleh gelar Sarjana

Digitally signed by

Julianto

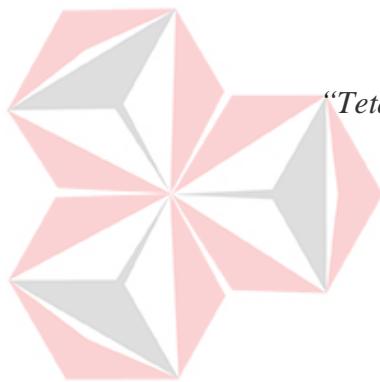
Date: 2025.08.08

16:54:00 +07'00'

Julianto Lemantara, S.Kom., M.Eng.

NIDN. 0722108601

Dekan Fakultas Teknologi dan Informatika
Universitas Dinamika



“Tetaplah berusaha walaupun takdir yang akan menentukan”

UNIVERSITAS
Dinamika

PERNYATAAN
PERSETUJUAN PUBLIKASI DAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Sebagai mahasiswa **Universitas Dinamika**, Saya :

Nama : **Wishnu Haryo Bhimantoro**
NIM : **21410200015**
Program Studi : **S1 Teknik Komputer**
Fakultas : **Fakultas Teknologi dan Informatika**
Jenis Karya : **Laporan Tugas Akhir**
Judul Karya : **RANCANG BANGUN SISTEM KONTROL DAN MONITORING SUHU DAN KELEMBABAN INKUBATOR FERMENTASI TEMPE MENGGUNAKAN *PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE (PID)***

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa :

1. Demi pengembangan Ilmu Pengetahuan, Teknologi dan Seni, Saya menyetujui memberikan kepada **Universitas Dinamika** Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif (*Non-Exclusive Royalty Free Right*) atas seluruh isi/sebagian karya ilmiah Saya tersebut diatas untuk disimpan, dialihmediakan, dan dikelola dalam bentuk pangkalan data (*database*) untuk selanjutnya didistribusikan atau dipublikasikan demi kepentingan akademis dengan tetap mencantumkan nama Saya sebagai penulis atau pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.
2. Karya tersebut diatas adalah hasil karya asli Saya, bukan plagiat baik sebagian maupun keseluruhan. Kutipan, karya, atau pendapat orang lain yang ada dalam karya ilmiah ini semata-mata hanya sebagai rujukan yang dicantumkan dalam Daftar Pustaka Saya.
3. Apabila dikemudian hari ditemukan dan terbukti terdapat tindakan plagiasi pada karya ilmiah ini, maka Saya bersedia untuk menerima pencabutan terhadap gelar kesarjanaan yang telah diberikan kepada Saya.

Demikian surat pernyataan ini Saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 9 Juli 2025



Wishnu Haryo Bhimantoro
NIM : 21410200015

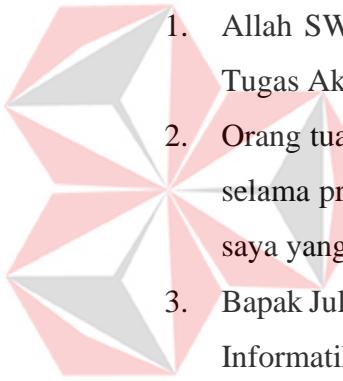
ABSTRAK

Tempe merupakan makanan tradisional Indonesia yang memiliki nilai gizi tinggi dan berperan penting dalam mendukung ketahanan pangan nasional. Namun, proses fermentasi tempe yang masih dilakukan secara tradisional sering menghasilkan kualitas produk yang tidak konsisten akibat suhu dan kelembapan lingkungan yang tidak terkontrol. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun sistem kontrol dan monitoring suhu serta kelembapan pada inkubator fermentasi tempe menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terhubung ke platform Internet of Things (IoT). Sistem ini dilengkapi dengan sensor DHT22 untuk pemantauan suhu dan kelembapan secara real-time, modul dimmer AC untuk mengatur intensitas pemanas lampu pijar, serta mist maker dan kipas DC yang dikendalikan melalui relay untuk menjaga kelembapan dan sirkulasi udara. Pengendalian suhu dilakukan dengan metode Proportional Integral Derivative (PID) untuk menghasilkan suhu yang stabil pada titik setel (set point) dan mengurangi overshoot. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu menjaga suhu inkubasi stabil pada set point 35°C dengan rata-rata error pengukuran suhu sebesar 0,69% dan rata-rata error kelembapan sebesar 3,6%. Selain itu, waktu fermentasi tempe dengan inkubator hanya memerlukan waktu selama 20 jam, sedangkan fermentasi secara alami membutuhkan waktu yang lebih lama yaitu selama 26 jam. Proses pertumbuhan jamur pada inkubator juga lebih merata dan konsisten, serta dapat dipantau dan dikontrol secara real-time dari jarak jauh melalui IoT.

Kata kunci: *Tempe, Fermentasi, ESP32, PID, Inkubator.*

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul "Rancang Bangun Sistem Kontrol dan Monitoring Suhu dan Kelembapan Fermentasi Tempe Menggunakan *Proportional Integral Derivative (PID)*". Selama proses penyusunan Laporan Tugas Akhir ini, penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu, memberikan saran, masukan dan dukungan. Ucapan terima kasih ini ditujukan kepada:

- 
1. Allah SWT, karena dengan Rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini.
 2. Orang tua dan seluruh keluarga, yang telah memberikan dukungan dan dorongan selama proses penyelesaian laporan Tugas Akhir ini khususnya almarhum kakek saya yang membantu dalam mengerjakan proyek ini.
 3. Bapak Julianto Lemantara, S.Kom., M.Eng., selaku Dekan Fakultas Teknologi dan Informatika Universitas Dinamika.
 4. Bapak Pauladie Susanto, S.Kom., M.T., selaku Ketua Prodi S1 Teknik Komputer sekaligus dosen pembahas, atas masukan dan saran sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini.
 5. Bapak Harianto, S.Kom., M.Eng., selaku Dosen Pembimbing 1 yang telah memberikan masukan, wawasan dan arahan bagi penulis selama penggerjaan dan pembuatan Laporan Tugas Akhir ini.
 6. Ibu Weny Indah Kusumawati, S.Kom., M.MT., selaku Dosen Pembimbing 2 yang telah memberikan bimbingan, dukungan, dan motivasi bagi penulis penggerjaan dan pembuatan Laporan Tugas Akhir ini.
 7. Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, yang telah memberikan dukungan serta bantuan, baik secara langsung maupun tidak langsung dalam

penyelesaian Laporan Tugas Akhir ini.

Penulis sangat menyadari bahwa masih terdapat kekurangan pada penulisan laporan ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun agar laporan ini menjadi lebih baik. Semoga laporan ini dapat berguna dan bermanfaat untuk menambah wawasan bagi pembaca.

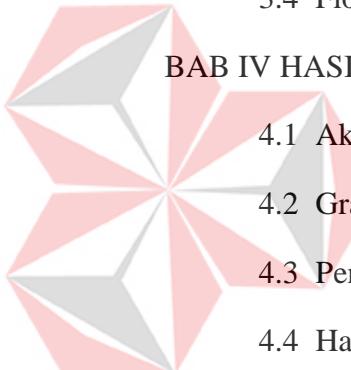
Surabaya, 6 Agustus 2025

Penulis



DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan	3
1.5 Manfaat	4
BAB II LANDASAN TEORI	5
2.1 Fermentasi Tempe	5
2.2 Ragi Tempe	6
2.3 Proportional Integral Derivative (PID)	6
2.4 PWM (Pulse Width Modulation)	7
2.5 Mikrokontroler ESP32	8
2.6 Internet of Things	9
2.7 Sensor DHT22	10
2.8 Lampu Pijar	10



2.9 Power Supply	11
2.10 Module AC Dimmer	12
2.11 Ultrasonik Mist Maker.....	12
2.12 Relay	13
2.13 Kipas DC.....	14
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	15
3.1 Diagram Blok	15
3.2 Rancangan Mekanik	16
3.3 Rancangan Elektronik	16
3.4 Flowchart Sistem.....	17
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	20
4.1 Akurasi Suhu dan Kelembapan Sensor DHT22.....	20
4.2 Grafik Pengujian PID	22
4.3 Pengujian Perbandingan Tempe.....	26
4.4 Hasil Implementasi Sistem.....	38
4.5 Implementasi dan Penjelasan Logika PID dalam Program.....	40
BAB V PENUTUP.....	43
5.1 Kesimpulan.....	43
5.2 Saran.....	43
DAFTAR PUSTAKA	45
LAMPIRAN.....	47

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2. 1 Fermentasi Tempe	5
Gambar 2. 2 Diagram Sistem PID.....	6
Gambar 2. 3 Pin Out ESP32.....	8
Gambar 2. 4 Sensor DHT22.....	10
Gambar 2. 5 Lampu Pijar	11
Gambar 2. 6 Power Supply	11
Gambar 2. 7 AC Dimmer Robotdyn	12
Gambar 2. 8 Mist Maker	13
Gambar 2. 9 Relay 2 Channel	14
Gambar 2. 10 Kipas DC	14
Gambar 3. 1 Diagram blok sistem	15
Gambar 3. 2 Rancangan mekanik	16
Gambar 3. 3 Rangkaian alat	16
Gambar 3. 4 Flowchart sistem kerja	18
Gambar 3. 5 Flowchart proses PID	19
Gambar 4. 1 Grafik PID dengan nilai Kcr 700	22
Gambar 4. 2 Grafik PID dengan nilai Kcr 800	23
Gambar 4. 3 Grafik PID dengan nilai Kcr 900	23
Gambar 4. 4 Grafik PID dengan nilai Kcr 1000	24
Gambar 4. 5 Grafik PID dengan nilai Kp 700, Ki 10, Kd 30.....	25
Gambar 4. 6 Tempe pengujian pertama sebelum fermentasi	29
Gambar 4. 7 Tempe pengujian pertama setelah 20 jam fermentasi	30
Gambar 4. 8 Tempe pengujian pertama setelah 26 jam fermentasi	31
Gambar 4. 9 Tempe pengujian kedua sebelum fermentasi	35
Gambar 4. 10 Tempe pengujian kedua setelah 20 jam fermentasi	36
Gambar 4. 11 Tempe pengujian kedua setelah 26 jam fermentasi	37

Gambar 4. 12 Tampilan dashboard monitoring	39
Gambar 4. 13 Tampilan dashboard dan LCD	40



DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2. 1 Perbedaan ESP32 dengan Mikrokontroler lain.....	8
Tabel 4. 1 Akurasi suhu	20
Tabel 4. 2 Akurasi kelembapan.....	21
Tabel 4. 3 Pengujian pertama.....	26
Tabel 4. 4 Pengujian kedua	32



DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1 Program Sistem Inkubator Fermentasi Tempe	47
Lampiran 2 Dokumentasi Pengujian Pertama Proses Fermentasi Tempe	52
Lampiran 3 Dokumentasi Pengujian Kedua Proses Fermentasi Tempe	58
Lampiran 4 Kartu Bimbingan Tugas Akhir	63
Lampiran 5 Bukti Originalitas Tugas Akhir	64
Lampiran 6 Biodata Diri	66



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tempe merupakan salah satu makanan tradisional Indonesia yang memiliki nilai gizi tinggi, terutama sebagai sumber protein nabati yang murah dan mudah diakses oleh seluruh lapisan masyarakat. Tempe banyak dikenal sebagai makanan fermentasi yang berasal dari bahan dasar kedelai. Dalam konteks kebutuhan pangan nasional, tempe menjadi komoditas penting yang mendukung ketahanan pangan dan perbaikan gizi masyarakat.

Saat ini, pemerintah Indonesia di bawah kepemimpinan Presiden Prabowo Subianto tengah menggulirkan program strategis nasional berupa penyediaan makan bergizi bagi anak sekolah sebagai upaya menurunkan angka stunting, meningkatkan kualitas sumber daya manusia, serta mendorong kemandirian pangan lokal. Tempe diusulkan sebagai salah satu komponen utama karena kandungan gizinya yang tinggi. Namun, menurut penelitian yang sudah ada produksi tempe masih dilakukan dengan cara tradisional (Adini Alvina, 2019). Hal ini dikarenakan para pelaku usaha tempe berasal dari kalangan industri rumah tangga yang masih menggunakan peralatan dan proses produksi yang tidak standar sehingga proses fermentasi yang memakan waktu lama dan tidak selalu menghasilkan kualitas yang konsisten. Cuaca yang tidak menentu dapat mengakibatkan kapang Rhizopus tidak berkembang dengan baik, bahkan dapat mati, yang pada akhirnya menurunkan kualitas hingga menyebabkan kegagalan produksi. Pengendalian suhu dan kelembapan yang tepat selama proses fermentasi dapat mengurangi lamanya waktu fermentasi.

