

**IMPLEMENTASI LOGIKA FUZZY PADA PLAT PEMANAS SOLDER
DENGAN METODE *REFLOW* UNTUK MENINGKATKAN AKURASI
SUHU PENSOLDERAN**

Tesis S-2

Disusun untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar Magister Teknik
Program Studi Magister Teknik Elektro Universitas Islam Sultan Agung Semarang.



Disusun Oleh:
Purbo Tri Prakoso
20602200012

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG
2025**

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

IMPLEMENTASI LOGIKA FUZZY PADA PLAT PEMANAS SOLDER DENGAN METODE *REFLOW* UNTUK MENINGKATKAN AKURASI SUHU PENSOLDERAN

Yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Purbo Tri Prakoso

NIM : 20602200012

Telah dipertahankan di depan Dewan Penguji

Pada Tanggal : 29 Agustus 2025

Susunan Dewan Penguji dan Pembimbing

Pembimbing 1

Dr. Bustanul Arifin, ST., MT

NIDN : 0614117701

Penguji 1

Prof. Dr. Ir. Sri Arttini Dwi P, M.Si

NIDN : 0620026501

Pembimbing 2

Ir. Survani Alifah, MT., Ph.D

NIDN : 0625036901

Penguji 2

Dr. Eka Nurvanto Budisusila, ST., MT

NIDN : 0619107301

Penguji 3

Dr. Ir. Agus Adhi Nugroho, MT

NIDN : 0628086501

Tesis ini telah disetujui sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar
Magister Teknik

Tanggal : 29 Agustus 2025

Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro

Prof. Dr. Ir. Sri Arttini Dwi Prasetyowati, M.Si

NIDN : 0620026501

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Purbo Tri Prakoso

NIM : 20602200012

Program Studi : Magister Teknik elektro

Fakultas : Teknologi Industri

Dengan ini saya menyatakan bahwa Tesis yang diajukan kepada Program Studi Magister Teknik Elektro dengan judul :

IMPLEMENTASI LOGIKA FUZZY PADA PLAT PEMANAS SOLDER DENGAN METODE REFLOW UNTUK MENINGKATKAN AKURASI SUHU PENSOLDERAN

Adalah hasil karya sendiri, judul tersebut belum pernah diajukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Magister Teknik Elektro Universitas Islam Sultan Agung (UNISSULA) ataupun pada universitas lain serta belum pernah dipublikasikan dalam bentuk apapun dan dalam media manapun. Jika ditemukan dikemudian hari data/fakta bahwa Tesis ini adalah milik saya, segala bentuk kesalahan dan ketidakbenaran dalam Tesis ini adalah tanggung jawab saya. Pernyataan ini saya buat dengan sadar dan penuh tanggung jawab.

Semarang, 29 Agustus 2025

Yang Menyatakan



Purbo Tri Prakoso

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Purbo Tri Prakoso
NIM : 20602200012
Program Studi : Magister Teknik Elektro
Fakultas : Teknologi Industri

Dengan ini menyatakan Karya Ilmiah berupa Tesis S-2 dengan Judul : **Implementasi Logika Fuzzy pada Plat Pemanas Solder dengan Metode Reflow untuk Meningkatkan Akurasi Suhu Pensolderan**

Menyetujui menjadi hak milik Universitas Islam Sultan Agung serta memberikan Hak bebas Royalti Non-Eksklusif untuk disimpan, dialihmediakan, dikelola dan pangkalan data dan dipublikasikan diinternet dan media lain untuk kepentingan akademis selama tetap menyantumkan nama penulis sebagai pemilik hak cipta. Pernyataan ini saya buat dengan sungguh-sungguh. Apabila dikemudian hari terbukti ada pelanggaran Hak Cipta/Plagiatisme dalam karya ilmiah ini, maka segala bentuk tuntutan hukum yang timbul akan saya tanggung secara pribadi tanpa melibatkan Universitas Islam Sultan agung.

Semarang, 29 Agustus 2025

Yang Menyatakan

Purbo Tri Prakoso

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum warahmatullahi wabarakatuh

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas rahmat, karunia, serta hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “Implementasi Logika Fuzzy pada Plat Pemanas Solder dengan Metode Reflow untuk Meningkatkan Akurasi Suhu Pensolderan”. Penulis menyadari bahwa penyusunan tesis ini tidak akan terwujud tanpa adanya bimbingan, dukungan, dan doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Ir. Sri Artini Dwi Prasetrowati, M.Si selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro Universitas Islam Sultan Agung.
2. Bapak Dr. Bustanul Arifin, ST, MT, selaku Dosen Pembimbing 1, yang telah membimbing serta motivasi yang tak ternilai selama proses penelitian hingga penyusunan tesis ini selesai.
3. Ibu Ir. Suryani Alifah, MT, Ph.D. selaku Dosen Pembimbing 2, yang telah membimbing serta motivasi yang tak ternilai selama proses penelitian hingga penyusunan tesis ini selesai.
4. Bapak dan Ibu Dosen Penguji, yang telah memberikan saran, kritik, dan pertanyaan yang membangun demi perbaikan isi tesis ini.
5. Kedua orang tua tercinta, Ayahanda Idris Syamsuri dan Ibunda Sri Hastuti, yang senantiasa memberikan doa yang tiada henti.
6. Istri tercinta, Wiwin Ismawati yang selalu mendukung dalam suka dan duka.
7. Semua Teman satu angkatan Magister Teknik Elektro Universitas Islam Sultan Agung tahun ajaran 2022.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa tesis ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, segala bentuk kritik dan saran yang membangun akan penulis terima dengan lapang dada. Akhir kata, penulis berharap semoga tesis ini dapat memberikan

manfaat dan kontribusi bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam bidang sistem kendali suhu, serta dapat menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya

Semarang, 29 Agustus 2025

Yang Menyatakan



Purbo Tri Prakoso

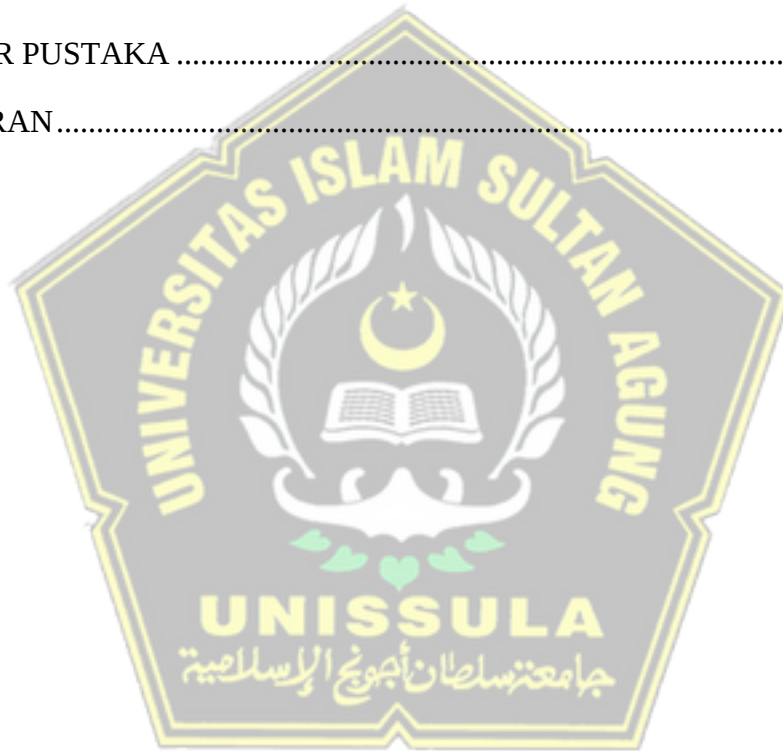


DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Manfaat Penelitian	5
1.6 Kontribusi Tesis	5
1.7 Keaslian Penelitian	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Tinjauan Pustaka	7
2.2 Landasan Teori	7
2.2.1 Solder	10
2.2.2 Logika Fuzzy	16
2.3 Hipotesis	23
BAB III DESAIN PENELITIAN	22

3.1	Tahapan Penelitian	22
3.2	Analisis Kebutuhan	22
3.3	Parameter Penelitian.....	23
3.4	Perancangan Model	24
3.4.1	Perancangan Perangkat Keras.....	25
3.4.1.1	Desain Fisik Sistem Kendali Solder	26
3.4.1.2	Desain Sensor Suhu	27
3.4.1.3	Desain Sensor Arus AC	28
3.4.1.4	Desain Sensor Arus DC	29
3.4.1.5	Desain Zero Cross Detector.....	30
3.4.1.6	Desain Driver Kipas Pendingin	31
3.4.1.7	Desain Pemanas Solder	32
3.4.1.8	Driver Pemanas Solder	33
3.4.1.9	Desain Kipas Pendingin.....	34
3.4.2	Perancangan Software.....	35
3.4.2.1.	Proses Penalaran Mesin (Inference Engine)	59
3.5	Pengujian dan Analisa	64
BAB IV HASIL DAN PENGUJIAN.....		70
4.1	Pengujian Alat	70
4.1.1.	Pengujian Sensor.....	70
4.1.2.	Pengujian Plat Pemanas	77
4.1.3.	Pengujian Kipas Pendingin	78
4.2	Analisis dan Pembahasan Hasil Pengujian Alat.....	86

4.2.1. Analisis dan Pembahasan Pengujian Sensor	86
4.2.2. Analisis dan Pembahasan Pengujian Plat Pemanas	90
4.2.3. Analisis dan Pembahasan Pengujian Kipas Pendingin.....	91
BAB V KESIMPULAN.....	93
5.1. Kesimpulan.....	93
5.2. Saran.....	94
DAFTAR PUSTAKA	96
LAMPIRAN.....	100



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Visualisasi penempatan dalam proses penyolderan komponen SMD ...	10
Gambar 2.2 Pembagian zona suhu berdasarkan waktu operasi	12
Gambar 2.3 a). Visualisasi sambungan komponen dengan printed circuit board (PCB) sebelum dilakukan proses penyolderan. b). Visualisasi sambungan komponen dengan printed circuit board (PCB) sebelum dilakukan proses penyolderan.....	13
Gambar 2.4 Pemanas PTC	14
Gambar 2.5 Hubungan antara resistansi, suhu dan daya pada pemanas PTC. Hubungan antara resistansi, suhu dan daya pada pemanas PTC.	15
Gambar 2.6 Fungsi keanggotaan (membership function)	20
Gambar 3.1 Alur Kerja Penelitian	22
Gambar 3.3 Diagram Blok Perancangan Alat	25
Gambar 3.4 Desain Tampak Depan Solder Plat Panas.....	26
Gambar 3.5 Desain Plat Alimunium Dan Pemasangan Pemanas PTC	32
Gambar 3.7 Wiring Sensor Tegangan dan Arus.....	29
Gambar 3.8 ThermocoupeL Tipe K.....	27
Gambar 3.9 Pengondisian Sinyal ThermocoupeL Tipe K.....	28
Gambar 3.12 Flowchart Sistem Kendali Logika Fuzzy	37
Gambar 3.13 Desain model logika fuzzy	38
Gambar 3.14 Fungsi Keanggotaan	39
Gambar 3.15 Derajat Keanggotaan Positif	39
Gambar 3.16 Derajat Keanggotaan Negatif	40
Gambar 3.17 Ruas trapesium untuk masukan dengan simpangan error negatif.	40
Gambar 3.19 Ruas segitiga untuk masukan dengan simpangan error positif.....	44

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi Kipas AUB0912VH.....	35
Tabel 3. 2 Simulasi Nilai μ (negatif).....	42
Tabel 3. 3 Simulasi nilai μ (sesuai)	43
Tabel 3. 4 Simulasi Nilai μ (positive).	46
Tabel 3. 5 Simulasi Nilai μ (kecil)	48
Tabel 3. 6 Simulasi nilai μ (sedang).....	50
Tabel 3. 7 Simulasi Nilai μ (besar).....	52
Tabel 3. 8 Simulasi Nilai μ (kecil)	54
Tabel 3. 9 Simulasi nilai μ (sedang).....	56
Tabel 3. 10 Simulasi Nilai μ (besar).....	58
Tabel 3.11 Penalaran Sistem Kendali Solder	59
Tabel 4. 1 Hasil Pengujian Sensor Suhu	71
Tabel 4. 3 Tabel Hasil Pengujian Sensor Arus ACS 712.....	72
Tabel 4. 4 Tabel Hasil Pengujian Sensor Arus AC Pada PZEM 004.....	73
Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Plat Pemanas Berdasarkan Waktu	77

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan *printed circuit board* (PCB) banyak ditemukan pada sebagian besar perangkat elektronik [1]. Produk *printed circuit board* (PCB) banyak digunakan pada sistem elektronik modern seperti ponsel dan komputer. Perkembangan penggunaan *printed circuit board* (PCB) cukup pesat semenjak teknologi pemasangan komponen yang biasa disebut dengan *surface mounting technology* (SMT) dalam perakitan *printed circuit board* (PCB) yang terus dikembangkan pada pengecilan ukuran dari komponen yang digunakan sehingga jumlah komponen yang lebih banyak dalam satu *printed circuit board* (PCB) [2]. Salah satu hal penting dalam proses produksi perangkat elektronik adalah pada proses penyolderan *printed circuit board* (PCB) yang umumnya menggunakan teknik *reflow* yang menentukan hasil akhir pada perakitan *printed circuit board* (PCB) [3]. Dalam proses *reflow* terdapat empat tahap dalam melakukan penyolderan yakni *preheat zone*, *thermal soak zone*, *reflow zone* dan *cooling zone* [4]. Proses pensolderan dengan metode *reflow* sangat krusial karena nilai titik suhu maksimal yang cukup tinggi dan pada tahapan tertentu mendekati nilai suhu yang dapat merusak komponen, maka pada umumnya dalam proses penyolderan *reflow* memiliki toleransi suhu yang kecil, yakni sekitar lima derajat celcius untuk ke semua tahapannya. Kerusakan komponen ini dikarenakan timah-perak-tembaga yang umumnya digunakan memiliki titik leleh yang tinggi (suhu yang digunakan pada solder *reflow* puncaknya sekitar 220°C yang mendekati suhu yang dapat merusak komponen elektronika) sedangkan timah solder *reflow* yang digunakan (suhu leleh timah solder *reflow* mulai 183°C), oleh karena itu cara pemanasan dengan teknik *reflow* membutuhkan sistem optimasi untuk menghindari suhu berlebihan pada komponen *surface mount device* (SMD) dan *printed circuit board* (PCB) [5].

Upaya pengembangan solder dengan metode *reflow* umumnya dikendalikan dengan algoritma tertentu seperti algoritma *proportional integral derivative* (PID) dan algoritma genetika. Dalam penelitian yang sudah dilakukan oleh Tsung-Nan Tsai dengan judul *Thermal parameters optimization of a reflow soldering in printed circuit board assembly* mengungkapkan bahwa “*genetic algorithm* (GA) merupakan pencarian heuristic adaptif yang dapat memecahkan masalah secara global. Dalam metode ini terinspirasi dari mekanisme alam dan genetika dalam sistem manusia” [1]. Pendekatan algoritma lainnya seperti penggunaan *proportional integral derivative* (PID) seperti penelitian yang dilakukan oleh Johanes Prihandono dengan judul penelitian Pengaturan suhu dengan menggunakan control PID menjelaskan bahwa “Pengendali PID adalah sistem pengendali gabungan antara pengendali proporsional, integral, dan turunan (derivative). Performansi sistem pengendali PID ditentukan oleh parameter kendali yang didapat dari perhitungan maupun eksperimen. Parameter PID optimal pada dasarnya dapat dicari secara lebih pasti (tanpa coba-coba) berdasarkan model dan nilai parameter proses yang diketahui” [6] adapula penelitian yang dilakukan oleh P. Singhala dengan judul *Temperature control using fuzzy logic*, dalam penelitian tersebut P. Singhala mengungkapkan bahwa “logika fuzzy bukan sebagai metodologi kontrol, tetapi sebagai metode memproses data dengan mengizinkan keanggotaan yang ditetapkan sebagian alih-alih non-keanggotaan” [7]. Dari beberapa sistem kendali yang telah dijelaskan diatas setiap algoritma memiliki kekurangan dan kelebihan, seperti pada penggunaan *genetic algorithm* (GA) memiliki kekurangan dimana perlunya percobaan yang banyak untuk mendapatkan persamaan yang diharapkan. Keberhasilan *genetic algorithm* didapat dari mengevaluasi parameter yang sudah ditentukan dengan melihat hasil yang paling baik, pengembangannya dilakukan dengan melakukan pencarian solusi dengan pertimbangan probabilitas terbaik dari perbaikan data melalui seleksi, pengelompokan dan perubahan (data) [1]. Untuk *proportional integral derivative* (PID) memiliki desain algoritma yang cukup sederhana dikarenakan hanya menggunakan parameter *error* atau kesalahan antara nilai yang sudah dicapai dan nilai yang diharapkan, kesederhanaan inilah menjadi

kekurangan daripada *proportional integral derivative* (PID) dimana cukup sulit untuk mendapatkan hasil yang diharapkan, seringkali sistem ini mengalami *overshoot* meskipun sudah dilakukan *tuning* parameter yang dibutuhkan, sehingga seringkali sistem *proportional integral derivative* (PID) perlu untuk dikombinasikan dengan algoritma yang lain untuk mendapatkan respon yang diharapkan. Selain kedua algoritma yang sudah dijelaskan masih ada algoritma logika fuzzy dimana algoritma ini menggunakan sistem keanggotaan dimana sistem ini mampu melakukan kalkulasi yang diperlukan berdasarkan derajat keanggotaan sehingga algoritma ini mampu untuk menyesuaikan dengan kondisi yang ada, berbeda dengan *proportional integral derivative* (PID) yang harus dikombinasikan dengan algoritma yang lain untuk mendapatkan hasil yang diharapkan, selain itu penulis berpendapat bahwa logika fuzzy lebih baik untuk diterapkan pada sistem kendali jika dibandingkan dengan *genetic algorithm* (GA) dikarenakan logika fuzzy tidak perlu melakukan banyak percobaan untuk mendapatkan persamaan yang cocok dengan sistem, dimana percobaan yang banyak dilakukan berdampak pada kemungkinan kecelakaan kerja apabila salah dalam menggunakan nilai pada parameter yang digunakan dengan baik dan cepat. Untuk mendapatkan suhu sesuai dengan setpoint yang diinginkan maka pada alat ini menggunakan metode logika fuzzy sebagai kontrol sistem secara keseluruhan dengan mencari fungsi keanggotaan yang tepat dan sesuai dengan sistem yang diinginkan. Fungsi keanggotaan yang telah dibuat tersebut dapat dirubah-rubah untuk memperoleh suhu yang diinginkan [8], sehingga dalam penelitian ini penulis memutuskan untuk menggunakan logika fuzzy dalam penelitiannya yang berdasarkan berbagai studi literatur yang sudah ditelaah sebelumnya.

Logika fuzzy bekerja berdasarkan keanggotaan, dalam penggunaannya maka digunakan pembacaan sensor yang digunakan sebagai acuan penentuan nilai daripada logika fuzzy dan juga nilai derajat keanggotaan untuk menentukan keputusan. Dikarenakan suhu yang digunakan cukup tinggi maka digunakan sensor suhu *thermocouple*. *Thermocouple* adalah salah satu metode eksperimental yang paling banyak digunakan untuk mengukur suhu dalam permesinan. *Thermocouple* bersifat

konduktif, tidak mahal, dapat dioperasikan pada temperatur yang luas jangkauannya dan dapat dengan mudah diterapkan, namun, mereka hanya mengukur suhu rata-rata secara keseluruhan bidang kontak pahat dan benda kerja [9].

Dari berbagai literasi yang sudah dipelajari maka dalam kasus penelitian ini peneliti melakukan penelitian dengan menggunakan logika fuzzy pada solder *reflow* yang kemudian dibandingkan dengan solder *reflow* yang tanpa menggunakan logika fuzzy. Dari banyaknya literasi yang sudah dipelajari maka peneliti yakin bahwa penggunaan logika fuzzy pada solder *reflow* akan memperbaiki performa dari solder *reflow*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas maka ditarik beberapa rumusan masalah diantaranya adalah:

1. Bagaimana cara mengontrol suhu pada setiap tahapan proses reflow soldering (preheat, soak, reflow, cooling) secara presisi untuk mendapatkan hasil solder yang berkualitas maksimal
2. Bagaimana sistem kendali mampu mengendalikan daya solder yang sesuai dengan kebutuhan setiap tahapan penyolderan sehingga dapat meningkatkan kepresisian suhu pensolderan.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian yang dilakukan saat ini adalah:

1. Merancang dan mengimplementasikan sebuah sistem kontrol suhu pada solder reflow yang mampu menjaga presisi temperatur di setiap tahapan proses pensolderan untuk meningkatkan kualitas hasil penyolderan.
2. Mengevaluasi tingkat kepresisian suhu yang dihasilkan sistem kendali solder dengan sistem *reflow* dengan penggunaan logika fuzzy

1.4 Batasan Masalah

Penelitian ini dibatasi oleh beberapa hal sehingga penelitian ini lebih terarah, adapun batasan masalah yang ada dalam penelitian ini diantaranya adalah:

1. Dalam penelitian ini hanya menggunakan metode *reflow* dalam proses pensolderan.
2. Dalam uji coba penyolderan hanya digunakan komponen *surface mount device* (SMD).
3. Dalam penelitian ini hanya digunakan *thermocouple type k*.
4. Dalam penelitian ini hanya menggunakan *pulse wide modulation* (PWM) pada arus *alternating current* (AC).
5. Pada logika fuzzy hanya digunakan metode Tsukamoto dalam pengaplikasiannya.
6. Dalam penelitian ini hanya dilakukan riset operasi, sehingga dalam penelitian ini tidak dilakukan pembuktian secara matematis terhadap logika fuzzy.
7. Dalam penelitian ini hanya menggunakan metode pemanasan menggunakan plat pemanas / *hot plate*

1.5 Manfaat Penelitian

Dalam penelitian ini memiliki beberapa manfaat diantaranya adalah:

1. Memberikan kepastian ketepatan suhu dalam penggunaan solder dengan metode *reflow* untuk mendapatkan hasil solder yang baik dan tidak merusak komponen
2. Diharapkan mampu menghasilkan solder dengan metode *reflow* yang baik tanpa merusak komponen.

1.6 Kontribusi Tesis

Penelitian ini berkontribusi beberapa hal diantaranya adalah :

1. Memberikan referensi penelitian selanjutnya berkaitan dengan logika fuzzy dalam pengendalian sebuah alat, khususnya pengendalian suhu pada solder dengan metode *reflow*.
2. Memberikan alternatif metode menyolder perangkat elektronika yang lebih baik.

1.7 Keaslian Penelitian

Berdasarkan penelusuran tinjauan pustaka yang telah dipelajari yang berkaitan dengan solder *reflow*, logika fuzzy, maka ditemukan beberapa penelitian yang berkaitan dengan penelitian yang penulis lakukan, diantaranya adalah:

1. Studi banding yang dilakukan oleh Tsung-Nan Tsai dalam penelitiannya [1] yang menjelaskan sistem solder *reflow* oven untuk menyolder komponen surface mount device (SMD) dengan menggunakan metode *Surface mount technology* (SMT).
2. Sisi kebaruan dari penelitian yang dilakukan ini adalah menyolder komponen surface mount device (SMD) dengan menggunakan metode *Surface mount technology* (SMT) manun dengan sistem pensolderan *reflow* hot plate.

Penelitian ini tidak digunakan metode penurunan tegangan untuk pengaturan suhu, melainkan menggunakan metode pulse width modulation (PWM) pada arus AC untuk mengendalikan kinerja dari pemanas dan kipas pendingin.

Berdasarkan beberapa kajian yang sudah dipaparkan makan diketahui terdapat perbedaan dengan penelitian yang ini dikerjakan. Perbedaan yang ada seperti penggunaan logika fuzzy dalam satu kasus yang dimana biasanya kedua algoritma tersebut jarang dikombinasikan dalam satu perangkat, untuk pembaruan selanjutnya adalah penggunaan *hot plate* pada metode penyolderan *reflow* yang dimana kebanyakan kasus penelitian menggunakan metode solder *reflow* yang metode pemanasannya menggunakan cara seperti oven dengan pemanas inframerah.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Setelah peneliti melakukan telaah terhadap beberapa penelitian sebelumnya didapat beberapa keterkaitannya, seperti penelitian yang dilakukan oleh Y. Guo, M. Liu, M. Yin, dan Y. Yan yang berjudul *Reliability Sensibility Analysis of the PCB Assembly concerning Warpage during the Reflow Soldering Process* yang menjelaskan akan pentingnya penggunaan teknik *reflow* pada proses pensolderan PCB demi mendapatkan hasil pensolderan yang maksimal. Dalam penelitian ini akan terdapat beberapa mode dalam alat, yakni mode *standby*, *preheating*, *heating* dan *cooling*, yang dijalankan secara otomatis dengan sistem kendali logika fuzzy.

2.2 Landasan Teori

Banyak produk yang menggunakan komponen elektronika, dimana penggunaan komponen elektronika meningkatkan fungsi dari sebuah produk menjadi lebih terkendali dan bekerja dengan sendirinya. Menurut pendapat [11] dikarenakan dibutuhkan kompleksitas rangkaian elektronik dan juga komponen yang lebih kompleks. Untuk menunjang kebutuhan rangkaian elektronik maka dikembangkan beberapa inovasi dalam dunia elektronik, salah satunya adalah metode *surface mounting technology* (SMT) dengan tujuan meringkas area yang dibutuhkan sebuah sistem elektronika pada *printed circuit board* (PCB). [1] menyatakan bahwa *surface mounting technology* (SMT) merupakan metode utama dalam pemasangan dan menghubungkan komponen *surface mount device* (SMD) secara permanen terhadap *printed circuit board* (PCB). Menurut [2] dalam proses perakitan *printed circuit board* (PCB) dengan cara *surface mounting technology* (SMT) sambungan solder menjadi perhatian yang sangat penting, demi tercapainya kualitas dalam perakitan *printed circuit board* (PCB).

Untuk mendapatkan kualitas penyolderan banyak penelitian yang dilakukan untuk mencari metode penyolderan yang tepat, salah satunya adalah teknik penyolderan dengan metode *reflow*. Penyolderan dengan metode *reflow* merupakan salah satu bagian yang sangat penting dalam pengemasan dan perakitan elektronik, perpindahan panas dari penyolderan dari alat yang menggunakan metode *reflow* biasanya meliputi lampu pemanas inframerah, udara panas, udara panas dengan inframerah, sedangkan beberapa teknik yang biasa digunakan dalam penyolderan *reflow* diantaranya menggunakan sepenuhnya udara panas, *reflow* konduksi *hot plate*, *reflow* dengan inframerah, *reflow* dengan sinar laser, dan lain-lain [12]. Untuk penelitian ini digunakan cara penyolderan dengan teknik *reflow* konduksi *hot plate*. Tujuan dari metode penyolderan *reflow* adalah untuk melelehkan bubuk pasta solder yang kemudian merekatkan komponen yang pada akhirnya menjadi ikatan yang kuat secara metalurgi. Metode *reflow* dijalankan dengan beberapa zona diantaranya *pre heat zone*, *thermal soak zone*, *reflow zone*, dan *cooling zone*. Zona-zona yang sudah disebutkan merupakan area tahap dimana perlakuan nilai suhu maksimal tertentu dapat diterapkan. Batas suhu ditentukan dengan melihat nilai komponen yang memiliki suhu dengan toleransi terendah dari nilai maksimum komponen itu sendiri. Untuk titik leleh pasta solder yang digunakan memiliki titik lebur sekitar 221°C. Sedangkan nilai suhu maksimum yang biasanya dapat digunakan adalah 230°C [4]. Suhu di atasnya dapat merusak komponen *surface mounting technology* (SMT) dan dapat mengakibatkan adanya senyawa intermetalik. Senyawa intermetalik merupakan senyawa yang terbentuk dari logam-logam yang memiliki struktur kristal yang berbeda. Melihat permasalahan tersebut dimana pasta solder baru meleleh pada suhu 221°C sedangkan pada suhu diatas 230°C komponen *surface mounting technology* (SMT) mengalami kerusakan, maka dibutuhkan sebuah sistem kendali dan pengamatan nilai suhu yang baik sehingga proses penyolderan mendapatkan hasil yang baik.

Ada beberapa cara dalam melakukan pengendalian suhu pada solder, namun dalam kasus ini digunakan logika fuzzy untuk mengendalikannya, seperti yang telah dilakukan oleh [8] yang menggunakan logika fuzzy untuk mendapatkan suhu sesuai

dengan *setpoint* maka digunakan oleh logika fuzzy sebagai kontrol secara keseluruhan. Hal ini beralasan dikarenakan cara daripada logika fuzzy dalam mengambil keputusan lebih bervariasi jika dibandingkan cara pengambilan keputusan komputer pada umumnya yang hanya menggunakan logika satu dan nol. Pada penelitian yang dilakukan oleh [10] yang mengungkapkan bahwa dalam banyak penelitian menyatakan bahwa logika fuzzy sudah mencakup semua algoritma yang ada. dalam beberapa tahun terakhir logika fuzzy telah diterapkan dalam berbagai bidang untuk memecahkan masalah pencitraan, robotika, database dan banyak aplikasi keteknikan lainnya. hal ini dikarenakan logika fuzzy mengambil keputusan berdasarkan sistem berbasis logika dimana keputusan diambil berdasarkan nilai kebenaran antara nol hingga satu. Dengan logika fuzzy bisa untuk mengenali linguistik seperti agak besar, besar, sangat besar dan lain sebagainya [13].

