BAB II
DASAR TEORI

2. 1 Tinjauan Pustaka

Penelitian ini mengacu pada penelitian terdahulu tentang pengaruh suhu terhadap mutu cabai kering, pengendalian suhu alat pengering, dan penerapan logika fuzzy. Referensi tersebut menjadi pertimbangan dalam merancang sistem kontrol suhu pada alat pengering cabai. Ringkasan penelitian terdahulu beserta keterbatasannya disajikan pada Tabel 2.1

Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Terdahulu

No	Judul Penelitian	Keterangan	Perbaikan
1.	Investigation of Optimal Drying Conditions of Red Chili Peppers in a Hot Air Cabinet Dryer (Getahun & Ebissa, 2024)	Menguji suhu 40, 50, dan 60°C serta kelembapan relatif 25, 35, dan 45%. Kondisi terbaik diperoleh pada suhu 50°C dan kelembapan relatif 35% [4].	Suhu ditetapkan untuk setiap perlakuan. Pembahasan berfokus pada kondisi pengeringan dan mutu cabai.
2.	Pengaruh Temperatur Pengeringan pada Alat Pengering Sistem Rotary terhadap Kualitas Cabai Merah (Pratama dkk., 2021)	Menguji suhu pengeringan 60, 70, dan 80°C. Pada suhu 70°C diperoleh kadar air 11,22% dengan warna merah cerah, sedangkan pada 80°C warna cabai menjadi kecoklatan [17].	Suhu diatur secara manual melalui pembakaran LPG, sehingga belum menggunakan kendali otomatis dengan umpan balik sensor.
3.	Rancang Bangun Alat Pengering Cabai Sistem Tubular Heater dengan Memanfaatkan Energi Surya (Irfansah dkk., 2021)	Merancang alat pengering cabai dengan tubular heater dan pemanfaatan energi surya. Suhu ruang pengering diatur menggunakan thermostat [9].	Pengaturan pemanas masih menggunakan ON/OFF, sehingga suhu naik turun di sekitar nilai acuan.
No	**Judul Penelitian**	**Keterangan**	**Perbaikan**

4.	Implementasi Algoritma PID untuk Pengontrolan Suhu pada Mesin Pengering Cabai (Toar dkk., 2025)	Menggunakan PID pada mesin pengering cabai dan memperoleh suhu yang mendekati setpoint. Parameter kendali ditentukan melalui tuning dan penyesuaian pada setpoint pengujian [10].	Parameter PID memerlukan penyetelan sesuai kondisi pengujian untuk memperoleh respons suhu yang diinginkan.
5.	Analisa Perbandingan Pengaturan Suhu Berbasis Logika Fuzzy Interferensi Sugeno dan Mamdani pada Alat Pengering Biji Kopi (Nafisah dkk., 2023)	Membandingkan Sugeno dan Mamdani dengan masukan error dan delta error. Mamdani menghasilkan error maksimal lebih kecil pada konfigurasi yang diuji [15].	Pengujian dilakukan pada biji kopi. Penerapan pada alat pengering cabai memerlukan penyesuaian rancangan dan pengujian.

Berdasarkan Tabel 2.1, penelitian terdahulu memberikan acuan mengenai pemilihan suhu dan metode pengendalian pada alat pengering. Getahun dan Ebissa memperoleh kondisi pengeringan terbaik pada suhu 50°C dengan kelembapan relatif 35%, serta menemukan penurunan nilai warna cabai seiring kenaikan suhu [4]. Pratama dkk. mendapatkan kadar air 11,22% dengan warna cabai merah cerah pada suhu 70°C, sedangkan pada suhu 80°C warna cabai berubah menjadi kecoklatan [17]. Kedua penelitian tersebut menunjukkan bahwa suhu pengeringan perlu diperhatikan karena memengaruhi mutu cabai yang dihasilkan.

Pada pengendalian suhu, Irfansah dkk. menggunakan termostat untuk mengatur pemanas jenis *tubular heater*. Sistem kendali ON/OFF tersebut menyebabkan suhu ruang pengering naik turun di sekitar nilai acuan [9]. Toar dkk. menerapkan metode *Proportional Integral Derivative* (PID) dan memperoleh suhu yang mendekati *setpoint*. Parameter Kp, Ki, dan Kd ditentukan melalui proses tuning dan disesuaikan pada setiap *setpoint* pengujian untuk memperoleh respons yang diinginkan [10].

Penerapan logika fuzzy dibahas dalam penelitian Nafisah dkk. yang membandingkan metode Sugeno dan Mamdani pada alat pengering biji kopi. Kedua metode menggunakan masukan berupa error dan delta error. Pada konfigurasi yang

diuji, Mamdani menghasilkan error maksimal lebih kecil daripada Sugeno [15]. Hasil ini menjadi pertimbangan bahwa kinerja Sugeno pada alat yang dirancang tetap perlu dinilai melalui pengujian.

Pada lima penelitian yang dibandingkan, pengendalian suhu pengering cabai yang dibahas meliputi pengaturan manual, termostat, dan PID, sedangkan perbandingan metode fuzzy dilakukan pada pengering biji kopi. Hasil pengujian pada biji kopi belum dapat langsung menggambarkan kinerja pengendali pada alat pengering cabai dengan rancangan yang berbeda. Oleh karena itu, celah penelitian yang dikaji adalah penerapan dan pengujian fuzzy Sugeno sebagai pengendali suhu pada alat pengering cabai.

Untuk menjawab celah tersebut, penelitian ini merancang sistem kontrol suhu menggunakan fuzzy Sugeno orde nol berbasis ESP32. Pengendali mengolah *error* dan delta *error* melalui 15 aturan untuk mengatur pemanasan *heater* halogen melalui modul AC *light dimmer*. Sistem dilengkapi mode manual dengan *setpoint* yang ditentukan pengguna dan mode otomatis dengan setpoint berdasarkan klasifikasi massa awal cabai. Kontribusi penelitian ini terletak pada penerapan pengendali tersebut dalam rancangan alat pengering cabai serta evaluasi respons suhunya berdasarkan *rise time, settling time, overshoot*, dan *error steady state*.

2. 2 Tanaman Cabai

Cabai (*Capsicum* sp.) berasal dari benua Amerika, meliputi Meksiko, Amerika Tengah, dan wilayah Andes di Amerika Selatan. Tanaman ini kemudian dibawa ke Indonesia oleh bangsa Portugis. Cabai memiliki beragam jenis dan varietas dengan ukuran serta tingkat kepedasan yang berbeda. Cabai rawit berukuran kecil dan memiliki tingkat kepedasan tinggi, sedangkan cabai keriting berukuran lebih besar dengan rasa yang pedas. Sementara itu, cabai merah besar memiliki tingkat kepedasan yang lebih rendah [10]. Bentuk fisik tanaman cabai yang banyak dibudidayakan di Indonesia ditunjukkan pada Gambar 2.1.

Gambar 2. 1 Tanaman Cabai [1]

Cabai termasuk komoditas hortikultura yang mengandung beragam zat gizi, seperti protein, lemak, karbohidrat, vitamin, dan mineral. Kandungan airnya tergolong tinggi, yaitu sekitar 70 hingga 91% berbasis basah, bergantung pada jenis cabai [4], [17]. Tingginya kandungan air membuat cabai mudah rusak sehingga masa simpannya relatif singkat. Oleh karena itu, diperlukan penanganan pascapanen untuk mengurangi kadar air cabai, salah satunya melalui proses pengeringan.

2. 3 Cabai Kering

Cabai kering dihasilkan dengan mengurangi kadar air cabai segar hingga mencapai tingkat yang aman untuk disimpan. Pengurangan kadar air ini membantu menghambat pertumbuhan mikroorganisme dan memperlambat reaksi biokimia penyebab kerusakan, sehingga cabai dapat disimpan lebih lama. Persyaratan mutu cabai kering, termasuk batas kadar air maksimal, diatur dalam SNI 3389:2023 yang ditetapkan oleh Badan Standardisasi Nasional [18]. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kadar air yang aman untuk penyimpanan cabai kering berkisar antara 11 hingga 13 persen [4]. Sementara itu, cabai dengan kadar air sekitar 11 persen memiliki mutu yang baik, ditandai dengan tekstur kering dan warna merah cerah [17]. Bentuk cabai setelah melalui proses pengeringan ditunjukkan pada Gambar 2.2.

Gambar 2. 2 Cabai Kering [17]

Mutu cabai kering tidak hanya ditentukan oleh kadar air, tetapi juga dipengaruhi oleh suhu selama pengeringan. Suhu yang lebih tinggi mempercepat pengurangan kadar air, namun dapat menyebabkan degradasi pigmen yang mengubah warna cabai. Pada pengeringan dengan suhu 70°C, cabai masih berwarna merah cerah, sedangkan pada suhu 80°C warnanya berubah menjadi kecoklatan [17]. Perbedaan warna cabai yang dikeringkan pada suhu 60°C, 70°C, dan 80°C dapat dilihat pada Gambar 2.3. Suhu pengeringan juga berkaitan dengan kandungan *capsaicin*, yaitu senyawa yang menentukan tingkat kepedasan cabai. Kandungan senyawa ini menurun seiring meningkatnya suhu pengeringan, sehingga tingkat kepedasan produk akhir ikut berkurang [19]. Dengan demikian, pemilihan suhu perlu mempertimbangkan waktu yang dibutuhkan untuk mengeringkan cabai sekaligus mutu yang ingin dipertahankan.