Untuk mendukung keberhasilan program makan bergizi nasional, dibutuhkan inovasi teknologi yang mampu meningkatkan efisiensi dan kualitas produksi tempe secara signifikan. Salah satu solusi yang ditawarkan adalah merancang dan membangun sistem monitoring suhu dan kelembapan pada inkubator fermentasi tempe. Sistem ini bertujuan untuk menjaga parameter lingkungan secara optimal dan stabil

sehingga proses fermentasi lebih terstandar.

Dengan memanfaatkan teknologi berbasis mikrokontroler seperti ESP32 dan sensor suhu-kelembapan DHT22, sistem ini dapat memberikan pemantauan kondisi lingkungan secara real-time dan akurat. Pada penelitian yang dilakukan sebelumnya inkubator tempe berjalan dengan baik namun dengan mengganti mikrokontroler menggunakan ESP32 yang terhubung dengan platform IoT, maka sistem ini dapat memonitoring suhu dan kelembapan pada inkubator tempe dari jarak jauh, sehingga memudahkan produser dalam mengontrol suhu dan kelembapan tanpa harus mengecek langsung inkubator (Galih Mustiko Aji, 2024).

Pada penelitian yang dilakukan sebelumnya dengan menggunakan lampu sebagai pemanas, penggunaan metode PID untuk pengendalian suhu diperlukan, dan penambahan komponen mist maker sebagai penambah kelembapan (Riko Putra Yunas, 2020). Module AC dimmer digunakan untuk mengontrol lampu sebagai pemanas dan relay untuk menyalakan mist maker ketika dibutuhkan. Penggunaan AC dimmer pada proyek inkubator tempe dapat mengatur intensitas panas lampu yang bergantung dari besar arus listrik yang dialirkan sehingga dapat mengontrol seberapa terang atau panas lampu menyala. Sedangkan mist maker untuk membuat kabut berfungsi dengan cara mengubah air menjadi kabut dengan teknologi ultrasonic.

Berdasarkan latar belakang yang sebelumnya sudah dijelaskan, oleh karena itu penelitian ini berfokus pada pengembangan inkubator fermentasi tempe yang terkoneksi ke platform IoT sehingga dapat mengontrol dari jarak jauh dan proses fermentasi tempe menggunakan metode PID yang bertujuan untuk aksi kontrol yang cepat serta dapat mengurangi overshoot sehingga dapat menghasilkan suhu yang stabil pada set point yang diinginkan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka dapat dirumuskan masalah yang dibahas dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana merancang sistem monitoring suhu dan kelembapan yang dapat memantau proses fermentasi tempe secara real-time dan akurat?

2. Bagaimana implementasi teknologi IoT dengan mikrokontroler ESP32 dapat meningkatkan efisiensi monitoring inkubator tempe dari jarak jauh?
3. Bagaimana penerapan metode PID dapat menjaga kestabilan suhu pada proses fermentasi untuk menghasilkan kualitas tempe yang optimal dengan tekstur padat, dan warna putih merata?

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini terfokus dan terarah, maka batasan masalah yang diterapkan meliputi:

1. Penelitian ini hanya membahas proses fermentasi tempe, tidak mencakup seluruh proses produksi tempe dari awal (perendaman, perebusan, pengupasan kedelai).
2. Implementasi metode PID hanya diterapkan untuk pengendalian suhu.
3. Nilai parameter PID ditentukan melalui metode manual tuning berdasarkan eksperimen, tanpa menggunakan metode optimasi atau algoritma adaptif.
4. Proyek ini dibatasi pada skala prototipe inkubator kecil, dan belum diterapkan untuk skala industri atau produksi massal.

1.4 Tujuan

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah diatas, berikut adalah tujuan dari penelitian ini:

1. Untuk merancang sistem monitoring suhu dan kelembapan yang mampu memantau proses fermentasi tempe secara real-time dan akurat untuk memastikan kondisi lingkungan inkubator tetap sesuai kebutuhan fermentasi.
2. Untuk menerapkan teknologi IoT berbasis mikrokontroler ESP32 dalam sistem inkubator tempe guna meningkatkan efisiensi dan kemudahan monitoring jarak jauh melalui koneksi internet.
3. Untuk menerapkan metode pengendalian PID dalam menjaga kestabilan suhu selama proses fermentasi, sehingga dapat menghasilkan tempe dengan kualitas optimal, ditinjau dari tekstur yang padat dan jamur yang merata.

1.5 Manfaat

Adapun dari Tugas Akhir ini dapat diperoleh manfaat yang diharapkan meliputi:

1. Dapat meningkatkan efisiensi proses produksi, serta menghasilkan tempe dengan kualitas yang lebih konsisten, ditinjau dari tekstur yang padat dan jamur yang merata.
2. Mendukung program makan bergizi nasional dengan memastikan ketersediaan tempe sebagai sumber protein nabati yang murah dan berkualitas.
3. Mendorong kemandirian pangan lokal dan meningkatkan pemanfaatan teknologi tepat guna di bidang industri pangan skala kecil dan menengah.



BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Fermentasi Tempe

Tempe merupakan produk fermentasi yang berasal dari kedelai dan diolah dengan bantuan kapang *Rhizopus spp*, yang merupakan jenis kapang yang tumbuh baik di suhu optimum pertumbuhan adalah 30-35°C dan kelembapan dibawah 60-70% RH untuk proses fermentasi tempe (Riska Suryanti Putri, 2018).

Kedelai sebelum menjadi tempe harus melalui beberapa tahapan mulai dari perendaman atau perebusan untuk mempermudah pengupasan kulit, selanjutnya proses peragian atau inokulasi yang mengandung jamur pembuat tempe, setelah itu tempe dibungkus dan didiamkan selama 1-2 hari pada suhu ruang sebagai proses inkubasi sehingga kacang kedelai dipenuhi miselium putih yang berasal dari jamur pembuat tempe. Terlihat pada gambar 2. 1 bentuk setelah kedelai yang dfermentasi menjadi tempe.



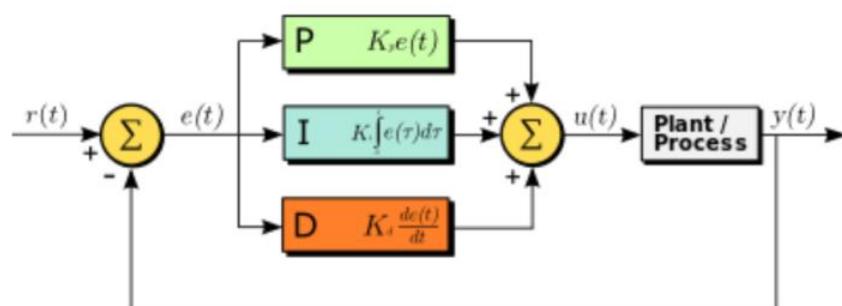
Gambar 2. 1 Fermentasi Tempe
(Sumber: Septi Lailia Suknia, 2020)

2.2 Ragi Tempe

Ragi tempe merupakan bibit yang dipergunakan untuk pembuatan tempe. Oleh karena itu sering pula disebut sebagai starter tempe. Ragi tempe mengandung jamur *Rhizopus sp.* yang dikenal pula sebagai jamur tempe. Secara tradisional, jamur untuk starter pembuatan tempe biasanya diambil dari daun pisang bekas pembungkus tempe pada waktu pembuatan, atau daun aru atau jati yang dikenal dengan sebutan “usar”. Namun demikian, penggunaan daun pisang atau usar ini sangat terbatas dan hanya untuk produksi kecil-kecilan. Untuk produksi yang lebih besar, starter tempe dibuat dengan memperbanyak jamur tempe (*Rhizopus sp.*) pada media tertentu. Selanjutnya, spora yang dihasilkannya diawetkan dalam keadaan kering bersama medium tempat tumbuh jamur tempe tersebut. Dengan teknik seperti ini kualitas tempe yang diproduksi akan terjamin, karena dosis penggunaan starter dapat diatur.

2.3 Proportional Integral Derivative (PID)

PID (*Proportional-Integral-Derivative*) merupakan metode pengendalian otomatis yang umum digunakan dalam sistem kontrol suhu, termasuk pada inkubator fermentasi tempe. Sistem ini bekerja dengan mendekati perbedaan antara suhu aktual dengan nilai yang diinginkan (*setpoint*), lalu mengoreksi perbedaannya agar kondisi dalam inkubator tetap stabil dan sesuai kebutuhan fermentasi.



Gambar 2. 2 Diagram Sistem PID
(Sumber: Sun, 2024)

Kontrol Proportional memberikan koreksi berdasarkan besarnya kesalahan (*error*) antara suhu aktual dan suhu target. Semakin besar *error*, semakin kuat respons sistem. Dalam fermentasi tempe, kontrol proporsional membantu mencapai suhu optimal dari 30–35°C dengan cepat dan efisien. Pout merupakan output kontrol proporsional, dimana K_p adalah konstanta atau parameter dan $e(t)$ adalah error yang merupakan selisih antara setpoint dan nilai aktual.

$$P_{out} = K_p e(t) \quad (1)$$

Kontrol Integral menjumlahkan *error* dari waktu ke waktu. Tujuannya adalah untuk menghilangkan kesalahan kecil yang terus-menerus, seperti suhu yang selalu kurang dari target walau sudah lama. Ini penting agar proses fermentasi tempe tidak terganggu oleh kesalahan akumulatif. K_i merupakan konstanta integral dan e merupakan input error.

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2)$$

Kontrol Derivatif memperkirakan perubahan suhu berdasarkan laju perubahannya. Ini membantu sistem mengantisipasi lonjakan atau penurunan suhu yang terlalu cepat, sehingga suhu tetap stabil dan tidak *overheat*. K_d merupakan konstanta derivatif.

$$D_{out} = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

Untuk mendapatkan suatu sistem kendali dengan hasil pengendalian yang memiliki waktu naik yang cepat, kesalahan yang kecil dan kestabilan yang baik, dapat dilakukan dengan menggabungkan ketiga aksi kendali tersebut menjadi aksi kendali PID (Fikri, 2019).

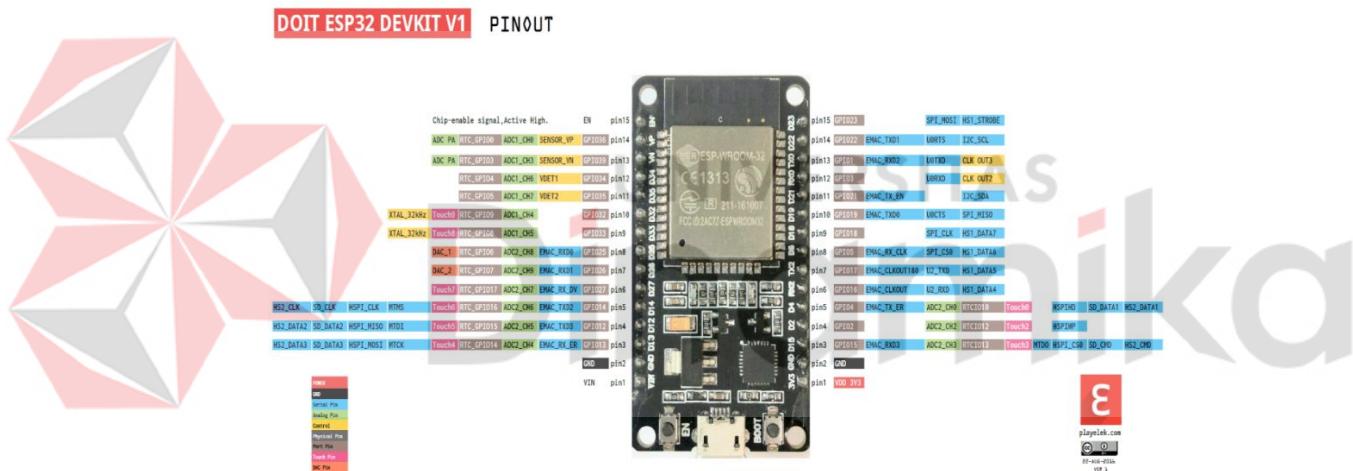
2.4 PWM (Pulse Width Modulation)

PWM adalah singkatan dari *Pulse Width Modulation*, yaitu teknik yang biasa digunakan untuk mengontrol daya ke perangkat listrik, dibuat praktis dengan *switch* daya elektronik. Metode PWM merupakan metode untuk pengaturan daya listrik dengan mengubah lebar pulsa sinyal digital dalam satu periode (Fikri, 2019). Pada aktuator lampu pijar, PWM bekerja dengan mengatur tingkat kecerahan lampu melalui

variasi *duty cycle*. Semakin besar *duty cycle*, semakin terang lampu menyala karena menerima daya lebih lama dalam tiap siklus. Teknik ini efisien dan umum digunakan dalam sistem kendali berbasis mikrokontroler.