Permasalahan utama dalam sistem kendali ini adalah cukup dekatnya nilai suhu titik lebur pasta solder dengan nilai suhu titik kerusakan komponen *surface mount device* (SMD), yakni hanya Sembilan derajat saja, artinya apabila terjadi kesalahan pembacaan tegangan atau *overshoot* terhadap *set point* dari suhu yang ditargetkan terutama pada saat tahap *reflow zone* yang menuntut untuk berada di suhu 220°C berpotensi merusak komponen. Untuk itu kepresisian suhu yang digunakan berdampak signifikan dalam penelitian ini. Selain kepresisian sensor yang perlu diperhatikan, jangkauan suhu yang dapat dicapai oleh sensor juga harus diperhatikan mengingat penggunaan suhu yang sangat tinggi. Dalam penelitian ini menggunakan *thermocouple* sesuai dengan literatur yang sudah dibuat oleh [9] yang menyatakan bahwa *thermocouple* merupakan salah satu model yang banyak digunakan untuk mengukur suhu dalam permesinan. *Thermocouple* bersifat konduktif, murah, dapat dioperasikan dalam rentang suhu yang luas dan dengan mudah untuk diterapkan, namun hanya bisa mengukur rata-rata suhu area yang terkena kontak dan benda kerja. Namun, dikarenakan murahness sensor dan modul, hasil dari pengukuran rusak akibat gangguan akustik sehingga perlu adanya penyaringan terlebih dahulu untuk didapatkan nilai suhu yang aktual [14].

2.2.1 Solder

Solder merupakan logam atau perpaduan logam yang berfungsi sebagai pengikat dua permukaan logam secara bersamaan. Setelah kedua permukaan diposisikan, solder diaplikasikan dan dibiarkan meleleh untuk kemudian memadat dan menyatukan kedua permukaan tersebut[15]. Dalam industri elektronik, sambungan solder telah digunakan sebagai metode esensial untuk penyambungan komponen pada printed circuit board (PCB) selama bertahun-tahun[16]. Mengingat perannya yang krusial, sambungan solder menjadi salah satu bagian dari perangkat yang rentan mengalami kegagalan. Artinya, apabila salah satu sambungan ini gagal, maka integritas dan fungsionalitas keseluruhan sistem dapat terganggu atau bahkan berhenti berfungsi sepenuhnya [17].

Untuk memahami pentingnya integritas sambungan tersebut, perlu ditinjau bahwa penyolderan merupakan suatu proses penyambungan metalurgi yang fundamental. Proses ini bertujuan untuk menciptakan sambungan elektrik yang konduktif dan ikatan mekanis yang kuat antara terminal komponen dengan papan sirkuit cetak. Prinsip kerjanya didasarkan pada pelelehan logam pengisi (solder) yang memiliki titik lebur lebih rendah dari material substrat. Saat solder mendingin dan memadat, ia membentuk lapisan *intermetallic compound* (IMC) pada antarmuka antara solder dan permukaan konduktif (misalnya, tembaga pada PCB), yang menjadi fondasi dari kekuatan dan konduktivitas sambungan. Keberhasilan proses ini sangat bergantung pada tiga elemen krusial: manajemen termal yang presisi, penggunaan fluks untuk deoksidasi permukaan dan memfasilitasi pembasahan (*wetting*), serta pemilihan komposisi aloi solder yang tepat. Metodologi penyolderan ini dapat diklasifikasikan berdasarkan skala aplikasi dan teknologi komponen, terutama antara *Through-Hole Technology* (THT) dan *Surface-Mount Technology* (SMT).

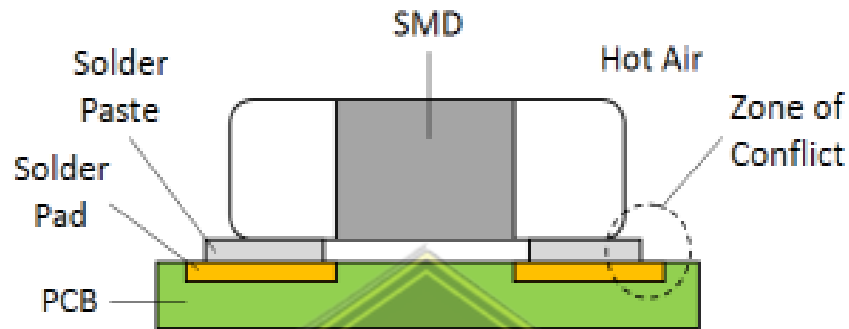
Untuk perakitan komponen THT dalam skala produksi massal, teknik yang dominan digunakan adalah *Wave Soldering*. Proses ini dirancang untuk efisiensi tinggi dengan menyolder seluruh titik sambungan di sisi bawah PCB secara simultan. Rangkaian prosesnya dimulai dengan aplikasi fluks, diikuti zona pemanasan awal

(*preheating*) untuk mencegah kejutan termal, dan puncaknya adalah saat papan sirkuit dilewatkan di atas gelombang solder cair yang terkontrol. Dinamika fluida dari gelombang tersebut memungkinkan solder cair mengisi lubang (*plated through-holes*) melalui aksi kapilaritas, sehingga membentuk sambungan yang solid. Namun, seiring dengan tren miniaturisasi dan peningkatan densitas komponen, metode ini mulai tergeser.

Tren tersebut mendorong adopsi *Surface-Mount Technology* (SMT) sebagai standar industri, dengan teknik penyolderan utamanya adalah *Reflow Soldering*. Berbeda secara fundamental dari *wave soldering*, proses ini melibatkan pemanasan seluruh rakitan PCB untuk melelehkan deposit pasta solder yang telah diaplikasikan sebelumnya melalui stensil presisi. Setelah mesin *pick-and-place* menempatkan komponen, rakitan dimasukkan ke dalam *reflow oven* dengan profil termal terkontrol yang terdiri dari zona *preheat*, *soak*, *reflow*, dan *cooling*. Tegangan permukaan dari solder cair selama fase *reflow* juga berfungsi mengoreksi posisi komponen (*self-alignment*), menghasilkan sambungan yang sangat akurat. Di luar itu, terdapat pula teknik khusus seperti *Vapor Phase Soldering* (VPS) untuk transfer panas seragam dan Laser Soldering untuk pemanasan lokal yang sangat presisi, yang pemilihannya bergantung pada kompleksitas rekayasa, volume produksi, dan kendala termal.

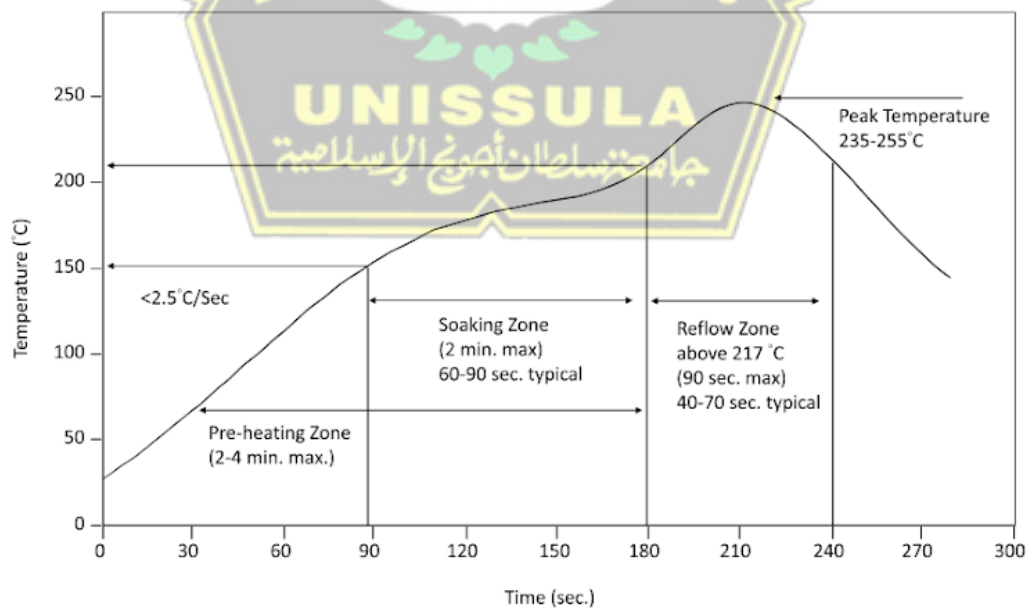
Pada abad 21 ini manufaktur rangkaian papan elektronik telah berkembang dari metode dilubangi secara tradisional menjadi metode pemasangan di permukaan, dan pada banyak kasus pembuatan papan pcb menggunakan metode *Surface mount technology* (SMT). *Surface mount technology* (SMT) merupakan era baru perakitan elektro mekanik yang mengimplementasikan perakitan komponen elektronika dengan kerapatan tinggi, kehandalan tinggi, miniaturisasi, biaya rendah dan biaya produksi yang rendah membuatnya menjadi alasan yang tepat dalam produksi *printed circuit board* (PCB) [18]. Dalam metode *Surface mount technology* (SMT) solder ditempatkan di salah satu sisi atau diantara kedua sisi *printed circuit board* (PCB). Komponen

elektronika disolder langsung pada bantalan solder ini dikarenakan komponen berukuran kecil, yang disebut dengan komponen *surface mount device* (SMD)[11].



Gambar 2.1 Visualisasi penempatan dalam proses penyolderan komponen SMD [11]

Sebagai langkah penting dalam metode *Surface mount technology* (SMT), proses penyolderan dengan metode *reflow* menentukan kualitas akhir dari perakitan *printed circuit board* (PCB). Dalam proses ini biasanya melewati empat tahapan, yakni *preheating*, *soaking*, *reflow* dan *cooling*[4]. Untuk ilustrasi pembagian zona dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Pembagian zona suhu berdasarkan waktu operasi [17]

Pre-heating zone merupakan fase dimana *printed circuit board* (PCB) dan timah cair dipanaskan hingga suhu maksimal 150°C dengan durasi maksimal 90 detik, setelah itu penyolderan memasuki fase *soaking zone* yang meningkatkan suhu menjadi sekitar 210°C selama 60-90 detik, yang berfungsi untuk mengaktifkan flux antar permukaan yang disolder dan mengurangi oksidasi logam. Pada zona selanjutnya adalah *reflow zone* yang dilakukan selama 40-70 detik dengan suhu maksimal 217°C , pada zona ini cairan timah mulai mencair antara dua bidang yang sedang disolder. Untuk tahap terakhir adalah *cooling zone*, dimana pada zona ini dilakukan pendinginan sampai suhu pada *printed circuit board* (PCB) kembali mendekati suhu ruangan dan timah cair yang meleleh sudah mengeras kembali.



Gambar 2.3 a). Visualisasi sambungan komponen dengan printed circuit board (PCB) sebelum dilakukan proses penyolderan. b). Visualisasi sambungan komponen dengan printed circuit board (PCB) sesudah dilakukan proses penyolderan [17]

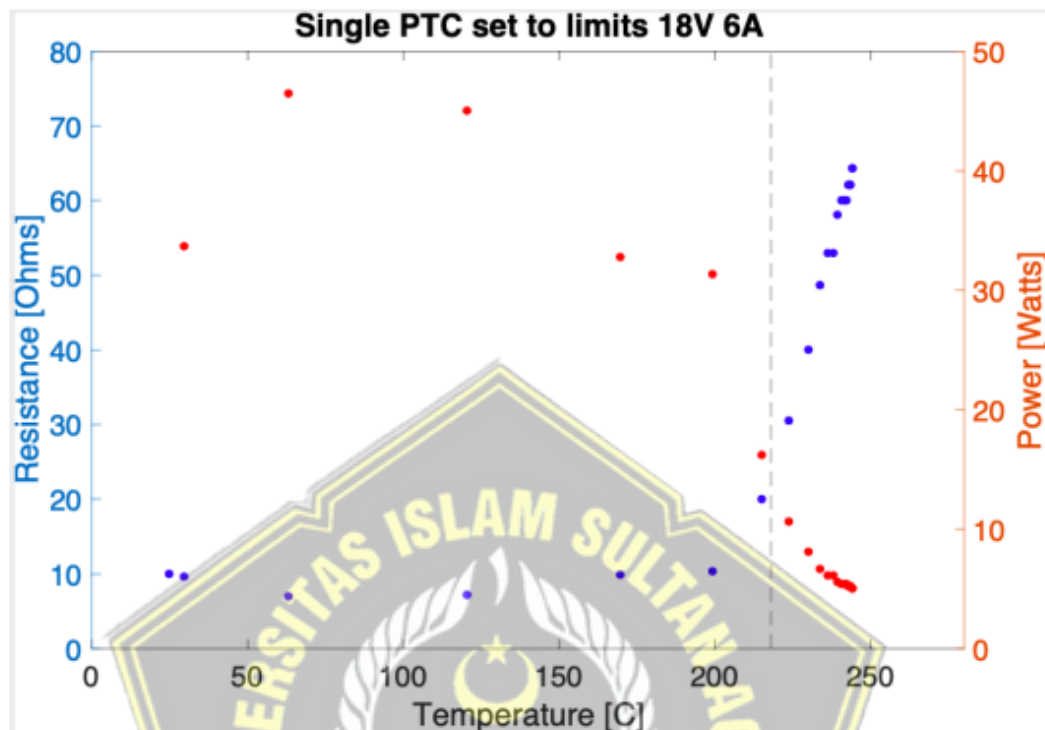
Dalam proses penyolderan maka digunakan elemen pemanas untuk memanaskan timah, sehingga komponen terpatry terhadap PCB. Elemen pemanas dapat diklasifikasikan sebagai elemen pemanas logam, elemen pemanas non-logam dan elemen pemanas kompleks yang dikombinasikan dengan karbon hitam dan polimer. Awalnya, elemen pemanas logam termasuk bahan Fe-CrAl, bahan Ni-Cr. Kawat nichrome (paduan kromium nikel) yang telah digunakan secara umum sebagai bagian resistor penghasil panas dari elemen pemanas konvensional [19]. Dalam penelitian ini merujuk pada penelitian yang dilakukan oleh Andrew Shepherd dan Katarina Brekalo

dengan judul *Developing Positive Thermal Coefficient (PTC) Heater For Solar Electric Cooking* dimana dalam penelitian tersebut dijelaskan karakter dari pemanas PTC berdasarkan hasil dari penelitian dimana pemanas PTC ini dirasa cukup cocok untuk pemanas solder dikarenakan secara fisik pemanas PTC berbentuk pipih sehingga luas penampang untuk perpindahan panas cukup baik seperti pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Pemanas PTC [19]

Selain itu dalam penelitian tersebut disebutkan bahwa kemampuan pemanas PTC ini mampu sampai dengan 250°C yang dimana pemanas PTC mengalami penurunan kinerja setelah mencapai suhu 220°C . Hal ini dikarenakan kenaikan nilai resistansi dari PTC sehingga sesuai dengan hukum Ohm, dimana jika nilai tegangan tetap namun terjadi kenaikan nilai resistansi maka arus yang mengalir berkurang, yang secara otomatis berdampak pada penurunan daya daripada pemanas PTC tersebut. Adapun hasil penelitian tersebut disajikan dalam gambar 2.5.



Gambar 2.5 Hubungan antara resistansi, suhu dan daya pada pemanas PTC. Hubungan antara resistansi, suhu dan daya pada pemanas PTC [19].

Dalam penentuan daya dari pemanas solder dilandaskan pada perhitungan jumlah energi panas yang dibutuhkan dalam perubahan suhu setiap 1°C. Pada model perpindahan panas digunakan persamaan yang ditampilkan dalam persamaan 2.1, dan pengurangan suhu akibat perpindahan panas ke fluida udara yang sesuai dengan persamaan 2.2.

Untuk mencapai profil temperatur yang ideal, perancangan ini mempertimbangkan dua fase krusial: pemanasan dan pendinginan. Pada fase pemanasan, daya maksimal yang dibutuhkan oleh elemen pemanas ditentukan berdasarkan analisis termal. Perhitungan ini menyeimbangkan jumlah kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhu plat pemanas—mulai dari tahap pre-heating hingga mencapai puncak suhu reflow—dengan energi panas yang secara bersamaan hilang ke lingkungan sekitar melalui proses konveksi udara.

Setelah proses reflow selesai, fase pendinginan yang terkendali menjadi sangat penting untuk menjamin kualitas maksimal dari sambungan solder. Dalam penelitian ini, pendinginan dilakukan secara paksa dengan menghembuskan udara lingkungan menggunakan kipas. Untuk menentukan spesifikasi kipas pendingin yang tepat, serangkaian perhitungan perlu dilakukan secara sistematis.

Langkah pertama adalah menghitung total energi kalor yang tersimpan di dalam plat pemanas pada saat suhu puncaknya. Dari nilai tersebut, dapat diperkirakan laju perpindahan panas yang ditargetkan selama proses pendinginan. Karena pendinginan menggunakan hembusan udara paksa, laju perpindahan panas ini sangat bergantung pada koefisien konveksi. Nilai koefisien konveksi ini selanjutnya digunakan untuk menentukan parameter fisis yang paling dapat dikendalikan, yaitu kecepatan aliran udara pendingin yang harus dihasilkan oleh kipas.

Pada akhirnya, setelah kecepatan udara yang diperlukan berhasil didapatkan, nilai tersebut dikonversi menjadi laju aliran volumetrik—biasanya dalam satuan Meter Kubik per Jam (m^3/h). Satuan ini merupakan standar umum yang digunakan dalam spesifikasi teknis kipas. Melalui rangkaian analisis dari pemanasan hingga pendinginan ini, spesifikasi komponen pemanas dan pendingin dapat ditentukan secara presisi, sehingga performa sistem yang dirancang dapat sesuai dengan ekspektasi yang diharapkan.

2.2.2 Logika Fuzzy

Logika fuzzy pertama dikenalkan oleh DR. Lotfi Zadeh di Universitas California, Berkeley pada tahun 1965. Logika fuzzy merupakan perkembangan dari sistem boolean, dimana sistem Boolean banyak digunakan pada sistem komputer, dimana dalam sistem Boolean dikenal kondisi satu atau nol. Sistem Boolean banyak digunakan pada pengolahan data komputer ataupun sistem kecerdasan buatan untuk menyelesaikan masalah. Dalam sistem kendali logika fuzzy menawarkan fleksibilitas dalam desain dan implementasinya, karena dalam implementasinya menggunakan persamaan diferensial “*If then*” [7]. Pada buku [20] menyatakan bahwa hampir semua

konsep matematika, teknik, kedokteran dan lain sebagainya telah didefinisikan ke dalam logika fuzzy. Bahkan dalam penelitian lain logika fuzzy digunakan dalam metode pengolahan data seperti yang dilakukan dalam penelitian yang dilakukan [21] yang menggunakan logika fuzzy untuk pendeteksian kata asing pada sebuah kalimat. Untuk di dunia sistem kendali elektronika logika fuzzy sangat familiar seperti untuk kendali motor, suhu, radiasi dan lain sebagainya.

Akhir-akhir ini sistem control dengan logika fuzzy sangat populer jika dibandingkan dengan sistem kendali konvensional, terutama sistem kontrol logika fuzzy yang identik dengan pola berfikir manusia, jika dibandingkan dengan sistem kendali yang konvensional [20]. Logika fuzzy digunakan sebagai pemecah dinamis untuk masalah yang berkaitan dengan peluang tingkat tinggi untuk aplikasi yang berbeda-beda [22]. Logika fuzzy juga dapat mengontrol sistem yang non-linier yang sulit atau bahkan tidak mungkin untuk dimodelkan secara matematis, ini membuka pintu kemungkinan pengaplikasian yang mungkin dianggap tidak layak untuk di otomatiskan [10]. Dalam beberapa jurnal dan seminar yang sering dilakukan dalam organisasi elektronika seperti IEEE dan IFAC, himpunan logika fuzzy didefinisikan dalam suatu himpunan fuzzy A dalam semesta pembicaraan U didefinisikan sebagai kumpulan pasangan μ dan fungsi keanggotaannya $\mu_A(x)$. Derajat keanggotaan $\mu_A(x)$ mempunyai interval $[0,1]$ untuk tiap nilai x dan U . nilai fungsi keanggotaan menunjukkan tingkat keanggotaan elemen x dan A , dapat dinotasikan sebagai:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \in A \\ 0 & \text{if } x \notin A \end{cases} \dots\dots\dots(2.1)$$

Secara umum himpunan fuzzy dinotasikan sebagai berikut:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in U\} \dots\dots\dots(2.2)$$

Persamaan (2.1) & (2.2) adalah cara formal untuk mendefinisikan himpunan fuzzy A . Artinya, himpunan A adalah kumpulan dari pasangan elemen x dan derajat keanggotaannya $\mu_A(x)$. Tanda $/$ pada persamaan (2.2) bukan berarti pembagian, melainkan hanya pemisah antara elemen dan nilai keanggotaannya.

Jika μ kontinyu (misalnya $\mu = R$), A dapat dinyatakan sebagai:

$$A = \int_u \mu_A(x) - x \dots \dots \dots (2.3)$$

Sedangkan bila μ diskrit, maka A biasanya dituliskan:

$$A = \sum \mu_A(x) / x \dots \dots \dots (2.4)$$

Persamaan (2.3) & (2.4): Ini menjelaskan cara penulisan untuk dua jenis "semesta pembicaraan" (U) yang berbeda:

Kontinu ($\int$): Digunakan jika nilai x bisa berupa apa saja dalam sebuah rentang (misalnya, suhu, kecepatan, tekanan). Simbol integral $\int$ di sini bukan untuk dihitung, melainkan melambangkan "kumpulan" dari semua anggota dalam semesta yang kontinu.

Diskrit ($\sum$): Digunakan jika nilai x adalah nilai-nilai yang terpisah (misalnya, jumlah orang, level gigi transmisi). Simbol sigma $\sum$ juga bukan untuk dijumlahkan secara aritmatika, melainkan melambangkan "gabungan" dari anggota-anggota yang diskrit.

Keterangan rumus 2.1 sampai dengan 2.4

- A: Ini adalah nama dari himpunan fuzzy (Fuzzy Set). Contohnya, A bisa mewakili konsep seperti "Suhu Panas", "Kecepatan Lambat", atau "Permintaan Tinggi"
- { }: Tanda kurung kurawal ini berarti "himpunan dari" atau "kumpulan dari".
- x: Mewakili elemen atau anggota individual dari semesta pembicaraan. Jika himpunan A adalah "Suhu Panas", maka x adalah nilai suhu spesifik, misalnya 29°C, 32°C, dst.
- $\mu_A(x)$: Ini adalah Fungsi Keanggotaan (Membership Function). Simbol μ (mu) menunjukkan "derajat keanggotaan". Jadi, $\mu_A(x)$ memberikan nilai antara 0 dan 1 yang menunjukkan seberapa besar x dianggap sebagai anggota himpunan A. Contoh: $\mu_{Panas}(32^\circ\text{C}) = 0.8$ berarti suhu 32°C memiliki derajat keanggotaan sebesar 0.8 (cukup tinggi) dalam himpunan "Suhu Panas".

- |: Tanda garis vertikal ini dibaca "sedemikian sehingga" atau "dimana". Tanda ini memisahkan bentuk elemen di sebelah kiri dengan syarat yang harus dipenuhi di sebelah kanan.
- $\in$: Simbol ini dibaca "elemen dari" atau "anggota dari".
- U: Ini adalah Semesta Pembicaraan (Universe of Discourse), yaitu keseluruhan nilai yang mungkin untuk x. Untuk "Suhu Panas", U bisa jadi rentang suhu dari 0°C hingga 100°C.

Adapun beberapa proses yang dijalankan dalam logika fuzzy meliputi:

1. Fuzifikasi

Bagian fuzifikasi merupakan representasi dari masukan dalam sistem kendali fuzzy, dengan cara pengklasifikasian informasi fuzzy menjadi bentuk variabel linguistik, keanggotaan linguistik dan fungsi keanggotaan dari nilai *crisp* (numerik). Informasi ini (nilai fuzzy) dibandingkan dengan asumsi/premis dari semua aturan “jika, maka” yang terkandung dalam basis aturan dan digunakan dalam mekanisme *Inferensi* untuk aktivasi dan pengaplikasiannya[23]. Hal ini dilakukan karena data diproses ke dalam teori himpunan fuzzy yang sudah ditentukan, sehingga data yang tidak dalam bentuk fuzzy harus diubah terlebih dahulu.

2. Operasi logika fuzzy

Operasi logika fuzzy berguna dalam penentuan derajat kebenaran yang dihitung dari aturan yang sudah dibuat sebelumnya.

3. Implikasi

Implikasi merupakan proses dalam logika fuzzy untuk mendapatkan kesimpulan dalam perhitungan logika fuzzy, yang dimana nilainya antara nol sampai dengan maksimal bernilai satu.

4. Agregasi

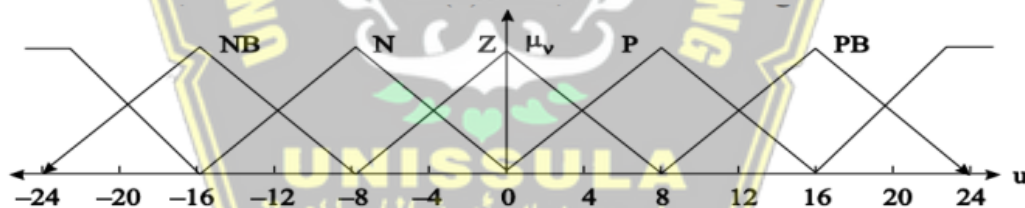
Agregasi adalah penyatuan dari sejumlah nilai dalam logika fuzzy dari beberapa implikasi yang di dalam agresi inilah terjadi komputasi nilai akhir, yang

apabila terdapat lebih dari satu keanggotaan dalam satu nilai yang diproses dalam logika fuzzy.

5. Defuzzifikasi

Defuzzifikasi adalah proses pemetaan yang dilakukan dari hasil agresi menjadi nilai yang bisa dipahami oleh mesin. Defuzzifikasi mengkalkulasikan nilai aktual dari *pulse width modulation* (PWM) untuk pemanas dan kipas untuk mengatur nilai suhu [7]. Adapun beberapa cara yang dapat dilakukan adalah dengan beberapa metode berikut ini:

1. Metode keanggotaan maksimum.
2. Metode keanggotaan pusat luas.
3. Metode keanggotaan maksimum rata-rata.
4. Metode keanggotaan centroid.
5. Metode keanggotaan *center of sum*.
6. Metode keanggotaan *weight average method*.
7. Metode keanggotaan *first of maxima or last of maxima*.



Gambar 2.6 Fungsi keanggotaan (membership function) [20]

Dalam penelitian ini digunakan logika fuzzy Tsukamoto dengan metode keanggotaan maksimum. Dimana logika fuzzy Tsukamoto merupakan suatu metode dalam mengambil keputusan sangat fleksibel dan memiliki toleransi pada data yang ada [24]. Sistem ini bekerja dengan dua input yaitu nilai setting suhu (set point), dan selisih antara set point dengan suhu aktual disebut sebagai error, dan outputnya berupa tingkat panas elemen pemanas (0- 50Hz). Adapun tahapan dalam metode fuzzy logic controller adalah 1) Fuzzifikasi, 2) Rule, 3) inferensi, dan 4) defuzzifikasi [25].

