

## BAB II

### DASAR TEORI

#### 2.1 Kajian Pustaka

Tabel 2. 1 Penelitian Sebelumnya

| Peneliti / Tahun        | Judul Fokus Penelitian                            | Metode / Sistem                      | Hasil Utama                                                     | Relevansi dengan Penelitian Ini                                    |
|-------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| P, Singhala, 2014[7]    | Temperatu re Control using Fuzzy Logic            | Fuzzy Logic, kontrol suhu pemanas    | Sistem mampu menjaga suhu lebih stabil dibanding kontrol ON/OFF | Memberikan dasar konsep penggunaan fuzzy dalam menjaga suhu cacing |
| Suparman to, 2025 [9]   | Analisis kualitas & efisiensi cacing elektrik     | Analisis eksperime n cacing elektrik | Menemuka n masalah utama: suhu tidak stabil & boros energi      | Menguatkan latar belakang bahwa cacing butuh sistem kendali suhu   |
| Abduljaba r , 2011 [10] | Simulation & Design of Fuzzy Temperatu re Control | Simulasi MATLAB + Fuzzy Mamdani      | FIS mampu menurunkan error dan overshoot                        | Sebagai acuan merancang membership function dan rule base          |

|                                  |                                               |                                          |                                                   |                                                            |
|----------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Hendrawati, 2025 [11]            | Fuzzy Logic untuk kontrol pemanas dan kipas   | Mamdani Fuzzy, sensor suhu, fan + heater | Pengendalian suhu stabil menggunakan dua aktuator | Relevan langsung: penelitianmu memakai heater + fan        |
| Phan, Van Du, 2024 [12]          | Adaptive Fuzzy-Neural Controller for Kiln     | Fuzzy adaptif + neural network           | Respons cepat dan hemat energi                    | Menjadi referensi ide pengembangan untuk perbaikan sistem  |
| Aditya, 2025 [13]                | Temperature Control of Canting Electric       | Sistem kontrol suhu canting elektrik     | Menjelaskan kebutuhan suhu ideal malam            | Sumber utama untuk karakteristik canting elektrik          |
| A. Nidhar, 2025 [14]             | Fuzzy Logic Temp Controller (dryer/incubator) | ESP32 + Fuzzy + thermocouple             | Error kecil $< \pm 2^{\circ}\text{C}$             | Relevan pada implementasi ESP32 + MAX6675                  |
| Rajeswari Subramaniam, 2023 [15] | Fuzzy Logic for Thermal Regulation            | Simulasi kontrol suhu HVAC               | Menurunkan fluktuasi suhu efektif                 | Membantu merumuskan parameter evaluasi (error, stabilitas) |
| F. Imaduddin Adhim, 2025 [16]    | Implementasi Fuzzy pada Kendali Suhu Roaster  | Fuzzy Mamdani + Thermocouple             | Sistem stabil walau terjadi gangguan              | Relevan: kondisi canting sering mengalami gangguan suhu    |

|                         |                                              |                  |                                                   |                                                      |
|-------------------------|----------------------------------------------|------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Soesanti ,<br>2019 [17] | Fuzzy<br>Controller<br>for Heat<br>Exchanger | Fuzzy<br>Mamdani | Menghasilk<br>an respon<br>cepat &<br>error kecil | Menjadi<br>dasar teori<br>desain fuzzy<br>controller |
|-------------------------|----------------------------------------------|------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------|

Berdasarkan Tabel 2.1 dapat disimpulkan bahwa metode Fuzzy Logic Control telah banyak digunakan dan terbukti efektif dalam sistem pengendalian suhu, khususnya pada sistem pemanas yang bersifat nonlinier dan rentan terhadap gangguan.

Penerapan fuzzy logic mampu menghasilkan kestabilan suhu yang lebih baik dibandingkan metode kontrol konvensional ON/OFF. Hasil ini menegaskan bahwa pendekatan fuzzy lebih adaptif terhadap perubahan kondisi sistem dan cocok diterapkan pada proses pemanasan yang membutuhkan kestabilan suhu, seperti pada canting elektrik [18]. Permasalahan utama pada canting elektrik adalah ketidakstabilan suhu dan pemborosan energi. Temuan ini memperkuat urgensi penerapan sistem kendali suhu yang cerdas dan adaptif, sehingga dapat menjaga suhu kerja canting tetap stabil sesuai kebutuhan proses membak [9].

Penggunaan metode Fuzzy Mamdani menunjukkan bahwa fuzzy logic mampu menurunkan error, overshoot, serta mempertahankan kestabilan suhu meskipun terjadi gangguan pada sistem. Penelitian-penelitian ini menjadi landasan penting dalam perancangan fungsi keanggotaan (membership function) dan aturan fuzzy (rule base) pada sistem kendali suhu [10], [11], [16], [17]. Namun demikian, penerapan metode Fuzzy Mamdani memiliki keterbatasan pada proses defuzzifikasi yang relatif lebih kompleks dan membutuhkan sumber daya komputasi yang lebih besar. Hal ini menjadi pertimbangan penting terutama ketika sistem diimplementasikan pada mikrokontroler dengan keterbatasan sumber daya, seperti Arduino UNO.

Pengembangan fuzzy ke arah adaptif mampu meningkatkan kecepatan respon dan efisiensi energi. Meskipun penelitian tersebut menggunakan pendekatan yang lebih kompleks (fuzzy-neural), hasilnya memperlihatkan bahwa sistem fuzzy yang dirancang secara tepat mampu memberikan kinerja yang sangat baik dalam pengendalian suhu [12]. Implementasi fuzzy logic berbasis mikrokontroler dan sensor termokopel mampu menghasilkan error suhu yang kecil, yaitu kurang dari  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ . Hal ini relevan langsung dengan penelitian ini yang menggunakan sensor termokopel tipe K dan modul MAX6675 sebagai sistem akuisisi data suhu [14].