2.5 Mikrokontroler ESP32

ESP32 adalah mikrokontroler yang dikenalkan oleh *Espressif System* merupakan penerus dari mikrokontroler EPS8266. Pada mikrokontroler ini sudah tersedia modul WiFi dalam *chip* sehingga sangat mendukung untuk membuat sistem aplikasi Internet of Things. (Muliadi, 2020) Terlihat pada gambar 2. 3 merupakan pin out dari ESP32. Pin tersebut dapat dijadikan input atau output untuk menyalakan komponen elektronika.



	Arduino Uno	Node MCU (ESP8266)	ESP32
SRAM	2kB	160kB	512kB
GPIO Pin (ADC/DAC)	14 (6/-)	17 (1/-)	36 (18/2)
Bluetooth	Tidak ada	Tidak ada	Ada
Wifi	Tidak ada	Ada	Ada
SPI/12C/UART	1/1/1	2/1/2	4/2/2

Terlihat perbedaan yang menjadi keunggulan mikrokontroler ESP32 dibanding dengan mikrokontroler yang lain, mulai dari *pin out* yang lebih banyak, *pin analog* lebih banyak, memori yang lebih besar, terdapat bluetooth 4.0 *low energy* serta tersedia WiFi yang memungkinkan untuk mengaplikasikan Internet of Things dengan mikrokontroler ESP32.

2.6 Internet of Things

Internet of Things merupakan sebuah konsep atau skenario dimana suatu objek yang memiliki kemampuan untuk mentransfer data melalui jaringan tanpa memerlukan interaksi manusi ke manusia atau manusia ke komputer. Pada dasarnya, Internet of Things mengacu pada benda yang dapat diidentifikasi secara unik sebagai representasi virtual dalam struktur berbasis internet. Istilah Internet of Things awalnya disarankan oleh Kevin Ashton pada tahun 1999 dan mulai terkenal melalui Auto-ID Center.

Internet of Things didefinisikan sebagai sebuah penemuan yang mampu menyelesaikan permasalahan yang ada melalui penggabungan teknologi dan dampak sosial. Jika ditinjau dari standarisasi secara teknik, IoT dapat digambarkan sebagai infrastruktur global untuk memenuhi kebutuhan informasi masyarakat, memungkinkan layanan canggih dengan interkoneksi baik secara fisik dan virtual berdasarkan pada yang telah ada dan perkembangan infromasi serta teknologi komunikasi (ICT) (Yudho Yudhanto, 2019).

Selain itu, sang pencetus istilah Internet of Things Kevin Ashton menyampaikan definisi dalam e-book berjudul “Making Sense of IoT”. Pengertian “Internet of Things” adalah sensor-sensor yang terhubung ke internet dan berperilaku seperti internet dengan membuat koneksi terbuka setiap saat, serta berbagai data secara bebas dan

memungkinkan aplikasi-aplikasi yang tidak terduga, sehingga komputer dapat memahami dunia di sekitar mereka dan menjadi bagian dari kehidupan manusia (Yudho Yudhanto, 2019).

2.7 Sensor DHT22

Sensor DHT22 adalah sensor digital yang berguna untuk mengukur tingkat kelembapan udara dan suhu. Kemudian sensor ini menggunakan kapasitor dan termistor untuk mendeteksi perubahan resistivitas akibat perubahan kelembapan dan suhu udara. DHT22 memiliki rentang ukur suhu pada sensor 0% sampai 100%, sedangkan kelembapan memiliki ukur sekitar 40°C hingga 125°C. Sensor ini memiliki tiga buah pin yaitu Vcc sebagai sumber tegangan, pin *input output*, dan pin *ground* dimana dapat dihubungkan ke mikrokontroler lainnya (Fitri Wulandari, 2020). Gambar 2.4 merupakan bentuk sensor DHT22.



Gambar 2. 4 Sensor DHT22
(Sumber: Fitri Wulandari, 2020)

2.8 Lampu Pijar

Lampu pijar adalah sumber cahaya buatan yang dihasilkan melalui penyaluran arus listrik melalui filamen yang kemudian memanaskan dan menghasilkan cahaya. Kaca yang menyelubungi filamen panas tersebut menghalangi udar untuk berhubungan dengannya sehingga filamen tidak akan langsung rusak akibat oksidasi. Pada dasarnya filamen pada sebuah lampu pijar adalah sebuah resistor. Saat dialiri arus listrik, filamen tersebut menjadi sangat panas, berkisar antara 2800°K hingga maksimum 3700°K

(Irmam Hariman, 2023). Ini menyebabkan warna cahaya yang dipancarkan oleh lampu pijar biasanya berwarna kuning kemerahan. Gambar 2. 5 bentuk lampu pijar.



Gambar 2. 5 Lampu Pijar
(Sumber: Jhulinda Nizar Wati, 2023)

2.9 Power Supply

Power supply adalah alat atau sistem yang berfungsi untuk menyalurkan energi listrik atau bentuk energi jenis apapun yang sering digunakan untuk menyalurkan energi listrik. Secara prinsip rangkaian power supply adalah menurunkan tegangan AC, menyearahkan tenganan AC sehingga menjadi DC, menstabilkan tegangan DC, yang terdiri dari atas transformator, dioda dan kapasitor atau condensator. Terlihat pada Gambar. 5 Transformator berbentuk kotak dan terdapat lilitan-lilitan kawat email didalamnya. Tugas dari komponen ini adalah untuk menaikkan atau menurunkan tegangan AC sesuai kebutuhan.



Gambar 2. 6 Power Supply
(Sumber: Susi Susanti Gea, 2024)

2.10 Module AC Dimmer

Module AC Light Dimmer module merupakan module dimmer buatan RobotDyn yang dapat dikontrol oleh mikrokontroler seperti Arduino, Raspberry Pi dan sebagainya. Dalam modul dimmer ini terdapat fitur pin zero crossing detector. Adanya fitur ini menyebabkan Mikrokontroler dapat mengetahui waktu yang pas dalam pengiriman sinyal PWM. Timing yang tidak tepat mengakibatkan arus AC dengan TRIAC akan menghasilkan sinyal output yang kacau apabila dihubungkan dengan PWM dan dapat menyebabkan dimmer tidak befungsi semestinya (Ahmad Aldi, 2024).



Gambar 2. 7 AC Dimmer Robotdyn
(Sumber: Ahmad Aldi, 2024)

Proses waktu penyalan *zero crossing* bergantung pada saat sinyal menyentuh nilai nol. Maka dibutuhkan mekanisme untuk mendeteksi waktu sinyal tersebut bernilai 0. Pada aplikasi dimmer digital, perlintasan titik nol harus dideteksi terlebih dahulu sebelum melakukan penyalan. Pendekripsi nilai nol bisa dilakukan dengan rangkaian *zero crossing detector* (Ahmad Aldi, 2024).

2.11 Ultrasonik Mist Maker

Ultrasonik mist maker merupakan modul yang berfungsi untuk menghasilkan uap air atau kabut. Mist Maker memanfaatkan osilasi listrik pada frekuensi ultrasonik. Keramik perubahan osilasi listrik menjadi solusi mekanik, yang menciptakan kabut dan semprotan air. Mist Maker akan dimatikan secara otomatis jika air terlalu rendah. 1-1

/ 2 “sampai 2” air adalah kedalaman operasi yang ideal, meskipun akan bekerja pada sampai dengan 4 “air. *Fogger ultrasonically* akan menguap sekitar 1 liter air di 4 sampai 5 jam. Untuk penggunaan di dalam ruangan. Tingkat air: approx. 80ml per jam (MARDIANAH, 2024).



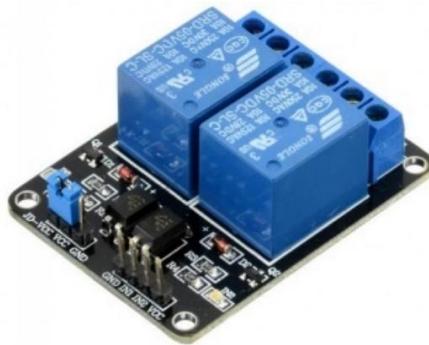
Gambar 2. 8 Mist Maker

(Sumber: MARDIANAH, 2024)

Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa Ultrasonik Mist Maker merupakan modul yang digunakan untuk menghasilkan uap air atau kabut dengan memanfaatkan osilasi listrik pada frekuensi ultrasonik. Modul ini menggunakan keramik untuk mengubah osilasi listrik menjadi osilasi mekanik, menciptakan kabut dan semprotan air (MARDIANAH, 2024).

2.12 Relay

Relay tersusun atas lilitan-lilitan yang bisa menjadikan saklar relay membuka dan menutup. Relay merupakan suatu perangkat elektronika yang bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetik. Kendali ON/OFF relay ini bergantung pada nilai output sensor yang diproses terlebih dahulu pada mikrokontroler nodeMCU, kemudian akan memberikan perintah kerja pada relay ini (MARDIANAH, 2024).



Gambar 2. 9 Relay 2 Channel
(Sumber: MARDIANAH, 2024)

Jadi relay adalah sebuah komponen elektromekanis yang berfungsi seperti saklar otomatis. Relay dapat mengalirkan atau memutuskan arus listrik ke suatu perangkat seperti kipas DC berdasarkan sinyal kendali dari mikrokontroler. Relay memungkinkan rangkaian kecil atau arus rendah untuk mengontrol rangkaian yang lebih besar. Inkubator pada fermentasi tempe, relay membuat sistem otomatis untuk mengatur kelembapan.

2.13 Kipas DC

Kipas DC adalah kipas yang digerakkan oleh arus searah Direct Current (DC). Biasanya kipas ini menggunakan tegangan rendah, seperti 5V, 12V, atau 24V, dan sering digunakan dalam berbagai aplikasi elektronik, termasuk alat-alat otomatisasi, hingga proyek berbasis mikrokontroler seperti penggunaan untuk kelembapan alat ini.



