

BAB III

METODOLOGI

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan mulai dari bulan September 2025 hingga Januari 2026 di Laboratorium Terpadu 502 lantai 5 Universitas Muhammadiyah Surabaya. Pada penelitian ini dilakukan rancang bangun sistem kendali suhu pada canting elektrik berbasis logika fuzzy dilaksanakan.

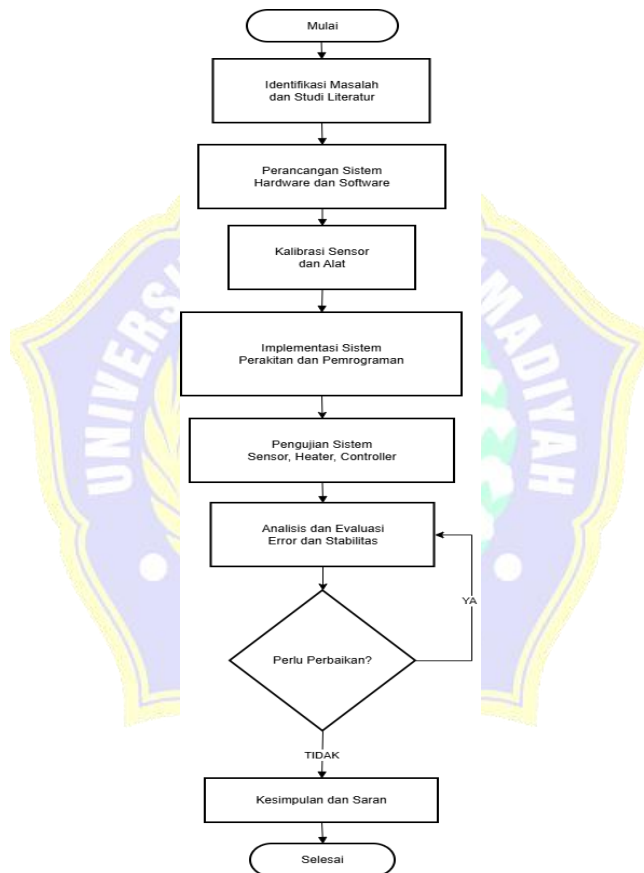
3.2 Jadwal penelitian

Tabel 3. 1 Tabel Penelitian

No	Kegiatan	Bulan															
		Oktober				November				Desember				Januari			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1.	Studi literatur																
2.	Perancangan sistem kendali suhu berbasis logika fuzzy																
3.	Perancangan & perakitan alat canting elektrik																
4.	Pengumpulan dan pengolahan data																
5.	Analisis efisiensi metode fuzzy logic																

[illegible]

3.3 Metode Penelitian



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir sistem pada Gambar 3.1 menggambarkan tahapan pelaksanaan penelitian rancang bangun sistem kendali suhu cangting elektrik berbasis logika fuzzy secara sistematis dan berurutan. Setiap blok saling berhubungan dan membentuk satu kesatuan proses yang berulang hingga sistem mencapai kinerja yang diharapkan.

Proses penelitian diawali dengan tahap mulai, yang menandai dimulainya seluruh rangkaian kegiatan penelitian. Tahap berikutnya adalah identifikasi masalah dan studi literatur. Pada tahap ini dilakukan pengamatan terhadap permasalahan yang terjadi pada penggunaan cangting konvensional, khususnya ketidakstabilan suhu. Selanjutnya dilakukan studi literatur dari buku, jurnal, dan standar yang relevan untuk memperoleh dasar teori mengenai sistem kendali suhu, logika fuzzy, metode Sugeno, serta karakteristik cangting elektrik. Tahap ini menjadi landasan utama dalam menentukan pendekatan dan metode yang digunakan pada penelitian.

Berdasarkan hasil identifikasi masalah dan studi literatur, proses dilanjutkan ke perancangan sistem hardware dan software. Pada tahap ini dirancang arsitektur sistem secara keseluruhan, meliputi pemilihan sensor suhu, mikrokontroler, elemen pemanas, serta perancangan algoritma kendali fuzzy Sugeno. Perancangan perangkat lunak meliputi penyusunan flowchart, struktur program, serta logika kendali yang akan diimplementasikan. Setelah perancangan selesai, tahap selanjutnya adalah kalibrasi sensor dan alat. Kalibrasi dilakukan untuk memastikan bahwa sensor suhu dan alat ukur yang digunakan memberikan hasil pengukuran yang akurat dan sesuai dengan nilai referensi. Tahap ini sangat penting karena keakuratan data sensor akan mempengaruhi kinerja sistem kendali fuzzy secara keseluruhan.

Tahap berikutnya adalah implementasi sistem yang meliputi perakitan dan pemrograman. Pada tahap ini seluruh komponen perangkat keras dirakit sesuai dengan desain yang telah dibuat, dan algoritma fuzzy Sugeno diimplementasikan ke dalam mikrokontroler. Implementasi ini mengintegrasikan hasil perancangan hardware dan software menjadi satu sistem yang dapat berfungsi secara utuh.

Setelah sistem berhasil diimplementasikan, dilakukan pengujian sistem yang mencakup pengujian sensor, elemen pemanas (heater), dan pengendali (controller). Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa setiap bagian sistem bekerja sesuai dengan fungsinya dan mampu merespons perubahan suhu dengan benar.

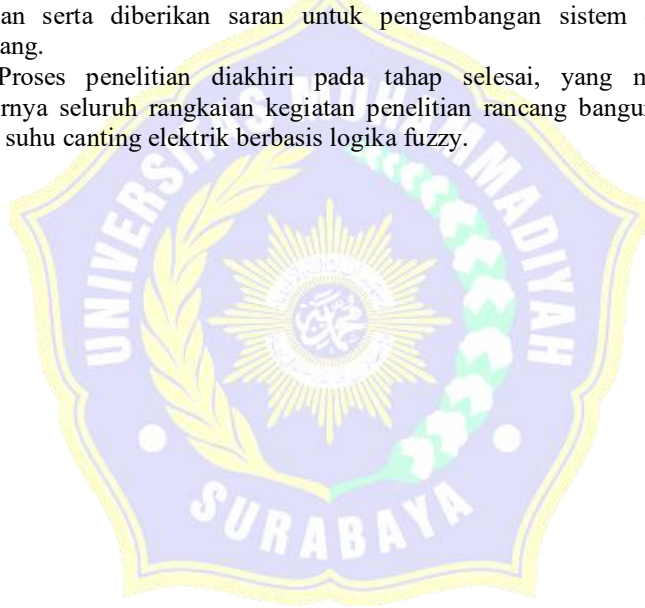
Data hasil pengujian selanjutnya dianalisis pada tahap analisis dan evaluasi error serta stabilitas sistem. Pada tahap ini dilakukan evaluasi terhadap kinerja sistem kendali suhu berdasarkan parameter error suhu,

overshoot, waktu respon, dan kestabilan suhu. Hasil analisis ini digunakan untuk menilai apakah sistem telah memenuhi kriteria yang diharapkan.

