



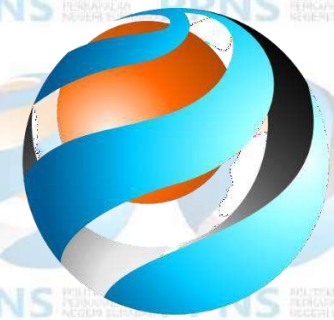
TUGAS AKHIR (AE43250)

**IMPLEMENTASI SISTEM KENDALI SUHU DAN KELEMBABAN
PADA MESIN PENGERING CABAI OTOMATIS MENGGUNAKAN
METODE *FUZZY***

Rachmadian Sukhoirine
NRP. 0922040068

Dosen Pembimbing
Aulia Rahma Annisa, S.ST., M.T.
Ii Munadhif, S.ST., M.T.

PROGRAM STUDI D4 TEKNIK OTOMASI
JURUSAN TEKNIK KELISTRIKAN KAPAL
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
SURABAYA
2026



PPNS POLITEKNIK
PERKAPALAN
NEGERI SURABAYA

TUGAS AKHIR (AE43250)

**IMPLEMENTASI SISTEM KENDALI SUHU DAN KELEMBABAN
PADA MESIN PENGERING CABAI OTOMATIS MENGGUNAKAN
METODE *FUZZY***

Rachmadian Sukhoirine
NRP. 0922040068

Dosen Pembimbing
Aulia Rahma Annisa, S.ST., M.T.
Ii Munadhif, S.ST., M.T.

PROGRAM STUDI D4 TEKNIK OTOMASI
JURUSAN TEKNIK KELISTRIKAN KAPAL
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
SURABAYA
2026

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

IMPLEMENTASI SISTEM KENDALI SUHU DAN KELEMBABAN PADA MESIN PENGERING CABAI OTOMATIS MENGGUNAKAN METODE FUZZY

Disusun Oleh:
Rachmadian Sukhoirine
0922040068

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Kelulusan
Program Studi D4 Teknik Otomasi
Jurusan Teknik Kelistrikan Kapal
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA

Disetujui oleh Tim penguji Tugas Akhir Tanggal Ujian : 21 Juli 2026
Periode Wisuda : Oktober 2026

Menyetujui,

Dosen Penguji

1. Prof. Dr. Eng. Mohammad Abu Jami'in, S.T., M.T. (0030057503)
2. Didik Sukoco, S.T., M.T. (0005026909)
3. Aulia Rahma Annisa S.ST., M.T. (0303069102)
4. Ii Munadhif, S.ST., M.T. (0010079102)

NIDN

Tanda Tangan

Dosen Pembimbing

1. Aulia Rahma Annisa S.ST., M.T.
2. Ii Munadhif, S.ST., M.T.

NIDN

Tanda Tangan

Menyetujui
Ketua Jurusan,

Isa Rachman, S.T., M.T.
NIP. 198008162008121001

Mengetahui
Koordinator Program Studi,

Agus Khumaidi, S.ST., M.T.
NIP. 199308172020121004

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT

No. : F.WD I. 021
Date : 3 Nopember 2015
Rev. : 01
Page : 1 dari 1

Yang bertandatangan dibawah ini :

Nama : Rachmadian Sukhoirine

NRP. : 0922040068

Jurusan/Prodi : Teknik Kelistrikan Kapal/D4 Teknik Otomasi

Dengan ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa :

Tugas Akhir yang akan saya kerjakan dengan judul :

IMPLEMENTASI SISTEM KENDALI SUHU DAN KELEMBABAN PADA MESIN PENDINGIN CABAI OTOMATIS MENGGUNAKAN METODE *FUZZY*

Adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain.

Apabila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam karya ilmiah tersebut, maka saya bersedia menerima **sanksi** sesuai ketentuan peraturan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan penuh tanggung jawab.

Surabaya, 03 September 2026
Yang membuat pernyataan,



(Rachmadian Sukhoirine)
NRP. 0922040068

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, karunia, dan penyertaan-Nya sehingga Tugas Akhir yang berjudul **"IMPLEMENTASI SISTEM KENDALI SUHU DAN KELEMBABAN PADA MESIN PENDINGIN CABAI OTOMATIS MENGGUNAKAN METODE FUZZY"** sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Diploma 4 pada Program Studi Teknik Otomasi, Jurusan Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini, penulis menyadari bahwa keberhasilan ini tidak terlepas dari bantuan, dukungan, dan doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan penuh rasa syukur dan hormat, penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua tercinta dan adik penulis, yang tidak pernah berhenti memberikan doa, kasih sayang, kepercayaan, serta menjadi alasan terbesar bagi penulis untuk terus melangkah hingga menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Rachmad Tri Soelistijono, S.T., M.T. selaku Direktur Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
3. Bapak Isa Rachman, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Kelistrikan Kapal Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
4. Bapak Agus Khumaidi, S.ST., M.T., selaku Koordinator Program Studi Teknik Otomasi Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
5. Bapak Ryan Yudha Adhitya, S.ST., M.T., selaku Koordinator Tugas Akhir yang telah memberikan arahan selama pelaksanaan Tugas Akhir.
6. Ibu Aulia Rahma Annisa, S.ST., M.T., selaku Dosen Pembimbing I yang dengan penuh kesabaran telah meluangkan waktu, tenaga, serta pikiran untuk membimbing, mengarahkan, memberikan kritik, saran, dan motivasi kepada penulis sejak awal hingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan.
7. Bapak Ii Munadhif, S.ST., M.T., selaku Dosen Pembimbing II yang senantiasa memberikan arahan, masukan, ilmu, serta solusi atas berbagai kendala yang dihadapi penulis selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.

8. Prof. Dr. Eng. Mohammad Abu Jami'in, S.T., M.T. dan Bapak Didik Sukoco, S.T., M.T., selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik dan saran sehingga penulis dapat memperbaiki dan menyempurnakan Tugas Akhir ini.
9. Seluruh jajaran dosen serta tenaga kependidikan Jurusan Teknik Kelistrikan Kapal Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya yang telah memberikan ilmu, pengalaman, bimbingan, serta pelayanan terbaik selama penulis menempuh pendidikan.
10. Seseorang yang penulis sebut dengan nama samaran "James", terima kasih atas segala bantuan, waktu, dan dukungan yang telah diberikan selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.
11. Tsamarah, Della, dan Chika, yang telah menjadi sahabat terbaik selama masa perkuliahan. Terima kasih atas dukungan dan semangat yang selalu diberikan. Terutama kepada Tsamarah sebagai teman sekamar, yang telah menemani dan menjadi tempat berbagi cerita selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.
12. Seluruh keluarga besar Teknik Otomasi Angkatan 2022, khususnya kelas "Otomasi kfc Jagonya Ayam", terima kasih atas kebersamaan, kerja sama, dan kenangan yang akan selalu menjadi bagian indah dari perjalanan selama di bangku perkuliahan.
13. Sahabat-sahabat CEMET, yang selalu memberikan doa, dukungan, dan semangat, meskipun tidak selalu berada di tempat yang sama.
14. Seluruh pihak yang telah membantu dan mendukung penulis, baik secara langsung maupun tidak langsung, yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis sepenuhnya menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk perbaikan di masa depan. Penulis berharap Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi semua orang yang membacanya. Akhir kata, semoga Tugas Akhir ini bisa menjadi amal jariyah yang bermanfaat bagi penulis dan bagi siapa pun yang membacanya.

Penulis

(Rachmadian Sukhoirine)

IMPLEMENTASI SISTEM KENDALI SUHU DAN KELEMBABAN PADA MESIN PENGERING CABAI OTOMATIS MENGGUNAKAN METODE FUZZY

Rachmadian Sukhoirine

ABSTRAK

Meningkatnya konsumsi produk olahan cabai menuntut proses pengeringan yang mampu menjaga kestabilan suhu agar kualitas produk tetap terjaga. Namun, metode pengeringan konvensional masih mengalami fluktuasi suhu sehingga proses pengeringan menjadi kurang stabil dan hasil pengeringan tidak merata. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem pengering cabai otomatis berbasis *Programmable Logic Controller* (PLC) Mitsubishi FX3U dan ESP32 menggunakan metode *Fuzzy*. Sistem menggunakan sensor SHT20 sebagai sensor utama untuk mengukur suhu dan kelembaban relatif (RH), sensor RTD PT100 sebagai sensor pembanding suhu, serta sensor *moisture* kapasitif untuk mengukur kadar air cabai. Metode *Fuzzy* menggunakan dua masukan, yaitu *error* suhu dan *error* kelembaban relatif, untuk menghasilkan keluaran berupa PWM *heater* dan PWM kipas yang dikirimkan ke PLC melalui komunikasi Modbus RTU guna mengendalikan proses pengeringan secara otomatis. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan suhu pada *setpoint* 60°C dengan *overshoot* sebesar 0,1°C dan *steady-state error* sebesar $\pm 0,17^\circ\text{C}$. Dibandingkan sistem tanpa metode, penerapan metode *Fuzzy* menghasilkan pengendalian suhu yang lebih stabil serta mampu menghasilkan pengeringan yang lebih optimal. Pada pengeringan selama 4 jam, kadar air cabai berhasil diturunkan hingga berada di bawah batas ukur sensor *moisture*, dengan rata-rata kadar air sebesar 2,6% pada rak atas dan 1,0% pada rak bawah yang menunjukkan hasil pengeringan relatif seragam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode *Fuzzy* mampu meningkatkan kestabilan pengendalian suhu sekaligus meningkatkan efektivitas proses pengeringan cabai.

Kata kunci: Pengering Cabai, *Fuzzy*, Pengendalian Suhu dan Kelembaban, PLC, ESP32.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

IMPLEMENTATION OF TEMPERATURE AND HUMIDITY CONTROL SYSTEM IN AUTOMATIC CHILI DRYING MACHINE USING FUZZY METHOD

Rachmadian Sukhoirine

ABSTRACT

The rising consumption of processed chili products necessitates a drying process capable of maintaining temperature stability to preserve product quality. However, conventional drying methods often suffer from temperature fluctuations, leading to process instability and uneven drying results. This study aims to design and implement an automated chili drying system based on a Mitsubishi FX3U Programmable Logic Controller (PLC) and an ESP32 microcontroller, utilizing a Fuzzy logic method. The system employs an SHT20 sensor as the primary sensor for measuring temperature and relative humidity (RH), a PT100 RTD sensor for temperature comparison, and a capacitive moisture sensor to measure the chili's moisture content. The Fuzzy method utilizes two inputs temperature error and relative humidity error to generate PWM outputs for the heater and fan; these signals are transmitted to the PLC via Modbus RTU communication to automate the drying process. Test results demonstrate that the system maintains the temperature at a 60°C setpoint with an overshoot of 0.1°C and a steady-state error of $\pm 0.17^\circ\text{C}$. Compared to a system without this control method, the implementation of the Fuzzy method yields more stable temperature control and more optimal drying performance. After a four-hour drying period, the chili moisture content was successfully reduced to levels below the moisture sensor's measurement threshold, with average moisture contents of 2.6% on the top rack and 1.0% on the bottom rack, indicating relatively uniform drying results. The study concludes that the Fuzzy method enhances temperature control stability while simultaneously improving the effectiveness of the chili drying process.

Keywords: Chili Dryer, Fuzzy, Temperature and Humidity Control, PLC, ESP32.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT	v
KATA PENGANTAR.....	vii
ABSTRAK.....	ix
ABSTRACT	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xix
DAFTAR NOTASI.....	xxiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Penelitian	5
1.4 Tujuan Penelitian	5
1.5 Manfaat Penelitian	6
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Kajian Penelitian Terdahulu.....	7
2.2 Kajian Pustaka.....	10
2.2.1 <i>Fuzzy Logic</i>	11
2.2.2 PLC Mitsubishi FX3U 48MT	15
2.2.3 ESP32.....	16
2.2.4 <i>Power Supply</i>	17
2.2.5 Schneider HMIGXU3512	18
2.2.6 <i>Thermocouple</i> Rtd PT100	19
2.2.7 Sensor SHT20	20

2.2.8	Sensor <i>Moisture</i> Kapasitif	21
2.2.9	<i>Heater</i>	22
2.2.10	Kipas DC 24V	23
2.2.11	MAX485 TTL to RS485 Converter.....	24
2.2.12	<i>Driver</i> BTS7960	25
2.2.13	<i>Optocoupler</i> PC817	26
2.2.14	<i>Transmitter</i> PT100.....	27
2.2.15	GX Works 2.....	27
2.2.16	MATLAB	28
2.2.17	Vijeo Designer Basic 2.1	29
BAB 3 METODE PENELITIAN		31
3.1	Konsep Penelitian.....	31
3.1.1	Diagram Kerja Sistem	32
3.1.2	Diagram Blok Kontrol	35
3.2	Tahapan Penelitian	36
3.2.1	Identifikasi Masalah	37
3.2.2	Studi Literatur.....	37
3.2.3	Analisa Kebutuhan Sistem.....	38
3.3	Perencanaan dan Desain	38
3.3.1	Perancangan <i>Hardware</i>	38
3.3.2	Perancangan <i>Software</i>	43
3.4	Metode Pengendalian Sistem.....	49
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		53
4.1	Hasil Perencanaan <i>Hardware</i>	53
4.1.1	Hasil Perancangan PLC dengan Transmitter RTD PT100	53
4.1.2	Hasil Perancangan PLC dengan SHT20	54

4.1.3	Hasil Perancangan PLC dengan <i>Moisture</i> Kapasitif.....	55
4.1.4	Hasil Perancangan PLC dengan <i>Heater</i>	56
4.1.5	Hasil Perancangan PLC dengan Kipas DC	58
4.1.6	Hasil Perancangan PLC dengan <i>Buzzer</i>	59
4.1.7	Hasil Perancangan Schneider HMIGXU3512	61
4.1.8	Perancangan <i>Wiring</i> Panel	61
4.2	Hasil Perancangan Mekanik.....	62
4.3	Hasil Perancangan <i>Software</i>	64
4.3.1	Hasil Perancangan Program PLC Mitsubishi FX3U-48MT	64
4.3.2	Perancangan <i>Aplication Instruction</i>	69
4.3.3	Pengujian Desain HMI.....	70
4.4	Pengujian <i>Hardware</i>	71
4.4.1	Pengujian Sensor <i>Thermocouple</i> RTD PT100	72
4.4.2	Pengujian Sensor SHT20	73
4.4.3	Pengujian Sensor <i>Moisture</i> Kapasitif.....	74
4.4.4	Pengujian <i>Heater</i>	75
4.4.5	Pengujian Kipas 24 VDC	77
4.4.6	Pengujian <i>Buzzer</i>	79
4.5	Pengujian <i>Software</i>	79
4.5.1	Pengujian HMI.....	80
4.6	Simulasi Metode <i>Fuzzy</i>	80
4.6.1	Perancangan Sistem Kendali Fuzzy	80
4.6.2	Perancangan <i>Fuzzy Logic Controller</i>	81
4.6.3	Simulasi Respon Sistem.....	83
4.6.4	Perhitungan Manual <i>Fuzzy Logic Controller</i>	86
4.7	Pengujian Sistem Tanpa Metode.....	88

4.7.1	Pengujian Respon Suhu Tanpa Metode.....	88
4.7.2	Pengujian Distribusi Suhu	90
4.7.3	Pengujian Pengeringan Cabai Tanpa Metode.....	91
4.8	Pengujian Sistem Menggunakan Metode	94
4.8.1	Pengujian Kinerja Sistem <i>Fuzzy</i>	94
4.8.2	Pengujian Hasil Pengeringan Cabai	97
4.8.3	Pengujian Keseragaman Hasil Pengeringan	98
4.9	Analisis Perbandingan	99
4.9.1	Analisis Respon Sistem	99
4.9.2	Analisis Hasil Pengeringan Cabai	101
4.10	Pembahasan	104
4.10.1	Pembahasan Implementasi Sistem.....	104
4.10.2	Pembahasan Perfoma Sistem.....	105
4.10.3	Pembahasan Hasil Pengeringan.....	105
4.10.4	Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu	107
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN		109
5.1	Kesimpulan.....	109
5.2	Saran	110
DAFTAR PUSTAKA		111
LAMPIRAN		115
Lampiran 1. Biodata Mahasiswa		115

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Tabel Penelitian Terdahulu	7
Tabel 2. 2 Spesifikasi PLC FX3U 48MT	16
Tabel 2. 3 Spesifikasi ESP32	17
Tabel 2. 4 Spesifikasi <i>Power Supply</i>	18
Tabel 2. 5 Spesifikasi PT100	20
Tabel 2. 6 Spesifikasi SHT20.....	21
Tabel 2. 7 Spesifikasi Sensor <i>Moisture</i> Kapasitif	22
Tabel 2. 8 Spesifikasi PTC <i>Air Heater</i>	23
Tabel 2. 9 Spesifikasi MAX485 TTL to RS485 Converter	25
Tabel 2. 10 Spesifikasi <i>Driver</i> BTS7960	25
Tabel 2. 11 Spesifikasi <i>Optocoupler</i> PC817	26
Tabel 2. 12 Spesifikasi Transmitter PT100.....	27
Tabel 3. 1 Kebutuhan Sistem	38
Tabel 3. 2 Parameter <i>Membership Function Error</i> Suhu.....	45
Tabel 3. 3 Parameter <i>Membership Function Error</i> RH	46
Tabel 3. 4 <i>Rule Base</i> PWM <i>Heater</i>	47
Tabel 3. 5 <i>Rule Base</i> PWM Kipas.....	47
Tabel 3. 6 <i>Memory Address Function Block</i> PWM	49
Tabel 4. 1 Konektivitas PLC ke <i>Transmitter</i> RTD PT100.....	54
Tabel 4. 2 Konektivitas SHT20 ke PLC.....	55
Tabel 4. 3 Konektivitas <i>Moisture</i> Kapasitif ke PLC	56
Tabel 4. 4 Konektivitas <i>Heater</i> ke PLC	57
Tabel 4. 5 Konektivitas Kipas ke PLC	58
Tabel 4. 6 Konektivitas <i>Buzzer</i> ke PLC	59
Tabel 4. 7 Konektivitas Keseluruhan Sistem ke PLC	60
Tabel 4. 8 Dimensi Mesin Pengering Cabai.....	62
Tabel 4. 9 Hasil Pengujian Sensor <i>Thermocouple</i> RTD PT100.....	72
Tabel 4. 10 Hasil Pengujian Sensor SHT20.....	73
Tabel 4. 11 Hasil Pengujian Sensor <i>Moisture</i> Kapasitif	75
Tabel 4. 12 Hasil Pengujian <i>Heater</i>	76

Tabel 4. 13 Hasil Pengujian Kipas	78
Tabel 4. 14 <i>Rule Base</i> PWM Heater	82
Tabel 4. 15 <i>Rule Base</i> PWM Kipas	82
Tabel 4. 16 Pengujian Respon Suhu Tanpa Metode.....	89
Tabel 4. 17 Hasil Pengujian Distribusi Suhu Tanpa Metode	91
Tabel 4. 18 Hasil Pengujian Pengeringan Cabai Tanpa Metode	92
Tabel 4. 19 Hasil Pengujian Kinerja Sistem Menggunakan Metode <i>Fuzzy</i>	94
Tabel 4. 20 Hasil Pengujian Pengeringan Cabai Menggunakan Metode <i>Fuzzy</i>	97
Tabel 4. 21 Pengujian Keseragaman Sampel Cabai pada Setiap Rak	99
Tabel 4. 22 Perbandingan Respon Sistem	100
Tabel 4. 23 Perbandingan Hasil Pengeringan Cabai	101

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Kondisi Cabai Kering Tidak Secara Maksimal	2
Gambar 2. 1 PLC Mitsubishi FX3U 48MT	15
Gambar 2. 2 Modul ESP32	16
Gambar 2. 3 <i>Power Supply</i>	17
Gambar 2. 4 Schneider HMIGXU3512	18
Gambar 2. 5 Sambungan RTD	19
Gambar 2. 6 RTD PT100	20
Gambar 2. 7 Sensor SHT20	21
Gambar 2. 8 Sensor Moisture Kapasitif	22
Gambar 2. 9 <i>Heater</i>	23
Gambar 2. 10 Kipas DC 24V	24
Gambar 2. 11 Voltage to PWM Converter.....	24
Gambar 2. 12 <i>Driver</i> BTS7960	25
Gambar 2. 13 Optocoupler PC817	26
Gambar 2. 14 Transmitter PT100.....	27
Gambar 2. 15 <i>Software GX Works2</i>	28
Gambar 2. 16 <i>Software Matlab</i>	28
Gambar 2. 17 <i>Software Vijeo Designer</i>	29
Gambar 3. 1 Diagram Blok Sistem	32
Gambar 3. 2 Diagram Kerja Sistem	33
Gambar 3. 3 Diagram Blok Kontrol <i>Fuzzy</i> dengan Ruang Pengering	35
Gambar 3. 4 Tahapan Penelitian	36
Gambar 3. 5 Perancangan Alat Tampak Depan	39
Gambar 3. 6 Perancangan Alat Tampak Samping	39
Gambar 3. 7 Perancangan <i>Hardware</i>	42
Gambar 3. 8 Tampilan <i>Software GX Works2</i>	43
Gambar 3. 9 Tampilan HMI.....	43
Gambar 3. 10 Tampilan Operasi Manual	44
Gambar 3. 11 <i>Membership Function Error Suhu</i>	45
Gambar 3. 12 <i>Membership Function Error RH</i>	46

Gambar 3. 13 <i>Function Block</i> PWM GX Works2	49
Gambar 4. 1 <i>Wiring</i> PLC dengan Transmitter RTD PT100	53
Gambar 4. 2 <i>Wiring</i> PLC dengan SHT20	54
Gambar 4. 3 <i>Wiring</i> Moisture Kapasitif	56
Gambar 4. 4 <i>Wiring</i> PLC dengan <i>Heater</i>	57
Gambar 4. 5 <i>Wiring</i> PLC dengan Kipas	58
Gambar 4. 6 <i>Wiring</i> PLC dengan <i>Buzzer</i>	59
Gambar 4. 7 <i>Wiring</i> Keseluruhan dari Mesin Pengering Cabai Otomatis	60
Gambar 4. 8 <i>Wiring</i> pada Panel	61
Gambar 4. 9 Hasil Perancangan Mekanik	63
Gambar 4. 10 Konfigurasi PLC	64
Gambar 4. 11 Program untuk <i>Scalling</i> RTD PT100 dan <i>Buzzer</i>	65
Gambar 4. 12 Program untuk <i>Scalling</i> SHT20	66
Gambar 4. 13 Program untuk <i>Scalling</i> <i>Heater</i>	67
Gambar 4. 14 Program untuk <i>Scalling</i> Kipas	68
Gambar 4. 15 Instruksi Khusus	69
Gambar 4. 16 Konfigurasi HMI <i>Schneider</i> GXU3512	70
Gambar 4. 17 Desain <i>Overview</i> HMI	71
Gambar 4. 18 Tampilan Mode Manual HMI	71
Gambar 4. 19 Pengujian Sensor <i>Thermocouple</i> RTD PT100	72
Gambar 4. 20 Pengujian Sensor SHT20	73
Gambar 4. 21 Pengujian Sensor Moisture Kapasitif	74
Gambar 4. 22 Pengujian <i>Heater</i>	76
Gambar 4. 23 Pengujian Kipas	77
Gambar 4. 24 Pengujian <i>Buzzer</i>	79
Gambar 4. 25 Pengujian HMI GXU3512	80
Gambar 4. 26 Rule Viewer Fuzzy Sugeno pada Kondisi Skenario 1	83
Gambar 4. 27 Rule Viewer Fuzzy Sugeno pada Kondisi Skenario 2	84
Gambar 4. 28 Rule Viewer Fuzzy Sugeno pada Kondisi Skenario 3	85
Gambar 4. 29 Respon Suhu Tanpa Metode	90
Gambar 4. 30 Hasil Pengujian Pengeringan Cabai Tanpa Metode	93
Gambar 4. 31 Respon Suhu terhadap Waktu	95

Gambar 4. 32 Grafik RH terdapat Waktu	96
Gambar 4. 33 Grafik PWM <i>Heater</i> dan PWM Kipas	96
Gambar 4. 34 Grafik Respon Suhu Tanpa Metode dengan Menggunakan Metode	100
Gambar 4. 35 Hasil Pengeringan Cabai Tanpa Metode	103
Gambar 4. 36 Hasil Pengeringan Cabai Menggunakan Metode	103
Gambar 4. 37 Cabai Kering di Pasar.....	106
Gambar 4. 38 Cabai Kering Hasil Pengeringan Menggunakan Metode Fuzzy ...	106

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR NOTASI

SP	: <i>Setpoint</i>
PV	: <i>Process Variable</i> (nilai aktual hasil pembacaan sensor)
$e(k)$	: Nilai <i>error</i> pada saat ke- k
$\mu A(x)$	: Derajat keanggotaan elemen x pada himpunan fuzzy A
x	: Elemen pada semesta pembicaraan
α_i	: <i>Firing strength</i> (derajat aktivasi) aturan fuzzy ke- i
z_i	: Nilai keluaran (konsekuen) pada aturan fuzzy ke- i
n	: Jumlah aturan <i>fuzzy</i> yang aktif
u	: Nilai keluaran (<i>crisp output</i>) hasil defuzzifikasi
PWM	: <i>Pulse Width Modulation</i>
RH	: <i>Relative Humidity</i> (kelembaban relatif)
%RH	: Persentase kelembaban relatif
°C	: Derajat Celsius

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Meningkatnya preferensi Generasi Z terhadap kuliner pedas turut memposisikan cabai merah sebagai komoditas hortikultura strategis dalam ekonomi pangan nasional. Tren tersebut sejalan dengan perkembangan produksi cabai di Indonesia yang menunjukkan peningkatan dari tahun ke tahun. Berdasarkan laporan kinerja Kementerian Pertanian Tahun 2024, produksi aneka cabai pada tahun 2020 tercatat sekitar 2,75 juta ton dan terus meningkat hingga mencapai kisaran 3 juta ton pada tahun 2023–2024. Data ini menunjukkan bahwa permintaan dan konsumsi cabai yang tinggi mendapat respons positif melalui upaya peningkatan produksi di sektor hulu. Namun, tingginya angka produksi tersebut belum diimbangi dengan teknologi pengolahan pascapanen yang memadai. Permasalahan utama muncul dari sifat fisikokimia cabai merah yang memiliki kadar air tinggi di level 80–90%, sehingga sangat rentan terhadap kerusakan fisiologis dan serangan mikroba pembusuk (Muammar dkk., 2025). Dalam proses pengolahan cabai, pengeringan bertujuan menurunkan kadar air hingga 5–8 % agar cabai kering memiliki umur simpan lebih lama dan mutu produk tetap baik (BPTP Kalsel, 2024). Tanpa intervensi pascapanen yang akurat, masa simpan cabai menjadi sangat terbatas, yang sering kali memicu fluktuasi harga yang ekstrem saat volume panen melampaui daya serap pasar. Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI 3389:2023) tentang cabai kering, kadar air maksimum cabai kering yang memenuhi standar mutu pangan adalah sebesar 11% untuk menjaga kualitas produk dan mencegah pertumbuhan jamur. Selain itu, proses pengeringan cabai umumnya dilakukan pada rentang suhu 50–60 °C agar warna, aroma, dan kandungan nutrisi cabai tetap terjaga selama proses pengeringan. Oleh karena itu, diperlukan sistem pengendalian suhu dan kelembaban yang stabil untuk menghasilkan cabai kering sesuai standar mutu pangan (BSIP Babel, 2023). Oleh karena itu, sebagai solusi penerapan teknik pascapanen yang efisien seperti metode pengeringan, menjadi sangat urgensi.

Proses ini bekerja dengan menurunkan kadar air hingga batas aman, sehingga mampu menghambat laju pertumbuhan mikroorganisme serta memperpanjang umur simpan produk.

Secara umum, teknik pengeringan cabai diklasifikasikan menjadi dua kategori, yakni metode alami melalui radiasi surya dan metode buatan yang memanfaatkan perangkat mekanis dengan sirkulasi udara panas (Muammar dkk., 2025). Di Indonesia, teknik penjemuran tradisional masih mendominasi karena efisiensi biaya. Meskipun terkendala fluktuasi cuaca, risiko kontaminasi, serta durasi pengeringan yang lama menjadi kendala teknis lainnya yang menyebabkan kerusakan mutu produk akibat paparan UV tidak terukur (Evania dkk., 2022). Kondisi tersebut mendorong perlunya pengembangan sistem pengering buatan yang mampu beroperasi secara lebih stabil dan higienis.



Gambar 1. 1 Kondisi Cabai Kering Tidak Secara Maksimal
(Sumber: antarafoto.com)

Urgensi peralihan teknologi pengeringan ini diperkuat oleh laporan Berita Radar Jogja (2024) mengenai imbauan Dinas Pertanian Kabupaten Sleman untuk menghindari penjemuran langsung karena menyebabkan cabai menghitam dan menurunkan nilai jual seperti yang terlampir pada Gambar 1.1. Permasalahan pengolahan pascapanen cabai di Indonesia, juga memicu berbagai inovasi di daerah lain, seperti pengembangan alat pengering cabai otomatis *Dryer Reborn* oleh mahasiswa Universitas Muhammadiyah Surabaya UMSURA di Lumajang. Sementara itu, di Provinsi Sumatera Utara, pemerintah daerah mendorong pembangunan fasilitas pengeringan cabai sebagai upaya menjaga pasokan dan stabilitas harga komoditas. Fakta tersebut menunjukkan bahwa sistem pengering cabai artifisial dan otomatis memiliki peran strategis, namun

masih memerlukan kajian lebih lanjut untuk meningkatkan kinerja dan keandalannya.

Berbagai penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa sistem pengering otomatis dengan pengendalian suhu mampu mempercepat proses dehidrasi bahan pertanian serta meningkatkan konsistensi mutu hasil pengeringan. Pengeringan pada suhu sekitar 60 °C terbukti mampu menurunkan kadar air cabai secara efektif hingga memenuhi standar cabai kering tanpa menyebabkan degradasi warna dan tekstur produk secara signifikan (Wicaksono et al., 2021; Fatkhurrozi & Setiawan, 2024; Firzatullah & Muladi, 2024; Tjahyanti et al., 2025). Namun demikian, karakteristik sistem termal pada ruang pengering bersifat nonlinier dan dipengaruhi oleh perubahan suhu serta kelembaban selama proses berlangsung, sehingga diperlukan metode pengendalian yang mampu menyesuaikan keluaran aktuator secara fleksibel agar suhu ruang pengering tetap berada di sekitar *setpoint*.

Seiring berkembangnya sistem kendali cerdas, metode *Fuzzy Logic* mulai banyak diterapkan pada sistem pengendalian proses termal karena mampu menangani ketidakpastian dan karakteristik sistem nonlinier tanpa memerlukan model matematis yang kompleks. Penelitian (Azis & Sinadia, 2024) menunjukkan bahwa metode *Fuzzy Expert* mampu mengatur proses pengeringan cabai secara otomatis sesuai perubahan kondisi ruang pengering. Penelitian (Ramli et al., 2024) juga menunjukkan bahwa penerapan *Fuzzy Logic* mampu menghasilkan pengendalian yang lebih stabil dibandingkan metode konvensional melalui penyesuaian keluaran berdasarkan aturan linguistik. Sementara itu, penelitian (Ananta et al., 2024) membuktikan bahwa metode *Fuzzy Mamdani* efektif mengendalikan suhu dan kelembaban pada sistem pengering biji kakao sehingga kondisi ruang pengering dapat dipertahankan mendekati kondisi yang diinginkan. Hasil-hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa metode *fuzzy* memiliki potensi yang baik untuk diterapkan pada sistem pengering komoditas pertanian.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian tersebut masih menggunakan metode *Fuzzy Mamdani* dan umumnya diterapkan pada sistem berbasis mikrokontroler. Implementasi metode *Fuzzy* berbasis PLC pada sistem pengering cabai masih relatif terbatas, terutama yang memanfaatkan komunikasi

Modbus RTU antara ESP32 sebagai pemroses logika *fuzzy* dan PLC sebagai pengendali aktuator. Selain itu, penelitian sebelumnya umumnya berfokus pada pengendalian suhu atau kelembaban secara terpisah. Pada penelitian ini digunakan metode *Fuzzy Sugeno* dengan dua variabel masukan, yaitu *error* suhu dan *error* kelembaban relatif (RH), serta dua variabel keluaran berupa PWM *heater* dan PWM kipas. Pendekatan tersebut memungkinkan kedua aktuator dikendalikan secara simultan sesuai kondisi ruang pengering sehingga diharapkan mampu menghasilkan kestabilan suhu yang lebih baik serta distribusi panas yang lebih merata selama proses pengeringan.