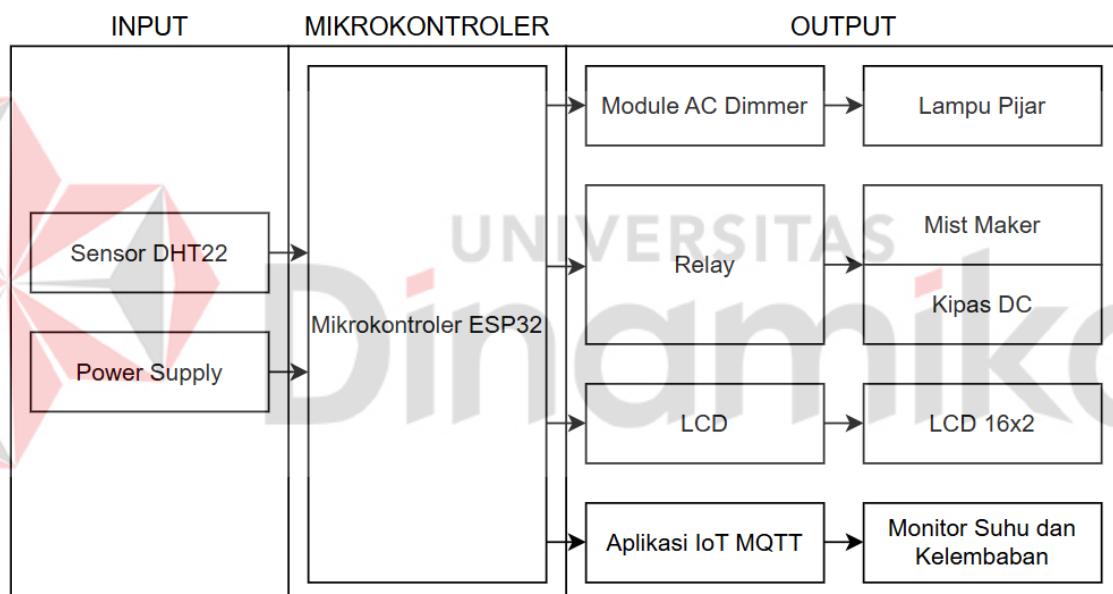
Gambar 2. 10 Kipas DC
(Sumber: Rachmat Aulia, 2021)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Blok

Dalam penelitian, perancangan blok diagram dilakukan untuk mengetahui alat-alat yang digunakan dalam membuat satu sistem, yang terdiri dari tiga bagian yaitu masukan (input), mikrokontroler, dan keluaran (output). Pada gambar 3.1 merupakan perancangan blok diagram pada prototype rancangan alat.

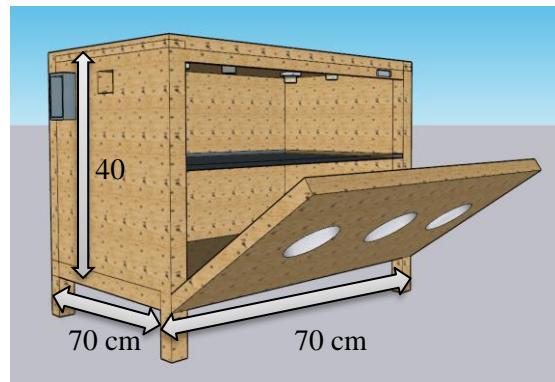


Gambar 3. 1 Diagram blok sistem

ESP32 sebagai pengendali utama central processing unit (CPU) dari sebuah sistem. Sensor DHT22, dan Power supply termasuk kedalam masukan (input) yang dihubungkan pada mikrokontroler. Dan output Module dimmer untuk menyalakan lampu pijar, relay untuk menyalakan mist maker dan kipas DC, LCD untuk menampilkan nilai suhu inkubator, dan Aplikasi IoT MQTT untuk monitoring suhu dan kelembapan.

3.2 Rancangan Mekanik

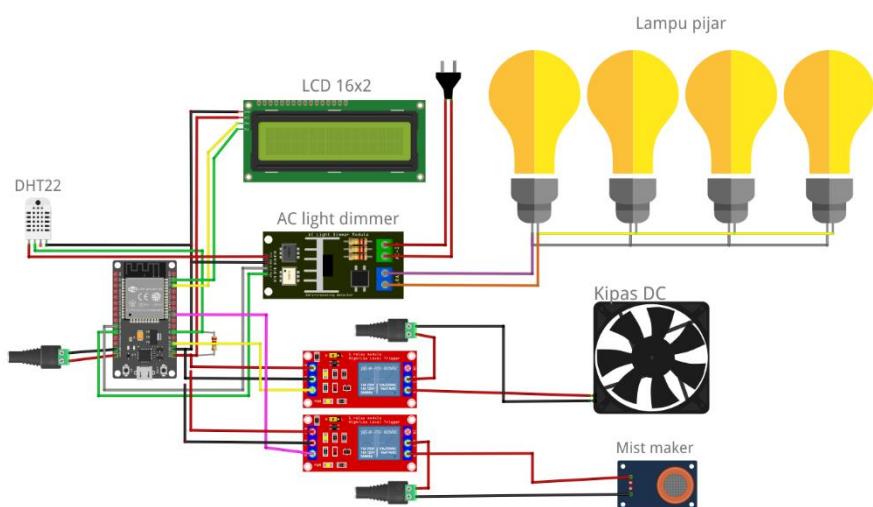
Adapun material yang digunakan pada pembuatan inkubator fermentasi tempe yaitu menggunakan kayu MDF. Didesain dengan ukuran panjang 70 cm, lebar 70 cm, dan tinggi 40 cm. Seperti terlihat pada gambar 3.2



Gambar 3. 2 Rancangan mekanik

3.3 Rancangan Elektronik

Rancangan elektronika pada pembuatan rangkaian alat penelitian ini, dibangun dari beberapa komponen yang dihubungkan menjadi satu. Komponen dihubungkan untuk membangun satu sistem yang dapat bekerja mengikuti perintah yang dibuat melalui program pada ESP32 sebagai mikrokontroler. Skema pembuatan rangkaian komponen tugas akhir dapat dilihat pada Gambar 3. 3.

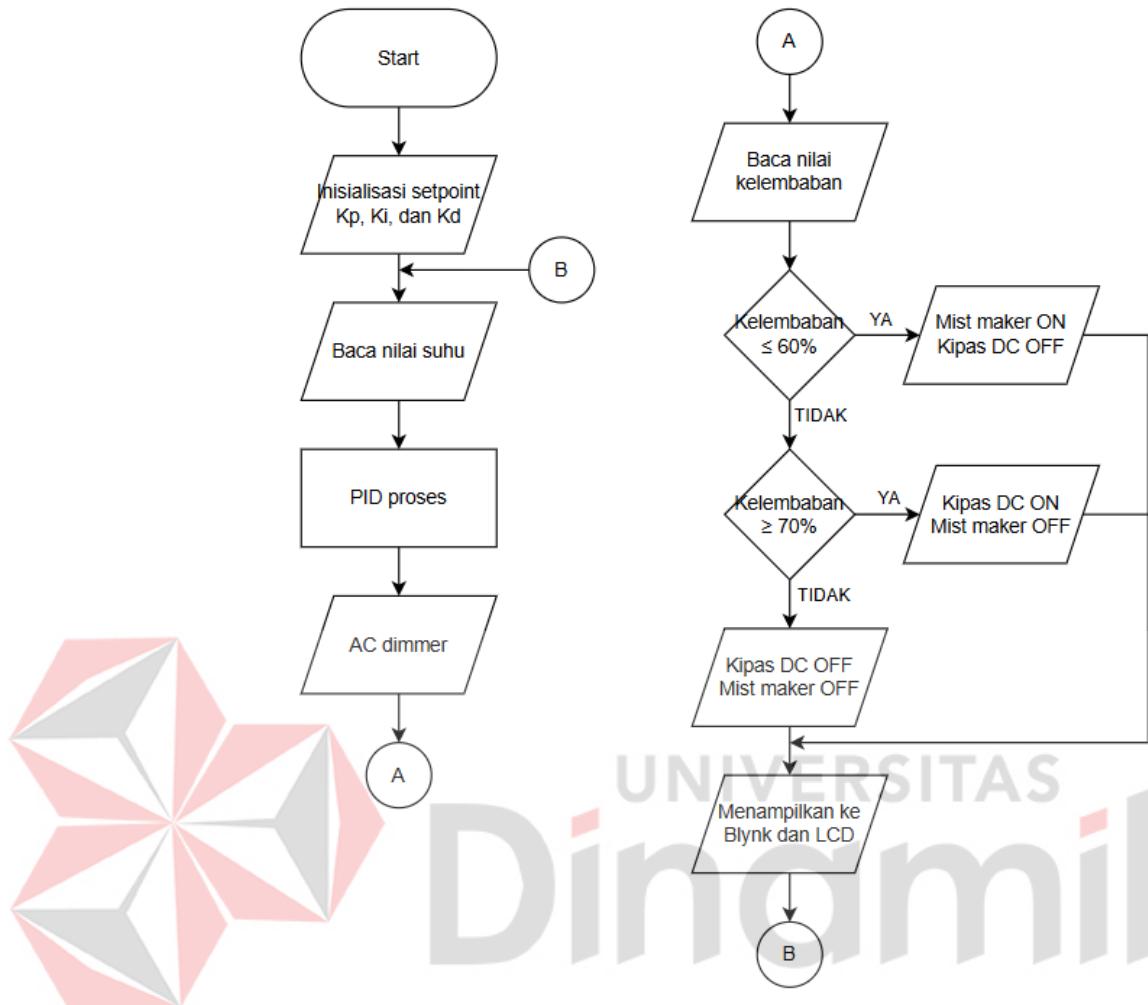


Gambar 3. 3 Rangkaian alat

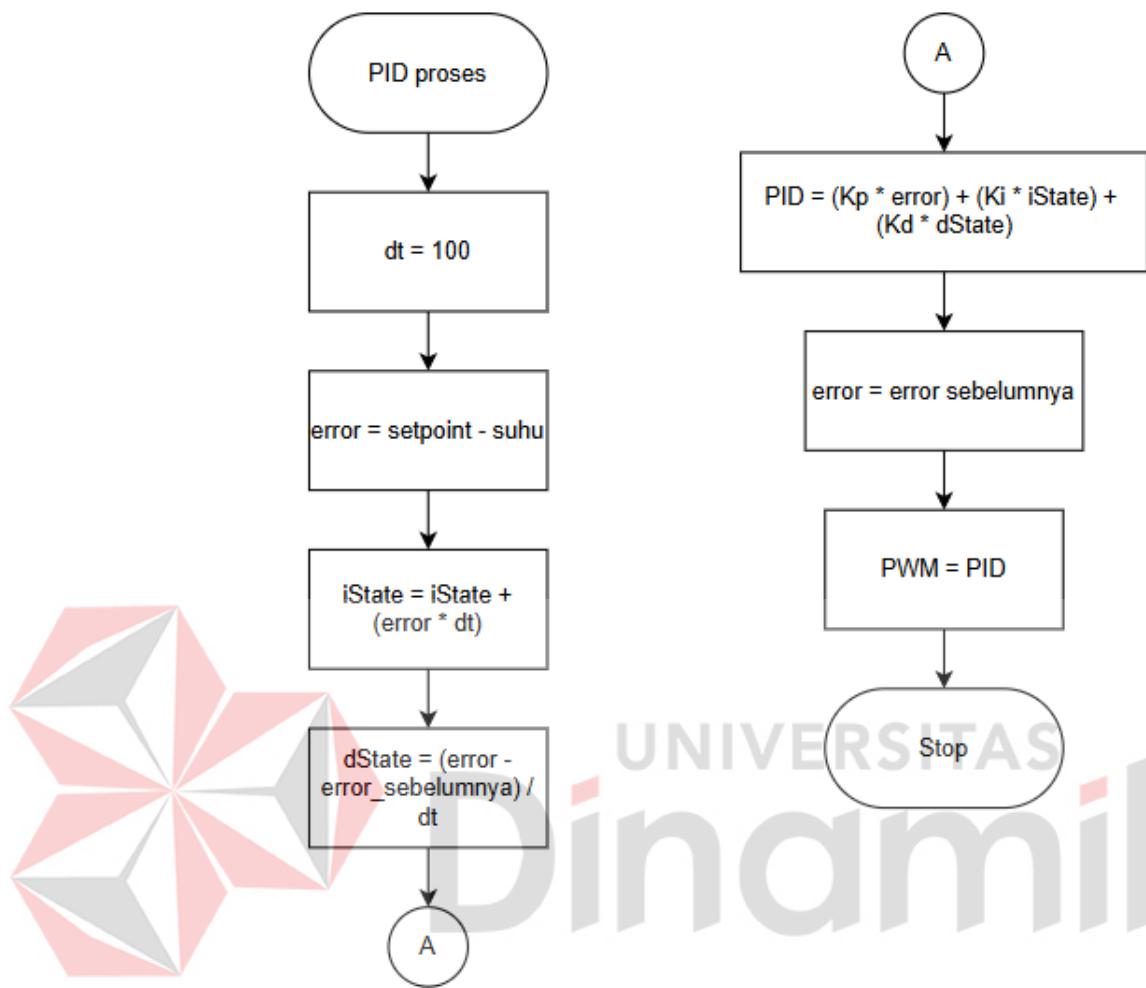
DHT22 sebagai input untuk membaca nilai suhu dan kelembapan, kipas DC dan mist maker sebagai output yang dikontrol melalui relay, dan lampu pijar adalah output dari sistem pengendali berupa intensitas cahaya pada lampu pemanas. Lampu akan menyala terang apabila suhu di dalam inkubator berada di bawah *setpoint* suhu yang sudah ditentukan, sebagai hasil dari sinyal kontrol PID yang menghasilkan nilai tinggi. Sebaliknya, ketika suhu mendekati atau sudah mencapai *setpoint*, maka lampu akan menyala lebih redup karena nilai *output* PID yang menurun. Ini adalah cerminan mekanisme kontrol proporsional terhadap selisih suhu *error*, dengan tujuan menjaga kestabilan suhu inkubator.