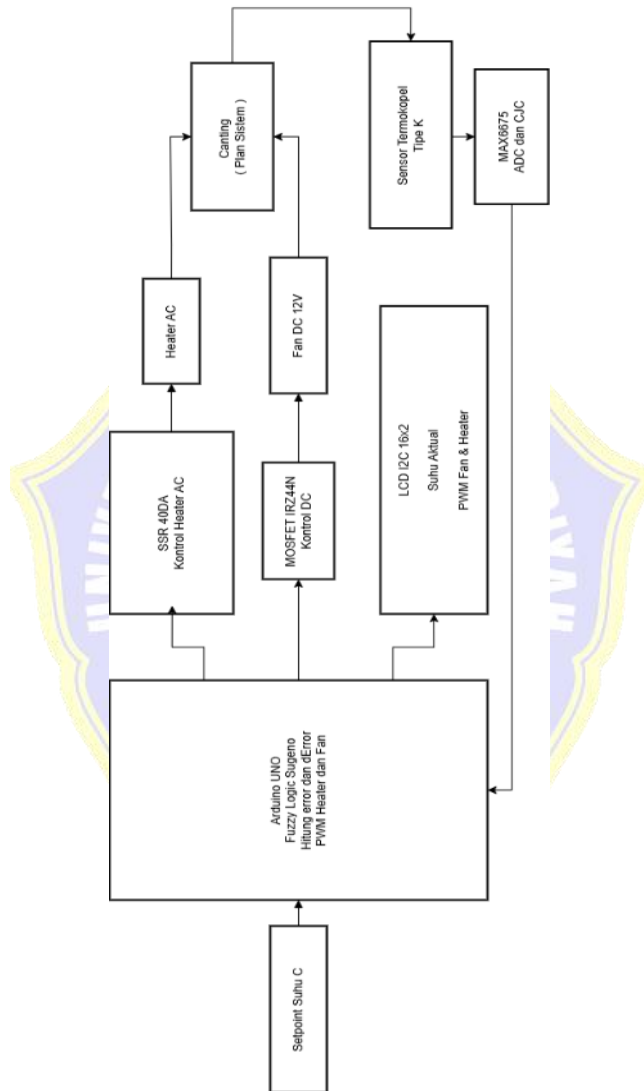
Selanjutnya dilakukan pengambilan keputusan pada blok perlu perbaikan?. Apabila hasil analisis menunjukkan bahwa kinerja sistem belum optimal, maka proses kembali ke tahap pengujian dan analisis untuk dilakukan penyesuaian pada parameter fuzzy, perangkat lunak, atau konfigurasi sistem. Proses ini bersifat iteratif hingga sistem mencapai performa yang diinginkan.

Jika hasil evaluasi menunjukkan bahwa sistem telah bekerja dengan baik dan memenuhi kriteria, maka proses dilanjutkan ke tahap kesimpulan dan saran. Pada tahap ini dirumuskan kesimpulan berdasarkan hasil penelitian serta diberikan saran untuk pengembangan sistem di masa mendatang.

Proses penelitian diakhiri pada tahap selesai, yang menandai berakhirnya seluruh rangkaian kegiatan penelitian rancang bangun sistem kendali suhu canting elektrik berbasis logika fuzzy.



3.4 Perancangan Sistem



Gambar 3. 2 Diagram Alir Sistem

Diagram blok sistem pada Gambar 3.2 menunjukkan arsitektur sistem kendali suhu canting elektrik berbasis logika fuzzy Sugeno yang bekerja dengan prinsip kendali loop tertutup (closed-loop control). Sistem ini dirancang untuk menjaga suhu canting tetap stabil sesuai dengan nilai setpoint yang ditentukan.

Sistem diawali dengan penentuan setpoint suhu, yaitu nilai suhu acuan yang diinginkan oleh pengguna. Nilai setpoint ini dikirimkan ke Arduino Uno sebagai pengendali utama sistem. Arduino Uno menerima dua masukan utama, yaitu setpoint suhu dan suhu aktual yang diperoleh dari sensor suhu. Selanjutnya, Arduino menghitung nilai error dan perubahan error antara suhu aktual dan setpoint. Nilai error tersebut diproses menggunakan algoritma logika fuzzy Sugeno untuk menghasilkan sinyal kendali berupa pulsa lebar modulasi (PWM).

Sinyal PWM dari Arduino Uno digunakan untuk mengendalikan dua aktuator utama, yaitu heater AC dan fan DC. Pengendalian heater dilakukan melalui Solid State Relay (SSR) 40A yang berfungsi sebagai saklar elektronik untuk mengatur daya heater AC secara aman dan terisolasi. Heater berperan sebagai sumber panas utama untuk menaikkan suhu canting. Sementara itu, pengendalian fan DC 12 V dilakukan menggunakan MOSFET IRZ44N, yang berfungsi sebagai pengatur kecepatan fan berdasarkan sinyal PWM dari Arduino. Fan digunakan untuk membantu menurunkan suhu atau mempercepat proses stabilisasi suhu ketika terjadi kenaikan suhu berlebih.

Canting elektrik berperan sebagai plant sistem, yaitu objek yang dikendalikan. Perubahan daya heater dan fan akan secara langsung memengaruhi suhu canting. Suhu aktual canting kemudian diukur menggunakan sensor thermocouple tipe K. Sensor ini dipilih karena mampu bekerja pada rentang suhu tinggi dan sesuai untuk aplikasi pemanas. Sinyal dari thermocouple diproses oleh modul MAX6675, yang berfungsi sebagai penguat sinyal, konverter analog ke digital (ADC), serta kompensasi sambungan dingin (*cold junction compensation*). Data suhu digital dari MAX6675 selanjutnya dikirimkan kembali ke Arduino Uno sebagai umpan balik sistem.

Sebagai antarmuka pengguna, sistem dilengkapi dengan LCD I2C 16×2 yang menampilkan informasi suhu aktual, setpoint suhu, serta nilai PWM heater dan fan. Tampilan ini memungkinkan pengguna memantau kondisi dan kinerja sistem secara real-time.

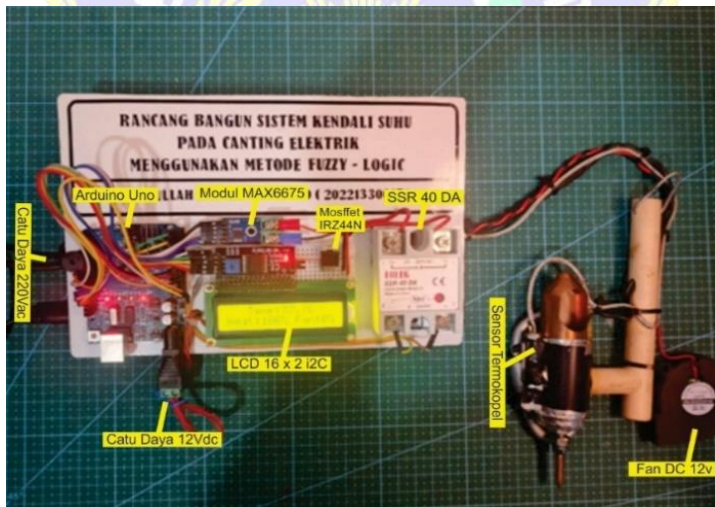
Secara keseluruhan, sistem bekerja dalam bentuk loop tertutup, di mana suhu aktual hasil pengukuran sensor dibandingkan dengan setpoint secara terus-menerus. Arduino Uno sebagai pengendali fuzzy akan menyesuaikan keluaran PWM heater dan fan berdasarkan hasil perhitungan logika fuzzy

Sugeno. Proses ini berlangsung secara kontinu sehingga sistem mampu merespons perubahan suhu dan menjaga kestabilan suhu cangting sesuai dengan setpoint yang ditentukan.