Berdasarkan hasil kajian penelitian terdahulu tersebut, dapat disimpulkan bahwa Fuzzy Logic Controller merupakan metode yang tepat

untuk pengendalian suhu canting elektrik. Namun, untuk meningkatkan efisiensi komputasi dan kemudahan implementasi pada Arduino UNO, penelitian ini memilih metode Fuzzy Logic Sugeno. Metode Sugeno memiliki output berupa konstanta atau persamaan linear sehingga proses defuzzifikasi menjadi lebih sederhana, cepat, dan efisien dibandingkan Mamdani.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mengadopsi konsep fuzzy logic yang telah terbukti efektif, tetapi juga mengembangkan pendekatan yang lebih sesuai dengan karakteristik sistem dan keterbatasan perangkat keras, sehingga diharapkan mampu menghasilkan pengendalian suhu canting yang lebih stabil, responsif, dan efisien terhadap gangguan.

## **2.2 Suhu kerja pada produksi batik**

Canting elektrik menggunakan elemen pemanas berbasis listrik yang dirancang untuk mempertahankan suhu lilin lebih stabil. Sistem ini biasanya dilengkapi sensor suhu, rangkaian kontrol, serta aktuator pemanas sehingga proses pembatikan dapat dilakukan dengan suhu lilin yang lebih terkontrol. Mekanisme pemanas elektrik bekerja dengan mengubah energi listrik menjadi panas dan menyalurkan panas ke ruang penampung lilin pada canting.

Suhu lilin merupakan parameter penting dalam pembatikan. Berdasarkan laporan teknis dari FES Library, lilin batik idealnya berada pada suhu sekitar 70°C, karena pada suhu tersebut lilin memiliki viskositas yang paling sesuai untuk proses penuangan menggunakan canting. Bila suhunya terlalu rendah, lilin mengental sehingga alirannya tersendat dan garis motif menjadi patah-patah. Sebaliknya, bila terlalu tinggi, lilin menjadi terlalu encer dan mudah merembes ke serat kain sehingga garis menjadi melebar dan sulit dikendalikan [19].

Pentingnya pengendalian suhu lilin penetapan suhu setpoint 80°C untuk menjaga lilin tetap cair dan stabil. Sistem kontrol PID digunakan untuk mempertahankan suhu tersebut. Dari hasil penelitian, kontrol otomatis terbukti mampu menjaga kestabilan suhu lilin meskipun terjadi gangguan atau perubahan kondisi lingkungan, sehingga proses membatik menjadi lebih efisien dan nyaman [13].

Selain itu, penelitian oleh Rizal & Muzakhim dari Politeknik Negeri Lhokseumawe menunjukkan bahwa suhu lilin antara 70°C, 80°C, dan 90°C

berpengaruh besar terhadap tingkat penetrasi lilin ke kain dan kualitas garis. Peningkatan suhu terbukti meningkatkan kemampuan lilin meresap ke kain, khususnya pada kecepatan aliran canting yang rendah. Namun, suhu yang terlalu tinggi juga dapat menyebabkan motif melebar karena lilin menjadi terlalu cair. Sebaliknya, suhu yang terlalu rendah menghasilkan aliran lilin yang lambat dan motif yang tidak tajam. Hal ini menguatkan bahwa rentang suhu lilin harus dikontrol dengan tepat untuk menjaga kualitas pembatikan [20].

Dari ketiga sumber tersebut dapat disimpulkan bahwa suhu ideal untuk lilin batik berada pada rentang  $70^{\circ}\text{C}$ – $90^{\circ}\text{C}$ , tergantung jenis lilin dan kebutuhan proses. Karena suhu memiliki pengaruh langsung terhadap viskositas lilin dan kualitas motif, sistem kendali otomatis seperti PID atau Fuzzy Logic diperlukan dalam canting elektrik. Teknologi ini memastikan lilin tetap berada pada suhu optimal meskipun menghadapi perubahan lingkungan atau variasi penggunaan.

### **2.3 Canting**

Canting merupakan komponen utama dalam proses pembatikan yang berfungsi sebagai media transfer panas dan fluida secara simultan. Pada canting tradisional, pemanasan malam dilakukan secara eksternal sehingga distribusi panas sulit dikontrol dan sangat bergantung pada keterampilan pengguna. Canting elektrik mengintegrasikan elemen pemanas langsung pada badan canting, sehingga proses perpindahan panas berlangsung lebih terlokalisasi dan terkontrol. Dari sudut pandang sistem termal, canting elektrik dapat dimodelkan sebagai sistem pemanas tertutup dengan massa termal kecil dan respon cepat, sehingga kestabilan suhu menjadi faktor dominan dalam menjaga viskositas dan kontinuitas aliran malam. Oleh karena itu, canting elektrik menjadi objek yang tepat untuk penerapan sistem pengendalian suhu berbasis umpan balik [21].



**Gambar 2. 1** *Canting Elektrik*

#### **2.4 Elemen Pemanas (Heater)**

Elemen pemanas merupakan komponen yang berfungsi mengonversi energi listrik menjadi energi panas berdasarkan prinsip efek Joule, yaitu panas yang dihasilkan akibat aliran arus listrik melalui material yang memiliki hambatan listrik. Besarnya energi panas yang dihasilkan dipengaruhi oleh nilai resistansi elemen dan arus yang mengalir, sehingga pengaturan daya listrik menjadi faktor utama dalam pengendalian laju pemanasan. Material elemen pemanas umumnya dipilih dari bahan dengan resistivitas tinggi dan stabil terhadap temperatur, seperti paduan nikel–krom atau material keramik resistif, agar mampu menghasilkan panas secara konsisten dan memiliki ketahanan termal yang baik.