3.4 Flowchart Sistem

Sistem kerja perlu dipahami untuk mengerti urutan operasi dari alat yang dibuat, sehingga program yang telah dibuat dapat dijalankan secara berurutan sesuai dengan sistem kerja yang diinginkan.



Gambar 3.4 Flowchart sistem kerja



Gambar 3. 5 Flowchart proses PID

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Akurasi Suhu dan Kelembapan Sensor DHT22

Pengujian dilakukan untuk mengetahui akurasi sensor DHT22 dalam mengukur suhu dan kelembapan. Proses kalibrasi ini sangat penting agar hasil pengukuran selama proses fermentasi tempe dapat dipercaya dan konsisten. Pada pengujian ini, sensor DHT22 dibandingkan dengan alat ukur referensi yaitu HTC, yang digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan secara manual. Perbandingan dilakukan dengan cara mencatat pembacaan suhu dari kedua alat setiap menit selama 10 menit. Nilai akurasi kemudian dihitung berdasarkan persentase *error* antara pembacaan sensor dan alat ukur referensi HTC, sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 4. 1.

Tabel 4. 1 Akurasi suhu

Pengujian/Menit	DHT22° C	Termometer ° C	Kondisi	%error
1	35,0	34,6	terbaca	1,2
2	35,0	34,6	terbaca	1,2
3	35,0	34,7	terbaca	0,9
4	35,0	34,8	terbaca	0,6
5	35,0	34,8	terbaca	0,6
6	35,0	34,8	terbaca	0,6
7	35,0	34,8	terbaca	0,6
8	35,0	34,8	terbaca	0,6
9	35,0	34,9	terbaca	0,3
10	35,0	34,9	terbaca	0,3
Rata – rata error				0,69%

Menghitung nilai %error dengan:

$$\%error = \frac{|Nilai DHT22 - Nilai Termometer|}{Nilai Termometer} \times 100\% \quad (4)$$

Hasil pengujian suhu yang disajikan pada Tabel 4. 1 menunjukkan bahwa pembacaan suhu dari sensor DHT22 memiliki tingkat akurasi yang baik jika dibandingkan dengan termometer HTC. Rata-rata nilai persentase *error* dari sepuluh kali pengukuran adalah sebesar 0,69%, yang menunjukkan bahwa perbedaan antara pembacaan DHT22 dan HTC relatif kecil.

Selisih suhu maksimum antara sensor DHT22 dan termometer berada pada rentang 0.0°C hingga 0.4°C, dengan nilai error individu berkisar antara 0.0% hingga 1.2%. Hasil ini menunjukkan bahwa sensor DHT22 mampu memberikan pembacaan suhu yang cukup akurat dan stabil, sehingga dapat digunakan dalam pengamatan suhu selama proses fermentasi.

Tabel 4. 2 Akurasi kelembapan

Pengujian/Menit	DHT22%	Hygrometer%	Kondisi	%error
1	61,0	63	terbaca	3,2
2	60,0	63	terbaca	4,8
3	60,3	63	terbaca	4,3
4	60,2	63	terbaca	4,4
5	60,2	63	terbaca	4,8
6	61,5	64	terbaca	2,4
7	60,4	63	terbaca	2,7
8	61,3	63	terbaca	2,7
9	62,0	64	terbaca	3,1
10	61,8	64	terbaca	3,4
Rata – rata error				3,6%

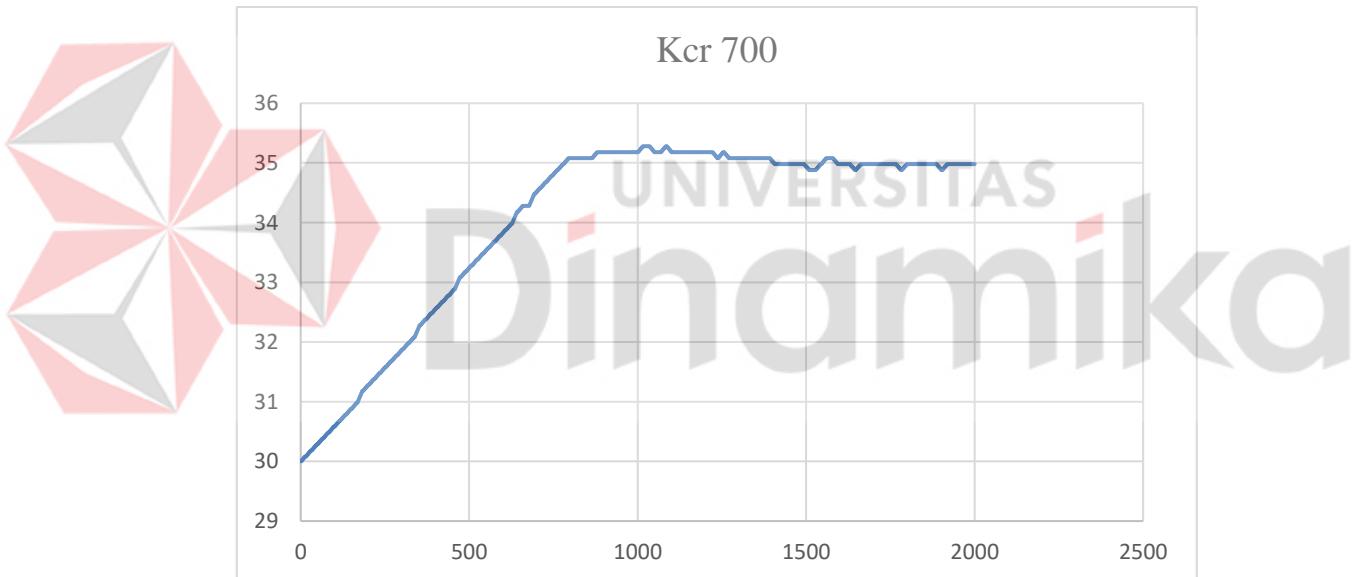
Menghitung nilai %error dengan:

$$\%error = \frac{Nilai\ DHT22 - Nilai\ Hygrometer}{Nilai\ hygrometer} \times 100\% \quad (5)$$

Pada tabel 4. 2 pengukuran kelembapan menunjukkan rata-rata *error* 3.6%, dengan *error* terbesar 4.8% pada pengukuran kedua dan kelima. Sebagian besar *error* berkisar di bawah 3% kecuali pengukuran kesatu. Selisih pembacaan kelembapan berkisar 1 – 3% antara pembacaan sensor DHT22 dengan HTC.

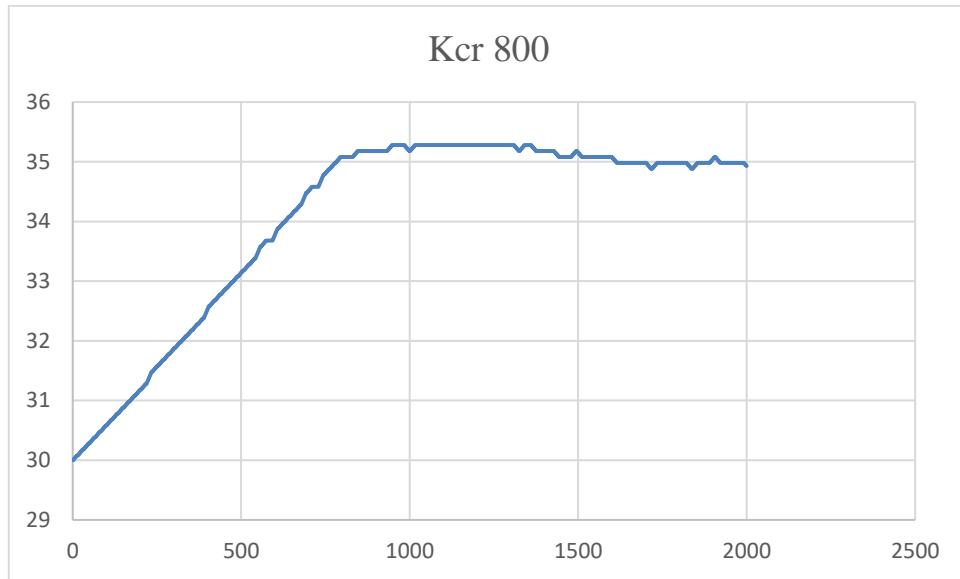
4.2 Grafik Pengujian PID

Pengujian PID dilakukan untuk menjaga suhu ruang fermentasi pada set point 35°C . Sistem PID (*Proportional Integral Derivative*) mengatur secara otomatis pemanasan dengan mengaktifkan lampu pemanas berdasarkan data sensor suhu, sehingga suhu tetap stabil pada nilai yang diinginkan. Pada penelitian ini, parameter PID ditentukan menggunakan metode *trial and error*, yang merupakan salah satu metode tuning parameter PID paling umum digunakan dalam sistem kontrol berbasis eksperimen. Berdasarkan grafik perbandingan respon sistem pada berbagai nilai K_{cr} 700 hingga 1000, berikut adalah penjelasan analisis setiap percobaan hingga ditentukan bahwa $K_{cr} = 700$ adalah nilai yang optimal:



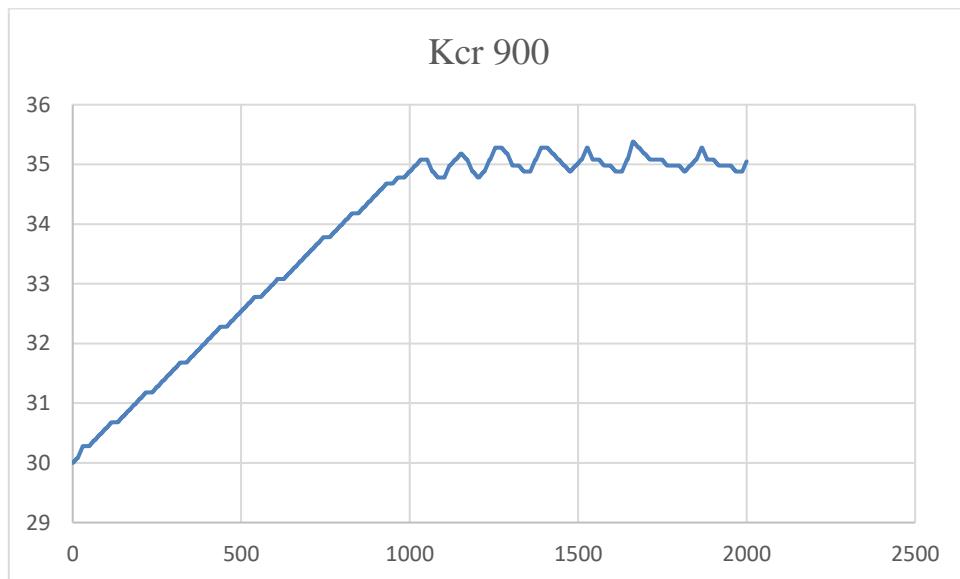
Gambar 4. 1 Grafik PID dengan nilai $K_{cr} 700$

Grafik ini menunjukkan bahwa respon sistem terlihat stabil dengan waktu pencapaian suhu set point 35°C yang cepat dan tanpa overshoot yang signifikan. Suhu naik secara bertahap dan berhenti pada nilai target dengan sedikit atau tanpa osilasi. Ini menunjukkan bahwa sistem P (Proportional) pada PID bekerja secara optimal, sehingga nilai $K_{cr} = 700$ menjadi kandidat untuk tuning parameter lebih lanjut.