3.5 Alat dan bahan

Alat (Hardware):

- Mikrokontroler Arduino Uno
- Sensor suhu tipe K + Modul MAX6675
- Elemen pemanas
- Kipas DC 12v
- Modul driver heater (SSR 40 DA)
- Modul driver fan (MOSFET IRZ44N)
- Catu daya 12V
- LCD / OLED display
- Kabel jumper
- Breadboard
- Cangting elektrik



Gambar 3. 3 Rancang Bangun Hadware

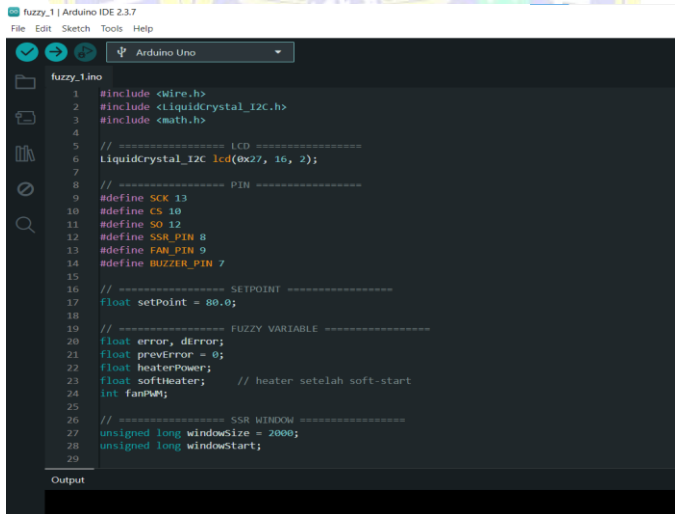
Gambar 3.3 menunjukkan diagram perangkat keras (hardware) sistem kendali suhu cangting elektrik berbasis mikrokontroler Arduino Uno.

Diagram ini menggambarkan hubungan antar komponen utama yang bekerja secara terintegrasi untuk melakukan pengukuran suhu, pemrosesan data, serta pengendalian aktuator pemanas dan kipas pendingin. Sebagai pusat kendali, mikrokontroler Arduino Uno berfungsi untuk menerima data suhu dari sensor, menjalankan algoritma kendali logika fuzzy, serta menghasilkan sinyal keluaran berupa Pulse Width Modulation (PWM) untuk mengatur elemen pemanas dan kipas pendingin.

Secara keseluruhan, sistem bekerja dengan cara sensor suhu membaca suhu cangting elektrik dan mengirimkan data ke Arduino Uno. Data tersebut diproses menggunakan algoritma kendali logika fuzzy untuk menentukan aksi kendali yang sesuai. Hasil defuzzyfikasi berupa sinyal PWM kemudian digunakan untuk mengatur daya elemen pemanas melalui SSR atau kecepatan kipas melalui MOSFET. Dengan konfigurasi perangkat keras ini, sistem mampu menjaga suhu cangting elektrik tetap stabil sesuai dengan set point yang diinginkan.

Software:

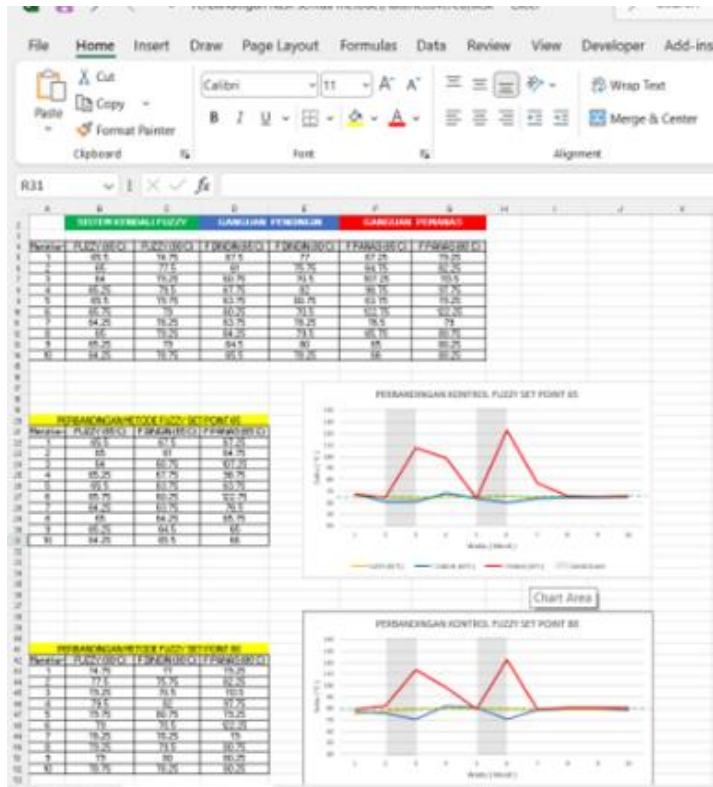
- Arduino IDE
- Microsoft Excel



```
fuzzy_1 | Arduino IDE 2.3.7
File Edit Sketch Tools Help

fuzzy_1.ino
1 #include <Wire.h>
2 #include <LiquidCrystal_I2C.h>
3 #include <math.h>
4
5 // ===== LCD =====
6 LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
7
8 // ===== PIN =====
9 #define SCK 13
10 #define CS 10
11 #define SO 12
12 #define SSR_PIN 8
13 #define FAN_PIN 9
14 #define BUZZER_PIN 7
15
16 // ===== SETPOINT =====
17 float setPoint = 80.0;
18
19 // ===== FUZZY VARIABLE =====
20 float error, derror;
21 float prevError = 0;
22 float heaterPower;
23 float softHeater; // heater setelah soft-start
24 int fanPWM;
25
26 // ===== SSR WINDOW =====
27 unsigned long windowSize = 2000;
28 unsigned long windowStart;
29
Output
```

Gambar 3. 4 Pemrograman Mikrokontroler Arduino



Gambar 3. 5 Pengambilan Pengujian data dan Grafik

Gambar 3.4 dan **Gambar 3.5** Menunjukkan Perangkat lunak yang digunakan dalam sistem kendali suhu canting elektrik terdiri dari Arduino IDE dan Microsoft Excel, yang saling terhubung dalam proses pengambilan, pengolahan, dan analisis data. Arduino IDE digunakan untuk memprogram mikrokontroler Arduino Uno agar dapat membaca suhu dari sensor tipe K melalui modul MAX6675, menjalankan algoritma kendali logika fuzzy, serta menghasilkan sinyal kendali berupa PWM untuk heater dan kipas pendingin. Selain itu, Arduino juga mengirimkan data hasil pengukuran dan kendali ke komputer melalui komunikasi serial dalam bentuk data streaming.