Dengan demikian, tugas akhir ini difokuskan pada perancangan dan implementasi mesin pengering cabai untuk jenis cabai merah besar (*Capsicum annuum* L.). Varietas ini dipilih sebagai objek penelitian karena memiliki struktur kulit yang relatif lebih tipis sehingga proses pelepasan air dapat berlangsung lebih cepat dan merata. Sistem pengering dirancang menggunakan metode *Fuzzy* dengan masukan berupa *error* suhu dan *error* kelembaban relatif (RH), serta menghasilkan keluaran berupa PWM *heater* dan PWM kipas untuk mengendalikan kondisi ruang pengering secara otomatis. Metode *Fuzzy* dipilih karena mampu menangani karakteristik sistem yang bersifat nonlinier tanpa memerlukan model matematis yang kompleks, serta memberikan pengendalian yang lebih fleksibel melalui aturan-aturan linguistik. Melalui penerapan metode tersebut diharapkan sistem mampu menjaga kestabilan suhu selama proses pengeringan, meningkatkan efektivitas penurunan kadar air cabai, menghasilkan tingkat kekeringan yang lebih seragam antar rak, serta menjadi salah satu alternatif teknologi pengering cabai otomatis yang dapat dikembangkan untuk mendukung kebutuhan sektor pertanian dan UMKM.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan permasalahan yang telah diuraikan sebelumnya, maka rumusan masalah yang menjadi dasar dalam pelaksanaan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang dan mengimplementasikan sistem kendali *Fuzzy* pada mesin pengering cabai berbasis PLC dan ESP32 agar mampu mengendalikan suhu ruang pengering secara adaptif?
2. Bagaimana mengintegrasikan sensor suhu, kelembaban relatif (RH), dan kadar air cabai dengan sistem kendali *Fuzzy* untuk mengendalikan *heater* dan kipas selama proses pengeringan?
3. Bagaimana pengaruh penerapan sistem kendali *Fuzzy* terhadap performa ruang pengering dan kualitas hasil pengeringan cabai berdasarkan kestabilan suhu, kelembaban relatif (RH), kadar air akhir, dan keseragaman hasil pengeringan?

1.3 Batasan Penelitian

Batasan masalah pada Tugas Akhir ini ditetapkan untuk membatasi ruang lingkup pembahasan dan memfokuskan penelitian pada aspek yang telah ditentukan, yaitu sebagai berikut:

1. Mesin pengering cabai otomatis dibuat dalam skala kecil dengan kapasitas maksimal 2 kg.
2. Jenis cabai yang digunakan sebagai objek pengeringan berupa cabai merah besar (*Capsicum annuum L.*).
3. Komunikasi Modbus RTU pada penelitian ini hanya digunakan sebagai media pertukaran data antara ESP32 dan PLC, tanpa dilakukan analisis terhadap performa komunikasi seperti kecepatan transmisi, waktu tunda (*delay*), maupun keandalan komunikasi.
4. Sensor kadar air digunakan sebagai instrumen cek validasi untuk mengevaluasi tingkat kekeringan dan keseragaman hasil pengeringan cabai pada setiap rak, tanpa difungsikan sebagai variabel kontrol dalam sistem kendali.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam pelaksanaan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Dapat merancang dan mengimplementasikan sistem kendali *Fuzzy* pada mesin pengering cabai berbasis PLC dan ESP32 agar mampu mengendalikan suhu ruang pengering.
2. Dapat mengintegrasikan sensor suhu, kelembaban relatif (RH), dan kadar air cabai dengan sistem kendali *Fuzzy* untuk mengendalikan PWM *heater* dan PWM kipas selama proses pengeringan.
3. Dapat mengetahui pengaruh penerapan sistem kendali *Fuzzy* terhadap performa ruang pengering dan kualitas hasil pengeringan cabai berdasarkan kestabilan suhu, kelembaban relatif (RH), kadar air akhir, dan keseragaman hasil pengeringan.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari pelaksanaan Tugas Akhir ini antara lain sebagai berikut:

1. Memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem otomasi termal melalui integrasi kontrol *Fuzzy* yang mampu mengendalikan suhu ruang pengering secara adaptif berdasarkan kondisi suhu dan kelembaban relatif (RH) pada alat pengering hortikultura.
2. Menyediakan pendekatan evaluasi kinerja pengeringan cabai berbasis pengukuran kadar air sebagai indikator objektif keberhasilan proses pengeringan dan keseragaman hasil antar rak.
3. Menyediakan sistem pengering cabai yang lebih aman dan andal melalui penerapan mekanisme *interlock* dan *emergency shutdown*.
4. Menyediakan model sistem pengering cabai yang mudah dikembangkan dan relevan sebagai rujukan teknologi pengering bagi skala UMKM.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini memuat ulasan referensi dari sumber, jurnal ilmiah dan laporan penelitian. Penjelasan mengenai penerapan teori, objek penelitian, pemilihan metode, penggunaan perangkat lunak dan perangkat keras dalam perancangan tugas akhir akan dibahas secara rinci pada bagian ini.

2.1 Kajian Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu disajikan dalam bentuk tabel-tabel sebagai panduan tugas akhir penulis. Berbagai teori digunakan dalam menyusun tugas akhir ini hingga terciptanya tugas akhir yang baik. Penulis menggunakan jurnal ilmiah berikut Tabel 2.1 sebagai referensi penelitian.

Tabel 2. 1 Tabel Penelitian Terdahulu

No	Judul dan Pembahasan	Temuan Penelitian	Kelebihan dan Kekurangan
1	Rancang Bangun Oven Pengering Cabai dilengkapi Kontrol Suhu Otomatis (Feno Tandigu., dkk, 2022 – <i>Jurnal Ilmiah Mahasiswa Teknik Mesin Vol. 8 (2)</i>) Penelitian ini membahas perancangan oven pengering cabai dengan sistem kontrol suhu otomatis. Pengujian dilakukan dengan membandingkan pembacaan suhu di dalam oven terhadap alat ukur pembanding.	Sensor yang digunakan adalah thermostat digital untuk mendeteksi suhu di dalam oven. Persentase <i>error</i> terbesar sebesar 0,91% pada suhu 60°C, sedangkan pada suhu 35°C, 70°C, dan 85°C menunjukkan hasil pembacaan yang sama dengan termometer pembanding. Oven mampu bekerja sesuai suhu yang diinginkan.	Kelebihan: Sistem mampu menjaga suhu oven dengan akurasi yang baik dan stabil. Kekurangan: Sistem kontrol masih bersifat sederhana dan belum dilengkapi pengaturan pemanas yang adaptif serta belum membahas aspek keselamatan dan keandalan sistem kendali secara mendalam.

No	Judul dan Pembahasan	Temuan Penelitian	Kelebihan dan Kekurangan
2	Pengeringan Cabai dengan Alat Pengering Bertenaga Hibrid Surya dan Gas Menggunakan Sistem Kontrol <i>Fuzzy Expert</i> (Azis & Sinadia, 2024 – <i>JTech Vol. 8 No. 2</i>) Penelitian ini membahas penerapan metode Fuzzy Expert pada mesin pengering cabai berbasis energi hibrid surya dan LPG. Sistem <i>fuzzy</i> digunakan untuk mengatur proses pengeringan sehingga suhu ruang pengering dapat dipertahankan pada kondisi yang optimal selama proses berlangsung.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem <i>Fuzzy Expert</i> mampu menjaga kondisi pengeringan lebih stabil, menurunkan kadar air cabai secara efektif, serta meningkatkan efisiensi penggunaan energi dibandingkan sistem tanpa pengendali fuzzy.	Kelebihan: Menggunakan objek penelitian yang sama yaitu cabai serta menerapkan metode Fuzzy sebagai sistem pengendali. Kekurangan: Sistem belum menggunakan PLC sebagai pengendali utama dan belum dilengkapi komunikasi Modbus RTU maupun HMI untuk monitoring proses.
3	Pembuatan Sistem Kontrol <i>Fuzzy Logic</i> pada Mesin Pengering (Ramli, Amin, & Munir, 2024 – <i>Syntax Literate: Jurnal Ilmiah Indonesia</i>) Penelitian ini membahas penerapan metode <i>Fuzzy Logic</i> pada mesin pengering berbasis energi	Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan suhu pengering sekitar 58°C dengan respon yang stabil serta berhasil menurunkan kadar air bahan hingga memenuhi standar pengeringan.	Kelebihan: Membuktikan bahwa metode <i>Fuzzy Logic</i> mampu menghasilkan pengendalian suhu yang stabil dan efektif pada proses pengeringan. Kekurangan: Penelitian hanya menggunakan parameter suhu sebagai variabel kendali dan belum mempertimbangkan

No	Judul dan Pembahasan	Temuan Penelitian	Kelebihan dan Kekurangan
	hibrid untuk menjaga kestabilan suhu selama proses pengeringan. Sistem memanfaatkan sensor suhu sebagai umpan balik untuk mengendalikan elemen pemanas secara otomatis sesuai kondisi pengeringan.		kelembaban relatif sebagai variabel masukan.
4	<i>Design of Temperature and Humidity Control System for Cocoa Bean Dryer Using Fuzzy Mamdani Method</i> (Ananta et al., 2024 – <i>Journal of Applied Science, Technology and Humanities</i>). Penelitian ini membahas penerapan metode <i>Fuzzy Mamdani</i> untuk mengendalikan suhu dan kelembaban pada sistem pengering biji kakao. Sistem menggunakan dua variabel masukan, yaitu suhu dan kelembaban relatif, kemudian diproses melalui fuzzifikasi, rule base, inferensi, dan defuzzifikasi untuk menghasilkan aksi	Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode <i>Fuzzy Mamdani</i> mampu menjaga kondisi suhu dan kelembaban lebih stabil selama proses pengeringan sehingga kualitas proses pengeringan menjadi lebih baik dibandingkan pengendalian konvensional.	Kelebihan: Menggunakan dua parameter lingkungan sebagai masukan sehingga pengendalian lebih adaptif terhadap perubahan kondisi ruang pengering. Kekurangan: Penelitian masih berfokus pada simulasi dan belum membahas implementasi menggunakan PLC.

No	Judul dan Pembahasan	Temuan Penelitian	Kelebihan dan Kekurangan
	pengendalian terhadap proses pengeringan.		
5	<i>Design of a PLC Based Temperature Controlled System</i> (Adedeji & Amosun, 2023 – <i>Jurnal Rekayasa Energi Manufaktur Vol. 8 (2)</i>). Penelitian ini membahas perancangan sistem kontrol suhu berbasis PLC untuk mengendalikan elemen pemanas secara otomatis.	PLC mampu membaca data sensor suhu dan mengendalikan output pemanas secara <i>real-time</i> menggunakan logika ladder. Sistem menunjukkan kestabilan suhu yang baik terhadap perubahan <i>setpoint</i> serta mudah diintegrasikan dengan sistem monitoring dan alarm.	Kelebihan: Sistem kontrol berbasis PLC memiliki keandalan tinggi, tahan terhadap gangguan, serta mendukung implementasi interlock dan sistem keselamatan. Kekurangan: Biaya implementasi relatif lebih tinggi dibandingkan sistem berbasis mikrokontroler dan belum diaplikasikan pada pengering komoditas pertanian.

Dari kelima penelitian tersebut terdapat penelitian yang membahas perancangan sensor dan aktuator, pengendalian pemanas, serta penggunaan metode *fuzzy* untuk membangun suatu sistem kendali. Penelitian-penelitian tersebut memberikan gambaran mengenai penerapan sistem kendali otomatis dalam mengatur parameter yang dibutuhkan sesuai dengan karakteristik proses. Penulis terinspirasi dari kelima judul di atas untuk menerapkan konsep dan pendekatan yang relevan dalam penelitian dengan judul “Implementasi Sistem Kendali Suhu dan Kelembaban pada Mesin Pengering Cabai Otomatis Menggunakan Metode *Fuzzy*”.

2.2 Kajian Pustaka

Pemahaman konsep yang mendasari suatu topik atau fenomena tertentu membutuhkan dasar teori. Agar penelitian dapat dilakukan dengan baik, seseorang harus memahami prinsip-prinsip dasar. Ini adalah penjelasan serta gambar komponen *software* dan *hardware* yang digunakan pada studi ini.

2.2.1 Fuzzy Logic

Logika *fuzzy* (*Fuzzy Logic*) merupakan salah satu metode kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*) yang dikembangkan oleh Lotfi A. Zadeh pada tahun 1965 untuk merepresentasikan penalaran manusia dalam menghadapi kondisi yang tidak pasti (*uncertainty*) dan bersifat nonlinier. Berbeda dengan logika biner (*crisp logic*) yang hanya mengenal dua kondisi yaitu benar (1) atau salah (0), logika *fuzzy* memungkinkan suatu variabel memiliki derajat keanggotaan (*membership degree*) pada rentang 0 sampai 1. Dengan demikian, suatu nilai tidak harus sepenuhnya benar atau salah, tetapi dapat berada di antara kedua kondisi tersebut sesuai tingkat keanggotaannya.

Pada sistem kendali, logika *fuzzy* banyak diterapkan pada proses yang sulit dimodelkan secara matematis, memiliki karakteristik nonlinier, atau dipengaruhi oleh banyak gangguan dari lingkungan. Salah satu penerapannya adalah pada sistem pengering hasil pertanian, di mana perubahan suhu dan kelembaban berlangsung secara dinamis sehingga memerlukan metode pengendalian yang mampu menyesuaikan kondisi sistem secara fleksibel. Melalui pendekatan linguistik seperti *Negative Big* (NB), *Negative Small* (NS), *Zero* (ZE), *Positive Small* (PS), dan *Positive Big* (PB), logika *fuzzy* dapat menghasilkan keputusan pengendalian yang menyerupai cara berpikir seorang operator.

Secara matematis, suatu himpunan fuzzy A pada semesta pembicaraan X didefinisikan sebagai:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\} \quad (2.1)$$

Dengan :

x : Elemen pada semesta pembicaraan

$\mu_A(x)$: Fungsi keanggotaan himpunan fuzzy A

$$0 \leq \mu_A(x) \leq 1$$

Pada penelitian ini digunakan *Fuzzy Inference System* (FIS) tipe Sugeno, karena memiliki proses komputasi yang lebih sederhana dan efisien dibandingkan metode Mamdani. Selain itu, keluaran metode Sugeno berupa nilai konstan

sehingga lebih mudah diimplementasikan pada sistem kendali digital berbasis mikrokontroler dan PLC. Proses pengambilan keputusan pada logika *fuzzy* terdiri atas empat tahapan utama, yaitu fuzzifikasi, pembentukan basis aturan (*rule base*), inferensi *fuzzy*, dan defuzzifikasi.

2.2.2.1 Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan proses mengubah nilai tegas (*crisp value*) menjadi nilai linguistik yang dinyatakan dalam bentuk derajat keanggotaan (*membership degree*). Pada penelitian ini variabel masukan terdiri dari *error* suhu dan *error* kelembaban relatif (*Relative Humidity/RH*).

Nilai *error* dihitung berdasarkan selisih antara nilai *setpoint* dan nilai aktual sensor menggunakan persamaan

$$e(k) = SP - PV \quad (2.2)$$

dengan

$e(k)$: *error* pada waktu ke- k

SP : *setpoint*

PV : nilai aktual sensor

Setelah nilai *error* diperoleh, masing-masing variabel dipetakan ke dalam lima himpunan linguistik, yaitu

- *Negative Big* (NB)
- *Negative Small* (NS)
- *Zero* (ZE)
- *Positive Small* (PS)
- *Positive Big* (PB)

Pembagian lima himpunan linguistik dipilih agar perubahan kondisi sistem dapat direpresentasikan secara lebih halus sehingga menghasilkan respon pengendalian yang lebih adaptif.

Pada penelitian ini digunakan dua jenis fungsi keanggotaan yaitu fungsi segitiga (*triangular membership function*) dan fungsi trapesium (*trapezoidal membership function*).

Fungsi segitiga dirumuskan sebagai

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x < c \\ 0, & x \geq c \end{cases} \quad (2.3)$$

Sedangkan fungsi trapezium dinyatakan sebagai

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ 1, & b < x < c \\ \frac{d-x}{d-b}, & c < x < d \\ 0, & x \geq d \end{cases} \quad (2.4)$$

2.2.1.2 Basis Aturan (*Rule Base*)

Basis aturan (*Rule Base*) merupakan sekumpulan aturan logika *IF-THEN* yang digunakan untuk menentukan aksi pengendalian berdasarkan kombinasi kondisi kedua variabel masukan. Setiap aturan menghubungkan kondisi *error* suhu dan *error* kelembaban terhadap keluaran berupa PWM *heater* dan PWM kipas. Secara umum bentuk aturan *fuzzy* dituliskan sebagai,

IF Error Suhu adalah A AND Error RH adalah B THEN PWM Heater adalah C dan PWM Fan adalah D.

Karena terdapat lima himpunan linguistik pada masing-masing variabel masukan, maka jumlah aturan yang terbentuk adalah

$$5 \times 5 = 25 \text{ aturan fuzzy}$$

Rule base tersebut disusun berdasarkan pengetahuan (*expert knowledge*) mengenai karakteristik proses pengeringan cabai. Ketika suhu ruang pengering masih jauh di bawah setpoint, PWM *heater* diberikan nilai yang besar sehingga daya pemanasan meningkat. Sebaliknya, ketika suhu telah mendekati atau melebihi *setpoint*, nilai PWM *heater* diperkecil untuk menghindari terjadinya *overshoot*. Pada sisi lain, PWM kipas diatur berdasarkan kombinasi kondisi suhu

dan kelembaban agar proses perpindahan panas dan pelepasan uap air berlangsung secara optimal.

2.2.1.3 Inferensi Fuzzy

Inferensi merupakan proses evaluasi seluruh aturan *fuzzy* berdasarkan nilai derajat keanggotaan hasil fuzzifikasi. Pada penelitian ini digunakan metode inferensi Sugeno dengan operator logika *AND* menggunakan operator *MIN* sehingga nilai *firing strength* setiap aturan diperoleh dari

$$\alpha_i = \min(\mu_{ErrorSuhu}, \mu_{ErrorRH}) \quad (2.5)$$

dengan

- α_i : *firing strength* aturan ke-i
- $\mu_{ErrorSuhu}$: derajat keanggotaan *error* suhu
- $\mu_{ErrorRH}$: derajat keanggotaan *error* kelembaban

Nilai *firing strength* menunjukkan tingkat aktivasi masing-masing aturan. Semakin besar nilai *firing strength* maka semakin besar kontribusi aturan tersebut terhadap keluaran sistem.

2.2.1.4 Defuzzifikasi

Tahap terakhir adalah defuzzifikasi, yaitu mengubah hasil inferensi menjadi nilai tegas (*crisp output*) yang dapat digunakan sebagai sinyal kendali.

Karena menggunakan metode Sugeno dengan keluaran konstan (*constant output*), proses defuzzifikasi dilakukan menggunakan metode *Weighted Average* (WA) yang dirumuskan sebagai

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i z_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} \quad (2.9)$$

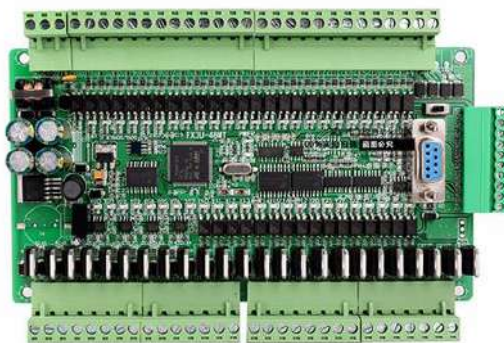
dengan

- z : keluaran *crisp*
- α_i : *firing strength* aturan ke-i
- z_i : nilai konstan keluaran aturan ke-i
- n : jumlah aturan yang aktif

Hasil defuzzifikasi berupa nilai PWM *heater* dan PWM kipas yang selanjutnya dikirimkan menuju PLC Mitsubishi FX3U melalui komunikasi Modbus RTU. PLC kemudian menggunakan kedua nilai PWM tersebut untuk mengendalikan kecepatan pemanasan *heater* dan putaran kipas selama proses pengeringan cabai berlangsung. Dengan demikian, pengendalian suhu dan kelembaban dapat dilakukan secara otomatis sesuai kondisi aktual ruang pengering tanpa memerlukan model matematis sistem yang kompleks.

2.2.2 *PLC Mitsubishi FX3U 48MT*

Programmable Logic Controller merupakan rangkaian elektronik yang dapat melakukan macam-macam fungsi pengontrolan yang kompleks PLC ini bisa diprogram, dikendalikan dan dioperasikan operator yang belum memiliki pengalaman komputer. PLC sering kali diwakili oleh *line* dan diagram *ladder*. PLC adalah elektronik digital yang sengaja dirancang untuk mampu mengontrol mesin melakukan proses pengimplementasian fungsi kendali sekuesional, operasi *timing*, *counting*, dan aritmatika (Tresna Umar Syamsuri et al., 2020). PLC yang dipakai untuk mengontrol sistem yaitu PLC Mitsubishi FX3U 48MT, Tipe CPU ini memiliki 24 port input dan 24 port *output*. Adapun PLC yang digunakan pada penelitian ini terdapat pada Gambar 2.1 dan spesifikasi dari PLC tersebut dimuat pada Tabel 2.2.



Gambar 2. 1 PLC Mitsubishi FX3U 48MT
(Sumber: LK-Tronics, 2025)

Tabel 2. 2 Spesifikasi PLC FX3U 48MT

No	Fitur	Spesifikasi
1	<i>Input Power</i>	24VDC
2	<i>Communication ports</i>	1. RS232 2. RS485
3	<i>Transmission Speed</i>	38400 Kbps
4	<i>Program steps</i>	8000
5	<i>Digital Input</i>	24 digital input
6	<i>Digital Output</i>	24 digital output
7	<i>Analog Input</i>	- 3 analog input (0-10V) - 3 analog input (4-20mA)
8	<i>Analog Output</i>	1 analog output (0-10V)

Sumber: Mitsubishielectric.com

2.2.3 ESP32

ESP32 merupakan mikrokontroler berperforma tinggi yang dikembangkan oleh *Espressif Systems* dan dirancang untuk mendukung berbagai aplikasi *Internet of Things* (IoT) maupun sistem kendali tertanam (*embedded system*). ESP32 dilengkapi dengan prosesor dual-core 32-bit Xtensa LX6 yang mampu bekerja hingga frekuensi 240 MHz, serta memiliki berbagai antarmuka komunikasi seperti UART, SPI, I²C, ADC, DAC, PWM, *Wi-Fi*, dan *Bluetooth*. Kelengkapan fitur tersebut menjadikan ESP32 mampu melakukan pengolahan data sensor, komunikasi serial, serta pengendalian perangkat secara *real-time*.



Gambar 2. 2 Modul ESP32
(Sumber: Amazon.com)

Tabel 2. 3 Spesifikasi ESP32

No	Fitur	Spesifikasi
1	Mikrokontroler	ESP32
2	Frekuensi <i>Clock</i>	Hingga 240 Mz
3	Tegangan Operasi	3,0-3,6 VDC (3,3 V nominal)
4	<i>Flash Memory</i>	4 MB
5	GPIO	Hingga 32 pin GPIO
6	ADC	12-bit
7	Antarmuka Komunikasi	UART, SPI, I ² C, PWM
8	<i>Wi-Fi & Bluetooth</i>	IEEE 802.11 b/g/n dan Bluetooth v4.2 BLE

Sumber: Espressif Systems, ESP32-WROOM-32 Datasheet

2.2.4 Power Supply

Power Supply adalah suatu alat yang mampu memberikan tegangan langsung dari sumber satu ke sumber tegangan lainnya. *Power Supply* umumnya dipakai pada komputer atau laptop untuk mengirim tegangan ke komponen atau *hardware* lain dikomputer, contohnya *hard drive*, *motherboard*, kipas, dan lain sebagainya. *Power supply* mengambil input tegangan arus bolak-balik (AC) dan mengubahnya menjadi arus searah (DC) kemudian mendistribusikannya ke macam-macam *hardware* di komputer kita. Karena pada arus *direct current* (DC) banyak diperlukan untuk pengoperasian perangkat, DC juga dikenal sebagai arus searah, sedangkan AC adalah kebalikannya yaitu arus bolak balik atau berlawanan. Definisi umum dari *power supply* pada komputer adalah suatu pengubah tegangan yang dapat mengubah tegangan AC menjadi DC, sehingga semua perangkat keras yang memerlukan Tegangan arus DC dapat menerima tegangan listrik dari *power supply* ini.



Gambar 2. 3 *Power Supply*
(Sumber: Ichsan et al, 2022)

Tabel 2. 4 Spesifikasi *Power Supply*

No.	Spesifikasi	Keterangan
1	Model	S-60-12
2	<i>Output</i> (W)	60
3	<i>Output Voltage</i> DC	24V 10A
4	<i>Output</i> AC	110/220V

Sumber: Alldatashet.com

2.2.5 *Schneider* HMIGXU3512

Human Machine Interface (HMI) merupakan sebuah platform integratif yang memfasilitasi interaksi antara operator manusia dengan sistem mekanis. Perangkat ini diimplementasikan dalam bentuk *Graphic User Interface* (GUI) pada terminal komputer, yang berfungsi sebagai instrumen visual bagi pengguna untuk melakukan pengawasan serta pengaturan terhadap berbagai parameter dalam suatu sistem otomasi industri secara *real-time*. HMI digunakan untuk mengakses sistem setiap saat untuk berbagai tujuan, seperti kegagalan mesin, menampilkan status proses, menampilkan kuantitas produk dan dimana pengguna mengendalikan mesin pada plant. Penggunaan HMI memiliki beberapa keunggulan, misalnya menggunakan warna untuk memudahkan kode proses mengidentifikasi, menggunakan ikon atau gambar untuk memudahkan pengenalan objek dan layar dapat diubah sehingga akses sistem dapat dibuat. Pada sistem manufaktur, HMI harus bekerja dengan cara terintegrasi dengan PLC. HMI seperti Gambar 2.4 memberikan antarmuka visual yang memungkinkan operator untuk memantau dan mengontrol sistem secara efisien. Dengan terintegrasi, HMI dapat berkomunikasi dengan PLC untuk membaca data dan mengirim perintah kontrol.



Gambar 2. 4 Schneider HMIGXU3512
(Sumber: Schneider Electric)

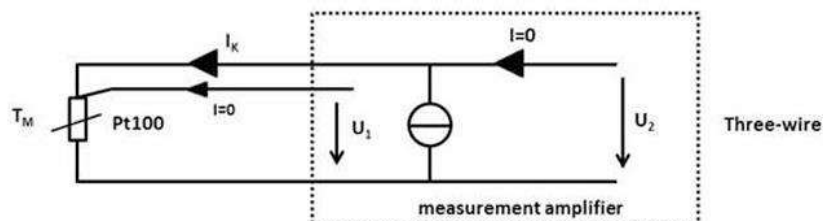
2.2.6 Thermocouple Rtd PT100

Thermocouple Rtd PT100 merupakan sensor suhu yang dapat mendeteksi suhu melalui dua jenis konduktor logam berbeda dengan penggabungan kedua ujungnya, yang dapat menimbulkan efek "*Thermo electric*". Efek ini ditemukan oleh *Thomas Johann Seebeck* fisikawan Estonia tahun 1821, di mana konduktor dari logam mengalami suhu berbeda dan menghasilkan tegangan. Perbedaan tegangan antara kedua sambungan tersebut disebut dengan "*Seeback*" (Gunawan et al., 2022). Termokopel adalah jenis sensor suhu yang umum digunakan pada perangkat elektronik yang berhubungan oleh suhu.

Kelebihannya adalah:

- Model tipe bermacam-macam, harga terjangkau (*low cost*), dan kisaran suhunya lebar sehingga bisa digunakan di suhu yang tinggi.
- Responnya relatif cepat. Tapi untuk sensitivitasnya lemah. (A. J. Hidayat et al., 2022).

Mengenai RTD, efek fisik yang dimanfaatkan adalah bahwa hambatan listrik bervariasi dengan suhu. Hubungan antara suhu dan resistensi dapat dijelaskan dengan sebuah persamaan. nominal untuk suhu tertentu. R_0 adalah resistensi nominal untuk suhu tertentu T_0 . T_M adalah suhu resistor dan a , b , c ... adalah konstanta yang bergantung pada material. Sebagai contoh, R_0 dari PT100 menghantarkan tepat $100\ \Omega$ pada 0°C dan mendukung rentang pengukuran antara -200 hingga 850°C . Untuk menentukan nilai resistensi, arus konstan yang telah ditentukan sebelumnya I_k , (biasanya 1 mA) digunakan dan penurunan tegangan melintasi resistor dihitung. Gambar 2.4 menunjukkan rangkaian yang biasa digunakan.



Gambar 2. 5 Sambungan RTD
(Sumber: Metzger, n.d.)

Dengan melakukan pengukuran dari U_1 dan U_2 , pengaruh resistansi timbal dihilangkan. Namun, hal ini memerlukan bahwa jalur suplai dan jalur balik memiliki panjang yang sama, terbuat dari bahan yang sama, dan terpapar pada suhu yang sama. Dalam skenario ini, tegangan I_k sekali lagi diketahui, namun penurunan tegangan pada catu daya yang lebih rendah dari garis diukur terlalu tinggi. Dari pengetahuan tentang U_1 dan U_2 , resistensi PT100 dapat ditentukan untuk kabel yang identik.(Metzger, n.d.)



Gambar 2. 6 RTD PT100
(Sumber: k-thermocouple, 2025)

Tabel 2. 5 Spesifikasi PT100

No	Parameter Karakteristik	Keterangan
1	Nama Perangkat	RTD PT100
2	Jumlah Kabel	3
3	Ukuran Sensor	4mmx30mm
4	Material	Stainless steel
5	Range	0°C sampai +400°C

Sumber: Omega.com

2.2.7 Sensor SHT20

Sensor SHT20 merupakan sensor suhu dan kelembapan digital buatan Sensirion yang telah banyak digunakan sebagai standar industri karena memiliki ukuran yang ringkas dan sistem pengolahan data terintegrasi. Sensor ini menggabungkan elemen sensor kelembapan tipe kapasitif, sensor suhu berbasis band-gap, serta rangkaian analog dan digital khusus dalam satu chip berbasis teknologi CMOSens®. Sensor SHT20 mampu mengukur kelembapan relatif pada rentang 0–100 %RH dengan tingkat akurasi $\pm 3,0$ %RH. Selain itu, sensor ini juga dapat mengukur suhu pada rentang -40 hingga 125 °C dengan tingkat akurasi

$\pm 0,3^{\circ}\text{C}$. Data hasil pengukuran dikirimkan dalam bentuk sinyal digital sehingga memiliki stabilitas tinggi, konsumsi daya rendah, serta cocok untuk sistem kendali dan monitoring berbasis PLC maupun mikrokontroler (Sensirion AG, 2014).



Gambar 2. 7 Sensor SHT20
(Sumber: GNS Component)

Tabel 2. 6 Spesifikasi SHT20

No	Parameter Karakteristik	Keterangan
1	Tipe Sensor	SHT20
2	Tegangan Kerja	9-36 VDC
3	Daya Maksimum	$\leq 0,3\text{ W}$
4	Rentang Pengukuran Suhu	-40°C hingga $+125^{\circ}\text{C}$
5	Akurasi Suhu	$\pm 0,3^{\circ}\text{C}$
6	Resolusi Suhu	$0,01^{\circ}\text{C}$
7	Rentang Pengukuran Kelembaban	0-100% RH
8	Akurasi Kelembaban	$\pm 3\text{ \%RH}$
9	Resolusi Kelembaban	$0,04\text{ \% RH}$
10	Komunikasi	RS485 (Modbus RTU)

Sumber: Sensirion AG

2.2.8 Sensor *Moisture* Kapasitif

Sensor *moisture* kapasitif merupakan sensor yang digunakan untuk mengukur kadar air suatu material berdasarkan perubahan nilai kapasitansi listrik. Sensor ini bekerja dengan memanfaatkan perbedaan konstanta dielektrik antara air dan material kering, di mana air memiliki konstanta dielektrik yang jauh lebih tinggi sehingga perubahan kadar air akan memengaruhi nilai kapasitansi sensor. Sensor *moisture* kapasitif umumnya terdiri dari dua elektroda yang dilapisi bahan isolator sehingga bersifat non-korosif dan lebih stabil dibandingkan sensor *moisture* konduktif. Sensor ini mampu mengukur kadar air pada rentang 0–100% dengan akurasi yang bergantung pada proses kalibrasi, serta menghasilkan

keluaran berupa sinyal *analog*, seperti tegangan rendah atau arus standar industri 4–20 mA. Dengan bantuan transmitter atau modul pengkondisi sinyal, sensor moisture kapasitif dapat diintegrasikan dengan sistem kendali berbasis PLC untuk pemantauan kadar air secara *real-time* pada proses pengeringan bahan pertanian (Zhang et al., 2021; Liu et al., 2023).



Gambar 2. 8 Sensor Moisture Kapasitif
(Sumber: Taryana, 2021)

Tabel 2. 7 Spesifikasi Sensor Moisture Kapasitif

No	Parameter Karakteristik	Keterangan
1	Jenis Sensor	<i>Capacitive Moisture Sensor</i>
2	Tegangan Kerja	3,3-5VDC
3	Arus Operasi	< 5 mA
4	Tegangan Keluaran	Analog (0-3V)
5	Dimensi	$\pm 98 \times 23$ mm
6	Suhu Operasi	-40°C hingga 85°C

Sumber: DFRobot

2.2.9 Heater

Heater merupakan yang dapat mengganti listrik menjadi panas. Pengoperasian *heater* yaitu ketika arus melewati konduktor dan memenuhi hambatannya, sehingga panas dapat dihasilkan. *Heater* menghasilkan panas dari kawat yang mempunyai resistansi yang tinggi. bahan yang dipakai yaitu niklin yang dapat mengaliri arus dari ujung-ujung keduanya dan dilapisi lapisan isolasi listrik yang mampu melakukan perpindahan panas dengan baik dan aman.

Pada penelitian ini, *heater* digunakan sebagai sumber panas utama untuk proses pengeringan. Suhu kerja *heater* dikendalikan agar tetap berada pada nilai *setpoint* yang telah ditentukan guna menjaga kestabilan proses pengeringan dan

kualitas hasil akhir. Pengendalian suhu dilakukan menggunakan PLC yang menerapkan metode kontrol fuzzy, sehingga keluaran daya *heater* dapat disesuaikan secara otomatis berdasarkan selisih antara suhu aktual dan *setpoint*. Dengan penerapan sistem kendali tersebut, suhu pengeringan diharapkan dapat dijaga tetap stabil meskipun terjadi gangguan dari perubahan beban atau kondisi lingkungan.