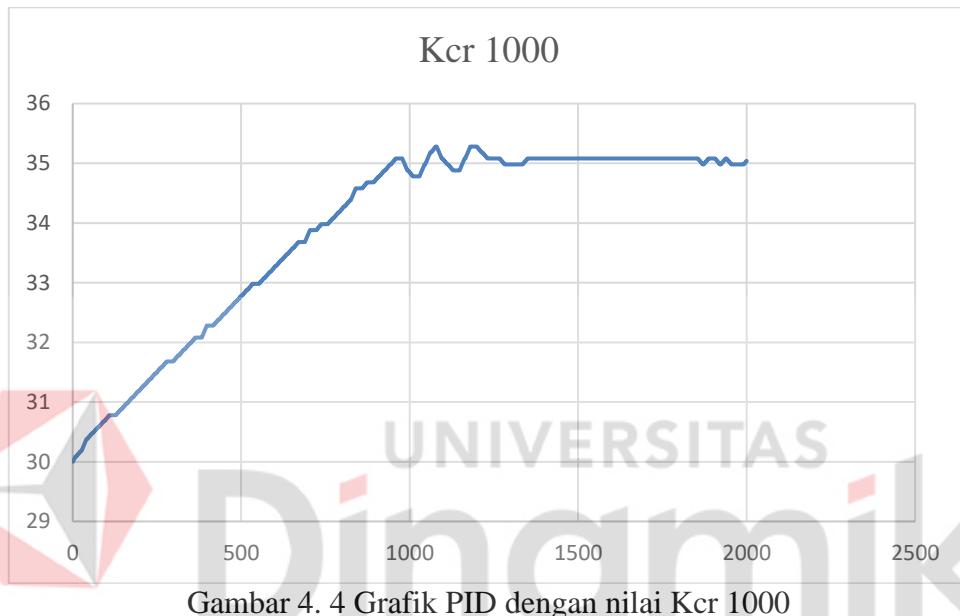
Gambar 4. 2 Grafik PID dengan nilai Kcr 800

Grafik dengan $K_{cr} = 800$ menunjukkan adanya overshoot untuk mencapai titik maksimum kemudian turun untuk mencapai set point 35°C namun waktu yang dibutuhkan untuk turun lebih lama dibandingkan dengan nilai $K_{cr} = 700$. Respon ini terlalu lama untuk mencapai *set point* sehingga kurang cocok digunakan untuk fermentasi kestabilan suhu.

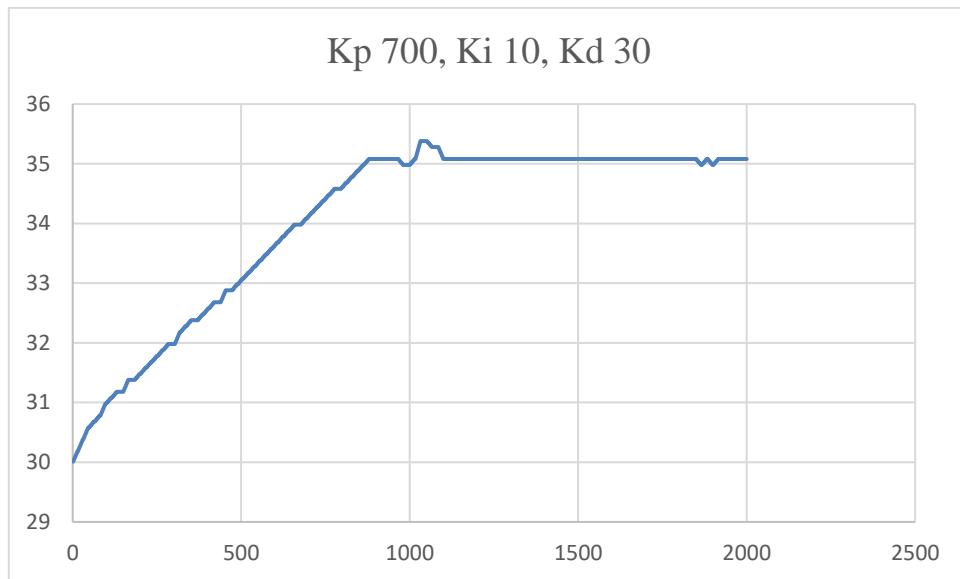


Gambar 4. 3 Grafik PID dengan nilai Kcr 900

Pada nilai $K_{cr} = 900$, osilasi dan overshoot meningkat lebih tajam dibandingkan nilai sebelumnya. Respon sistem menjadi agresif, ditandai dengan suhu yang melewati *set point* cukup jauh dan suhu mengalami naik turun yang tidak stabil. Kestabilan tercapai lebih lambat dan tidak presisi. Ini menunjukkan bahwa $K_{cr} = 900$ terlalu tinggi untuk sistem ini.



Nilai K_{cr} ini menghasilkan respon yang stabil namun waktu yang diperlukan pemanas untuk menaikkan suhu mencapai set point 35°C cukup lama dibandingkan dengan nilai $K_{cr} = 700$ dan sebelum overshoot suhu mencapai nilai maksimum terlihat pada grafik nilai suhu sudah mengalami penurunan yang signifikan sehingga nilai ini terlalu besar dan tidak cocok digunakan untuk sistem ini.



Gambar 4. 5 Grafik PID dengan nilai Kp 700, Ki 10, Kd 30

Grafik respon sistem dengan pengaturan PID menggunakan nilai $K_p = 700$, $K_i = 10$, dan $K_d = 30$ menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga suhu ruang fermentasi secara stabil pada *set point* 35°C . Dari grafik terlihat bahwa suhu meningkat secara bertahap menuju suhu target tanpa mengalami overshoot yang signifikan. Setelah mencapai suhu *set point*, suhu tetap stabil dengan osilasi yang sangat kecil, menandakan bahwa sistem pengendali bekerja secara optimal.

Nilai parameter PID ini ditentukan berdasarkan pengujian awal terhadap berbagai nilai K_{cr} , mulai dari $K_{cr} = 700$ hingga $K_{cr} = 1000$. Dari pengujian tersebut, nilai $K_{cr} = 700$ dipilih sebagai nilai yang paling stabil karena menghasilkan respon sistem yang cepat, minim overshoot, dan mampu mencapai suhu target tanpa nilai yang berubah berlebihan. Pengujian-pengujian sebelumnya pada K_{cr} yang lebih tinggi misalnya $K_{cr} = 800$, 900 , dan 1000 menunjukkan adanya osilasi besar dan ketidakstabilan suhu, sehingga dinilai kurang cocok untuk menjaga suhu inkubator yang membutuhkan kestabilan tinggi.

Berdasarkan nilai $K_{cr} = 700$ inilah, parameter PID kemudian disesuaikan menggunakan metode *trial and error* untuk mendapatkan kombinasi nilai K_p , K_i , dan K_d yang paling sesuai. Hasil dari tuning tersebut adalah nilai $K_p = 700$, $K_i = 10$, dan

$K_d = 30$, yang terbukti memberikan respon sistem yang paling stabil dan efisien. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa nilai $K_{cr} = 700$ menjadi dasar penentuan parameter PID akhir yang digunakan dalam sistem pengendalian suhu fermentasi tempe pada penelitian ini.

4.3 Pengujian Perbandingan Tempe

Dalam penelitian ini, dilakukan pengujian perbandingan proses fermentasi tempe antara metode inkubator dengan fermentasi secara alami. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui perbedaan waktu tumbuh jamur, suhu, serta kelembapan pada kedua metode selama proses fermentasi, sehingga dapat diketahui efektivitas masing-masing metode dalam menghasilkan tempe yang berkualitas.

Tabel 4. 3 Pengujian pertama

Lama Fermentasi	Kondisi jamur yang di fermentasi secara		Nilai suhu			Nilai kelembapan		
	Inkubator	Alami	DHT °C	HTC °C	Alami °C	DHT %	HTC %	Alami %
-	Jamur belum tumbuh	Jamur belum tumbuh	28,78	29,3	31,2	52	61	70
2 jam	Jamur belum tumbuh	Jamur belum tumbuh	35,0	34,0	31,5	60,0	75	68
4 jam	Jamur belum tumbuh	Jamur belum tumbuh	35,0	34,8	30,6	60,2	66	69
6 jam	Jamur belum tumbuh	Jamur belum tumbuh	35,0	34,8	29,8	60	64	72
8 jam	Jamur belum tumbuh	Jamur belum tumbuh	35,0	34,8	29,8	60,1	65	73
10 jam	Jamur belum tumbuh	Jamur belum tumbuh	35,0	34,9	29,8	60,3	65	73
12 jam	Jamur belum tumbuh	Jamur belum tumbuh	35,0	34,8	30,1	60,4	65	71
14 jam	Jamur mulai tumbuh	Jamur belum tumbuh	35,0	34,8	32,2	61	65	62

Lama Fermentasi	Kondisi jamur yang di fermentasi secara		Nilai suhu			Nilai kelembapan		
	Inkubator	Alami	DHT °C	HTC °C	Alami °C	DHT %	HTC %	Alami %
16 jam	Jamur mulai menyelimuti kedelai	Jamur belum tumbuh	35,0	35,0	33,6	60,6	65	52
18 jam	Jamur menyelimuti kedelai	Jamur belum tumbuh	35,0	35,0	34,2	60	65	47
20 jam	Sudah menjadi tempe	Jamur mulai tumbuh	-	-	33,8	-	-	44
22 jam	Sudah menjadi tempe	Jamur mulai menyelimuti muti kedelai	-	-	33	-	-	45
24 jam	Sudah menjadi tempe	Jamur menyelimuti muti kedelai	-	-	32,6	-	-	59
26 jam	Sudah menjadi tempe	Sudah menjadi tempe	-	-	30,8	-	-	69

Pada tabel 4. 3 dilakukan pengamatan proses fermentasi tempe dengan membandingkan metode inkubator dan fermentasi secara alami. Dari data, dapat dilihat beberapa hal penting:

1. Pertumbuhan Jamur

- Pada jam ke-0 hingga 12, belum terlihat pertumbuhan jamur pada kedelai baik yang diperlakukan menggunakan inkubator maupun secara alami.
- Memasuki jam ke-14, jamur mulai tumbuh pada metode inkubator, sedangkan pada fermentasi alami belum terlihat adanya pertumbuhan.
- Pada jam ke-16, jamur mulai menyelimuti kedelai pada metode inkubator, sedangkan metode alami masih belum menunjukkan tanda-tanda pertumbuhan jamur.
- Pada jam ke-18, kedelai dalam inkubator sudah terselimuti jamur, sementara pada fermentasi alami jamur masih belum tumbuh.

- Pada jam ke-20, kedelai pada metode inkubator telah berubah menjadi tempe, sedangkan pada metode fermentasi alami jamur baru mulai tumbuh.
 - Pada jam ke-26, kedelai yang diperlakukan secara alami baru berubah menjadi tempe.
2. Suhu dan Kelembapan
 - Suhu pada metode inkubator dijaga secara stabil di angka 35°C sepanjang proses fermentasi, sesuai dengan suhu optimal untuk pertumbuhan *Rhizopus spp.*
 - Suhu pada fermentasi secara alami tidak stabil karena dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, dengan nilai yang fluktuatif dari awal hingga akhir proses.
 3. Waktu dan Pembentukan Tempe
 - Kedelai yang diperlakukan menggunakan inkubator telah menjadi tempe dalam waktu 20 jam fermentasi.
 - Pada metode fermentasi alami, kedelai baru menjadi tempe setelah melalui proses fermentasi selama 26 jam.





Gambar 4. 6 Tempe pengujian pertama sebelum fermentasi

Gambar 4. 6 menunjukkan kondisi awal kedelai sebelum memasuki proses fermentasi. Kedelai telah melalui tahap peragian dengan ragi tempe, namun belum menunjukkan tanda-tanda pertumbuhan jamur. Secara visual, kedelai masih tampak terpisah satu sama lain dengan warna permukaan yang dominan kuning, menandakan bahwa proses fermentasi belum berlangsung dan belum ada perkembangan miselium dari jamur *Rhizopus spp.*



Gambar 4. 7 Tempe pengujian pertama setelah 20 jam fermentasi

Gambar 4.7 menampilkan perbandingan hasil fermentasi setelah 20 jam menggunakan dua metode berbeda. Bagian kiri gambar menunjukkan kedelai yang difermentasi menggunakan inkubator, sedangkan bagian kanan menunjukkan kedelai yang difermentasi secara alami. Terlihat bahwa pada metode inkubator, jamur telah tumbuh dengan baik dan menyelimuti seluruh permukaan kedelai sehingga telah terbentuk tempe. Sementara itu, pada fermentasi secara alami, pertumbuhan jamur masih sangat minim dan belum menyelimuti kedelai secara merata. Hal ini menunjukkan efektivitas metode inkubator dalam mempercepat pertumbuhan jamur dan pembentukan tempe.