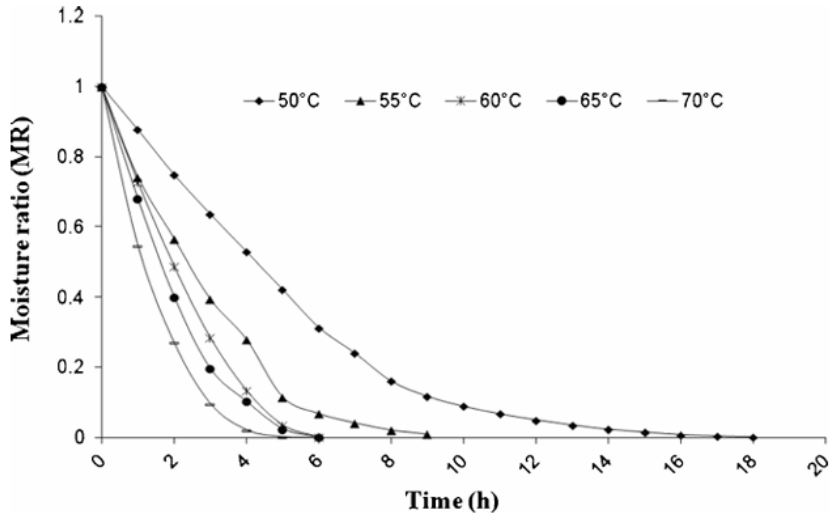
Gambar 2. 3 Perbandingan Warna Cabai Hasil Pengeringan pada Suhu 60°C, 70°C, dan 80°C [17]

Cabai kering dapat dimanfaatkan dalam bentuk utuh maupun diolah menjadi cabai bubuk, serpihan cabai, dan *chili oil*. Berbagai bentuk olahan tersebut memberikan nilai tambah karena lebih praktis untuk disimpan dan didistribusikan.

Selain itu, produk olahan cabai kering dapat digunakan sebagai bahan baku dalam industri pangan [2].

2. 4 Pengeringan

Pengeringan merupakan proses pengurangan kadar air bahan melalui penguapan dengan memanfaatkan energi panas. Proses ini membantu menghambat pertumbuhan mikroorganisme dan memperlambat reaksi biokimia penyebab kerusakan, sehingga bahan dapat disimpan lebih lama [4]. Pada cabai, pengeringan diperlukan karena kandungan airnya yang tinggi membuat bahan mudah rusak setelah panen. Perubahan kadar air cabai selama pengeringan pada beberapa suhu dapat dilihat melalui kurva *moisture ratio* pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Kurva Penurunan Moisture Ratio Cabai pada Berbagai Suhu Pengeringan Mode Udara Panas [19]

Berdasarkan Gambar 2.4, *moisture ratio* cabai menurun selama pengeringan, dengan penurunan yang lebih cepat pada suhu tinggi dan semakin lambat menjelang akhir proses. Secara umum, pengeringan memiliki periode laju konstan dan laju menurun. Namun, pada pengeringan cabai yang diteliti, proses berlangsung dalam periode laju menurun sejak awal [19]. Hal ini berkaitan dengan dinding buah atau *pericarp* yang menghambat perpindahan panas dan massa, sehingga air di bagian dalam cabai membutuhkan waktu lebih lama untuk dikeluarkan.

Pengeringan melibatkan perpindahan panas dan massa secara bersamaan. Panas digunakan untuk menguapkan air dalam bahan, lalu uap air dibawa keluar

oleh aliran udara. Lajunya dipengaruhi oleh suhu, kelembapan relatif, kecepatan udara, serta ukuran dan ketebalan bahan [4]. Kenaikan suhu udara pengering dapat menurunkan kelembapan relatif dan memperbesar perbedaan tekanan uap antara bahan dengan udara, sehingga penguapan berlangsung lebih cepat [17].

Selain membantu memperpanjang masa simpan, pengeringan mengurangi bobot dan volume bahan. Produk menjadi lebih mudah ditangani, sementara kebutuhan biaya pengemasan, transportasi, dan penyimpanannya dapat ditekan [4].

2. 5 Suhu

Suhu merupakan besaran fisika yang menunjukkan tingkat panas atau dinginnya suatu benda. Pada tingkat mikroskopis, suhu berkaitan dengan energi kinetik rata-rata partikel penyusun benda tersebut. Dalam Sistem Internasional, suhu termasuk besaran pokok dengan satuan kelvin (K), sedangkan satuan derajat Celsius (°C) lebih umum digunakan dalam kehidupan sehari-hari [20]. Ketika dua benda dengan suhu berbeda saling berinteraksi secara termal, energi berpindah dari benda bersuhu lebih tinggi ke benda bersuhu lebih rendah hingga tercapai kesetimbangan termal.

Pengukuran suhu memanfaatkan perubahan sifat fisik bahan akibat perubahan suhu. Prinsip ini digunakan pada berbagai jenis sensor, seperti sensor berbasis pemuaian zat, perubahan resistansi pada RTD dan termistor, serta pembangkitan tegangan termoelektrik [20]. Respons sensor kemudian diubah menjadi sinyal yang dapat dibaca dan diolah oleh sistem. Pemilihan sensor perlu disesuaikan dengan rentang suhu, akurasi, resolusi, dan waktu respons yang dibutuhkan. Akurasi menunjukkan seberapa dekat hasil pengukuran dengan nilai acuan, sedangkan resolusi menunjukkan perubahan terkecil yang dapat dibedakan oleh sensor. Kesalahan pembacaan dapat diketahui dengan membandingkan hasil pengukuran sensor terhadap alat ukur acuan pada beberapa titik suhu.

Dalam sistem kendali suhu, hasil pembacaan sensor digunakan sebagai variabel proses (*process variable*) yang dibandingkan dengan suhu acuan atau *setpoint*. Selisih keduanya disebut *error* dan menjadi masukan bagi pengendali untuk menentukan aksi pada pemanas. Karena pengendali bekerja berdasarkan suhu yang terbaca, ketelitian sensor turut menentukan kemampuan sistem dalam

menjaga suhu sesuai *setpoint*. Oleh karena itu, pemilihan sensor dan kalibrasinya perlu diperhatikan sejak tahap perancangan.

2. 6 Kalor

Kalor adalah energi yang berpindah antara dua sistem akibat perbedaan suhu. Perpindahan ini secara alami berlangsung dari benda bersuhu tinggi ke benda bersuhu rendah hingga keduanya mencapai kesetimbangan termal [14]. Kalor dapat berpindah melalui konduksi, konveksi, dan radiasi. Dalam pengeringan, energi tersebut digunakan untuk memanaskan bahan dan menguapkan air yang terkandung di dalamnya.

Kebutuhan kalor untuk menaikkan suhu suatu benda ditentukan oleh massa, kalor jenis bahan, dan perubahan suhu yang diinginkan. Hubungan ketiganya dinyatakan dalam Persamaan 2.1.

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \tag{2.1}$$

dengan:

Q = banyaknya kalor (J)

m = massa benda (kg)

c = kalor jenis benda (J/kg^{o}C)

ΔT = besarnya perubahan suhu (^{o}C)

Berdasarkan Persamaan 2.1, benda dengan massa lebih besar membutuhkan lebih banyak kalor untuk mengalami kenaikan suhu yang sama. Kebutuhan kalor juga meningkat apabila perubahan suhu yang diinginkan semakin besar. Selain itu, setiap bahan memiliki kalor jenis yang berbeda. Pada massa dan kenaikan suhu yang sama, bahan dengan kalor jenis lebih tinggi memerlukan kalor lebih banyak [14].

Kemampuan suatu benda dalam menyerap kalor juga dinyatakan melalui kapasitas kalor, yaitu jumlah kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhu benda sebesar satu derajat. Kapasitas kalor dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.2.

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \tag{2.2}$$

dengan:

C = kapasitas kalor (J/°C)

Q = banyaknya kalor (J)

ΔT = besarnya perubahan suhu (°C)

Pada pengeringan, kalor tidak hanya menaikkan suhu bahan, tetapi juga mengubah air dari fase cair menjadi uap. Energi yang diperlukan dalam perubahan fase ini disebut kalor laten penguapan [22]. Besarnya kalor untuk menguapkan air dinyatakan dalam Persamaan 2.3.

$$Q = m \cdot L \tag{2.3}$$

dengan:

Q = banyaknya kalor (J)

m = massa air yang diuapkan (kg)

L = kalor laten penguapan air (J/kg)

Penguapan air membutuhkan energi yang besar. Oleh sebab itu, kebutuhan energi dalam pengeringan umumnya lebih banyak digunakan untuk menguapkan air daripada sekadar menaikkan suhu bahan. Jumlah air yang harus dikeluarkan menjadi salah satu penentu kebutuhan kalor selama proses berlangsung.

Perpindahan kalor mengikuti prinsip kekekalan energi. Dalam pertukaran kalor tanpa kehilangan panas ke lingkungan, kalor yang dilepaskan benda bersuhu tinggi sama dengan kalor yang diterima benda bersuhu rendah hingga tercapai kesetimbangan suhu. Prinsip ini dikenal sebagai asas Black [22] dan dinyatakan dalam Persamaan 2.4

$$Q_{Masuk} = Q_{Keluar} \tag{2.4}$$

Persamaan 2.4 menunjukkan bahwa jumlah kalor yang diterima sama dengan jumlah kalor yang dilepaskan, dengan asumsi tidak ada kalor yang hilang ke lingkungan. Perpindahan kalor berlangsung dari benda bersuhu tinggi ke benda bersuhu rendah hingga keduanya mencapai suhu yang sama [22].