Masukan dari sistem kendali pada logika fuzzy umumnya merupakan berupa *error E*, dimana error adalah nilai selisih antara nilai masukan terhadap nilai *set point* yang sudah ditentukan, sehingga dapat dirumuskan.

$$Error = SP - PV \dots \dots \dots (2.12)$$

Dimana $SP = Set Point$

$PV = Point Value$

Dari Gambar 2.6 sebagai contoh daripada perhitungan nilai fuzzy antara Z (*Zero*) dan P (*Positive*), maka dapat disimpulkan bahwa:

Persamaan Z (*Zero*) adalah :

$$\mu(Z) = \frac{P - U}{P - Z} \dots \dots \dots (2.13)$$

$$Z = \frac{u(P)}{x} + P \dots \dots \dots (2.14)$$

Persamaan P (*Positive*) adalah :

$$\mu(P) = \frac{P - (u - P)}{P - Z} \dots \dots \dots (2.15)$$

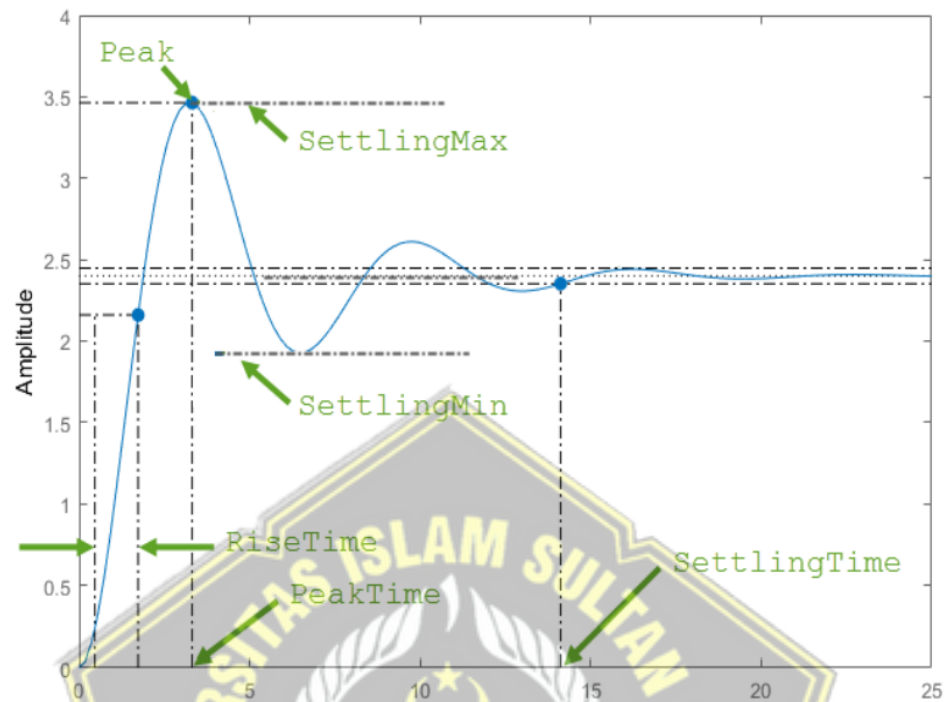
$$P = \frac{u(P)}{x} + Z \dots \dots \dots (2.16)$$

Sehingga nilai fuzzy pada nilai antara *Zero* dan *Positive* adalah :

$$Fuzzy = \frac{u(Z) \times Z + u(P) \times P}{u(Z) + U(P)} \dots \dots \dots (2.17)$$

Sistem ini bekerja dengan satu masukan saja yaitu nilai seting suhu (*set point*), dan selisih antara *set point* dengan suhu yang terbaca saat ini disebut sebagai *error (E)*, dan outputnya berupa tingkat panas elemen pemanas (0- 50Hz). Adapun tahapan dalam metode fuzzy logic controller adalah 1) Fuzzifikasi, 2) Rule, 3) inferensi, dan 4) defuzzifikasi.

Sistem kendali memiliki beberapa yang akan menentukan baik dan buruknya sebuah sistem kendali yang sering disebut dengan *step response* pada sistem kendali, yang merupakan grafik yang dihasilkan dari response pada sistem kendali, adapun beberapa parameter yang ada dalam *step response* diantaranya adalah *overshoot*, *settling max*, *settling min*, *rise time*, *peak time* dan *sttling time*. Adapun penjelasan pada *step response* di jelaskan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Step Response Pada Sistem Kendali [13]

Keterangan Gambar :

1. *Rise time* merupakan waktu yang dibutuhkan oleh sistem kendali untuk mencapai nilai 90% dari nilai *error*, *rise time* dimulai dihitung saat sistem kendali mencapai nilai 10% dari nilai *error*.
2. *Settling time* merupakan waktu yang dibutuhkan oleh sistem kendali dalam mencapai kondisi *steady state* dimulai saat sistem pertama beroperasi, *steadystate* sendiri merupakan 2% atau 5% dari nilai *error* saat sistem baru pertama beroperasi. Dalam penelitian ini ditentukan nilai *steady state* sebesar 2%.
3. *Settling min* merupakan nilai simpangan paling *Negatif* terhadap *setpoint* setelah sistem kendali mencapai *setting max* dan setelah melewati nilai *setpoint*.
4. *Settling max* adalah nilai *peak* atau nilai simpangan terbesar sistem kendali terhadap nilai *setpoint*.
5. *Peak Time* adalah waktu yang dibutuhkan oleh sistem kendali dalam mencapai nilai *peak* atau *settling max* dihitung mulai dari sistem kendali mulai pertama beroperasi.

2.3 Hipotesis

Hipotesis dalam penelitian dengan judul “Implementasi Logika Fuzzy Pada Plat Pemanas Solder Dengan Metode *Reflow*” dapat memberikan kepresisian suhu aktual terhadap suhu acuan yang sudah sudah teruji dalam beberapa penelitian yang terkait dengan tema penelitian ini.

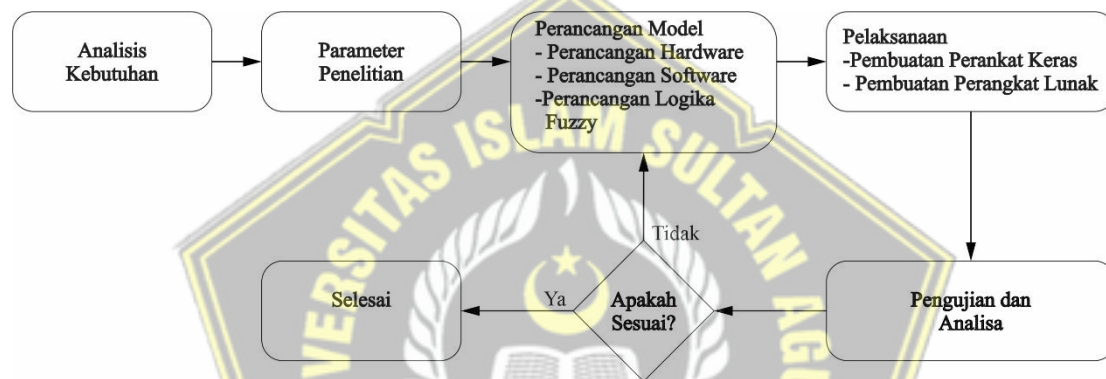


BAB III

DESAIN PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

Penelitian ini menggunakan model yang meliputi studi pustaka, analisis kebutuhan alat dan bahan, perancangan parameter, perancangan arsitektur, perancangan alat, perancangan sistem, pelaksanaan, serta pengujian dan analisa. Adapun alur tahapan kerja dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Tahapan Penelitian Penelitian

3.2 Analisis Kebutuhan

Dalam penelitian ini, dilakukan analisis kebutuhan untuk merancang dan mengembangkan sebuah sistem kendali solder reflow berbasis logika fuzzy, yang bertujuan untuk mengendalikan suhu aktual agar sesuai dengan suhu target yang diinginkan dalam proses penyolderan. Sistem ini menggunakan parameter masukan fuzzy berupa suhu aktual, yang diukur dengan sensor Thermocouple tipe K, dengan pengondisian sinyal yang dilakukan menggunakan modul MAX6675, yang memungkinkan konversi sinyal termocouple analog menjadi data digital yang dapat diproses lebih lanjut. Selain suhu, sistem juga dilengkapi dengan sensor arus AC PZEM-004T untuk mengukur arus yang digunakan oleh heater, serta sensor arus DC ACS712 untuk memonitor arus pada kipas pendingin, yang kemudian menjadi masukan bagi logika fuzzy dalam menentukan pengaturan aktuator yang diperlukan.

Plat pemanas sebagai aktuator utama dikendalikan menggunakan rangkaian TRIAC, yang bekerja pada tegangan 220V AC, dan pengaturan penyalan TRIAC dilakukan dengan memanfaatkan Zero Cross Detector untuk mendeteksi sudut arus AC sehingga pemanas dapat beroperasi secara lebih efisien dan presisi. Kipas pendingin DC, yang digunakan untuk mendinginkan proses solder, dikendalikan menggunakan driver motor DC L298, yang menerima sinyal dari logika fuzzy untuk mengatur kecepatan kipas sesuai kebutuhan pendinginan. Semua proses inferensi logika fuzzy ini dijalankan oleh mikrokontroler berbasis ATmega328, yang diprogram menggunakan Arduino IDE. Laptop digunakan sebagai alat untuk memprogram mikrokontroler dan juga sebagai alat untuk memantau status sistem serta untuk analisis data selama eksperimen. Hasil analisis, seperti perubahan suhu, arus heater, dan kecepatan kipas terhadap waktu, dianalisis menggunakan Microsoft Excel untuk mendapatkan wawasan lebih dalam mengenai performa sistem.

Sistem ini membutuhkan catu daya 12V DC yang dihasilkan dari konversi tegangan 220V AC menggunakan modul power supply AC to DC 12V. Tegangan 12V DC ini kemudian diubah menjadi 5V DC menggunakan konverter DC-DC 12V ke 5V untuk memenuhi kebutuhan daya pada mikrokontroler ATmega328, sensor-sensor, Zero Cross Detector, dan layar LCD sebagai tampilan status sistem secara real-time. Dengan pengaturan ini, seluruh subsistem beroperasi secara sinergis untuk menghasilkan sistem solder reflow yang efisien, akurat, dan responsif dalam mengatur suhu secara otomatis berbasis logika fuzzy

3.3 Parameter Penelitian

Parameter penelitian memuat berbagai unsur yang mempengaruhi dalam penelitian. Dalam penelitian ini ada dua parameter yang digunakan diantaranya:

1. Parameter dependen yang merupakan parameter tetap berupa nilai suhu yang diharapkan atau disebut dengan setpoint.

2. Parameter independen yang merupakan parameter yang dapat terus berubah yang mempengaruhi dari sistem kendali diantaranya adalah suhu solder saat ini, arus pada sistem pemanas dan arus pada sistem pendingin

3.4 Perancangan Model

Perancangan model penelitian ini bertujuan untuk membangun sebuah sistem kendali solder reflow berbasis logika fuzzy yang dapat mengatur suhu aktual agar sesuai dengan suhu target yang diinginkan dalam proses penyolderan. Model sistem ini dirancang dengan menggunakan sensor Thermocouple tipe K untuk mengukur suhu, yang sinyalnya dikondisikan dan dikonversi menjadi data digital melalui modul MAX6675. Pengukuran suhu ini menjadi parameter utama dalam sistem kendali, yang dikombinasikan dengan pengukuran arus AC pada heater menggunakan sensor arus PZEM-004T, serta pengukuran arus DC pada kipas pendingin menggunakan sensor arus ACS712. Kedua sensor ini berfungsi sebagai masukan dalam proses inferensi logika fuzzy untuk mengatur dua aktuator utama, yaitu plat pemanas dan kipas pendingin, sesuai dengan kebutuhan suhu dan pendinginan.

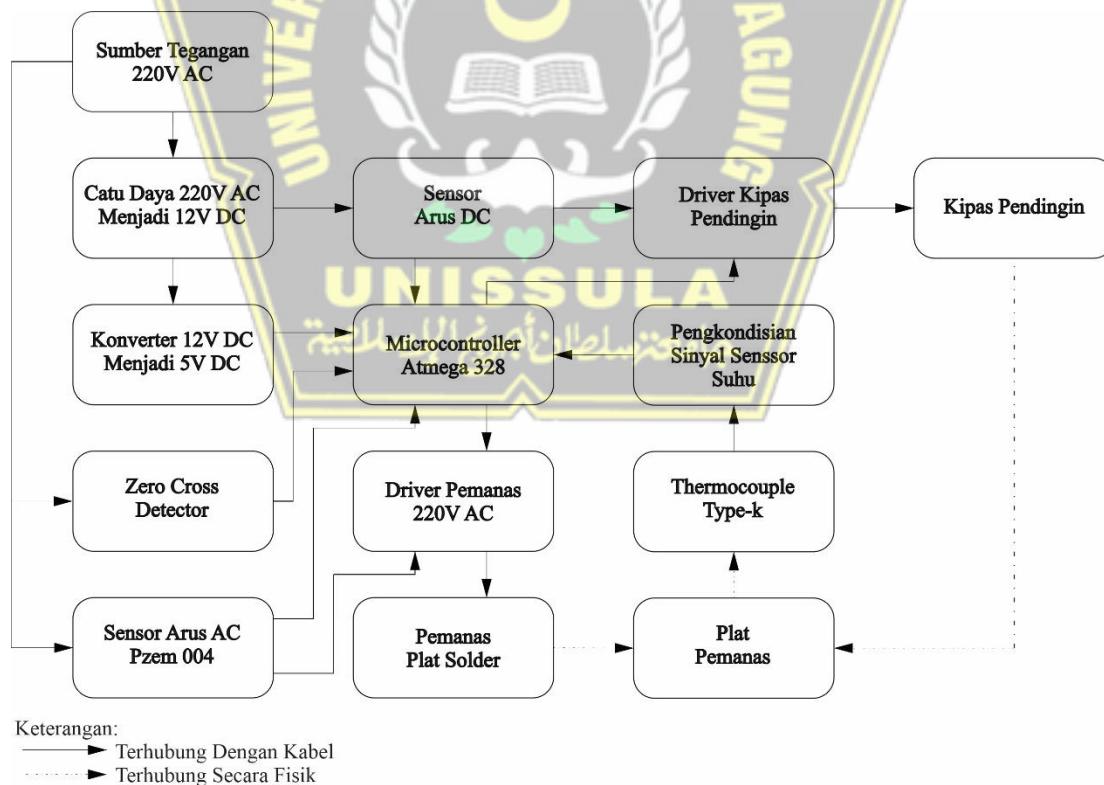
Plat pemanas dikendalikan menggunakan rangkaian TRIAC pada tegangan 220V AC, dengan pengaturan sudut penyalan dilakukan menggunakan Zero Cross Detector untuk memastikan pemanas beroperasi secara efisien dengan pengaturan daya yang tepat. Sedangkan kipas pendingin yang bekerja pada tegangan DC dikendalikan menggunakan driver motor DC L298, yang menerima sinyal dari hasil keluaran logika fuzzy untuk mengatur kecepatan kipas sesuai dengan kebutuhan pendinginan.

Proses kendali dan pemrograman dilakukan menggunakan mikrokontroler ATmega328, yang diprogram dengan menggunakan Arduino IDE untuk mengimplementasikan logika fuzzy yang diperlukan untuk pengaturan suhu dan kecepatan kipas. Laptop digunakan sebagai alat untuk memprogram mikrokontroler dan untuk memantau data sistem serta menganalisis hasil eksperimen. Untuk analisis data lebih lanjut, digunakan Microsoft Excel untuk memproses dan menganalisis data suhu, arus heater, dan kecepatan kipas terhadap waktu guna mengevaluasi kinerja

sistem. Sumber daya listrik sistem ini diperoleh melalui konversi tegangan 220V AC menjadi 12V DC menggunakan modul power supply AC to DC 12V, yang kemudian dikonversi lebih lanjut menjadi 5V DC melalui konverter DC-DC 12V ke 5V untuk memenuhi kebutuhan daya pada mikrokontroler ATmega328, sensor-sensor, Zero Cross Detector, dan layar LCD yang digunakan untuk menampilkan status sistem secara real-time. Seluruh sistem ini diintegrasikan dengan tujuan untuk menciptakan sistem kendali solder reflow yang presisi, efisien, dan adaptif berbasis logika fuzzy yang dapat menjaga kestabilan suhu sesuai dengan setpoint yang diinginkan

3.4.1 Perancangan Perangkat Keras

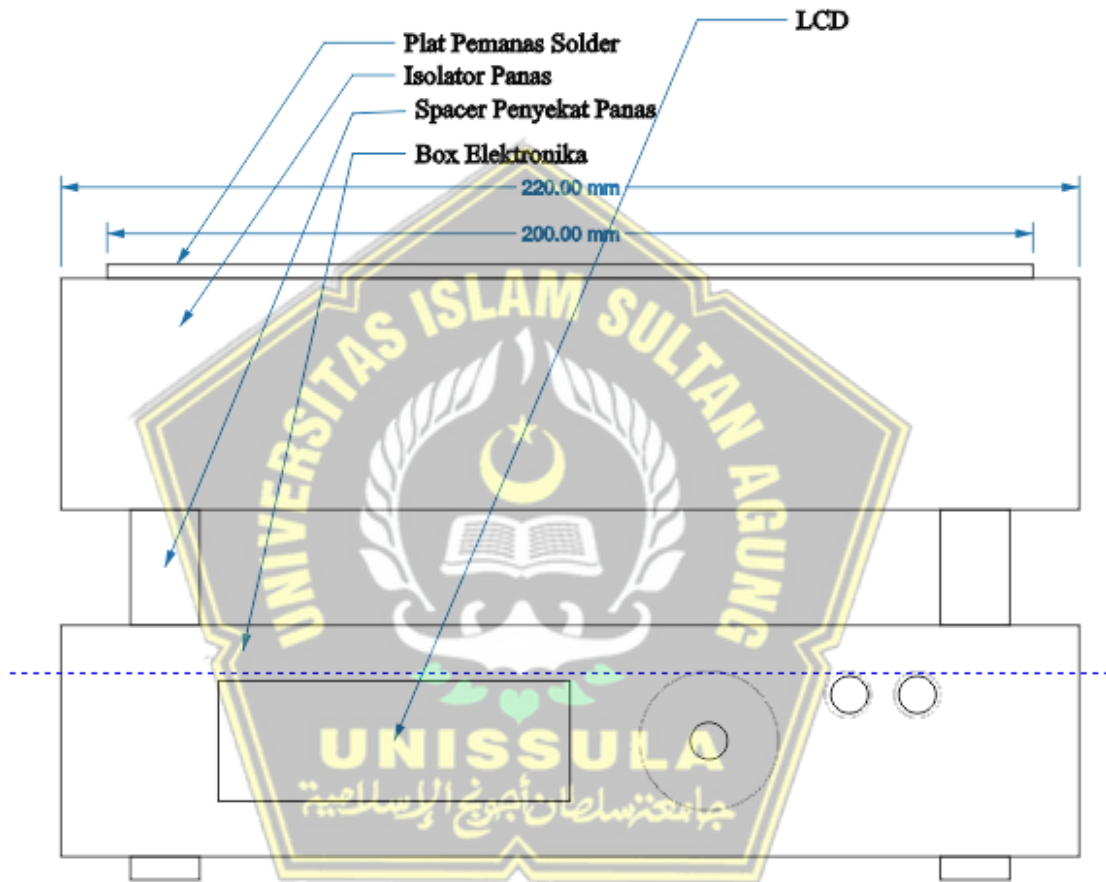
Sebagaimana yang sudah dijelaskan dalam sub bab 3.3 yang menjelaskan beberapa komponen yang digunakan dalam penelitian ini maka pada sub bab perancangan perangkat keras dijelaskan *block diagram* perancangan perangkat keras. Adapun penjelasannya disajikan ke dalam Gambar 3.1



Gambar 3. 2 Diagram Blok Perancangan Alat

Gambar 3.2 menjelaskan tentang diagram blok dari solder yang digunakan dalam penelitian ini dijelaskan dengan lebih detail pada sub bab 3.4.3 yang membahas tentang perancangan perangkat keras.

3.4.1.1 Desain Fisik Sistem Kendali Solder



Gambar 3.3 Desain Tampak Depan Sistem Kendali Solder Plat Panas

Pada Gambar 3.4 dijelaskan dimensi fisik solder plat panas (hot plate) dengan tinggi total 1.130 mm panjang kebelakang 320 mm dan lebar 220 mm, sedangkan untuk area pensolderan adalah lebar 200 mm dan panjang 300 mm. Dalam penelitian ini dibuat sebuah alat untuk mensolder komponen elektronika agar menyatu dengan PCB (printed circuit board) sesuai dengan Gambar 3.3.

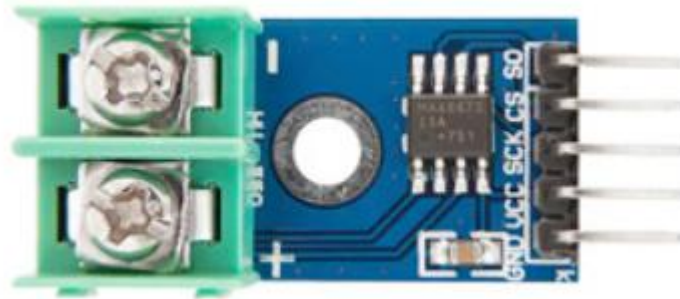
3.4.1.2 Desain Sensor Suhu

Sensor suhu yang dipakai dalam penelitian ini menggunakan thermocouple tipe k, dimana thermocouple yang digunakan memiliki rentang kerja dari sekitar 150°C sampai dengan 400°C. Adapun gambar visualisasi dari thermokoupe yang dipakai digambarkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3. 4 Thermocoupe Tipe K [33]

Thermocoupe bekerja dengan memanfaatkan efek seebeck, dimana jika ada dua bahan yang berbeda yang terhubung dan terdapat perubahan suhu maka kedua bahan tersebut mengalirkan arus. Aliran arus inilah yang digunakan untuk mengetahui nilai suhu. Nilai Suhu dari plat pemanas dalam penelitian ini diukur menggunakan thermocoupe . Namun, permasalahan dari thermocoupe adalah perubahan nilainya cukup kecil sekitar 1 μV – 70 μV untuk perubahan setiap perubahan suhu 1°C, sehingga perlu untuk diberikan pengendalian sinyal dikarenakan pembacaan ADC dari mikrokontroler untuk setiap bitnya sekitar 4,8mV. Oleh karena itu, diperlukan pengondisian sinyal sehingga tegangan dan arus pada thermocoupe dapat dibaca mikrokontroler. Adapun desain dari pengondisian sinyal thermocoupe disajikan dalam Gambar 3.6.

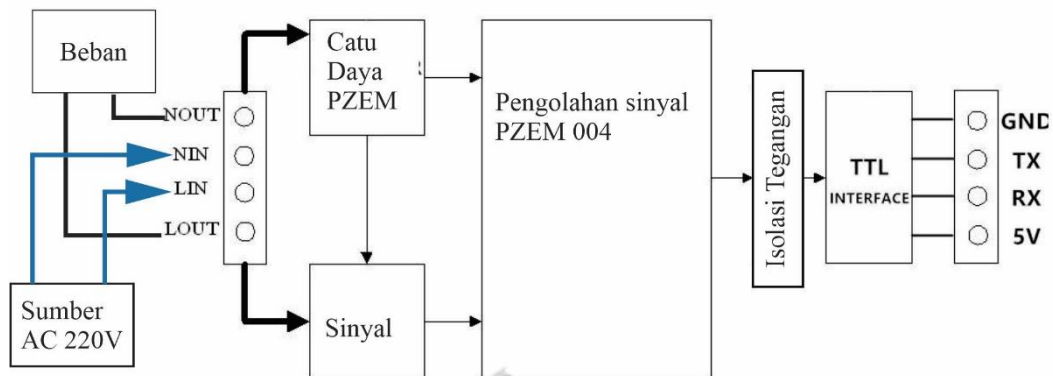


Gambar 3. 5 Pengondisian Sinyal ThermocoupeI Tipe K MAX 6675 [37]

IC MAX6675 merupakan sirkuit terpadu monolitik yang berfungsi sebagai sistem pengkondisi sinyal dan konverter digital lengkap untuk termokopel tipe K. Komponen ini secara internal mengintegrasikan penguat instrumentasi, mekanisme kompensasi sambungan dingin (cold-junction compensation) yang esensial menggunakan sensor suhu internal, serta konverter analog-ke-digital (ADC) 12-bit. Sinyal tegangan rendah dari termokopel yang telah diamplifikasi dan dikoreksi secara otomatis kemudian dikonversi menjadi data digital dengan resolusi 0.25°C dan ditransmisikan ke mikrokontroler melalui antarmuka periferil serial (SPI). Dengan demikian, penggunaan MAX6675 secara signifikan menyederhanakan desain perangkat keras, meningkatkan imunitas terhadap derau (noise), dan menjamin akurasi pengukuran temperatur tanpa memerlukan sirkuit pengkondisi sinyal eksternal yang kompleks.

3.4.1.3 Desain Sensor Arus AC

Sensor tegangan dan sensor arus dalam penelitian ini digunakan sebagai masukan untuk logika fuzzy. Dalam penelitian ini digunakan modul sensor tegangan dan sensor arus PZEM 004 dimana cakupan pembacaan tegangan dari 80V sampai dengan 260V dan cakupan pembacaan arus dari 0A sampai dengan 10A serta frekuensi kerja pada 45Hz sampai dengan 65Hz. Sensor PZEM 004 memiliki komunikasi TTL *interface* dengan metode Modbus, sehingga modul PZEM 004 menggunakan protokol komunikasi RS485 dengan *baud rate* 9600 dan 8 bit data. Adapun *wiring* dari PZEM 004 dijelaskan dalam Gambar 3.6.



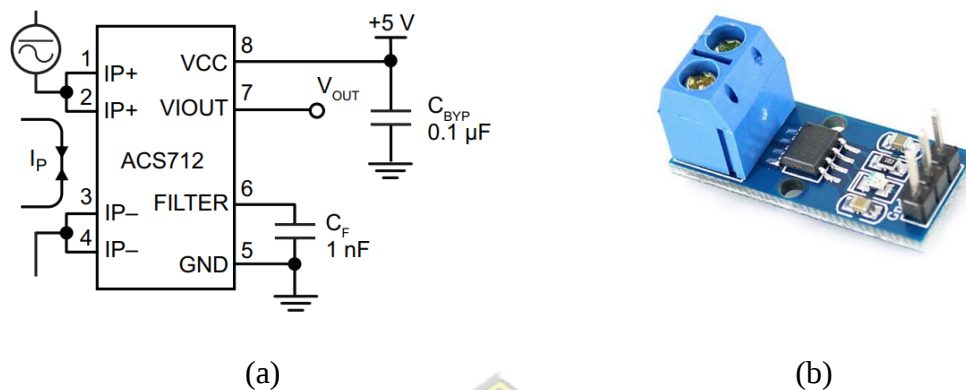
Gambar 3. 6 Wiring Sensor Tegangan dan Arus [27]

3.4.1.4 Desain Sensor Arus DC

Pada era modern ini, pengukuran arus listrik secara akurat dan real-time menjadi kebutuhan penting dalam berbagai aplikasi elektronik, mulai dari sistem monitoring energi hingga perlindungan beban listrik. Salah satu solusi praktis dan efisien untuk mendeteksi arus adalah menggunakan sensor berbasis efek Hall, seperti ACS712.

Penelitian ini berfokus pada desain dan implementasi sensor arus berbasis modul ACS712 5 Ampere, yang bertujuan untuk menghasilkan sistem pengukuran arus listrik yang akurat, stabil, dan mudah diintegrasikan dengan mikrokontroler. Modul ACS712 menawarkan pengukuran arus AC dan DC dengan isolasi galvanik, sensitivitas tinggi, serta bentuk keluaran analog yang proporsional terhadap arus yang mengalir.

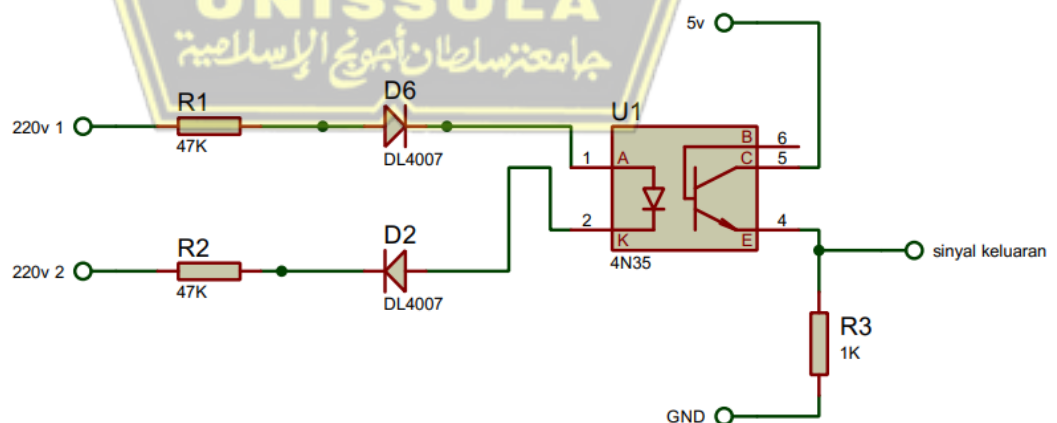
Dalam penelitian ini, ACS712-5A dipilih karena rentang pengukurannya sesuai untuk aplikasi beban kecil hingga menengah, seperti sistem kontrol motor, monitoring catu daya, dan proteksi sirkuit elektronik. Sensor ini mampu mengukur arus hingga ± 5 Ampere dengan sensitivitas sebesar 185 mV/A, dan menghasilkan tegangan output sekitar 2,5 V saat tidak ada arus (zero current voltage), memungkinkan deteksi arah arus.