Gambar 4. 8 Tempe pengujian pertama setelah 26 jam fermentasi

Gambar 4. 8 memperlihatkan hasil fermentasi setelah berlangsung selama 26 jam. Kedelai di sebelah kiri merupakan hasil fermentasi menggunakan inkubator yang sejak jam ke-20 sudah menjadi tempe dan tidak menunjukkan perubahan signifikan. Sedangkan kedelai di sebelah kanan yang difermentasi secara alami kini telah mengalami pertumbuhan jamur yang merata dan telah berubah menjadi tempe. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa fermentasi alami membutuhkan waktu lebih lama yaitu 26 jam untuk mencapai kondisi yang sama dengan fermentasi menggunakan inkubator yang hanya membutuhkan waktu 20 jam.

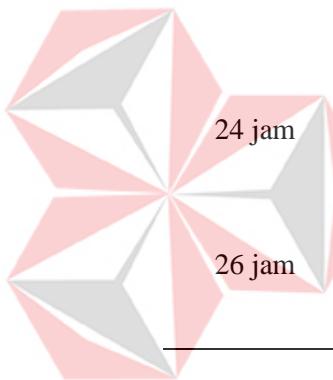
Pada pengujian pertama, proses fermentasi tempe menggunakan inkubator yang dilengkapi dengan sistem kontrol suhu dan kelembapan berbasis metode PID untuk mengontrol suhu terbukti mampu mempercepat pertumbuhan jamur *Rhizopus spp.*

dibandingkan dengan fermentasi secara alami. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa dalam waktu 20 jam, kedelai yang difermentasi dalam inkubator telah sepenuhnya berubah menjadi tempe. Sementara itu, kedelai yang difermentasi secara alami baru menunjukkan pertumbuhan jamur pada jam ke-20 dan baru benar-benar menjadi tempe setelah 26 jam fermentasi. Hal ini menunjukkan bahwa metode inkubator mampu mempercepat proses fermentasi selama 6 jam. Jika ingin melihat lebih detail proses kedelai yang belum terselimuti jamur sampai terselimuti jamur sehingga menjadi tempe dapat dilihat pada **“Lampiran 2 Dokumentasi Pengujian Pertama Proses Fermentasi Tempe”**, dapat dilihat dokumentasi proses fermentasi kedelai baik metode inkubator ataupun secara alami hingga menjadi tempe setiap 2 jam selama 26 jam.

Tabel 4. 4 Pengujian kedua

Lama Fermentasi	Kondisi jamur yang di fermentasi secara Inkubator	Nilai suhu			Nilai kelembapan		
		Alami	DHT °C	HTC °C	Alami °C	DHT %	HTC %
- 2 jam	Jamur belum tumbuh	Jamur belum tumbuh	28.8	29.6	31.5	60	61
	Jamur belum tumbuh	Jamur belum tumbuh	35.0	34.8	30.7	60.8	66
4 jam	Jamur belum tumbuh	Jamur belum tumbuh	35.0	34.9	30.5	60.9	66
	Jamur belum tumbuh	Jamur belum tumbuh	35.0	34.8	30.2	61	66
6 jam	Jamur belum tumbuh	Jamur belum tumbuh	35.0	34.9	30.4	60	65
	Jamur belum tumbuh	Jamur belum tumbuh	35.0	34.8	30.2	61	66
8 jam	Jamur belum tumbuh	Jamur belum tumbuh	35.0	34.9	30.4	60	65
	Jamur belum tumbuh	Jamur belum tumbuh	35.0	34.9	30.4	60	65
10 jam	Jamur belum tumbuh	Jamur belum tumbuh	35.0	34.9	29.7	60	66
	Jamur belum tumbuh	Jamur belum tumbuh	35.0	34.8	30.9	63	66
12 jam	Jamur belum tumbuh	Jamur belum tumbuh	35.0	34.8	30.9	63	72

Lama Fermentasi	Kondisi jamur yang di fermentasi secara		Nilai suhu			Nilai kelembapan		
	Inkubator	Alami	DHT °C	HTC °C	Alami °C	DHT %	HTC %	Alami %
14 jam	Jamur mulai tumbuh	Jamur belum tumbuh	35.0	35.0	32.8	60.2	66	56
16 jam	Jamur mulai menyelimuti kedelai	Jamur belum tumbuh	35.0	34.9	33.8	61.4	65	50
18 jam	Jamur menyelimuti kedelai	Jamur belum tumbuh	35.0	34.8	34.3	60	65	47
20 jam	Sudah menjadi tempe	Jamur mulai tumbuh	-	-	33.7	-	-	48
22 jam	Sudah menjadi tempe	Jamur mulai menyelimuti muti kedelai	-	-	32.8	-	-	55
24 jam	Sudah menjadi tempe	Jamur menyelimuti muti kedelai	-	-	32.6	-	-	63
26 jam	Sudah menjadi tempe	Sudah menjadi tempe	-	-	31.9	-	-	72



Pada tabel 4. 4 dilakukan pengamatan proses fermentasi tempe dengan membandingkan metode inkubator dan fermentasi secara alami. Dari data, dapat dilihat beberapa hal penting:

1. Pertumbuhan Jamur

- Pada jam ke-0 hingga 12, belum terlihat pertumbuhan jamur pada kedelai baik yang diperlakukan inkubator maupun secara alami.
- Memasuki jam ke-14, jamur mulai tumbuh pada metode inkubator, sedangkan pada fermentasi alami belum terlihat adanya pertumbuhan.
- Pada jam ke-16, jamur mulai menyelimuti kedelai pada metode inkubator, sedangkan metode alami masih belum menunjukkan tanda-tanda

pertumbuhan jamur.

- Pada jam ke-18, kedelai dalam inkubator sudah terselimuti jamur, sementara pada fermentasi alami jamur masih belum tumbuh.
 - Pada jam ke-20, kedelai pada metode inkubator telah berubah menjadi tempe, sedangkan pada metode fermentasi alami jamur baru mulai tumbuh.
 - Pada jam ke-26, kedelai yang diperlakukan secara alami baru berubah menjadi tempe.
2. Suhu dan Kelembapan
- Suhu pada metode inkubator dijaga secara stabil di angka 35°C sepanjang proses fermentasi, sesuai dengan suhu optimal untuk pertumbuhan *Rhizopus spp.*
 - Suhu pada fermentasi secara alami tidak stabil karena dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, dengan nilai yang fluktuatif dari awal hingga akhir proses.
3. Waktu dan Pembentukan Tempe
- Kedelai yang diperlakukan menggunakan inkubator telah menjadi tempe dalam waktu 20 jam fermentasi.
 - Pada metode fermentasi alami, kedelai baru menjadi tempe setelah melalui proses fermentasi selama 26 jam.



Gambar 4. 9 Tempe pengujian kedua sebelum fermentasi

Gambar 4. 9 menunjukkan kondisi awal kedelai sebelum memasuki proses fermentasi. Kedelai telah melalui tahap peragian dengan ragi tempe, namun belum menunjukkan tanda-tanda pertumbuhan jamur. Secara visual, kedelai masih tampak terpisah satu sama lain dengan warna permukaan yang dominan kuning, menandakan bahwa proses fermentasi belum berlangsung dan belum ada perkembangan miselium dari jamur *Rhizopus spp.*



Gambar 4. 10 Tempe pengujian kedua setelah 20 jam fermentasi

Gambar 4. 10 menampilkan perbandingan hasil fermentasi setelah 20 jam menggunakan dua metode berbeda. Bagian kiri gambar menunjukkan kedelai yang difermentasi menggunakan inkubator, sedangkan bagian kanan menunjukkan kedelai yang difermentasi secara alami. Terlihat bahwa pada metode inkubator, jamur telah tumbuh dengan baik dan menyelimuti seluruh permukaan kedelai sehingga telah terbentuk tempe. Sementara itu, pada fermentasi secara alami, pertumbuhan jamur masih sangat minim dan belum menyelimuti kedelai secara merata. Hal ini menunjukkan efektivitas metode inkubator dalam mempercepat pertumbuhan jamur dan pembentukan tempe.



Gambar 4. 11 Tempe pengujian kedua setelah 26 jam fermentasi

Gambar 4. 11 memperlihatkan hasil fermentasi setelah berlangsung selama 26 jam. Kedelai di sebelah kiri merupakan hasil fermentasi menggunakan inkubator yang sejak jam ke-20 sudah menjadi tempe dan tidak menunjukkan perubahan signifikan. Sedangkan kedelai di sebelah kanan yang difermentasi secara alami kini telah mengalami pertumbuhan jamur yang merata dan telah berubah menjadi tempe. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa fermentasi alami membutuhkan waktu lebih lama yaitu 26 jam untuk mencapai kondisi yang sama dengan fermentasi menggunakan inkubator yang hanya membutuhkan waktu 20 jam.

Tidak berbeda dengan pengujian pertama, proses fermentasi tempe pada pengujian kedua menggunakan inkubator yang dilengkapi dengan sistem kontrol suhu dan kelembapan berbasis metode PID untuk mengontrol suhu terbukti mampu mempercepat pertumbuhan jamur *Rhizopus spp.* dibandingkan dengan fermentasi

secara alami. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa dalam waktu 20 jam, kedelai yang diperlakukan dalam inkubator telah sepenuhnya berubah menjadi tempe. Sementara itu, kedelai yang diperlakukan secara alami baru menunjukkan pertumbuhan jamur pada jam ke-20 dan baru benar-benar menjadi tempe setelah 26 jam fermentasi. Hal ini menunjukkan bahwa metode inkubator mampu mempercepat proses fermentasi selama 6 jam. Jika ingin melihat lebih detail proses kedelai yang belum terselimuti jamur sampai terselimuti jamur sehingga menjadi tempe dapat dilihat pada **“Lampiran 3 Dokumentasi Pengujian Kedua Proses Fermentasi Tempe”**, dapat dilihat dokumentasi proses fermentasi kedelai baik metode inkubator ataupun secara alami hingga menjadi tempe setiap 2 jam selama 26 jam.

Berdasarkan hasil dari dua pengujian fermentasi tempe, inkubator dengan sistem kontrol suhu berbasis PID mampu menjaga suhu tetap stabil pada *set point* 35° C, sedangkan pada pengujian tanpa kontrol otomatis suhu tidak stabil dan sering berubah drastis yang berdampak nyata terhadap hasil fermentasi. Dari dua hasil pengujian fermentasi dilihat pada gambar 4. 6 dibandingkan dengan gambar 4. 9, gambar 4. 7 dibandingkan dengan gambar 4. 10, dan gambar 4. 8 dibandingkan dengan gambar 4. 11 dengan waktu yang sama tidak terlihat perbedaan proses fermentasi tempe yang jauh berbeda, dari kedua pengujian fermentasi kedelai pada metode inkubator sama – sama telah menjadi tempe pada jam ke-20 dan fermentasi kedelai pada metode alami sama – sama telah menjadi tempe pada jam ke-26.

4.4 Hasil Implementasi Sistem

Dilakukan pengujian sistem monitoring dan kontrol suhu serta kelembapan berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan sensor DHT22, ESP32, dan aplikasi mobile berbasis MQTT. Sistem dirancang untuk mengontrol suhu ruangan secara otomatis maupun manual dengan mengatur *set point* suhu dan mengubah mode menjadi manual untuk dapat menyalakan dan menonaktifkan kipas dan mist maker.



Gambar 4. 12 Tampilan dashboard monitoring

Pada gambar 4. 12 menunjukkan sistem berhasil melakukan pembacaan suhu dan kelembapan secara real-time dan mengirimkannya ke aplikasi mobile melalui MQTT. Saat ini output dimmer menunjukkan 0% yang berarti lampu bohlam sebagai pemanas tidak menyala karena suhu telah mencapai *set point*. Mode pada dashboard tidak dalam kondisi manual yang membuat kipas dan mist maker otomatis ketika kelembapan berkisar kurang antara 60% dan lebih 70%. Terlihat nilai kelembapan di angka 53.0% yang mengharuskan mist maker aktif untuk mendapatkan dan mencapai nilai kelembapan pada inkubator di atas angka 60%.