**Gambar 2. 2** *Element Pemanas (Heater)*

Dalam sistem pemanas, karakteristik elemen pemanas tidak hanya ditentukan oleh kemampuan menghasilkan panas, tetapi juga oleh distribusi termal dan respon dinamisnya. Elemen dengan distribusi panas yang merata dan laju pemanasan yang cepat cenderung menghasilkan kestabilan suhu yang lebih baik serta mengurangi gradien temperatur pada media yang dipanaskan. Struktur elemen yang dirancang secara presisi mampu meningkatkan kecepatan pemanasan dan keseragaman distribusi panas, sehingga performa sistem termal menjadi lebih efisien [22].

Pada aplikasi canting elektrik, elemen pemanas berperan sebagai aktuator utama dalam sistem pengendalian suhu. Namun, adanya inersia termal pada elemen pemanas menyebabkan respon suhu tidak bersifat instan terhadap perubahan daya masukan. Kondisi ini berpotensi menimbulkan keterlambatan respons dan overshoot suhu apabila tidak dikendalikan dengan baik. Oleh karena itu, elemen pemanas perlu diintegrasikan dengan sistem kendali yang mampu mengatur daya secara adaptif agar suhu malam dapat dipertahankan pada rentang kerja optimal.

## 2.5 Aktuator Kipas (Fan)

Kipas merupakan aktuator yang berfungsi mengendalikan suhu sistem dengan meningkatkan laju perpindahan panas melalui mekanisme konveksi paksa. Dengan mempercepat aliran udara di sekitar objek yang dipanaskan, kipas mampu memperbesar koefisien perpindahan panas sehingga energi panas dapat dilepaskan ke lingkungan secara lebih cepat. Dalam konteks sistem pengendalian suhu, kipas berperan sebagai aktuator pendingin yang bekerja secara aktif ketika suhu melebihi nilai referensi atau menunjukkan kecenderungan meningkat secara berlebihan



**Gambar 2. 3** Blower Fan 12Vdc

Permodelan sistem pengendalian suhu dan kelembapan ruangan berbasis Internet of Things (IoT) dengan kipas sebagai aktuator utama. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa pengendalian kipas berdasarkan kondisi suhu mampu meningkatkan kestabilan sistem dan mempercepat respons penurunan suhu dibandingkan dengan pendinginan alami. Temuan ini mengindikasikan bahwa kipas tidak hanya berfungsi sebagai perangkat ventilasi, tetapi juga sebagai elemen kendali yang signifikan dalam sistem pengendalian suhu tertutup [23].

Dalam sistem kendali modern, kipas umumnya dioperasikan secara variabel menggunakan sinyal Pulse Width Modulation (PWM), sehingga tingkat pendinginan dapat disesuaikan secara proporsional terhadap kondisi suhu. Pendekatan ini memungkinkan sistem meredam overshoot dan mempercepat pencapaian kondisi tunak. Oleh karena itu, integrasi kipas sebagai aktuator pendingin menjadi solusi efektif untuk meningkatkan respons dinamis dan kestabilan suhu, khususnya pada sistem termal berskala kecil seperti cangking elektrik.

## 2.6 SSR

Solid State Relay (SSR) adalah saklar elektronik yang berfungsi menggantikan relai mekanik dengan memanfaatkan komponen semikonduktor seperti *TRIAC*, *SCR*, atau *MOSFET*. SSR bekerja dengan menerima sinyal kontrol bertegangan rendah pada sisi input (misalnya dari mikrokontroler), lalu menghubungkan atau memutuskan arus beban pada sisi output tanpa menggunakan kontak mekanis.

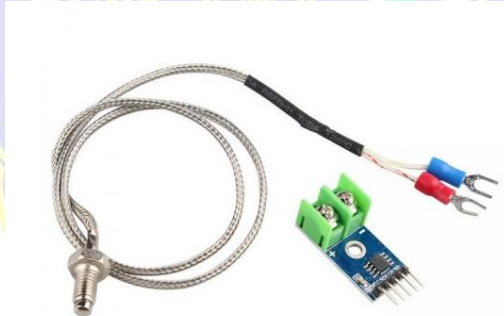


**Gambar 2. 4** Solid State Relay 40 DA

Keunggulan SSR adalah kecepatan switching tinggi, umur pakai panjang, bebas percikan listrik (*arcing*), dan mampu bekerja senyap. Namun, SSR memiliki kelemahan seperti munculnya panas akibat rugi daya semikonduktor dan adanya arus bocor saat kondisi OFF (Mude et al. 2024). Penggunaan SSR pada sistem pemanas industri meningkatkan efisiensi dan keandalan dibanding *magnetic contactor*. SSR juga cocok diintegrasikan dengan sistem IoT atau mikrokontroler karena input kontrolnya hanya memerlukan tegangan rendah (3–32 V DC) [25].

## 2.7 Sensor Suhu Thermocouple Tipe K/J dengan module MAX6675

Thermocouple tipe K merupakan sensor suhu yang menghasilkan tegangan listrik akibat adanya perbedaan suhu antara dua jenis logam. Tegangan ini kemudian dikonversi menjadi nilai suhu melalui modul MAX6675 agar dapat diproses oleh mikrokontroler. Tegangan tersebut berbanding lurus dengan perbedaan suhu antara titik panas (*hot junction*) dan titik referensi (*cold junction*).



**Gambar 2. 5** Thermocouple Tipe K & Modul Max6675

Thermocouple tipe K (Chromel–Alumel) memiliki rentang suhu sangat luas, yakni  $-200^{\circ}\text{C}$  hingga  $1250^{\circ}\text{C}$ , dan banyak digunakan untuk sistem industri serta alat pemanas. Sedangkan tipe J (Iron–Constantan) memiliki rentang  $-40^{\circ}\text{C}$  hingga  $750^{\circ}\text{C}$  dan lebih sensitif pada suhu sedang [26].