Gambar 2. 9 *Heater*
(Nipu et al., 2022)

Tabel 2. 8 Spesifikasi PTC Air Heater

No	Parameter Karakteristik	Keterangan
1	Tipe <i>Heater</i>	PTC Air Heater (<i>Ceramic PTC Heating Element</i>)
2	Tegangan Kerja	24 VDC
3	Daya Nominal	100 W
4	Arus Nominal	$\pm 4,17$ A
5	Material Sirip	Aluminium
6	Suhu Permukaan Maksimum	$\pm 200^{\circ}\text{C}^*$

Sumber: alibaba.com

2.2.10 Kipas DC 24V

Kipas DC 24 V merupakan aktuator yang digunakan untuk mengalirkan udara guna membantu proses pendinginan dan pengendalian suhu pada suatu sistem. Kipas ini bekerja dengan memanfaatkan motor arus searah (DC) yang berputar ketika diberikan tegangan sebesar 24 V, sehingga menghasilkan aliran udara yang dapat mempercepat pelepasan panas dari ruang atau permukaan objek. Pada sistem ini, kipas DC 24 V dikendalikan oleh *Programmable Logic Controller* (PLC) melalui rangkaian penggerak seperti *relay* atau *driver* transistor, karena PLC tidak dapat menggerakkan beban DC secara langsung. Pengaturan

kipas dilakukan berdasarkan sinyal keluaran PLC yang diproses dari hasil pengukuran sensor suhu dan logika kendali yang diterapkan. Pengaturan kipas tidak bertujuan sebagai pendingin aktif, melainkan sebagai sistem sirkulasi udara untuk pemerataan panas dan pengendalian kelembapan ruang pengering.



Gambar 2. 10 Kipas DC 24V
(Sumber: Lazada)

2.2.11 MAX485 TTL to RS485 Converter

MAX485 TTL to RS485 Converter pada penelitian ini berfungsi sebagai modul komunikasi serial antara ESP32 dengan PLC menggunakan protokol komunikasi RS485 Modbus RTU. Modul MAX485 digunakan untuk mengubah sinyal TTL dari ESP32 menjadi sinyal diferensial RS485 sehingga data dapat dikirim dengan lebih stabil dan tahan terhadap *noise* pada jarak komunikasi yang lebih jauh. Pada sistem ini, modul MAX485 digunakan untuk mengirimkan data sensor menuju PLC agar dapat dibaca pada *software GX Works*. Selain itu, komunikasi RS485 dipilih karena memiliki keunggulan dalam kestabilan transmisi data dibandingkan komunikasi serial biasa, terutama pada lingkungan industri yang memiliki banyak gangguan elektromagnetik. Adapun gambar dan spesifikasi dari modul MAX485 TTL to RS485 Converter pada Gambar 2.11 dan Tabel 2.9 sebagai berikut.



Gambar 2. 11 Voltage to PWM Converter
(Sumber: Tokopedia)

Tabel 2. 9 Spesifikasi MAX485 TTL to RS485 Converter

No	Parameter Karakteristik	Keterangan
1	Tegangan Kerja	5VDC
2	Protokol Komunikasi	RS485 Half Duplex
3	Kecepatan Transmisi Data	Hingga 2.5 Mbps
4	Interface Mikrokontroler	TTL UART Serial
5	Pin Komunikasi RS485	A dan B
6	IC Utama	MAX485

Sumber: MAX485 Datasheet

2.2.12 Driver BTS7960

Driver BTS7960 pada penelitian ini berfungsi sebagai pengendali pemanas/*heater* dan juga kipas. Dengan adanya driver BTS7960, *heater* dan kipas dapat di *adjustable* oleh plc dengan suhu yang diinginkan. Berikut adalah driver motor BTS 7960 ditunjukkan pada Gambar 2.12 (Athoillah et al., 2021).



Gambar 2. 12 Driver BTS7960
(Sumber: Athoillah et al, 2021)

Tabel 2. 10 Spesifikasi Driver BTS7960

No	Parameter Karakteristik	Keterangan
1	Resistansi	16m Ω @25 C °
2	Arus rendah diam	7 μ A @25 C °
3	Kapasitas PWM	25 kHz
4	Arus maksimum	43 A
5	Tegangan mikrokontroler	5V
6	Tegangan Suplai	5.5-27V

Sumber: Infineon BTS7960 Datasheet

2.2.13 Optocoupler PC817

Optocoupler pada penelitian ini berfungsi sebagai pengaman sekaligus isolator antara rangkaian kontrol (PLC) dengan rangkaian beban (*heater* dan kipas). Dengan adanya optocoupler, sinyal dari PLC dapat diteruskan tanpa adanya hubungan listrik secara langsung, sehingga dapat melindungi PLC dari gangguan tegangan tinggi, *noise*, maupun lonjakan arus dari sisi beban. Selain itu, penggunaan *optocoupler* juga meningkatkan keandalan sistem dalam proses switching perangkat AC.

Optocoupler yang digunakan berupa *opto chip* yang disolder dengan tambahan resistor sebesar 2,2 k Ω . Resistor ini berfungsi untuk membatasi arus yang masuk ke dalam *optocoupler* agar tidak melebihi batas maksimum komponen, sehingga mencegah kerusakan pada sisi input.



Gambar 2. 13 Optocoupler PC817
(Sumber: Tokopedia)

Tabel 2. 11 Spesifikasi Optocoupler PC817

No	Parameter Karakteristik	Keterangan
1	Tegangan <i>Input (Forward)</i>	1.2 V - 1.4 V
2	Arus <i>input</i> maksimum	20 mA
3	Tegangan output maksimum	80 V
4	Arus kolektor maksimum	50 mA
5	<i>Isolation Voltage</i>	5000 Vrms
6	Resistor <i>Input</i>	2,2 k Ω
7	Tipe <i>Output</i>	<i>Phototransistor</i>

Sumber: Sharp Microelectronics Datasheet

2.2.14 Transmitter PT100

Transmitter adalah alat yang digunakan untuk mengubah perubahan sensing element dari sebuah sensor menjadi sinyal yang mampu diterjemahkan oleh *controller*. Transmitter PT100 adalah suatu komponen yang terhubung pada sensor suhu yang bertujuan untuk mengirimkan sinyal yang nantinya akan diteruskan pada PLC. Range yang digunakan untuk transmisi ini adalah 4-20mA (Komalasari & Saragih, 2024).



Gambar 2. 14 Transmitter PT100
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

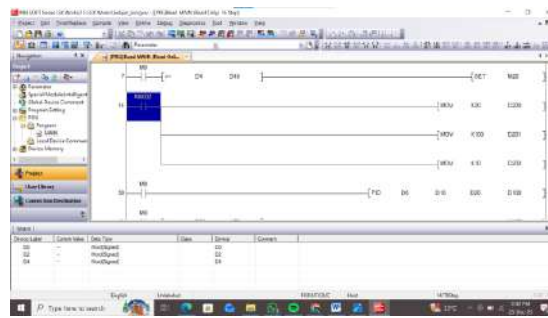
Tabel 2. 12 Spesifikasi Transmitter PT100

No	Spesifikasi	Keterangan
1	<i>Power Supply</i>	24VDC
2	<i>Output</i>	4-20mA
3	<i>Temperature Range</i>	0 C-400 C

Sumber: Datasheet Temperature Transmitter PT100

2.2.15 GX Works 2

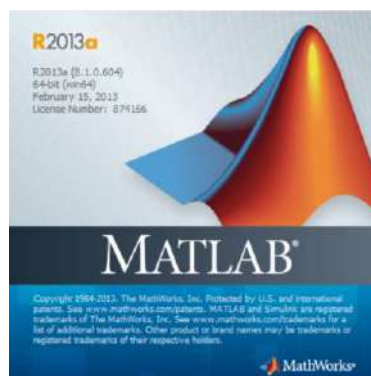
Software GX Works 2 merupakan salah satu alat bantu untuk membuat berbagai macam program komputer, khususnya yang menggunakan sistem operasi PLC (Ardiansyah & Risfendra, 2020). *GX Works2* merupakan *software* yang digunakan untuk memprogram PLC pada Pemrograman dengan menggunakan *software GX Works2* dapat dilakukan dengan tiga cara yaitu menggunakan *Ladder Diagram*, *SFC (Sequential Flow Chart)*, dan *Intelligent Function*. Ketiga cara tersebut memiliki fungsi untuk mempermudah *user* terhubung dengan PLC melalui komputer / laptop (Sitorus et al., 2023)



Gambar 2. 15 Software GX Works2
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

2.2.16 MATLAB

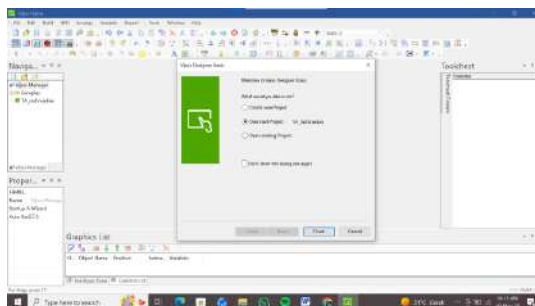
Matlab adalah *software* yang membantu kita melakukan perhitungan matematis, menganalisis data, mengembangkan algoritma, melakukan simulasi, memodelkan dan menyajikannya dalam bentuk grafik. Program *Matlab* sangat cocok untuk aplikasi ilmiah, karena memberikan hasil yang lebih akurat dibandingkan perhitungan manual. *Matlab* memiliki grafis yang sangat baik (Puji Astuti, 2020). *Matlab* Merupakan produk komersial Mathworks, Inc. *Matlab* telah menjadi aplikasi yang sangat berguna untuk melakukan tugas pemrosesan aljabar linier dan perhitungan matematis lainnya. *Matlab* juga dilengkapi dengan banyak fungsi bawaan yang berguna untuk melakukan tugas-tugas yang seringkali sulit dilakukan ketika berhadapan dengan bilangan, tentu saja menghitung matriks numerik. *Matlab* sering digunakan untuk menyelesaikan permasalahan yang berhubungan dengan operasi elemen, matriks, optimasi, aproksimasi dan permasalahan lainnya. (Fatwa et al., 2022).



Gambar 2. 16 Software Matlab
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

2.2.17 Vijeo Designer Basic 2.1

Vijeo Designer adalah *software* yang digunakan untuk membuat program pada *Human Machine Interface* (HMI) *Schneider Electric* yang telah menyediakan berbagai fitur untuk membangun tampilan panel *interface* yang lebih komunikatif dan interaktif. *Software* ini mendukung pembuatan sistem monitoring dan kontrol antara manusia dan mesin sehingga lebih mudah dipahami oleh operator dalam proses pengoperasian sistem industri. *Vijeo Designer* digunakan untuk membangun *Graphic User Interface* (GUI) pada sistem PLC agar pengguna lebih mudah dalam melakukan pengawasan dan pengendalian sistem. Pada *software* ini tersedia berbagai komponen visual seperti *push button*, indikator, alarm, *trend graph*, display data, dan *input* parameter yang dapat difungsikan untuk mengontrol maupun memonitor kerja mesin secara *real time*. HMI dapat juga menampilkan data-data rangkuman kerja mesin secara grafik secara *real time*. (Aji & Susilo, 2021).



Gambar 2. 17 *Software Vijeo Designer*
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 3

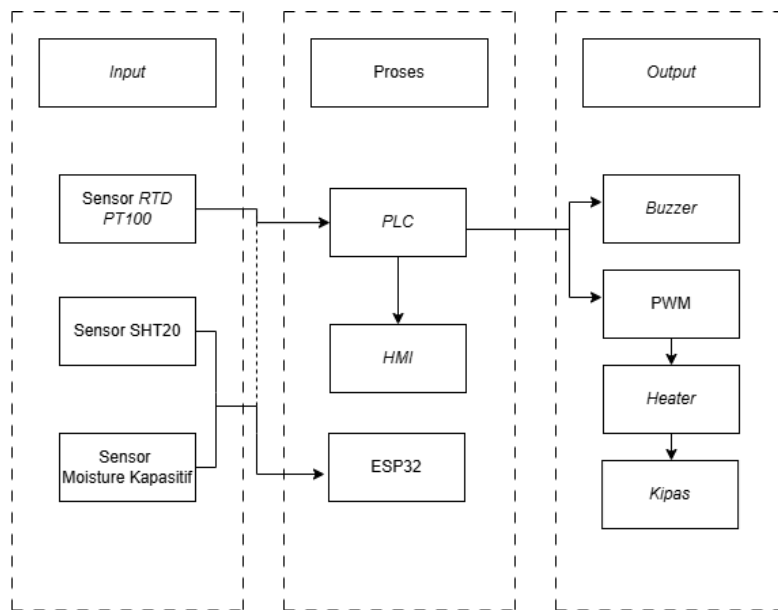
METODE PENELITIAN

Pemilihan metode penelitian perlu disesuaikan dengan tujuan penelitian yang telah ditetapkan sebelumnya. Pada keterangan lebih lanjut mengenai hal ini, peneliti diharapkan merinci metode yang akan diterapkan untuk mencapai tujuan penelitian, serta memberikan argument yang mendukung keunggulan suatu metode penelitian disbanding metode lainnya.

Bab ini memuat jalannya penelitian dalam kerangka Tugas Akhir yang akan dikerjakan oleh penulis. Rinciannya mencakup pengidentifikasian pemilihan masalah, analisis, dan perancangan yang melibatkan aspek-aspek seperti sistem, hardware, dan software yang akan dipresentasikan secara terperinci dalam sub-bab yang terkait. Penjelasan mengenai alur penelitian akan dipaparkan secara sistematis dan urut sesuai dengan langkah yang telah ditentukan.

3.1 Konsep Penelitian

Pada bagian ini akan disajikan konsep penulis mengenai penelitian yang akan dilakukan. Konsep penelitian menjadi dasar perancangan dan pengembangan sistem yang akan dibuat. Dengan memberikan gambaran umum mengenai sistem yang akan dibangun, maka penelitian ini akan mempunyai kerangka yang kokoh. Konsep tersebut akan dijelaskan dalam bentuk diagram blok agar mudah dipahami. Diagram blok sistem pada Gambar 3.1 akan membantu pembaca dengan mudah memahami konsep umum sistem yang akan dibangun dan penelitian ini akan memiliki kerangka kerja yang kokoh. Konsep penelitian ini dirancang dengan mempertimbangkan keterkaitan antara kebutuhan fungsional sistem, karakteristik objek pengeringan, serta metode pengendalian yang digunakan. Setiap komponen dalam sistem saling terintegrasi untuk mendukung tercapainya tujuan penelitian, yaitu menghasilkan proses pengeringan cabai yang stabil dan terkontrol. Oleh karena itu, penyajian konsep dalam bentuk diagram blok dipilih untuk memperjelas alur kerja sistem, hubungan antar subsistem, serta aliran sinyal dan energi dalam proses pengeringan.

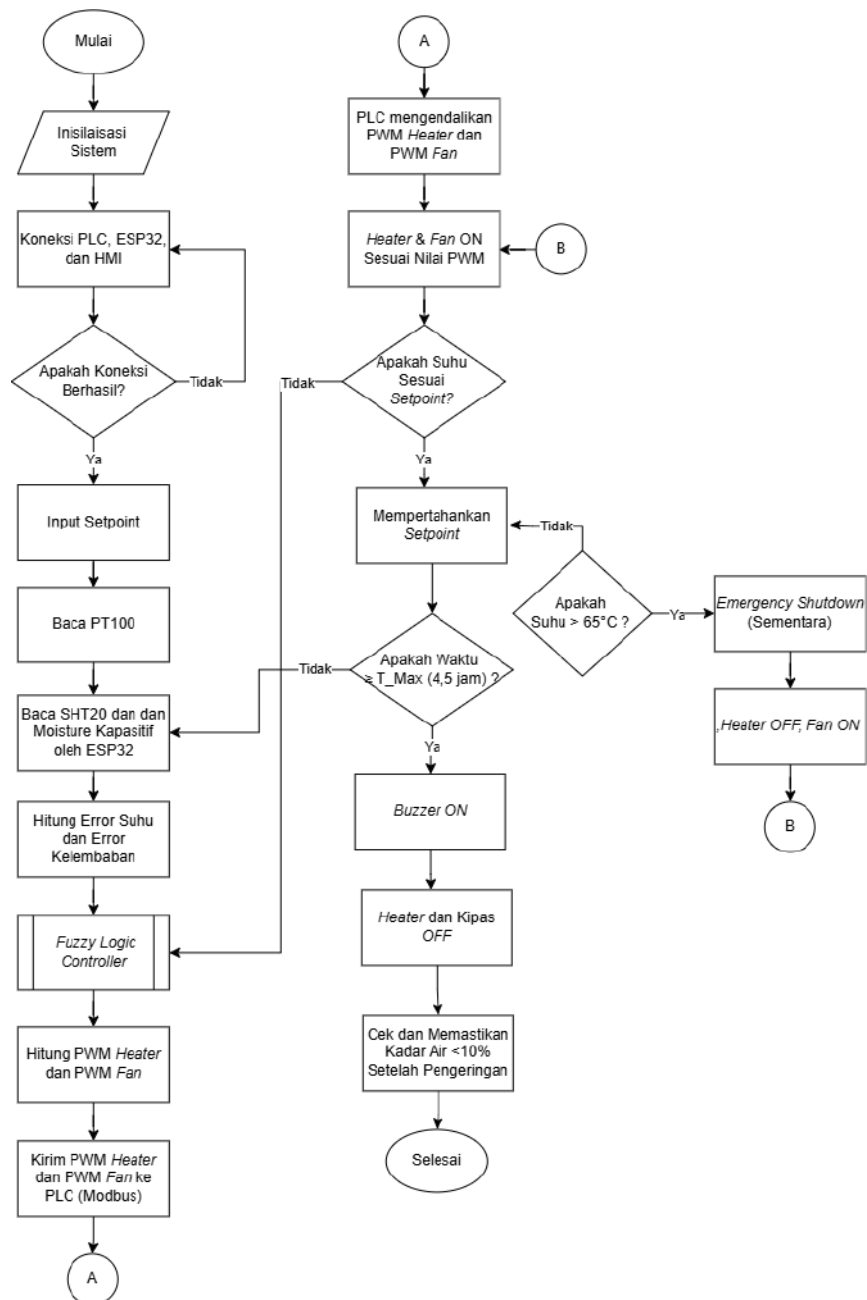


Gambar 3. 1 Diagram Blok Sistem

Pada Gambar 3.1 digambarkan sensor *thermocouple* yang ditempatkan secara proksimal dengan *heater* untuk pemantauan suhu *real* sekaligus fungsi proteksi, sensor kelembapan guna mengawasi kondisi udara selama proses berlangsung, serta sensor kadar air (*moisture* kapasitif) berfungsi untuk mendeteksi tingkat kandungan air pada bahan cabai sebagai indikator tingkat kekeringan produk. Informasi dari seluruh transduser ini diakuisisi oleh PLC Mitsubishi FX3U-48MT yang berperan sebagai unit pemroses sentral. Di dalam *controller*, algoritma pengendalian suhu diterapkan untuk menjaga kestabilan suhu sesuai *setpoint*, sementara logika pengendalian kelembapan dan kadar air digunakan untuk mengatur kerja kipas secara adaptif. *Human Machine Interface* (HMI) sebagai sarana monitoring dan pengaturan sistem. Pada sisi output, PLC mengendalikan *heater* sebagai sumber panas utama, kipas untuk membantu pemerataan suhu dan penguapan kadar air, serta *buzzer* yang berfungsi sebagai indikator atau alarm apabila sistem mendeteksi kondisi abnormal selama proses pengeringan.

3.1.1 Diagram Kerja Sistem

Diagram kerja sistem merupakan bagian yang akan menjelaskan proses pengoperasian sistem tersebut. Dari awal hingga akhir proses. Berikut representasi dari diagram kerja sistem.



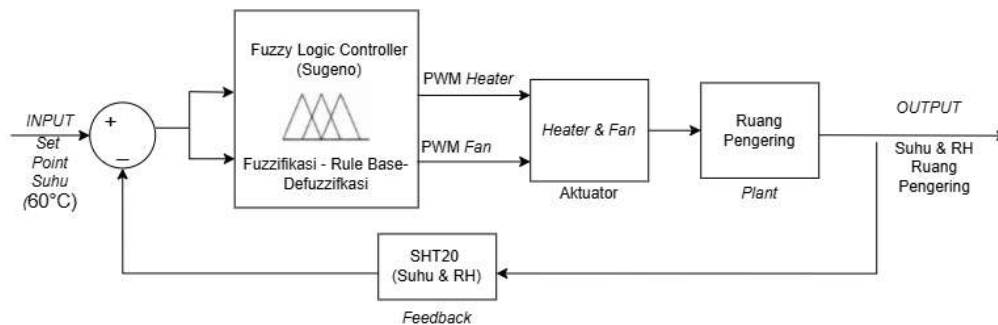
Gambar 3. 2 Diagram Kerja Sistem

Dari Gambar 3.2 dapat dilihat kerja sistem PID pada Tugas Akhir ini adalah:

1. Pada kondisi awal, inisialisasi semua sistem.
2. Mengkoneksikan PLC dan ESP32 dengan Modbus RTU lalu ke HMI untuk monitoring sistem.
3. Pembacaan sensor *moisture* kapasitif untuk mengecek nilai kadar air pada cabai sebelum dikeringkan.

4. Operator memasukkan nilai *setpoint* suhu melalui HMI sebagai acuan proses pengendalian.
5. Pembacaan sensor *thermocouple* dan SHT20 untuk membaca suhu dan kelembaban relatif (RH) yang selanjutnya dikirim ke ESP32 untuk diproses.
6. Nilai *error* suhu dan *error* kelembaban yang terbaca kemudian digunakan sebagai *input* pada sistem logika *fuzzy* untuk melakukan proses fuzzifikasi, evaluasi *rule base*, dan defuzzifikasi untuk menghasilkan nilai keluaran berupa PWM *heater* dan PWM *fan*.
7. Nilai PWM *Heater* dan PWM *Fan* yang dihasilkan kemudian dikirimkan ke PLC melalui komunikasi Modbus RTU sebagai sinyal kendali aktuator.
8. PLC menerima nilai PWM tersebut dan mengendalikan *heater* serta kipas sesuai nilai yang diterima sehingga suhu dan sirkulasi udara di dalam ruang pengering dapat menyesuaikan kondisi proses pengeringan.
9. Sistem terus memantau suhu ruang pengering. Apabila suhu belum mencapai kondisi yang diinginkan, maka proses pembacaan sensor, perhitungan *error*, dan pengendalian *fuzzy* akan terus dilakukan secara berulang hingga suhu mendekati *setpoint*.
10. Setelah suhu berada di sekitar *setpoint*, sistem akan mempertahankan kondisi tersebut selama proses pengeringan berlangsung. Sebagai sistem pengaman (*safety system*), apabila suhu melebihi 65°C, maka sistem menjalankan *emergency shutdown* sementara dengan mematikan *heater* dan tetap mengaktifkan kipas hingga suhu kembali berada pada kondisi aman. Setelah itu, proses pengendalian dilanjutkan kembali.
11. Sistem terus beroperasi hingga waktu pengeringan mencapai waktu maksimum (T_Max) selama 4,5 jam. Setelah waktu tersebut tercapai, *buzzer* diaktifkan sebagai indikator bahwa proses pengeringan telah selesai, kemudian *heater* dan kipas dimatikan secara otomatis.
12. Pada tahap akhir, dilakukan pemeriksaan kembali menggunakan sensor moisture kapasitif untuk memastikan kadar air cabai telah berada di bawah 10% sebagai indikator keberhasilan proses pengeringan, kemudian sistem berhenti.

3.1.2 Diagram Blok Kontrol



Gambar 3. 3 Diagram Blok Kontrol *Fuzzy* dengan Ruang Pengereng

Berdasarkan diagram blok pada Gambar 3.3, sistem pengendalian pada alat pengering cabai dirancang menggunakan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) metode Sugeno untuk mengendalikan suhu dan kelembaban ruang pengering. Sistem diawali dengan pemberian *setpoint* suhu sebesar 60°C sebagai acuan utama proses pengendalian. Nilai *setpoint* tersebut dibandingkan dengan suhu aktual yang dibaca oleh sensor SHT20 sehingga diperoleh *error* suhu, sedangkan *error* kelembaban diperoleh dari selisih antara nilai *setpoint* kelembaban dengan kelembaban aktual yang dibaca sensor SHT20. Kedua nilai *error* tersebut selanjutnya menjadi masukan bagi *Fuzzy Logic Controller*.

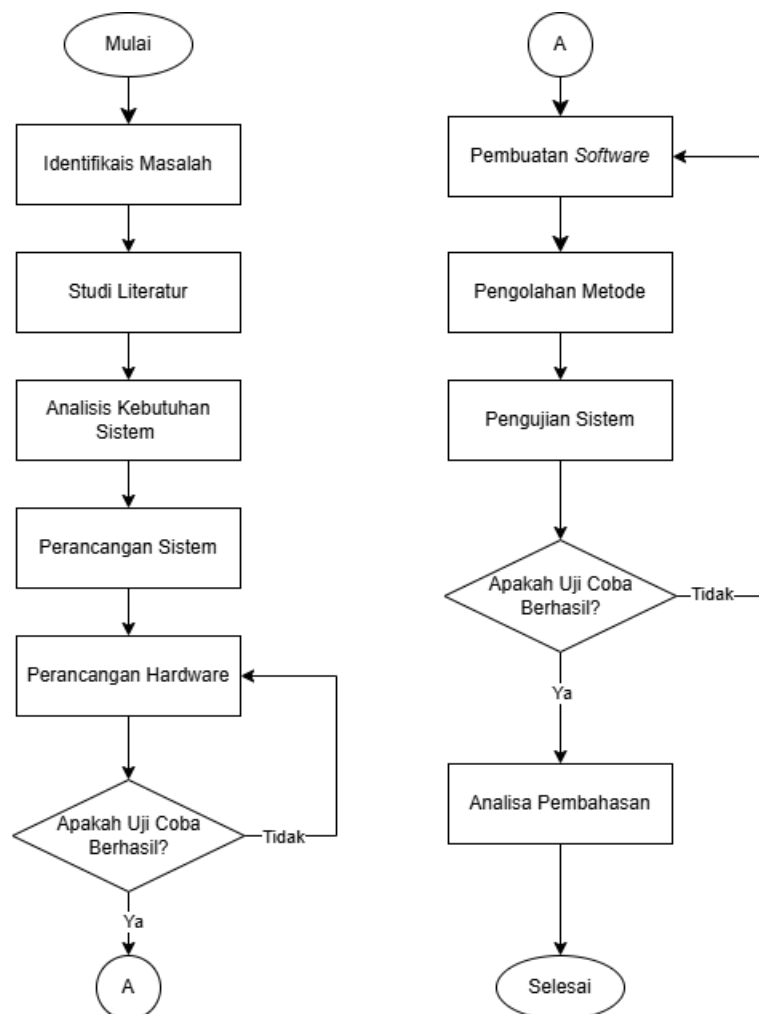
Di dalam *Fuzzy Logic Controller*, nilai *error* suhu dan *error* kelembaban diproses melalui tahapan fuzzifikasi, evaluasi *rule base*, dan defuzzifikasi menggunakan metode Sugeno untuk menghasilkan dua keluaran berupa PWM *heater* dan PWM *fan*. Nilai PWM tersebut kemudian dikirimkan ke PLC Mitsubishi FX3U melalui komunikasi Modbus RTU untuk mengendalikan daya heater dan kecepatan putar kipas. Dengan mekanisme ini, *heater* dan kipas tidak bekerja menggunakan sistem *ON-OFF*, melainkan dikendalikan secara proporsional sesuai kondisi suhu dan kelembaban di dalam ruang pengering sehingga proses pengeringan berlangsung lebih stabil.

Perubahan kerja *heater* dan kipas akan memengaruhi kondisi termal di dalam ruang pengering sebagai *plant* sistem. Suhu dan kelembaban ruang pengering kemudian dipantau kembali oleh sensor SHT20 sebagai sinyal umpan

balik (*feedback*) yang digunakan untuk menghitung kembali nilai *error* suhu dan *error* kelembaban pada siklus pengendalian berikutnya. Dengan adanya mekanisme umpan balik tersebut, sistem membentuk sistem kendali tertutup (*closed-loop control*) yang mampu menyesuaikan keluaran PWM secara berkelanjutan terhadap perubahan kondisi di dalam ruang pengering sehingga suhu dan kelembaban dapat dipertahankan mendekati nilai yang diinginkan.

3.2 Tahapan Penelitian

Bagian ini berisi alur kerja peneliti yang ditampilkan dalam bentuk diagram *flowchart*. Membuat alur kerja dalam bentuk diagram *flowchart* berguna untuk memudahkan pemahaman terhadap proses yang dibuat selama proses yang dibuat pada saat penelitian yang berisi penjelasan setiap langkah tahapan kegiatan.



Gambar 3. 4 Tahapan Penelitian

3.2.1 Identifikasi Masalah

Proses identifikasi masalah dilakukan untuk menganalisis permasalahan pada proses pengolahan pascapanen cabai, khususnya dalam menjaga kestabilan suhu dan kelembaban relatif (RH) selama proses pengeringan. Pengendalian suhu yang kurang stabil dapat menyebabkan proses pengeringan tidak berlangsung secara optimal sehingga berpotensi menurunkan mutu produk, memperpanjang waktu pengeringan, serta menghasilkan tingkat kekeringan yang tidak merata antar rak. Selain itu, perubahan kelembaban relatif di dalam ruang pengering akibat proses evaporasi juga memengaruhi efektivitas pengeringan sehingga diperlukan metode kendali yang mampu beradaptasi terhadap perubahan kondisi tersebut. Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengembangkan sistem pengering cabai otomatis berbasis PLC Mitsubishi FX3U dan ESP32 dengan menerapkan metode *Fuzzy*. Metode tersebut dipilih karena mampu mengendalikan sistem yang bersifat nonlinier tanpa memerlukan model matematis yang kompleks, sehingga diharapkan dapat menjaga kestabilan suhu ruang pengering serta meningkatkan efektivitas dan keseragaman hasil pengeringan cabai.

3.2.2 Studi Literatur

Perancangan Studi literatur merupakan kegiatan yang sangat penting dalam penelitian Tugas Akhir. Pada tahap ini, penulis mempelajari berbagai jurnal ilmiah, prosiding, buku, standar, serta *datasheet* komponen yang berkaitan dengan sistem pengering cabai, metode *Fuzzy*, sistem kendali berbasis PLC dan ESP32, sensor suhu dan kelembaban, serta komunikasi Modbus RTU. Selain itu, penulis juga mengkaji penelitian-penelitian terdahulu yang relevan untuk mengetahui perkembangan teknologi, metode yang telah digunakan, serta kelebihan dan keterbatasannya sebagai acuan dalam perancangan sistem. Hasil studi literatur tersebut menjadi dasar dalam menentukan metode penelitian, pemilihan komponen, penyusunan algoritma *Fuzzy*, serta perancangan perangkat keras dan perangkat lunak pada sistem pengering cabai yang dikembangkan.

3.2.3 Analisa Kebutuhan Sistem

Analisis kebutuhan sistem merupakan tahap untuk menentukan komponen yang diperlukan dalam pembuatan penelitian ini, antara lain:

Tabel 3. 1 Kebutuhan Sistem

No	Pembuatan	Analisa Kebutuhan	Jumlah
1	Kebutuhan <i>Input</i>	Sensor <i>Thermocouple</i>	1 Buah
		Sensor SHT20	1 Buah
		Sensor Moisture Kapasitif	1 Buah
		<i>Pushbotton</i>	2 Buah
2	Kebutuhan <i>Output</i>	<i>Heater</i>	1 Buah
		Kipas	1 Buah
		<i>Buzzer</i>	1 Buah
		BTS7960	2 Buah
		<i>Optocoupler</i> PC817	1 Buah
3	Kebutuhan Primer	PLC <i>Mitsubishi FX3U</i> 48MT	1 Buah
		ESP32	1 Buah
		Laptop	1 Buah
		HMI Schneider GXU 3512	1 Buah
		Oven	1 Buah

3.3 Perencanaan dan Desain

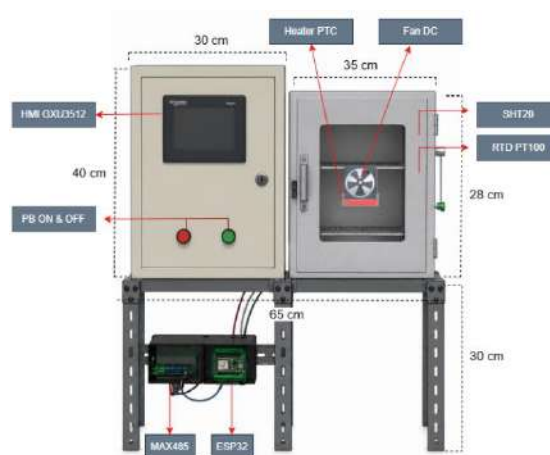
Sub bab ini membahas tentang perencanaan dan desain alat yang akan dibuat. Penjelasan mengenai perencanaan sistem pengering cabai, mulai dari *hardware* hingga *software* akan disampaikan. Berikut adalah perencanaan yang dilakukan.