2. 7 Hukum Termodinamika I

Hukum Termodinamika I menjelaskan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, tetapi dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Prinsip ini dikenal sebagai hukum kekekalan energi. Dalam sistem termodinamika, pertukaran energi antara sistem dan lingkungan dapat berlangsung melalui kalor maupun kerja [15].

Kalor yang diterima sistem dapat digunakan untuk menambah energi dalam dan melakukan kerja terhadap lingkungan. Hubungan antara ketiga besaran tersebut dinyatakan pada Persamaan 2.5.

$$Q = \Delta U + W \tag{2.5}$$

dengan:

Q = kalor yang diberikan kepada sistem (Joule)

ΔU = perubahan energi dalam sistem (Joule)

W = usaha yang dilakukan sistem terhadap lingkungan (Joule)

Persamaan 2.5 menunjukkan bahwa kalor yang masuk terbagi menjadi perubahan energi dalam dan kerja yang dilakukan sistem. Besarnya perubahan energi dalam ditentukan oleh keadaan awal dan akhir sistem, sehingga tidak bergantung pada lintasan proses yang dilalui [16].

Prinsip kekekalan energi juga digunakan untuk menjelaskan perubahan energi listrik menjadi kalor pada elemen pemanas. Dalam kondisi ideal, ketika seluruh energi listrik yang diberikan digunakan untuk menaikkan suhu bahan, hubungan antara energi pemanas dan kalor yang diserap bahan dinyatakan pada Persamaan 2.6 [23].

$$P \cdot t = m \cdot c \cdot \Delta T \tag{2.6}$$

dengan:

P = daya elemen pemanas (W)

t = lama pemanasan (s)

m = massa benda (kg)

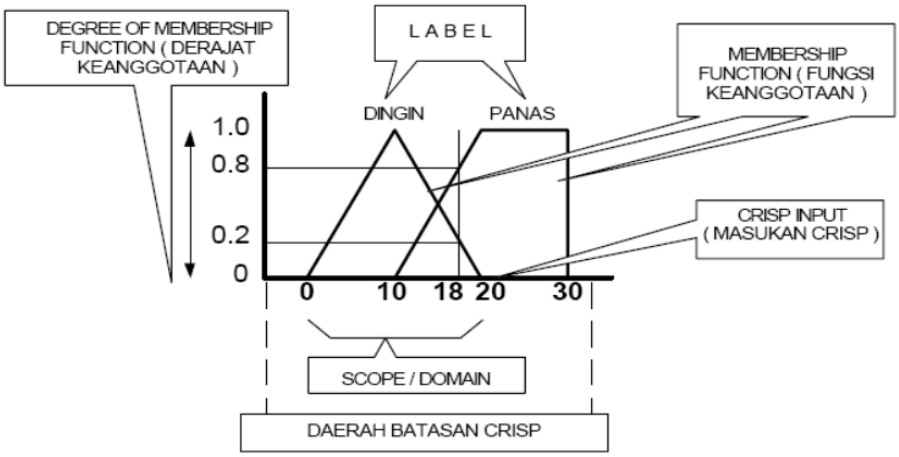
c = kalor jenis benda (J/kg^{o}C)

ΔT = besarnya perubahan suhu (^{o}C)

Berdasarkan Persamaan 2.6, energi yang diberikan pemanas ditentukan oleh daya dan lama pemanasan. Pada massa dan jenis bahan yang sama, semakin besar energi yang diserap, semakin besar pula kenaikan suhunya. Hubungan ini menjadi salah satu dasar untuk memperkirakan kebutuhan daya *heater* dalam perancangan alat pengering.

2. 8 Fuzzy Logic

Logika fuzzy merupakan pengembangan dari logika klasik yang hanya mengenal nilai benar (1) dan salah (0). Pada logika fuzzy, suatu nilai dapat memiliki derajat keanggotaan antara 0 hingga 1, sehingga perubahan kondisi dapat digambarkan secara bertahap [24]. Konsep dasar logika fuzzy ditunjukkan pada Gambar 2.5.



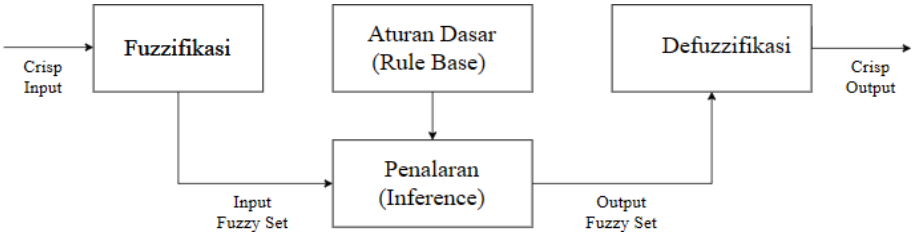
Gambar 2. 5 Konsep Dasar Logika Fuzzy [28]

Berdasarkan Gambar 2.5, nilai masukan tegas (*crisp input*) dipetakan ke dalam himpunan fuzzy melalui fungsi keanggotaan. Pada gambar tersebut, himpunan diberi label “dingin” dan “panas”. Kedua fungsi keanggotaan memiliki daerah yang saling tumpang tindih, sehingga satu nilai masukan dapat menjadi anggota kedua himpunan dengan derajat keanggotaan yang berbeda. Dengan cara ini, perubahan dari kondisi dingin menuju panas tidak dibatasi oleh satu nilai pemisah yang tegas.

Beberapa istilah yang digunakan dalam logika fuzzy meliputi variabel fuzzy, himpunan fuzzy, semesta pembicaraan, dan domain. Variabel fuzzy merupakan besaran yang diolah, sedangkan himpunan fuzzy menggambarkan kelompok kondisi dalam variabel tersebut. Semesta pembicaraan mencakup seluruh rentang nilai suatu variabel, sementara domain menunjukkan rentang nilai pada masing-masing himpunan fuzzy [25]. Pembagian ini membantu sistem mengolah masukan sesuai kondisi yang diwakilinya.

Dalam pengendalian, logika fuzzy dapat diterapkan pada sistem yang sulit dijelaskan melalui model matematis. Metode ini juga memiliki aturan kendali yang

dapat disesuaikan untuk memperbaiki respons sistem [27]. Pengolahan masukannya dilakukan melalui sistem inferensi fuzzy atau *Fuzzy Inference System*, dengan alur seperti pada Gambar 2.6.

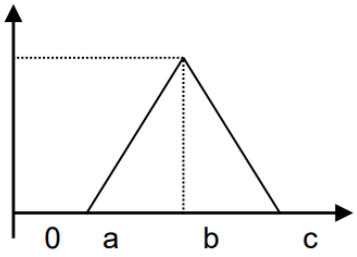


Gambar 2. 6 Diagram Umum Fuzzy Logic [28]

Berdasarkan Gambar 2.6, pengolahan dimulai dari fuzzifikasi, yaitu mengubah masukan tegas menjadi derajat keanggotaan dalam himpunan fuzzy. Hasilnya digunakan pada tahap penalaran (*inference*) untuk mengevaluasi aturan yang tersimpan dalam basis aturan (*rule base*). Selanjutnya, hasil penalaran diolah melalui defuzzifikasi untuk menghasilkan keluaran tegas yang dapat digunakan sebagai sinyal kendali [24], [27]. Dengan demikian, keluaran sistem ditentukan oleh kondisi masukan, fungsi keanggotaan, dan aturan yang digunakan.

2.8.1 Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan tahap pengubahan masukan tegas (*crisp input*) menjadi derajat keanggotaan dalam himpunan fuzzy. Setiap nilai masukan dipetakan melalui fungsi keanggotaan sehingga dapat menjadi anggota satu atau lebih himpunan dengan nilai antara 0 hingga 1 [25]. Bentuk fungsi yang umum digunakan adalah segitiga dan trapesium [26]. Kurva fungsi segitiga beserta perhitungannya ditunjukkan pada Gambar 2.7 dan Persamaan 2.7.



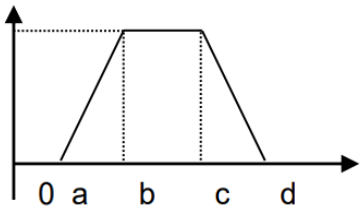
$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b < x \leq c \\ 0 & x \geq c \end{cases} \tag{2.7}$$

Gambar 2. 7 Kurva dan Fungsi Segitiga [28]

Berdasarkan Gambar 2.7, fungsi keanggotaan segitiga memiliki tiga parameter, yaitu a, b, dan c. Derajat keanggotaan naik secara linear dari nol pada

titik a hingga mencapai satu pada titik b, kemudian menurun hingga kembali menjadi nol pada titik c. Parameter a dan c menunjukkan batas himpunan, sedangkan b merupakan titik keanggotaan maksimum. Persamaan 2.7 digunakan untuk menghitung derajat keanggotaan berdasarkan posisi nilai masukan pada kurva.

Selain segitiga, fungsi keanggotaan dapat berbentuk trapesium yang memiliki bagian datar pada derajat keanggotaan maksimum. Fungsi ini menggunakan empat parameter, yaitu a, b, c, dan d [26]. Bentuk kurva dan perhitungannya ditunjukkan pada Gambar 2.8 dan Persamaan 2.8.