Sinyal keluaran thermocouple berupa tegangan yang sangat kecil (mikrovolt), sehingga diperlukan modul konverter MAX6675 agar dapat

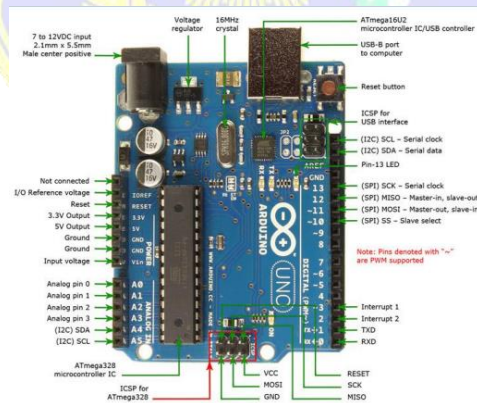
dibaca oleh mikrokontroler. Modul MAX6675 digunakan sebagai antarmuka antara thermocouple dan mikrokontroler, yang berfungsi mengonversi sinyal suhu menjadi data digital sehingga dapat diolah secara langsung dalam sistem kendali berbasis Arduino melalui komunikasi SPI (Serial Peripheral Interface).

Keunggulan kombinasi thermocouple tipe K/J dan MAX6675:

- Akurasi tinggi dengan kesalahan pengukuran  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ .
- Respon cepat dan mampu bekerja pada suhu tinggi.
- Mudah diintegrasikan dengan mikrokontroler seperti Arduino, ESP32, atau Raspberry Pi.
- Tersedia fitur kompensasi suhu otomatis.

## 2.8 Mikrokontroler Arduino uno

Arduino Uno adalah sebuah board mikrokontroler berbasis ATmega328P yang banyak digunakan dalam penelitian otomasi dan sistem kendali karena sifatnya yang *open-source*, mudah diprogram, dan memiliki kemampuan input/output digital serta analog serta *PWM* untuk mengendalikan aktuator. Menurut beberapa studi, Arduino merupakan platform yang efektif untuk pengembangan sistem kendali berbasis sensor karena menyediakan antarmuka yang intuitif antara sensor dan aktuator, serta didukung oleh perangkat lunak Arduino IDE yang menyediakan berbagai pustaka untuk mempermudah pengembangan *embedded system* [27].



**Gambar 2. 6** Mikrokontroler Arduino Uno [27]

Arduino Uno memiliki spesifikasi utama sebagai berikut:

- Mikrokontroler: ATmega328P
- Tegangan operasi: 5 V
- Tegangan input: 7–12 V
- Kecepatan clock: 16 MHz
- Memori Flash: 32 KB
- SRAM: 2 KB
- EEPROM: 1 KB
- Pin digital I/O: 14 pin
- Pin analog input: 6 pin

Spesifikasi tersebut memungkinkan Arduino Uno untuk melakukan pemrosesan data sensor, perhitungan fuzzy, serta pengendalian aktuator secara real-time [1], Arduino Uno dirancang untuk memudahkan pengembangan sistem elektronik dengan menyediakan antarmuka input–output yang sederhana, lingkungan pemrograman yang mudah digunakan, serta kemampuan pemrosesan yang memadai untuk aplikasi kendali real-time.

## **2.9 Sistem kendali yang digunakan**

Sistem kendali dapat didefinisikan sebagai mekanisme yang berfungsi mengatur perilaku suatu proses agar keluaran yang dihasilkan sesuai dengan nilai yang telah ditentukan. Sistem ini bekerja dengan memproses sinyal masukan untuk menghasilkan aksi kendali terhadap objek yang dikontrol.. Tujuan utama dari sistem kendali adalah untuk menjaga kestabilan sistem, mencapai nilai referensi (setpoint), serta meminimalkan kesalahan (error) antara keluaran aktual dan nilai yang diharapkan.

Kendali terbuka merupakan sistem kendali yang bekerja tanpa menggunakan umpan balik dari keluaran sistem. Pada sistem ini, aksi kendali diberikan langsung kepada plant berdasarkan nilai masukan yang telah ditentukan sebelumnya tanpa memperhatikan kondisi aktual keluaran. Akibatnya, sistem kendali terbuka tidak mampu melakukan koreksi apabila terjadi gangguan atau perubahan beban, sehingga tingkat akurasi dan kestabilannya relatif rendah. Meskipun demikian, kendali terbuka memiliki struktur yang sederhana dan mudah diimplementasikan, sehingga masih banyak digunakan pada aplikasi yang tidak memerlukan ketelitian tinggi.

Kendali tertutup menggunakan umpan balik dari keluaran sistem sebagai dasar pengendalian. Pada sistem kendali tertutup, keluaran diukur oleh sensor dan dibandingkan dengan nilai setpoint untuk menghasilkan sinyal error. Nilai error ini selanjutnya diproses oleh pengendali untuk menghasilkan aksi koreksi yang bertujuan memperkecil selisih antara

keluaran aktual dan nilai yang diinginkan. Dengan adanya mekanisme umpan balik, sistem kendali tertutup mampu merespons gangguan eksternal, menyesuaikan perubahan kondisi lingkungan, serta menjaga kestabilan dan akurasi sistem secara lebih baik dibandingkan kendali terbuka.

Sistem kendali suhu pada canting elektrik termasuk ke dalam sistem kendali tertutup, karena suhu aktual diukur menggunakan sensor suhu dan dibandingkan dengan suhu referensi yang telah ditentukan. Selisih antara suhu aktual dan setpoint digunakan sebagai masukan bagi pengendali fuzzy untuk menentukan besar sinyal kendali yang diberikan kepada heater dan fan. Dengan penerapan kendali tertutup berbasis logika fuzzy, sistem diharapkan mampu menjaga suhu kerja canting elektrik tetap stabil, mengurangi overshoot, serta meningkatkan keandalan sistem terhadap gangguan pemanas dan pendingin eksternal.