3.3.1 Perancangan *Hardware*

Tahap selanjutnya pada penelitian Tugas Akhir ini adalah perancangan *hardware*. Perancangan *hardware* dilakukan dengan merancang seluruh komponen fisik sistem yang digunakan pada prototipe alat pengering cabai. *Software* yang digunakan dalam proses perancangan *hardware* adalah *Autodesk Inventor*, yang dipilih karena mampu memvisualisasikan bentuk tiga dimensi secara detail dan presisi. Perancangan *hardware* dilakukan dengan mempertimbangkan aspek fungsional, ergonomi, dan keselamatan kerja, sehingga setiap komponen dapat ditempatkan secara optimal sesuai dengan kebutuhan sistem. Penempatan komponen seperti *heater*, sensor suhu, sensor kelembapan, kipas, serta ruang pengering dirancang secara terintegrasi agar sistem dapat

bekerja secara efektif dan aman. Selain itu, perancangan juga memperhatikan kemudahan dalam proses perawatan dan perbaikan alat apabila terjadi gangguan selama pengoperasian.

Hasil perancangan *hardware* ini kemudian dijadikan acuan utama dalam tahap perakitan dan implementasi alat pada penelitian ini. Dengan adanya perancangan yang matang, proses perakitan dapat dilakukan secara sistematis dan meminimalkan kesalahan pemasangan komponen. Perancangan *hardware* ini juga berguna untuk memudahkan peneliti dalam memahami hubungan antar komponen serta alur kerja sistem secara keseluruhan sebelum alat direalisasikan secara fisik. Bentuk perancangan *hardware* alat pengering cabai ditunjukkan pada Gambar 3.5 dan Gambar 3.6 di bawah ini.



Gambar 3. 5 Perancangan Alat Tampak Depan



Gambar 3. 6 Perancangan Alat Tampak Samping

Pada Gambar 3.5 ditunjukkan perancangan alat pengering cabai tampak depan, sedangkan Gambar 3.6 memperlihatkan perancangan alat tampak samping. Sistem pemanas pada alat ini menggunakan satu buah *heater* PTC Air yang diposisikan di bagian tengah belakang ruang pengering, tepat di depan kipas DC. Penempatan ini bertujuan untuk memastikan panas dapat terdistribusi merata ke seluruh permukaan bahan yang dikeringkan dengan bantuan kipas yang berfungsi untuk membantu pergerakan udara panas. Rak jaring digunakan agar aliran udara panas dapat melewati cabai secara optimal dari bawah ke atas.

Sensor SHT20 dipasang di dalam ruang pengering di sebelah kanan samping untuk mendeteksi nilai suhu dan kelembaban relatif (*Relative Humidity/RH*) secara *real-time* sebagai umpan balik (*feedback*) utama pada sistem kendali *Fuzzy*. Selain itu, sensor RTD PT100 ditempatkan berdekatan dengan sensor SHT20 untuk membaca suhu pada area ruang pengering sebagai sensor pembanding dan validasi pengukuran suhu. Data dari sensor PT100 digunakan untuk memastikan pembacaan suhu dari sensor SHT20 tetap akurat dan stabil selama proses pengeringan berlangsung, khususnya pada kondisi ruang pengering yang terpapar panas *heater* secara langsung. Data suhu dan kelembaban yang terbaca digunakan untuk menghasilkan nilai *error* suhu dan *error* kelembaban yang kemudian akan diproses oleh metode *Fuzzy Sugeno*.

Sebagai sistem pengaman, *buzzer* diintegrasikan pada sistem kontrol dan akan aktif apabila terdeteksi kondisi suhu melebihi batas maksimum yang diizinkan. Pada kondisi tersebut, sistem akan menjalankan mekanisme *emergency shutdown* untuk menghentikan kerja *heater* secara otomatis guna mencegah kerusakan alat maupun bahan yang dikeringkan. Secara keseluruhan, desain mekanik alat pengering ini dirancang dengan mempertimbangkan efisiensi distribusi panas, kestabilan suhu dan kelembaban, serta kemudahan integrasi sensor dan aktuator dengan sistem kendali berbasis PLC. Dimensi utama alat pengering adalah sebagai berikut: panjang 35 cm, lebar 25 cm, tinggi 28 cm, kaki penyangga 30 cm, dengan perhitungan volume sebesar:

$$V = P \times L \times T \quad (3.1)$$

$$V = 0,35 \times 0,25 \times 0,28$$

$$V = 0,0245 \text{ m}^3$$

Pemanasan udara di dalam oven dapat dihitung dengan :

$$Q_{udara} = \rho \cdot V \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (3.2)$$

$$Q_{udara} = 1,2 \times 0,058 \times 1005 \times 30$$

$$Q_{udara} = 2.100 \text{ J}$$

Hal ini menunjukkan energi yang kecil sehingga udara cepat panas. Dilanjutkan dengan korelasi perhitungan massa cabai.

$$Q_{cabai} = 2 \text{ kg} \times 3.500 \text{ J} \times 30 = 210.000 \text{ J}$$

Air yang diuapkan dianggap 1 kg dari massa cabai 2kg, dan kalor laten penguapan air adalah 2.260 kJ/kg, sehingga evaporasi air sebesar 2.260.000 J. Secara praktis, oven dengan ukuran $0,5776 \text{ m}^3$ memiliki kehilangan panas 15-30% dari total energi.

$$Q_{loss} = 0,2 \times (Q_{udara} + Q_{produk} + Q_{evap}) \quad (3.3)$$

$$Q_{loss} = 0,2 \times (2.100 + 210.000 + 2.260.000)$$

$$Q_{loss} = 494.000 \text{ J}$$

Sehingga dari total kebutuhan energi panas semuanya sekitar $Q_{total} = 3.000.000 \text{ J}$. Penentuan daya pemanas dengan permisalan waktu pengeringan selama 4 jam, maka:

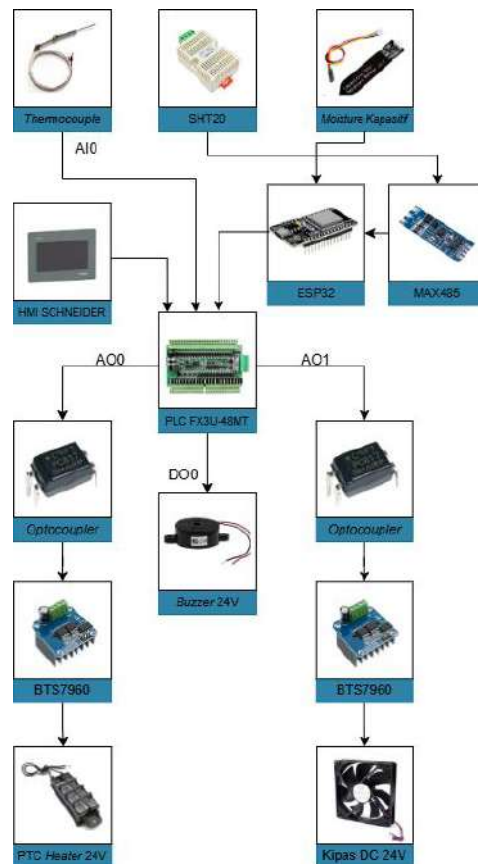
$$P = \frac{Q_{total}}{t} = \frac{3.000.000}{4 \times 3.600} = 208 \text{ W} \quad (3.4)$$

Dengan faktor keamanan $P_{heater} = 250 - 300 \text{ W}$

Berdasarkan perhitungan energi dan daya kebutuhan panas, penetapan suhu 60°C tidak penulis ambil secara asumptif, melainkan berdasarkan volume oven 0,0245

m³ dinilai layak secara termal dan memenuhi persyaratan mutu pengeringan cabai sesuai SNI.

Perancangan *hardware* ditunjukkan pada Gambar 3.7 yang meliputi tiga sensor yang dipakai dalam sistem, satu sensor untuk pengecekan dan validasi kadar air cabai sebelum dan setelah pengeringan, dan PLC Mitsubishi FX3U 48MT sebagai *controller* dan HMI Schneider GXU 3512 sebagai tampilan *touchscreen*. Seluruh komponen tersebut diintegrasikan dalam satu sistem yang saling terhubung untuk memastikan proses akuisisi data, pengolahan sinyal, serta pengendalian aktuator dapat berjalan secara sinkron. Selain itu, perancangan *hardware* ini juga mempertimbangkan kemudahan instalasi, keandalan sistem, dan aspek keselamatan kerja selama alat beroperasi. Dengan adanya desain elektrik yang terstruktur dan terdokumentasi dengan baik, sistem diharapkan dapat beroperasi secara stabil, aman, serta mudah dalam proses pengoperasian dan pemeliharaan.



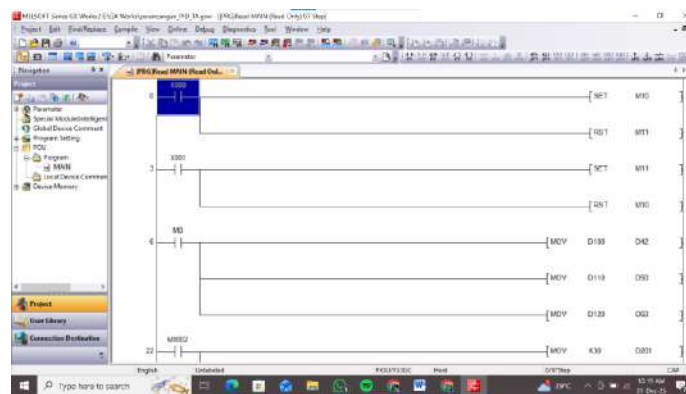
Gambar 3. 7 Perancangan *Hardware*

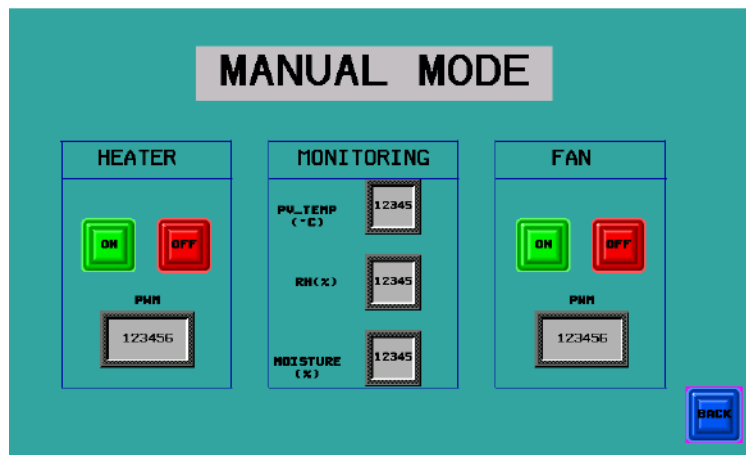
3.2.2 Perancangan Software

Terdapat dua perancangan *software* dalam pembuatan Tugas Akhir ini, perancangan *software* ini berupa perancangan program PLC dan program *Easy Builder 500* untuk tampilan HMI yang akan memudahkan dalam pengoperasian.

1. Perancangan PLC

Perancangan dan pemrograman ini bertujuan untuk menghubungkan antara *hardware* dengan *controller* (PLC). Sehingga terjadi komunikasi antara PLC dengan *hardware*. Sehingga alat dapat dikendalikan secara manual maupun otomatis menggunakan PLC yang di dalamnya sudah terprogram pengontrolan aktuator dan juga pembacaan sensor.





Gambar 3. 10 Tampilan Operasi Manual

3. Perancangan Fuzzy Logic Controller untuk Kendali Suhu dan Kelembaban

Pada penelitian ini sistem kendali menggunakan metode *Fuzzy Logic Controller* (FLC) dengan dua variabel masukan, yaitu *error* suhu dan *error* kelembaban relatif (*Relative Humidity*/RH). Kedua variabel tersebut digunakan untuk menentukan besar sinyal PWM yang diberikan kepada heater dan kipas secara langsung tanpa menggunakan pengendali PID.

Nilai *error* diperoleh dari selisih antara nilai *setpoint* dengan nilai aktual yang dibaca oleh sensor. *Error* suhu menunjukkan seberapa jauh suhu ruang pengering terhadap suhu yang diinginkan, sedangkan *error* kelembaban menunjukkan selisih antara kelembaban aktual dengan kelembaban target. Kedua nilai tersebut menjadi masukan utama pada proses logika fuzzy.

Perhitungan *error* dinyatakan dengan Persamaan (2.2) yang dijelaskan pada subbab 2.2.1.

$$e(k) = SP - PV$$

Nilai *error* menunjukkan seberapa jauh kondisi sistem terhadap setpoint. Setelah diperoleh nilai *error* suhu dan *error* kelembaban, kedua nilai tersebut diubah menjadi variabel linguistik melalui proses fuzzifikasi.

Masing-masing variabel masukan dibagi menjadi lima himpunan linguistik yaitu:

- *Negative Big* (NB)
- *Negative Small* (NS)

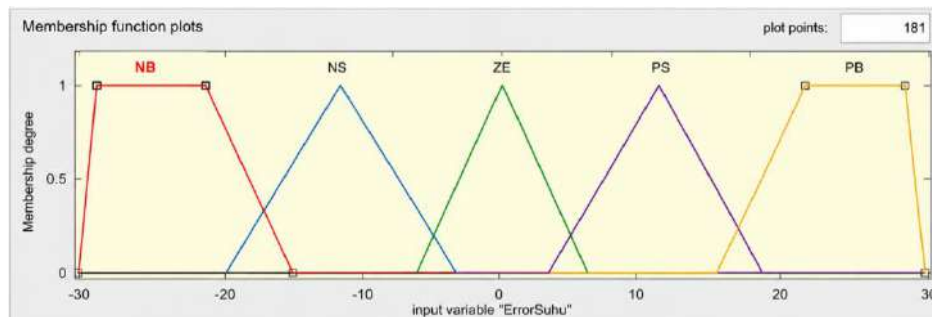
- Zero (ZE)
- Positive Small (PS)
- Positive Big (PB)

Penggunaan lima himpunan linguistik dipilih agar perubahan kondisi sistem dapat direpresentasikan lebih halus sehingga keputusan pengendalian menjadi lebih adaptif terhadap perubahan kondisi ruang pengering.

Pada penelitian ini digunakan dua jenis fungsi keanggotaan, yaitu fungsi segitiga (trimf) dan fungsi trapesium (trapmf). Bentuk matematis kedua fungsi keanggotaan tersebut telah dijelaskan pada Persamaan (2.3) dan Persamaan (2.4) pada sub bab 2.2.1. Pada tahap perancangan, fungsi-fungsi tersebut digunakan untuk membentuk himpunan *fuzzy* pada variabel masukan *error* suhu dan *error* kelembaban relatif (RH).

Fungsi keanggotaan yang digunakan pada penelitian ini terdiri atas:

1. Membership Function Error Suhu

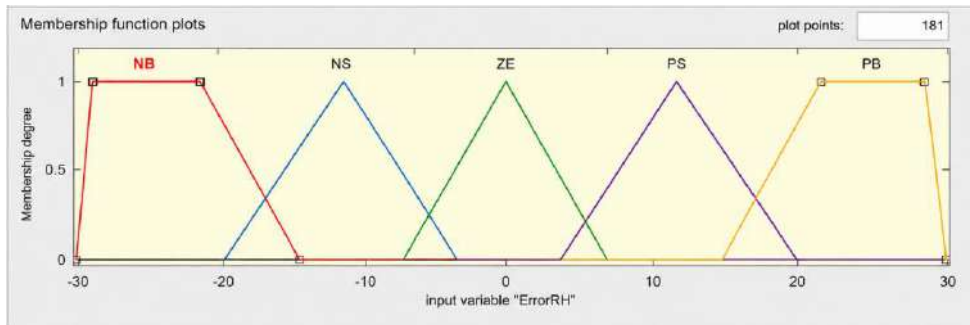


Gambar 3. 11 Membership Function Error Suhu

Tabel 3. 2 Parameter Membership Function Error Suhu

Membership	Range
NB	Trapmf(-30,-30,-15,-8)
NS	Trimf(-15,-8,0)
ZE	Trimf(-5,0,5)
PS	Trimf(0,8,15)
PB	Trapmf(8,15,30,30)

2. Membership Function Error RH



Gambar 3. 12 Membership Function Error RH

Tabel 3. 3 Parameter Membership Function Error RH

Membership	Range
NB	Trapmf(-30,-30,-20,-10)
NS	Trimf(-20,-10,0)
ZE	Trimf(-8,0,8)
PS	Trimf(0,10,20)
PB	Trapmf(10,20,30,30)

Setelah proses fuzzifikasi selesai dilakukan, derajat keanggotaan setiap variabel digunakan sebagai masukan pada basis aturan (*Rule Base*). Karena setiap sistem *fuzzy* memiliki dua variabel masukan dengan lima himpunan linguistik, maka jumlah aturan yang terbentuk adalah 25 aturan *fuzzy*.

Pada penelitian ini, konsekuen setiap aturan berupa nilai konstan PWM *heater* dan PWM kipas yang ditentukan berdasarkan kondisi suhu dan kelembaban ruang pengering. Nilai PWM tersebut diperoleh melalui proses perancangan dan penyetelan (*tuning*) sehingga mampu menghasilkan karakteristik pengendalian yang sesuai dengan kebutuhan proses pengeringan cabai.

Rule base PWM *heater* dan PWM kipas ditunjukkan pada Tabel 3.4 dan Tabel 3.5. Penerapan rule base tersebut bertujuan untuk menentukan respons keluaran sistem berdasarkan kondisi suhu dan kelembaban yang terdeteksi selama proses pengeringan berlangsung. Dengan demikian, perubahan nilai PWM pada *heater* dan kipas dapat disesuaikan dengan kondisi ruang pengering untuk mendukung proses pengeringan yang lebih stabil.

Tabel 3. 4 Rule Base PWM Heater

Error Suhu / Error RH	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	550	550	520	500	480
NS	450	420	400	350	320
ZE	250	220	180	150	120
PS	80	50	30	20	10
PB	0	0	0	0	0

Tabel 3. 5 Rule Base PWM Kipas

Error Suhu / Error RH	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	220	200	180	160	140
NS	180	160	140	120	100
ZE	140	120	100	80	60
PS	100	80	60	40	30
PB	60	50	40	30	20

Tahap inferensi digunakan untuk menentukan keluaran setiap aturan berdasarkan kombinasi nilai *error* suhu dan *error* kelembaban.

Pada penelitian ini digunakan metode inferensi Sugeno orde nol (*Zero Order Sugeno*). Operasi logika AND menggunakan operator PROD (perkalian) sehingga *firing strength* setiap aturan dihitung sebagai hasil kali derajat keanggotaan kedua variabel masukan.

Persamaan *firing strength* dinyatakan sebagai,

$$\alpha_i = \mu_{eT} \times \mu_{RH} \quad (3.5)$$

dengan

α_i : firing strength aturan ke-i

μ_{eT} : derajat keanggotaan *error* suhu

μ_{RH} : derajat keanggotaan *error* kelembaban

Nilai *firing strength* yang diperoleh selanjutnya digunakan sebagai bobot pada proses defuzzifikasi.

Karena menggunakan metode Sugeno orde nol, setiap konsekuen aturan berupa nilai konstan yang merepresentasikan tingkat PWM *heater* maupun PWM *fan*. Nilai *crisp* dihitung menggunakan metode *Weighted Average* (*wtaver*).

Persamaan defuzzifikasi dituliskan sebagai

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i z_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} \quad (3.6)$$

dengan

K : nilai keluaran PWM

α_i : *firing strength*

z_i : nilai konstan pada konsekuen aturan

n : jumlah aturan yang aktif

Hasil proses defuzzifikasi menghasilkan dua keluaran berupa PWM *Heater* dan PWM *Fan* dengan rentang nilai 0–1000.

Nilai PWM *Heater* dan PWM *Fan* yang diperoleh dari proses defuzzifikasi kemudian dikirimkan oleh ESP32 menuju PLC Mitsubishi FX3U melalui komunikasi Modbus RTU. PLC menerima kedua nilai tersebut sebagai referensi PWM untuk mengendalikan *heater* dan kipas selama proses pengeringan berlangsung. Hal ini membuat algoritma kendali menjadi lebih sederhana, namun tetap mampu menyesuaikan keluaran aktuator secara adaptif terhadap perubahan kondisi sistem.

4. Perancangan *Ladder Diagram* PWM pada *GX Works2*

Perancangan *Ladder Diagram* PWM pada PLC Mitsubishi FX3U dengan menggunakan *software* GX WORKS 2, dilakukan untuk mengimplementasikan PWM *heater* dan kipas yang nilainya telah diterima dari ESP32 dan telah diterima oleh PLC pada memori address yang sesuai yang dapat dilihat pada Gambar 3.11 dan Tabel 3.3 dibawah ini.



Gambar 3. 13 *Function Block PWM GX Works2*

Tabel 3. 6 Memory Address Function Block PWM

<i>Memory Address</i>	<i>Keterangan</i>
M0	<i>Enable keluaran PWM</i>
M8000	<i>Always ON PLC</i>
D100	<i>Present Value (PV) Suhu (x10)</i>
D102	<i>Value PWM Heater hasil Fuzzy Logic (0–1000)</i>
D103	<i>Value PWM Kipas hasil Fuzzy Logic (0–1000)</i>
D104	<i>Value ADC Moisture Sensor</i>
D105	<i>Value Moisture Content (%)</i>

3.4 Metode Pengendalian Sistem

Pada metode penelitian ini digunakan metode *Fuzzy Logic Controller* (FLC) untuk mengendalikan suhu dan kelembaban relatif (*Relative Humidity/RH*) pada ruang pengering cabai secara otomatis. Sistem *fuzzy* menggunakan dua variabel masukan, yaitu *error* suhu dan *error* kelembaban (RH), yang diperoleh dari selisih antara nilai *setpoint* dengan nilai aktual hasil pembacaan sensor. Kedua nilai *error* tersebut diproses melalui tahapan fuzzifikasi, evaluasi basis aturan (*rule base*), dan defuzzifikasi untuk menghasilkan keluaran berupa nilai *Pulse Width Modulation* (PWM) heater dan PWM kipas. Nilai PWM yang

dihasilkan kemudian dikirimkan ke PLC Mitsubishi FX3U melalui komunikasi Modbus RTU untuk mengendalikan aktuator selama proses pengeringan berlangsung. Adapun sensor yang digunakan pada penelitian ini dijelaskan sebagai berikut.

1. Sensor SHT20

Pada penelitian ini digunakan sensor SHT20 sebagai sensor utama (*feedback*) karena mampu mengukur suhu dan kelembaban relatif (*Relative Humidity/RH*) secara bersamaan. Sensor ditempatkan di dalam ruang pengering untuk memantau kondisi udara selama proses pengeringan berlangsung. Nilai suhu yang diperoleh digunakan untuk menghitung *error* suhu, sedangkan nilai kelembaban relatif digunakan untuk menghitung *error* kelembaban terhadap nilai referensi yang telah ditentukan. Kedua nilai *error* tersebut kemudian menjadi masukan bagi *Fuzzy Logic Controller* untuk menentukan besar nilai PWM *heater* dan PWM kipas sesuai kondisi ruang pengering.

Penggunaan sensor SHT20 dipilih karena memiliki komunikasi digital RS485 yang stabil, mampu mengukur dua parameter sekaligus, serta memiliki akurasi yang memadai untuk memantau perubahan kondisi udara selama proses pengeringan. Dengan memanfaatkan informasi suhu dan kelembaban relatif secara bersamaan, sistem mampu menghasilkan aksi kendali yang lebih adaptif terhadap perubahan kondisi di dalam ruang pengering.

2. Sensor *Thermocouple* RTD PT100

Selain sensor SHT20, penelitian ini menggunakan sensor RTD PT100 sebagai sensor pembanding dan validasi suhu. Sensor PT100 digunakan untuk memastikan bahwa hasil pembacaan suhu dari sensor SHT20 sesuai dengan kondisi aktual di dalam ruang pengering, khususnya pada area yang berada di sekitar elemen pemanas. Sensor RTD PT100 dipilih karena memiliki tingkat akurasi, linearitas, dan stabilitas yang tinggi sehingga banyak digunakan pada sistem pengukuran suhu di bidang industri. Pada penelitian ini, data suhu dari sensor PT100 tidak digunakan sebagai variabel masukan sistem kendali, melainkan sebagai parameter validasi pembacaan suhu serta monitoring kondisi ruang pengering selama proses pengujian.

3. Sensor *Moisture* Kapasitif

Untuk mengevaluasi keberhasilan proses pengeringan, penelitian ini menggunakan sensor moisture kapasitif sebagai alat ukur kadar air cabai sebelum dan sesudah proses pengeringan. Sensor bekerja berdasarkan perubahan kapasitansi yang dipengaruhi oleh kandungan air pada objek yang diukur. Semakin tinggi kadar air cabai, semakin besar nilai kapasitansi yang terbaca oleh sensor.

Data kadar air yang diperoleh tidak digunakan sebagai variabel masukan pada sistem *Fuzzy Logic Controller*, melainkan sebagai parameter evaluasi hasil pengeringan. Sensor moisture digunakan untuk membandingkan kadar air cabai sebelum dan sesudah proses pengeringan guna mengetahui efektivitas sistem pengering. Perlu diperhatikan bahwa sensor memiliki keterbatasan pengukuran pada cabai yang telah mengering sehingga pembacaan dapat mencapai 0% ketika kandungan air sudah sangat rendah dan bagian cabai tidak lagi memungkinkan dilakukan pengukuran secara optimal. Oleh karena itu, hasil pembacaan sensor digunakan sebagai indikator tingkat kekeringan dan dikombinasikan dengan pengamatan visual terhadap kondisi cabai.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

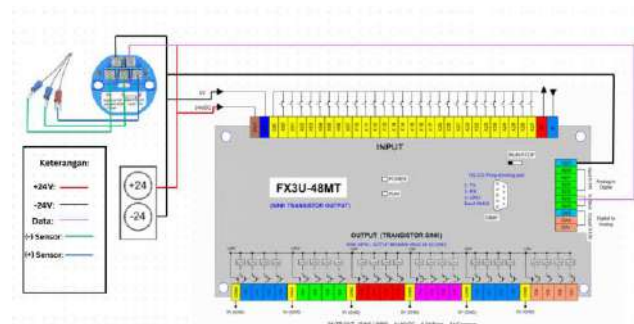
Pada bab ini membahas hasil dan analisis pengujian tugas akhir, mencakup pengujian *hardware*, *software*, dan metode sistem untuk memastikan seluruh sistem berjalan dengan baik sesuai dengan konsep.

4.1 Hasil Perencanaan *Hardware*

Perancangan *hardware* dilakukan dengan menentukan komponen utama berupa sensor yang digunakan sebagai input untuk membaca kondisi sistem, seperti suhu, kelembaban, dan kadar air. Selain itu, perancangan juga mencakup pemilihan dan penempatan aktuator sebagai output, seperti elemen pemanas (*heater*), kipas DC, serta *buzzer* sebagai indikator peringatan. Dengan pemilihan dan integrasi komponen yang tepat, sistem diharapkan dapat bekerja sesuai dengan kondisi dan tujuan yang telah ditetapkan.

4.1.1 Hasil Perancangan PLC dengan *Transmitter* RTD PT100

Transmitter RTD PT100 digunakan dalam sistem sebagai *input* untuk mengukur suhu dengan tingkat ketelitian yang tinggi. Sensor ini mengubah perubahan resistansi pada elemen PT100 menjadi sinyal analog yang dapat dibaca oleh PLC. Data yang diperoleh kemudian digunakan sebagai acuan dalam proses pengendalian sistem. Hasil perancangan menunjukkan bahwa transmitter mampu memberikan pembacaan suhu yang stabil dan sesuai dengan kondisi aktual, sehingga mendukung kinerja sistem dalam menjaga parameter yang telah ditentukan. *Wiring* gambar dapat dilihat di gambar 4.1 dibawah ini.



Gambar 4. 1 *Wiring* PLC dengan *Transmitter* RTD PT100
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

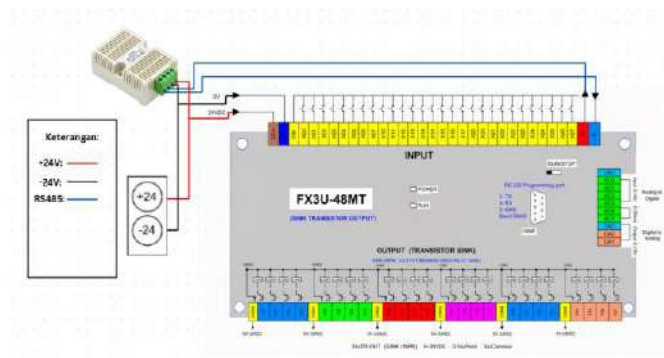
Tabel 4. 1 Konektivitas PLC ke Transmitter RTD PT100

Transmitter RTD PT100	PLC
(+) Sensor	Analog Input (AD4) (+)
(-) Sensor	Analog Input (-)

Berdasarkan Tabel 4.1, dapat disimpulkan bahwa koneksi antara *transmitter* RTD PT100 dan PLC dilakukan melalui sinyal analog serta suplai daya DC. Terminal *Power +* dan *Power -* pada *transmitter* dihubungkan ke sumber tegangan DC 24V dan ground (0V) sebagai catu daya agar perangkat dapat beroperasi dengan baik. Sementara itu, terminal Output + dan Output - dihubungkan ke input analog pada PLC untuk mengirimkan sinyal hasil pengukuran suhu. Sinyal ini merupakan hasil konversi dari perubahan resistansi sensor PT100 menjadi sinyal analog yang dapat dibaca oleh PLC. Dengan konfigurasi ini, pembacaan suhu dapat dilakukan secara stabil dan mendukung proses pengendalian sesuai dengan parameter yang telah ditentukan.

4.1.2 Hasil Perancangan PLC dengan SHT20

Sensor SHT20 memiliki peran penting dalam sistem sebagai input untuk mengukur suhu dan kelembaban udara. Data yang diperoleh dari sensor ini digunakan sebagai acuan dalam proses pengendalian yang dilakukan oleh PLC. Hasil perancangan menunjukkan bahwa sensor mampu memberikan pembacaan yang cukup stabil dan sesuai dengan kondisi lingkungan. Dengan karakteristik tersebut, sensor SHT20 dapat mendukung kinerja sistem dalam menjaga kondisi sesuai dengan parameter yang telah ditentukan.



Gambar 4. 2 Wiring PLC dengan SHT20
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

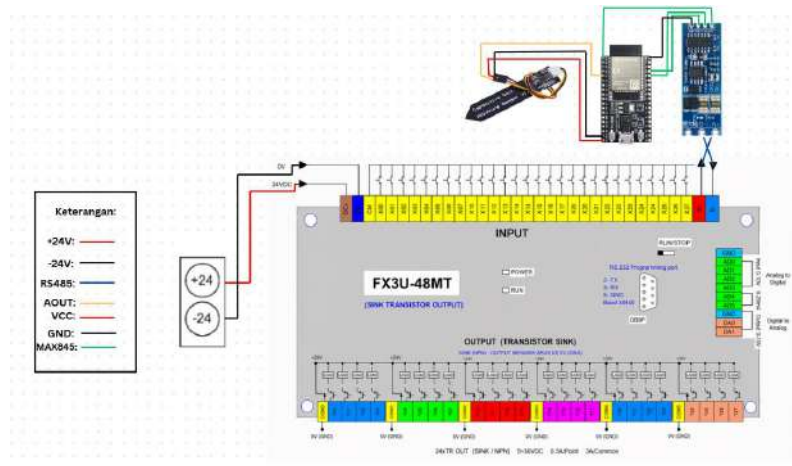
Tabel 4. 2 Konektivitas SHT20 ke PLC

Sensor SHT20	PLC
A+	RS485 A+
B-	RS485 B-
V+	DC +24
V-	DC -24

Berdasarkan Tabel 4.2, dapat disimpulkan bahwa koneksi antara sensor SHT20 dan PLC dilakukan melalui komunikasi protokol RS485 serta suplai daya DC. Pin A+ dan B– pada sensor SHT20 masing-masing dihubungkan ke terminal RS485 A+ dan RS485 B– pada PLC, yang menunjukkan bahwa komunikasi data dilakukan secara diferensial melalui RS485, memungkinkan pertukaran data yang stabil dan tahan gangguan dalam jarak yang relatif jauh. Selain itu, pin V+ dan V– pada sensor dihubungkan ke sumber daya DC 24V dan *ground* (DC -24), yang merupakan standar tegangan kerja umum pada sistem kontrol industri. Konfigurasi ini memastikan sensor mendapatkan suplai daya yang cukup serta dapat mengirimkan data suhu dan kelembaban secara real-time ke PLC untuk keperluan monitoring dan pengendalian proses secara otomatis.

4.1.3 Hasil Perancangan PLC dengan *Moisture* Kapasitif

Sensor *moisture* kapasitif digunakan dalam sistem sebagai input untuk mengukur kadar air pada objek, dalam hal ini cabai sebelum dan setelah proses pengeringan. Sensor ini bekerja dengan mendeteksi perubahan kapasitansi yang dipengaruhi oleh kandungan air, sehingga dapat memberikan indikasi tingkat kelembaban bahan. Data yang diperoleh dari sensor ini digunakan sebagai acuan untuk mengetahui efektivitas proses pengeringan. Dengan karakteristik tersebut, sensor *moisture* kapasitif dapat membantu sistem dalam mengevaluasi kondisi kadar air sesuai dengan parameter yang diinginkan.