$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a < x \leq b \\ 1 & b < x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & c < x \leq d \\ 0 & x \geq d \end{cases} \quad (2.8)$$

Gambar 2. 8 Kurva dan Fungsi Trapesium [28]

Berdasarkan Gambar 2.8, derajat keanggotaan meningkat dari nol pada titik a hingga mencapai satu pada titik b. Nilainya tetap satu sampai titik c, lalu menurun hingga menjadi nol pada titik d. Bagian datar antara b dan c menunjukkan bahwa seluruh nilai pada rentang tersebut memiliki keanggotaan penuh. Melalui Persamaan 2.8, derajat keanggotaan dihitung sesuai posisi masukan pada bagian naik, datar, atau turun, sedangkan nilai di luar batas a hingga d memiliki derajat keanggotaan nol.

2.8.2 Aturan Dasar (*Rule Base*)

Basis aturan merupakan kumpulan pernyataan JIKA–MAKA yang menghubungkan kondisi masukan dengan keluaran sistem. Penyusunannya didasarkan pada pemahaman terhadap karakteristik dan perilaku sistem yang dikendalikan [24]. Bagian JIKA disebut anteseden, yang berisi kondisi masukan, sedangkan bagian MAKA disebut konsekuen, yang menyatakan keluaran untuk kondisi tersebut. Melalui aturan ini, sistem menentukan respons yang sesuai dengan masukan yang diterima.

Jumlah aturan yang dapat dibentuk bergantung pada banyaknya variabel masukan dan himpunan fuzzy pada setiap variabel. Kombinasi antarkondisi

masukan menjadi dasar penyusunan aturan kendali. Jika satu aturan melibatkan lebih dari satu kondisi, hubungan antar kondisi tersebut dinyatakan menggunakan operator logika fuzzy, seperti AND atau OR.

2.8.3 Penalaran (*Inference*)

Penalaran merupakan tahap evaluasi aturan berdasarkan derajat keanggotaan masukan yang diperoleh dari proses fuzzifikasi [25]. Hasil evaluasi ini berupa bobot aktivasi atau α-predikat yang menunjukkan tingkat terpenuhinya kondisi pada setiap aturan. Pada pengendali dengan operator AND–MIN, bobot aktivasi ditentukan dengan mengambil nilai terkecil dari derajat keanggotaan kedua masukan. Perhitungannya dinyatakan pada Persamaan 2.9.

$$\alpha i = min\ (\mu_{Ai}(e_k), \mu_{Bi}(\Delta e_k)) \tag{2.9}$$

dengan:

αi = bobot aktivasi aturan ke-(i).

$\mu_{Ai}(e_k)$ = derajat keanggotaan *error* pada aturan ke-(i).

$\mu_{Bi}(\Delta e_k)$ = derajat keanggotaan delta *error* pada aturan ke-(i).

Berdasarkan Persamaan 2.9, derajat keanggotaan *error* dan delta *error* pada setiap aturan dibandingkan untuk memperoleh nilai minimum sebagai bobot aktivasi. Aturan dengan bobot lebih besar dari nol dinyatakan aktif dan digunakan dalam perhitungan keluaran. Dalam satu proses penalaran, beberapa aturan dapat aktif secara bersamaan karena nilai masukan dapat memiliki keanggotaan pada lebih dari satu himpunan fuzzy.

2.8.4 Defuzzifikasi

Defuzzifikasi merupakan tahap pengolahan hasil penalaran fuzzy menjadi nilai tegas (*crisp output*) yang dapat digunakan sebagai sinyal kendali untuk aktuator [26]. Beberapa metode yang digunakan dalam tahap ini antara lain *center of area*, bisektor, *mean of maximum*, *largest of maximum*, dan *smallest of maximum*. Pemilihan metode tersebut turut memengaruhi respons sistem kendali [26].

Metode defuzzifikasi disesuaikan dengan model inferensi fuzzy yang digunakan. Pada model Mamdani, keluaran umumnya dihitung menggunakan metode *center of area* atau centroid. Sementara itu, model Sugeno menggunakan rata-rata berbobot (*weighted average*) untuk memperoleh nilai keluaran tegas.

2. 9 Fuzzy Logic Sugeno

Sugeno merupakan model inferensi fuzzy dengan keluaran aturan berupa konstanta atau persamaan linear, sedangkan keluaran aturan Mamdani berbentuk himpunan fuzzy [29]. Bentuk umum aturannya adalah JIKA x adalah A DAN y adalah B MAKA z = f(x, y). A dan B menyatakan himpunan fuzzy pada bagian masukan, sementara z merupakan keluaran tegas. Berdasarkan keluarannya, Sugeno dibedakan menjadi orde nol yang menggunakan konstanta dan orde satu yang menggunakan persamaan linear [29]. Penelitian ini menggunakan Sugeno orde nol karena perhitungannya lebih sederhana untuk diterapkan pada mikrokontroler.

Keluaran Sugeno dihitung menggunakan rata-rata berbobot (*weighted average*), yaitu jumlah hasil kali bobot aktivasi dan konsekuen setiap aturan dibagi jumlah seluruh bobot aktivasi [29]. Perhitungannya ditunjukkan pada Persamaan 2.10.

$$z = \frac{\sum_{i=1}^{n} a_i z_i}{\sum_{i=1}^{n} a_i} \tag{2.10}$$

dengan:

z = nilai keluaran hasil defuzzifikasi.

a_i = bobot aktivasi aturan ke-(i).

z_i = konstanta konsekuen aturan ke-(i).

n = jumlah aturan.

Persamaan 2.10 berlaku ketika jumlah bobot aktivasi lebih besar dari nol. Karena konsekuen aturan berupa nilai tegas, perhitungan tidak memerlukan pencarian titik pusat luas seperti pada metode centroid, sehingga proses defuzzifikasi lebih sederhana.

Dalam pengendalian suhu, masukan yang digunakan adalah *error* dan delta *error*. Nilai *error* diperoleh dari selisih suhu acuan dengan suhu terukur, sebagaimana dinyatakan pada Persamaan 2.11.

$$e_k = T_{setpoint} - T_k \tag{2.11}$$

dengan:

e_k = nilai keluaran hasil defuzzifikasi.

$T_{setpoint}$ = bobot aktivasi aturan ke-(i).

T_k = konstanta konsekuen aturan ke-(i).

Pada Persamaan 2.11, e_k merupakan *error* pada waktu pengukuran ke-k, Tsetpoint adalah suhu acuan, dan T_k adalah suhu terukur. Nilai positif menunjukkan suhu masih di bawah acuan, sedangkan nilai negatif menunjukkan suhu telah melampaui acuan.

Delta *error* digunakan untuk mengetahui laju perubahan *error*. Nilainya dihitung dari selisih *error* saat ini dan sebelumnya, kemudian dibagi selang waktu pengukuran, seperti pada Persamaan 2.12.

$$\Delta e_k = \frac{e_k - e_{k-1}}{t_k - t_{k-1}} \tag{2.12}$$

dengan:

Δe_k = nilai keluaran hasil defuzzifikasi.

e_{k-1} = bobot aktivasi aturan ke-(i).

t_{k-1} = konstanta konsekuen aturan ke-(i).

Pada Persamaan 2.12, Δe_k adalah laju perubahan *error*, e_k dan e_{k-1} adalah *error* saat ini dan sebelumnya, sedangkan t_k dan t_{k-1} adalah waktu kedua pengukuran. Pada *setpoint* tetap, delta *error* negatif menunjukkan suhu meningkat, sedangkan nilai positif menunjukkan suhu menurun.

Setelah defuzzifikasi, keluaran dapat diperhalus agar perubahan perintah antarsiklus tidak terlalu besar. Penghalusan dilakukan dengan menggeser perintah sebelumnya menuju target keluaran menggunakan Persamaan 2.13.

$$u_k = u_{k-1} + \lambda\,(z_{target,k} - u_{k-1}) \tag{2.13}$$

dengan:

u_k = nilai keluaran hasil defuzzifikasi.

u_{k-1} = bobot aktivasi aturan ke-(i).

λ = konstanta konsekuen aturan ke-(i).

$z_{target,k}$ = nilai keluaran hasil defuzzifikasi.

Pada Persamaan 2.13, u_k adalah perintah saat ini, u_{k-1} adalah perintah sebelumnya, λ adalah faktor penghalusan, dan ztarget,k adalah target keluaran. Semakin kecil faktor penghalusan, semakin kecil perubahan perintah pada setiap

siklus. Nilai faktor dan pembatasan keluaran dijelaskan pada bagian perancangan sistem kendali.

Sugeno dapat digunakan untuk pemodelan, identifikasi, prediksi, dan kendali otomatis yang membutuhkan keluaran numerik, sedangkan Mamdani lebih sesuai untuk penalaran dengan interpretasi linguistik [29]. Dalam penelitian ini, keluaran Sugeno digunakan untuk mengatur daya *heater* halogen melalui modul *AC light dimmer* agar suhu ruang pengering mencapai dan bertahan di sekitar *setpoint*.

2. 10 Arduino IDE

Program kendali suhu yang dijalankan oleh ESP32 perlu ditulis dan diunggah ke mikrokontroler. Untuk keperluan tersebut, Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) menyediakan tempat untuk menulis program, memeriksa hasil kompilasi, dan mengunggahnya ke papan yang digunakan [30]. Program pada Arduino IDE disebut *sketch* dan disimpan sebagai berkas berekstensi `.ino`. Penulisannya menggunakan bahasa berbasis C/C++ serta dapat dibantu oleh pustaka sesuai komponen yang digunakan [31].