## **2.10 Logika Fuzzy**

### **2.10.1 Pengertian Logika Fuzzy**

Logika fuzzy adalah pendekatan pengambilan keputusan yang dirancang untuk menangani kondisi sistem yang tidak pasti dan bersifat samar. Metode ini memungkinkan suatu variabel memiliki lebih dari satu tingkat keanggotaan dalam suatu himpunan, dengan nilai yang dinyatakan dalam rentang 0 hingga 1. Konsep dasar logika fuzzy pertama kali diperkenalkan oleh [2], yang menyatakan bahwa suatu elemen dapat memiliki derajat keanggotaan lebih dari satu dalam suatu himpunan, dengan nilai antara 0 hingga 1.

Salah satu keunggulan logika fuzzy adalah kemampuannya dalam mengendalikan sistem tanpa memerlukan pemodelan matematis yang kompleks. Pendekatan ini memanfaatkan aturan berbasis bahasa manusia sehingga lebih fleksibel dalam menghadapi sistem nonlinier, sehingga sangat sesuai untuk aplikasi kendali berbasis pengalaman dan pengetahuan manusia. Oleh karena itu, logika fuzzy banyak diterapkan pada sistem kendali suhu, kecepatan motor, dan sistem termal lainnya [3].

### **2.10.2 Struktur Sistem Logika Fuzzy**

Sistem kontrol berbasis fuzzy umumnya terdiri dari tiga komponen utama :

#### **A. Fuzzification**

Fuzzifikasi merupakan proses pemetaan nilai input tegas (crisp), seperti suhu aktual, menjadi variabel linguistik berdasarkan fungsi keanggotaan yang telah ditentukan. Melalui proses ini, nilai input dapat

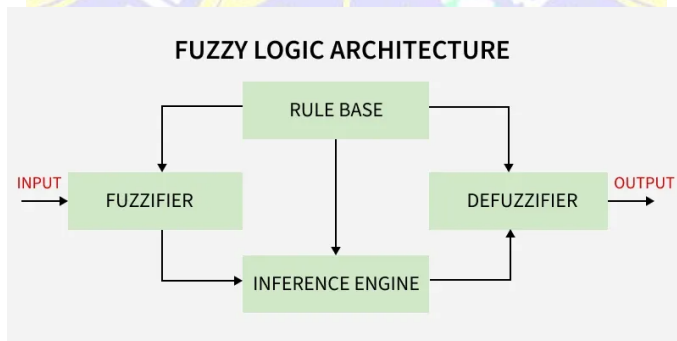
memiliki lebih dari satu derajat keanggotaan pada himpunan fuzzy yang berbeda, sehingga mencerminkan kondisi sistem secara lebih realistis.

### B. Inference Engine (Mesin Inferensi)

Mesin inferensi berfungsi sebagai inti pengambilan keputusan dalam sistem fuzzy. Proses ini dilakukan berdasarkan aturan logika fuzzy berbentuk **IF-THEN** yang dirancang untuk merepresentasikan pengetahuan atau pengalaman operator. Aturan-aturan tersebut menghubungkan kondisi input dengan aksi kendali yang dihasilkan, sehingga sistem dapat merespons perubahan kondisi secara adaptif. Bagian ini melakukan proses pengambilan keputusan berdasarkan aturan fuzzy (*if-then rules*).

### C. Defuzzification

Defuzzifikasi merupakan proses konversi keluaran fuzzy menjadi nilai tegas (crisp value) yang dapat digunakan secara langsung oleh aktuator. Metode paling banyak digunakan adalah **Centroid of Area (COA)** [28]. Proses ini diperlukan agar hasil pengambilan keputusan fuzzy dapat diterapkan dalam sistem kendali nyata, seperti pengaturan daya pemanas atau kecepatan kipas.



**Gambar 2. 7** Fuzzy logic Architecture

(sumber : <https://www.geeksforgeeks.org/artificial-intelligence/fuzzy-logic-introduction/>)

### 2.10.3 Implementasi Fuzzy Logic pada Sistem Kendali Suhu

Sistem kendali suhu, logika fuzzy umumnya menggunakan variabel masukan berupa suhu aktual, error suhu (selisih antara setpoint dan suhu aktual), serta perubahan error (delta error). Variabel-variabel tersebut digunakan untuk menggambarkan kondisi sistem secara menyeluruh, baik dari sisi nilai maupun kecenderungan perubahan suhu [11].

Keluaran dari sistem fuzzy berupa sinyal kendali yang digunakan untuk mengatur daya elemen pemanas dan, apabila diperlukan, kecepatan kipas pendingin. Dengan pendekatan ini, sistem mampu menaikkan atau menurunkan suhu secara bertahap sesuai kondisi, sehingga kestabilan suhu dapat dipertahankan.

## 2.11 Konsep Dasar Metode Fuzzy Sugeno

Metode fuzzy Sugeno merupakan salah satu metode inferensi fuzzy yang dikembangkan oleh Takagi dan Sugeno untuk memodelkan sistem nonlinier dan sistem kendali. Metode ini dirancang untuk menghasilkan keluaran berupa nilai tegas (crisp) yang diperoleh dari kombinasi aturan fuzzy dan fungsi matematis sederhana.