Gambar 4. 3 Wiring Moisture Kapasitif
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Tabel 4. 3 Konektivitas Moisture Kapasitif ke PLC

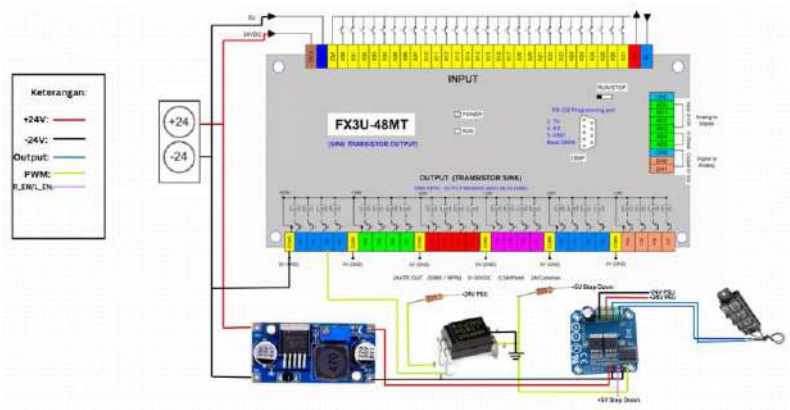
Sensor Moisture & MAX485	PLC
A+	RS485 A+
B-	RS485 B-
VCC	DC +5V
GND	DC GND
AO Sensor	GPIO34 ESP32

Berdasarkan gambar *wiring* di atas, sensor moisture kapasitif dihubungkan dengan mikrokontroler untuk proses pembacaan data. Selanjutnya, data dari sensor dikonversi menggunakan modul MAX485 RS485 to TTL Converter agar dapat dikomunikasikan dengan PLC melalui protokol RS485. Konfigurasi ini memungkinkan data kadar air dapat dikirim dan dibaca oleh PLC dengan lebih stabil, terutama untuk kebutuhan integrasi dalam sistem kontrol. Dengan demikian, sensor dapat berfungsi dengan baik sebagai alat bantu dalam pengukuran kadar air sebelum dan setelah proses pengeringan.

4.1.4 Hasil Perancangan PLC dengan *Heater*

Heater memiliki peran penting dalam sistem sebagai aktuator yang berfungsi untuk meningkatkan suhu sesuai dengan kebutuhan proses. Pengendalian heater dilakukan berdasarkan hasil pengolahan data oleh PLC, sehingga output yang diberikan dapat menyesuaikan kondisi yang diinginkan. Dalam perancangannya, heater dikendalikan melalui rangkaian driver yang terdiri dari modul *step-down*, *optocoupler*, serta komponen pendukung lainnya untuk

memastikan proses *switching* berjalan dengan aman dan stabil. Dengan konfigurasi tersebut, *heater* dapat bekerja secara optimal dalam menjaga suhu sesuai dengan parameter yang telah ditentukan.



Gambar 4. 4 Wiring PLC dengan Heater
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Tabel 4. 4 Konektivitas Heater ke PLC

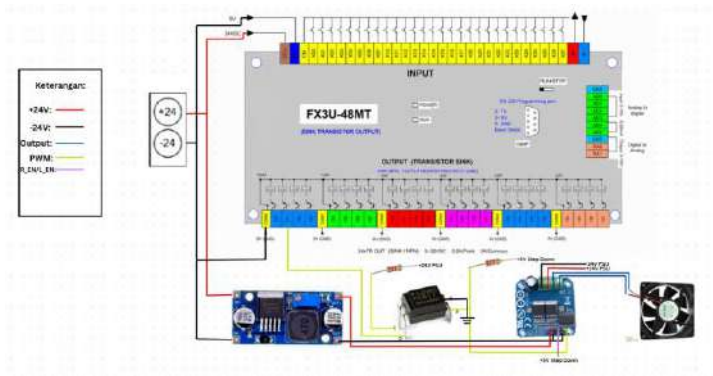
Heater PTC 24V	PLC
Input PC817	Output PWM PLC (Pin 2)
VCC BTS7960	+5V Step Down
GND BTS7960	GND Step Down
RPWM BS7960	Output PC817 (Pin 3)
+24V BTS7960	+24V PSU
GND BTS7960 Power	-24V PSU
Output BTS7960	Heater PTC Air 24V

Berdasarkan Gambar 4.4 wiring di atas, dapat dilihat bahwa *heater* dikendalikan melalui rangkaian driver yang terhubung dengan output PLC menggunakan modul BTS7960 sebagai pengendali daya. Sebelum sinyal masuk ke *optocoupler*, ditambahkan resistor sebesar 2,2 kΩ yang berfungsi untuk membatasi arus agar tidak merusak komponen. Selanjutnya, *optocoupler* digunakan sebagai isolator antara rangkaian kontrol dan rangkaian daya sehingga meningkatkan keamanan sistem. Modul BTS7960 dimanfaatkan untuk mengatur daya keluaran ke *heater* menggunakan metode PWM (*Pulse Width Modulation*), sehingga besar panas yang dihasilkan dapat dikontrol sesuai kebutuhan sistem. Tegangan dari power supply terlebih dahulu diatur menggunakan modul *step-down* sebelum digunakan pada rangkaian driver. Dengan konfigurasi ini, *heater*

dapat dikendalikan secara aman, stabil, dan responsif sesuai dengan logika pengendalian yang telah diprogram pada PLC.

4.1.5 Hasil Perancangan PLC dengan Kipas DC

Kipas memiliki peran penting dalam sistem sebagai aktuator yang berfungsi untuk menurunkan suhu serta membantu sirkulasi udara sesuai dengan kebutuhan proses. Pengendalian kipas dilakukan berdasarkan hasil pengolahan data oleh PLC, sehingga output yang diberikan dapat menyesuaikan kondisi yang diinginkan. Dalam perancangannya, kipas dikendalikan melalui rangkaian driver yang terdiri dari modul *step-down*, *optocoupler*, serta komponen pendukung lainnya untuk memastikan proses switching berjalan dengan aman dan stabil. Dengan konfigurasi tersebut, kipas dapat bekerja secara optimal dalam menjaga kondisi lingkungan sesuai dengan parameter yang telah ditentukan.



Gambar 4. 5 Wiring PLC dengan Kipas
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Tabel 4. 5 Konektivitas Kipas ke PLC

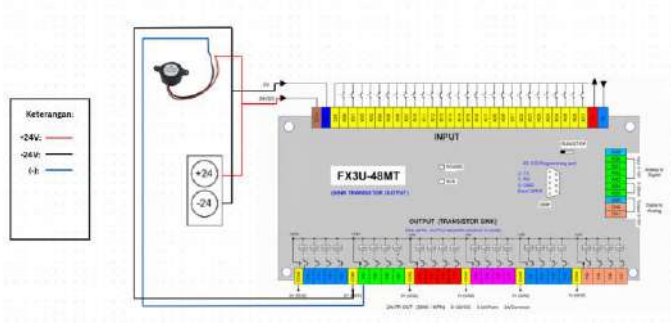
Kipas DC 24V	PLC
Input PC817	Output PWM PLC (Pin 2)
VCC BTS7960	+5V Step Down
GND BTS7960	GND Step Down
RPWM BS7960	Output PC817 (Pin 3)
+24V BTS7960	+24V PSU
GND BTS7960 Power	-24V PSU
Output BTS7960	Kipas DC 24V

Berdasarkan Gambar 4.5, dapat dilihat bahwa kipas dikendalikan melalui rangkaian driver yang terhubung dengan output PLC menggunakan modul

BTS7960 sebagai pengendali daya. Sebelum sinyal masuk ke optocoupler, ditambahkan resistor sebesar 2,2 kΩ yang berfungsi untuk membatasi arus agar tidak merusak komponen. Selanjutnya, *optocoupler* digunakan sebagai isolator antara rangkaian kontrol dan rangkaian daya sehingga meningkatkan keamanan sistem. Modul BTS7960 dimanfaatkan untuk mengatur kecepatan putaran kipas menggunakan metode PWM (*Pulse Width Modulation*), sehingga kecepatan kipas dapat disesuaikan dengan kebutuhan sistem. Tegangan dari power supply terlebih dahulu diatur menggunakan modul *step-down* sebelum digunakan pada rangkaian driver. Dengan konfigurasi ini, kipas dapat dikendalikan secara aman, stabil, dan responsif sesuai dengan logika pengendalian yang telah diprogram pada PLC.

4.1.6 Hasil Perancangan PLC dengan *Buzzer*

Buzzer digunakan dalam sistem sebagai *output* yang berfungsi sebagai indikator peringatan terhadap kondisi tertentu. Dalam hal ini, *buzzer* akan aktif ketika proses telah selesai serta ketika terjadi kondisi over suhu yang melebihi batas yang telah ditentukan. Perangkat ini diaktifkan berdasarkan hasil pengendalian oleh PLC sesuai dengan parameter yang telah ditetapkan. Hasil perancangan menunjukkan bahwa *buzzer* dapat bekerja dengan baik sebagai media notifikasi suara, sehingga memudahkan pengguna dalam mengetahui kondisi sistem secara cepat. Dengan demikian, *buzzer* mendukung sistem dalam memberikan respon terhadap perubahan kondisi yang terjadi.

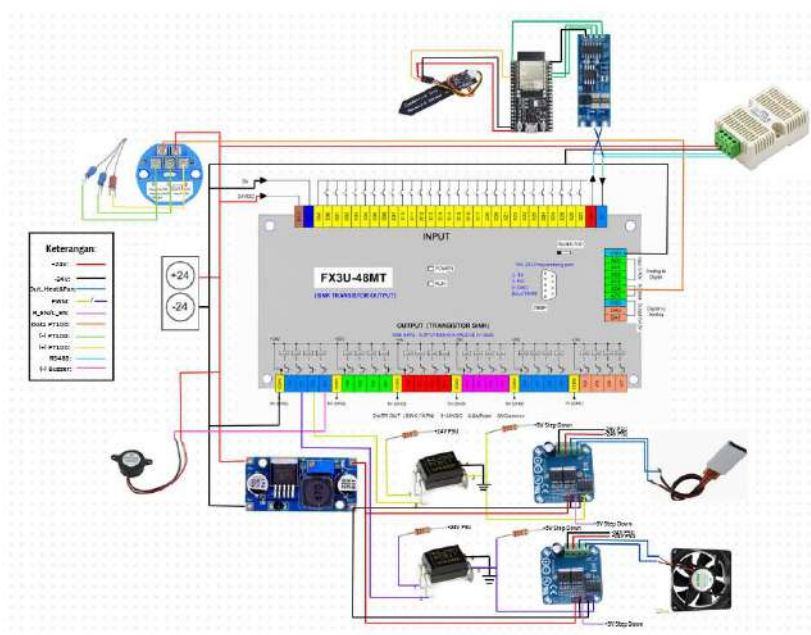


Gambar 4. 6 Wiring PLC dengan *Buzzer*
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Tabel 4. 6 Konektivitas *Buzzer* ke PLC

Buzzer	PLC
+	+24V
-	Y4

Berdasarkan Tabel 4.6, dapat disimpulkan bahwa koneksi antara *buzzer* dan PLC dilakukan melalui output digital serta suplai daya DC. Terminal positif (+) pada *buzzer* dihubungkan langsung ke sumber tegangan +24V, sedangkan terminal negatif (-) dihubungkan ke salah satu output PLC, yaitu Y4. Konfigurasi ini menunjukkan bahwa PLC bekerja dengan sistem *sink*, di mana buzzer akan aktif ketika output Y4 dalam kondisi ON sehingga arus mengalir dari +24V menuju output PLC. Dengan demikian, *buzzer* dapat berfungsi sebagai indikator suara yang memberikan notifikasi ketika kondisi tertentu pada sistem terpenuhi.



Gambar 4. 7 Wiring Keseluruhan dari Mesin Pengering Cabai Otomatis
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Tabel 4. 7 Konektivitas Keseluruhan Sistem ke PLC

No	PLC	Hardware	Address
1	AD0+, AD0-	Transmitter RTD PT100	D10
2	RS485 A+, B-	Sensor SHT20	D15 dan D20
		Sensor <i>Moisture</i> Kapasitif	D50
3	Y1, DC+	Kipas	Y1
4	Y2, DC+	Heater	Y2
5	Y3, DC+	Buzzer	Y3
6	DA0	Driver BTS7960 Heater (PWM)	D30
7	DA1	Driver BTS7960 Kipas (PWM)	D20
8	RX, TX	HMI	-
8	+24V , 0V	Power Supply Sistem	-

4.1.7 Hasil Perancangan Schneider HMIGXU3512

Schneider HMIGXU bertujuan untuk menampilkan proses pada plant ini. Mulai dari kendali *start* dan *stop* kemudian mengatur parameter variabel pada plant. HMI ini digunakan untuk validasi sensor beserta monitoring dan kontrol pada *plant*.

4.1.8 Perancangan Wiring Panel

Perancangan wiring panel adalah salah satu tahapan penting dalam pembuatan sistem kontrol otomatis. Panel Harus dirancang dengan baik untuk memastikan koneksi yang tepat dan efisien antara komponen elektronik dan sistem pengontrolannya. sehingga nantinya sistem dapat berjalan dengan lancar dengan penataan kabel dan komponen yang tertata didalam panel memberikan safety dalam sistem alat. Panel yang digunakan memiliki dimensi 30 x 40 x 18 cm seperti gambar dibawah ini.



Gambar 4. 8 Wiring pada Panel
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Berdasarkan gambar 4.8 agar komponen *hardware* yang digunakan dalam tugas akhir terlihat rapi serta mudah untuk dilakukan wiring maka diperlukan sebuah panel. Adapun panel yang digunakan memiliki ukuran lebar 30 cm, tinggi 40 cm dan panjang 18 cm. Komponen yang dipasang pada panel diantaranya MCB 1 pole dengan arus 4A, *power supply* 24V terminal blok, PLC Mitsubishi FX3U 48MT, HMI, PCB untuk PWM, *Push Botton* dan juga pengkabelan.

Proses penempatan komponen dimulai dengan meletakkan beberapa komponen pada *base plat* panel dahulu. Lalu, tanda diberikan pada tiap lubang ulir pada setiap komponen sebagai panduan penempatan. Tanda ini membantu memastikan bahwa komponen akan dipasang pada posisi yang tepat. Selanjutnya, dilakukan pengeboran pada *base plat* sesuai dengan tanda titik yang telah diberikan sebelumnya. Proses pengeboran ini memungkinkan beberapa lubang yang diperlukan untuk pemasangan komponen yang telah ditandai.

Setelah penempatan dan pengeboran selesai, tahap selanjutnya adalah pengkabelan untuk setiap komponen yang terpasang. Pengkabelan ini melibatkan penyambungan kabel antara komponen satu dengan yang lainnya, serta ke sumber daya listrik atau sinyal yang diperlukan. Pengkabelan yang teratur dan rapi sangat penting untuk memastikan koneksi yang andal antara komponen-komponen tersebut.

Setelah semua komponen terpasang dan dikabelkan dengan benar, dilakukan pengetesan. Proses ini melibatkan pemeriksaan dan verifikasi kinerja masing-masing komponen. Pengetesan bertujuan untuk memastikan bahwa komponen berfungsi dengan baik dan bekerja sesuai yang diharapkan dalam sistem yang dirancang. Dengan demikian, proses penempatan komponen melibatkan langkah-langkah seperti meletakkan, memberikan tanda, pengeboran, pengkabelan, dan pengetesan. Proses ini penting untuk memastikan bahwa komponen-komponen terpasang dengan benar dan berfungsi optimal dalam sistem yang dibangun.

4.2 Hasil Perancangan Mekanik

Pada perancangan mekanik pengering cabai otomatis ini memiliki beberapa komponen dengan berbagai ukuran yang ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4. 8 Dimensi Mesin Pengering Cabai

Keterangan	
Dimensi Oven	35 x 25 x 28 cm
Dimensi Kipas	9 cm
Dimensi Panel	30 x 18 x 40 cm
Tinggi Kerangka	30 cm

Berdasarkan Tabel 4.8 dapat diketahui ukuran dimensi mekanik dari Mesin

Pengering Cabai. Untuk detailnya bisa dilihat pada Gambar 4.9 hasil perancangan mekanik dibawah ini.



Gambar 4. 9 Hasil Perancangan Mekanik

Gambar 4.9 merupakan gambar hasil perancangan mesin dan gambar perancangan desain mesin. Berdasarkan gambar tersebut, bahan utama yang digunakan dalam penyusunan mekanik dari tugas akhir ini terdiri dari besi siku lubang dan plat aluminium. Besi siku lubang digunakan untuk membentuk kerangka kaki dari mesin pengering cabai, sementara plat aluminium digunakan untuk membuat base plat dari oven pengering cabai. Di oven terdapat sensor suhu PT100, SHT20, *heater* dan juga kipas. Sensor suhu PT100 terletak di samping kiri bersampingan dengan SHT20 untuk memantau suhu dan kelembaban ruang pengeringan untuk mendeteksi suhu pada *heater* atau pemanas. Selain itu, *heater* di letakkan di sisi belakang tengah untuk memastikan panas dapat tersebar secara merata dengan bantuan kipas yang diletakkan di belakangnya agar udara panas yang terdapat pada heater dapat dialirkan dan dihembuskan langsung oleh kipas.

Dengan menggunakan bahan utama seperti besi siku lubang dan plat aluminium, serta melibatkan komponen seperti sensor suhu PT100, sensor SHT20, *heater*, dan Kipas DC, mekanik dari tugas akhir ini dapat mengimplementasikan sistem yang dapat mengontrol dan memantau suhu pemanas, serta mengatur kerja *heater* dan kipas untuk proses pengeringan cabai dengan efektif.

4.3 Hasil Perancangan Software

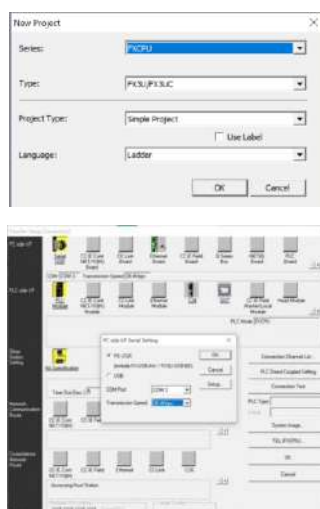
Pada perancangan software merupakan proses penting dalam pengembangan sistem otomasi. Dalam perancangan software, berbagai aspek seperti kebutuhan peneliti, fungsionalitas, antarmuka peneliti, dan arsitektur sistem diperhatikan secara menyeluruh. Dalam perancangan software, digunakan aplikasi *GX Works2* dan *Vijeo Designer*, dilakukan beberapa langkah penting terkait program dan desain antarmuka. Tahap pertama melibatkan perancangan program di *GX Works2* untuk memprogram dan konfigurasi PLC. Selain itu, perancangan juga meliputi pembuatan antarmuka peneliti melalui HMI dengan menggunakan Software *Vijeo Designer Basic 2.1* yang terintegrasi dengan PLC Mitsubishi FX3U. Dengan melakukan perancangan *software* menggunakan *GX Works* dan *Vijeo Designer*, peneliti dapat menciptakan sistem otomasi yang efisien, mudah dioperasikan, dan sesuai dengan kebutuhan peneliti.

4.3.1 Hasil Perancangan Program PLC Mitsubishi FX3U-48MT

Perancangan program pada PLC Mitsubishi FX3U 48MT menggunakan software dari Mitsubishi yaitu *GX Works2*. Perancangan program PLC Mitsubishi FX3U 48MT ini meliputi:

1. Konfigurasi PLC

Pada penelitian ini digunakan PLC Mitsubishi FX3U 48MT seperti pada gambar.

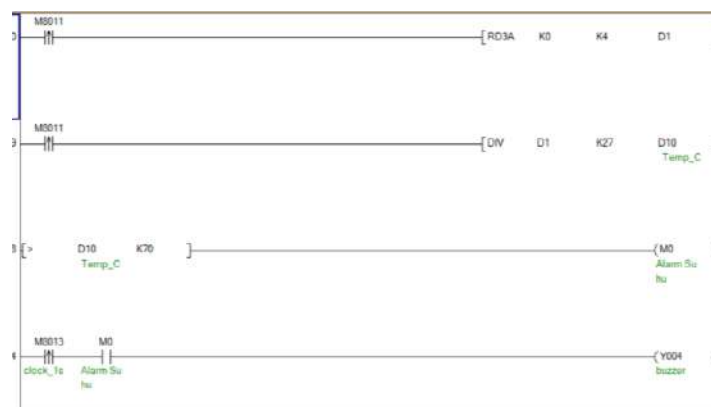


Gambar 4. 10 Konfigurasi PLC
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Dapat dilihat pada gambar PLC yang digunakan yaitu PLC dengan *device type* FX3U 48MT dengan 48 pin dan *output* transistor. *Network type* untuk konfigurasi yaitu USB dan RS232. PLC ini memiliki 24 digital *input*, 24 digital *output*, analog *input* 6 *channel* dan 2 *channel* analog *output* built-in menerima sinyal 0 to 10V.

2. Perancangan *Function Scaling* Analog *Input*, beserta Digital *Input* dan *Output*

Perancangan *funciton scaling* ini bertujuan untuk memudahkan dalam melakukan *scaling* data dari sensor PT100. Dengan adanya *function scaling* ini apabila ada sensor baru tidak perlu membuat program *scaling* lagi, namun hanya memberikan input-an *range* dan juga *address* yang digunakan.

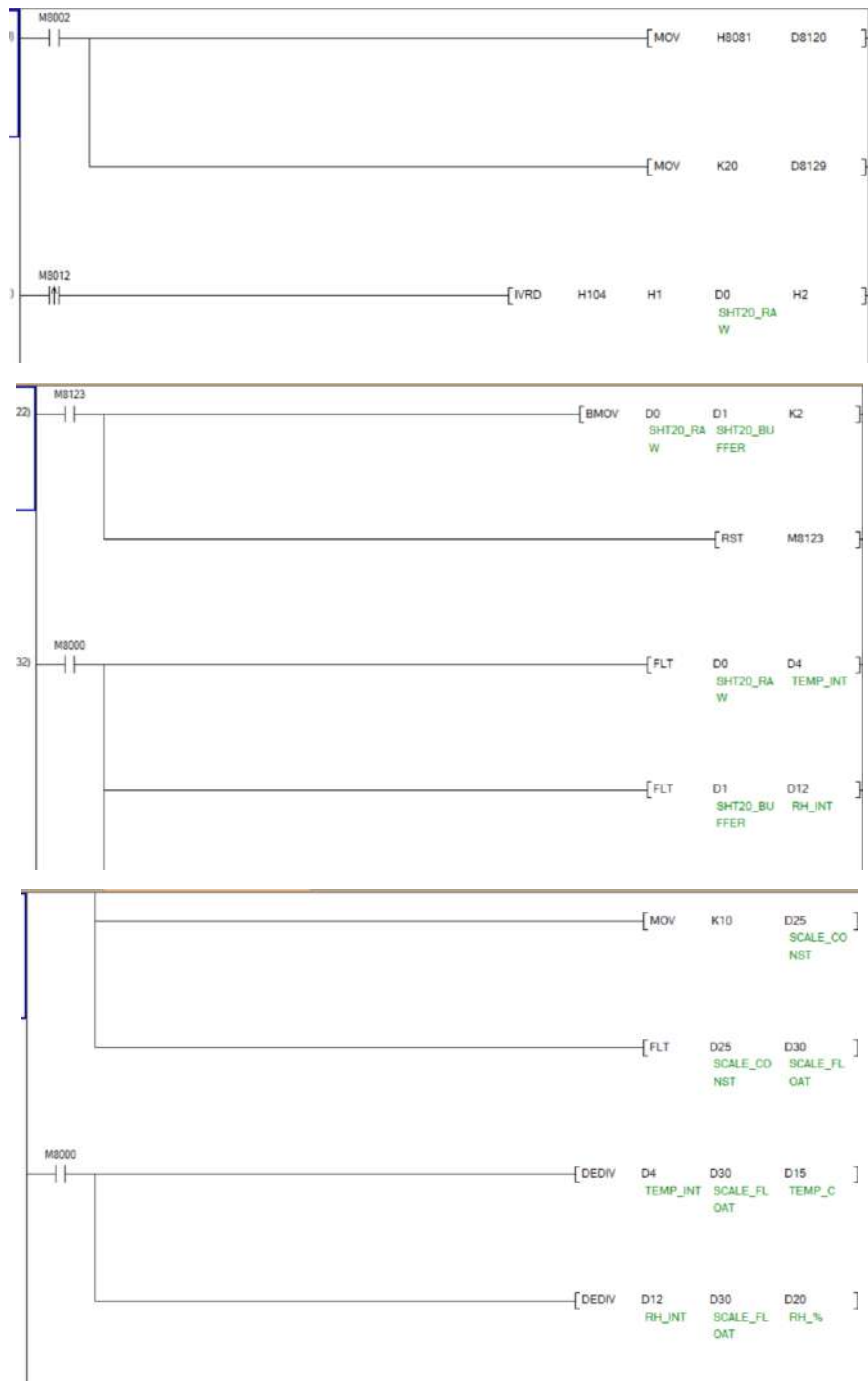


Gambar 4. 11 Program untuk *Scaling* RTD PT100 dan Buzzer
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Berdasarkan gambar program *ladder* pembacaan sensor RTD PT100 di atas, sistem digunakan untuk membaca nilai suhu melalui modul analog yang diproses oleh PLC. Data yang diperoleh dari sensor masih berupa nilai mentah (*raw data*), kemudian dilakukan proses *scaling* menggunakan instruksi pembagian agar dapat dikonversi menjadi nilai suhu dalam satuan derajat Celcius.

Selanjutnya, nilai suhu yang telah dikonversi akan dibandingkan dengan batas maksimum yang telah ditentukan, yaitu sebesar 70°C. Apabila suhu melebihi batas tersebut, maka sistem akan mengaktifkan alarm berupa *buzzer*. *Buzzer* bekerja secara berkedip dengan memanfaatkan *clock* internal PLC sebagai

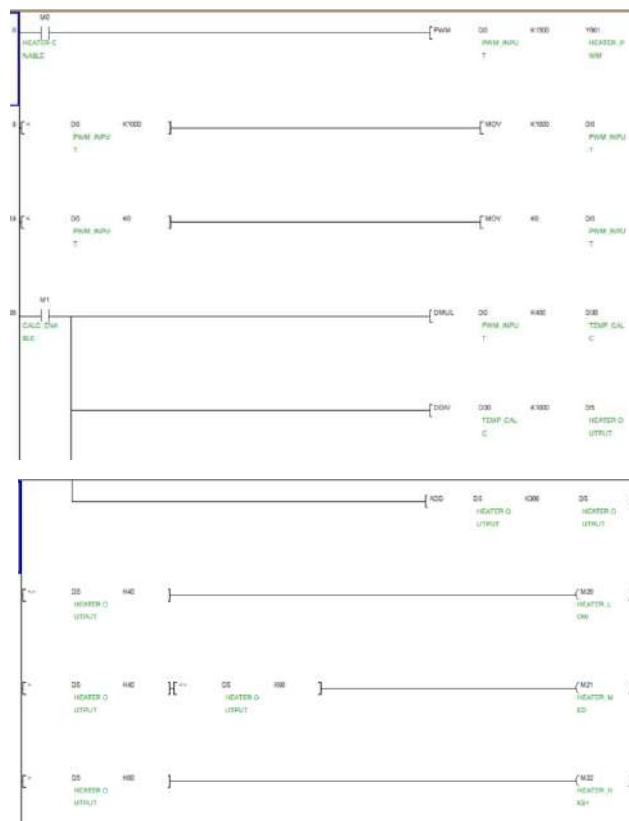
indikator bahwa suhu berada pada kondisi tidak normal atau melebihi batas yang diizinkan.



Gambar 4. 12 Program untuk *Scalling* SHT20
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

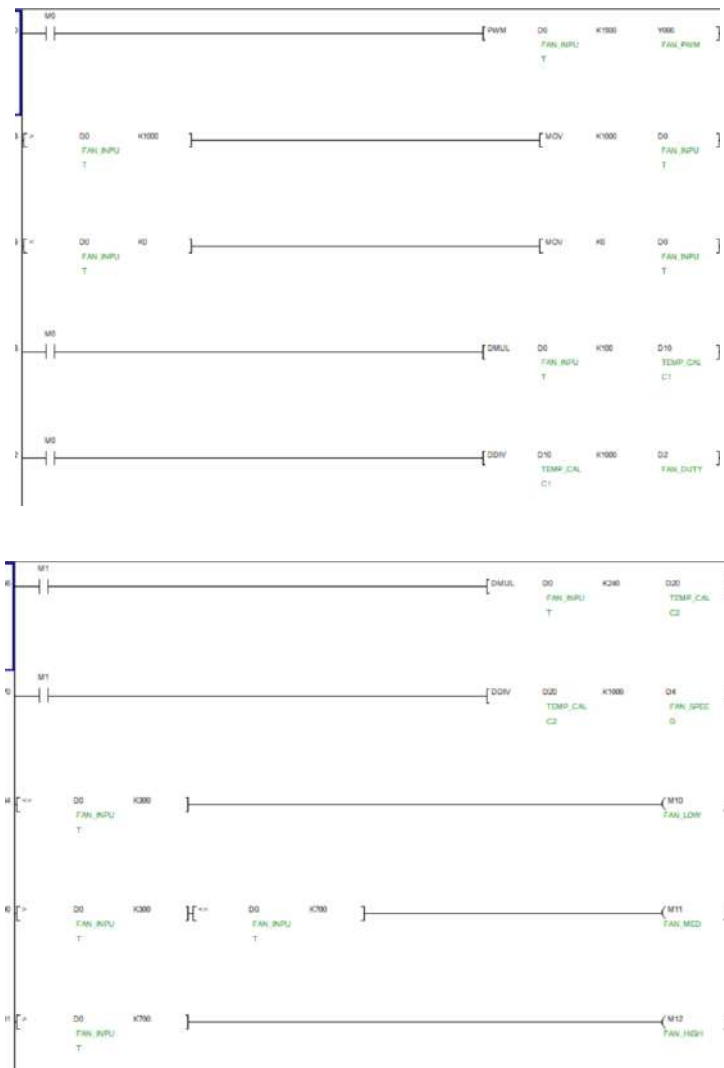
Berdasarkan gambar program ladder pembacaan sensor SHT20 di atas, sistem digunakan untuk membaca data suhu dan kelembaban melalui komunikasi serial menggunakan instruksi khusus pada PLC. Pada saat awal sistem dijalankan, dilakukan inisialisasi parameter komunikasi dengan mengisi nilai tertentu ke register *buffer* agar modul dapat bekerja sesuai dengan kebutuhan pembacaan sensor. Selanjutnya, data dari sensor SHT20 dibaca menggunakan instruksi komunikasi dan disimpan ke dalam register data. Data yang diperoleh kemudian dipindahkan dan dikonversi dari bentuk integer ke floating point agar dapat diolah lebih lanjut dengan tingkat presisi yang lebih tinggi.

Setelah proses konversi, dilakukan perhitungan scaling menggunakan operasi pembagian untuk mengubah nilai data menjadi satuan yang sesuai, yaitu suhu dalam derajat Celcius dan kelembaban dalam persen (%RH). Dengan demikian, nilai yang dihasilkan dapat digunakan untuk monitoring maupun pengendalian sistem secara lebih akurat.



Gambar 4. 13 Program untuk *Scaling Heater*
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Berdasarkan gambar program *ladder* pengendalian *heater* di atas, sistem digunakan untuk mengatur daya pemanas menggunakan metode PWM. Nilai input dimasukkan ke dalam register D0 dengan rentang 0 hingga 1000, kemudian dilakukan pembatasan agar tidak melebihi batas yang ditentukan. Selanjutnya, dilakukan proses *scaling* menggunakan operasi perkalian, pembagian, dan penjumlahan untuk menghasilkan nilai *duty cycle* yang sesuai. Nilai *duty cycle* tersebut digunakan untuk menentukan tingkat daya heater yang kemudian dikelompokkan menjadi kondisi rendah, sedang, dan tinggi. *Output* PWM dikirimkan melalui Y001 untuk mengatur besar daya *heater* sehingga proses pemanasan dapat berjalan sesuai kebutuhan sistem.

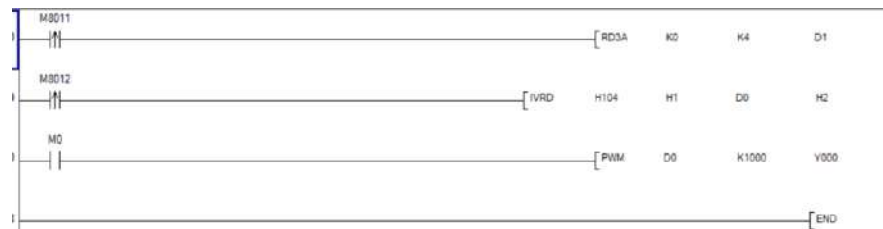


Gambar 4. 14 Program untuk *Scaling* Kipas
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Berdasarkan Gambar 4.14 program *ladder scalling* kipas, sistem digunakan untuk mengatur kecepatan kipas menggunakan metode PWM. Nilai input dimasukkan ke dalam register D0 dengan rentang 0 hingga 1000, kemudian dibatasi agar tidak melebihi nilai minimum dan maksimum. Selanjutnya dilakukan proses perhitungan menggunakan operasi perkalian dan pembagian untuk menghasilkan nilai *duty cycle* yang sesuai. Nilai tersebut digunakan untuk menentukan tingkat kecepatan kipas, yang diklasifikasikan menjadi kondisi rendah, sedang, dan tinggi berdasarkan range nilai tertentu. *Output* PWM kemudian dikirimkan melalui Y000 untuk mengatur kecepatan putaran kipas sesuai dengan input yang diberikan.