Data yang dikirimkan dari Arduino kemudian diterima oleh Microsoft Excel menggunakan fitur Data Streamer. Excel berfungsi sebagai alat untuk merekam data pengukuran secara real-time dalam bentuk tabel. Data yang diterima meliputi suhu aktual, set point, serta nilai PWM heater dan fan. Setelah data tersimpan, Microsoft Excel digunakan untuk melakukan perhitungan secara otomatis menggunakan rumus yang tersedia, seperti perhitungan error dan delta error suhu. Hasil perhitungan tersebut selanjutnya divisualisasikan dalam bentuk grafik, seperti grafik suhu terhadap waktu dan grafik respon sistem kendali.

Dengan demikian, Arduino IDE berperan sebagai penghasil dan pengirim data, sedangkan Microsoft Excel berfungsi sebagai penerima, pengolah, dan visualisasi data. Hubungan antara kedua perangkat lunak ini memungkinkan proses pengujian dan evaluasi kinerja sistem kendali suhu dilakukan secara lebih mudah, cepat, dan terstruktur.

3.6 Variabel Penelitian dan Parameter Pengukuran

Tabel 3. 2 Variabel dan parameter Penelitian

No.	Parameter	Satuan	Deskripsi
1	Suhu aktual canting	°C	Hasil pembacaan sensor untuk memantau kondisi suhu real-time.
2	Error suhu	°C	Selisih antara setpoint dan suhu aktual.
3	Waktu respon	Menit	Waktu yang diperlukan untuk mencapai setpoint.
4	Overshoot	%	Kelebihan suhu di atas setpoint.

Pada Tabel 3.2 dijelaskan bahwa parameter yang digunakan dalam pengujian sistem kendali suhu canting elektrik meliputi suhu aktual canting, error suhu, waktu respon, dan overshoot. Suhu aktual canting merupakan hasil pembacaan sensor suhu yang digunakan untuk memantau kondisi suhu canting secara real-time selama sistem beroperasi. Parameter ini

menunjukkan kemampuan sistem dalam mempertahankan suhu sesuai dengan setpoint yang telah ditentukan.

3.7 Variabel Input & Output

Dalam sistem kendali suhu canting elektrik berbasis logika fuzzy, variabel input dan output memiliki peran penting dalam menentukan kinerja sistem secara keseluruhan. Variabel input digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan oleh pengendali fuzzy, sedangkan variabel output merupakan sinyal kendali yang diberikan kepada aktuator untuk mengatur suhu sistem. Pada penelitian ini, variabel input yang digunakan adalah error dan delta error, sedangkan variabel output berupa sinyal PWM untuk heater dan fan.

3.7.1 Variabel Input

1. Error (e)

Error merupakan selisih antara suhu referensi (setpoint) dan suhu aktual hasil pembacaan sensor. Variabel error menunjukkan tingkat penyimpangan suhu sistem terhadap nilai yang diinginkan. Nilai error menjadi indikator utama apakah sistem membutuhkan peningkatan pemanasan atau pendinginan. Secara umum, error bernilai positif ketika suhu aktual lebih rendah dari setpoint, sehingga sistem perlu meningkatkan daya heater. Sebaliknya, error bernilai negatif ketika suhu aktual lebih tinggi dari setpoint, sehingga diperlukan aksi pendinginan melalui fan. Error didefinisikan sebagai:

$$e = T_{setpoint} - T_{aktual} \dots \dots \dots (3.1)$$

Keterangan :

- $e > 0$ → suhu di bawah set point → **heater aktif**
- $e < 0$ → suhu di atas set point → **fan aktif**
- $e \approx 0$ → suhu mendekati set point → sistem stabil

2. Delta error (Δe)

Delta error (Δe) merupakan perubahan nilai error terhadap waktu, yang menunjukkan kecenderungan perubahan suhu sistem. Variabel ini digunakan untuk mengetahui apakah suhu sedang mengalami kenaikan atau penurunan secara cepat atau lambat. Dengan mempertimbangkan delta error, sistem kendali fuzzy tidak hanya merespons besarnya penyimpangan suhu, tetapi juga memperhitungkan arah dan kecepatan perubahan suhu. Hal ini

membantu sistem dalam mengurangi overshoot dan meningkatkan kestabilan suhu di sekitar setpoint.

Delta error menunjukkan **perubahan error terhadap waktu**, dirumuskan sebagai:

$$\Delta e = e(k) - e(k - 1) \dots \dots \dots (3.2)$$

di mana:

- $e(k)$ = error saat ini
- $e(k - 1)$ = error sebelumnya

Keterangan :

- $\Delta e > 0 \rightarrow$ error bertambah $\rightarrow$ suhu makin jauh dari set point
- $\Delta e < 0 \rightarrow$ error berkurang $\rightarrow$ suhu mendekati set point
- $\Delta e = 0 \rightarrow$ kondisi stabil

3.7.2 Variabel Output

1. PWM heater

PWM heater merupakan sinyal kendali yang digunakan untuk mengatur daya pemanasan pada elemen pemanas canting elektrik. Nilai PWM ditentukan berdasarkan hasil proses defuzzifikasi metode Fuzzy Sugeno orde nol. Semakin besar nilai PWM heater, semakin besar daya listrik yang diberikan ke heater sehingga suhu meningkat lebih cepat. Pengaturan PWM memungkinkan pemanasan dilakukan secara bertahap dan terkontrol, sehingga sistem dapat mencapai setpoint dengan lebih stabil.

2. PWM fan

PWM fan merupakan sinyal kendali yang digunakan untuk mengatur kecepatan kipas pendingin. Fan diaktifkan ketika suhu aktual melebihi setpoint atau ketika error bernilai negatif. Nilai PWM fan yang besar menghasilkan kecepatan kipas yang lebih tinggi, sehingga proses pendinginan berlangsung lebih cepat. Pengendalian fan berbasis PWM memungkinkan sistem menurunkan suhu secara terkendali tanpa menyebabkan fluktuasi suhu yang berlebihan.

3.7.3 Hubungan Variabel Input dan Output

Variabel input berupa error dan delta error diproses melalui algoritma fuzzy untuk menghasilkan variabel output berupa PWM heater dan PWM fan. Hubungan ini membentuk sistem kendali tertutup yang adaptif, di mana setiap perubahan suhu akan langsung memengaruhi nilai error dan delta error, sehingga sistem secara otomatis menyesuaikan aksi pemanasan atau pendinginan. Dengan penggunaan dua variabel input dan dua variabel output,

sistem kendali mampu menjaga suhu cangting elektrik tetap stabil dan responsif terhadap gangguan.

3.8 Perancangan Sistem kendali Fuzzy

3.8.1 Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan proses mengubah nilai input tegas (crisp) menjadi derajat keanggotaan pada beberapa himpunan fuzzy. Pada sistem kendali suhu cangting elektrik ini, variabel input fuzzy terdiri dari error suhu (e) dan perubahan error (Δe). Nilai error dan delta error diperoleh dari hasil pengukuran suhu aktual dan setpoint yang kemudian diproses oleh sistem fuzzy.

Proses fuzzifikasi dilakukan dengan memetakan nilai error dan delta error ke dalam beberapa himpunan linguistik menggunakan fungsi keanggotaan segitiga. Pemilihan fungsi keanggotaan segitiga dilakukan karena bentuknya sederhana, mudah diimplementasikan pada mikrokontroler Arduino Uno, serta mampu merepresentasikan perubahan kondisi suhu secara linier dan gradual.