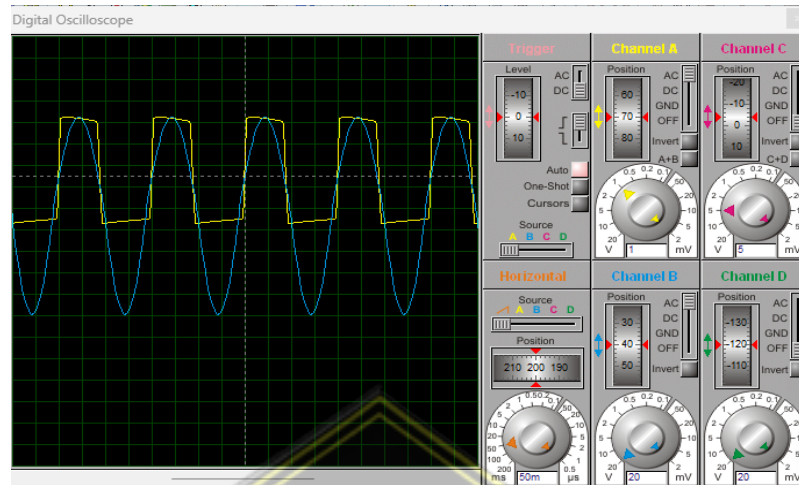
Gambar 3. 7 a) Rangkaian Sensor Arus ACS 712 [35]. b) Bentuk Fisik Modul Sensor Arus ACS 712 [34]

3.4.1.5 Desain Zero Cross Detector

Zero Cross Detector dimaksudkan untuk mengetahui sudut fasa pada arus AC yang berguna untuk meregulator arus yang mengalir pada beban, dimana dalam penelitian ini beban yang digunakan adalah plat pemanas solder itu sendiri. *Zero cross detector* yang dipakai dalam penelitian ini menggunakan optocoupler 4N35 yang dimaksudkan agar arus listrik yang ada pada jaringan listrik PLN tidak mengganggu kinerja dari seperangkat sistem elektronika solder dengan plat pemanas yang didesain ini, untuk desain dari *Zero cross detector* digambarkan pada Gambar 3.8



Gambar 3. 8 Desain zero cross detector



Gambar 3.9 Hasil Simulasi Zero Cross Detector

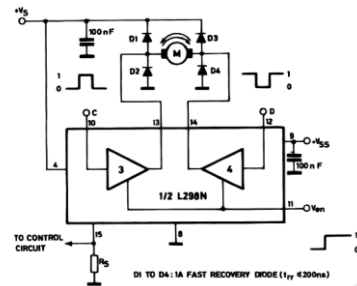
Gambar 3.9 menjelaskan hubungan antara sinyal arus AC dan arus keluaran dari zero cross detector, dimana sinyal warna kuning merupakan sinyal keluaran dari zero cross detector dan sinyal warna biru merupakan arus AC yang menunjukkan ketika arus AC bermuatan tegangan lebih positif maka keluaran dari zero cross detector bernilai positif, dengan cara ini maka dapat dihitung sudut dari arus AC dengan cara menghitung durasi sinyal. Jika jaringan listrik PLN berfrekuensi 50Hz maka waktu yang dibutuhkan dalam setiap derajat perubahan sudut fasa adalah 0.0556ms.

3.4.1.6 Desain Driver Kipas Pendingin

Dalam dunia otomasi dan sistem kendali modern, kemampuan mengendalikan motor DC secara presisi menjadi komponen penting dalam berbagai aplikasi, mulai dari robotika, otomasi industri, hingga sistem transportasi pintar. Untuk memenuhi kebutuhan ini, diperlukan suatu driver motor yang mampu menangani beban besar, tahan terhadap fluktuasi tegangan, serta mendukung kendali arah dan kecepatan motor. Salah satu solusi yang banyak digunakan adalah IC L298.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem driver motor berbasis L298 sebagai bagian dari sistem kendali motor DC dua arah. L298 merupakan IC dual full-bridge driver yang dirancang khusus untuk mengendalikan beban induktif seperti motor DC dan motor stepper. Dengan kemampuan menangani arus hingga

2 Ampere per channel dan tegangan kerja hingga 46 Volt, L298 menjadi pilihan ideal untuk berbagai aplikasi berbasis mikrokontroler.

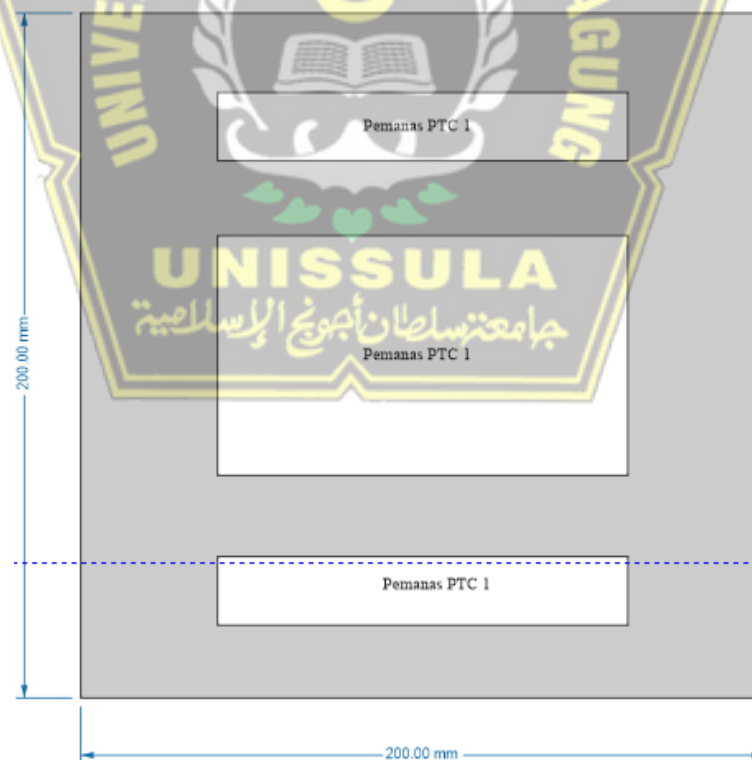


(a)

(b)

Gambar 3. 10 a) Gambar Schematic Driver Motor L298 [36]. b) Gambar Modul Driver Motor L298[36]

3.4.1.7 Desain Pemanas Solder



Gambar 3. 11 Desain Plat Alimunium Dan Pemasangan Pemanas PTC

Dari Gambar 3.11 dijelaskan desain plat pemanas solder yang digunakan dalam proses pensolderan dengan panjang area pensolderan sebesar 300 mm, lebar 200 cm dan ketebalan 3mm. Untuk pemanas PTC menggunakan daya sebesar 300 W untuk setiap PTC yang digunakan, dengan dimensi PTC menggunakan lebar 70 mm dan panjang 120 mm.

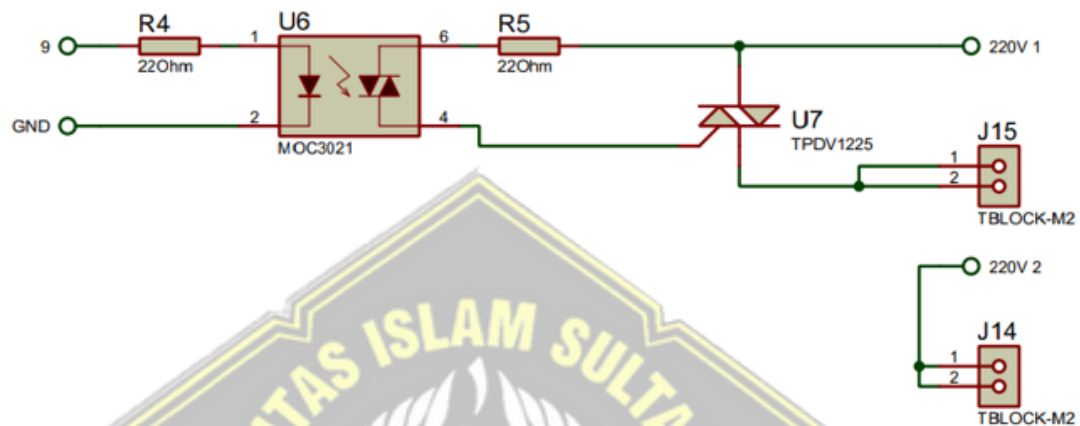
3.4.1.8 Driver Pemanas Solder

Pengendalian beban listrik berbasis arus bolak-balik (AC) merupakan salah satu tantangan utama dalam bidang elektronika daya dan otomasi industri. Untuk memenuhi kebutuhan kontrol daya AC yang efisien, andal, dan hemat biaya, penggunaan komponen semikonduktor seperti TRIAC menjadi pilihan yang sangat populer. TRIAC (Triode for Alternating Current) merupakan perangkat **switching** yang dapat menghantarkan arus di kedua arah, sehingga ideal untuk pengendalian beban AC.

Penelitian ini mengimplementasikan sistem driver arus AC berbasis TRIAC, yang dapat digunakan untuk mengendalikan berbagai beban listrik seperti lampu, motor AC, pemanas, dan alat-alat industri ringan. Tahapan desain driver arus AC meliputi:

- a. **Pemilihan Komponen:** TRIAC dipilih berdasarkan spesifikasi tegangan dan arus beban yang akan dikendalikan. Komponen tambahan seperti optoisolator (misalnya MOC3021) digunakan untuk mengisolasi bagian kendali (low voltage) dari bagian daya (high voltage), meningkatkan keamanan dan keandalan sistem.
- b. **Perancangan Sirkuit Pemicu:** Sirkuit pemicu menggunakan sinyal logika rendah dari mikrokontroler untuk mengaktifkan optoisolator, yang kemudian memicu gate TRIAC. Teknik ini memungkinkan pengendalian beban AC tanpa kontak mekanik (solid-state switching).
- c. **Pengaturan Daya:** Untuk aplikasi pengaturan daya, seperti peredupan lampu (dimmer) atau kontrol kecepatan motor, teknik pengendalian fase (phase control) diterapkan. Dengan mengubah sudut pemicu (firing angle) TRIAC, daya efektif yang diberikan ke beban dapat diatur.

- d. Pengujian dan Validasi: Sistem diuji dengan berbagai tipe beban resistif dan induktif untuk mengevaluasi kinerja switching, efisiensi kontrol daya, respons terhadap perubahan beban, serta ketahanan terhadap noise listrik.



Gambar 3. 12 Desain Driver Pemanas Solder

3.4.1.9 Desain Kipas Pendingin

Perancangan pendinginan pada sistem kendali diperlukan untuk memastikan hasil pensolderan sesuai harapan. Rentang perubahan suhu yang dibutuhkan dalam pendinginan adalah dua sampai dengan 3.5°C untuk setiap satu detik dari suhu maksimal sekitar 220°C hingga mencapai suhu ruangan kembali di sekitar 30°C. Apabila dilakukan pendinginan lebih dari empat derajat Celsius maka terjadi keretakan dalam sambungan solder sehingga diperlukan sistem kendali yang mampu untuk memastikan penurunan suhu yang terjadi tidak lebih dari empat derajat selsius. untuk memastikan ketepatan penurunan suhu maka perlu dilakukan simulasi perhitungan pelepasan kalor ke udara yang terkendali, maka juga dibutuhkan kapasitas kipas pendingin yang minimal memiliki kemampuan untuk mencapai *air flow* yang cukup besar

Dalam penelitian kali ini akan digunakan kipas pendingin dengan kemampuan *air flow* sampai dengan $1.770 \text{ m}^3/\text{min}$ dengan model AUB0912VH dengan spesifikasi yang dijelaskan dengan Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Spesifikasi Kipas AUB0912VH

Item	Deskripsi
Tegangan Operasi	12 V DC
Arus Masukan	0.38A-0.6A
Daya Masukan	4.56W-7.2W
Kecepatan Bilah	3800 RPM
Kecepatan <i>Air Flow</i>	1770 m^3/min
Kebisingan Suara Yang dihasilkan	45dB-49dB

Berdasarkan spesifikasi kipas pendingin pada Tabel 3.1 maka pemilihan komponen kipas pendingin dirasa sudah mampu untuk melakukan pendinginan dengan cepat dikarenakan kemampuan dari kecepatan air flow kipas pendingin yang digunakan adalah 1770 m^3/min .

3.4.2 Perancangan Software

Perancangan perangkat lunak untuk sistem kendali solder reflow berbasis logika fuzzy ini bertujuan untuk menjaga suhu dalam proses solder reflow agar sesuai dengan suhu target yang diinginkan. Sistem ini menggunakan logika fuzzy untuk mengolah beberapa parameter masukan, yakni suhu yang diukur oleh sensor Thermocouple tipe K, arus AC untuk heater yang diukur oleh sensor PZEM-004 dengan komunikasi Modbus, dan arus DC untuk kipas pendingin yang diukur dengan sensor ACS712. Setiap parameter ini menjadi masukan bagi sistem logika fuzzy untuk menghitung kebutuhan pengaturan aktuator.

Data suhu yang diperoleh dari sensor Thermocouple tipe K diproses melalui modul MAX6675 dengan komunikasi serial untuk mengkonversi sinyal termocouple menjadi data digital yang dapat dibaca oleh mikrokontroler. Data arus untuk heater, yang diperoleh dari sensor PZEM-004 dengan komunikasi Modbus, digunakan untuk memantau konsumsi daya heater, sedangkan data arus kipas pendingin yang diperoleh dari sensor ACS712 digunakan untuk memantau beban pada kipas. Ketiga parameter masukan

ini (suhu, arus AC heater, dan arus DC kipas) kemudian dimasukkan ke dalam algoritma logika fuzzy, yang dirancang untuk memberikan keluaran berupa kontrol untuk plat pemanas dan kipas pendingin.

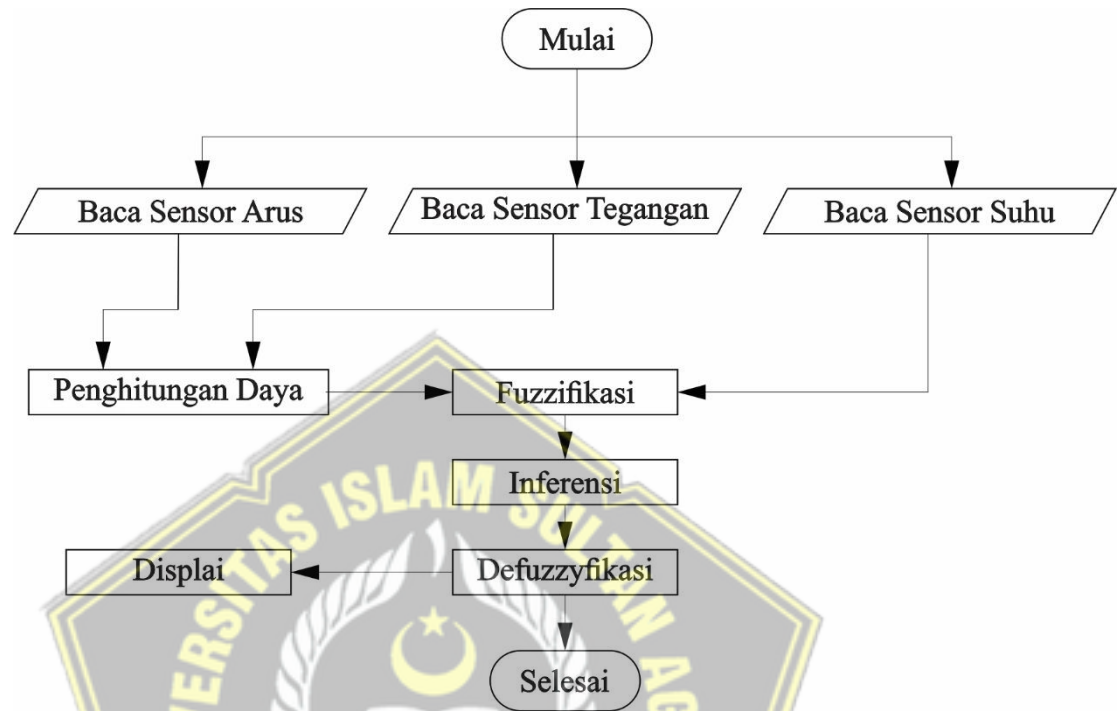
Logika fuzzy akan menghasilkan dua output utama: PWM untuk kontrol kecepatan kipas pendingin dan PWM untuk pengendalian daya plat pemanas. PWM DC digunakan untuk driver motor DC L298 yang mengatur kecepatan kipas, sedangkan PWM AC digunakan untuk rangkaian TRIAC yang mengatur daya pada plat pemanas. Penggunaan Zero Cross Detector dalam perangkat lunak memungkinkan deteksi sudut dari arus AC sehingga pengendalian PWM AC pada plat pemanas dapat dilakukan dengan tepat waktu, memastikan pengaturan suhu yang lebih stabil dan efisien.

Perangkat lunak ini dibuat menggunakan Arduino IDE dan memanfaatkan komunikasi serial untuk pertukaran data antara mikrokontroler dan perangkat lainnya, seperti modul MAX6675, sensor PZEM-004, dan layar LCD untuk menampilkan status sistem secara real-time. Layar LCD ini juga terhubung melalui komunikasi serial dengan mikrokontroler untuk mempermudah monitoring sistem.

Pada proses kendali, mikrokontroler akan terus-menerus membaca data dari sensor, memprosesnya menggunakan algoritma logika fuzzy, dan mengirimkan sinyal kontrol untuk kedua aktuator berdasarkan hasil inferensi tersebut. Laptop digunakan untuk memprogram dan menguji perangkat lunak, serta untuk menganalisis data performa selama eksperimen menggunakan Microsoft Excel. Sistem ini akan menjaga kestabilan suhu solder reflow secara otomatis dengan pengaturan yang akurat berdasarkan suhu dan daya yang terukur selama proses.

3.4.2.1 Desain Flowchart Logika Fuzzy

Matlab merupakan software yang mampu untuk melakukan berbagai simulasi untuk melihat respon dari sebuah sistem berdasarkan parameter yang digunakan. Dalam penelitian ini digunakan matlab untuk mensimulasikan logika fuzzy, sehingga parameter-parameter logika fuzzy yang digunakan sesuai dengan kebutuhan. Untuk menjalankan sistem kendali fuzzy pada matlab maka diperlukan *flowchart* alur yang digunakan. Gambar 3.13 adalah flowchart sistem kendali logika fuzzy yang digunakan.

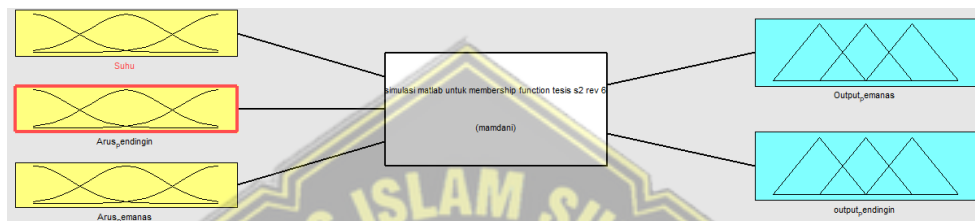


Gambar 3. 13 Flowchart Sistem Kendali Logika Fuzzy

Dari Gambar 3.13 dijelaskan flowchart dari sistem kendali logika fuzzy yang digunakan dalam penelitian ini dimana digunakan beberapa masukan untuk logika fuzzy seperti suhu plat solder dan daya yang dikeluarkan solder untuk melakukan pemanasan yang diambil dari perkalian antara tegangan dan arus. Dari data daya dan suhu yang didapatkan dilakukan proses fuzzifikasi sehingga menghasilkan himpunan yang selanjutnya dilakukan proses penalaran oleh sistem yang berpedoman terhadap aturan yang sudah ditentukan. Apabila sudah melalui proses penalaran sesuai aturan yang sudah ditentukan maka dilanjutkan dengan proses defuzzifikasi untuk mendapatkan nilai keluaran. Nilai keluaran inilah yang menjadi nilai pada sistem kendali untuk mengendalikan jumlah daya yang digunakan untuk memanaskan plat solder. Apabila suhu pada plat solder belum sesuai dengan ketetapan suhu yang sudah ada maka sistem terus bekerja mengoreksi sampai nilai dari suhu pada plat pemanas sesuai dengan suhu yang diharapkan.

3.4.2.2 Desain Kendali Berbasis Logika Fuzzy

Perancangan kendali berbasis logika fuzzy memerlukan sebuah pemodelan untuk mempermudah dalam menganalisa respon sistem sebelum logika fuzzy tersebut diimplementasikan pada sistem mikrokontroler. Pemodelan dalam penelitian ini menggunakan aplikasi matlab dengan desain pemodelan logika fuzzy disajikan dalam Gambar 3.14.



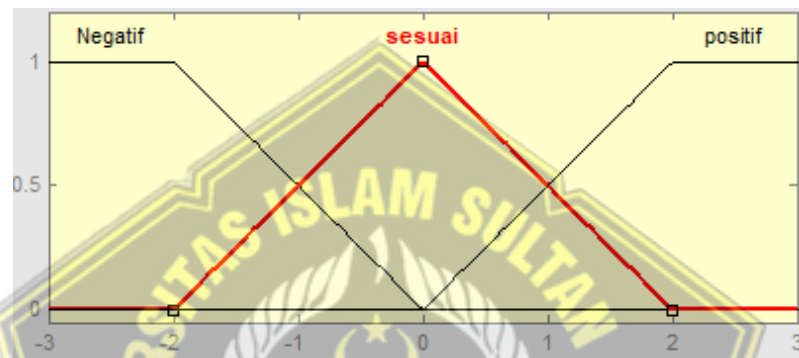
Gambar 3. 14 Desain model logika fuzzy

Di dalam sistem logika fuzzy pada aplikasi matlab digunakan logika fuzzy Tsukamoto dimana memiliki dua buah masukan berupa data sensor suhu dan dan arus, kemudian memiliki dua keluaran berupa pemanas yang nantinya digunakan sebuah pemanas ptc dan sebuah kipas pending untuk proses pendinginan. Metode logika fuzzy yang digunakan menggunakan metode min – max dan menggunakan metode COA (*Center of area*). Untuk menghasilkan kinerja sistem seperti yang diinginkan maka perlu direncanakan fungsi keanggotaannya, dimana rancangan tersebut dibahas dala sub bab selanjutnya yakni sub bab 3.5.3.

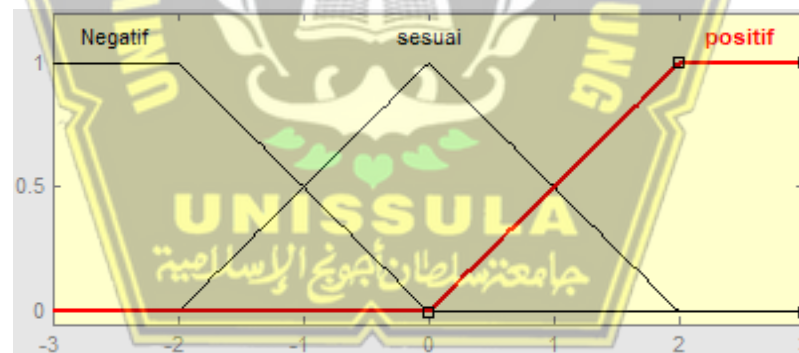
3.4.2.3 Proses Fuzifikasi dan Defuzifikasi

Tahapan fuzifikasi membutuhkan masukan dari sensor yang digunakan sebagai acuan dalam logika fuzzy maka dalam penelitian ini digunakan data dari sensor suhu, arus pendingin dan arus pemanas untuk proses fuzifikasi, nilai sensor suhu tersebut diolah untuk mendapatkan nilai selisih dari hasil pembacaan sensor suhu terhadap nilai setpoint yang sudah ditentukan sesuai dengan tahapan *reflow*. Nilai *error* atau selisih suhu tersebut diolah untuk dimasukkan kedalam tiga kategori, yakni N (negatif), S (sesuai) dan P (positive), sedangkan untuk arus pendingin dan arus pemanas akan diolah menjadi tiga

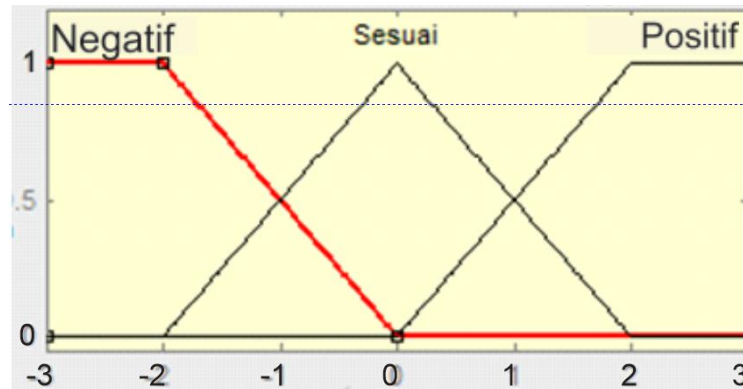
kategori juga yakni kecil, sedang dan besar. Kondisi N merupakan kondisi dimana hasil pengukuran sensor yang digunakan kurang dari setpoint yang sudah ditetapkan, kemudian kondisi S merupakan kondisi dimana hasil pengukuran dari sensor yang digunakan sudah sesuai dengan setpoint, kemudian kondisi P merupakan kondisi dimana nilai sensor yang dibaca melebihi dari setpoint yang sudah ditentukan. Berikut desain dari fungsi keanggotaan dijelaskan lebih lanjut pada Gambar 3.15 sampai dengan 3.17.



Gambar 3. 15 Fungsi Keanggotaan Selisih Suhu



Gambar 3. 16 Derajat Keanggotaan Positif Dari Nilai Δt

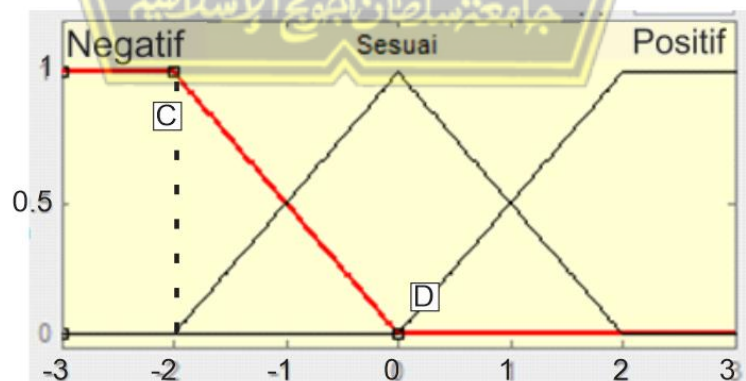


Gambar 3. 17 Derajat Keanggotaan Negatif Dari Nilai Δt

Keterangan gambar 3.15 sampai dengan gambar 3.20:

- Negatif = Selisih suhu (Δt) $-\infty$ sampai dengan 0°C .
- Sesuai = Selisih suhu (Δt) -2 sampai dengan 2°C .
- Positif = Selisih suhu (Δt) 0 sampai dengan $\infty^\circ\text{C}$.
- Sumbu x (horizontal) = Rentang nilai Δt
- Sumbu y (vertikal) = Rentang derajat keanggotaan dalam logika fuzzy.

Dalam perancangan sensor tekanan dengan fungsi keanggotaan negatif menggunakan aturan trapesium dengan posisi kemiringan di sebelah kanan seperti yang sudah dijelaskan pada Gambar 3.16:



Gambar 3. 18 Ruas negatif untuk masukan dengan simpangan error negatif.

Dari Gambar 3.18 maka ditentukan derajat keanggotaan untuk fungsi keanggotaan negatif dengan persamaan berikut :

$$\text{Negatif} = \begin{cases} 0, & x \geq d \text{ atau } x \geq 0 \dots\dots\dots(3.1) \\ 1 & x \leq c \text{ atau } x \leq -2 \dots\dots\dots(3.2) \\ \frac{d-x}{d-c} & c \geq x \geq d \text{ atau } -2 \leq x \leq 0 \dots\dots\dots(3.3) \end{cases}$$

Keterangan :

x = Nilai error suhu atau Δt

c = Batas domain keanggotaan negatif bernilai 1 saat Δt bernilai -2°C

d = Batas domain keanggotaan negatif bernilai 0 saat Δt bernilai 0°C

Pada rumus diatas menunjukkan bahwa model masukan dari sensor suhu untuk simpangan negatif dengan titik c, d merupakan batas dari setiap simpangan negatif. Apabila nilai error suhu berada dalam keanggotaan negatif yakni nilai error lebih dari atau sama dengan dua derajat celcius maka nilai keanggotaannya adalah satu, apabila nilai error diantara nol sampai dengan dua maka nilai error berada dalam kawasan titik c dan d, dengan demikian maka nilai keanggotaan dapat dihitung dengan rumus $\mu[x] = (d-x) / (d-c)$, sedangkan apabila nilai error sama dengan atau lebih dari d maka nilai keanggotaannya adalah nol.