4.3.2 Perancangan *Aplication Instruction*

Application instruction dalam konteks PLC (*Programmable Logic Controller*) adalah kumpulan perintah atau fungsi yang digunakan untuk menjalankan tugas-tugas tertentu dalam program PLC. Instruksi ini memungkinkan PLC melakukan operasi khusus seperti perhitungan, pengendalian waktu, komunikasi data, dan fungsi logika lainnya yang dibutuhkan dalam sistem otomatisasi.



Gambar 4. 15 Instruksi Khusus
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Dapat dilihat pada Gambar 4.25, program tersebut digunakan untuk pembacaan sensor dengan instruksi khusus yang memiliki parameter dengan fungsi yang berbeda yakni.

- RD3A: Merupakan instruksi khusus untuk membaca data dari perangkat I/O.
- K0: Parameter ini menunjukkan alamat perangkat I/O yang akan dibaca. Dalam contoh ini, alamat yang digunakan adalah K0.
- K4: Parameter ini menunjukkan sub-alamat perangkat I/O yang akan

dibaca. Dalam contoh ini, sub-alamat yang digunakan adalah K4.

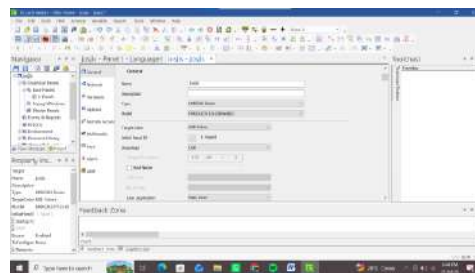
- d. D1: Parameter ini menunjukkan di mana data yang dibaca akan disimpan dalam memori PLC. Dalam contoh ini, data yang dibaca akan disimpan di D1.
- e. IVRD: IVRD digunakan untuk membaca data dari perangkat Modbus slave yang terhubung melalui modul komunikasi serial. Instruksi ini dipakai saat PLC berperan sebagai Modbus Master, misalnya untuk mengambil data dari sensor, inverter, atau alat ukur lainnya yang terhubung ke sistem.
- f. PWM: Merupakan instruksi khusus untuk menghasilkan sinyal PWM untuk kontrol *output*.

4.3.3 Pengujian Desain HMI

Pada pembuatan HMI, penulis menggunakan software Easy Builder 500 version 2.7.4. Perancangan software ini meliputi:

1. Konfigurasi HMI *Schneider GXU3512*

Pada Tugas Akhir ini, tampilan *interface* menggunakan HMI *Schneider GXU3512* dengan *software Vijeo Designer* version 2.1. Penggunaan *interface* ini bertujuan untuk memudahkan dalam melakukan monitoring saat proses berjalan dan juga memudahkan dalam mengontrol sistem secara keseluruhan, karena dalam satu layar tersebut sudah memuat seluruh sistem yang ada.



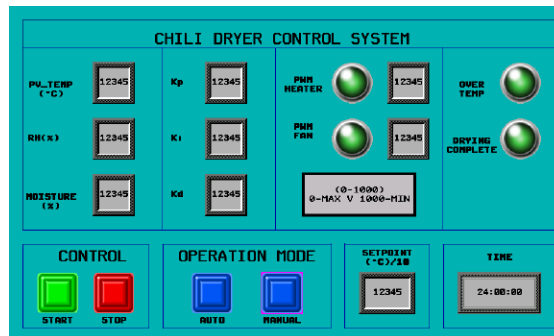
Gambar 4. 16 Konfigurasi HMI *Schneider GXU3512*

Pada Gambar 4.16 dapat dilihat konfigurasi pada HMI *Schneider GXU3512*. Pada opsi sistem parameter dilakukan pengaturan IP yang sesuai dengan IP address dari PLC yang digunakan. Nantinya, HMI akan terhubung dengan PLC Mitsubishi FX3U 48MT menggunakan RS232.

2. Desain *Overview*

Perancangan desain *overview* ini bertujuan untuk memudahkan dalam

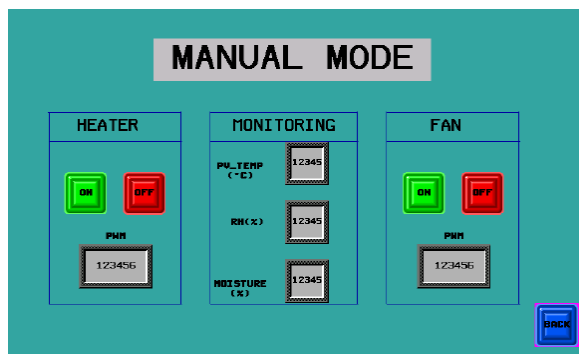
monitoring sistem karena pada tampilan ini mencakup seluruh sistem yang digunakan sehingga dapat memantau secara langsung proses yang sedang terjadi.



Gambar 4. 17 Desain Overview HMI
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

3. Desain Tampilan Mode Manual

Pada Mode Manual, peneliti memiliki kendali penuh terhadap operasi prototipe, peneliti dapat mengontrol perangkat secara manual sesuai dengan kebutuhan dan preferensi, tanpa adanya pengaturan otomatis atau intervensi dari sistem lainnya. Mode ini digunakan peneliti untuk memiliki kendali langsung pada perangkat dan ingin mengatur setiap aspek operasionalnya.



Gambar 4. 18 Tampilan Mode Manual HMI
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

4.4 Pengujian Hardware

Pada pengujian *hardware* ini terdapat pengujian sensor dan aktuator dengan menggunakan pembanding sebagai penguji keakuratan sensor. Dan mengamati respon aktuator apakah sudah berfungsi dengan baik. Untuk mendapatkan nilai eror pada setiap percobaan, maka hasil pengujian dapat dihitung dengan menggunakan persamaan dibawah ini:

$$\%Error = \frac{Pengujian-Data}{Pengujian} \times 100\% \quad (4.1)$$

4.4.1 Pengujian Sensor *Thermocouple* RTD PT100

Pada penelitian ini digunakan sensor RTD PT100 untuk membaca dan mengukur suhu pada area heater di dalam ruang pengering. Sensor RTD PT100 dipilih karena memiliki tingkat akurasi, linearitas, dan stabilitas yang baik pada sistem termal. Selain digunakan untuk pembacaan suhu, sensor ini juga dimanfaatkan sebagai sensor validasi dan pembandingan terhadap pembacaan suhu dari sensor SHT20 selama proses pengeringan berlangsung. Dalam proses pengujian, sensor RTD PT100 dibandingkan dengan termometer digital untuk mengetahui tingkat akurasi dan persentase error pembacaan suhu. Sensor RTD PT100 pada penelitian ini menggunakan transmitter arus 4–20 mA dengan rentang pengukuran suhu 0°C hingga 400°C sehingga data suhu dapat diintegrasikan dengan sistem kendali PLC secara lebih stabil dan minim gangguan *noise*.



Gambar 4. 19 Pengujian Sensor *Thermocouple* RTD PT100
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

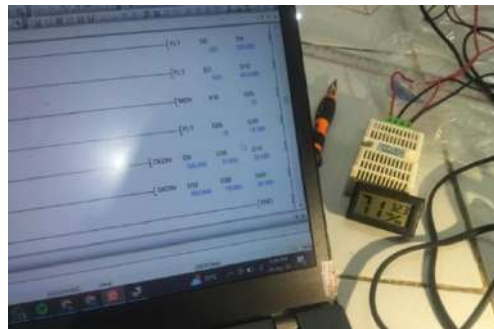
Tabel 4. 9 Hasil Pengujian Sensor *Thermocouple* RTD PT100

No	Sensor <i>Termocouple</i> (°C)	<i>Hygrometer</i> (°C)	Persentase <i>Error</i> (%)
1	32.5	32.8	0.9
2	34.3	34.5	0.5
3	37.0	37.3	0.8
4	40.0	40.2	0.4
5	42.3	42.5	0.4
6	45.0	45.1	0.2
7	47.2	47.0	0.4
8	50.1	50.3	0.3
9	55.0	55.2	0.3
10	60.2	60.1	0.1
Persentase <i>error</i> rata-rata			0.43

Pada Tabel 4.9 dapat dilihat hasil pembacaan antara sensor suhu *Thermocouple* dengan *hygrometer* digital. Sensor mampu melakukan pembacaan suhu dengan nilai *error* rata-rata sebesar 0,43%. Dapat disimpulkan bahwa sensor suhu *Thermocouple* dapat melakukan pembacaan yang baik dengan nilai *error* yang rendah.

4.4.2 Pengujian Sensor SHT20

Pengujian sensor SHT20 dilakukan untuk memastikan bahwa sensor dapat membaca suhu dan kelembaban udara secara akurat dan stabil. Proses ini penting untuk memastikan keandalan sensor dalam sistem otomatisasi, khususnya dalam pengendalian suhu pada alat pengering cabai. Pembacaan sensor kemudian dibandingkan dengan hasil dari alat ukur standar seperti *hygrometerr* digital guna mengetahui tingkat akurasi serta kestabilan data yang dihasilkan sensor selama pengujian.



Gambar 4. 20 Pengujian Sensor SHT20
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

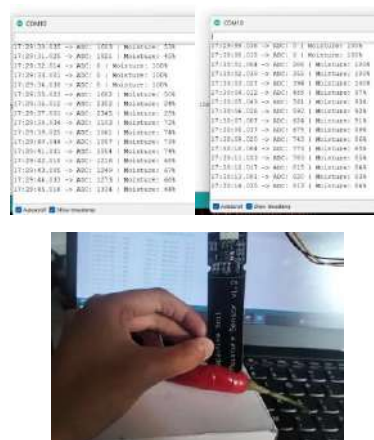
Tabel 4. 10 Hasil Pengujian Sensor SHT20

No	RH SHT20 (%)	Hygrometer (%)	Suhu SHT20 (°C)	Hygrometer (°C)	Persentase Error RH (%)	Persentase Error Suhu (%)
1	60.3	60.0	31.8	31.6	0.5	0.6
2	61.7	61.0	32.0	31.8	1.1	0.6
3	65.5	65.0	32.3	32.0	0.8	0.9
4	67.1	67.0	32.8	32.5	0.1	0.9
5	67.3	67.0	33.1	32.9	0.4	0.6
6	68.5	68.0	33.5	33.3	0.7	0.9
7	68.7	68	34.2	34.0	1.0	0.5
8	69.2	69	34.7	34.4	0.2	0.8
9	70.2	70	35.3	35.1	0.2	0.5
10	71.4	71	35.5	35.3	0.5	0.5
Persentase error rata-rata					0.55	0.68

Berdasarkan hasil pengujian sensor SHT20, diperoleh rata-rata persentase *error* suhu sebesar 0,68% dan kelembaban sebesar 0,55%, sehingga sensor mampu bekerja dengan cukup baik dalam membaca kondisi ruang pengering. Selisih pembacaan antara sensor dan *hygrometer* digital dipengaruhi oleh kondisi lingkungan serta karakteristik sensor. Selain itu, jika dibandingkan dengan sensor RTD PT100, SHT20 memiliki tingkat keandalan yang sedikit lebih rendah. Hal ini disebabkan karena PT100 dirancang khusus untuk pengukuran suhu dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi dibandingkan SHT20 yang berfungsi sebagai sensor suhu dan kelembaban.

4.4.3 Pengujian Sensor *Moisture* Kapasitif

Pengujian sensor *moisture* kapasitif dilakukan pada mesin pengering cabai otomatis untuk mengevaluasi kemampuan sensor dalam melakukan pengecekan dan validasi kadar air cabai sebelum dan sesudah proses pengeringan. Sensor ini digunakan sebagai alat ukur untuk mengetahui perubahan tingkat kelembapan bahan, sehingga dapat menjadi indikator keberhasilan proses pengeringan. Melalui pengujian ini, dapat diketahui sejauh mana sensor mampu memberikan data yang konsisten dan representatif terhadap kondisi aktual kadar air cabai. Selain itu, hasil pengukuran sensor digunakan sebagai bahan validasi untuk memastikan bahwa proses pengeringan telah mencapai tingkat kekeringan yang diharapkan. Oleh karena itu, pengujian sensor *moisture* kapasitif menjadi tahapan penting dalam mendukung evaluasi performa mesin pengering cabai otomatis.



Gambar 4. 21 Pengujian Sensor *Moisture* Kapasitif
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

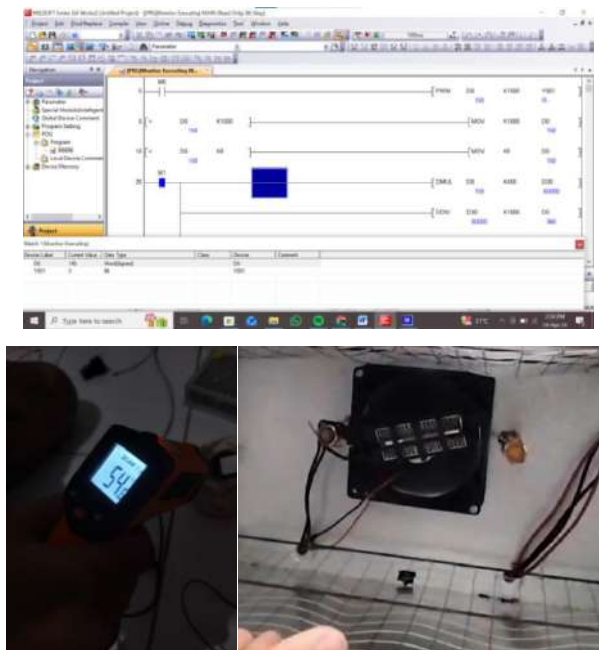
Tabel 4. 11 Hasil Pengujian Sensor Moisture Kapasitif

No	Kategori Kondisi Cabai	Rentang ADC	Rentang Moisture (%)
1	Basah	≤ 1000	51-100
2	Kering Optimal	> 1000	0-50

Berdasarkan hasil pengujian sensor moisture kapasitif, diperoleh bahwa sensor mampu membedakan tingkat kadar air cabai pada tiga kategori kondisi, yaitu basah, setengah kering, dan kering optimal. Pada kondisi basah, nilai ADC berada pada rentang rendah dengan persentase moisture tinggi, menandakan kandungan air cabai masih besar. Pada kondisi setengah kering, nilai ADC mulai meningkat disertai penurunan persentase moisture, yang menunjukkan proses pengurangan kadar air sedang berlangsung. Sementara itu, pada kondisi kering optimal, nilai ADC tercatat paling tinggi dengan persentase moisture rendah, menandakan kadar air cabai telah berkurang secara signifikan. Hasil ini menunjukkan adanya hubungan berbanding terbalik antara nilai ADC dan kadar air, sesuai karakteristik sensor moisture kapasitif. Dengan demikian, sensor dinilai mampu digunakan sebagai alat validasi untuk mengecek kondisi kadar air cabai sebelum dan sesudah proses pengeringan pada mesin pengering cabai otomatis.

4.4.4 Pengujian Heater

Pengujian *heater* dilakukan untuk memastikan elemen pemanas dapat bekerja sesuai kebutuhan sistem dalam menghasilkan suhu pengeringan yang stabil. *Heater* memiliki peran utama sebagai sumber panas yang digunakan untuk menurunkan kadar air pada cabai selama proses pengeringan. Melalui pengujian ini, dapat diketahui kemampuan *heater* dalam merespons perintah kontrol, mencapai suhu target, serta menjaga kestabilan temperatur di dalam ruang pengering. Selain itu, pengujian juga bertujuan untuk mendeteksi adanya penyimpangan kinerja yang dapat memengaruhi efisiensi proses pengeringan. Oleh karena itu, pengujian *heater* menjadi tahapan penting dalam memastikan performa keseluruhan sistem pengering cabai otomatis berjalan secara optimal.



Gambar 4. 22 Pengujian *Heater*
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Tabel 4. 12 Hasil Pengujian *Heater*

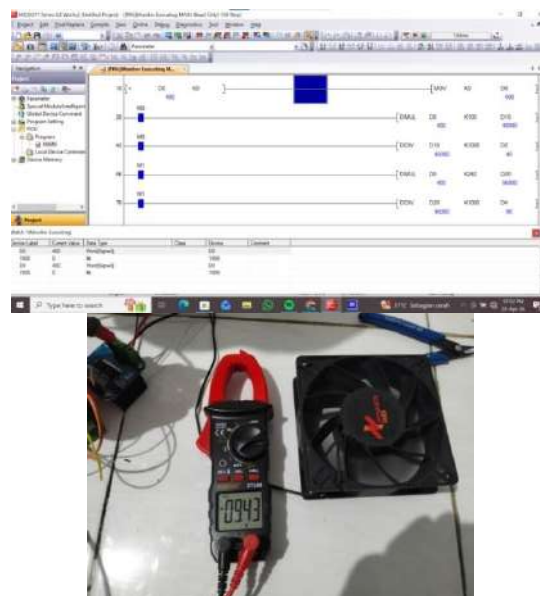
No	PWM <i>Heater</i> (%)	Suhu <i>Heater</i> (°C)	Suhu <i>Thermogun</i> (°C)	Persentase <i>Error</i> (%)
1	10	34.0	33.5	1.47
2	15	36.0	35.6	1.11
3	23.5	39.4	38.9	1.27
4	31	42.4	41.8	1.42
5	42	46.8	46.1	1.50
6	51.5	50.6	50.2	0.79
7	63.5	55.4	54.8	1.08
8	73.5	59.4	58.9	0.84
9	86	64.4	63.9	0.78
10	95	68	67.5	0.74
Persentase <i>error</i> rata-rata				1.10

Berdasarkan tabel pengujian *heater*, diperoleh hasil bahwa tegangan aktual hasil pengujian sangat mendekati nilai teoritis dengan rata-rata persentase *error* sebesar 1,10%. Nilai *error* tertinggi berada pada *output* 42% sebesar 1,50%, sedangkan *error* terendah terjadi pada *output* 95% sebesar 0,74%. Hal ini

menunjukkan bahwa sistem pengendalian *heater* memiliki tingkat akurasi yang baik dan respons yang stabil terhadap perubahan nilai *output*. Selisih kecil antara data teoritis dan hasil pengujian dapat disebabkan oleh toleransi komponen elektronik, fluktuasi catu daya, serta karakteristik pembacaan alat ukur. Namun secara keseluruhan, *error* yang rendah menandakan bahwa sistem kontrol *heater* bekerja efektif dalam menghasilkan tegangan sesuai kebutuhan proses pemanasan pada mesin pengering cabai otomatis.

4.4.5 Pengujian Kipas 24 VDC

Pengujian kipas DC dilakukan dengan tujuan untuk memastikan bahwa kipas mampu bekerja secara optimal dalam mendukung proses pengeringan cabai. Kipas DC memiliki peran penting dalam mensirkulasikan udara panas di dalam ruang pengering sehingga distribusi suhu dapat merata ke seluruh bagian cabai. Dengan sirkulasi udara yang baik, proses pengeringan menjadi lebih efektif dan merata, sehingga kadar air cabai dapat berkurang sesuai target yang diinginkan tanpa merusak kualitas produk. Selain itu, pengujian ini juga bertujuan untuk mengetahui kestabilan performa kipas selama alat beroperasi serta mendeteksi kemungkinan gangguan pada sistem aliran udara. Oleh karena itu, pengujian kipas DC menjadi salah satu tahapan penting dalam memastikan keseluruhan sistem pengering cabai otomatis dapat bekerja secara efisien dan optimal.



Gambar 4. 23 Pengujian Kipas
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

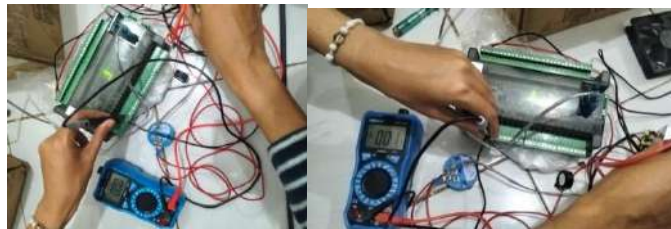
Tabel 4. 13 Hasil Pengujian Kipas

No	PWM Kipas (%)	Tegangan Kipas (V)	Tegangan Voltmeter (V)	Persentase Error (%)
1	10	2.4	2.1	12.5
2	20	4.8	4.3	10.42
3	30	7.2	6.9	4.17
4	40	9.6	9.4	2.08
5	50	12.0	11.6	3.33
6	60	14.4	13.6	5.56
7	70	16.8	16.4	2.38
8	80	19.2	18.7	2.60
9	90	21.6	21.4	0.93
10	100	24.0	23.5	2.08
Persentase <i>error</i> rata-rata				4.61

Tabel pengujian kipas DC menunjukkan hubungan antara persentase output kipas, tegangan data teoritis, dan tegangan hasil pengujian aktual pada sistem pengering cabai otomatis. Berdasarkan hasil pengujian, tegangan aktual yang diperoleh cenderung mendekati nilai teoritis dengan rata-rata persentase *error* sebesar 4,61%. Nilai *error* tertinggi terjadi pada *output* rendah, yaitu 12,50% pada 10% *output*, sedangkan pada *output* yang lebih tinggi *error* cenderung menurun. Kondisi ini disebabkan oleh karakteristik sinyal PWM yang menghasilkan tegangan dalam bentuk pulsa, sehingga pembacaan multimeter merupakan nilai rata-rata yang dapat berbeda dari tegangan teoritis. Selain itu, adanya beban dari motor kipas, toleransi catu daya, serta respons motor DC yang tidak sepenuhnya linear juga memengaruhi hasil pengukuran. Meskipun demikian, nilai *error* yang diperoleh masih dalam batas wajar, sehingga sistem kendali kipas dinilai mampu bekerja dengan baik dan stabil dalam mengatur sirkulasi udara pada proses pengeringan cabai.

4.4.6 Pengujian Buzzer

Pada penelitian ini *buzzer* digunakan sebagai indikator keluaran (*output*) yang berfungsi memberikan notifikasi suara terhadap kondisi tertentu pada sistem. *Buzzer* akan aktif ketika proses telah selesai serta saat terjadi kondisi over suhu yang melebihi batas yang telah ditentukan. Selain sebagai indikator, *buzzer* juga menjadi bagian dari respon sistem terhadap hasil pengolahan data kendali.



Gambar 4. 24 Pengujian Buzzer
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

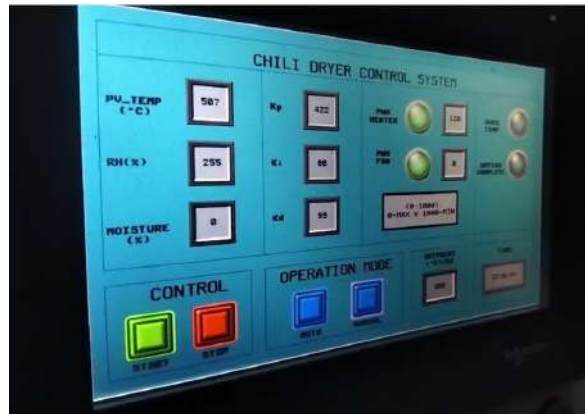
Hasil pengujian *buzzer* ditunjukkan pada dua kondisi, yaitu saat *buzzer* dalam keadaan *off* dan *on*. Pada foto sebelah kiri ditampilkan hasil pengukuran tegangan dari *power supply* dan *output* PLC saat *buzzer* dalam kondisi *off*, di mana tidak terdapat aktivasi pada *buzzer*. Sedangkan pada foto sebelah kanan ditunjukkan hasil pengukuran tegangan dari *power supply* dan *output* PLC saat *buzzer* dalam kondisi *on*. Pada kondisi *on*, terlihat bahwa tegangan yang terbaca hanya sekitar 1 volt. Hal ini disebabkan oleh penggunaan instruksi M8013 pada program PLC yang menghasilkan sinyal berkedip (*blink*) dengan sistem 1 *pulse*, sehingga tegangan yang terukur merupakan nilai rata-rata dari sinyal tersebut. Meskipun demikian, *buzzer* tetap dapat aktif dan menghasilkan suara sesuai dengan kondisi yang telah ditentukan dalam sistem.

4.5 Pengujian Software

Pengujian software pada penelitian ini dilakukan terhadap *Human Machine Interface* (HMI) untuk memastikan seluruh fungsi antarmuka dapat bekerja sesuai dengan perancangan. Pengujian meliputi tampilan halaman, fungsi tombol, proses input parameter, serta kemampuan HMI dalam menampilkan data monitoring secara *real-time*. Hasil pengujian ini digunakan untuk memastikan bahwa HMI mampu berfungsi sebagai media interaksi antara pengguna dengan sistem pengering cabai.

4.5.1 Pengujian HMI

Pengujian HMI ini bertujuan untuk memastikan apakah tampilan layar HMI sudah sesuai dan juga memastikan fungsi tombol-tombol pada HMI agar dapat digunakan sesuai dengan fungsinya.



Gambar 4. 25 Pengujian HMI GXU3512

4.6 Simulasi Metode Fuzzy

Langkah awal dalam pengujian metode *Fuzzy* adalah melakukan perancangan sistem kendali berbasis logika *fuzzy* untuk mengatur kerja heater dan kipas secara otomatis berdasarkan kondisi suhu dan kelembaban relatif (RH) di dalam ruang pengering. Berbeda dengan pengendalian konvensional yang menggunakan logika ON–OFF, metode *Fuzzy* menghasilkan keluaran berupa nilai PWM *heater* dan PWM kipas berdasarkan hasil inferensi dari kondisi aktual sistem. Selanjutnya dilakukan simulasi untuk menganalisis proses fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi sebelum metode diimplementasikan pada ESP32.

4.6.1 Perancangan Sistem Kendali Fuzzy

Pada sistem ini, terdapat dua variabel input utama yang digunakan dalam proses *fuzzy*, yaitu *error* suhu dan *error* kelembaban relatif (RH). Nilai *error* (*e*) diperoleh dari selisih antara *setpoint* (SP) dan nilai aktual proses (PV) yang dibaca sensor SHT20, sedangkan *error* kelembaban diperoleh dari selisih antara kelembaban aktual dan kelembaban *setpoint*. Secara matematis dapat dituliskan sebagai:

$$e_T = SP_T - T \quad (4.2)$$

$$e_{RH} = RH - RH_{SP} \quad (4.3)$$

Nilai *error* digunakan untuk menunjukkan seberapa jauh sistem dari kondisi yang diinginkan. Kedua variabel tersebut kemudian diproses menggunakan metode Fuzzy Sugeno sehingga menghasilkan dua variabel keluaran berupa PWM *heater* dan PWM kipas.

Seluruh proses fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi dijalankan pada ESP32. Nilai PWM *heater* dan PWM kipas hasil proses fuzzy kemudian dikirimkan ke PLC Mitsubishi FX3U melalui komunikasi Modbus RTU. PLC selanjutnya menggunakan nilai PWM tersebut untuk mengendalikan *heater* dan kipas sehingga kondisi suhu dan kelembaban ruang pengering dapat dijaga selama proses pengeringan berlangsung.

4.6.2 Perancangan Fuzzy Logic Controller

Perancangan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) pada penelitian ini menggunakan metode Fuzzy Sugeno orde nol (*Zero Order Sugeno*). Metode ini dipilih karena menghasilkan keluaran berupa nilai tegas (*crisp value*) sehingga sesuai untuk menghasilkan sinyal PWM secara langsung pada ESP32. FLC terdiri atas dua variabel masukan, yaitu *error* suhu dan *error* kelembaban relatif (RH), sedangkan variabel keluarannya berupa PWM *heater* dan PWM kipas.

a. Membership Function

Pada tahap fuzzifikasi, masing-masing variabel masukan dibagi menjadi lima himpunan linguistik, yaitu *Negative Big* (NB), *Negative Small* (NS), *Zero* (ZE), *Positive Small* (PS), dan *Positive Big* (PB). Fungsi keanggotaan yang digunakan merupakan kombinasi fungsi trapesium (*trapezoidal*) pada daerah ekstrem dan fungsi segitiga (*triangular*) pada daerah transisi sehingga perubahan nilai keanggotaan berlangsung secara halus.

Rentang fungsi keanggotaan disesuaikan dengan karakteristik proses pengeringan cabai. Variabel *error* suhu menggunakan rentang sekitar -30 hingga 30°C , sedangkan *error* kelembaban relatif menggunakan rentang -30 hingga $30\%\text{RH}$. Hasil proses fuzzifikasi berupa derajat keanggotaan masing-masing himpunan linguistik yang selanjutnya digunakan pada tahap inferensi.

b. *Rule Base*

Tahap berikutnya adalah proses inferensi menggunakan aturan IF–THEN. Penelitian ini menggunakan dua variabel masukan, yaitu *error* suhu dan *error* kelembaban relatif (RH), yang masing-masing memiliki lima himpunan linguistik sehingga terbentuk sebanyak 25 kombinasi aturan.

Berbeda dengan metode Mamdani, setiap aturan pada metode Sugeno menghasilkan keluaran berupa nilai konstan (*singleton*). Pada penelitian ini digunakan dua buah *rule base*, yaitu *rule base* untuk menghasilkan PWM *heater* dan *rule base* untuk menghasilkan PWM kipas. Penyusunan aturan dilakukan berdasarkan karakteristik proses pengeringan cabai serta pengamatan terhadap hubungan antara suhu, kelembaban, dan kebutuhan pemanasan maupun sirkulasi udara selama proses pengeringan. *Rule base* lengkap yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 4.13 dan Tabel 4.14.

Tabel 4. 14 *Rule Base PWM Heater*

Error Suhu / Error RH	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	550	550	520	500	480
NS	450	420	400	350	320
ZE	250	220	180	150	120
PS	80	50	30	20	10
PB	0	0	0	0	0

Tabel 4. 15 *Rule Base PWM Kipas*

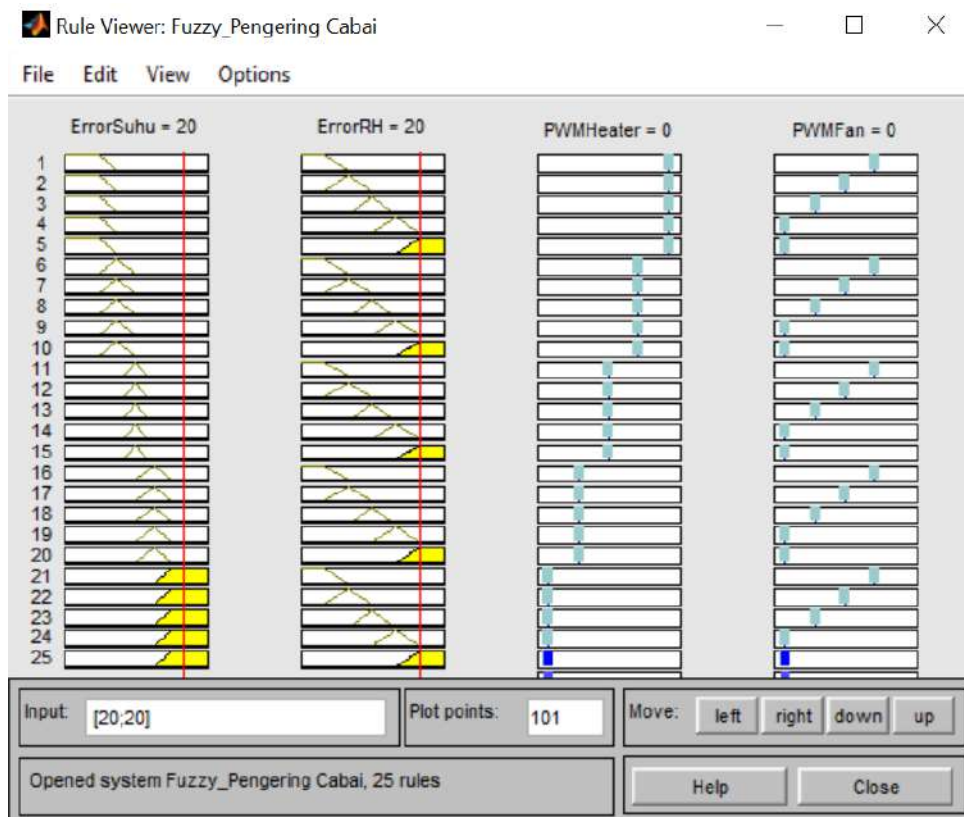
Error Suhu / Error RH	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	220	200	180	160	140
NS	180	160	140	120	100
ZE	140	120	100	80	60
PS	100	80	60	40	30
PB	60	50	40	30	20

Nilai pada setiap aturan merupakan nilai *singleton* yang digunakan pada metode Fuzzy Sugeno orde nol. Nilai singleton tersebut tidak langsung menjadi keluaran PWM akhir, tetapi akan dikalikan dengan nilai *firing strength* dari setiap aturan pada proses inferensi. Selanjutnya seluruh nilai singleton dihitung menggunakan metode *Weighted Average* sehingga diperoleh nilai PWM *heater*

dan PWM kipas yang kemudian dikirimkan ke PLC Mitsubishi FX3U melalui komunikasi Modbus RTU.