Antarmuka Arduino IDE terdiri atas editor program, tombol untuk menjalankan fungsi utama, dan bagian yang menampilkan pesan selama pemeriksaan maupun pengunggahan program. Susunan bagian tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.9.

Gambar 2. 9 Software Arduino IDE [31]

Pada Gambar 2.9, editor berada di bagian tengah dan menampilkan kerangka awal *sketch*, yaitu void setup() dan void loop(). Deretan tombol di bagian atas digunakan untuk mengelola dan mengunggah program, sedangkan panel di bagian bawah menampilkan pesan dari proses kompilasi. Informasi papan dan *port* yang dipilih juga terlihat pada bagian bawah jendela. Dengan tampilan ini, penulisan kode dan pemeriksaan hasilnya dapat dilakukan melalui satu aplikasi.

Tombol yang sering digunakan saat menyiapkan *sketch* memiliki fungsi yang berbeda. Ringkasan fungsi tombol pada Arduino IDE disajikan pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Simbol dan Fungsi Toolbar Software Arduino IDE

Jenis *Toolbar*	Keterangan
Verify	Memiliki fungsi untuk *check kode* yang sudah dibuat sudah sesuai dengan aturan pemrograman apakah terdapat kesalahan atau tidak.
Upload	Melakukan penguploadan atau kompilasi program atau syntax yang sudah dibuat menjadi bahasa yang dapat dipahami oleh mikrokontroler Arduino.
New	Memiliki fungsi untuk membuat *Sketch* baru.
Open	Memiliki fungsi untuk membuka *sketch* yang sudah pernah dibuat jika diperlukan untuk editing atau ulang upload *syntax* yang sudah dibuat ke mikrokontroler Arduino.
Save	Memiliki fungsi untuk menyimpan *syntax* yang dibuat pada sketch yang sudah dibuat sebelumnya
Serial Monitor	Memiliki fungsi untuk monitor yang menampilkan data yang dikirimkan atau adanya pertukaran antara Arduino dengan sketch pada port serial. Monitoring ini berguna untuk melakukan debugging jika perangkat tidak dilengkapi dengan Arduino. Selain itu dapat menampilkan nilai proses, nilai pembacaan, dan pesan editor.

Berdasarkan Tabel 2.2, *sketch* dapat dibuat atau dibuka terlebih dahulu, lalu disimpan dan diperiksa dengan *Verify*. Setelah tidak ditemukan kesalahan kompilasi, tombol *Upload* digunakan untuk memasukkan program ke mikrokontroler. *Serial Monitor* membantu pengguna melihat data keluaran program saat perangkat dijalankan.

Selain mengenali tombol pada aplikasi, penulisan *sketch* memerlukan pemahaman tentang struktur program, tipe data, dan perintah masukan atau keluaran. Beberapa sintaks dasar yang digunakan dalam pemrograman Arduino dirangkum pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Syntax Pemrograman Arduino IDE

Title	Detail
#include	Fungsinya untuk memasukkan library const int yang mendeklarasikan nilai suatu besaran yang tidak mengalami perubahan atau memiliki nilai yang tetap.
Define	Mendeklarasikan variabel yang tetap.
Int	Mendeklarasikan variabel yang memiliki tipe data bilangan bulat.
Float	Mendeklarasikan variabel yang memiliki tipe data bilangan real.
Void Setup	Melakukan tindakan awal dengan hanya sekali perlakuan.
Void Loop	Kode program yang akan diulang secara terus menerus dan sketsa akan berhenti jika listrik tidak mengalir.
PinMode	Menyatakan fungsi pin pada mikrokontroler.
Serial.print	Fungsinya untuk memerintah mengirimkan data pada serial monitor.
Serial.Println	Fungsinya untuk mengirimkan data pada serial monitor dengan baris baru.
If/ else/ else if	Perintah untuk mengambil keputusan.
DigitalWrite	Menyatakan nilai pada sebuah pin.
DigitalRead	Membaca nilai digital.

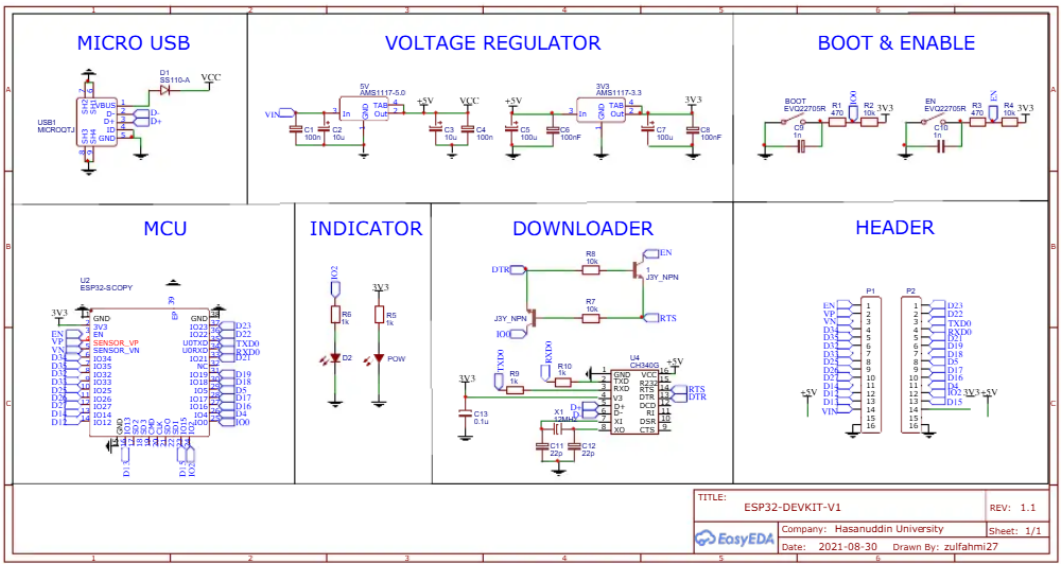
Tabel 2.3 menunjukkan bahwa setiap sintaks memiliki tugas tersendiri. void setup() digunakan untuk pengaturan awal, sedangkan void loop() memuat proses

yang perlu dijalankan berulang. Perintah lain digunakan untuk mengatur pin, membaca kondisi, menentukan tindakan, dan menampilkan data serial. Pembagian fungsi tersebut menjadi dasar untuk memahami susunan program kendali pada ESP32.

2. 11 Mikrokontroler ESP32

Perubahan suhu di dalam ruang pengering harus dibaca dan diolah sebelum daya pemanas diatur kembali. Pada alat ini, pekerjaan tersebut dilakukan oleh ESP32. Mikrokontroler buatan Espressif Systems ini menyediakan pin masukan dan keluaran untuk menghubungkan perangkat lain, serta memiliki fitur Wi-Fi dan Bluetooth [32].

ESP32 menggunakan prosesor Xtensa LX6 32-bit dengan dua inti yang dapat bekerja hingga 240 MHz. Memori SRAM di dalamnya berkapasitas 520 KB [33]. Agar dapat digunakan sebagai papan pengendali, chip ESP32 dipadukan dengan rangkaian catu daya, koneksi ke komputer, dan pin penghubung. Hubungan antarrangkaian tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2. 10 Skematik Mikrokontroler ESP32 [33]

Melalui Gambar 2.10 , mengenai skematik tersebut memperlihatkan jalur dari konektor Micro-USB menuju rangkaian pendukung ESP32. Pengatur tegangan menyediakan catu daya bagi papan, sedangkan bagian *boot* dan *enable* berkaitan dengan pengunggahan program serta pengaturan ulang mikrokontroler. Pin penghubung di sisi rangkaian menjadi akses untuk memasang sensor dan modul

lain. Susunan komponen ini tampak lebih jelas pada bentuk fisik papan di Gambar 2.11.

Gambar 2. 11 Mikrokontroller ESP32 [32]

Papan pada Gambar 2.11 memiliki konektor Micro-USB di salah satu ujungnya dan deretan pin pada kedua sisi. Melalui konektor USB, program dapat diunggah dari komputer. Deretan pin digunakan untuk menghubungkan ESP32 dengan komponen pada alat pengering, tanpa perlu membuat rangkaian langsung pada kaki chip.

Dalam sistem kendali suhu, salah satu pin GPIO menerima data digital dari sensor DHT22. ESP32 kemudian menggunakan data tersebut untuk menghitung *error* dan *delta error* sebagai masukan pengendali *Fuzzy Logic Sugeno*. Di sisi keluaran, pengaturan daya *heater* halogen berkaitan dengan sinyal *zero crossing* dari modul AC *light dimmer* yang menjadi acuan waktu penyalaan TRIAC. ESP32 juga memiliki periferal dan antarmuka lain, seperti ADC, DAC, PWM, UART, SPI, dan I2C [32]. Rincian kemampuan mikrokontroler ini tercantum pada Tabel 2.4.