1. Fuzzifikasi Error (e)

Variabel error suhu dikelompokkan menjadi lima himpunan fuzzy, yaitu:

1. **SP** (Sangat panas)
2. **P** (Panas)
3. **N** (Normal)
4. **D** (Dingin)
5. **SD** (Sangat Dingin)

Nilai error positif menunjukkan suhu aktual masih berada di bawah setpoint, sedangkan error negatif menunjukkan suhu telah melampaui setpoint.

2. Fuzzifikasi Delta Error (Δe)

Variabel delta error digunakan untuk menunjukkan kecenderungan perubahan suhu sistem, apakah suhu sedang meningkat atau menurun. Himpunan fuzzy delta error dibagi menjadi:

6. **NB** (Negative Big)
7. **NS** (Negative Small)
8. **ZE** (Zero)
9. **PS** (Positive Small)
10. **PB** (Positive Big)

Dengan adanya delta error, sistem fuzzy tidak hanya mempertimbangkan selisih suhu terhadap setpoint, tetapi juga arah dan kecepatan perubahan suhu, sehingga respon kendali menjadi lebih adaptif.

3.8.2 Membership Function Error

Berdasarkan karakteristik kerja sistem kendali suhu canting elektrik, penetapan rentang nilai error menjadi tahap penting agar sistem kendali fuzzy dapat bekerja secara efektif dan aman. Canting elektrik pada penelitian ini dirancang beroperasi pada **rentang suhu kerja 65–80 °C**, yang merupakan suhu optimal untuk menjaga viskositas malam batik tetap stabil. Oleh karena itu, penyimpangan suhu dari nilai set point perlu dikendalikan secara ketat untuk menghindari penurunan kualitas proses pembatikan.

Dari hasil pengamatan sistem dan pengujian awal, overshoot suhu hingga ± 20 °C masih dianggap signifikan karena dapat menyebabkan malam terlalu encer atau berisiko merusak elemen pemanas. Untuk mengantisipasi kondisi tersebut, sistem pendingin berupa kipas dirancang bekerja secara lebih agresif ketika suhu aktual melebihi set point lebih dari 20 °C, yang ditunjukkan oleh nilai error negatif yang besar.

Maka rentang error (e) yang realistis dan aman ditetapkan:

$$e = T_{setpoint} - T_{aktual} \Rightarrow [-20 \text{ s.d. } +20] \dots \dots \dots (3.3)$$

Tabel 3. 3 Membership Function Error (e)

Himpunan	Rentang Error (°C)	Keterangan
SP (Sangat panas)	≤ -20	Suhu jauh di atas set point
P (Panas)	$-20 \text{ s.d } -10$	Suhu sedikit di atas set point
N (Normal)	$-10 \text{ s.d } +10$	Suhu mendekati set point
D (Dingin)	$+10 \text{ s.d } +20$	Suhu sedikit di bawah set point
SD (Sangat Dingin)	$\geq +20$	Suhu jauh di bawah set point

Tabel 3.4 tersebut menunjukkan pembagian himpunan linguistik variabel error (e) yang merepresentasikan kondisi selisih antara suhu set point

dan suhu aktual pada sistem kendali canting elektrik. Himpunan Sangat Panas (SP) dan Panas (P) menggambarkan kondisi suhu aktual yang berada di atas set point, dengan tingkat penyimpangan dari yang sangat besar hingga kecil. Himpunan Normal (N) menunjukkan kondisi suhu yang mendekati set point, di mana sistem berada pada keadaan relatif stabil. Sementara itu, himpunan Dingin (D) dan Sangat Dingin (SD) merepresentasikan kondisi suhu aktual yang berada di bawah set point, dengan tingkat penyimpangan dari kecil hingga besar. Pembagian rentang error ini memungkinkan sistem kendali fuzzy memberikan respon pemanasan atau pendinginan yang sesuai dengan tingkat penyimpangan suhu yang terjadi.

3.8.3 Membership Function Delta Error (Δe)

Delta error (Δe) digunakan untuk menggambarkan **kecepatan perubahan suhu terhadap waktu**, sehingga sistem kendali tidak hanya mempertimbangkan besar penyimpangan suhu dari set point, tetapi juga kecenderungan perubahannya. Dengan memasukkan delta error sebagai variabel masukan, sistem kendali fuzzy mampu mengantisipasi kondisi kenaikan atau penurunan suhu yang terlalu cepat, sehingga risiko overshoot dan osilasi dapat dikurangi. Delta error menggambarkan kecepatan perubahan suhu, dari data pengujian tipikal perubahan suhu berkisar ± 10 °C/s.

Rentang Delta Error:

$$\Delta e = [-5 \text{ s.d. } +5]$$

Tabel 3. 4 Membership Function Delta Error (e)

Himpunan	Rentang Δe (°C/s)	Keterangan
NB (Negative Big)	≤ -5	Error turun sangat cepat
NS (Negative Small)	$-5 \text{ s.d. } -2$	Error turun perlahan
ZE (Zero)	$-2 \text{ s.d. } +2$	Perubahan error kecil
PS (Positive Small)	$+2 \text{ s.d. } +5$	Error naik perlahan
PB (Positive Big)	$\geq +5$	Error naik sangat cepat

Tabel 3.4 menunjukkan pembagian himpunan linguistik untuk variabel delta error (Δe) yang merepresentasikan kecepatan perubahan suhu pada sistem kendali canting elektrik. Himpunan Negative Big (NB) dan Negative Small (NS) menggambarkan kondisi penurunan suhu yang cepat dan perlahan, sedangkan Positive Small (PS) dan Positive Big (PB)

menunjukkan kenaikan suhu secara perlahan hingga sangat cepat. Himpunan Zero (ZE) merepresentasikan kondisi perubahan suhu yang kecil atau mendekati stabil. Pembagian ini memungkinkan sistem kendali fuzzy menyesuaikan aksi pemanasan dan pendinginan secara lebih responsif terhadap dinamika perubahan suhu.

3.8.4 Membership Fuction Heater

Rule base disusun berdasarkan logika kendali suhu cangting dan hasil pengamatan sistem pemanas. Aturan fuzzy untuk heater dan fan dirancang secara terpisah.