4.6.3 Simulasi Respon Sistem

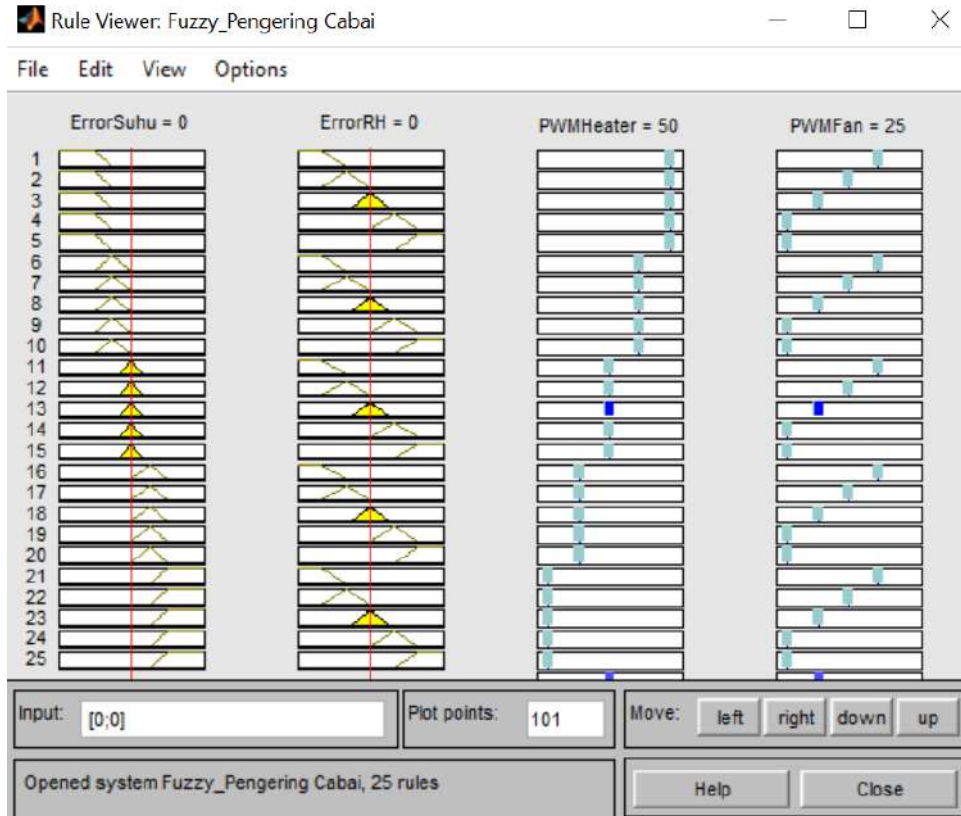
Setelah dilakukan perancangan sistem kendali *Fuzzy*, tahap selanjutnya adalah melakukan simulasi untuk menganalisis respon sistem terhadap perubahan *setpoint* dan kondisi awal. Simulasi ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja metode yang diusulkan sebelum diimplementasikan pada sistem nyata.



Gambar 4. 26 Rule Viewer Fuzzy Sugeno pada Kondisi Skenario 1
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

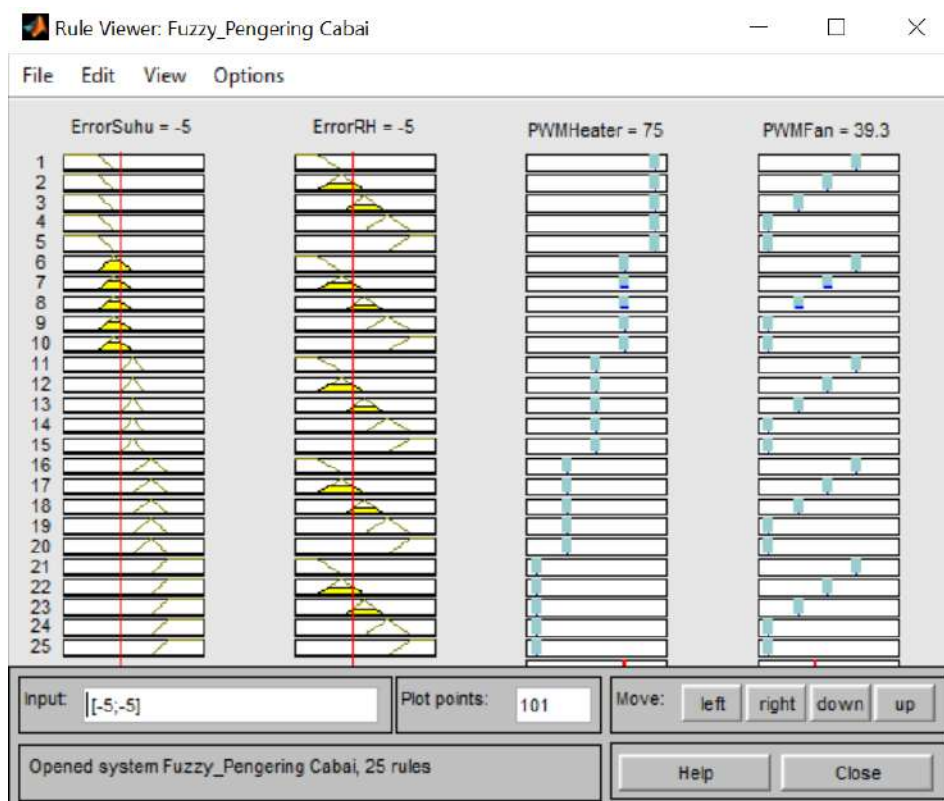
Berdasarkan Gambar 4.25, hasil simulasi menunjukkan bahwa metode Fuzzy Sugeno mampu menghasilkan nilai PWM *heater* dan PWM kipas yang berubah secara adaptif sesuai dengan perubahan nilai *error* suhu dan *error* kelembaban. Pada skenario pertama, ketika *error* suhu dan *error* RH masing-masing bernilai 20, sistem menghasilkan nilai PWM *heater* dan PWM kipas sebesar 0. Mengingat sistem menggunakan logika PWM invers, nilai tersebut menunjukkan bahwa *heater* dan kipas bekerja pada daya maksimum untuk

mempercepat kenaikan suhu ruang pengering serta meningkatkan sirkulasi udara pada tahap awal proses pengeringan.



Gambar 4. 27 Rule Viewer Fuzzy Sugeno pada Kondisi Skenario 2
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Pada skenario kedua, ketika *error* suhu dan *error* RH bernilai 0, sistem menghasilkan nilai PWM *heater* sebesar 50 dan PWM kipas sebesar 25. Kondisi ini menunjukkan bahwa saat suhu dan kelembaban telah mencapai nilai *setpoint*, pengendali tidak langsung menghentikan kerja aktuator, melainkan mengurangi daya secara bertahap agar suhu tetap stabil dan sirkulasi udara tetap terjaga. Karakteristik tersebut merupakan salah satu keunggulan metode *Fuzzy Sugeno*, yaitu mampu menghasilkan keluaran yang bersifat kontinu (*smooth*) melalui proses *weighted average*, sehingga perubahan sinyal kendali tidak terjadi secara tiba-tiba.



Gambar 4. 28 Rule Viewer Fuzzy Sugeno pada Kondisi Skenario 3
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Pada skenario ketiga, ketika error suhu dan error RH bernilai -5, sistem menghasilkan nilai PWM *heater* sebesar 75 dan PWM kipas sebesar 39,3. Pada logika PWM invers, nilai tersebut menunjukkan bahwa daya *heater* semakin dikurangi karena suhu telah melebihi *setpoint*, sedangkan kipas masih tetap bekerja pada tingkat tertentu untuk membantu sirkulasi udara dan mempercepat pelepasan uap air dari ruang pengering. Hasil simulasi ini menunjukkan bahwa keluaran *Fuzzy Sugeno* berubah secara bertahap mengikuti kondisi sistem, sehingga mampu menghasilkan aksi kendali yang lebih adaptif dibandingkan pengendalian *ON-OFF*. Oleh karena itu, simulasi ini menjadi dasar bahwa metode yang dirancang telah sesuai secara konseptual sebelum diimplementasikan pada sistem pengering cabai berbasis PLC Mitsubishi FX3U dan ESP32.

4.6.4 Perhitungan Manual *Fuzzy Logic Controller*

Untuk memverifikasi proses kerja *Fuzzy Logic Controller* (FLC), dilakukan perhitungan manual menggunakan salah satu skenario yang sama dengan simulasi pada MATLAB *Fuzzy Logic Toolbox*. Perhitungan manual ini bertujuan untuk menunjukkan proses fuzzifikasi, inferensi, hingga diperoleh nilai keluaran berupa PWM *heater* dan PWM *fan* sebelum algoritma diimplementasikan pada ESP32 dan PLC Mitsubishi FX3U.

Pada skenario ini digunakan nilai *error* suhu sebesar 10°C dan *error* kelembaban (RH) sebesar 5%. Nilai *error* diperoleh dari selisih antara nilai *setpoint* dan nilai aktual sensor sesuai Persamaan (4.2).

Tahap pertama adalah proses fuzzifikasi, yaitu mengubah nilai crisp menjadi derajat keanggotaan pada masing-masing membership function. Untuk *error* suhu sebesar 10°C, nilai tersebut berada pada daerah irisan himpunan *Positive Small* (PS) dan *Positive Big* (PB) sehingga diperoleh

$$\mu_{PS}(10) = \frac{15 - 10}{15 - 8} = 0,7143$$

$$\mu_{PB}(10) = \frac{10 - 10}{15 - 8} = 0,2857$$

Sedangkan himpunan NB, NS, dan ZE bernilai nol.

Untuk *error* kelembaban sebesar 5%, nilai tersebut berada pada daerah irisan himpunan *Zero* (ZE) dan *Positive Small* (PS) sehingga diperoleh

$$\mu_{ZE}(5) = \frac{8 - 5}{8} = 0,375$$

$$\mu_{PS}(5) = \frac{5}{10} = 0,5$$

Sedangkan himpunan NB, NS, dan PB bernilai nol.

Berdasarkan hasil fuzzifikasi tersebut, terdapat empat aturan (*rule*) yang aktif, yaitu

1. *IF Error Suhu = PS AND Error RH = ZE THEN PWM Heater = High dan PWM Fan = High.*
2. *IF Error Suhu = PS AND Error RH = PS THEN PWM Heater = High dan PWM Fan = Very High.*
3. *IF Error Suhu = PB AND Error RH = ZE THEN PWM Heater = Very High dan PWM Fan = High.*
4. *IF Error Suhu = PB AND Error RH = PS THEN PWM Heater = Very High dan PWM Fan = Very High.*

Pada simulasi MATLAB digunakan metode inferensi Sugeno dengan operator AND = *Product*, sehingga firing strength setiap aturan diperoleh dari hasil perkalian derajat keanggotaan kedua variabel input.

Untuk aturan pertama diperoleh

$$\alpha_1 = 0,7143 \times 0,375 = 0,2679$$

Aturan kedua

$$\alpha_2 = 0,7143 \times 0,5 = 0,3571$$

Aturan ketiga

$$\alpha_3 = 0,2857 \times 0,375 = 0,1071$$

Aturan keempat

$$\alpha_4 = 0,2857 \times 0,5 = 0,1429$$

Selanjutnya dilakukan proses defuzzifikasi menggunakan metode *Weighted Average (wtaver)* sebagaimana digunakan pada MATLAB Sugeno. Persamaan defuzzifikasi dinyatakan sebagai

$$z = \frac{\sum \alpha_i z_i}{\sum \alpha_i} \quad (4.4)$$

Dengan z_i merupakan nilai singleton pada masing-masing keluaran.

Untuk PWM *Heater*, nilai singleton yang aktif adalah 25, 25, 0, dan 0 sehingga diperoleh

$$PWM_{hetaer} = \frac{(0,2679 \times 25) + (0,3571 \times 25) + (0,1071 \times 0) + (0,1429 \times 0)}{(0,2679 + 0,3571 + 0,1071 + 0,1429)}$$

$$PWM_{heater} = 17,86$$

Sedangkan untuk PWM *Fan*, nilai singleton yang aktif adalah 25, 0, 25, dan 0 sehingga diperoleh

$$PWM_{fan} = \frac{(0,2679 \times 25) + (0,3571 \times 0) + (0,1071 \times 25) + (0,1429 \times 0)}{(0,2679 + 0,3571 + 0,1071 + 0,1429)}$$

$$PWM_{fan} = 10,71$$

Hasil perhitungan manual tersebut menghasilkan nilai keluaran PWM *Heater* sebesar 17,86 dan PWM *Fan* sebesar 10,71. Nilai tersebut sama dengan hasil simulasi MATLAB sehingga menunjukkan bahwa proses fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi telah berjalan sesuai dengan rancangan algoritma Fuzzy Sugeno. Nilai PWM yang dihasilkan selanjutnya digunakan sebagai referensi dalam implementasi algoritma pada ESP32, kemudian dikonversi ke rentang PWM yang digunakan PLC Mitsubishi FX3U untuk mengendalikan *heater* dan kipas selama proses pengeringan cabai.

4.7 Pengujian Sistem Tanpa Metode

Pada tahap ini membahas hasil pengujian sistem tanpa menerapkan logika *fuzzy*. Pengujian dilakukan sebagai data pembandingan untuk mengetahui karakteristik dasar sistem serta mengevaluasi pengaruh penerapan metode terhadap performa pengendalian suhu dan kelembaban.

4.7.1 Pengujian Respon Suhu Tanpa Metode

Pengujian respon suhu tanpa metode dilakukan untuk mengetahui karakteristik dasar sistem pengering dengan mekanisme kontrol *ON-OFF* sebagai

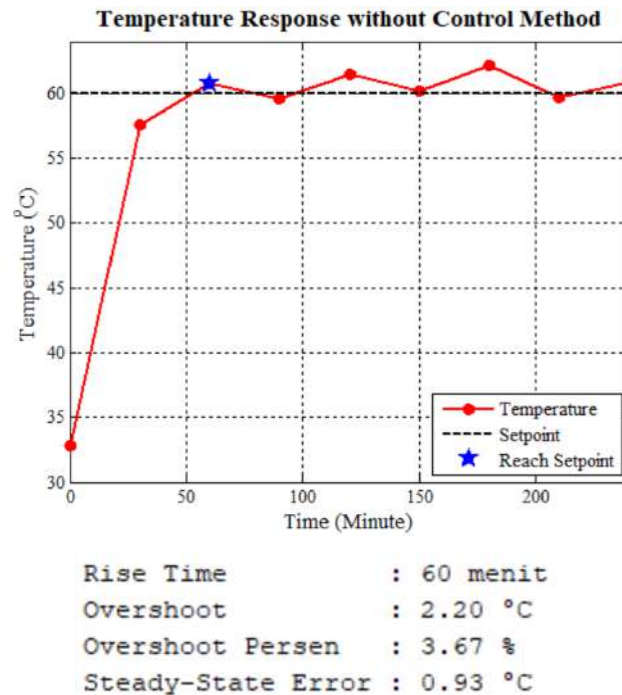
data pembandingan terhadap sistem yang menggunakan metode *Fuzzy*. Pada pengujian ini, setpoint suhu ditetapkan sebesar 60°C. Selama proses berlangsung, sensor PT100 dan SHT20 membaca suhu ruang pengering secara periodik, kemudian data dicatat pada interval waktu tertentu hingga proses pengujian selesai. Pengujian ini bertujuan untuk memperoleh data acuan (*baseline*) sehingga perbedaan performa sistem tanpa metode dan sistem yang menggunakan metode *Fuzzy* dapat dianalisis secara objektif. Hasil pengujian respon suhu tanpa metode ditunjukkan pada Tabel 4.16.

Tabel 4. 16 Pengujian Respon Suhu Tanpa Metode

Waktu (menit)	Setpoint (°C)	Suhu Aktual (°C)	PWM Heater	PWM Kipas	Kondisi Heater
0	60	32.8	0	200	ON
30	60	57.6	0	200	ON
60	60	60.8	1000	200	OFF
90	60	59.6	0	200	ON
120	60	61.5	1000	200	OFF
150	60	60.2	1000	200	OFF
180	60	62.2	1000	200	OFF
210	60	59.9	0	200	ON
240	60	60.9	1000	200	OFF

Berdasarkan data pada Tabel 4.16, sistem tanpa metode menggunakan mekanisme kontrol ON–OFF pada *heater*, sedangkan PWM kipas dipertahankan konstan sebesar 200 selama proses pengeringan. Pada awal proses, *heater* bekerja pada daya maksimum sehingga suhu meningkat dari 32,8°C menjadi 57,6°C dalam 30 menit dan mencapai 60,8°C pada menit ke-60. Ketika suhu telah melewati *setpoint*, *heater* dimatikan, namun panas yang masih tersimpan pada elemen pemanas menyebabkan suhu tetap meningkat hingga mencapai sekitar 62,2°C. Setelah suhu menurun di bawah *setpoint*, *heater* kembali aktif sehingga terbentuk siklus pemanasan dan pendinginan secara berulang. Akibatnya, suhu ruang pengering terus berfluktuasi pada kisaran 59,6–62,2°C. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa mekanisme ON–OFF belum mampu mengatur daya *heater* secara bertahap sehingga kestabilan suhu di sekitar setpoint masih kurang baik. Selain itu, PWM *heater* tampak berlawanan dengan kondisi *heater* karena driver BTS7960 menggunakan logika PWM invers, yaitu PWM 0 menunjukkan *heater*

bekerja pada daya maksimum, sedangkan PWM 1000 menunjukkan *heater* tidak aktif.



Gambar 4. 29 Respon Suhu Tanpa Metode

Berdasarkan Gambar 4.29, suhu ruang pengering meningkat dengan cepat hingga mendekati *setpoint* 60°C pada awal proses pemanasan. Setelah mencapai *setpoint*, suhu tidak langsung stabil, tetapi mengalami kenaikan hingga sekitar 62,2°C akibat inersia termal sebelum menurun kembali. Siklus tersebut terus berulang sehingga terbentuk pola osilasi di sekitar *setpoint* dengan fluktuasi sekitar $\pm 2^\circ\text{C}$. Fluktuasi ini terjadi karena *heater* hanya bekerja pada dua kondisi, yaitu aktif dan tidak aktif, tanpa pengaturan daya secara bertahap. Akibatnya, sistem belum mampu mempertahankan suhu ruang pengering secara stabil selama proses pengeringan berlangsung.

4.7.2 Pengujian Distribusi Suhu

Pengujian distribusi suhu dilakukan untuk mengetahui pemerataan suhu pada ruang pengering tanpa menggunakan metode *Fuzzy*. Pengukuran dilakukan setelah suhu ruang pengering mencapai kondisi stabil dengan memindahkan sensor PT100 secara bergantian pada rak atas dan rak bawah. Pada setiap titik pengukuran dilakukan tiga kali pengambilan data, kemudian dihitung nilai rata-

ratanya untuk mengetahui distribusi panas di dalam ruang pengering. Hasil pengukuran distribusi suhu pada ruang pengering tanpa metode ditunjukkan pada Tabel 4.17.

Tabel 4. 17 Hasil Pengujian Distribusi Suhu Tanpa Metode

Titik Pengukuran	Pengukuran 1 (°C)	Pengukuran 2 (°C)	Pengukuran 3 (°C)	Rata-rata (°C)
Bagian Atas	59.4	59.8	59.6	59.6
Bagian Bawah	61.8	62.1	61.7	61.8

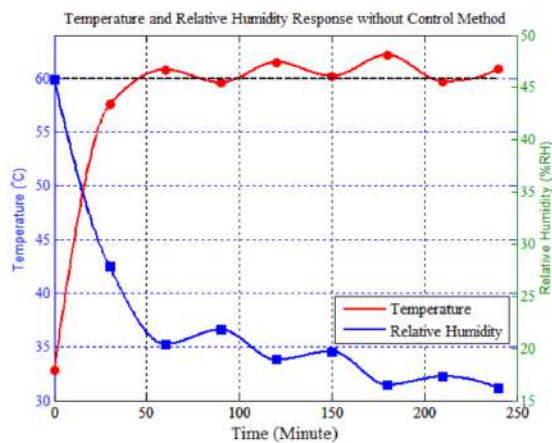
Berdasarkan Tabel 4.17, suhu pada bagian bawah ruang pengering cenderung lebih tinggi dibandingkan bagian atas dengan selisih rata-rata sekitar 2,2°C. Kondisi tersebut disebabkan oleh posisi *heater* dan kipas yang berada di bagian bawah, sehingga udara panas terlebih dahulu terkonsentrasi di area tersebut sebelum bersirkulasi ke bagian atas. Selain itu, penggunaan kontrol ON-OFF menyebabkan suhu ruang pengering terus berfluktuasi sehingga distribusi panas belum merata pada seluruh bagian ruang pengering. Hasil pengujian ini menjadi acuan untuk mengevaluasi peningkatan pemerataan suhu setelah sistem menerapkan metode *Fuzzy*.

4.7.3 Pengujian Pengeringan Cabai Tanpa Metode

Pengujian pengeringan cabai tanpa metode dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mengurangi kadar air cabai menggunakan kontrol ON-OFF. Pengujian dilakukan menggunakan cabai merah dengan massa awal 2 kg. *Setpoint* suhu ditetapkan sebesar 60°C dan *heater* dioperasikan dengan nilai PWM sebesar 0 (daya maksimum) dan kipas dioperasikan pada nilai PWM tetap sebesar 200 selama proses pengeringan. Pengukuran kadar air cabai dilakukan menggunakan sensor moisture kapasitif sebelum proses pengeringan dimulai dan setelah proses pengeringan selesai selama 4 jam. Hasil pengujian pengeringan cabai tanpa metode ditunjukkan pada Tabel 4.18. Data hasil pengukuran tersebut selanjutnya digunakan untuk mengetahui perubahan kadar air cabai sebelum dan setelah proses pengeringan serta mengevaluasi kemampuan kontrol ON-OFF dalam proses pengeringan.

Tabel 4. 18 Hasil Pengujian Pengeringan Cabai Tanpa Metode

Waktu (menit)	Suhu (°C)	RH (%RH)	Kondisi Cabai	Dokumentasi
0	32.8	45.8	Cabai segar, permukaan mengilap, tekstur keras	
30	57.6	27.8	Mulai layu, permukaan masih basah	
60	60.8	20.4	Layu, kulit mulai mengerut	
90	59.6	21.8	Permukaan mulai mengering, warna mulai pekat	
120	61.5	18.9	Sebagian besar permukaan telah kering	
150	60.2	19.7	Tekstur mulai keras	
180	62.2	16.5	Hampir seluruh permukaan kering	
210	59.7	17.3	Hampir mencapai kondisi kering	
240	60.9	16.2	Cabai kering, tekstur keras dan keriput	



Gambar 4. 30 Hasil Pengujian Pengeringan Cabai Tanpa Metode

Berdasarkan Tabel 4.18 dan Gambar 4.30, selama proses pengeringan suhu ruang pengering berada pada kisaran 59,6–62,2°C, sedangkan kelembaban relatif (RH) menurun secara bertahap dari 45,8% menjadi 16,2%. Namun, pada beberapa interval pengamatan nilai RH sempat meningkat kembali bersamaan dengan penurunan suhu ruang pengering, misalnya dari 20,4% menjadi 21,8% dan dari 18,9% menjadi 19,7%. Kondisi tersebut terjadi karena cabai masih mengalami proses evaporasi, yaitu pelepasan kandungan air dari dalam bahan ke udara di dalam ruang pengering. Uap air hasil evaporasi menyebabkan kelembaban udara meningkat sesaat, sedangkan sebagian energi panas digunakan sebagai kalor laten untuk proses penguapan sehingga suhu ruang pengering mengalami sedikit penurunan sebelum kembali meningkat. Secara visual, kondisi cabai juga mengalami perubahan dari segar menjadi layu, kemudian permukaannya mulai mengering hingga mencapai kondisi kering setelah proses pengeringan selama kurang lebih 4 jam.

Heater dikendalikan menggunakan mekanisme ON–OFF dengan setpoint 60°C. Meskipun *heater* dimatikan ketika suhu mencapai *setpoint*, suhu masih meningkat hingga sekitar 62,2°C akibat inersia termal pada elemen pemanas. Berdasarkan hasil pengukuran menggunakan sensor moisture kapasitif, pembacaan kadar air cabai berubah dari 78,5% sebelum pengeringan menjadi 0% setelah proses pengeringan selesai. Nilai 0% tersebut bukan menunjukkan kadar air absolut cabai, melainkan batas minimum pembacaan sensor moisture kapasitif pada cabai yang telah kering. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem tanpa metode

mampu mengeringkan cabai, namun pengendalian suhu yang masih berfluktuasi akibat mekanisme ON–OFF menyebabkan kondisi ruang pengering kurang stabil dibandingkan sistem yang menggunakan metode *Fuzzy*, sehingga metode *Fuzzy* diharapkan mampu menghasilkan proses pengeringan yang lebih efektif dan konsisten.

4.8 Pengujian Sistem Menggunakan Metode

Pada tahap ini menyajikan hasil pengujian sistem setelah menerapkan metode *fuzzy* pada pengendalian suhu dan kelembaban. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi performa sistem dalam menjaga kestabilan suhu, mengendalikan kelembaban, serta meningkatkan kualitas proses pengeringan cabai.

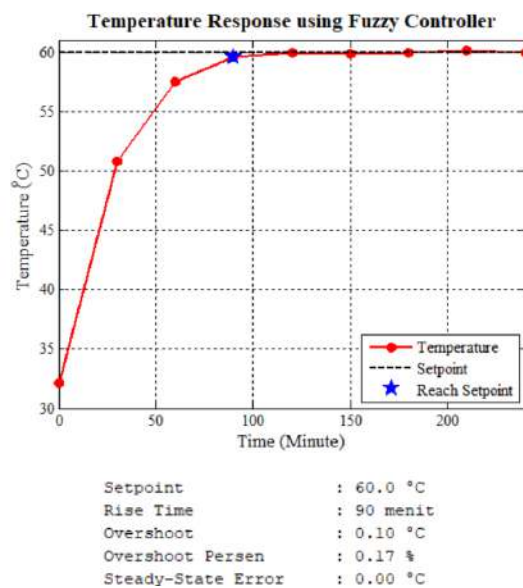
4.8.1 Pengujian Kinerja Sistem Fuzzy

Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem pengering cabai setelah menerapkan metode *Fuzzy*. Selama proses pengeringan, ESP32 membaca suhu dan kelembaban relatif (RH) dari sensor SHT20, kemudian melakukan proses fuzzifikasi, evaluasi rule base, dan defuzzifikasi untuk menghasilkan nilai PWM *heater* dan PWM kipas berdasarkan kondisi suhu dan kelembaban ruang pengering. Nilai PWM tersebut dikirimkan ke PLC melalui komunikasi Modbus RTU untuk mengendalikan *heater* dan kipas secara otomatis selama proses pengeringan berlangsung. Pengujian dilakukan mulai dari kondisi awal ruang pengering hingga sistem mencapai setpoint suhu sebesar 60°C. Hasil pengujian kinerja sistem menggunakan metode *Fuzzy* ditunjukkan pada Tabel 4.19.

Tabel 4. 19 Hasil Pengujian Kinerja Sistem Menggunakan Metode Fuzzy

Waktu (menit)	Suhu (°C)	RH (%RH)	PWM Heater	PWM Kipas
0	32.1	49.7	0	20
30	50.8	28.6	0	48
60	57.5	18.5	85	130
90	59.6	15.2	235	195
120	60.0	13.8	295	220
150	59.9	14.5	285	218
180	60.0	13.6	300	220
210	60.1	14.1	315	220
240	60.0	13.4	300	220

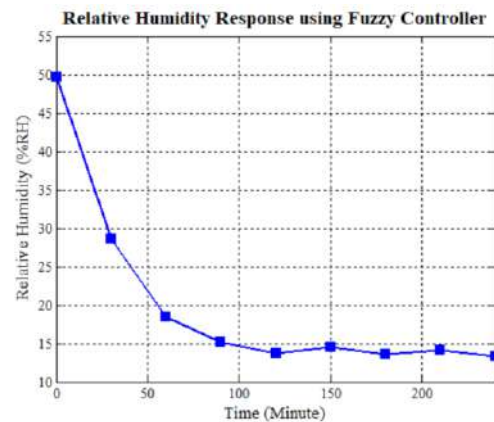
Berdasarkan Tabel 4.19, sistem *Fuzzy* mampu meningkatkan suhu ruang pengering dari 34,1°C hingga mencapai *setpoint* 60°C dalam waktu sekitar 90 menit. Selama proses pemanasan, nilai PWM *heater* berada pada kondisi maksimum untuk mempercepat kenaikan suhu, sedangkan PWM kipas meningkat secara bertahap mengikuti perubahan kondisi ruang pengering. Setelah suhu mendekati *setpoint*, nilai PWM *heater* dikurangi secara adaptif sehingga sistem hanya mengalami *overshoot* maksimum sebesar 0,1°C. Selanjutnya suhu berfluktuasi kecil pada rentang 59,8–60,1°C akibat proses koreksi keluaran *fuzzy* dalam mempertahankan kondisi tunak. Perubahan nilai PWM *heater* dan PWM kipas selama proses pengendalian menunjukkan bahwa metode *Fuzzy* mampu menyesuaikan kondisi *plant* secara *real-time* sehingga respon sistem menjadi cepat sekaligus stabil di sekitar *setpoint*.



Gambar 4. 31 Respon Suhu terhadap Waktu

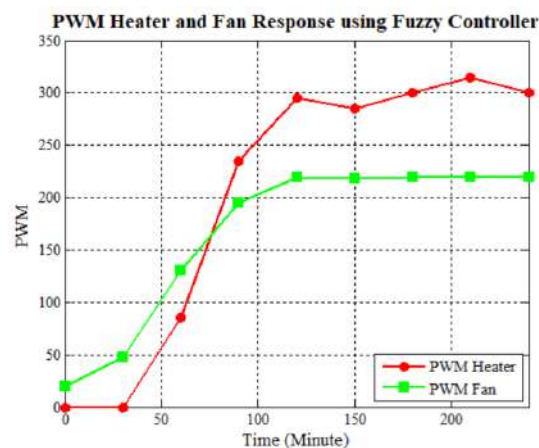
Berdasarkan Gambar 4.31, suhu ruang pengering meningkat secara bertahap dari 32,1°C hingga mencapai *setpoint* 60°C dalam waktu sekitar 90 menit. Kenaikan suhu berlangsung lebih lambat pada tahap awal karena sebagian energi panas digunakan untuk memanaskan ruang pengering sekaligus menguapkan kadar air cabai yang masih tinggi. Setelah mencapai *setpoint*, suhu dapat dipertahankan pada kisaran 59,9–60,1°C dengan fluktuasi yang sangat kecil dan tanpa *overshoot* yang signifikan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa metode *Fuzzy* mampu menyesuaikan keluaran *heater* dan kipas secara adaptif

sehingga suhu ruang pengering tetap stabil meskipun terjadi perubahan kondisi selama proses pengeringan.



Gambar 4. 32 Grafik RH terdapat Waktu

Berdasarkan Gambar 4.32, kelembaban relatif (RH) mengalami penurunan dari 49,7% pada awal proses menjadi sekitar 13,4% pada akhir pengeringan. Penurunan RH menunjukkan bahwa uap air di dalam ruang pengering semakin berkurang seiring berlangsungnya proses pengeringan. Meskipun demikian, pada menit ke-150 dan menit ke-210 RH sempat meningkat dari 13,8% menjadi 14,5% serta dari 13,6% menjadi 14,1%. Kondisi tersebut terjadi akibat proses evaporasi, yaitu ketika air dari bagian dalam cabai berpindah ke permukaan kemudian menguap sehingga sesaat meningkatkan kelembaban udara di dalam ruang pengering. Setelah uap air dikeluarkan melalui sirkulasi udara oleh kipas, nilai RH kembali menurun. Pola tersebut menunjukkan bahwa proses pelepasan kadar air cabai berlangsung secara kontinu hingga akhir proses pengeringan.



Gambar 4. 33 Grafik PWM Heater dan PWM Kipas

Berdasarkan Gambar 4.33, nilai PWM *heater* dan PWM kipas berubah mengikuti kondisi suhu dan kelembaban ruang pengering yang diproses oleh metode *Fuzzy*. Pada awal proses, PWM *heater* bernilai 0, yang menunjukkan *heater* bekerja pada daya maksimum untuk mempercepat kenaikan suhu, sedangkan PWM kipas meningkat secara bertahap dari 20 menjadi 220 guna memperlancar sirkulasi udara dan membantu proses penguapan kadar air. Setelah suhu mendekati *setpoint*, nilai PWM *heater* meningkat hingga berada pada kisaran 285–315, yang menunjukkan daya *heater* dikurangi secara bertahap agar suhu tidak terus meningkat. Sementara itu, PWM kipas tetap berada pada kisaran 218–220 untuk menjaga distribusi udara panas dan membantu mengeluarkan uap air dari ruang pengering. Perubahan kedua nilai PWM tersebut menunjukkan bahwa metode *Fuzzy* mampu menyesuaikan kerja *heater* dan kipas secara adaptif sesuai kondisi proses pengeringan sehingga suhu tetap berada di sekitar *setpoint*.

4.8.2 Pengujian Hasil Pengeringan Cabai

Pengujian hasil pengeringan cabai dilakukan untuk mengetahui efektivitas metode *Fuzzy* dalam menurunkan kadar air cabai selama proses pengeringan. Pengukuran kadar air dilakukan menggunakan sensor moisture kapasitif sebelum proses pengeringan dimulai dan setelah proses pengeringan selesai selama 4 jam. Selain itu, dilakukan pengamatan terhadap perubahan tingkat kekeringan cabai sebagai indikator keberhasilan proses pengeringan. Hasil pengujian pengeringan cabai menggunakan metode *Fuzzy* ditunjukkan pada Tabel 4.20.