Dari penjelasan Gambar 3.17 maka dapat diambil contoh apabila suhu terukur satu derajat maka :

$$\begin{aligned} \mu (\text{negatif}) [x] &= \frac{(d-x)}{(d-c)}, \\ &= \frac{0^{\circ}\text{C} - (-1^{\circ}\text{C})}{0^{\circ}\text{C} - (-2^{\circ}\text{C})} \\ &= \frac{1}{2} \\ &= 0,5 \end{aligned}$$

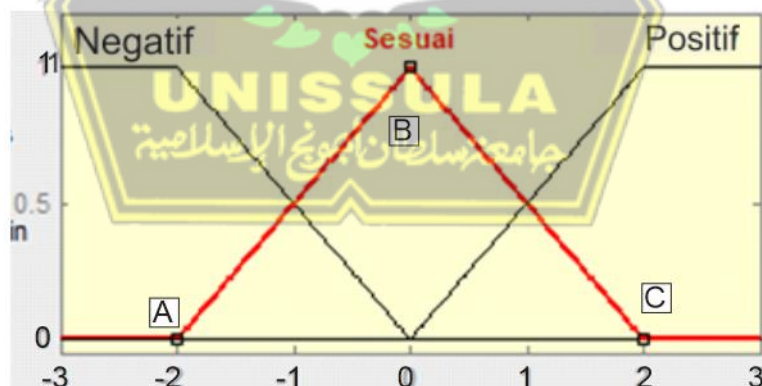
Maka nilai μ (negatif) [x] dapat disimulasikan nilai keanggotaannya sebagai berikut ditampilkan dalam Tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Simulasi Nilai μ (negatif)

Nilai x	(d-x)	(d-c)	$\mu = (d-x)/(d-c)$
-0.2	0.2	2	0.1
-0.4	0.4	2	0.2
-0.6	0.6	2	0.3
-0.8	0.8	2	0.4
-1	1	2	0.5
-1.2	1.2	2	0.6
-1.4	1.4	2	0.7
-1.6	1.6	2	0.8
-1.8	1.8	2	0.9
-2	2	2	1

Dari Tabel 3.2 diatas dijelaskan nilai fuzzy yang disimbolkan dengan μ terhadap nilai error yang di umpamakan dengan nilai x, dimana semakin besar nilai x maka nilai μ trapesium juga semakin besar.

Dalam perancangan sensor tekanan dengan fungsi keanggotaan S (sesuai) menggunakan aturan segitiga dengan posisi kemiringan di sebelah kanan dan kiri seperti yang sudah dijelaskan pada Gambar 3.18.

**Gambar 3. 19** Ruas segitiga untuk masukan dengan simpangan error sesuai.

Dari Gambar 3.19 digunakan untuk menentukan nilai keanggotaan dari masukan sensor suhu maka dapat dihitung dengan persamaan:

$$\text{Sesuai} = \begin{cases} 0, & x < a \text{ atau } x > a \dots\dots\dots(3.5) \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \dots\dots\dots(3.6) \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \dots\dots\dots(3.7) \\ 1 & x \geq c \dots\dots\dots(3.8) \end{cases}$$

Keterangan :

x = Nilai error suhu atau Δt

a = Batas domain keanggotaan sesuai bernilai 0 saat Δt kurang dari -2°C

b = Titik domain keanggotaan sesuai bernilai 1 saat Δt bernilai 0°C

c = Batas domain keanggotaan sesuai bernilai 0 saat Δt lebih dari 2°C

Pada rumusan diatas menunjukkan model masukan sensor suhu dengan simpangan tekanan sesuai segitiga, dengan titik a, b, dan c merupakan batasan dari simpangan negatif dan positif. Dari Gambar 3.17 nilai a adalah nilai batasan error -2, b adalah 0 dan c adalah nilai error 2 dengan persamaan ketika nilai error kurang dari 0 maka nilai fuzzy dapat dicari dengan persamaan $\mu = (b-x)/(b-a)$ sedangkan apabila nilai error lebih dari 0 maka nilai fuzzy dapat dicari dengan persamaan $\mu = (b-x)/(b-a)$. Adapun perhitungan dari dari persamaan diatas sebagai berikut:

Jika nilai error adalah $-0,35^{\circ}\text{C}$ maka nilai μ (sesuai) [x] adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \mu \text{ (sesuai) [x]} &= (b-x)/(b-a) \\ &= (0 - (-0,35^{\circ}\text{C}) / (0 - (-2^{\circ}\text{C}))) \\ &= 0,35 / 2 \\ &= 0.175 \end{aligned}$$

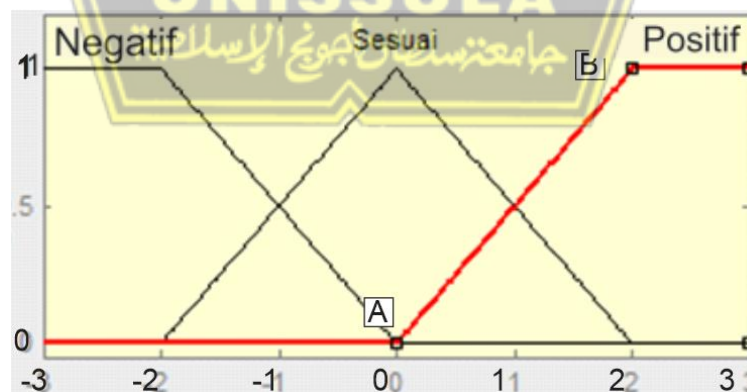
Maka nilai μ (sesuai) [x] dapat disimulasikan nilai keanggotaannya sebagai berikut ditampilkan dalam Tabel 3.3 di bawah ini:

Tabel 3. 3 Simulasi nilai μ (sesuai)

Nilai x > 0	(x-b)	(b-a)	$\mu = (b-x)/(b-a)$
2	2	2	1
1.8	1.8	2	0.9
1.6	1.6	2	0.8

1.4	1.4	2	0.7
1.2	1.2	2	0.6
1	1	2	0.5
0.8	0.8	2	0.4
0.6	0.6	2	0.3
0.4	0.4	2	0.2
0.2	0.2	2	0.1
0	0	2	0
Nilai $x < 0$	$(b-x)$	$(b-a)$	$\mu = (b-x)/(b-a)$
-0.2	0.2	2	0.1
-0.4	0.4	2	0.2
-0.6	0.6	2	0.3
-0.8	0.8	2	0.4
-1	1	2	0.5
-1.2	1.2	2	0.6
-1.4	1.4	2	0.7
-1.6	1.6	2	0.8
-1.8	1.8	2	0.9
-2	2	2	1

Untuk perancangan sensor tekanan dengan fungsi keanggotaan P (positif) menggunakan aturan trapesium dengan posisi kemiringan di sebelah kiri seperti yang sudah dijelaskan pada Gambar 3.19.



Gambar 3. 20 Ruas positif untuk masukan dengan simpangan error positif

Dari Gambar 3.20 maka ditentukan derajat keanggotaan untuk fungsi keanggotaan negatif dengan persamaan berikut :

$$\text{Positif} = \begin{cases} 0, & x \leq a \dots\dots\dots(3.10) \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \dots\dots\dots(3.11) \\ 1, & b \leq x \dots\dots\dots(3.12) \\ 0, & b \leq x \dots\dots\dots(3.13) \end{cases}$$

Keterangan :

x = Nilai error suhu atau Δt

a = Batas domain keanggotaan negatif bernilai 0 saat Δt kurang dari 0°C

b = Batas domain keanggotaan negatif bernilai 1 saat Δt lebih dari 2°C

Pada rumus diatas menunjukkan model masukan sensor suhu untuk simpangan positif dengan titik a dan b yang merupakan batas dari setiap simpangan positif. jika nilai error positif yakni nilai error lebih dari atau sama dengan dua derajat celcius maka nilai keanggotaannya adalah satu, apabila nilai error diantara nol sampai dengan dua maka nilai error berada dalam kawasan titik a dan b, dengan demikian maka nilai keanggotaan dapat dihitung dengan rumus $\mu(\text{positif}) [x] = (x-a)/(b-a)$ sedangkan apabila nilai error sama dengan atau lebih dari d maka nilai keanggotaannya adalah nol.

Dari persamaan diatas maka dapat diambil contoh apabila suhu terukur $1,4^{\circ}\text{C}$, maka :

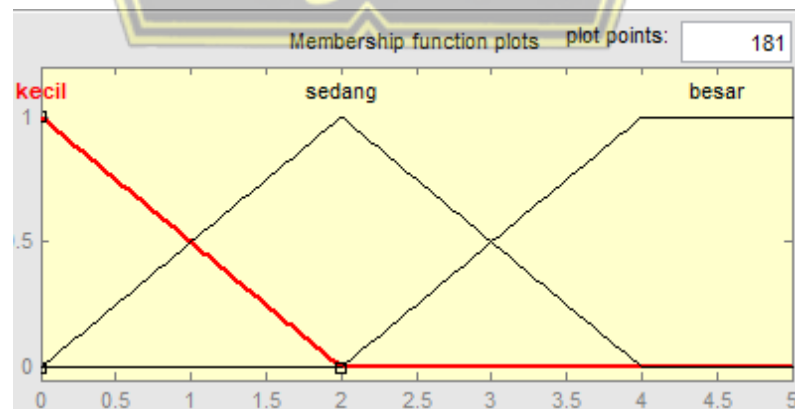
$$\begin{aligned} \mu(\text{positif}) [x] &= (x-a)/(b-a) \\ &= (1,4^{\circ}\text{C} - 0^{\circ}\text{C}) / (0^{\circ}\text{C} - (2^{\circ}\text{C})) \\ &= (-1,4^{\circ}\text{C} - (0^{\circ}\text{C})) / -2^{\circ}\text{C} \\ &= 1,4/2 \\ &= 0,7 \end{aligned}$$

Dari contoh perhitungan diatas maka dapat dicari nilai sampel dari $\mu(\text{positif}) [x]$ pada Tabel 3.4.

Tabel 3. 4 Simulasi Nilai μ (positive).

Nilai $x > 0$	$(x-a)$	$(b-a)$	$\mu = (x-a)/(b-a)$
2	2	2	1
1.8	1.8	2	0.9
1.6	1.6	2	0.8
1.4	1.4	2	0.7
1.2	1.2	2	0.6
1	1	2	0.5
0.8	0.8	2	0.4
0.6	0.6	2	0.3
0.4	0.4	2	0.2
0.2	0.2	2	0.1
0	0	2	0

Masukan kedua dalam proses fuzzifikasi adalah nilai dari arus yang digunakan dalam proses pendinginan sedangkan nilai masukan ketiga merupakan arus dari pemanas dimana arus pendingin merupakan arus DC dikarenakan menggunakan actuator berupa kipas pendingin yang bersumber dari arus DC kemudian pada masukan ketiga merupakan arus AC dikarenakan menggunakan sumber arus AC.

**Gambar 3. 21** Fungsi keanggotaan arus pendingin

Keterangan gambar 3.21 sampai dengan 3.24:

Kecil = Nilai Arus 0A sampai dengan 2A.

Sedang = Nilai Arus 0A sampai dengan 4A.

Besar = Nilai Arus lebih dari 2A.

Sumbu x (horizontal) = Rentang nilai arus pendingin.

Sumbu y (vertikal) = Rentang derajat keanggotaan dalam logika fuzzy.

Dalam perancangan sensor arus dengan fungsi kesanggotaan kecil menggunakan aturan segitiga siku-siku dengan nilai puncak keangggoraan pada arus 0A dan nilai paling kecil pada nilia $\geq 2A$ seperti yang dijelaskan pada gambar 3.22.



Gambar 3. 22 Ruas keanggotaan untuk keanggotaan kecil pada arus pendingin

Dari Gambar 3.22 maka ditentukan derajat keanggotaan untuk fungsi keanggotaan arus pendingin kecil dengan persamaan berikut:

$$\text{Kecil} = \begin{cases} 0, & x \geq c \dots\dots\dots(3.14) \\ 1 & x \leq 0 \dots\dots\dots(3.15) \\ \frac{2-x}{2} & 2 \geq x \geq 0 \dots\dots\dots(3.16) \end{cases}$$

Keterangan :

x = Nilai arus pendingin

a = Batas domain keanggotaan kecil bernilai 1 saat arus bernilai 0 amper

b = Batas domain keanggotaan kecil bernilai 0 saat arus lebih dari 2 amper

Rumusnya berbentuk segitiga siku-siku menurun (kadang juga disebut trapezoid kiri) dan dibagi dalam tiga bagian, pada saat arus sama dengan 0A maka nilainya adalah 1 sedangkan ketika nilainya lebih dari 2A maka nilainya adalah 0 sedangkan apabila nilai suhu kurang dari 2A dan lebih dari 0A maka perhitungannya sebagai berikut berdasarkan gambar 3.22 diatas:

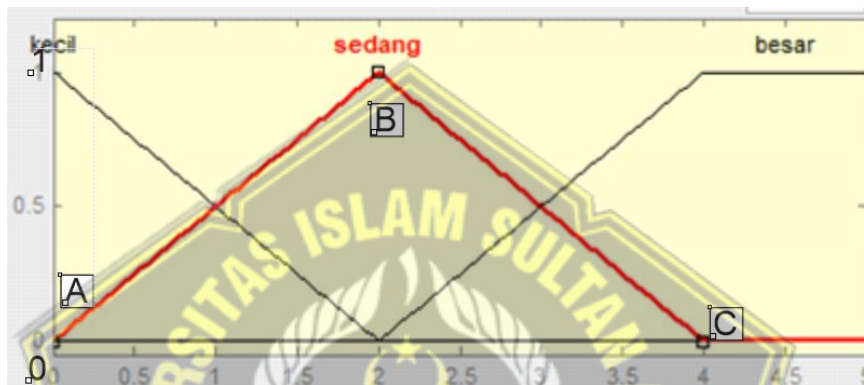
$$\begin{aligned}\mu (\text{kecil}) [x] &= \frac{2-x}{2} \\ &= \frac{2-0,4}{2} \\ &= \frac{1,6}{2} \\ &= 0,8\end{aligned}$$

Maka nilai μ (kecil) [x] dapat disimulasikan nilai keanggotaannya sebagai berikut ditampilkan dalam Tabel 3.5.

Tabel 3. 5 Simulasi Nilai μ (kecil)

Nilai x	2-x	$\mu = (2-x)/2$
0	2	1
0.2	1.8	0.9
0.4	1.6	0.8
0.6	1.4	0.7
0.8	1.2	0.6
1	1	0.5
1.2	0.8	0.4
1.4	0.6	0.3
1.6	0.4	0.2
1.8	0.2	0.1
2	0	0

Kemudian untuk Dalam perancangan sensor arus dengan fungsi keanggotaan sedang menggunakan aturan segitiga dengan posisi kemiringan di sebelah kanan dan kiri dengan sisi minimal sebelah kiri pada posisi 0A dan sisi minimal sebelah kanan adalah 4A dengan puncak nilai pada 2A sehingga pada arus 2A nilai keanggotaannya adalah 1 dan jika nilai Arus lebih dari 4A atau sama dengan 0A maka nilai keanggotaannya adalah 0 seperti yang sudah dijelaskan pada Gambar 3.5.



Gambar 3. 23 Ruas keanggotaan fuzzy untuk masukan keanggotaan sedang pada arus pendingin

Dari masukan arus pendingin untuk menentukan nilai keanggotaannya maka dibuat persamaan berikut:

$$\text{Sedang} = \begin{cases} 0, & x = 0 \text{ atau } x > c \dots\dots\dots(3.17) \\ \frac{x}{2} & a \leq x \leq b \dots\dots\dots(3.18) \\ \frac{4-x}{2} & b \leq x \leq c \dots\dots\dots(3.19) \\ 1 & x = b \dots\dots\dots(3.20) \end{cases}$$

Keterangan :

- x = Nilai arus pendingin
- a = Batas domain keanggotaan sedang bernilai 0 saat arus bernilai 0 A
- b = Batas domain keanggotaan sedang bernilai 1 saat arus bernilai 2 A
- c = Batas domain keanggotaan sedang bernilai 0 saat arus lebih dari 4 A

Sehingga akan menghasilkan nilai μ (sedang) $[x]$ kurang dari 1 jika nilai arus tidak sama dengan 2A dan lebih dari 0 jika arus tidak sama dengan 0A atau lebih kecil dari 4A. Sebagai contoh jika nilai arus sama dengan 1,4A maka:

$$\begin{aligned}\mu (\text{sedang}) [x] &= \frac{x}{2} \\ &= \frac{1,4}{2} \\ &= 0,7\end{aligned}$$

Maka nilai μ (sedang) $[x]$ dapat disimulasikan nilai keanggotaannya sebagai berikut ditampilkan dalam Tabel 3.6 di bawah ini:

Tabel 3. 6 Simulasi nilai μ (sedang)

Nilai $2 > x > 0$	$x/2$	
0	0	
0.2	0.1	
0.4	0.2	
0.6	0.3	
0.8	0.4	
1	0.5	
1.2	0.6	
1.4	0.7	
1.6	0.8	
1.8	0.9	
2	1	
Nilai $2 < x < 4$	$4-x$	$(4-x)/2$
2.2	1.8	0.9
2.4	1.6	0.8
2.6	1.4	0.7
2.8	1.2	0.6
3	1	0.5
3.2	0.8	0.4
3.4	0.6	0.3
3.6	0.4	0.2
3.8	0.2	0.1

4	0	0
---	---	---

Untuk perancangan sensor arus dengan fungsi keanggotaan besar menggunakan aturan trapesium dengan posisi kemiringan di sebelah kiri seperti yang sudah dijelaskan pada Gambar 3.24.



Gambar 3. 24 Ruas keanggotaan besar untuk masukan arus pendingin

Dari Gambar 3.24 maka ditentukan derajat keanggotaan untuk fungsi keanggotaan negatif dengan persamaan berikut :

$$\text{Besar} = \begin{cases} 0, & x \leq a \dots\dots\dots(3.21) \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \dots\dots\dots(3.22) \\ 1, & b \leq x \dots\dots\dots(3.23) \end{cases}$$

Keterangan :

x = Nilai arus pendingin

a = Batas domain keanggotaan besar bernilai 0 saat arus kurang dari 2 A.

b = Batas domain keanggotaan besar bernilai 1 saat arus lebih dari 4 A.

Dalam rumus pada persamaan 3.21 sampai 3.23 menjelaskan bahwa dalam ruas trapesium apabila nilai arus kurang dari 2A maka nilai keanggotaan besar bernilai 0 dan jika nilai arus lebih dari 4A maka nilai keanggotaanya adalah 1. Dari persamaan 3.21 sampai dengan 3.23 maka jika diambil contoh arus bernilai 3.4 maka:

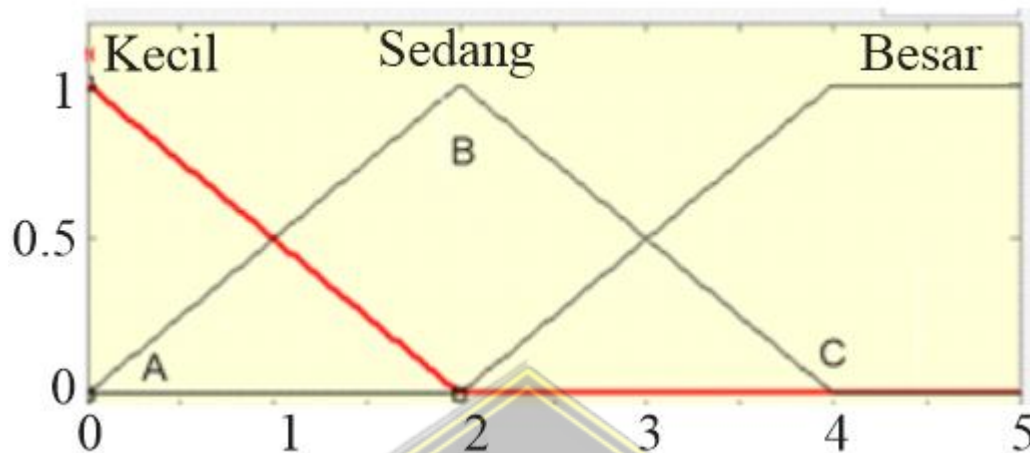
$$\begin{aligned}
 \mu \text{ (besar) } [x] &= \frac{x-2}{2} \\
 &= \frac{3,4-2}{2} \\
 &= \frac{1,4}{2} \\
 &= 0,7
 \end{aligned}$$

Dari contoh perhitungan diatas makan dapat dicari nilai sampel dari μ (besar) [x] pada Tabel 3.7.

Tabel 3. 7 Simulasi Nilai μ (besar)

Nilai x > 0	x-2	(x-2)/2
2	0	0
2.2	0.2	0.1
2.4	0.4	0.2
2.6	0.6	0.3
2.8	0.8	0.4
3	1	0.5
3.2	1.2	0.6
3.4	1.4	0.7
3.6	1.6	0.8
3.8	1.8	0.9
4	2	1

Pada perancangan sensor arus pemanas, fungsi keanggotaan "kecil" dirancang menggunakan bentuk segitiga siku-siku, dengan nilai keanggotaan maksimum terjadi pada arus 0 A dan menurun hingga mencapai nilai minimum pada arus ≥ 2 A, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.25.



Gambar 3. 25 Ruas untuk masukan keanggotaan kecil arus pemanas

Keterangan gambar 3.25 sampai dengan 3.26

Kecil = Nilai Arus 0A sampai dengan 2A.

Sedang = Nilai Arus 0A sampai dengan 4A.

Besar = Nilai Arus lebih dari 2A.

Sumbu x (horizontal) = Rentang nilai arus pemanas.

Sumbu y (vertikal) = Rentang derajat keanggotaan dalam logika fuzzy.

Berdasarkan Gambar 3.25, diperoleh rumus derajat keanggotaan untuk fungsi keanggotaan arus pendingin kategori kecil sebagai berikut:

$$\text{kecil} = \begin{cases} 0, & x \geq b \dots\dots\dots (3.24) \\ 1 & x = 0 \dots\dots\dots (3.26) \\ \frac{2-x}{2} & 2 \geq x \geq 0 \dots\dots\dots (3.27) \end{cases}$$

Keterangan :

x = Nilai arus pemanas

a = Batas domain keanggotaan kecil bernilai 1 saat arus bernilai 0 A

b = Batas domain keanggotaan kecil bernilai 0 saat arus lebih dari 2A

Rumusnya berbentuk segitiga siku-siku menurun (kadang juga disebut trapezoid kiri) dan dibagi dalam tiga bagian, pada saat arus sama dengan 0A maka nilainya adalah 1 sedangkan ketika nilainya lebih dari 2A maka nilainya adalah 0 sedangkan apabila nilai suhu kurang dari 2A dan lebih dari 0A maka perhitungannya sebagai berikut berdasarkan gambar 3.25 diatas:

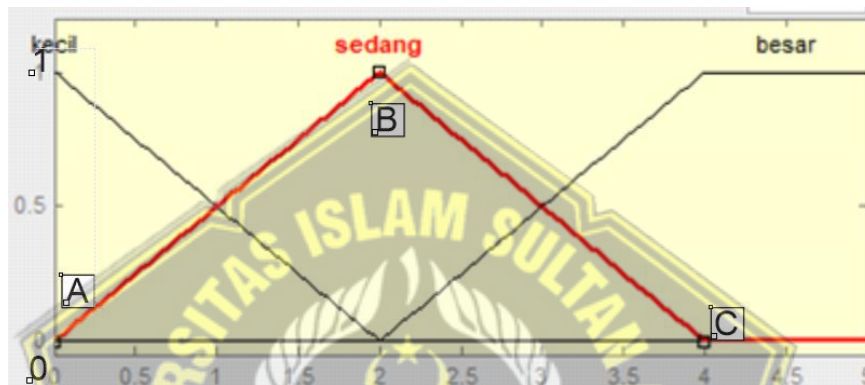
$$\begin{aligned}
 \mu (\text{kecil}) [x] &= \frac{2-x}{2} \\
 &= \frac{2-0,4}{2} \\
 &= \frac{1,6}{2} \\
 &= 0,8
 \end{aligned}$$

Maka nilai $\mu (\text{kecil}) [x]$ dapat disimulasikan nilai keanggotaannya sebagai berikut ditampilkan dalam Tabel 3.8.

Tabel 3. 8 Simulasi Nilai μ (kecil)

Nilai x	2-x	$\mu = (2-x)/2$
0	2	1
0.2	1.8	0.9
0.4	1.6	0.8
0.6	1.4	0.7
0.8	1.2	0.6
1	1	0.5
1.2	0.8	0.4
1.4	0.6	0.3
1.6	0.4	0.2
1.8	0.2	0.1
2	0	0

Kemudian untuk Dalam perancangan sensor arus pemanas dengan fungsi keanggotaan sedang menggunakan aturan segitiga dengan posisi kemiringan di sebelah kanan dan kiri dengan sisi minimal sebelah kiri pada posisi 0A dan sisi minimal sebelah kanan adalah 4A dengan puncak nilai pada 2A sehingga pada arus 2A nilai keanggotaannya adalah 1 dan jika nilai arus lebih dari 4A atau sama dengan 0A maka nilai keanggotaannya adalah 0 seperti yang sudah dijelaskan pada Gambar 3.26.



Gambar 3. 26 Ruas keanggotaan fuzzy untuk masukan keanggotaan sedang pada arus pemanas

Selanjutnya, pada perancangan sensor arus dengan fungsi keanggotaan "sedang", digunakan bentuk segitiga dengan kemiringan di kedua sisi, di mana nilai minimum berada pada arus 0 A di sisi kiri dan 4 A di sisi kanan. Nilai keanggotaan mencapai maksimum ($\mu = 1$) pada arus 2 A, sedangkan untuk arus sama dengan 0 A atau lebih dari 4 A, nilai keanggotaannya menjadi 0. Hal ini telah dijelaskan pada Gambar 3.26.

Dari masukan arus pendingin untuk menentukan nilai keanggotaannya maka dibuat persamaan 3.28 sampai dengan 3.31.

$$\text{Sedang} = \begin{cases} 0, & x = 0 \text{ atau } x > c \dots\dots\dots(3.28) \\ \frac{x}{2} & a \leq x \leq b \dots\dots\dots(3.29) \\ \frac{4-x}{2} & b \leq x \leq c \dots\dots\dots(3.30) \\ 1 & x = b \dots\dots\dots(3.31) \end{cases}$$

Sehingga akan menghasilkan nilai μ (sedang) $[x]$ kurang dari 1 jika nilai arus tidak sama dengan 2A dan lebih dari 0 jika arus tidak sama dengan 0A atau lebih kecil dari 4A. Sebagai contoh jika nilai arus sama dengan 1,4A maka:

$$\begin{aligned} \mu (\text{sedang}) [x] &= \frac{x}{2} \\ &= \frac{1,4}{2} \\ &= 0,7 \end{aligned}$$

Maka nilai μ (sedang) $[x]$ dapat disimulasikan nilai keanggotaannya sebagai berikut ditampilkan dalam Tabel 3.9 di bawah ini:

Tabel 3. 9 Simulasi nilai μ (sedang)

Nilai $2 > x > 0$	$x/2$
0	0
0.2	0.1
0.4	0.2
0.6	0.3
0.8	0.4
1	0.5
1.2	0.6
1.4	0.7
1.6	0.8
1.8	0.9
2	1

Nilai $2 < x < 4$	$4-x$	$(4-x)/2$
2.2	1.8	0.9
2.4	1.6	0.8
2.6	1.4	0.7
2.8	1.2	0.6
3	1	0.5
3.2	0.8	0.4
3.4	0.6	0.3
3.6	0.4	0.2
3.8	0.2	0.1
4	0	0

Untuk perancangan sensor arus dengan fungsi keanggotaan besar menggunakan aturan trapesium dengan posisi kemiringan di sebelah kiri seperti yang sudah dijelaskan pada Gambar 3.26



Gambar 3. 26 Ruas keanggotaan besar untuk masukan arus pemanas

Dari gambar 3.27 maka ditentukan derajat keanggotaan untuk fungsi keanggotaan negatif dengan persamaan berikut :

$$\text{Trapesium} = \begin{cases} 0, & x \leq a \dots\dots\dots(3.32) \\ \frac{x-2}{2} & a \leq x \leq b\dots\dots\dots(3.33) \\ 1, & b \leq x \leq c\dots\dots\dots(3.34) \end{cases}$$

Persamaan pada Rumus 3.32 sampai 3.34 menunjukkan bahwa pada fungsi keanggotaan berbentuk trapesium, nilai keanggotaan "besar" adalah 0 ketika arus kurang dari 2 A, dan mencapai nilai 1 saat arus melebihi 4 A. Berdasarkan persamaan tersebut, jika diambil contoh arus sebesar 3,4 A, maka:

$$\begin{aligned} \mu (\text{besar}) [x] &= \frac{x-2}{2} \\ &= \frac{3,4-2}{2} \\ &= \frac{1,4}{2} \\ &= 0,7 \end{aligned}$$

Dari contoh perhitungan diatas maka dapat dicari nilai sampel dari μ (besar) [x] pada Tabel 3.10

Tabel 3. 10 Simulasi Nilai μ (besar)

Nilai x > 0	x-2	(x-2)/2
2	0	0
2.2	0.2	0.1
2.4	0.4	0.2
2.6	0.6	0.3
2.8	0.8	0.4

3	1	0.5
3.2	1.2	0.6
3.4	1.4	0.7
3.6	1.6	0.8
3.8	1.8	0.9
4	2	1

Masukan kedua yang digunakan dalam proses fuzifikasi merupakan nilai turunan dari sensor suhu dengan membership sebagai berikut:

3.4.2.1. Proses Penalaran Mesin (Inference Engine)

Proses penalaran yang digunakan dalam penelitian kali ini adalah MAX – MIN, yang dimana nilai maksimum dari perbandingan nilai – nilai minimum pada error. Berikut penalaran yang dirancang untuk keluran pemanas dan kipas pendingin

Tabel 3.11 Penalaran Sistem Kendali Solder

Δ Error Suhu	I_h (arus pemanas)	I_c (arus pendingin)	Daya Pemanas	Daya Pendingin
Negatif	Besar	Sedang	Sedang	Kecil
Negatif	Sedang	Sedang	Besar	Kecil
Negatif	Sedang	Sedang	Besar	Sedang
Sesuai	Sedang	Sedang	Sedang	Sedang
Positif	Sedang	Besar	Kecil	Sedang
Positif	Sedang	Sedang	Kecil	Besar
Positif	Besar	Besar	Kecil	Besar

Sesuai	Besar	Sedang	Kecil	Kecil
Sesuai	Kecil	Besar	Besar	Besar

Pada pemodelan logika fuzzy dalam penelitian ini ada Sembilan aturan yang sudah ditentukan seperti penalaran yang sebelumnya sudah dijelaskan diatas.