Metode Sugeno berbeda dari metode Mamdani karena pada bagian konsekuen aturan tidak menggunakan himpunan fuzzy, melainkan berupa konstanta atau fungsi linier dari variabel input. Hal ini menyebabkan metode Sugeno memiliki struktur perhitungan yang lebih sederhana dan lebih efisien secara komputasi. Dalam sistem kendali suhu, karakteristik sistem umumnya bersifat nonlinier dan dipengaruhi oleh banyak faktor seperti perubahan beban termal dan gangguan lingkungan. Oleh karena itu, metode fuzzy Sugeno sangat sesuai digunakan karena mampu memetakan kondisi sistem berdasarkan aturan linguistik tanpa memerlukan model matematis yang kompleks [3].

### 2.11.1 Pengertian Fuzzy Sugeno Orde Nol

Fuzzy Sugeno orde nol merupakan bentuk metode Sugeno di mana keluaran setiap aturan berupa **konstanta**. Metode ini tidak melibatkan fungsi linier pada bagian konsekuen, sehingga perhitungannya menjadi lebih sederhana fuzzy Sugeno orde nol sangat cocok diterapkan pada sistem kendali suhu karena menghasilkan sinyal kendali yang stabil dan mudah diimplementasikan pada sistem tertanam (embedded system). Selain itu, metode ini memiliki waktu komputasi yang cepat, sehingga mampu bekerja secara real-time. Dalam sistem kendali suhu canting elektrik, penggunaan fuzzy Sugeno orde nol memungkinkan pengaturan daya pemanas dilakukan secara bertahap dan halus, sehingga mengurangi risiko lonjakan suhu yang berlebihan [4].

### 2.11.2 Perbedaan Logika Fuzzy Mamdani dan Sugeno

Perbedaan utama antara metode Mamdani dan Sugeno terletak pada karakteristik keluaran yang dihasilkan. Metode Mamdani menghasilkan keluaran berupa himpunan fuzzy yang memerlukan proses defuzzifikasi,

sedangkan metode Sugeno langsung menghasilkan nilai numerik sehingga lebih efisien untuk sistem real-time.

**Tabel 2. 2** Perbedaan Logika Fuzzy Mamdani dan Sugeno

| Aspek Perbandingan          | Fuzzy Mamdani  | Fuzzy Sugeno                    |
|-----------------------------|----------------|---------------------------------|
| Bentuk output               | Himpunan fuzzy | Konstanta atau fungsi linier    |
| Defuzzifikasi               | Diperlukan     | Tidak terpisah (langsung crisp) |
| Kompleksitas komputasi      | Lebih tinggi   | Lebih rendah                    |
| Implementasi mikrokontroler | Kurang efisien | Lebih efisien                   |
| Stabilitas output           | Relatif lambat | Lebih stabil                    |

Pada tabel 2.2 dijelaskan oleh [4] bahwa metode Mamdani lebih intuitif dan mudah dipahami secara linguistik, sedangkan metode Sugeno lebih unggul dalam implementasi sistem kendali real-time.

### 2.11.3 Alasan Pemilihan Metode Sugeno

Metode fuzzy Sugeno dipilih dalam penelitian ini karena memiliki struktur keluaran yang sederhana dan efisien secara komputasi. Metode ini sangat cocok diterapkan pada sistem kendali suhu berbasis mikrokontroler yang memiliki keterbatasan sumber daya. Selain itu, metode Sugeno menghasilkan sinyal kendali yang lebih halus dan stabil, sehingga mampu meminimalkan overshoot dan fluktuasi suhu pada sistem pemanas. Hal ini menjadikan metode Sugeno lebih sesuai untuk menjaga kestabilan suhu malam pada canting elektrik. [5]. Metode Fuzzy Sugeno

### 2.11.4 Struktur Aturan IF–THEN pada Metode Sugeno

Struktur aturan fuzzy pada metode Sugeno berbentuk pernyataan **IF–THEN** yang menghubungkan kondisi input dengan keluaran sistem. Secara umum, bentuk aturan fuzzy Sugeno dapat dinyatakan sebagai berikut: **IF** (Error adalah A) **AND** (Perubahan Error adalah B) **THEN** Output = k

di mana A dan B merupakan himpunan fuzzy dari variabel input, sedangkan k adalah nilai konstanta keluaran.

Derajat kebenaran dari setiap aturan ditentukan berdasarkan hasil fuzzyfikasi variabel input. Nilai ini kemudian digunakan sebagai bobot dalam perhitungan keluaran sistem. Struktur aturan IF–THEN ini memungkinkan sistem fuzzy merepresentasikan pengetahuan pakar dalam bentuk aturan sederhana dan mudah dimodifikasi. Pada penelitian ini, aturan fuzzy dirancang berdasarkan hubungan antara error suhu dan perubahan error terhadap kebutuhan daya pemanas, sehingga sistem dapat merespons perubahan suhu secara adaptif [5].

### 2.11.5 Fungsi Keanggotaan Segitiga

Fungsi keanggotaan segitiga merupakan salah satu fungsi keanggotaan yang paling umum digunakan dalam sistem fuzzy karena bentuknya sederhana dan mudah dipahami. Fungsi ini ditentukan oleh tiga parameter, yaitu a, b, dan c.

Rumus fungsi keanggotaan segitiga dinyatakan sebagai berikut:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \text{ atau } x \geq c \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x < c \end{cases} \dots\dots\dots (2.1)$$

Fungsi keanggotaan segitiga sangat sesuai digunakan pada sistem kendali suhu karena mampu merepresentasikan perubahan kondisi suhu secara linier dan gradual [3].

### 2.12 Standar & Regulasi sistem

Standar dan regulasi digunakan sebagai acuan untuk memastikan bahwa sistem kendali suhu canting elektrik yang dirancang memenuhi aspek keselamatan, keandalan, dan kinerja teknis. Penerapan standar ini juga memperkuat dasar akademik penelitian serta memastikan sistem dapat dioperasikan secara aman.