Tabel 3. 5 Rule base Heater

Himpunan	Rentang Error (°C)	Keterangan
SP (Sangat panas)	$0 < e \leq 2$	Heater hampir mati
P (Panas)	$2 < e \leq 5$	Pemanasan sangat kecil
N (Normal)	$5 < e \leq 10$	Pemanasan ringan
D (Dingin)	$10 < e \leq 15$	Pemanasan sedang
SD (Sangat Dingin)	$15 < e \leq 20$	Pemanasan besar
SSD (Sangat sangat Dingin)	$e > 20$	Pemanasan maksimum

Tabel 3. 6 Parameter segitiga Rule base Heater

Himpunan	Parameter Segitiga (a, b, c)	Keterangan
SP (Sangat panas)	(0, 1, 2)	Heater hampir mati
P (Panas)	(2, 3.5 , 5)	Pemanasan sangat kecil
N (Normal)	(5, 7.5 , 10)	Pemanasan ringan
D (Dingin)	(10, 12.5 , 15)	Pemanasan sedang
SD (Sangat Dingin)	(15, 17.5 , 20)	Pemanasan besar
SSD (Sangat sangat Dingin)	(20, 22.5 , 25)	Pemanasan maksimum

Tabel 3.5 dan Tabel 3.6 menunjukkan fungsi keanggotaan (membership function) output heater pada sistem kendali suhu cangting elektrik yang dibagi ke dalam enam himpunan linguistik, yaitu Sangat Panas (SP), Panas (P), Normal (N), Dingin (D), Sangat Dingin (SD), dan Sangat Sangat Dingin (SSD). Pembagian ini merepresentasikan tingkat penyimpangan suhu di bawah set point, di mana semakin besar nilai error, semakin besar pula daya pemanasan yang diberikan. Fungsi keanggotaan dimodelkan menggunakan fungsi segitiga dengan parameter (a, b, c) untuk menghasilkan transisi kendali yang halus antar tingkat pemanasan, sehingga heater tidak bekerja secara tiba-tiba dan sistem mampu menjaga kestabilan suhu dengan minim overshoot.

3.8.5 Membership Fuction Fan

Rule base disusun berdasarkan logika kendali suhu cangting dan hasil pengamatan sistem pemanas. Aturan fuzzy untuk heater dan fan dirancang secara terpisah. Fan bekerja saat suhu melebihi setpoint (error negatif):

Tabel 3. 7 Rule base Fan

Himpunan	Rentang Error (°C)	Keterangan
SP (Sangat panas)	$e \leq -20$	Fan sangat kuat
P (Panas)	$-20 < e \leq -10$	Fan sedang
N (Normal)	$-10 < e \leq 0$	Fan kecil / mati
D (Dingin)	—	Tidak digunakan
SD (Sangat Dingin)	—	Tidak digunakan

Tabel 3. 8 Parameter segitiga Rule base fan

Himpunan	Parameter Segitiga (a, b, c)	Keterangan
SP (Sangat panas)	(-30, -20 , -10)	Fan sangat kuat
P (Panas)	(- 20, - 10 , 0)	Fan sedang
N (Normal)	(-10, 0 , +2)	Fan mati

D (Dingin)	—	Tidak digunakan
SD (Sangat Dingin)	—	Tidak digunakan

Tabel 3.7 dan **Tabel 3.8** menunjukkan rule base dan fungsi keanggotaan output fan pada sistem kendali suhu cangting elektrik yang digunakan untuk mengatasi kondisi overshoot, yaitu saat suhu aktual melebihi set point (error bernilai negatif). Fan hanya diaktifkan pada himpunan Sangat Panas (SP), Panas (P), dan Normal (N), dengan tingkat pendinginan yang meningkat seiring bertambahnya besar error negatif, mulai dari fan kecil hingga sangat kuat. Fungsi keanggotaan dimodelkan menggunakan fungsi segitiga dengan parameter (a, b, c) untuk menghasilkan respon pendinginan yang bertahap dan halus, sedangkan himpunan Dingin (D) dan Sangat Dingin (SD) tidak digunakan karena pada kondisi tersebut suhu berada di bawah set point dan tidak memerlukan pendinginan. Pendekatan ini memastikan fan bekerja secara selektif dan efektif dalam menekan overshoot tanpa mengganggu kestabilan suhu sistem.

3.9 Rule Base heater & Fan

Basis aturan (*rule base*) merupakan kumpulan aturan logika fuzzy yang digunakan untuk menentukan aksi kendali berdasarkan kondisi sistem. Pada penelitian ini, basis aturan berfungsi sebagai penghubung antara hasil fuzzyfikasi variabel input, yaitu error (e) dan delta error (Δe), terhadap nilai keluaran berupa sinyal kendali PWM heater dan PWM fan. Error (e) didefinisikan sebagai selisih antara suhu set point dengan suhu aktual, sedangkan delta error (Δe) menyatakan perubahan error terhadap waktu. Kedua variabel tersebut digunakan untuk merepresentasikan kondisi pemanasan dan laju perubahan suhu pada cangting elektrik.

Basis aturan disusun dalam bentuk pernyataan IF–THEN, di mana bagian IF menyatakan kondisi linguistik dari error dan delta error, sedangkan bagian THEN menyatakan aksi kendali berupa besaran PWM heater dan fan. Aturan-aturan ini dirancang berdasarkan pengetahuan intuitif pengendalian suhu, yaitu:

- semakin besar nilai error, maka daya heater yang diberikan semakin besar,
- ketika suhu mendekati set point atau cenderung meningkat cepat, daya heater dikurangi dan fan diaktifkan untuk menjaga kestabilan suhu.

3.10 Defuzzifikasi Sistem Kendali Fuzzy

Setelah proses fuzzifikasi dan inferensi fuzzy dilakukan berdasarkan rule base yang telah ditetapkan, langkah selanjutnya adalah **defuzzifikasi**, yaitu proses untuk mengubah keluaran fuzzy menjadi **nilai tegas (crisp)** yang dapat digunakan sebagai sinyal kendali aktual pada heater dan fan.

3.10.1 Metode Defuzzifikasi yang Digunakan

Pada penelitian ini, metode defuzzifikasi yang digunakan adalah **metode centroid (Center of Gravity / COG)**. Metode centroid dipilih karena:

1. Memberikan hasil keluaran yang **halus dan kontinu**
2. Paling umum digunakan pada sistem kendali fuzzy Mamdani
3. Menghasilkan respon yang stabil dan minim osilasi
4. Cocok untuk sistem kendali suhu yang membutuhkan transisi bertahap

Secara matematis, defuzzifikasi dengan metode centroid dirumuskan sebagai berikut:

$$u^* = \frac{\int u \cdot \mu(u) du}{\int \mu(u) du} \dots \dots \dots (3.4)$$

dengan:

- u^* = nilai keluaran tegas (crisp output)
- u = variabel keluaran (heater atau fan)
- $\mu(u)$ = derajat keanggotaan hasil inferensi fuzzy

3.10.2 Integrasi Heater dan Fan

Untuk menghindari konflik kerja antara heater dan fan:

- **Jika error positif (suhu di bawah set point)** → hanya heater yang aktif
- **Jika error negatif (suhu di atas set point)** → hanya fan yang aktif

- **Jika error mendekati nol** → heater dan fan berada pada kondisi minimum

Pendekatan ini menjaga kestabilan sistem dan mencegah pemborosan energi.

3.11 Proses Clamping Nilai PWM Output

Pada implementasi sistem kendali suhu cangting elektrik berbasis logika fuzzy, hasil defuzzifikasi berupa nilai tegas (crisp) perlu dikonversikan menjadi sinyal kendali **Pulse Width Modulation (PWM)** untuk mengatur daya heater dan kecepatan fan. Mikrokontroler Arduino Uno hanya menerima nilai PWM dalam rentang **0 hingga 255**, sehingga diperlukan proses **clamping** untuk memastikan nilai keluaran berada dalam batas yang diizinkan oleh sistem.