Akhir dari proses dalam logika fuzzy adalah proses defuzifikasi yang merubah himpunan dalam logika fuzzy menjadi sinyal kendali yang digunakan untuk menggerakan plant. Plant dalam penelitian ini menggunakan pemanas berupa heater ptc yang memiliki pendekatan beban resistif dan kipas pendingin yang keduanya dikendalikan arus keluarannya. Keluaran dari membership ini adalah kecil, sedang dan besar. Untuk mencari nilai inferenai fuzzy maka ditetapkan menggunakan aturan min/max dimana nilai minimal hasil dari fuzzyfikasi dari masing-masing fuzzyfikasi yang akan diambil dari setiap sensor dimana masukan dari nilai error suhu dan arus pemanas menjadi masukan logika fuzzy untuk control pemanas kemudian error suhu dan arus kipas menjadi masukan logika fuzzy untuk sistem kendali kipas pendinginan, kedua sistem kedali akan dipadukan untuk mendapatkan hasil akhir suhu yang sesuai dengan setpoint yang sudah ditentukan dengan nilai error sekecil mungkin.

Setelah ditetukannya aturan penalaran sistem kendali yang sudah dijelaskan pada Tabel 3.11 maka selanjutnya akan dilakukan proses implikasi. Tahap ini mengubah input numerik (crisp input) menjadi nilai keanggotaan fuzzy. Untuk setiap input, kita hitung derajat keanggotaannya (μ) pada setiap himpunan fuzzy yang relevan.

Misalnya, jika masukan adalah Suhu, maka kita hitung μ Negatif (Error Suhu), μ Sesuai(Error Suhu), dan μ Positif(Error Suhu). Kemudian Setiap aturan dievaluasi untuk mendapatkan kekuatan pemicu atau *firing strength* (α). Operator logika *AND* yang menghubungkan kondisi dalam aturan dievaluasi menggunakan operator *Min*, atau diambil nilai μ terendah dari hasil fuzzyfikasi denga rumus 3.35 dibawah ini.

Rumus: $\alpha = \min(\mu_A(x), \mu_B(y), \mu_C(x))$ 3.35

Untuk aturan: Jika A adalah A1 dan B adalah B1 kemudian C adalah C1

Nilai α ini akan digunakan untuk "memotong" fungsi keanggotaan monoton pada bagian output. Sebagai contoh jika nilai μ_A (Error Suhu) bernilai 0,7 dan μ_B (Nilai Arus Pemanas) adalah 0,5 μ_C (Nilai Arus Pendingin Kecil) adalah 0,6 maka:

$\alpha = \min(\mu_{\text{Error Suhu Negatif}}(0,7), \mu_{\text{Nilai Arus Pemanas Kecil}}(0,5), \mu_{\text{Nilai Arus Pendingin Sedang}}(0,6))$

$\alpha = 0,5$ (Diambil nilai terendahnya dikarenakan menggunakan operator min)

Nilai kekuatan pemicu atau *firing strength* (α) sudah ditemukan maka selanjutnya akan dicari nilai dari z_{pemanas} dan $z_{\text{pendingin}}$ dengan membuat fungsi linear monoton, dimana daya maksimal sistem pendingin adalah 60 watt dan daya maksimal pemanas adalah 1100 watt maka ditentukan nilai z pada setiap rentang menjadi :

Daya Pendingin (Rentang 0 - 60 Watt)

- Kecil: Daya rendah, kita definisikan sebagai fungsi menurun dari 20W ke 0W.

$$z = 20 - 20\alpha \quad \text{.....3.36}$$

- Sedang: Daya menengah, naik dari 20W ke 40W.

$$z = 20 + 20\alpha \quad \text{.....3.37}$$

- Besar: Daya tinggi, naik dari 40W ke 60W (maksimal).

$$z = 40 + 20\alpha \quad \text{.....3.38}$$

Daya Pemanas (Rentang 0 - 1100 Watt)

- Kecil: Pemanasan rendah, kita definisikan sebagai fungsi menurun dari 300W ke 0W.

$$z=300-300\alpha \dots\dots\dots 3.39$$

- Sedang: Pemanasan menengah, naik dari 300W ke 700W.

$$z=300+400\alpha \dots\dots\dots 3.40$$

- Besar: Pemanasan tinggi, naik dari 700W ke 1100W (maksimal).

$$z=700+400\alpha \dots\dots\dots 3.41$$

Ketika sudah dapat ditentukan nilai *firing strength* (α) dan $z_{pemanas}$ dan $z_{pendingin}$ maka selanjutnya akan dilakukan rekapitulasi nilai output per Aturan (z_i) berdasarkan rumus 3.36 sampai dengan rumus 3.41. untuk lebih jelasnya aplikasi rumus 3.36 sampai dengan rumus 3.41 maka dijelaskan dalam table 3.12.

Tabel 3.12 Contoh Rekalkulasi Nilai Output per Aturan z)

Aturan	α_i	Output Pemanas (Aturan)	Output Pendingin (Aturan)	$z_{pemanas}$	$z_{pendingin}$
R1	0.25	Sedang	Kecil	$300+400(0.25)=400$	$20-20(0.25)=15$
R3	0.25	Besar	Kecil	$700+400(0.25)=800$	$20-20(0.25)=15$
R6	0.25	Besar	Besar	$700+400(0.25)=800$	$40+20(0.25)=45$
R7	0.5	Sedang	Sedang	$300+400(0.50)=500$	$20+20(0.50)=30$

Defuzzyfikasi

Tahap terakhir adalah menggabungkan semua nilai keluaran tegas individual (z_i) dari setiap aturan menjadi satu nilai keluaran akhir sistem (Z). Metode Tsukamoto menggunakan metode rata-rata terbobot (*weighted average*), yang juga sering disebut

sebagai *center average defuzzifier*. Dalam metode ini, setiap nilai z_i diberi bobot sesuai dengan kekuatan pemicu aturannya, α_i . Dimana persamaan $z_{pemanas_i}$ dan $z_{pendingin_i}$ yang dijelaskan lebih detail pada persamaan 3.42 dan 3.43.

$$z_{pemanas_i} = \alpha_i \times z_{pemanas} \dots\dots\dots 3.42$$

$$z_{pendingin_i} = \alpha_i \times z_{pendingin} \dots\dots\dots 3.43$$

Sudah dijelaskan pada persamaan 3.42 dan 3.43 maka pada tabel 3.13 akan diperlihatkan bagaimana nilai $z_{pemanas_i}$ dan $z_{pendingin_i}$ dalam beberapa kondisi yang kemudian akan dimasukkan ke dalam proses defuzzifikasi. Berikut ditampilkan contoh perhitungannya dalam tabel 3.13.

Tabel 3.13 Tabel Perhitungan Rata-Rata Terbobot Menggunakan Nilai z_i

Aturan	α_i	$z_{pemanas}$	$z_{pendingin}$	$z_{pemanas_i}$ ($\alpha_i \times z_{pemanas}$)	$z_{pendingin_i}$ ($\alpha_i \times z_{pendingin}$)
R1	0.25	400	15	100	3.75
R3	0.25	800	15	200	3.75
R6	0.25	800	45	200	11.25
R7	0.50	500	30	250	15.00
Total (Σ)	1.25			750	33.75

Dari Tabel 3.13 maka akan didapat hasil nilai akhir dari defuzzyfikasi untuk sistem kendali pemanas dan sistem kendali pendingin dengan menggunakan persamaan 3.44 untuk mencari defuzzyfikasi sistem kendali pemanas dan 3.45 untuk defuzzyfikasi sistem kendali pendingin:

$$z_{pemanas_i} = \frac{\sum (\alpha_i \times z_{pemanas})}{\sum \alpha_i} \dots\dots\dots 3.44$$

$$z_{pendingin_i} = \frac{\sum (\alpha_i \times z_{pendingin})}{\sum \alpha_i} \dots\dots\dots 3.45$$

Maka dari persamaan 3.44, 3.45 dan tabel 3.13 maka didapat nilai defuzzyfikasi sebagai berikut:

Perhitungan daya pemanas:

$$\begin{aligned}
 z_{pemanas_i} &= \frac{\sum(a_i \times z_{pemanas})}{\sum a_i} \\
 &= \frac{750}{1.25} \\
 &= 600 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

Perhitungan daya pendingin:

$$\begin{aligned}
 z_{pendingin_i} &= \frac{\sum(a_i \times z_{pendingin})}{\sum a_i} \\
 &= \frac{33.75}{1.25} \\
 &= 27 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

3.5 Pengujian dan Analisa

Analisis data dalam penelitian ini akan mencakup uraian model dan cara analisis dari daya yang dihasilkan. Dalam penelitian ini digunakan metode penelitian kuantitatif eksperimen dengan tujuan membuktikan hipotesis penelitian dalam kondisi yang terkendali. Dalam penelitian ini ada beberapa sumber data yang menjawab dari hipotesis sesuai dengan variabel penelitian diantaranya sumber data arus, ketepatan suhu solder reflow hot plate terhadap suhu yang sudah ditetapkan, dan besaran overshoot, settling max, settling min, rise time, peak time dan settling time dari setiap parameter yang sudah ditentukan.

Selain itu untuk mendapatkan data yang lebih akurat maka dalam penelitian ini disertakan pula data steadystate time yang merupakan nilai yang dibutuhkan dari sistem kendali dalam mencapai nilai steady state dihitung mulai sistem pertama dimulai dan juga disajikan data steady state error yang merupakan persentase kesalahan yang dialami sistem kendali pada saat kondisi steady state.



BAB IV

HASIL DAN PENGUJIAN

Setelah melakukan perancangan perangkat keras dan perangkat lunak maka langkah selanjutnya adalah tahapan pengujian alat dari beberapa bagian yang sudah dirancang sebelumnya. Awal mula pengujian adalah pengujian sensor yang dipakai yang meliputi sensor suhu, arus dan tegangan yang kemudian akan menjadi bahan analisis dalam penelitian ini, selain itu akan dilakukan fungsi dari layar penampil berupa LCD yang akan menampilkan parameter yang sudah ditentukan, pada tahapan akhir akan dilakukan pengujian fungsi dari logika fuzzy yang akan digunakan.

Penelitian ini bermaksud untuk merancang sistem kendali pada solder yang menggunakan plat pemanas untuk melakukan pensolderan komponen SMD dengan tujuan untuk mendapatkan kepresisian suhu dalam melakukan pensolderan sehingga didapatkan hasil pensolderan yang baik. Penelitian ini akan menggunakan logika fuzzy untuk sistem kendalinya. Berdasarkan metode penelitian yang sudah dijelaskan dalam bab tiga, penelitian ini akan melalui beberapa tahapan. Beberapa tahapan yang dilalui dalam penelitian ini meliputi Studi Pustaka, Analisa Kebutuhan, Perancangan, Pelaksanaan serta Pengujian dan Analisa. Dalam upaya memperjelas dari hasil penelitian ini maka akan dijelaskan dalam bab empat.

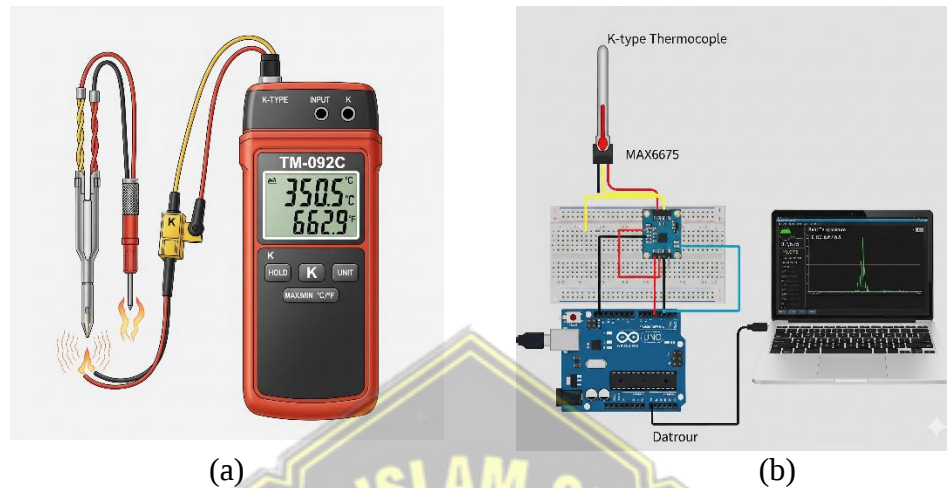
4.1 Pengujian Alat

4.1.1. Pengujian Sensor

Sensor yang digunakan adalah sensor suhu, sensor tegangan dan sensor arus dengan Sensor yang suhu yang digunakan dalam penelitian ini adalah sensor thermocouple tipe k dengan rentang kerja antar 0°C - 400°C, sensor tegangan dengan rentang sekitar 220V AC dan sensor arus dengan rentang 0A AC sampai dengan 10A AC dengan menggunakan modul Pzem 004T. Adapun hasil pengujian sensor-sensor yang dipakai dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 4.1 sampai dengan Tabel 4.3 dan Gambar 4.1.

Tabel 4. 1 Hasil Pengujian Sensor Suhu

Suhu terukur (°C)	Suhu terbapaca pada thermocouple (°C) sebelum dipasang pada sistem kendali	Nilai error suhu pada thermocouple (oC) sebelum dipasang pada sistem kendali	Suhu terbapaca pada thermocouple (°C) sesudah dipasang pada sistem kendali	Nilai error suhu pada thermocouple (oC) sesudah dipasang pada sistem kendali
35	35,7	0,7	35.03	0.03
40	40,4	0,4	40.45	0.45
50	50,3	0,3	50.33	0.33
60	60,3	0,3	60.51	0.51
70	70,6	0,6	70.94	0.94
80	80,5	0,5	80.71	0.71
90	90,4	0,4	90.29	0.29
100	100,3	0,3	100.85	0.85
110	110,7	0,7	110.02	0.02
120	120,6	0,6	120.06	0.06
130	130,5	0,5	130.62	0.62
140	140,4	0,4	140.6	0.6
150	150,3	0,3	150.66	0.66
160	160,2	0,2	160.97	0.97
170	170,6	0,6	170.16	0.16
180	180,5	0,5	180.96	0.96
190	190,9	0,9	190.88	0.88
200	200,8	0,8	200.81	0.81
210	209.7	0.3	210.08	0.08
220	220.3	0.3	220.92	0.92
Error rata-rata		0,5		0.54

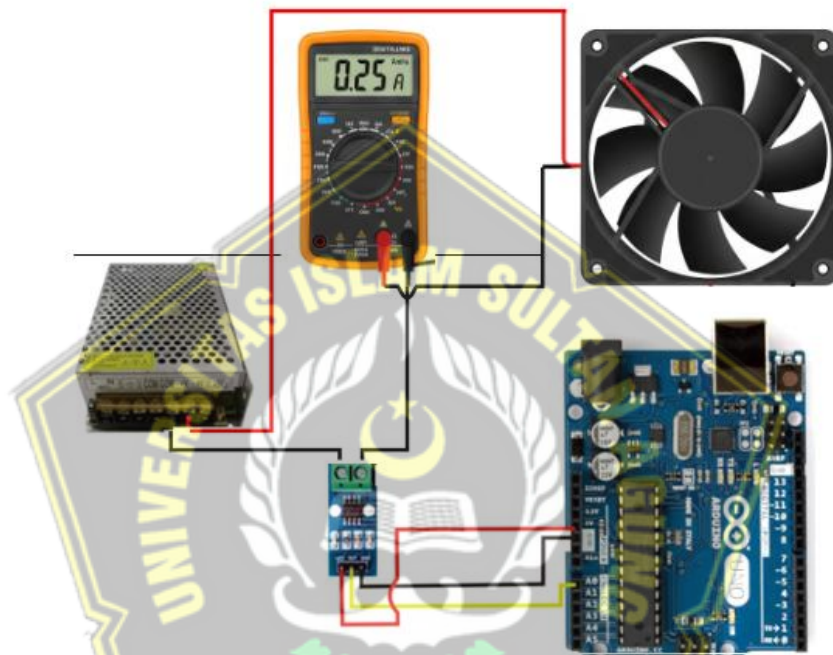


Gambar 4.1 (a) Gambar visualisasi simulasi proses pengambilan data suhu dengan alat ukur di pasaran sebelum dipasang pada solder. (b) Gambar Visualisasi simulasi proses pengambilan data suhu dengan max6675 dan Atmega 328(Arduino Uno)

Tabel 4. 2 Tabel Hasil Pengujian Sensor Arus ACS 712

No.	Arus Terukur Pada Ampermeter (Amper)	Hasil Pembacaan arus pada ACS 712 sebelum dipasang di sistem kendali (Amper)	Error pembacaan arus pada ACS 712 sebelum dipasang di sistem kendali (Amper)	Hasil Pembacaan arus pada ACS 712 setelah dipasang di sistem kendali (Amper)	Error pembacaan arus pada ACS 712 setelah dipasang di sistem kendali (Amper)
1	0.51	0.52	0.01	0.51	0.00
2	1.05	1.11	0.07	1.03	-0.01
3	1.57	1.66	0.10	1.55	-0.02
4	2.06	2.14	0.09	2.04	-0.01
5	2.54	2.59	0.05	2.53	-0.01
6	3.02	3.05	0.03	3.02	-0.01
7	3.51	3.54	0.02	3.51	0.00
8	4.04	4.10	0.06	4.03	-0.01

9	4.53	4.56	0.04	4.52	-0.01
10	5.03	5.08	0.05	5.03	-0.01
Rata-rata		0.05			-0.01

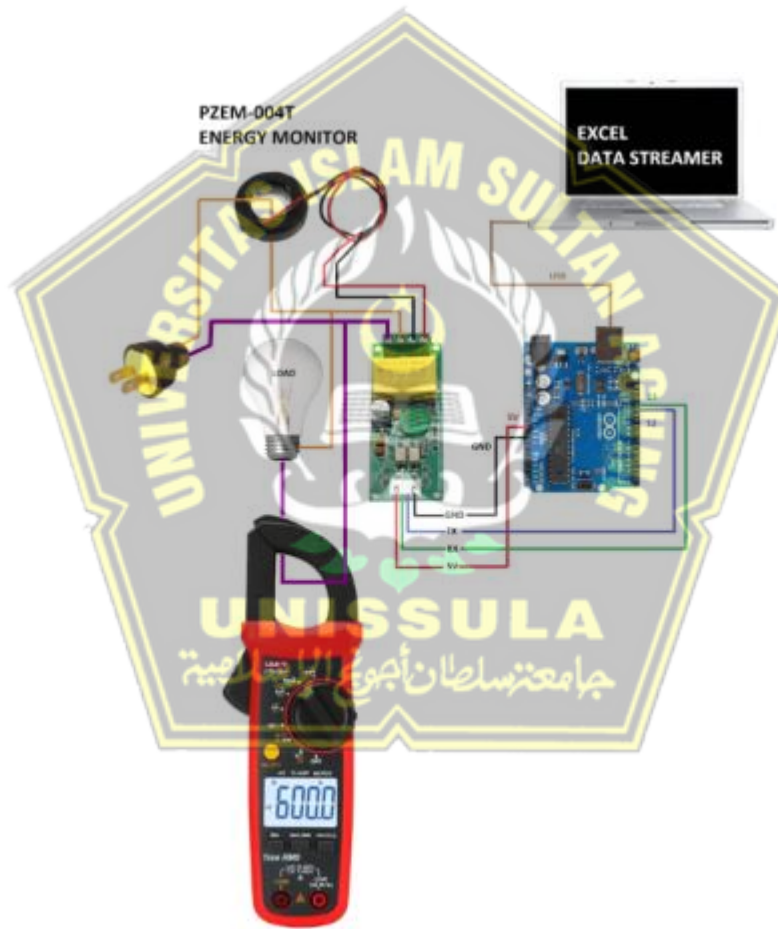


Gambar 4.2 Visualisais pengkabelan dalam pengambilan data untuk tabel 4.2

Tabel 4. 3 Tabel Hasil Pengujian Sensor Arus AC Pada PZEM 004

No.	Rata-rata Tang Ampere (Amper)	Hasil Pembacaan arus pada Pzem 004 sebelum dipasang di sistem kendali (Amper)	Error pembacaan arus pada Pzem 004 sebelum dipasang di sistem kendali (Amper)	Hasil Pembacaan arus pada Pzem 004 setelah dipasang di sistem kendali (Amper)	Error pembacaan arus pada Pzem 004 setelah dipasang di sistem kendali (Amper)
1	0.50	0.55	0.05	0.59	0.09
2	1.00	1.07	0.07	1.08	0.08
3	1.50	1.51	0.01	1.61	0.11

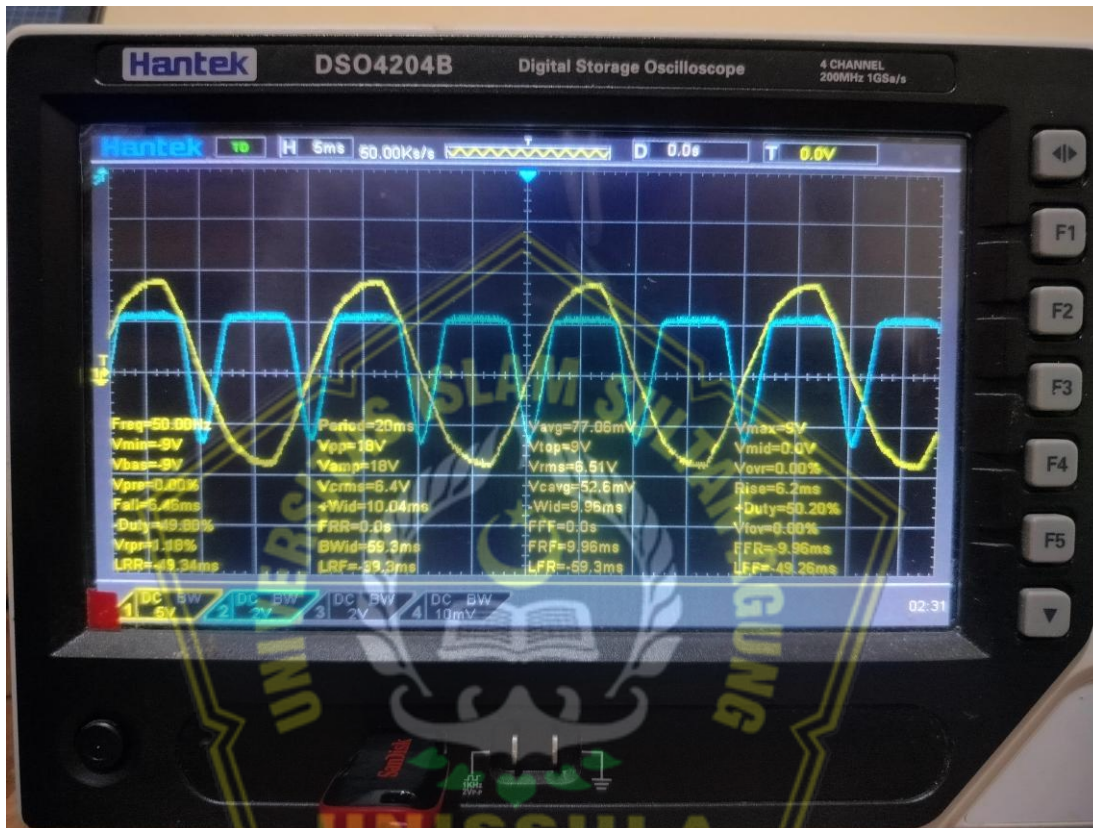
4	2.00	2.08	0.08	2.04	0.04
5	2.50	2.61	0.11	2.60	0.10
6	3.00	3.07	0.07	3.05	0.05
7	3.50	3.60	0.10	3.57	0.07
8	4.00	4.13	0.13	4.11	0.11
9	4.50	4.64	0.14	4.59	0.09
10	5.00	5.12	0.12	5.07	0.07
Rata-rata			0.09		0.08



Gambar 4.3 Visualisasi wiring dalam proses pengambilan data pada tabel 4.3

Berdasarkan tabel 4.1 didapatkan kesimpulan bahwa sensor suhu yang digunakan berfungsi dengan baik dengan kesalahan rata-rata 0,5°C. Pada Tabel 4.2 juga menunjukkan hasil yang cukup baik dengan nilai kesalahan sensor arus terukur 0,05 ampere

dan pada Tabel 4.3 menunjukkan hasil dari sensor arus yang cukup baik dengan nilai kesalahan pada rentang 0.08 ampere yang jika dilihat error pembacaan setiap sensor rata-rata sudah dibawah 10% sehingga dirasa sudah layak untuk digunakan.



Gambar 4.4 Hasil Pengujian Secara Visual Zerocross Detector

Gambar 4.4 menampilkan hasil pengamatan langsung menggunakan osiloskop digital Hantek DSO4204B terhadap performa rangkaian zero-crossing detector. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi ketepatan dan kecepatan respons sistem deteksi saat gelombang sinusoidal tegangan AC menyilang titik nol (zero-crossing), yang merupakan aspek krusial dalam sistem kendali berbasis fase, seperti pengaturan daya pemanas pada solder reflow.

Pada tampilan osiloskop, terdapat dua channel pengukuran:

- Channel 1 (warna kuning) merepresentasikan sinyal input berupa gelombang sinusoidal 50 Hz yang diturunkan dari tegangan jala-jala PLN 220 Volt AC

menjadi ± 6 Volt AC menggunakan transformator step-down. Tujuan penurunan tegangan ini adalah untuk memungkinkan visualisasi aman dan akurat pada perangkat osiloskop tanpa membahayakan perangkat maupun pengguna.

- Channel 2 (warna biru) menunjukkan sinyal output dari rangkaian zero-crossing detector yang berbasis komparator, yang menghasilkan sinyal digital berbentuk gelombang persegi. Gelombang persegi ini berubah dari logika rendah ke tinggi, atau sebaliknya, setiap kali gelombang sinusoidal menyilang titik nol.

Dari hasil pengamatan, dapat terlihat bahwa transisi logika pada sinyal keluaran (channel biru) terjadi secara sinkron dengan titik nol pada gelombang sinusoidal (channel kuning). Hal ini menunjukkan bahwa rangkaian zero-crossing detector memiliki resolusi temporal dan akurasi tinggi dalam mendeteksi momen nol-cross dengan deviasi waktu yang sangat kecil dan tidak signifikan. Informasi ini menjadi penting karena kesalahan deteksi atau keterlambatan respon pada sistem zero-cross dapat menyebabkan ketidaktepatan dalam pengaturan sudut penyalan (firing angle) TRIAC atau pengendali daya lainnya, yang pada akhirnya akan berdampak pada kestabilan suhu sistem solder reflow.

Selain itu, gelombang persegi yang dihasilkan oleh detektor memiliki duty cycle sekitar 50%, sesuai dengan frekuensi 50 Hz dari input AC. Ini menunjukkan bahwa sistem detektor mampu mengikuti frekuensi AC tanpa mengalami distorsi atau kehilangan siklus, sehingga dapat diandalkan untuk digunakan sebagai sumber interrupt eksternal pada mikrokontroler dalam sistem kendali suhu solder reflow. Perlu untuk diketahui bahwa tegangan yang dibaca Oscilloscope untuk sinyal zero cross detector memiliki rentang 0-5 Volt DC, sedangkan pada microcontroller untuk membaca sinyal digital bernilai 0 (zero) pada tegangan 0-1,5 Volt DC dan akan bernilai 1 pada tegangan 1,5-5v, sehingga pada sinyal zerocross meskipun seakan akan bernilai masih 1 namun pada pembacaanya pada tegangan kurang dari 1,5 Volt bernilai 0 (zero), selain itu keterlambatan perubahan sinyal detector dalam mengikuti sinyal sinusoidal diakibatkan oleh death time clock dari optocoupler yang digunakan, besaran death time clock 10-18

microsecond, sehingga sinyal zero cross akan tertinggal setidaknya selama 18 microsecond.