Tabel 2. 4 Spesifikasi Mikrokontroller ESP32

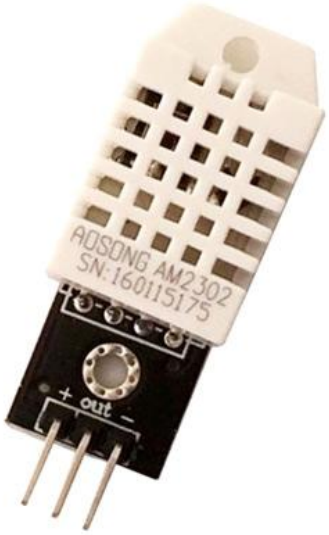
Spesifikasi	Keterangan
CPU	*Tenesilicia Xtensa LX6 32bit Dual-Core 160/240 MH*
SRAM	520 KB
FLASH	2 MB (max 64 MB)
Tegangan	2.2V – 3.6V

Arus Kerja	Range 80mA
Bahasa Pemrograman	(C, C++, Pyhton, dll)
Open Source	Ya
WiFi	802.11 b/g/n
Bluetooth	4.2BR/EDR+BLE
UART	3
GPIO	32
SPI 4	4
I2C	2
PWM	8
ADC	18 Channel (12-bit)
DAC	2 Channel (8-bit)

Dari spesifikasi pada Tabel 2.4, bagian yang paling berkaitan dengan pengendalian suhu ialah prosesor, memori, dan pin GPIO. Prosesor menjalankan pembacaan sensor serta perhitungan kendali, sementara GPIO menyediakan jalur menuju DHT22 dan modul *dimmer*. Wi-Fi dan Bluetooth melengkapi kemampuan ESP32, tetapi proses pengaturan pemanas yang dibahas dalam laporan ini berlangsung melalui pembacaan sensor dan pengendalian modul yang terhubung ke papan.

2. 12 DHT22

Suhu udara di dalam ruang pengering dibaca menggunakan sensor DHT22. Sensor ini juga dapat mengukur kelembapan relatif. Pengukuran suhu dilakukan oleh termistor, sedangkan kelembapan dideteksi melalui elemen kapasitif. Hasil keduanya dikirim sebagai data digital melalui satu jalur menuju mikrokontroler [34]. Bentuk sensor yang digunakan diperlihatkan pada Gambar 2.12**.**



Gambar 2. 12 Sensor DHT22

Selubung berlubang yang terlihat pada Gambar 2.12 memungkinkan udara di sekitar sensor mencapai elemen pengukur. Pin pada bagian bawah digunakan untuk catu daya, jalur data, dan *ground*. Melalui jalur data tersebut, hasil pembacaan suhu dan kelembapan dikirim ke mikrokontroler.

DHT22 memiliki rentang pengukuran suhu −40 °C hingga 80 °C dan kelembapan relatif 0–100% RH, dengan akurasi suhu nominal ±0,5 °C [34]. Hasil pengukuran dikirim melalui satu jalur dalam susunan 40 bit. Sebanyak 16 bit memuat data kelembapan, 16 bit memuat data suhu, dan 8 bit sisanya digunakan sebagai *checksum* untuk memeriksa data yang diterima mikrokontroler [34].

Akurasi yang tercantum pada spesifikasi merupakan acuan untuk karakteristik sensor. Dalam pengujian terhadap termohigrometer standar, Puspasari dkk. menemukan adanya selisih pada pembacaan suhu DHT22 [35]. Satya dan Puspasari juga melaporkan ketidakpastian hasil pengukuran DHT22 pada beberapa kondisi suhu ruangan [36]. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pembacaan sensor perlu dinilai sesuai kondisi pengujiannya. Karakteristik utama DHT22 dirangkum pada Tabel 2.5.

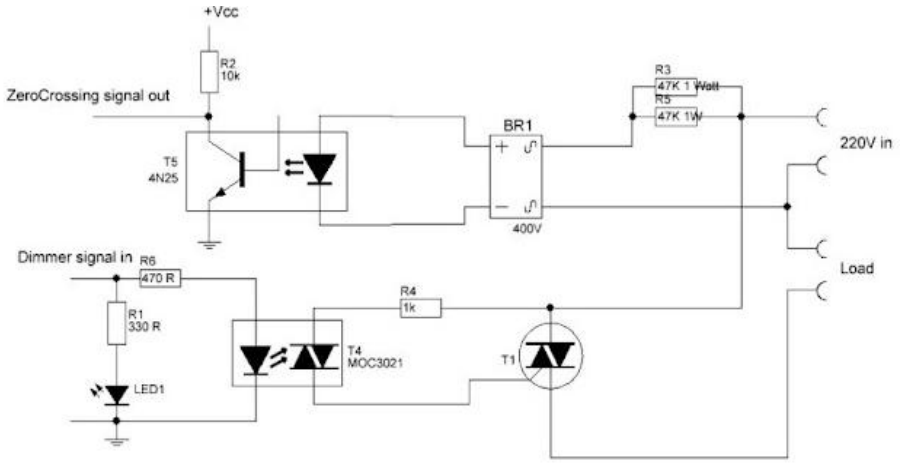
Tabel 2. 5 Spesifikasi Sensor DHT22

Spesifikasi	Keterangan
Jenis	Sensor suhu dan kelembaban digital
Elemen pengukur suhu	Termistor
Elemen pengukur kelembaban	Sensor kapasitif
Tegangan catu daya	3,3–6 VDC
Rentang pengukuran suhu	−40°C hingga 80°C
Akurasi suhu nominal	±0,5°C
Rentang pengukuran kelembaban	0–100% RH
Komunikasi data	MaxDetect *1-wire* melalui satu jalur data
Format pengiriman data	40 bit: 16 bit kelembaban, 16 bit suhu, dan 8 bit *checksum*

Rentang pengukuran dan akurasi pada Tabel 2.5 menjelaskan batas kemampuan nominal DHT22. Rentang suhu menyatakan wilayah pengukuran yang dicantumkan dalam spesifikasi, sedangkan nilai akurasi menjadi acuan untuk menilai hasil pembacaannya. Adanya selisih dan ketidakpastian dalam penelitian terdahulu menunjukkan bahwa spesifikasi tersebut tetap perlu dilengkapi dengan pengujian pada kondisi penggunaan sensor [35], [36].

2. 13 AC *Light Dimmer*

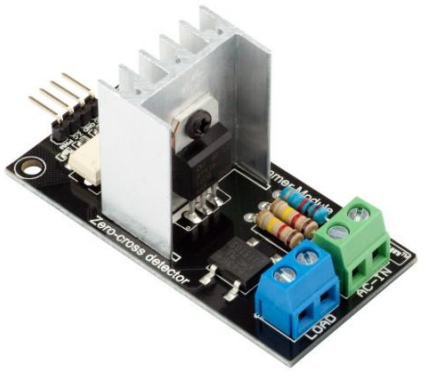
AC *light dimmer* digunakan untuk mengatur daya yang diterima beban listrik AC. Modul RobotDyn melakukan pengaturan tersebut dengan TRIAC, yaitu komponen yang dapat dipicu untuk mulai menghantarkan arus pada bagian tertentu dari gelombang AC [37]. Susunan rangkaian pendeteksi titik nol dan pemicu TRIAC diperlihatkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2. 13 Skematik AC Light Dimmer [37]

Rangkaian pada Gambar 2.13 memiliki jalur untuk mendeteksi saat tegangan AC melintasi titik nol atau *zero crossing*. Sinyal dari jalur tersebut dikirim ke mikrokontroler sebagai acuan waktu. Jalur kendali yang lain menerima sinyal pemicu dari mikrokontroler dan meneruskannya ke TRIAC, sehingga waktu mulai mengalirnya arus menuju beban dapat diatur.

Setelah menerima penanda *zero crossing*, mikrokontroler memberi jeda sebelum memicu TRIAC. Jeda yang singkat membuat TRIAC menghantarkan arus lebih lama dalam satu setengah siklus gelombang, sehingga daya yang diterima beban meningkat. Jika jedanya diperpanjang, bagian gelombang yang dialirkan ke beban menjadi lebih sedikit dan dayanya menurun [37]. Bentuk fisik modul diperlihatkan pada Gambar 2.14.



Gambar 2. 14 Modul AC ligth Dimmer [37]

Pada Gambar 2.14 terlihat terminal untuk menghubungkan sumber listrik AC dan beban, serta pin yang digunakan untuk menghubungkan modul dengan

mikrokontroler. TRIAC dilengkapi pendingin karena komponen tersebut menghantarkan arus pada sisi daya. Koneksi pada sisi kendali dan sisi daya memiliki fungsi berbeda, sehingga keduanya perlu diperhatikan saat modul dipasang.

Tegangan, frekuensi, dan batas arus menentukan kondisi kerja modul. Spesifikasi AC *light dimmer* yang tercantum pada laporan ini disajikan pada Tabel 2.6.

Tabel 2. 6 Spesifikasi Modul AC Light Dimmer

Spesifikasi	Keterangan
Manufaktur	RobotDyn
Tipe TRIAC	TRIAC BTA16
Arus AC Maksimal	Kontinyu max 2A, 5A
Tegangan AC	110/220 V
Frekuensi AC	50/60 Hz
Tegangan Pin Input	3.3 – 5 VDC
Dimensi	62 x 60 x 32 mm

Tabel 2.6 memuat spesifikasi untuk dua bagian modul. Tegangan dan frekuensi AC berkaitan dengan sumber listrik yang dihubungkan ke beban, sedangkan tegangan pin masukan berkaitan dengan rangkaian kendali dari mikrokontroler. Batas arus perlu diperhatikan agar modul digunakan sesuai kemampuan komponen dayanya.

Hubungan antara mikrokontroler, modul, sumber listrik, dan beban dilakukan melalui pin dengan fungsi yang berbeda. Konfigurasi pin tersebut disajikan pada Tabel 2.7.