**Tabel 2. 3** Standar & Regulasi sistem

| No | Standar /<br>Regulasi | Ruang Lingkup | Kaitan dengan<br>Penelitian |
|----|-----------------------|---------------|-----------------------------|
|----|-----------------------|---------------|-----------------------------|

|   |                       |                                       |                                               |
|---|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 1 | IEC 60335-1 [29]      | Keselamatan peralatan listrik         | Menjamin keamanan penggunaan canting elektrik |
| 2 | IEC 60519 [30]        | Keselamatan peralatan pemanas listrik | Acuan penggunaan elemen pemanas               |
| 3 | IEC 60584-1 [31]      | Standar thermocouple                  | Menjamin akurasi sensor suhu                  |
| 4 | IEEE 1012 [32]        | Verifikasi dan validasi sistem        | Acuan pengujian sistem kendali                |
| 5 | ISO/IEC TR 24028 [33] | Sistem AI berbasis aturan             | Fuzzy logic sebagai sistem cerdas             |

Pada tabel 2.3 dijelaskan bahwa standar dan regulasi yang digunakan dalam penelitian ini berfungsi sebagai acuan dalam perancangan dan pengujian sistem kendali suhu canting elektrik. Standar IEC 60335-1 dan IEC 60519 digunakan untuk menjamin aspek keselamatan peralatan listrik dan sistem pemanas, sedangkan standar IEC 60584-1 digunakan sebagai acuan pemilihan dan validasi sensor suhu. Selain itu, standar IEEE 1012 digunakan sebagai pedoman dalam proses verifikasi dan validasi sistem kendali, sementara ISO/IEC TR 24028 digunakan sebagai referensi konseptual dalam penerapan logika fuzzy sebagai sistem kendali berbasis aturan. Dengan mengacu pada standar tersebut, sistem yang dirancang diharapkan memiliki tingkat keselamatan, keandalan, dan kinerja yang sesuai dengan kaidah teknis yang berlaku.

### 2.13 Penjelasan Parameter Penilaian Metode (Baik/Buruk)

Parameter yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada teori respon sistem kendali klasik dan teori logika fuzzy. Parameter respon sistem kendali klasik seperti overshoot, error suhu, waktu menuju set point, kestabilan steady-state, dan respon terhadap gangguan merupakan indikator umum yang digunakan untuk mengevaluasi performa sistem kendali suhu.

Parameter-parameter tersebut menggambarkan karakteristik dinamis sistem, tingkat akurasi pengendalian, serta kemampuan sistem dalam mempertahankan kondisi kerja yang stabil. Sementara itu, untuk metode berbasis fuzzy logic, aspek adaptivitas pengendali juga menjadi pertimbangan penting, mengingat fuzzy control dirancang untuk menangani ketidakpastian dan variasi kondisi sistem.

**Tabel 2. 4** Parameter Penilaian Metode ( baik / buruk )

| <b>Parameter Penilaian</b>            | <b>Indikator Penilaian</b>                                     | <b>Kriteria Baik</b>                                   | <b>Kriteria Buruk</b>                             | <b>Sumber Referensi</b>              |
|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Overshoot (%)</b>                  | Persentase kenaikan suhu maksimum di atas set point            | Overshoot kecil ( $\leq 5\%$ )                         | Overshoot besar ( $> 10\%$ )                      | Ogata (2010) [34]                    |
| <b>Error Maksimum (°C)</b>            | Selisih maksimum suhu aktual terhadap set point                | Error kecil ( $\leq \pm 1-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) | Error besar ( $> \pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) | Dorf & Bishop (2017) [35]            |
| <b>Waktu Menuju Set Point (detik)</b> | Waktu yang dibutuhkan sistem mencapai set point pertama kali   | Waktu singkat                                          | Waktu lama                                        | Ogata (2010) [34]                    |
| <b>Kestabilan Steady-State</b>        | Fluktuasi suhu setelah mencapai set point                      | Fluktuasi kecil dan stabil                             | Fluktuasi besar dan berosilasi                    | Åström & Hägglund (2006) [36]        |
| <b>Respon terhadap Gangguan</b>       | Kemampuan sistem kembali ke set point setelah gangguan         | Cepat pulih, error kecil                               | Lambat pulih, error besar                         | Åström & Hägglund (2006) [36]        |
| <b>Adaptivitas Pengendali</b>         | Kemampuan menyesuaikan aksi kendali terhadap perubahan kondisi | Adaptif dan fleksibel                                  | Kaku dan tidak responsif                          | Zadeh (1965); Ross (2010) [28], [37] |

Berdasarkan Tabel 2.4 dapat disimpulkan bahwa metode pengendalian suhu yang baik ditandai oleh nilai overshoot yang rendah, error suhu kecil, waktu menuju set point yang singkat, serta kestabilan suhu yang baik pada kondisi steady-state. Selain itu, kemampuan sistem untuk meredam gangguan dan kembali ke set point dalam waktu relatif cepat juga menjadi indikator penting dalam menentukan kualitas suatu metode pengendalian.

Metode pengendalian yang memiliki overshoot besar dan error tinggi menunjukkan bahwa sistem kurang mampu membatasi lonjakan suhu dan mempertahankan akurasi pengendalian. Kondisi ini berpotensi menurunkan kualitas proses pemanasan dan meningkatkan risiko ketidakstabilan suhu. Sebaliknya, metode dengan fluktuasi kecil di sekitar set point dan respon gangguan yang cepat mencerminkan sistem kendali yang lebih adaptif dan andal.

Dengan menggunakan parameter-parameter penilaian tersebut, perbandingan antar metode pengendalian suhu dapat dilakukan secara konsisten dan ilmiah. Parameter ini selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam subbab perbandingan hasil pengujian untuk menentukan metode pengendalian yang paling efektif dalam menjaga kestabilan suhu canting elektrik.