Dengan hasil ini, dapat disimpulkan bahwa sistem zero-crossing detector bekerja dengan sangat baik dan layak digunakan sebagai acuan waktu dalam implementasi sistem kendali suhu berbasis logika fuzzy pada solder reflow, karena mampu mendeteksi setiap lintasan nol tegangan dengan presisi tinggi, dan tidak menimbulkan delay atau jitter yang dapat memengaruhi kestabilan proses pensolderan.

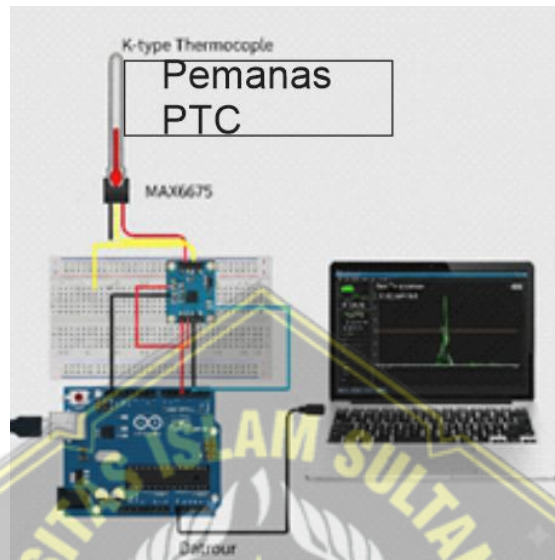
4.1.2. Pengujian Plat Pemanas

Data tersebut merekam hasil pengujian sebuah plat pemanas. Pengamatan dimulai dari kondisi awal (detik ke-0) pada suhu 30.0°C. Seiring berjalannya waktu, plat pemanas secara konsisten dipanaskan, yang menyebabkan suhunya terus meningkat secara signifikan. Proses pemanasan ini diamati selama 220 detik, dan pada akhir pengujian, suhu plat tercatat mencapai 220.3°C. Ini menggambarkan sebuah proses perpindahan panas yang efisien pada plat tersebut dalam rentang waktu yang diamati

Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Plat Pemanas Berdasarkan Waktu

Waktu (detik)	Pembacaan Suhu (°C)
0	30.0
20	48.8
40	66.6
60	86.0
80	99.9
100	117.6
120	136.3
140	154.9
160	173.4
180	191.9
200	210.4

220	220.3
-----	-------



Gambar 4.5 Visualisasi pngambilan data pada tabel 4.4

Berdasarkan data hasil pengujian plat pemanas, dapat disimpulkan bahwa terdapat hubungan yang sangat kuat dan positif antara waktu pemanasan dengan suhu yang dihasilkan. Pengujian yang dimulai dari suhu 30.0°C pada detik ke-0 menunjukkan peningkatan suhu yang konsisten dan cenderung linear, mencapai 220.3°C dalam waktu 220 detik. Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa laju kenaikan suhu rata-rata selama periode pengujian adalah sekitar 0.87°C per detik, yang mengindikasikan plat pemanas bekerja secara stabil dan efisien. Hubungan linear ini menyiratkan performa plat pemanas yang dapat diprediksi, di mana setiap penambahan waktu akan menghasilkan kenaikan suhu yang sebanding, meskipun teramati adanya sedikit perlambatan laju pemanasan menjelang akhir periode pengujian.

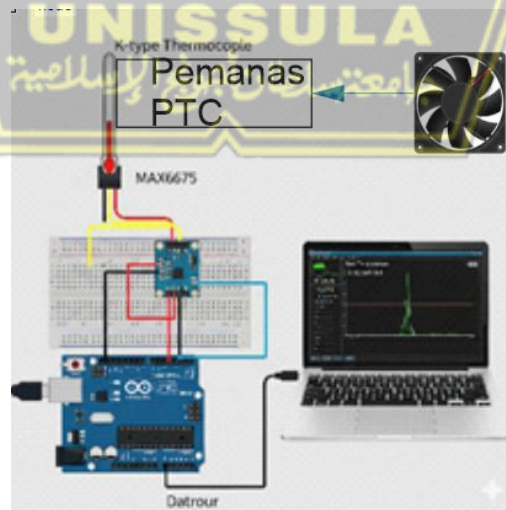
4.1.3. Pengujian Kipas Pendingin

Sistem pendingin yang digunakan pada penelitian ini akan menggunakan tegangan sekitar 12V DC, di mana kipas pendingin akan dikendalikan besar dayanya dengan mengatur nilai Pulse Width Modulation (PWM) pada arus DC. Nilai PWM

yang digunakan akan diatur oleh logika fuzzy. Hasil pengujian sistem pendingin dapat dilihat pada tabel sampel data sistem kendali fuzzy untuk pendinginan solder reflow.

Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Pendinginan Berdasarkan Waktu

Waktu (detik)	Nilai Pembacaan Suhu (°C)
0	222.5
20	205.7
40	187.2
60	171
80	153.3
100	137.4
120	120.1
140	103.2
160	85.6
180	69.2
200	49.9
220	37



Gambar 4.6. Visualisasi pengambilan data pada tabel 4.5

Tabel 4.5 di atas menyajikan data hasil pengujian sistem kendali suhu berbasis logika fuzzy pada proses pendinginan solder reflow. Data menunjukkan perubahan suhu sistem dari kondisi panas menuju kondisi dingin dalam rentang waktu 0 hingga 220 detik, dengan pembacaan dilakukan setiap 20 detik.

Pada kolom pertama tercatat waktu dalam satuan detik, kolom kedua menunjukkan suhu setpoint yang telah ditentukan untuk setiap waktu tertentu, kolom ketiga adalah nilai pembacaan suhu aktual dari sensor, dan kolom keempat menunjukkan error suhu, yaitu selisih antara setpoint dan nilai pembacaan aktual ($\text{Error} = \text{Setpoint} - \text{Pembacaan}$).

Pada detik ke-0, suhu awal sistem berada pada $222,5^{\circ}\text{C}$, sesuai dengan suhu yang terbaca oleh sensor, sehingga error bernilai 0°C . Seiring waktu, suhu setpoint menurun secara bertahap, merepresentasikan proses pendinginan terkontrol. Nilai pembacaan sensor cenderung mengikuti penurunan setpoint, dengan selisih error yang relatif kecil, menunjukkan bahwa sistem kendali fuzzy mampu menjaga suhu mendekati target yang diinginkan.

Error suhu yang tercatat berada dalam kisaran $-1,5^{\circ}\text{C}$ hingga $0,8^{\circ}\text{C}$, menandakan bahwa sistem memiliki tingkat akurasi yang baik dalam mengikuti penurunan suhu yang diharapkan. Nilai error yang positif mengindikasikan suhu aktual sedikit lebih tinggi dari target, sementara nilai negatif menunjukkan suhu aktual lebih rendah dari target. Hal ini menggambarkan kemampuan sistem dalam merespons dinamika pendinginan melalui pengaturan PWM pada kipas DC 12V yang dikendalikan oleh logika fuzzy.

Secara keseluruhan, tabel ini menunjukkan performa sistem kendali fuzzy yang stabil dan responsif dalam proses pendinginan, dengan deviasi suhu yang masih dalam batas toleransi yang dapat diterima.

4.1.4 Pengujian Sistem Kendali Solder Reflow Dengan Logika Fuzzy

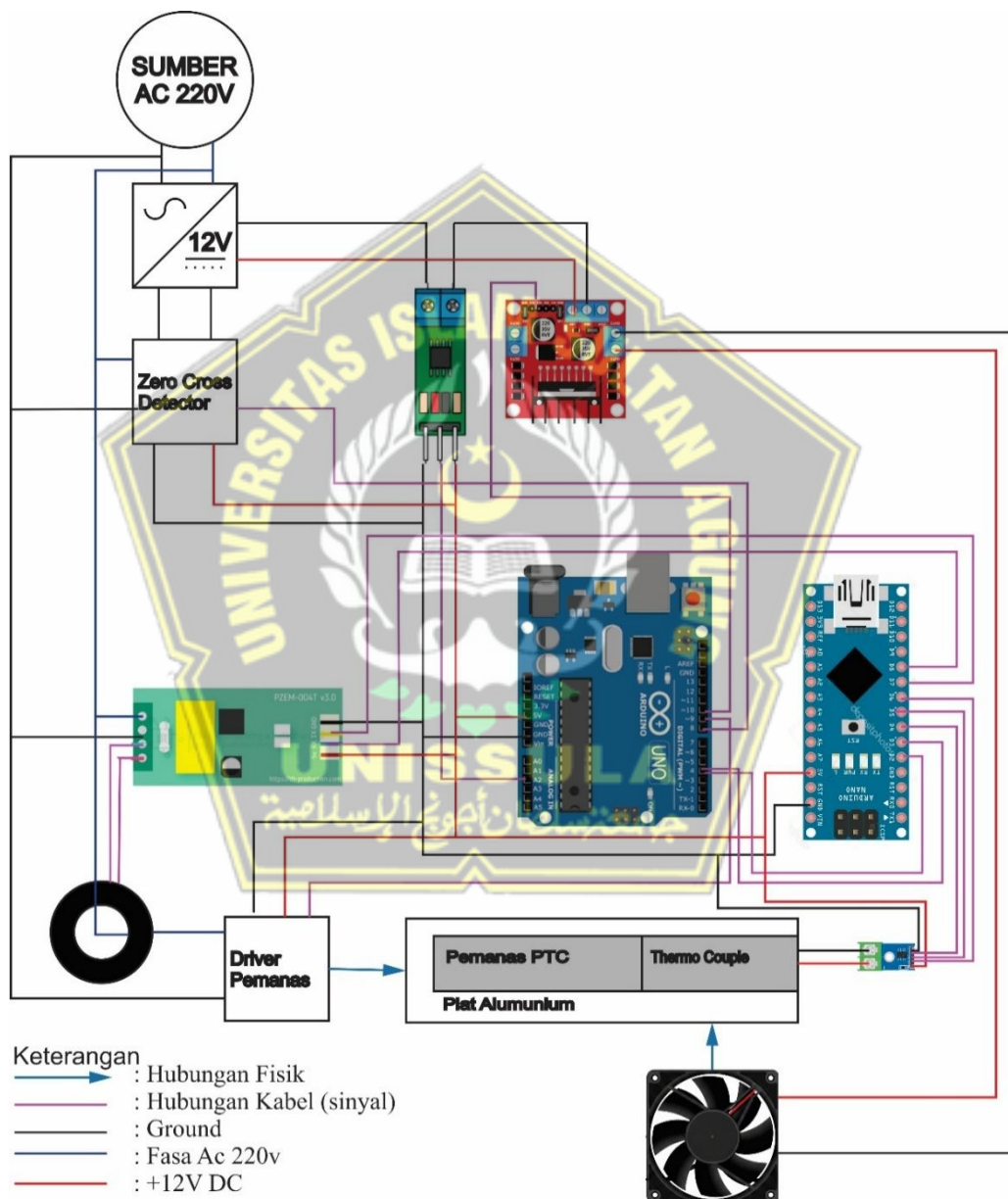
Tabel 4.6 menyajikan hasil pengujian sistem kendali suhu pada perangkat solder reflow yang dikendalikan oleh logika fuzzy. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengevaluasi sejauh mana sistem kendali mampu mengarahkan suhu sesuai

dengan setpoint yang ditentukan pada setiap interval waktu, sekaligus mengukur akurasi dan presisi sistem dalam mempertahankan kestabilan suhu selama proses reflow berlangsung, berikut ditampilkan tabel 4.6

Tabel 4. 6 Hasil Pengujian Sistem Kendali Plat Pemanas Berdasarkan Waktu

Waktu (detik)	Setpoint Suhu (°C)	Nilai Pembacaan Suhu (°C)	Error (°C)
0	30.0	29.4	-0.6
20	56.7	58.2	1.5
40	83.3	82.8	-0.5
60	110.0	110.1	0.1
80	136.7	137.6	0.9
100	156.7	155.5	-1.2
120	170.0	169.4	-0.6
140	183.3	184.0	0.7
160	196.7	195.9	-0.8
180	210.0	210.5	0.5
200	226.7	225.7	-1.0
220	222.5	222.5	0.0
240	205.8	205.7	-0.1
260	188.1	187.2	-0.9
280	171.0	171.0	0.0
300	153.9	153.3	-0.6
320	136.8	137.4	0.6
340	119.7	120.1	0.4
360	102.6	103.2	0.6
380	85.5	85.6	0.1
400	68.4	69.2	0.8

420	51.3	49.9	-1.4
440	38.5	37.0	-1.5



Gambar 4.7 Visualisasi pengkabelan untuk pengambilan data pada tabel 4.6

Pengujian dimulai pada suhu awal 30°C, dengan peningkatan suhu secara bertahap setiap 20 detik. Data setpoint dan nilai pembacaan suhu aktual ditampilkan, serta dihitung nilai error sebagai selisih antara suhu target dengan pembacaan aktual. Pada fase pemanasan awal (0–100 detik), sistem menunjukkan respon yang cepat dan cukup akurat, dengan nilai error relatif kecil. Sebagai contoh, pada detik ke-20 setpoint berada di 56.7°C dan suhu aktual tercatat 58.2°C, memberikan nilai error sebesar +1.5°C, yang masih dalam batas toleransi sistem pengendalian suhu solder. Hal ini menunjukkan bahwa sistem fuzzy memiliki kemampuan adaptif dalam menyesuaikan output daya pemanas terhadap kondisi suhu lingkungan.

Memasuki fase soak zone (100–160 detik), suhu target dinaikkan secara bertahap hingga mendekati 200°C. Pada periode ini, sistem tetap mampu menjaga kesesuaian antara setpoint dan suhu aktual. Sebagai contoh, pada detik ke-140 setpoint berada di 183.3°C dan suhu aktual adalah 184.0°C, menghasilkan error hanya +0.7°C, yang menunjukkan kestabilan sistem dalam zona krusial saat proses reflow berlangsung.

Pada puncak suhu reflow (200–220 detik), sistem mencapai suhu maksimum setpoint sebesar 226.7°C pada detik ke-200, dengan pembacaan aktual sebesar 225.7°C, menunjukkan error -1.0°C. Pada detik ke-220, suhu dijaga pada 222.5°C dengan pembacaan yang tepat sesuai, yaitu 222.5°C, atau error 0.0°C. Ini menunjukkan bahwa logika fuzzy bekerja sangat efektif dalam mencapai dan mempertahankan suhu target puncak tanpa overshoot yang signifikan.

Setelah itu, sistem memasuki fase pendinginan (240–440 detik), di mana suhu setpoint secara bertahap diturunkan. Hasil pembacaan suhu menunjukkan tren penurunan yang stabil dan mengikuti setpoint dengan akurasi tinggi. Meskipun terdapat fluktuasi error kecil pada beberapa titik (misalnya -1.5°C pada detik ke-440), perbedaan tersebut masih tergolong kecil dan tidak berdampak signifikan terhadap kualitas penyolderan, karena sistem telah melewati zona krusial reflow sebelumnya. Secara keseluruhan, data pada Tabel 4.6 menunjukkan bahwa sistem kendali dengan logika fuzzy mampu mengatur suhu dengan tingkat akurasi yang tinggi di sepanjang

tahapan penyolderan. Nilai error pada seluruh tahapan berkisar antara -1.5°C hingga $+1.5^{\circ}\text{C}$, yang menunjukkan bahwa variasi suhu berada dalam rentang toleransi termal proses reflow soldering. Hal ini membuktikan bahwa penerapan logika fuzzy dalam sistem solder reflow efektif dalam memberikan pengendalian suhu yang presisi, adaptif terhadap perubahan, dan sesuai dengan profil termal standar industri solder reflow.

4.1.5. Pengujian Solder Reflow Dari Pasaran

Sebagai langkah awal dalam proses evaluasi dan validasi terhadap sistem kendali fuzzy yang dikembangkan dalam penelitian ini, dilakukan pengujian terhadap perangkat solder konvensional yang tersedia di pasaran. Pengujian ini bertujuan untuk memperoleh data empiris mengenai karakteristik pemanasan pada perangkat solder tanpa teknologi reflow maupun algoritma kendali otomatis seperti PID, fuzzy logic, atau sistem kendali tertanam lainnya. Dengan demikian, data yang diperoleh dapat dijadikan tolak ukur awal untuk membandingkan efektivitas, efisiensi, dan stabilitas dari sistem kendali fuzzy yang dirancang secara khusus dalam penelitian ini.

Perangkat solder yang digunakan merupakan solder pemanas tipe standar yang bekerja secara manual tanpa adanya pengaturan suhu adaptif. Proses pemanasan dimulai pada suhu ruang, yaitu 30°C , dan pemantauan suhu dilakukan secara kontinu menggunakan sensor termokopel tipe K yang terhubung ke sistem pencatat data (data logger) untuk mendapatkan akurasi waktu dan suhu secara real-time.

Berdasarkan hasil pengujian, perangkat solder ini membutuhkan waktu 206 detik untuk mencapai suhu 220°C . Kenaikan suhu berlangsung secara terus-menerus tanpa fase pemanasan bertahap sebagaimana terdapat pada sistem reflow profesional. Hal ini menunjukkan bahwa pemanasan yang terjadi bersifat linear tak terkontrol, tanpa adanya pengaturan terhadap laju kenaikan suhu maupun stabilisasi suhu puncak. Kondisi ini menyebabkan ketidaksesuaian dengan standar profil termal proses reflow soldering, di mana pada praktik industri diperlukan beberapa fase, seperti preheat, soak, reflow, dan cooling.

Ketiadaan algoritma kendali dalam perangkat ini mengakibatkan suhu akhir bergantung sepenuhnya pada daya pemanas dan waktu pemanasan, tanpa

mempertimbangkan kondisi lingkungan atau material target. Meskipun perangkat ini mampu mencapai suhu puncak yang serupa dengan sistem kendali fuzzy (yaitu 220°C), tetapi proses pencapaiannya tidak mengikuti kurva suhu yang direkomendasikan oleh standar IPC untuk penyolderan komponen elektronik.

Hasil ini memberikan gambaran yang jelas bahwa perangkat solder konvensional hanya berfungsi sebagai alat pemanas dasar tanpa jaminan kestabilan termal maupun keamanan terhadap kerusakan termal pada komponen elektronik. Oleh karena itu, sistem kendali fuzzy yang dikembangkan diharapkan mampu memberikan performa yang lebih adaptif dan presisi, baik dari segi kecepatan pemanasan maupun kestabilan suhu selama proses berlangsung.

Dengan demikian, data pengujian ini berfungsi sebagai pembanding dasar yang relevan untuk mengukur keunggulan sistem kendali fuzzy yang tidak hanya menargetkan pencapaian suhu, tetapi juga mempertimbangkan dinamika waktu, kestabilan, dan keselamatan termal pada proses soldering modern. Berikut hasil pengujiannya dapat dilihat pada tabel 4.6.

Tabel 4.7 Sampel Data Sistem Solder Tanpa Sistem Kendali

Waktu (detik)	Setpoint	Pembacaan Suhu	Error (°C)
0	29.2	30.0	0.8
20	55.3	48.8	-6.5
40	82.9	66.6	-16.3
60	109.8	86.0	-23.8
80	129.6	99.9	-29.7
100	154.2	117.6	-36.6
120	166.8	136.3	-30.5
140	180.2	154.9	-25.3
160	192.1	173.4	-18.7
180	205.9	191.9	-14.0
200	221.3	210.4	-10.9
220	229.9	220.3	-9.6

4.2 Analisis dan Pembahasan Hasil Pengujian Alat

4.2.1. Analisis dan Pembahasan Pengujian Sensor

Tabel 4.1 di atas menyajikan hasil pengukuran suhu aktual menggunakan sensor thermocouple, baik sebelum maupun sesudah dipasang pada sistem kendali. Tujuan dari pengukuran ini adalah untuk mengevaluasi tingkat akurasi pembacaan suhu oleh thermocouple dalam kedua kondisi, serta melihat apakah terjadi peningkatan atau penurunan akurasi akibat intervensi sistem.

1. Kondisi Sensor Suhu Sebelum Dipasang pada Sistem Kendali

Pada kondisi awal (sebelum sensor thermocouple dipasang pada sistem kendali), sensor menunjukkan nilai error suhu yang relatif kecil dan konsisten, dengan rata-rata error sebesar $0,5^{\circ}\text{C}$. Error tersebut menunjukkan adanya sedikit deviasi antara suhu referensi dengan suhu yang terbaca oleh sensor, yang masih dalam batas toleransi umum untuk sensor thermocouple tipe K ($\pm 1^{\circ}\text{C}$).

Namun, pada beberapa titik suhu tinggi seperti 190°C dan 200°C , error terpantau cukup besar ($0,9^{\circ}\text{C}$ dan $0,8^{\circ}\text{C}$). Hal ini menunjukkan bahwa akurasi sensor sedikit menurun pada suhu tinggi, kemungkinan disebabkan oleh noise termal atau stabilitas tegangan referensi pada rangkaian pembaca sensor.

2. Kondisi Setelah Dipasang pada Sistem Kendali

Setelah sensor dipasang pada sistem kendali, nilai pembacaan suhu masih menunjukkan akurasi yang baik, dengan rata-rata error sebesar $0,54^{\circ}\text{C}$, atau hanya sedikit lebih besar dibandingkan saat sebelum dipasang.

Namun terdapat pola menarik, yaitu pada suhu rendah (di bawah 60°C), error cenderung lebih kecil (sekitar $0,03^{\circ}\text{C}$ hingga $0,51^{\circ}\text{C}$), menandakan bahwa sistem kendali memiliki respon pembacaan suhu yang stabil dan linier di kisaran suhu awal. Sebaliknya, pada suhu tinggi (di atas 150°C), error mulai meningkat, dan bahkan menyentuh $0,97^{\circ}\text{C}$ pada suhu 160°C dan $0,96^{\circ}\text{C}$ pada suhu 180°C . Hal ini bisa disebabkan oleh:

- Keterbatasan resolusi ADC dari mikrokontroler,

- Gangguan sinyal akibat rangkaian switching PWM di sekitar sistem,
- Atau delay dalam sistem pembacaan yang menyebabkan pembacaan tidak real-time terhadap suhu aktual.

3. Perbandingan dan Implikasi

Meskipun rata-rata error setelah pemasangan sedikit meningkat (dari $0,50^{\circ}\text{C}$ menjadi $0,54^{\circ}\text{C}$), perbedaan tersebut sangat kecil dan masih dalam batas toleransi standar, sehingga dapat disimpulkan bahwa pemasangan thermocouple ke dalam sistem kendali tidak memberikan dampak signifikan terhadap penurunan akurasi sensor.

Hal ini menunjukkan bahwa sistem kendali telah dirancang dengan cukup baik dari segi integrasi perangkat keras, terutama dalam hal penempatan sensor, perlindungan sinyal, dan pengolahan data pembacaan suhu.

Kemudian pada tabel 4.2 menyajikan hasil pengujian sensor arus ACS712 yang dibandingkan dengan pembacaan dari ampermeter digital sebagai alat ukur acuan. Pengujian dilakukan dalam dua tahap, yaitu sebelum dan sesudah sensor dipasang pada sistem kendali. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengevaluasi akurasi pembacaan sensor arus ACS712 serta memastikan bahwa integrasi sensor ke dalam sistem kendali tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap akurasi pembacaan.

1. Hasil Pengujian Sebelum Dipasang pada Sistem Kendali

Sebelum sensor dipasang pada sistem, pembacaan arus menunjukkan rata-rata error sebesar $0,05\text{ A}$, yang mencerminkan akurasi yang cukup baik. Nilai error tertinggi terjadi pada arus $1,57\text{ A}$ dengan error sebesar $0,10\text{ A}$, sedangkan error terkecil hanya $0,01\text{ A}$. Deviasi ini masih dalam toleransi khas sensor ACS712, yang umumnya memiliki kesalahan $\pm 0.1\text{ A}$ tergantung pada kalibrasi dan gangguan sinyal.

Hal ini menunjukkan bahwa sensor berfungsi normal ketika diuji dalam kondisi bebas dari interferensi sistem seperti switching atau noise dari beban daya.

2. Hasil Pengujian Setelah Dipasang pada Sistem Kendali

Setelah sensor dipasang pada sistem kendali, hasil menunjukkan bahwa akurasi pembacaan meningkat, dengan rata-rata error hanya sebesar $-0,01\text{ A}$. Hampir seluruh

pembacaan mendekati nilai acuan dari ampermeter, dan dalam banyak kasus, error menjadi nol atau negatif sangat kecil, seperti pada pembacaan arus 0,51 A dan 3,51 A.

Menariknya, meskipun sensor telah berada dalam sistem dengan kemungkinan gangguan dari rangkaian kendali seperti PWM, switching heater, atau beban induktif, performa sensor tetap stabil dan presisi. Ini mengindikasikan bahwa:

- Sistem telah dirancang dengan perlindungan sinyal arus yang baik, misalnya melalui isolasi jalur, filtering, atau ground yang bersih.
- Kalibrasi ADC (Analog-to-Digital Converter) pada mikrokontroler telah dilakukan secara akurat.

3. Perbandingan dan Implikasi

Jika dibandingkan antara kondisi sebelum dan sesudah sensor terintegrasi dalam sistem:

- Error menurun dari rata-rata 0,05 A menjadi -0,01 A, menunjukkan adanya peningkatan akurasi sistem secara keseluruhan.
- Tidak ditemukan nilai error besar setelah sensor terpasang, menandakan stabilitas sensor saat sistem aktif, bahkan dalam kondisi beban dinamis.

Hal ini penting karena sensor arus menjadi komponen kunci dalam sistem kendali suhu berbasis logika fuzzy, di mana data arus digunakan sebagai indikator daya heater aktif. Akurasi pembacaan arus yang tinggi akan mendukung keputusan fuzzy yang lebih presisi dalam mengatur output kendali.

Sementara itu pada Tabel 4.3 menampilkan hasil pengujian sensor arus AC menggunakan modul PZEM-004, dengan pembacaan arus dibandingkan terhadap nilai referensi berupa rata-rata tang ampere. Pengujian dilakukan dalam dua kondisi, yaitu sebelum dan sesudah sensor terpasang pada sistem kendali, dengan tujuan mengevaluasi akurasi sensor dalam berbagai kondisi operasional serta pengaruh integrasi sensor dalam sistem kendali.

1. Hasil Pengujian Sensor Arus Sebelum Pemasangan pada Sistem Kendali

Pada kondisi sebelum dipasang ke dalam sistem kendali, sensor PZEM-004 menunjukkan nilai error pembacaan yang cukup besar, dengan rata-rata error sebesar

0,453 A. Beberapa titik data menunjukkan error signifikan, misalnya pada pengukuran ke-4 (rata-rata 2,89 A) sensor hanya membaca 1,53 A sehingga menghasilkan error sebesar 1,357 A. Hal ini menandakan bahwa pembacaan sensor belum optimal dan mungkin dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti noise, interferensi elektromagnetik, atau kalibrasi awal sensor yang kurang tepat.

Error relatif yang besar pada pengukuran rendah hingga menengah ini menunjukkan bahwa sensor PZEM-004 memiliki keterbatasan dalam akurasi pada arus rendah, yang umumnya menjadi kelemahan modul berbasis pengukuran energi ini jika dibandingkan dengan sensor arus khusus seperti ACS712.

2. Hasil Pengujian Setelah Pemasangan pada Sistem Kendali

Setelah pemasangan sensor dalam sistem kendali, rata-rata error pembacaan arus menurun menjadi 0,403 A, menunjukkan adanya perbaikan akurasi walaupun masih relatif cukup besar dibandingkan dengan sensor lain (misal ACS712). Meskipun ada peningkatan, beberapa nilai error masih cukup signifikan, misalnya pada pengukuran pertama dan ketiga yang masing-masing menghasilkan error 0,45 A dan 0,53 A.

Hal ini bisa terjadi karena beberapa faktor:

- Modul PZEM-004 membaca arus menggunakan metode sampling dan pengolahan data yang berbeda, yang mungkin kurang cepat merespon perubahan arus secara dinamis.
- Integrasi sistem kendali yang kompleks dapat mempengaruhi kestabilan pembacaan sensor, terutama jika ada noise dari komponen lain atau switching pada sistem kendali.
- Sensor ini lebih optimal digunakan pada rentang arus yang lebih tinggi dan kurang presisi pada arus rendah hingga menengah.

3. Perbandingan dan Implikasi

Jika dibandingkan dengan sensor ACS712 yang sebelumnya diuji, PZEM-004 menunjukkan error pembacaan yang lebih besar baik sebelum maupun sesudah dipasang dalam sistem kendali. Rata-rata error sebesar sekitar 0,4 A ini menunjukkan

sensor PZEM-004 memiliki akurasi yang lebih rendah dan respons yang lebih lambat dalam aplikasi pengukuran arus yang presisi.