Tabel 4. 20 Hasil Pengujian Pengeringan Cabai Menggunakan Metode *Fuzzy*

Parameter	Sebelum Pengeringan	Setelah Pengeringan
Lama Pengeringan	4 jam	
Suhu Rata-rata Ruang Pengering	32.1°C	60.0°C
RH Rata-rata Ruang Pengering	49.7%RH	13.4%RH
Kadar Air Cabai (Sensor <i>Moisture</i>)	78.5%	0%
Kondisi Cabai		

Berdasarkan Tabel 4.20, suhu rata-rata ruang pengering meningkat dari 32,1°C menjadi sekitar 60,0°C selama proses pengeringan berlangsung, sedangkan kelembaban relatif (RH) menurun dari 49,7%RH menjadi 13,4%RH. Penurunan RH menunjukkan bahwa udara di dalam ruang pengering semakin kering sehingga mampu mempercepat proses penguapan kadar air dari cabai. Hasil pengukuran menggunakan sensor *moisture* kapasitif menunjukkan kadar air cabai menurun dari 78,5% menjadi 0% setelah pengeringan selama 4 jam. Nilai 0% tersebut bukan menunjukkan kadar air absolut cabai, melainkan merupakan batas minimum pembacaan sensor pada objek cabai yang telah kering. Nilai tersebut telah berada di bawah batas kadar air maksimum cabai kering, yaitu sekitar 11%, sehingga menunjukkan bahwa proses pengeringan telah berlangsung dengan baik. Hasil ini juga menunjukkan bahwa metode *Fuzzy* mampu menjaga kondisi ruang pengering tetap stabil sehingga proses pelepasan kadar air berlangsung secara efektif dan menghasilkan cabai dengan tingkat kekeringan yang sesuai.

4.8.3 Pengujian Keseragaman Hasil Pengeringan

Pengujian keseragaman hasil pengeringan dilakukan untuk mengetahui tingkat pemerataan hasil pengeringan pada setiap rak setelah sistem menerapkan metode *Fuzzy*. Pengujian dilakukan dengan mengukur kadar air beberapa sampel cabai pada rak atas dan rak bawah menggunakan sensor *moisture* kapasitif setelah proses pengeringan selama 4 jam selesai. Hasil pengukuran kemudian dibandingkan untuk mengetahui apakah distribusi panas di dalam ruang pengering mampu menghasilkan tingkat kekeringan yang relatif seragam. Hasil pengujian keseragaman hasil pengeringan cabai menggunakan metode *Fuzzy* ditunjukkan pada Tabel 4.21. Pengujian ini juga digunakan untuk melihat perbedaan tingkat kekeringan antara posisi rak atas dan rak bawah setelah proses pengeringan berlangsung. Dengan membandingkan hasil kadar air dari masing-masing rak, dapat diketahui sejauh mana sistem mampu menjaga pemerataan proses pengeringan pada seluruh bagian ruang pengering. Hasil pengukuran tersebut selanjutnya menjadi acuan dalam mengevaluasi kemampuan sistem dalam menghasilkan pengeringan cabai yang merata pada setiap rak.

Tabel 4. 21 Pengujian Keseragaman Sampel Cabai pada Setiap Rak

Sampel	Rak Atas		Rak Bawah	
	Kadar Air (%)	Dokumentasi	Kadar Air (%)	Dokumentasi
1	5		2	
2	3		0	
3	0		0	
4	5		0	
5	0		3	
Rata-rata	2.6		1	

Berdasarkan Tabel 4.21, pembacaan sensor moisture kapasitif menunjukkan bahwa cabai pada rak bawah cenderung memiliki tingkat kekeringan yang lebih tinggi dibandingkan rak atas. Rata-rata pembacaan sensor pada rak atas sebesar 2,6%, sedangkan pada rak bawah sebesar 1%. Perbedaan ini dipengaruhi oleh posisi rak bawah yang lebih dekat dengan *heater* dan kipas sehingga menerima distribusi panas yang lebih besar. Meskipun demikian, terdapat beberapa sampel pada rak atas yang juga telah mencapai pembacaan 0%, menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan pengeringan yang relatif merata, meskipun masih terdapat sedikit pengaruh distribusi panas akibat posisi mekanik di dalam ruang pengering.

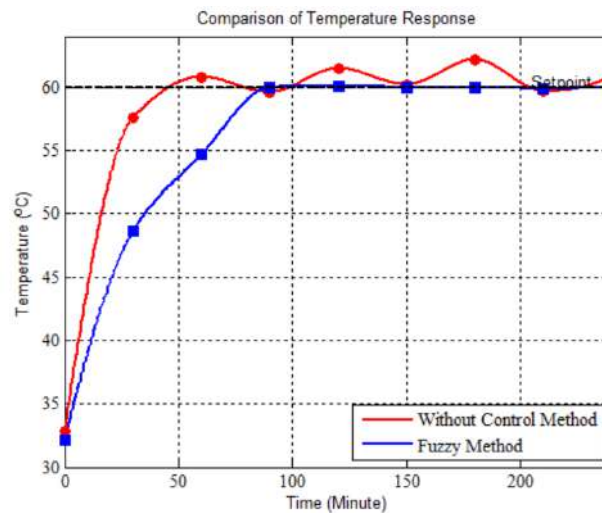
4.9 Analisis Perbandingan

Pada taap ini membahas analisis perbandingan antara sistem tanpa metode dan sistem yang menggunakan metode *Fuzzy*. Analisis dilakukan berdasarkan parameter respon sistem, kestabilan suhu, pengendalian kelembaban relatif (RH), waktu pengeringan, serta kualitas hasil pengeringan untuk mengetahui efektivitas metode yang diusulkan.

4.9.1 Analisis Respon Sistem

Analisis respon sistem dilakukan untuk membandingkan performa pengendalian suhu antara sistem tanpa metode dan sistem yang menggunakan metode *Fuzzy*. Parameter yang dibandingkan meliputi *rise time*, *settling time*, *overshoot*, dan *steady-state error*. Parameter-parameter tersebut digunakan untuk

mengevaluasi kemampuan sistem dalam mencapai dan mempertahankan suhu *setpoint* sebesar 60°C. Hasil perbandingan parameter respon sistem ditunjukkan pada Gambar 4.34 dan Tabel 4.22.



Gambar 4. 34 Grafik Respon Suhu Tanpa Metode dengan Menggunakan Metode

Berdasarkan Gambar 4.34, kurva respon suhu tanpa metode menunjukkan kenaikan suhu yang cepat, namun setelah mencapai *setpoint* masih terjadi fluktuasi yang cukup besar akibat *heater* hanya bekerja pada kondisi *ON* dan *OFF*. Sebaliknya, kurva metode *Fuzzy* memperlihatkan kenaikan suhu yang lebih bertahap, tetapi setelah mencapai *setpoint* suhu dapat dipertahankan pada kisaran 59,9–60,1°C dengan fluktuasi yang sangat kecil. Hasil ini menunjukkan bahwa metode *Fuzzy* lebih efektif dalam menjaga kestabilan suhu ruang pengering, sehingga mampu menciptakan kondisi pengeringan yang lebih konsisten dibandingkan sistem tanpa metode.

Tabel 4. 22 Perbandingan Respon Sistem

Parameter	Tanpa Metode	Fuzzy-PID Adaptive
<i>Rise Time</i>	±60 menit	±90 menit
<i>Settling Time</i>	Tidak tercapai	±90 menit
<i>Overshoot</i>	2,2°C (≈3,7%)	0,1°C (≈0,2%)
<i>Steady-State Error</i>	±1.5°C	±0.17°C

Berdasarkan Tabel 4.22, sistem tanpa metode memiliki *rise time* sekitar 60 menit, sedangkan metode *Fuzzy* membutuhkan sekitar 90 menit untuk mencapai

setpoint 60°C. Perbedaan tersebut terjadi karena pada sistem tanpa metode *heater* bekerja pada daya maksimum hingga suhu mencapai *setpoint*, sedangkan pada metode Fuzzy keluaran PWM *heater* dan PWM kipas diatur secara bertahap berdasarkan hasil inferensi *fuzzy* sehingga proses pemanasan berlangsung lebih halus.

Meskipun memiliki *rise time* yang lebih lama, metode Fuzzy menghasilkan performa pengendalian suhu yang lebih baik. Hal ini ditunjukkan oleh nilai *overshoot* yang hanya sebesar 0,1°C, sedangkan sistem tanpa metode mengalami *overshoot* hingga 2,2°C akibat mekanisme kontrol *ON-OFF* dan inersia termal pada elemen *heater*. Selain itu, metode Fuzzy mampu mempertahankan suhu tepat di sekitar *setpoint* dengan *steady-state error* sebesar 0,1°C, sedangkan sistem tanpa metode masih mengalami penyimpangan suhu sekitar ±1,5°C. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa metode Fuzzy mampu menghasilkan respon suhu yang lebih stabil selama proses pengeringan.

4.9.2 Analisis Hasil Pengeringan Cabai

Analisis hasil pengeringan dilakukan untuk membandingkan efektivitas sistem tanpa metode dan sistem yang menggunakan metode Fuzzy dalam menurunkan kadar air cabai serta menghasilkan tingkat pengeringan yang seragam. Perbandingan dilakukan berdasarkan kadar air akhir, kondisi fisik cabai, dan keseragaman hasil pengeringan pada kedua rak. Hasil perbandingan waktu pengeringan antara kedua sistem ditunjukkan pada Tabel 4.23.

Tabel 4. 23 Perbandingan Hasil Pengeringan Cabai

Parameter	Tanpa Metode	Metode Fuzzy
<i>Setpoint</i> Suhu	60°C	60°C
Kadar Air Awal	78.5%	78.5%
Kadar Air Akhir	8.2%	0%
Respon Suhu	Fluktuatif	Stabil
<i>Overshoot</i>	2,2°C	0,1°C
Steady State Error	±1.5°C	±0.17°C
Keseragaman Rak	Kurang merata	Lebih merata (selisih kadar air ±1%)

Berdasarkan Tabel 4.23 kedua sistem diuji dengan waktu pengeringan yang sama, yaitu selama 4 jam, sehingga perbedaan hasil yang diperoleh mencerminkan pengaruh metode pengendalian yang diterapkan. Pada sistem tanpa metode, pembacaan sensor moisture kapasitif masih menunjukkan kadar air sebesar 8,2%, sedangkan pada metode *Fuzzy* sensor telah menunjukkan pembacaan 0%. Nilai 0% tersebut bukan menunjukkan kadar air cabai benar-benar nol, melainkan batas minimum pembacaan sensor moisture kapasitif pada cabai yang telah mencapai kondisi kering.

Perbedaan hasil tersebut dipengaruhi oleh karakteristik pengendalian suhu pada masing-masing sistem. Sistem tanpa metode masih mengalami fluktuasi suhu akibat mekanisme ON-OFF dengan *overshoot* sebesar 2,2°C dan *steady-state error* sekitar $\pm 1,5^\circ\text{C}$. Fluktuasi tersebut menyebabkan proses perpindahan panas dan evaporasi air berlangsung kurang merata sehingga setelah 4 jam sebagian cabai masih memiliki kandungan air yang lebih tinggi. Sebaliknya, metode *Fuzzy* mampu mempertahankan suhu lebih dekat dengan *setpoint* dengan *overshoot* hanya sebesar 0,1°C dan *steady-state error* sebesar 0,17 °C. Kondisi suhu yang lebih stabil menghasilkan proses perpindahan panas yang lebih konsisten sehingga penguapan kadar air berlangsung lebih efektif.

Berdasarkan hasil pengamatan, cabai yang dikeringkan menggunakan metode *Fuzzy* juga memiliki tingkat kekeringan yang lebih seragam antara rak atas dan rak bawah dengan selisih kadar air sebesar 0,59%. Sementara itu, pada sistem tanpa metode masih dijumpai perbedaan tingkat kekeringan antar rak akibat distribusi panas yang kurang merata. Dengan waktu pengujian yang sama selama 4 jam, hasil tersebut menunjukkan bahwa metode *Fuzzy* mampu meningkatkan efektivitas proses pengeringan dibandingkan sistem tanpa metode. Apabila proses pengeringan tanpa metode dilanjutkan, cabai diperkirakan masih memerlukan waktu tambahan untuk mencapai tingkat kekeringan yang setara dengan metode *Fuzzy*.



Gambar 4. 35 Hasil Pengeringan Cabai Tanpa Metode



Gambar 4. 36 Hasil Pengeringan Cabai Menggunakan Metode

Berdasarkan Gambar 4.35 dan Gambar 4.36, hasil pengeringan cabai tanpa metode dan menggunakan *Fuzzy* memiliki tampilan yang relatif serupa. Namun, tingkat kekeringan cabai yang dikeringkan tanpa metode masih belum optimal sehingga diperkirakan masih memerlukan waktu pengeringan tambahan untuk mencapai kondisi yang setara. Sebaliknya, cabai yang dikeringkan menggunakan *Fuzzy* menunjukkan tingkat kekeringan yang lebih baik, ditandai dengan penyusutan yang lebih jelas akibat kandungan air yang lebih banyak teruapkan selama proses pengeringan. Hasil tersebut sejalan dengan pengujian kadar air, di mana metode *Fuzzy* mampu menghasilkan kadar air yang lebih rendah dibandingkan sistem tanpa metode pada durasi pengeringan yang sama.

4.10 Pembahasan

Pembahasan pada penelitian ini dilakukan untuk menginterpretasikan hasil pengujian yang telah diperoleh serta mengevaluasi kinerja sistem pengering cabai yang dirancang. Pembahasan tidak hanya difokuskan pada performa metode Fuzzy dalam meningkatkan kualitas pengendalian suhu, tetapi juga mencakup implementasi sistem secara keseluruhan, efektivitas proses pengeringan, serta perbandingan hasil penelitian dengan penelitian terdahulu. Dengan demikian, pembahasan ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai kontribusi metode yang diterapkan terhadap peningkatan performa sistem pengering cabai berbasis PLC dan ESP32.

4.10.1 Pembahasan Implementasi Sistem

Berdasarkan hasil implementasi, sistem pengering cabai berbasis PLC Mitsubishi FX3U dan ESP32 berhasil bekerja sesuai dengan perancangan. ESP32 berfungsi menjalankan metode Fuzzy dengan menggunakan nilai error suhu dan error kelembaban relatif (RH) sebagai masukan. Selanjutnya, proses fuzzifikasi, evaluasi rule base, dan defuzzifikasi menghasilkan nilai PWM *heater* dan PWM kipas yang kemudian dikirimkan ke PLC melalui komunikasi Modbus RTU. PLC menerima nilai PWM tersebut dan mengendalikan heater serta kipas secara otomatis sesuai kondisi ruang pengering.

Implementasi tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu menggabungkan keandalan PLC sebagai pengendali industri dengan fleksibilitas ESP32 dalam melakukan komputasi logika fuzzy. Hasil ini sejalan dengan penelitian Adedeji & Amosun (2023) yang menyatakan bahwa sistem berbasis PLC memiliki keandalan tinggi dalam pengendalian suhu serta mudah diintegrasikan dengan sistem monitoring. Selain itu, hasil implementasi juga menunjukkan bahwa metode *Fuzzy* mampu menghasilkan pengendalian heater dan kipas secara adaptif berdasarkan perubahan suhu dan kelembaban relatif di dalam ruang pengering, sehingga sistem dapat menyesuaikan kondisi pengeringan secara otomatis tanpa memerlukan model matematis sistem yang kompleks.

4.10.2 Pembahasan Performa Sistem

Berdasarkan hasil pengujian, penerapan metode *Fuzzy Sugeno* memberikan performa pengendalian suhu yang lebih baik dibandingkan sistem tanpa metode. Sistem tanpa metode memiliki *rise time* sekitar 60 menit, namun tidak mampu mencapai kondisi tunak karena suhu terus berfluktuasi akibat mekanisme kontrol ON–OFF. Sebaliknya, sistem dengan metode *Fuzzy* memerlukan waktu sekitar 90 menit untuk mencapai *setpoint* 60°C dan berhasil mencapai *settling time* pada waktu yang hampir sama. Meskipun waktu menuju *setpoint* lebih lama, metode *Fuzzy* menghasilkan proses pemanasan yang lebih bertahap sehingga suhu dapat dipertahankan pada rentang 59,9–60,1°C dengan *overshoot* hanya 0,1°C ($\approx 0,2\%$) dan *steady-state error* sebesar $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa metode *Fuzzy* mampu menghasilkan respon yang lebih stabil dibandingkan sistem tanpa metode yang masih mengalami *overshoot* sebesar 2,2°C ($\approx 3,7\%$) dan *steady-state error* sekitar $\pm 1,5^\circ\text{C}$.

Peningkatan performa tersebut menunjukkan bahwa pengendalian berbasis *Fuzzy Sugeno* mampu menyesuaikan keluaran PWM *heater* dan PWM kipas secara adaptif berdasarkan perubahan *error* suhu dan *error* kelembaban relatif, sehingga proses pemanasan berlangsung lebih halus dan fluktuasi suhu dapat diminimalkan. Hasil ini sejalan dengan penelitian Azis dan Sinadia (2024), Ramli dkk. (2024), serta Ananta dkk. (2024) yang menyatakan bahwa logika fuzzy mampu meningkatkan kestabilan sistem pengering melalui penyesuaian aksi kendali secara adaptif. Perbedaannya, penelitian ini menerapkan *Fuzzy Sugeno* dengan dua keluaran berupa PWM *heater* dan PWM kipas yang diimplementasikan pada sistem berbasis PLC Mitsubishi FX3U dan ESP32 melalui komunikasi Modbus RTU. Pendekatan tersebut menghasilkan proses kendali yang sederhana untuk diimplementasikan sekaligus mampu menjaga suhu pengering tetap stabil selama proses pengeringan berlangsung.

4.10.3 Pembahasan Hasil Pengeringan

Selama proses pengeringan, peningkatan suhu menyebabkan kadar air di dalam cabai mengalami evaporasi sehingga nilai kelembaban relatif (RH) ruang

pengering cenderung menurun. Pada beberapa interval pengujian, RH kembali meningkat akibat uap air yang dilepaskan cabai selama proses pengeringan. Meskipun demikian, metode *Fuzzy* mampu mempertahankan suhu di sekitar *setpoint* sehingga proses evaporasi berlangsung lebih stabil dibandingkan sistem tanpa metode.

Pengujian kadar air menunjukkan bahwa kedua sistem mampu menurunkan kadar air cabai hingga berada di bawah batas yang direkomendasikan. Namun, pada durasi pengeringan yang sama, yaitu 4 jam, sistem *Fuzzy* menghasilkan tingkat kekeringan yang lebih tinggi dibandingkan sistem tanpa metode. Hal ini menunjukkan bahwa kestabilan suhu memberikan pengaruh terhadap efektivitas proses pelepasan air dari cabai. Selain itu, tingkat penyusutan cabai pada sistem *Fuzzy* tampak lebih jelas, yang menunjukkan bahwa proses pengeringan berlangsung lebih optimal.



Gambar 4. 37 Cabai Kering di Pasar



Gambar 4. 38 Cabai Kering Hasil Pengeringan Menggunakan Metode Fuzzy
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Berdasarkan Gambar 4.37 dan Gambar 4.38, secara visual cabai hasil pengeringan pada penelitian memiliki warna merah yang masih relatif cerah dibandingkan cabai kering komersial yang dijual di pasaran, yang cenderung berwarna merah tua hingga kecokelatan. Perbedaan tersebut diduga dipengaruhi oleh perbedaan metode pengeringan, suhu operasi, lama proses pengeringan, maupun kondisi penyimpanan produk komersial yang tidak diketahui secara pasti.

Oleh karena itu, perbandingan visual ini hanya digunakan sebagai ilustrasi karakteristik hasil pengeringan dan bukan sebagai dasar evaluasi kuantitatif kualitas produk. Evaluasi keberhasilan sistem pada penelitian ini tetap mengacu pada hasil pengujian kestabilan suhu, kadar air akhir cabai, serta keseragaman hasil pengeringan antar rak yang telah dibahas pada subbab sebelumnya.

4.10.4 Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Secara umum, hasil penelitian ini mendukung penelitian-penelitian sebelumnya mengenai penerapan logika *fuzzy* pada sistem pengering. Penelitian Feno Tandigu dkk. (2022) menunjukkan bahwa sistem kontrol suhu otomatis mampu menjaga suhu pengering sesuai *setpoint*, sedangkan Azis dan Sinadia (2024) membuktikan bahwa metode *fuzzy* dapat diterapkan pada proses pengeringan cabai untuk meningkatkan kualitas pengendalian. Selain itu, Ramli dkk. (2024) serta Ananta dkk. (2024) menunjukkan bahwa logika *fuzzy* efektif menghasilkan pengendalian suhu dan kelembaban yang lebih adaptif dibandingkan metode konvensional, terutama pada sistem yang memiliki karakteristik nonlinier.

Penelitian ini mengembangkan konsep tersebut dengan menerapkan metode Fuzzy Sugeno yang menggunakan dua variabel masukan, yaitu *error* suhu dan *error* kelembaban relatif (RH), untuk menghasilkan dua keluaran berupa PWM *heater* dan PWM kipas. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya menggunakan Fuzzy Mamdani atau diimplementasikan pada sistem berbasis mikrokontroler, penelitian ini mengintegrasikan ESP32 sebagai pemroses algoritma fuzzy dengan PLC Mitsubishi FX3U sebagai pengendali utama melalui

komunikasi Modbus RTU, sehingga lebih sesuai untuk aplikasi otomasi industri. Berdasarkan hasil pengujian, sistem mampu mempertahankan suhu pada kisaran 59,9–60,1°C, dengan *overshoot* sebesar 0,1°C ($\approx 0,2\%$) dan *steady-state error* sebesar $\pm 0,17^\circ\text{C}$, sehingga menghasilkan proses pengeringan yang lebih stabil serta tingkat kekeringan cabai yang lebih baik dibandingkan sistem tanpa metode.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini merupakan tahapan akhir dari Tugas Akhir yang berisi kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan serta saran untuk pengembangan penelitian berikutnya berdasarkan topik Tugas Akhir ini. Kesimpulan yang disajikan merangkum temuan utama dan implikasi dari penelitian ini, sementara saran yang diberikan bertujuan untuk memberikan panduan bagi peneliti selanjutnya yang tertarik untuk melanjutkan atau mengembangkan topik penelitian ini lebih lanjut.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan analisa pengujian pada Tugas Akhir ini dapat disimpulkan bahwa:

1. Sistem kendali *Fuzzy* pada mesin pengering cabai berbasis PLC Mitsubishi FX3U dan ESP32 berhasil dirancang dan diimplementasikan. ESP32 berhasil mengolah nilai *error* suhu dan *error* kelembaban relatif (RH) menggunakan metode *Fuzzy* Sugeno untuk menghasilkan keluaran PWM *heater* dan PWM kipas, kemudian mengirimkan data tersebut ke PLC melalui komunikasi Modbus RTU. PLC mampu mengendalikan *heater* dan kipas secara otomatis sehingga suhu ruang pengering dapat dipertahankan di sekitar *setpoint* 60°C dengan *overshoot* sebesar 0,1°C dan *steady-state error* sebesar 0,17°C.
2. Integrasi sensor SHT20, sensor PT100, sensor moisture kapasitif, PLC, ESP32, dan HMI berhasil diterapkan pada sistem pengering cabai. Sistem mampu memantau suhu, kelembaban relatif (RH), dan kadar air cabai secara *real-time*, serta menyesuaikan keluaran *heater* dan kipas berdasarkan hasil inferensi metode *Fuzzy*. Meskipun terjadi perubahan RH akibat proses evaporasi selama pengeringan, sistem tetap mampu mempertahankan suhu mendekati *setpoint* sehingga proses pengeringan berlangsung secara otomatis dan stabil.
3. Penerapan metode *Fuzzy* mampu meningkatkan performa pengeringan dibandingkan sistem tanpa metode. Metode *Fuzzy* menghasilkan respon

pemanasan yang lebih bertahap dengan *rise time* sekitar 90 menit dan *settling time* sekitar 90 menit, namun mampu menjaga suhu jauh lebih stabil dibandingkan sistem tanpa metode yang tidak mencapai kondisi tunak. *Overshoot* berhasil ditekan menjadi 0,1°C dibandingkan 2,2°C pada sistem tanpa metode, sedangkan *steady-state error* menurun menjadi $\pm 0,1^\circ\text{C}$ dibandingkan $\pm 1,5^\circ\text{C}$. Pada durasi pengeringan yang sama, yaitu 4 jam, seluruh sampel cabai berhasil mencapai kadar air di bawah 10%, dengan beberapa sampel menunjukkan pembacaan 0% yang menandakan telah mencapai batas ukur minimum sensor moisture. Selain itu, hasil pengujian menunjukkan rata-rata kadar air sebesar 2,6% pada rak atas dan 1% pada rak bawah. Meskipun masih terdapat perbedaan akibat posisi rak terhadap *heater* dan kipas, seluruh sampel telah memenuhi kriteria cabai kering sehingga sistem mampu menghasilkan tingkat pengeringan yang relatif seragam pada kedua rak.

5.2 Saran

Dari hasil percobaan yang telah dilakukan, terdapat beberapa hal yang harus ditingkatkan untuk memaksimalkan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Menambahkan titik pengukuran suhu dan kelembaban pada beberapa posisi di dalam ruang pengering serta mengoptimalkan tata letak *heater* dan kipas agar distribusi panas lebih merata sehingga keseragaman hasil pengeringan dapat ditingkatkan.
2. Menggunakan alat ukur kadar air standar (*moisture analyzer*) atau sensor kadar air dengan rentang pengukuran yang lebih luas sebagai pembanding terhadap sensor *moisture* kapasitif sehingga hasil pengukuran kadar air dapat divalidasi dengan lebih akurat.
3. Melakukan pengujian menggunakan kapasitas cabai yang lebih besar maupun komoditas pertanian lainnya untuk mengevaluasi performa metode *Fuzzy* pada kondisi operasi yang lebih beragam.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdussamad, S., Husain, Z., & Manyoe, I. N. (2022). Analisis sistem pengeringan cabai berbasis teknologi buatan untuk efisiensi pascapanen. *Jurnal Teknologi Pertanian*, 14(2), 88–95.
- Adedeji, W. O., & Amosun, T. S. (2023). *Design of a PLC based temperature controlled system*. R.E.M. (Rekayasa Energi Manufaktur) Jurnal, 8(2), 93–100.
- Aji, B. L., & Susilo, K. E. (2021). Sistem Kontrol Kemudi Kapal Berbasis Scada Menggunakan Aplikasih Cx Programmer Dan Easybuilder. *Jurnal SAINTEKOM*, 11(1), 44–51.
- Anang, M., dkk. (2021). Rancang bangun alat pengering cabai sistem tubular heater memanfaatkan energi surya. *Jurnal Publikasi Teknik*, 9(1), 112–120.
- Ananta, dkk. (2024). *Design of Temperature and Humidity Control System for Cocoa Bean Dryer Using Fuzzy Mamdani Method*. Batrisya Journal.
- Ardiansyah, T. A., & Risfendra, R. (2020). Rancangan Sistem Mounting Device Berbasis PLC Menggunakan HMI. *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, 1(2), 49–54.
- Azis, A., & Sinadia, R. (2024). *Pengeringan Cabai dengan Alat Pengering Bertenaga Hibrid Surya dan Gas Menggunakan Sistem Kontrol Fuzzy Expert*. JTECH: Journal Technology.
- Badan Perencanaan Pembangunan, Penelitian, dan Pengembangan Provinsi Sumatera Utara. (2025). *Cabai merah, komoditas yang kerap memicu gelombang besar dalam perekonomian*. diakses dari https://bappelitbang.sumutprov.go.id/berita/read/cabai-merah-komoditas-yang-kerap-memicu-gelombang-besar-dalam-perekonomian?utm_source (diakses pada 25 Desember 2025)
- Evania, R., dkk. (2022). Dampak paparan sinar UV dan kontaminasi pada metode pengeringan tradisional cabai di Indonesia. *Jurnal Riset Teknologi Industri*, 16(1), 45–53.

- Fatwa, M., Rizki, R., Sriwinarty, P., & Supriyadi, E. (2022). Pengaplikasian Matlab pada Perhitungan Matriks. *Papanda Journal of Mathematics and Science Research*, 1(2), 81–93.
- Feno Tandigu, dkk. (2022). Rancang Bangun Oven Pengering Cabai Dilengkapi Kontrol Suhu Otomatis. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Teknik Mesin*, Vol. 8 No. 2.
- Hidayat, A. J., Marzuki, I., & Wicaksono, I. (2022). Rancang Bangun Pengendali Temperature Berbasis Arduino Uno Pada Ketel UAP di Pabrik Gula Wonolangan. *Jurnal JISE*, 1(1), 17–22.
- JPNN.com. (2025). *Tren makanan pedas meningkat, FKS bidik Generasi Z*. diakses dari <https://www.jpnn.com/news/tren-makanan-pedas-meningkat-fks-bidik-generasi-z?> (diakses pada 25 Desember 2025).
- Kementerian Pertanian Republik Indonesia. (2024). *Laporan Kinerja Kementerian Pertanian Tahun 2024*. Kementerian Pertanian Republik Indonesia.
- Kustiawan, Eko. Meningkatkan efisiensi peralatan dengan menggunakan solid state relay (SSR) dalam pengaturan suhu pack preheating oven (PHO). *Jurnal STT Yuppentek*, 2018, 9.1: 1-6.
- Metzger, K. (n.d.). imc - Measuring temperature with Resistance Temperature Detectors (RTD) (e.g., Pt100) and thermocouples.
- Muammar, dkk. (2025). Karakteristik fisiologis pascapanen cabai merah dan metode dehidrasi terkontrol. *Jurnal Ilmiah Teknik Pertanian*, 17(1), 12–20.
- Nipu, Y., Suhartono, S., & Mahardiananta, I. M. A. (2022). Rancang Bangun Alat Pembersih Ultrasonik Berbasis Arduino Dilengkapi Pemanas dan Drainase. *Jurnal RESISTOR (Rekayasa Sistem Komputer)*, 5(2), 105–115.
- Puji Astuti, S. (2020). Pemanfaatan Software Matrix Laboratory (Matlab) Untuk Meningkatkan Minat Belajar Mahasiswa Dalam Pembelajaran Fisika Kinematika. *Jurnal Pendidikan Berkarakter*, 3(2), 54–57.
- Radar Jogja. (2024, 15 Oktober). *Petani jangan jemur cabai langsung di bawah matahari, ini saran DP3 Sleman*. Radar Jogja. Diakses dari <https://radarjogja.jawapos.com/sleman/655196757/petani-jangan-jemur->

- cabai-langsung-di-bawah-matahari-ini-saran-dp3-sleman (diakses pada 29 November 2025).
- Ramli, Amin, & Munir. (2024). *Pembuatan Sistem Kontrol Fuzzy Logic pada Mesin Pengering*. Syntax Literate: Jurnal Ilmiah Indonesia.
- Sensirion AG, “Digital Humidity Sensor SHT2x (RH/T),” Online, 2014. [Online]. Available: http://www.sensirion.com/en/01_humidity_sensors/05_humidity_sensor_sht21/00_humidity_sensor_sht21.html. [Accessed: 27 Desember 2025].
- SIAL Paris. (2025). *Turning up the heat: Why spicy food and hot sauces are on fire*. diakses dari <https://www.sialparis.com/en/trends/News/why-spicy-food-and-hot-sauces-are-on-fire?> (diakses pada 25 Desember 2025)
- Sitorus, H. F., Harahap, R., Armansyah, & Yusniati. (2023). Rancang Bangun Sistem Kontrol Smarthome Berbasis PLC. *Journal of Electrical Technology*, 8(1), 23–27.
- Sutrisno, dkk. (2024). Desain sistem pengering cabai otomatis dengan efisiensi waktu berbasis kontrol suhu konstan. *Jurnal Mekatronika dan Otomasi*, 8(4), 150–158.
- Tresna Umar Syamsuri, Abdul Manaf, Harrij Mukti K, Ruwah Joto, & Sigi Syah Wibowo. (2020). Pelatihan Starting Motor Y/D Menggunakan Plc Pengajar Teknik Otomasi Industri Smk Muhammadiyah 1 Kepanjen. *Jurnal Pengabdian Polinema Kepada* <https://doi.org/10.33795/jppkm.v7i2.42>
- Universitas Muhammadiyah Surabaya. (2025, 20 Desember). *Mahasiswa UMSURA bantu petani Desa Supiturang pascabencana Semeru lewat Dryer Reborn dan lampu surya*. diakses dari <https://www.um-surabaya.ac.id/news/mahasiswa-umsura-bantu-petani-desa-supiturang-pascabencana-semeru-lewat-dryer-reborn-dan-lampu-surya?> (diakses pada 25 Desember 2025)
- Vida, dkk. (2021). Rancang bangun mesin pengering cabai otomatis untuk meningkatkan produktivitas petani lokal. *Jurnal Pengabdian Teknologi*, 5(2), 90–98.

Wahyu, dkk. (2024). Pengaruh kontrol suhu presisi terhadap masa simpan produk hortikultura kering. *Jurnal Sains dan Teknologi*, 12(1), 66–74.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Biodata Mahasiswa

BIODATA MAHASISWA

1. Nama : Rachmadian Sukhoirine
2. NRP : 0922040068
3. Program Studi : D4 - Teknik Otomasi
4. Agama : Islam
5. Status : Belum Menikah
6. Alamat Asal : Bendungrejo RT 04 RW 13, Jogoroto, Jombang
7. Nomor Telepon : 081331927546
8. Jenis Kelamin : Perempuan
9. Email : rachmadian0104@gmail.com
10. Tempat, Tanggal Lahir : Magetan, 07 November 2003
11. Nama Orang Tua/Wali : Pipit Fitriadi
12. Alamat Orang Tua/Wali : Bendungrejo RT 04 RW 13, Jogoroto, Jombang
13. Telepon Orang Tua/Wali : 08121736132
14. Riwayat Pendidikan :



Pendidikan Formal			
Pendidikan	Tahun	Tempat Pendidikan	Jurusan
Diploma 4	2022 - 2026	Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya	Teknik Otomasi
SMA	2019 – 2022	SMAN Jogoroto	MIPA
SMP	2016 – 2019	SMPN 1 Jogoroto	-
SD	2010 - 2016	SDN Gedangan	-