Gambar 4. 13 Tampilan dashboard dan LCD

Pada gambar 4. 13 menunjukkan meskipun nilai suhu sudah mencapai *set point*, sistem tetap mengaktifkan output dimmer pada level 25.4%. Ini disebabkan oleh algoritma PID yang berfungsi menjaga suhu tetap stabil di sekitar nilai set-point. Output PID tidak langsung turun ke 0% untuk menjaga agar suhu tidak turun dibawah *set point*, dan mengantisipasi adanya kehilangan panas pada inkubator.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem berhasil membaca data suhu dan kelembapan dari sensor DHT22, kemudian mengirimkannya ke aplikasi mobile melalui protokol MQTT. Dashboard aplikasi menampilkan data secara real-time, sehingga memudahkan pengguna untuk memantau kondisi ruangan kapan pun dan dimana pun namun dengan syarat koneksi internet.

4.5 Implementasi dan Penjelasan Logika PID dalam Program

Pengaturan suhu pada inkubator fermentasi tempe pada penelitian ini menggunakan metode Proportional Integral Derivative (PID) yang diimplementasikan melalui library PID_v1.h. Algoritma PID bertugas menyesuaikan daya lampu pemanas secara otomatis untuk menjaga suhu inkubator stabil pada nilai *set point* 35°C.

1. Inisialisasi Objek PID

Baris 54: `PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);`

Baris ini digunakan untuk membuat objek myPID dengan parameter-parameter kontrol sebagai berikut:

- Input: variabel input yang diisi dengan suhu aktual dari sensor DHT22.
- Output: variabel hasil perhitungan PID yang akan digunakan untuk mengatur intensitas pemanas lampu.
- Setpoint: nilai target suhu yang diinginkan, yaitu 35.0°C .
- $K_p = 700$, $K_i = 10$, $K_d = 30$: nilai parameter PID yang diperoleh dari metode *trial and error*.
- DIRECT: menunjukkan arah kontrol langsung (semakin besar *error*, semakin besar output pemanas).

Inisialisasi ini memungkinkan PID untuk bekerja secara otomatis dan melakukan perhitungan berdasarkan perbedaan suhu aktual terhadap target.

2. Pengaktifan Mode PID

Baris 137: `myPID.SetMode(AUTOMATIC);`

Perintah ini mengaktifkan mode otomatis pada objek myPID, yang berarti sistem akan terus menghitung nilai output setiap saat secara otomatis berdasarkan input dan *set point*. Tanpa perintah ini, PID tidak akan aktif.

3. Batasan Output PID

Baris 138: `myPID.SetOutputLimits(0, 96);`

Batasan ini memberikan rentang nilai minimum dan maksimum dari output PID. Nilai 0 berarti lampu pemanas mati, sedangkan 96 berarti daya maksimal dari dimmer. Ini disesuaikan dengan karakteristik modul AC dimmer yang digunakan, di mana nilai maksimum efektif adalah 96 bukan 100 agar sistem bekerja optimal tanpa melebihi kapasitas optimal pada lampu.

4. Proses Perhitungan PID

Baris 201: `myPID.Compute();`

Perintah ini digunakan untuk menghitung output berdasarkan algoritma

PID:

- Komponen Proportional (P) memberikan respon cepat terhadap error saat ini.
- Komponen Integral (I) menghitung akumulasi error dari waktu ke waktu untuk menghilangkan *steady state error*.
- Komponen Derivative (D) mengantisipasi perubahan error secara cepat untuk mengurangi osilasi.

Nilai output hasil komputasi akan digunakan untuk mengatur daya pada modul dimmer AC, yang memengaruhi intensitas cahaya dan panas dari lampu pijar sebagai pemanas. Semakin besar nilai output PID, semakin tinggi intensitas panas lampu, dan sebaliknya.

5. Integrasi dengan Sistem Pengendalian

Setelah nilai output dihitung, hasilnya akan digunakan sebagai input ke fungsi:

Baris 207: `dimmer.setPower(hasilPID);`

Dengan demikian, lampu akan menyala sesuai kebutuhan panas yang dihitung secara dinamis oleh algoritma PID.

6. Hasil Implementasi

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pengaturan PID yang digunakan berhasil menjaga suhu di dalam inkubator tetap berada di sekitar 35°C dengan perubahan naik turun suhu yang kecil. Ini dapat dilihat pada Gambar 4. 5 yang menunjukkan suhu naik secara bertahap dan stabil, tanpa overshoot berlebih. Nilai parameter $K_p = 700$, $K_i = 10$, dan $K_d = 30$ dipilih karena menghasilkan waktu tanggap yang cepat, stabil, dan minim osilasi dibandingkan parameter lainnya seperti $K_{cr} = 800, 900$, atau 1000 .

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, serta pengujian sistem kontrol dan monitoring suhu serta kelembapan pada inkubator fermentasi tempe menggunakan metode PID yang telah dilakukan selama tiga hari, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem inkubator berhasil dirancang dan dibangun dengan berbasis mikrokontroler ESP32, menggunakan sensor suhu dan kelembaban DHT22, serta output pemanas lampu pijar, kipas DC, dan humidifier mist maker. Sistem ini mampu mengendalikan suhu dan kelembaban di dalam inkubator secara otomatis.
2. Sistem berhasil diintegrasikan dengan komunikasi MQTT yang memungkinkan pemantauan dan pengendalian suhu secara jarak jauh melalui jaringan internet. Data suhu, kelembaban, dan output PID dikirim dan ditampilkan secara real-time melalui dashboard MQTT.
3. Metode PID terbukti efektif dalam mengendalikan suhu inkubator secara otomatis. Setelah dilakukan proses tuning parameter PID, diperoleh nilai optimal $K_p = 700$, $K_i = 10$, dan $K_d = 30$ yang mampu menjaga suhu stabil di sekitar setpoint 35°C tanpa overshoot berlebih dan waktu respon yang cepat.

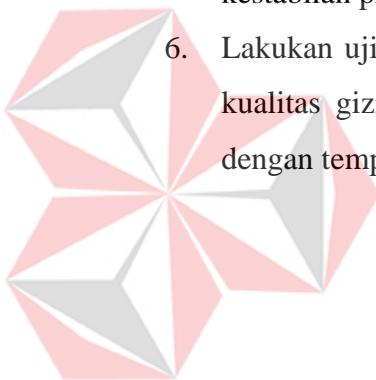
5.2 Saran

Agar penelitian dan pengembangan sistem inkubator fermentasi tempe dapat memberikan manfaat yang lebih luas dan hasil yang lebih optimal, berikut beberapa saran yang dapat dipertimbangkan:

1. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan sistem ini untuk skala inkubator yang lebih besar, sehingga dapat diterapkan pada produksi tempe industri atau kelompok usaha tempe skala menengah.
2. Integrasikan sistem logging otomatis yang merekam seluruh data suhu,

kelembapan, dan proses kontrol PID ke database atau cloud, sehingga data historis dapat dimanfaatkan untuk analisis mutu dan troubleshooting.

3. Lakukan tuning parameter PID yang lebih mendalam, misalnya dengan metode optimasi matematis, Ziegler Nichols, algoritma genetika, atau machine learning untuk menghasilkan respon pengendalian yang lebih cepat dan efisien serta mengurangi overshoot.
4. Tambahkan fitur notifikasi otomatis melalui aplikasi atau SMS/WA jika terjadi error seperti suhu/kelembapan keluar dari batas normal, sehingga operator bisa segera melakukan tindakan korektif.
5. Lakukan uji coba lebih lanjut pada kondisi lingkungan berbeda misal musim hujan, panas ekstrem, untuk mengetahui sejauh mana sistem mampu mempertahankan kestabilan proses fermentasi.
6. Lakukan uji laboratorium atau sensori pada tempe hasil inkubasi untuk menilai kualitas gizi, tekstur, dan rasa secara lebih objektif serta membandingkannya dengan tempe fermentasi alam.



UNIVERSITAS
Dinamika

DAFTAR PUSTAKA

- Adini Alvina, D. H. (2019). PROSES PEMBUATAN TEMPE TRADISIONAL . *Jurnal Pangan Halal*, 9.
- Ahmad Aldi, E. N. (2024). RANCANG BANGUN SISTEM KENDALI INTENSITAS CAHAYA LAMPU RUANGAN MENGGUNAKAN FUZZY LOGIC BERBASIS MIKROKONTROLER ARDUINO MEGA. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, 179 - 180.
- Fikri, A. A. (2019). SISTEM PENGATURAN PID MOTOR DC SEBAGAI PENGGERAK MINI CONVEYOR . *Jurnal Teknik Elektro*, 293 - 301.
- Fitri Wulandari, E. S. (2020). Sistem Kontrol dan Monitoring Suhu dan Kelembapan Udara pada Fermentasi Tempe Menggunakan Modul ESP8266 dengan platform IoT. *Jom FTEKNIK*, 2 - 3.
- Galih Mustiko Aji, A. F. (2024). Rancang Bangun Inkubator Tempe Untuk Mempercepat Waktu Fermentasi . *AGROTEKNIKA*, 488-497.
- GUNAWAN, P. N. (2011). LAPORAN PRAKTIKUM RANGKAIAN LISTRIK DAN RANGKAIAN LOGIKA. *JURUSAN TEKNIK ELEKTRO FAKULTAS TEKNIK*.
- Irman Hariman, J. M. (2023). SISTEM KONTROL LAMPU PEMANAS PIJAR MENGGUNAKAN SENSOR LDR DAN DHT11 PADA GREENHOUSE TreeD. *Jurnal Teknologi Informasi*, 2.
- Jhulinda Nizar Wati, M. Y. (2023). Pengaruh Jumlah Lampu Pijar terhadap Suhu Mesin Penetas Telur Berbasis Raspberry Pi. *JURNAL KOLABORATIF SAINS*, 575-585.
- MARDIANAH. (2024). *BUDIDAYA KANGKUNG MENGGUNAKAN SISTEM AEROPONIK BERBASIS ARDUINO*. MAJENE: MARDIANAH.
- Muliadi, A. I. (2020). PENGEMBANGAN TEMPAT SAMPAH PINTAR MENGGUNAKAN ESP32. *MEDIA ELEKTRIK*, 74.
- Rachmat Aulia, R. A. (2021). PENGENDALIAN SUHU RUANGAN MENGGUNAKAN MENGGUNAKAN FAN DAN DHT11 BERBASIS ARDUINO. *CESS (Journal of Computer Engineering System and Science)* , 30-38.
- Riko Putra Yunas, A. B. (2020). Sistem Kendali Suhu dan Kelembapan pada Proses Fermentasi Tempe. *JTEV (JURNAL TEKNIK ELEKT*

RO DAN VOKASIONAL), 103-113.

Riska Suryanti Putri, M. I. (2018). PENERAPAN TEKNOLOGI PENGENDALI FERMENTASI TEMPE BAGI USAHA KRUDEL LARISO KELURAHAN PURWANTORO KOTA MALANG. *Conference on Innovation and Application of Science and Technology (CIASTECH)*, 353-361.

Septi Lailia Suknia, T. P. (2020). PROSES PEMBUATAN TEMPE HOME INDUSTRY BERBAHAN DASAR KEDELAI (*Glycine max (L.) Merr*) DAN KACANG MERAH (*Phaseolus vulgaris L.*) DI CANDIWESI, SALATIGA . *Southeast Asian Journal of Islamic Education*, 59-76.

Sun, Y. (2024). Systematic Research and Optimization Design of Intelligent Electric Furnace Control System. *Transactions on Computer Science and Intelligent Systems Research*.

Susi Susanti Gea, P. R. (2024). Rancang Bangun Trainer Modul Praktikum Programmable Logic Controller Berbasis Outseal PLC Mega V.3 Standar PP. *Jurnal Harian Regional*, 311.

Yudho Yudhanto, A. A. (2019). *PENGANTAR TEKNOLOGI Internet of Things*. Surakarta: Penerbitan dan Percetakan UNS (UNS Press).