Namun, modul PZEM-004 masih dapat digunakan sebagai sensor arus untuk pengukuran kasar atau pemantauan daya listrik pada rentang arus yang cukup besar. Dalam konteks aplikasi pengendalian suhu dengan logika fuzzy yang memerlukan data arus yang cepat dan akurat, sensor ini kurang ideal jika dibandingkan dengan sensor khusus seperti ACS712.

4.2.2. Analis dan Pembahasan Pengujian Plat Pemanas

Tabel 4.4 menyajikan hasil pengujian performa plat pemanas yang diukur berdasarkan waktu dengan menggunakan sistem kendali berbasis logika fuzzy. Pada tabel tersebut ditampilkan nilai setpoint suhu, nilai pembacaan suhu aktual, serta error suhu (selisih antara setpoint dan pembacaan aktual) pada berbagai titik waktu selama proses pemanasan dan pendinginan.

1. Performa Pengendalian Suhu

Dari data terlihat bahwa nilai pembacaan suhu sangat mendekati nilai setpoint pada hampir semua interval waktu pengujian. Error suhu yang terjadi umumnya berada di kisaran $\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, yang merupakan rentang error yang sangat kecil dan dapat diterima dalam sistem kendali suhu seperti solder reflow.

Contoh:

Pada awal pengujian (0 detik), error sebesar $-0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ menandakan bahwa suhu aktual sedikit lebih rendah dari setpoint.

Pada waktu 20 detik, pembacaan suhu sedikit lebih tinggi dari setpoint dengan error $+1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Pada sebagian besar waktu lainnya, error berkisar antara $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga $+0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, dengan rata-rata error yang sangat kecil.

2. Stabilitas dan Respons Sistem

- Respons awal pemanasan cukup cepat, terlihat dari kenaikan suhu yang sesuai dengan setpoint pada interval waktu awal (0 s sampai 220 s).

- Sistem kendali mampu mempertahankan suhu pada setpoint dengan baik selama proses pemanasan hingga mencapai titik maksimal (sekitar 220 s).
- Setelah titik puncak suhu (220 s), terjadi penurunan suhu yang juga mengikuti perubahan setpoint dengan baik, yang menunjukkan bahwa sistem kendali fuzzy juga efektif pada fase pendinginan.

3. Ketepatan Pengendalian

- Error yang bervariasi kecil pada kisaran ± 1.5 °C menunjukkan bahwa akurasi pengendalian sistem berada pada level yang baik dan memenuhi standar pengendalian suhu dalam proses solder reflow.
- Tidak ditemukan lonjakan error yang signifikan, sehingga dapat disimpulkan bahwa logika fuzzy yang diterapkan pada sistem kendali efektif untuk menjaga suhu pada rentang yang diinginkan dengan stabil dan responsif.

4. Keseluruhan Efektivitas Sistem

- Hasil pengujian ini mengindikasikan bahwa sistem kendali yang menggunakan logika fuzzy mampu:
- Mengatur daya pemanas secara presisi.
- Menyesuaikan output daya secara adaptif sesuai dengan perubahan setpoint suhu dari waktu ke waktu.
- Meminimalkan selisih suhu (error) sehingga kualitas pemanasan untuk solder reflow dapat terjaga dengan baik.

4.2.3. Analisis dan Pembahasan Pengujian Kipas Pendingin

Tabel 4.5 menyajikan hasil pengujian pengendalian suhu plat pemanas pada rentang waktu tertentu, dengan parameter yang diamati meliputi setpoint suhu, nilai pembacaan suhu aktual, dan error suhu yang merupakan selisih antara nilai setpoint dan suhu aktual.

1. Ketepatan Pengendalian Suhu

- Data menunjukkan bahwa pembacaan suhu hampir selalu mendekati setpoint dengan error yang sangat kecil, berkisar antara -1.5°C hingga $+0.8^{\circ}\text{C}$.

- Pada beberapa titik waktu seperti 0 dan 60 detik, pembacaan suhu sangat akurat (error = 0).

- Error negatif terbesar terjadi pada waktu 220 detik sebesar -1.5°C , yang masih dalam batas toleransi pengendalian suhu untuk aplikasi solder reflow.

2. Respons Sistem terhadap Perubahan Setpoint

- Penurunan suhu dari 222.5°C pada waktu 0 detik hingga 38.5°C pada waktu 220 detik diikuti dengan baik oleh sistem kendali, dengan nilai pembacaan suhu aktual yang secara konsisten mengikuti tren penurunan setpoint.

- Hal ini menunjukkan bahwa sistem kendali mampu beradaptasi secara efektif terhadap perubahan setpoint dalam rentang waktu yang relatif singkat (setiap 20 detik).

3. Stabilitas Sistem Kendali

- Fluktuasi error yang kecil menunjukkan bahwa sistem kendali mampu mempertahankan kestabilan suhu selama proses pendinginan plat pemanas.

- Tidak terdapat lonjakan error yang signifikan, sehingga dapat dikatakan bahwa sistem memiliki kestabilan yang baik dan kemampuan menjaga suhu mendekati nilai setpoint secara konstan.

4. Evaluasi Akurasi dan Efektivitas

- Rata-rata error yang kecil mengindikasikan akurasi sistem dalam pengendalian suhu plat pemanas.

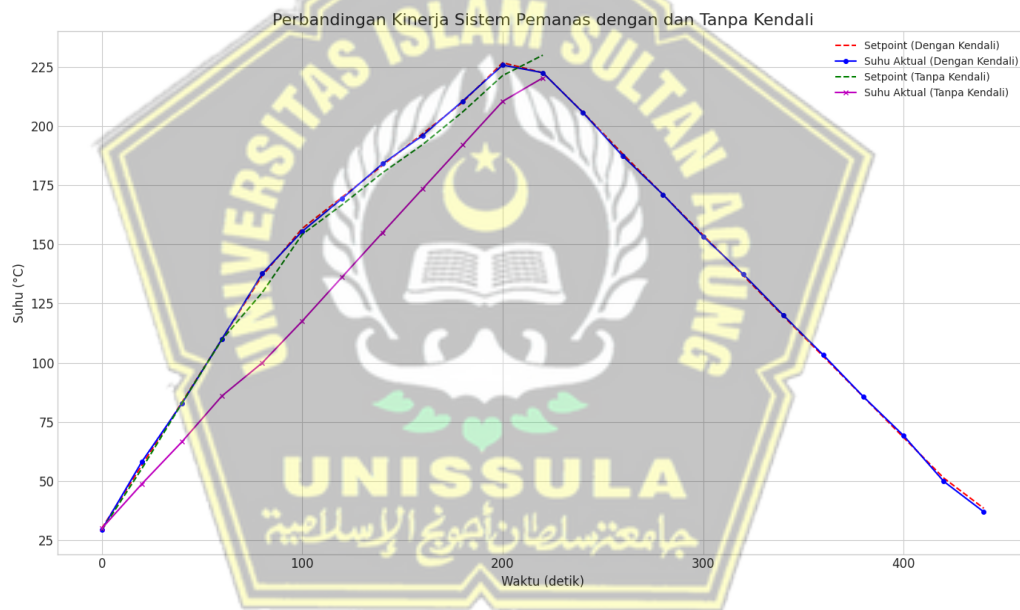
- Sistem kendali berbasis logika fuzzy yang diterapkan mampu mengatur output daya secara presisi dan responsif terhadap perubahan setpoint suhu.

- Kinerja sistem ini sangat sesuai untuk aplikasi pemanasan yang memerlukan pengendalian suhu dengan toleransi yang ketat seperti proses solder reflow.

4.2.4. Analisis dan Pembahasan Data Penelitian Solder Reflow Dengan Dan Tanpa Sistem Kendali

Dalam proses reflow soldering, kestabilan suhu dan kesesuaian dengan profil termal sangat krusial untuk menjamin keberhasilan penyolderan, khususnya pada

komponen elektronik permukaan (SMD). Tabel 4.6 menyajikan hasil pengamatan suhu terhadap waktu dari sistem solder reflow yang menerapkan kendali fuzzy logic, sementara Tabel 4.7 memperlihatkan kinerja sistem pemanas tanpa teknologi reflow dan tanpa algoritma pengendali. Berikut beberapa hasil analisa dan pembahasan terhadap tabel 4.7 dan tabel 4.6. Untuk mempermudah perbandingan data pada solder dengan sistem kendali logika fuzzy dan tanpa menggunakan sistem kendali terhadap profil suhu yang menggunakan acuan suhu pada metode pensolderan *reflow* maka dari Tabel 4.7 dan Tabel 4.6 dibuat gambar grafik pembanding yang divisualisasikan dalam gambar 4.1.



Gambar 4.1. Perbandingan Sistem Pemanas menggunakan Logika Fuzzy dan Tanpa Logika Fuzzy Terhadap Profil Suhu Reflow

Berdasarkan hasil pengujian yang disajikan dalam Tabel 4.6 dan Tabel 4.7, serta divisualisasikan pada grafik perbandingan, terlihat perbedaan kinerja yang sangat signifikan antara sistem pemanas yang menggunakan sistem kendali dengan yang tidak. Analisis ini dibagi menjadi tiga fokus utama: pola termal dan respons, akurasi dan deviasi, serta kecocokan dengan profil standar industri.

1. Pola Termal dan Respons Terhadap Setpoint

Pada sistem dengan kendali dengan logika fuzzy pada Tabel 4.6 menunjukkan bahwa kurva suhu aktual (biru) pada gambar 4.1 dari sistem dengan kendali dengan logika fuzzy mampu mengikuti kurva setpoint (merah putus-putus) dengan sangat baik di sepanjang proses, baik saat fase pemanasan (*ramp-up*) maupun pendinginan (*cool-down*). Respons sistem terlihat sangat cepat dan adaptif. Ketika setpoint berubah, sistem kendali segera menyesuaikan daya pemanas sehingga suhu aktual cepat mencapai nilai yang diinginkan. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme *feedback* pada sistem kendali bekerja secara efektif untuk meminimalisir selisih antara suhu target dan suhu sebenarnya.

Sistem tanpa kendali yang ditunjukkan datanya pada Tabel 4.7 memiliki hasil yang sebaliknya, sistem tanpa kendali menunjukkan kelambatan (*lag*) termal yang parah. Terlihat jelas pada grafik adanya jurang yang lebar antara kurva setpoint (hijau putus-putus) dengan suhu aktual (ungu). Sistem ini kesulitan untuk mencapai suhu setpoint, terutama pada fase pemanasan yang cepat. Suhu aktual selalu tertinggal jauh di bawah suhu yang seharusnya. Ini mengindikasikan bahwa sistem hanya memberikan daya pemanasan yang konstan atau tidak terregulasi, tanpa mampu mengompensasi kehilangan panas ke lingkungan atau merespons dinamika perubahan setpoint.

Dari data tabel 4.6 dan tabel 4.7 yang kemudian diperjelas pada gambar 4.1 memberikan gambaran perbedaan respons kedua sistem ini menggarisbawahi pentingnya sistem kendali. Sistem dengan kendali memiliki kapabilitas untuk secara aktif mengatur output berdasarkan *input* (setpoint) dan *feedback*, menghasilkan sistem yang dinamis dan responsif. Sistem tanpa kendali bersifat pasif dan kinerjanya sangat dipengaruhi oleh faktor eksternal dan perubahan termal dari plat pemanas itu sendiri, sehingga tidak dapat diandalkan untuk proses yang memerlukan presisi.

2. Akurasi dan Deviasi Suhu terhadap Setpoint

Sistem dengan kendali dengan logika fuzzy memiliki akurasi sistem ini sangat tinggi. Berdasarkan data pada Tabel 4.6, nilai *error* atau deviasi suhu sangat kecil, berada dalam rentang -1.5°C hingga 1.5°C . Bahkan pada beberapa titik, seperti pada detik ke-220 dan ke-280, *error* mencapai 0.0°C , yang berarti suhu aktual sama persis dengan setpoint.

- *Mean Absolute Error* (MAE) atau Rata-rata *Error* Absolut hanya sebesar 0.67°C .
- *Error* Maksimum Absolut adalah 1.50°C .

Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa sistem kendali mampu menjaga suhu plat pemanas agar sangat dekat dengan nilai yang diinginkan, yang merupakan syarat krusial untuk proses-proses termal yang sensitif.

Sedangkan sistem tanpa kendali dengan logika fuzzy menunjukkan sistem ini menunjukkan tingkat akurasi yang sangat rendah. Deviasi suhu sangat besar dan cenderung negatif, menandakan suhu aktual hampir selalu berada di bawah setpoint. Nilai *error* mencapai puncaknya pada detik ke-100 sebesar -36.6°C .

- *Mean Absolute Error* (MAE) mencapai 18.56°C , hampir 28 kali lebih besar dibandingkan sistem dengan kendali.
- *Error* Maksimum Absolut adalah 36.60°C .

Deviasi yang masif ini menunjukkan kegagalan total sistem untuk mencapai profil suhu yang ditargetkan sesuai dengan profil suhu *reflow*. Ketidakakuratan sebesar ini akan menyebabkan kegagalan produk terutama dalam produksi masal.

3. Kecocokan dengan Profil Reflow Standar Industri

Profil suhu yang digambarkan oleh kurva setpoint menyerupai profil standar untuk *reflow soldering*, yang umumnya terdiri dari empat fase: *Preheat*, *Soak*, *Reflow*, dan *Cooling*. Setiap fase memiliki target suhu dan laju perubahan suhu (*ramp rate*) yang spesifik untuk memastikan kualitas sambungan solder tanpa merusak komponen elektronik.

Sistem dengan kendali dengan logika fuzzy: Kinerja sistem dengan kendali sangat sesuai untuk diaplikasikan pada proses *reflow soldering*.

- Responsivitas Tinggi: Mampu mengikuti laju pemanasan dan pendinginan yang disyaratkan oleh standar industri (misalnya, J-STD-020).
- Akurasi Tinggi: Dapat mencapai dan menjaga suhu puncak (*peak temperature*) pada fase *reflow* dengan presisi. Ini sangat krusial karena suhu yang terlalu rendah akan menyebabkan solder tidak meleleh sempurna (*cold joint*), sementara suhu yang terlalu tinggi dapat merusak komponen.
- Stabilitas: Mampu menjaga suhu yang stabil selama fase *soak*, yang penting untuk aktivasi fluks dan mengurangi stres termal pada komponen.

Dengan performa tersebut, sistem dengan kendali dapat diandalkan untuk menghasilkan produk dengan kualitas yang konsisten dan sesuai standar industri.

Sistem tanpa kendali dengan logika fuzzy menunjukkan sistem ini sama sekali tidak cocok untuk proses *reflow soldering* atau proses industri lain yang memerlukan presisi termal.

- Kegagalan Mencapai Suhu Puncak: Dengan *error* sebesar puluhan derajat, sistem ini kemungkinan besar tidak akan pernah mencapai suhu leleh pasta solder yang dibutuhkan (misalnya 217-220°C untuk solder bebas timah).

- Profil Termal Tidak Terbentuk: Sistem ini gagal membentuk fase-fase yang dibutuhkan dalam profil *reflow*. Fase *preheat* dan *soak* tidak akan tercapai sesuai spesifikasi, yang dapat menyebabkan cacat seperti *tombstoning* atau *solder balling*.
- Tidak Dapat Diulang (*Non-Repeatable*): Proses menjadi tidak terkendali dan tidak dapat diulang, sehingga tidak ada jaminan kualitas dari satu produk ke produk lainnya.



BAB V

KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian pada penelitian kali ini, dapat disimpulkan bahwa sistem solder reflow yang dilengkapi dengan kendali logika fuzzy menunjukkan kinerja yang lebih unggul dibandingkan sistem pemanas tanpa teknologi reflow maupun sistem kendali apa pun. Hasil ini mendukung pencapaian tujuan penelitian, yaitu:

1. Merancang sistem kendali terpadu dengan kepresisian suhu tinggi:

Data pada Tabel 4.7 menunjukkan bahwa sistem solder *reflow* dengan kendali fuzzy mampu mengikuti profil termal penyolderan secara terstruktur, mulai dari fase pemanasan awal, pencapaian suhu puncak, hingga proses pendinginan yang terkontrol. Suhu setpoint berhasil dicapai dengan akurasi yang tinggi dan deviasi minimal, sebagian besar dalam rentang $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Hal ini membuktikan bahwa sistem kendali yang dirancang mampu mempertahankan suhu dalam batas toleransi yang sangat sempit, sesuai dengan standar industri penyolderan *reflow*. Dengan kontrol suhu yang presisi ini, kualitas hasil penyolderan dapat dioptimalkan dan risiko cacat solder dapat diminimalkan.

2. Mengevaluasi tingkat kepresisian sistem fuzzy:

Dari sisi evaluasi performa suhu, sistem tanpa kendali seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 4.7 memang mampu mencapai suhu target secara cepat, namun tidak mengatur tahapan suhu sesuai dengan standar proses *reflow*. Sistem ini tidak memiliki mekanisme pengendalian penurunan suhu, serta cenderung melakukan pemanasan linear hingga suhu akhir. Meskipun dapat mencapai suhu puncak namun ketiadaan kontrol terhadap tahapan penyolderan menurunkan potensi keberhasilan proses soldering secara menyeluruh, terutama untuk komponen sensitif.

Sebaliknya, sistem dengan kendali fuzzy mampu memberikan respons adaptif terhadap dinamika suhu, mempertahankan kestabilan dalam setiap fase, dan menghasilkan distribusi suhu yang lebih sesuai dengan kurva reflow. Evaluasi ini menunjukkan bahwa penggunaan logika fuzzy meningkatkan kepresisian sistem kendali secara signifikan dibandingkan sistem konvensional, menjadikannya lebih handal dalam aplikasi penyolderan profesional.

5.2. Saran

Sehubungan dengan hasil penelitian ini, beberapa rekomendasi untuk pengembangan penelitian lebih lanjut adalah sebagai berikut:

1. Peningkatan Presisi Melalui Kalibrasi Sensor dan Perangkat Keras.

Meskipun sistem kendali fuzzy menunjukkan performa yang cukup presisi, akurasi sistem dapat lebih ditingkatkan dengan melakukan kalibrasi sensor suhu secara berkala dan penggunaan sensor suhu dengan resolusi lebih tinggi, seperti thermocouple tipe K dengan sistem akuisisi data berbasis ADC 16-bit. Hal ini penting agar sistem mampu mempertahankan akurasi suhu dalam batas toleransi yang lebih ketat, terutama untuk komponen dengan sensitivitas termal tinggi.

2. Pengembangan Antarmuka Visual dan Monitoring Realtime.

Untuk mendukung kemudahan penggunaan dan evaluasi proses solder reflow, disarankan untuk mengembangkan antarmuka pengguna (GUI) yang menampilkan grafik suhu terhadap waktu secara real-time. Hal ini memungkinkan pengguna untuk memantau dan mengevaluasi langsung profil suhu yang terjadi pada setiap sesi penyolderan, serta mendeteksi anomali atau penyimpangan suhu lebih awal.

3. Implementasi Sistem Pembelajaran Adaptif (AI/Fuzzy Adaptive).

Meskipun logika fuzzy telah memberikan hasil yang baik, saran selanjutnya adalah mengintegrasikan algoritma adaptif berbasis AI, seperti adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) atau reinforcement learning untuk meningkatkan kecerdasan sistem dalam menyesuaikan parameter fuzzy terhadap dinamika lingkungan nyata. Hal ini akan memperluas kemampuan sistem dalam menangani variasi jenis komponen, ukuran PCB, serta perbedaan termal antar proses produksi.

4. Uji Kelayakan pada Aplikasi Nyata dan Beragam Komponen.

Untuk menjamin keandalan sistem secara praktis, disarankan dilakukan pengujian lebih lanjut pada berbagai jenis papan sirkuit dan komponen SMD dengan karakteristik termal yang berbeda. Hal ini akan menguji sejauh mana sistem fuzzy mampu beradaptasi dan menjaga kualitas penyolderan dalam situasi yang lebih kompleks dan realistis seperti pada proses manufaktur.

5. Efisiensi Energi dan Pengendalian Daya

Disarankan untuk mengembangkan modul pengendali daya yang lebih efisien, seperti penggunaan kontrol berbasis PWM (Pulse Width Modulation) pada elemen pemanas atau SSR (Solid State Relay) yang dikombinasikan dengan sistem prediktif untuk menghemat konsumsi daya tanpa mengorbankan kestabilan suhu.

6. Pendidikan dan Replikasi di Dunia Pendidikan Teknik

Karena sifat sistem yang relatif murah, terbuka, dan dapat dikembangkan, maka sistem ini sangat cocok diterapkan dalam pembelajaran teknik otomatisasi, mekatronika, dan sistem kendali di tingkat SMK maupun perguruan tinggi. Saran ini sekaligus mendukung pemanfaatan hasil penelitian sebagai alat bantu pendidikan untuk memperkenalkan konsep kendali fuzzy dan teknologi solder reflow kepada siswa dan mahasiswa secara praktikal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. N. Tsai, "Thermal parameters optimization of a reflow soldering profile in printed circuit board assembly: A comparative studi," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 12, no. 8, pp. 2601–2613, 2012, doi: 10.1016/j.asoc.2012.03.066.
- [2] K. W. Ko and H. S. Cho, "Solder joints inspection using a neural network and fuzzy rule-based classification method," *IEEE Trans. Electron. Packag. Manuf.*, vol. 23, no. 2, p. 78, 2000, doi: 10.1109/6104.846932.
- [3] Y. Guo, M. Liu, M. Yin, and Y. Yan, "Reliability Sensibility Analysis of the PCB Assembly concerning Warpage during the Reflow Soldering Process," *Mathematics*, vol. 10, no. 17, 2022, doi: 10.3390/math10173055.
- [4] T. L. Lam, "Low-Cost Non-Contact PCBs Temperature Monitoring and Control in a Hot Air Reflow Process Based on Multiple Thermocouples Data Fusion," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 123566–123574, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3036527.
- [5] H. Conseil-Gudla, F. Li, and R. Ambat, "Reflow Residues on Printed Circuit Board Assemblies and Interaction with Humidity," *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.*, vol. 21, no. 4, pp. 594–602, 2021, doi: 10.1109/TDMR.2021.3120941.
- [6] J. A. Prihantono, "Pengaturan suhu dengan menggunakan kontrol PID: Indonesia," *J. Ind. Elektro dan Penerbangan*, 2000, [Online]. Available: <https://jurnal.unnur.ac.id/index.php/indept/article/view/488%0Ahttps://jurnal.unnur.ac.id/index.php/indept/article/download/488/436>
- [7] S. P, S. D.N, and P. B, "Temperature Control using Fuzzy Logic," *Int. J. Instrum. Control Syst.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–10, 2014, doi: 10.5121/ijics.2014.4101.
- [8] W. T. Wahono, T. Winarno, and F. Fathoni, "Implementasi Fuzzy Logic Untuk Pengontrolan Suhu Pada Proses Reflow Oven Soldering," *J. Elektron. dan Otomasi Ind.*, vol. 3, no. 1, p. 2, 2020, doi: 10.33795/elkolind.v3i1.59.
- [9] A. Kus, Y. Isik, M. Cemal Cakir, S. Coşkun, and K. Özdemir, "Thermocouple

- and infrared sensor-based measurement of temperature distribution in metal cutting,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 15, no. 1, pp. 1274–1291, 2015, doi: 10.3390/s150101274.
- [10] I. A. O. S.O, A. A.E, and O. C.D, “Temperature Control System Using Fuzzy Logic Technique,” *Int. J. Adv. Res. Artif. Intell.*, vol. 1, no. 3, pp. 27–31, 2012, doi: 10.14569/ijarai.2012.010305.
- [11] I. S. S. Lim, E. C. Y. Chung, K. B. T. Tan, and K. S. Teoh, “The practicality of TRIZ based conceptual solutions in solving tombstoning defects during SMD soldering,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 103, pp. 123–129, 2015, doi: 10.1016/j.cherd.2015.09.012.
- [12] X. Q. Tang, S. J. Zhao, C. Y. Huang, and L. K. Lu, “Thermal stress-strain simulation analysis of BGA solder joint reflow soldering process,” *Proc. - 2018 19th Int. Conf. Electron. Packag. Technol. ICEPT 2018*, pp. 981–986, 2018, doi: 10.1109/ICEPT.2018.8480615.
- [13] I. Soesanti and R. Syahputra, “A Fuzzy Logic Controller Approach for Controlling Heat Exchanger Temperature,” *J. Electr. Technol. UMY*, vol. 3, no. 4, pp. 117–124, 2019, doi: 10.18196/jet.3462.
- [14] R. Septiana, I. Roihan, and R. A. Koestoer, “Denoising MAX6675 reading using Kalman filter and factorial design,” *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 11, no. 5, pp. 3818–3827, 2021, doi: 10.11591/ijece.v11i5.pp3818-3827.
- [15] W. Yang and D. D. L. Chung, “Effect of temperature on the electrical conduction and dielectric behavior of solder,” *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 32, no. 5, pp. 6511–6519, 2021, doi: 10.1007/s10854-021-05369-9.
- [16] S. Yi and R. Jones, “Machine learning framework for predicting reliability of solder joints,” *Solder. Surf. Mt. Technol.*, vol. 32, no. 2, pp. 82–92, 2020, doi: 10.1108/SSMT-04-2019-0013.
- [17] J. a. Depiver, S. Mallik, and D. Harmanto, “Solder joint failures under thermo-mechanical loading conditions—A review,” *Adv. Mater. Process. Technol.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–26, 2021, doi: 10.1080/2374068X.2020.1751514.

- [18] G. Ma, X. Huang, and S. Liu, "Heat Transfer Modeling and Oven Temperature Curve Optimization of Integrated Circuit Board Reflow Soldering," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 141876–141889, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3120496.
- [19] J. H. Yoo, J. D. Han, H. J. Yoo, S. G. Ok, and J. S. Ok, "PTC properties of PE/CB composites for energi saving heating elements," *Ferroelectrics*, vol. 515, no. 1, pp. 75–82, 2017, doi: 10.1080/00150193.2017.1360111.
- [20] D. . Hooda and V. Raich, *Fuzzy Logic Models and Fuzzy Control*. 2017.
- [21] I. Taufik, I. D. Aishia, and J. Jumadi, "Implementasi Fuzzy Search Untuk Pendeteksi Kata Asing Pada Dokumen Microsoft Word," *J. Tek. Inform.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–8, 2018, doi: 10.15408/jti.v10i1.6804.
- [22] R. Al Athamneh, M. Abueed, D. B. Hani, and S. Hamasha, "Fuzzy Approach for Reliability Modeling of Lead-Free Solder Joints in Elevated Temperature Environmental Conditions," *Crystals*, vol. 12, no. 6, 2022, doi: 10.3390/cryst12060775.
- [23] C. Dumitrescu, P. Ciotirnae, and C. Vizitiu, "Fuzzy logic for intelligent control system using soft computing applications," *Sensors*, vol. 21, no. 8, pp. 1–33, 2021, doi: 10.3390/s21082617.
- [24] S. Amalia, R. Andari, and R. Syukriansyah, "Studi Pemodelan Sistem Pengontrolan Suhu Ruangan Berbasis Logika Fuzzy Sugeno," *J. Sains dan Teknol. J. Keilmuan dan Apl. Teknol. Ind.*, vol. 20, no. 2, p. 175, 2020, doi: 10.36275/stsp.v20i2.287.
- [25] F. Prasetyawan and L. Anifah, "Sistem Kontrol Suhu Ketel Elektrik Menggunakan Metode Logika Fuzzy Sugeno Berbasis ESP8266 dengan Komunikasi Internet Of Things (IoT)," *J. Inf. Eng. Educ. Technol.*, vol. 5, no. 1, pp. 5–12, 2021, doi: 10.26740/jieet.v5n1.p5-12.
- [26] Arti, K. 2019. *System Identification and Control Design for a Stratospheric Flight Mission fo a Solar Electric Aircraft*. Master Tesis. Institute of flight System, Germany Aerodapce Center (DLR), Braunschweig, Germany

- [27] PZEM-004T-Datasheet-user-manual (innovatorsguru.com) diakses 4 september 2023
- [28] <https://innovatorsguru.com/wp-content/uploads/2019/06/PZEM-004T-V3.0-Datasheet-User-Manual.pdf> diakses 4 september 2023
- [29] <https://github.com/mandulaj/PZEM-004T-v30> diakses 4 september 2023
- [30] <http://thermocoupleinfo.com/type-k-thermocouple.htm> diakses 4 september 2023
- [31] https://www.sanyodenki.com/archive/document/product/cooling/catalog_E_pdf/San_Ace_92P25_E.pdf sumber 4 september 2023
- [32] <https://infokemendikbud.com/rumus-perpindahan-panas/> diakses 5 september 2023
- [33] <https://forum.arduino.cc/t/desperate-for-help-with-thermocouple/369979> diakses 5 september 2023
- [34] <https://id.szks-kuongshun.com/> diakses 5 september 2023
- [35] <https://www.mikrocontroller.net/topic/567997> diakses 5 september 2023
- [36] <https://www.arduinoindonesia.id/2022/10/driver-motor-1298n.html> diakses 5 desember 2023
- [37] <https://lastminuteengineers.com/max6675-thermocouple-arduino-tutorial/> diakses 28 agustus 2025