Tabel 2. 7 Spesifikasi Pin AC Light Dimmer

Pin	Jenis Pin	Fungsi

VCC	Input	Sumber tegangan modul (3.3V – 5V dari mikrokontroler)
GND	Input	Ground sistem
ZC	Output	Sinyal Zero Crossing Detector sebagai referensi sinkronisasi gelombang AC
PWM	Input	Menerima sinyal pemicu TRIAC dari mikrokontroler pada waktu yang ditentukan setelah *zero crossing*.
AC-IN	Input	Terminal input tegangan AC dari sumber listrik
AC-OUT	Output	Terminal output tegangan AC menuju beban

Pin ZC pada Tabel 2.7 mengirimkan sinyal *zero crossing* ke mikrokontroler. Setelah jeda waktu yang ditentukan, mikrokontroler mengirimkan sinyal melalui pin kendali untuk memicu TRIAC. VCC dan GND digunakan pada sisi kendali, sedangkan AC-IN dan AC-OUT menjadi jalur sumber listrik dan beban. Dengan urutan tersebut, perubahan waktu pemicuan TRIAC mengubah bagian gelombang AC yang diterima beban.

2. 14 *Heater* Halogen

Heater halogen menghasilkan panas ketika arus listrik mengalir melalui filamen wolfram di dalam tabungnya. Filamen yang memanas memancarkan cahaya dan radiasi panas, sehingga lampu halogen dapat dimanfaatkan sebagai sumber panas pada alat pengering [40]. Bentuk heater yang dibahas ditunjukkan pada Gambar 2.15.

Gambar 2. 15 Heater Halogen [40]

Gambar 2.15 memperlihatkan tabung pemanas dengan terminal pada kedua ujungnya. Saat lampu menyala, panas dipancarkan dari filamen ke area yang menghadap tabung. Di dalam ruang pengering, sebaran panas juga berkaitan dengan penempatan lampu dan pergerakan udara.

Purnomo dan Fzahruddin menggunakan lampu halogen pada kabinet pengering jagung. Pada kondisi pengujian mereka, hasil pengeringan antarrak dengan lampu halogen lebih merata dibandingkan dengan lampu bohlam [40]. Temuan itu menunjukkan bahwa jenis sumber panas dapat memengaruhi sebaran pemanasan, meskipun hasilnya tetap bergantung pada susunan rak dan aliran udara dalam kabinet.

Sebagai beban listrik, panas yang dihasilkan heater halogen berkaitan dengan daya yang diterimanya. Daya tersebut dapat diatur menggunakan AC *light dimmer* dengan mengubah bagian gelombang AC yang dialirkan ke heater. Spesifikasi heater yang tercantum dalam laporan disajikan pada Tabel 2.8.

Tabel 2. 8 Spesifikasi Heater Halogen

Spesifikasi	**Keterangan**
Tegangan kerja	220 V AC
Daya per unit	300 W
Jumlah unit	1 Buah
Spesifikasi	**Keterangan**
Daya total	300 W

Panjang gelombang	Inframerah gelombang pendek
Panjang tabung	45 Cm
Metode pengaturan daya	Modul AC *light dimmer*
Mekanisme perpindahan panas	Radiasi inframerah

Tegangan dan daya pada Tabel 2.8 menunjukkan nilai kerja yang dicantumkan untuk heater, sedangkan panjang tabung berkaitan dengan kebutuhan ruang pemasangannya. Tabel tersebut juga mencantumkan modul AC *light dimmer* sebagai pengatur daya. Karena nilai daya yang diterima heater berubah mengikuti pengaturan modul, daya nominal pada spesifikasi perlu dibedakan dari daya yang terukur saat alat bekerja.

2. 15 MCB (*Miniature Circuit Breaker*)

Miniature Circuit Breaker (MCB) digunakan untuk memutus aliran listrik ketika arus pada suatu rangkaian melampaui kondisi yang diizinkan. Gangguan tersebut dapat berupa beban lebih yang berlangsung selama beberapa waktu atau hubung singkat yang menyebabkan kenaikan arus secara tiba-tiba [41], [42]. Bentuk fisik MCB diperlihatkan pada Gambar 2.16.

Gambar 2. 16 *Miniature Circuit Breaker* [41]

Gambar 2.16 menampilkan MCB dengan jumlah kutub yang berbeda. Pada bagian depan terdapat tuas untuk menghubungkan atau memutus rangkaian secara manual, sedangkan terminal di bagian atas dan bawah digunakan untuk menyambungkan penghantar. Ketika mekanisme proteksinya bekerja, kontak di dalam MCB terbuka dan aliran listrik terputus.

Pemutusan pada MCB dilakukan melalui dua mekanisme. Saat beban lebih menyebabkan arus melampaui nilai nominal dalam suatu waktu, elemen bimetal memanas dan melengkung hingga melepaskan kontak. Pada hubung singkat, kenaikan arus yang besar mengaktifkan elemen elektromagnetik sehingga kontak diputus jauh lebih cepat [41], [42]. Kedua mekanisme tersebut menangani gangguan dengan karakter yang berbeda.

MCB juga tersedia dengan karakteristik pemutusan tipe B, C, dan D. Perbedaannya terutama terletak pada rentang arus yang mengaktifkan pemutusan elektromagnetik. Tipe C memiliki ambang pemutusan sesaat lebih tinggi daripada tipe B, sehingga pemilihan kurva perlu disesuaikan dengan sifat beban dan kemungkinan lonjakan arus saat perangkat dinyalakan [41]. Spesifikasi MCB yang tercantum dalam laporan disajikan pada Tabel 2.9.

Tabel 2. 9 Spesifikasi MCB

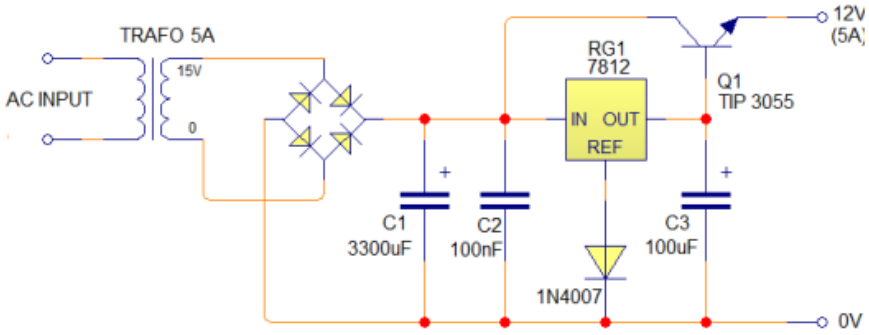
Spesifikasi	**Keterangan**
Fungsi	Proteksi beban lebih
Tegangan Kerja	220 VAC
Frekuensi	50 Hz
Arus Nominal	6 A
Karakteristik Trip	Curve C
Jumlah Pole	1 Pole
Kapasitas Pemutusan	4,5 kA
Standart	IEC 60898

Arus nominal, kurva pemutusan, dan kapasitas pemutusan pada Tabel 2.9 menerangkan aspek yang berbeda. Nilai 6 A menyatakan arus nominal MCB, kurva C menjelaskan karakteristik pemutusan elektromagnetiknya, sedangkan 4,5 kA merupakan kapasitas pemutusan arus hubung singkat yang dicantumkan untuk perangkat tersebut. Ketiganya perlu dibaca bersama saat menilai kesesuaian MCB dengan rangkaian yang dilindungi.

2. 16 *Power Supply*

Power supply atau catu daya menyediakan tegangan listrik yang dibutuhkan oleh rangkaian elektronika. Ketika sumber yang tersedia berupa arus bolak-balik (AC), tegangan tersebut perlu diubah menjadi arus searah (DC) agar sesuai dengan

kebutuhan rangkaian. Salah satu susunan dasar catu daya DC diperlihatkan pada Gambar 2.17 [44].



Gambar 2. 17 Skematik Rangkaian *Power Supply* [44]

Rangkaian pada Gambar 2.17 menggunakan transformator untuk menurunkan tegangan AC. Setelah itu, jembatan dioda menyearahkan tegangan, kapasitor mengurangi riak pada keluaran, dan regulator membantu mempertahankan tegangan DC. Skema tersebut menjelaskan prinsip kerja catu daya linier, sedangkan unit *power supply switching* memiliki cara pengaturan tegangan yang berbeda.

Bentuk fisik unit *power supply switching* dengan keluaran 12 V DC ditunjukkan pada Gambar 2.18. Unit seperti ini menerima tegangan dari sumber listrik dan menyediakan keluaran DC melalui terminal yang terpisah.

.

Gambar 2. 18 Power Supply 24 Volt 5 A [43]

Gambar 2.18 memperlihatkan bentuk unit catu daya yang dapat dipasang sebagai sumber tegangan bagi rangkaian elektronika. Nilai tegangan dan arus keluaran perlu diperiksa pada label unit karena bentuk fisik yang serupa dapat memiliki spesifikasi berbeda. Rincian spesifikasi unit 12 V DC disajikan pada Tabel 2.10.