## 2.14 Perhitungan Sistem Kendali Suhu

Sistem kendali suhu merupakan sistem kendali tertutup yang bertujuan untuk menjaga suhu aktual agar sesuai dengan nilai suhu referensi (setpoint). Pada sistem kendali tertutup, keluaran sistem berupa suhu aktual diukur menggunakan sensor, kemudian dibandingkan dengan nilai setpoint untuk menghasilkan nilai galat (error). Nilai error ini selanjutnya digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan oleh pengendali untuk mengatur besar sinyal kendali yang diberikan kepada aktuator, dalam hal ini heater dan fan.

### 2.14.1 Perhitungan Error

Error merupakan selisih antara suhu referensi (setpoint) dan suhu aktual yang terukur oleh sensor. Nilai error digunakan untuk mengetahui seberapa besar penyimpangan suhu sistem terhadap kondisi yang diinginkan. Secara matematis, nilai error dirumuskan sebagai berikut:

$$e(t) = T_{set} - T_{aktual} \dots \dots \dots (2.2)$$

dengan keterangan:

$e(t)$ : nilai Error ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{set}$ : suhu referensi atau setpoint ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{aktual}$ : suhu aktual hasil pengukuran sensor ( $^{\circ}\text{C}$ )

Nilai error bernilai positif apabila suhu aktual lebih rendah dari setpoint, sehingga sistem memerlukan peningkatan daya pemanasan. Sebaliknya, nilai error bernilai negatif apabila suhu aktual lebih tinggi dari setpoint, sehingga diperlukan aksi pendinginan untuk menurunkan suhu.

#### 2.14.2 Perhitungan Perubahan Delta Error

Selain nilai error, sistem kendali juga memperhitungkan perubahan error terhadap waktu yang dikenal sebagai delta error. Delta error digunakan untuk mengetahui kecenderungan perubahan suhu, apakah suhu sedang naik atau turun. Delta error dirumuskan sebagai berikut:

$$\Delta e(t) = e(t) - e(t - 1) \dots\dots\dots(2.3)$$

dengan keterangan:

$\Delta e(t)$ : perubahan Error

$e(t)$ : Error pada waktu saat ini

$e(t - 1)$ : Error pada waktu sebelumnya

Nilai delta error yang besar menunjukkan perubahan suhu yang cepat, sedangkan nilai delta error yang kecil menunjukkan perubahan suhu yang lambat atau mendekati kondisi stabil.

#### 2.14.3 Hubungan Error terhadap Aksi Kendali

Nilai error dan delta error digunakan sebagai masukan sistem kendali untuk menentukan besar sinyal kendali yang diberikan kepada aktuator. Pada sistem kendali suhu, aksi kendali dibagi menjadi dua bagian, yaitu pengendalian pemanas (heater) dan pengendalian pendingin (fan). Apabila nilai error bernilai positif dan besar, maka sistem meningkatkan keluaran heater untuk mempercepat kenaikan suhu. Sebaliknya, apabila nilai error bernilai negatif dan besar, maka sistem mengaktifkan fan untuk menurunkan suhu. Hubungan ini memungkinkan sistem menjaga suhu tetap berada di sekitar setpoint secara stabil.

#### 2.14.4 Perhitungan Keluaran Sistem Kendali Fuzzy Sugeno

Pada metode Fuzzy Sugeno orde nol, keluaran setiap aturan berupa nilai konstanta (crisp). Proses defuzzifikasi dilakukan menggunakan metode

rata-rata berbobot (weighted average) untuk memperoleh nilai keluaran akhir sistem. Secara matematis, keluaran sistem dirumuskan sebagai berikut:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \dots\dots\dots (2.4)$$

dengan keterangan:

$Z$ : nilai keluaran akhir sistem

$w_i$ : derajat aktivasi aturan ke- $i$

$z_i$ : nilai konstanta keluaran aturan ke- $i$

$n$ : jumlah aturan fuzzy yang aktif

Nilai keluaran ini selanjutnya digunakan sebagai sinyal kendali untuk mengatur besarnya PWM pada heater dan fan.

#### 2.14.5 Pembatasan Nilai Keluaran (Clamping)

Agar nilai keluaran sistem kendali tetap berada dalam batas aman dan sesuai dengan kemampuan aktuator, dilakukan pembatasan nilai keluaran atau clamping. Pembatasan ini bertujuan untuk mencegah pemberian sinyal kendali yang berlebihan (overdrive) pada heater maupun fan. Secara umum, pembatasan keluaran dirumuskan sebagai berikut:

$$Z_{akhir} = \begin{cases} Z_{min}, & Z < Z_{min} \\ Z, & Z_{min} \leq Z \leq Z_{max} \\ Z_{max}, & Z > Z_{max} \end{cases} \dots\dots\dots (2.5)$$

dengan keterangan:

$Z_{akhir}$ : nilai keluaran akhir sistem kendali setelah dilakukan pembatasan (clamping)

$Z$ : nilai keluaran sistem hasil proses defuzzifikasi Fuzzy Sugeno

$Z_{min}$ : batas minimum nilai keluaran yang diizinkan oleh sistem

$Z_{max}$ : batas maksimum nilai keluaran yang diizinkan oleh sistem

Pembatasan nilai keluaran dilakukan untuk memastikan sinyal kendali yang diberikan kepada aktuator berada dalam rentang kerja yang aman dan sesuai dengan kemampuan perangkat keras. Pada sistem kendali suhu, pembatasan ini berfungsi untuk mencegah terjadinya pemberian daya berlebih pada heater maupun kecepatan fan yang melebihi batas spesifikasi, sehingga meningkatkan keamanan, keandalan, dan umur pakai sistem.