3.11.1 Prinsip Clamping PWM

Clamping adalah proses pembatasan nilai keluaran agar tidak melebihi batas minimum dan maksimum sistem. Secara matematis, proses clamping PWM dirumuskan sebagai:

$$PWM_{out} = \begin{cases} 0, & \text{jika } PWM_{calc} < 0 \\ PWM_{calc}, & \text{jika } 0 \leq PWM_{calc} \leq 255 \dots\dots\dots (3.x) \\ 255, & \text{jika } PWM_{calc} > 255 \end{cases}$$

dengan:

- PWM_{calc} = nilai PWM hasil perhitungan
- PWM_{out} = nilai PWM akhir yang dikirim ke aktuator

3.11.2 Konversi Nilai Defuzzifikasi ke PWM

Misalkan:

- Domain keluaran heater hasil defuzzifikasi: **0–25**
- PWM Arduino: **0–255**

Maka konversi linier dilakukan menggunakan persamaan:

$$PWM_{calc} = \frac{u^*}{25} \times 255 \dots \dots \dots (3.x)$$

di mana:

- u^* = nilai hasil defuzzifikasi heater

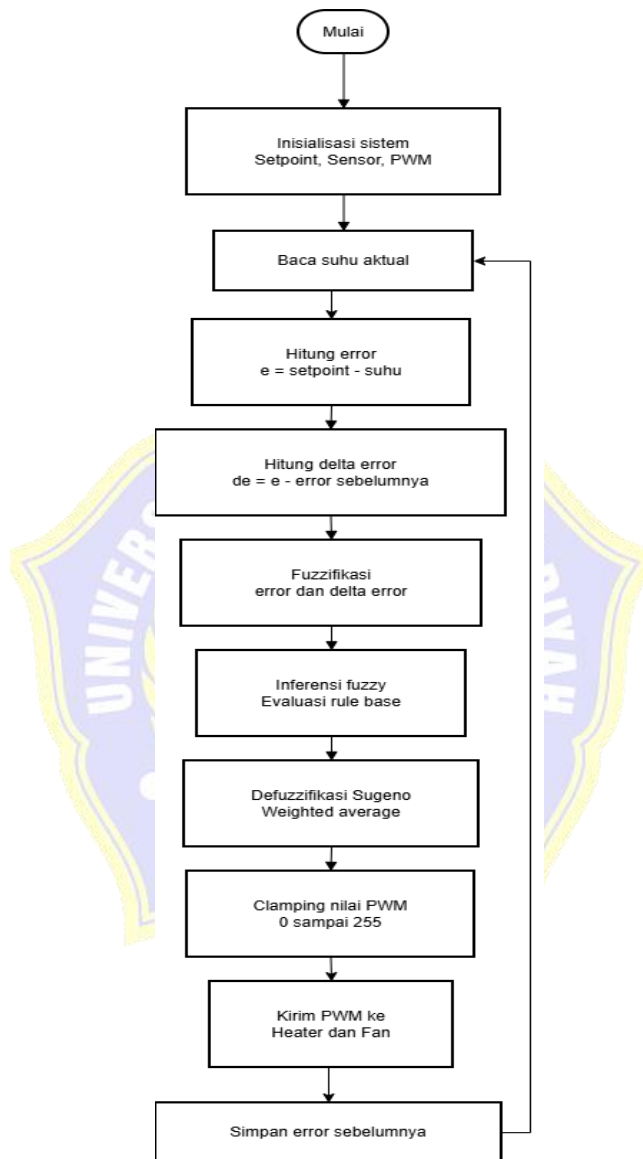
3.11.3 Analisis Dampak Clamping terhadap Sistem

Berdasarkan hasil pengujian:

1. Clamping mencegah **overflow PWM** yang dapat merusak aktuator
2. Menjamin kompatibilitas penuh dengan Arduino Uno
3. Menjaga kestabilan sistem pada kondisi ekstrem (overshoot besar)
4. Menghindari respon kendali yang tidak realistis

3.12 Flowchart algoritma fuzzy

Flowchart algoritma fuzzy menggambarkan proses pengendalian suhu yang dimulai dari pembacaan sensor suhu, perhitungan nilai error dan delta error, proses fuzzifikasi, inferensi fuzzy, hingga defuzzifikasi menggunakan metode Sugeno orde nol. Nilai keluaran berupa PWM heater dan fan kemudian dibatasi sesuai kemampuan perangkat keras sebelum dikirimkan ke aktuator.



Gambar 3. 6 Flowchart algoritma fuzzy

Gambar 3.6 menunjukkan flowchart algoritma sistem kendali suhu canting elektrik berbasis logika fuzzy Sugeno orde nol. Proses pengendalian dimulai dari tahap inialisasi sistem hingga pemberian sinyal kendali ke aktuator secara berulang (looping) untuk menjaga kestabilan suhu.

Proses diawali dengan kondisi Mulai, kemudian sistem melakukan inialisasi yang meliputi penetapan nilai setpoint suhu, inialisasi sensor suhu, serta pengaturan awal sinyal PWM untuk heater dan fan. Tahap ini bertujuan untuk memastikan seluruh komponen sistem berada dalam kondisi siap sebelum proses pengendalian dijalankan. Selanjutnya, sistem melakukan pembacaan suhu aktual melalui sensor suhu yang terpasang pada canting elektrik. Nilai suhu aktual ini digunakan sebagai umpan balik dalam sistem kendali tertutup. Setelah suhu aktual diperoleh, sistem menghitung nilai error, yaitu selisih antara suhu setpoint dan suhu aktual. Nilai error ini menunjukkan tingkat penyimpangan suhu terhadap kondisi yang diinginkan.

Setelah nilai error dihitung, sistem melanjutkan dengan perhitungan delta error, yaitu selisih antara error saat ini dengan error sebelumnya. Delta error digunakan untuk mengetahui kecenderungan perubahan suhu, apakah suhu sedang meningkat atau menurun, serta seberapa cepat perubahan tersebut terjadi. Nilai error dan delta error kemudian masuk ke tahap fuzzifikasi, di mana nilai crisp diubah menjadi derajat keanggotaan berdasarkan fungsi keanggotaan yang telah ditentukan. Proses ini memungkinkan sistem fuzzy untuk memproses informasi input secara linguistik.

Tahap berikutnya adalah inferensi fuzzy, yaitu proses evaluasi aturan IF-THEN berdasarkan rule base yang telah dirancang. Setiap aturan yang aktif menghasilkan keluaran berupa nilai konstanta sesuai dengan metode Fuzzy Sugeno orde nol. Hasil inferensi fuzzy selanjutnya diproses pada tahap defuzzifikasi menggunakan metode rata-rata berbobot (weighted average) untuk memperoleh nilai keluaran akhir sistem berupa sinyal PWM. Nilai PWM ini merepresentasikan besarnya aksi kendali yang akan diberikan kepada aktuator.

Sebelum sinyal PWM dikirimkan ke aktuator, dilakukan proses clamping nilai PWM untuk memastikan nilai keluaran berada dalam rentang yang diizinkan oleh sistem, yaitu 0 hingga 255. Pembatasan ini bertujuan untuk menjaga keamanan sistem dan mencegah kerusakan pada komponen

aktuator. Setelah nilai PWM dibatasi, sistem mengirimkan sinyal PWM ke heater dan fan sebagai aktuator pemanas dan pendingin. Heater dan fan bekerja secara proporsional sesuai dengan nilai PWM yang diberikan untuk menyesuaikan suhu sistem terhadap setpoint.