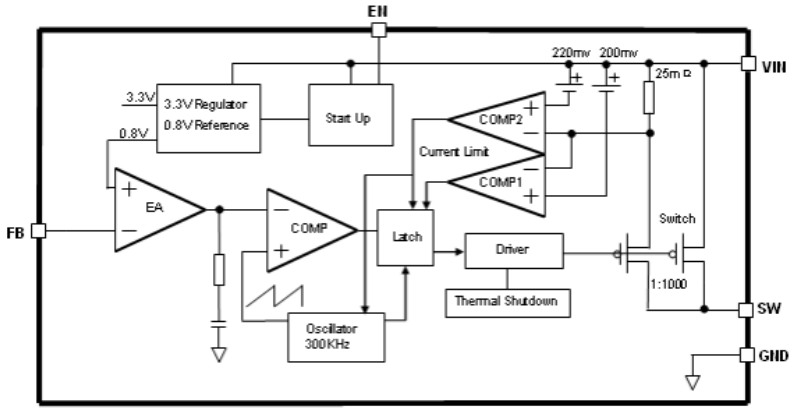
Tabel 2. 10 Spesifikasi Power Supply Switching

Spesifikasi	Keterangan
Supply Voltage	85 : 264 V AC, 120 : 370 V DC
Current consumption	0.6 A
Supply Power	60 W Max
Efficiency	80 %
Output Voltage	12V DC
Output current tAMB < 30ºC	5A
Output current tAMB = 40ºC	3.5 A
Voltage adjustment range	12V : 15 V DC

Berdasarkan Tabel 2.10, tegangan keluaran nominal unit adalah 12 V DC dengan daya maksimum 60 W. Kemampuan arus keluarannya juga berkaitan dengan suhu lingkungan. Tabel mencantumkan arus 5 A pada suhu di bawah 30 °C dan 3,5 A pada suhu 40 °C. Karena itu, angka 5 A tidak perlu dipahami sebagai kemampuan keluaran yang sama pada setiap kondisi suhu.

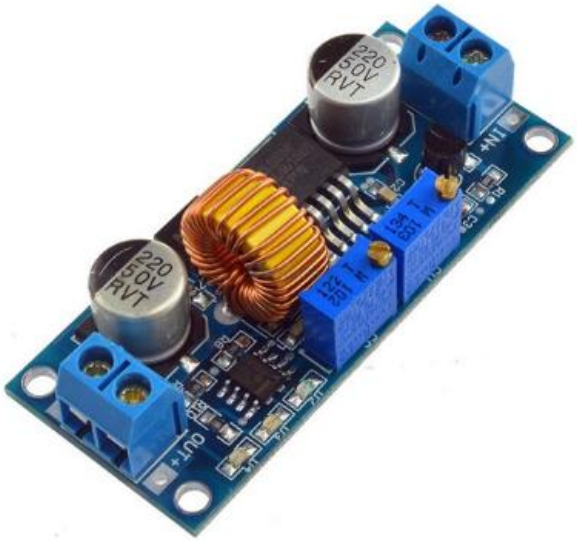
2. 17 *Modul Step-Down* XL4005

Modul *step down* XL4005 merupakan rangkaian *buck converter* DC-DC yang berfungsi menurunkan tegangan masukan searah menjadi tegangan keluaran yang lebih rendah dan dapat diatur. Berbeda dengan regulator linear yang menurunkan tegangan dengan membuang kelebihan energi dalam bentuk panas, *buck converter* bekerja dengan cara menyakelarkan tegangan masukan pada frekuensi tinggi, kemudian menyaringnya menggunakan induktor dan kapasitor sehingga dihasilkan tegangan keluaran yang relatif konstan [46]. Mekanisme tersebut menjadikan efisiensi konversi *buck converter* jauh lebih tinggi dibandingkan regulator linear [45]. Skematik modul AC *Light Dimmer* ditunjukkan pada Gambar 2.15.



Gambar 2. 19 Diagram Blok Stepdown XL4005 [47]

Besarnya tegangan keluaran ditentukan oleh *duty cycle* sinyal penyakelaran serta diatur melalui potensiometer multiputar yang terdapat pada modul. Rangkaian umpan balik pada modul berfungsi menjaga tegangan keluaran tetap konstan meskipun terjadi perubahan pada tegangan masukan maupun beban [45]. Modul ini menggunakan IC XL4005 yang bekerja pada frekuensi penyakelaran 300 kHz dengan arus keluaran maksimum 5 A [47]. Bentuk fisik modul *step down* XL4005 ditunjukkan pada Gambar 2.22.



Gambar 2. 20 Modul Step Down XL4005 [46]

Pada penelitian ini, modul XL4005 digunakan untuk menurunkan tegangan keluaran *power supply* menjadi tegangan kerja yang dibutuhkan oleh mikrokontroler ESP32 dan modul pendukung lainnya. Penggunaan modul ini

diperlukan karena komponen kendali bekerja pada tegangan yang lebih rendah dibandingkan tegangan keluaran *power supply* utama. Agar modul dapat bekerja dengan baik, tegangan masukan harus lebih tinggi minimal 1,5 volt dari tegangan keluaran yang dikehendaki, dan arus beban tidak boleh melampaui kapasitas maksimum modul [47]. Spesifikasi modul *step down* XL4005 disajikan pada Tabel 2.12.

Tabel 2. 11 Spesifikasi Modul Stepdown XL4005

Spesifikasi	Keterangan
IC utama	XL4005
Jenis rangkaian	*Buck converter* DC-DC, non-isolated
Tegangan masukan	5 V hingga 32 V DC
Tegangan keluaran	1,25 V hingga 30 V DC
Arus keluaran maksimum	5 A
Arus keluaran kontinu	3,5 A tanpa *heatsink*
Frekuensi penyakelaran	300 kHz
Efisiensi konversi	96%
Daya maksimum	50 W
Metode pengaturan	Potensiometer multiputar
Proteksi	Hubung singkat dan suhu berlebih
Dimensi	43 × 21 × 14 mm

2. 18 Saklar

Saklar (*switch*) merupakan komponen listrik yang berfungsi menghubungkan dan memutuskan aliran arus listrik pada suatu rangkaian. Komponen ini menjadi bagian penting pada hampir seluruh peralatan yang bekerja menggunakan energi listrik, karena berperan sebagai sarana kendali manual bagi pengguna untuk menghidupkan maupun mematikan sistem [48]. Pada instalasi listrik, saklar umum digunakan untuk mengendalikan nyala dan matinya beban, baik pada instalasi penerangan maupun instalasi tenaga.

Saklar pada dasarnya merupakan perangkat mekanis yang tersusun atas dua terminal atau lebih yang terhubung secara internal melalui kontak logam. Ketika kontak tersebut tertutup, rangkaian menjadi terhubung sehingga arus listrik dapat mengalir menuju beban. Sebaliknya, ketika kontak terbuka, rangkaian menjadi

terputus sehingga arus tidak dapat mengalir. Pada saklar mekanik manual, perubahan kedudukan kontak dari menghubung menjadi terputus atau sebaliknya dilakukan dengan menekan atau menggerakkan bagian knob secara manual [48].

Berdasarkan kondisi awal kontaknya, saklar dibedakan menjadi dua jenis, yaitu *Normally Open* (NO) dan *Normally Closed* (NC). Pada kontak NO, kondisi normalnya terbuka sehingga arus tidak mengalir, dan kontak akan menutup ketika saklar dioperasikan. Sebaliknya, pada kontak NC kondisi normalnya tertutup sehingga arus mengalir, dan kontak akan membuka ketika saklar dioperasikan [49]. Pemilihan jenis kontak disesuaikan dengan kebutuhan rangkaian, yaitu kontak NO umumnya digunakan sebagai penghubung untuk menghidupkan sistem, sedangkan kontak NC digunakan sebagai pemutus.

Berdasarkan jumlah kutub (*pole*) dan jumlah posisi kontak (*throw*), saklar diklasifikasikan menjadi beberapa tipe, di antaranya *Single Pole Single Throw* (SPST), *Single Pole Double Throw* (SPDT), *Double Pole Single Throw* (DPST), dan *Double Pole Double Throw* (DPDT). Kutub menyatakan jumlah rangkaian yang dapat dikendalikan oleh satu saklar, sedangkan posisi kontak menyatakan jumlah jalur yang dapat dilalui arus. Sementara itu, berdasarkan bentuk dan cara pengoperasiannya, saklar dibedakan menjadi *toggle switch* yang digerakkan melalui tuas, *rocker switch* yang digerakkan dengan menekan salah satu sisi, *push button* yang dioperasikan dengan menekan tombol, serta *rotary switch* yang dioperasikan dengan memutar. Bentuk fisik saklar yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2.23.

Gambar 2. 21 Saklar (*switch*) [49]

Penggunaan saklar memungkinkan pengguna menghidupkan dan mematikan sistem secara manual tanpa harus melepas sambungan ke sumber listrik, sehingga meningkatkan kemudahan pengoperasian sekaligus keamanan saat alat tidak

digunakan. Pemilihan saklar disesuaikan dengan tegangan kerja dan besarnya arus beban pada sistem, karena kapasitas arus saklar harus lebih besar daripada arus total yang mengalir agar kontak tidak mengalami panas berlebih maupun kerusakan. Spesifikasi saklar yang digunakan disajikan pada Tabel 2.12.

Tabel 2. 12 Spesifikasi Saklar

Spesifikasi	Keterangan
Tegangan kerja	220 VAC
Arus Nominal	6 – 10 A
Suhu Operasi	– 10º C sampai 85º C
Jenis input	Tegangan AC 220 V
Jenis Output	Tegangan AC Beban
Tipe	ON / OFF (SPST)
Sistem kerja	Mekanis (Manual switching)