Terakhir, sistem menyimpan nilai error saat ini sebagai error sebelumnya untuk digunakan pada siklus pengendalian berikutnya. Proses kemudian kembali ke tahap pembacaan suhu aktual dan berlangsung secara terus-menerus selama sistem beroperasi, sehingga suhu cangting elektrik dapat dijaga tetap stabil.

3.13 Kalibrasi Sensor Suhu

Kalibrasi sensor dilakukan untuk memastikan bahwa sensor suhu yang digunakan mampu memberikan hasil pengukuran yang akurat dan sesuai dengan suhu aktual cangting. Proses kalibrasi menjadi tahap penting karena keakuratan sensor sangat berpengaruh terhadap kinerja sistem kendali fuzzy secara keseluruhan.

3.13.1 Metode Kalibrasi Sensor

Metode kalibrasi yang digunakan pada penelitian ini adalah kalibrasi perbandingan (comparison calibration). Pada metode ini, hasil pembacaan sensor thermocouple tipe K dibandingkan dengan alat ukur referensi yang telah terkalibrasi. Kalibrasi dilakukan dengan memanaskan cangting hingga beberapa titik suhu kerja setpoint 60 °C, 80 °C, 100 °C, 120 °C, 1400 °C. Pada setiap titik suhu, pembacaan sensor dan alat referensi dilakukan secara bersamaan untuk memperoleh data perbandingan. Alat ukur referensi yang digunakan dalam proses kalibrasi adalah termometer digital non-kontak (infrared thermometer). Pengukuran dilakukan pada titik dan jarak yang sama untuk meminimalkan kesalahan pembacaan.

Data hasil pembacaan sensor thermocouple dan alat referensi dicatat dalam bentuk tabel untuk mengetahui selisih nilai pengukuran. Selisih ini digunakan untuk mengevaluasi tingkat akurasi sensor dan menentukan kelayakan sensor dalam sistem kendali suhu.

3.13.2 Perhitungan Error Kalibrasi

Error kalibrasi dihitung berdasarkan selisih antara hasil pembacaan sensor dan alat ukur referensi. Perhitungan error dilakukan menggunakan beberapa parameter, yaitu error absolut dan error persentase.

- Error Suhu

$$e = T_{sensor} - T_{referensi} \dots \dots \dots (3.5)$$

- Error Absolut

$$|e| = |T_{sensor} - T_{referensi}| \dots \dots \dots (3.6)$$

- Error Persentase

$$\%Error = \frac{|T_{sensor} - T_{referensi}|}{T_{referensi}} \times 100\% \dots \dots \dots (3.7)$$

Keterangan:

- T_{sensor} = suhu hasil pembacaan sensor thermocouple (°C)
- $T_{referensi}$ = suhu hasil pembacaan alat ukur referensi (°C)
- e = error pengukuran (°C)

Hasil perhitungan error kalibrasi digunakan untuk menilai tingkat ketelitian sensor. Sensor dinyatakan layak digunakan apabila nilai error berada dalam batas toleransi yang dapat diterima untuk aplikasi kendali suhu canting elektrik.

3.14 Skenario Pengujian sistem

Teknik pengambilan data pada penelitian ini dilakukan berdasarkan arsitektur sistem kendali suhu canting elektrik berbasis logika fuzzy Sugeno seperti yang ditunjukkan pada diagram sistem. Data yang diambil berasal dari sensor suhu yang terintegrasi dengan sistem kendali dan diproses oleh mikrokontroler Arduino Uno secara real-time. Pengambilan data suhu dilakukan menggunakan sensor thermocouple tipe K yang terpasang langsung pada bagian canting sebagai objek pemanasan (plant). Sensor ini membaca suhu aktual canting dan mengirimkan sinyal ke modul MAX6675 untuk dikonversi menjadi data digital. Data suhu digital selanjutnya dikirimkan ke Arduino Uno sebagai umpan balik sistem.

Pengambilan data dilakukan secara periodik dengan interval sampling tetap, yaitu setiap 1 detik sampai 600 detik. Interval ini dipilih agar perubahan suhu dapat terpantau secara kontinu dan respons sistem kendali fuzzy terhadap perubahan suhu dapat dianalisis dengan baik. Data yang direkam meliputi suhu aktual, setpoint suhu (65 °C dan 80 °C), nilai error, serta keluaran PWM heater dan fan. Seluruh data hasil pengukuran digunakan sebagai dasar analisis kinerja sistem kendali, meliputi evaluasi error suhu, waktu respon, overshoot, dan kestabilan suhu yang dibahas pada BAB IV.

3.15 Pengujian dengan Metode Kontrol Manual

Pengujian dengan metode kontrol manual dilakukan dengan mengoperasikan sistem tanpa menggunakan algoritma fuzzy. Pada metode ini, daya heater diatur secara manual menggunakan nilai PWM tetap, sementara fan diatur dalam kondisi mati atau tetap. Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui karakteristik dasar sistem pemanas tanpa kendali cerdas, serta sebagai pembandingan terhadap kinerja sistem kendali fuzzy. Data suhu yang diperoleh digunakan untuk menganalisis waktu respon, overshoot, dan kestabilan suhu sistem tanpa pengendalian adaptif.

3.16 Pengujian dengan Metode Fuzzy Logic

Pada pengujian ini, sistem kendali suhu dijalankan menggunakan algoritma logika fuzzy Sugeno tanpa gangguan eksternal. Sistem diuji untuk mencapai dan mempertahankan suhu setpoint 65 °C dan 80 °C secara otomatis. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan sistem fuzzy dalam mengendalikan suhu secara stabil, serta untuk mengetahui tingkat error suhu, waktu respon, dan overshoot yang dihasilkan oleh sistem kendali fuzzy dibandingkan dengan metode kontrol manual.

3.17 Pengujian dengan Metode Fuzzy Logic dengan Gangguan Pemanas

Pengujian ini dilakukan dengan memberikan gangguan berupa penambahan pemanas secara tiba-tiba pada sistem dengan Hotgun. Gangguan ini mensimulasikan kondisi kenaikan panas yang tidak terduga, misalnya akibat perubahan kondisi lingkungan atau karakteristik elemen pemanas. Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui kemampuan sistem kendali fuzzy dalam merespons lonjakan suhu dan mengembalikan suhu casing ke nilai setpoint secara stabil. Parameter yang diamati meliputi besarnya overshoot, waktu pemulihan, dan kestabilan suhu setelah gangguan.

3.18 Pengujian dengan Metode Fuzzy Logic dengan Gangguan Pendingin

Pengujian ini dilakukan dengan memberikan gangguan berupa peningkatan pendinginan, yaitu dengan mengaktifkan fan eksternal secara tiba-tiba. Gangguan ini mensimulasikan kondisi penurunan suhu akibat aliran udara atau perubahan lingkungan. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan sistem kendali fuzzy dalam menyesuaikan kembali daya heater dan fan untuk mengembalikan suhu ke setpoint. Parameter yang diamati meliputi waktu respon sistem, error suhu, serta kestabilan suhu setelah gangguan pendinginan.