

BAB II

LANDASAN TEORI

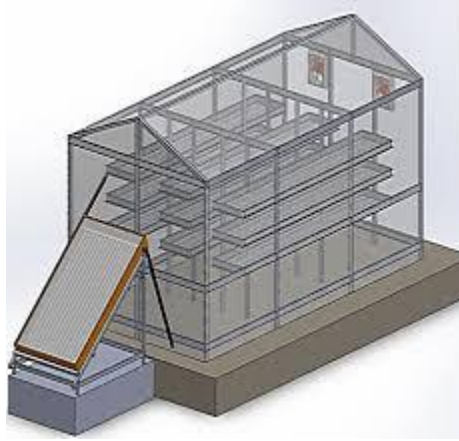
2.1. Solar Dryer Dome

SDD adalah sistem pengeringan berbasis energi matahari yang dirancang sebagai ruang tertutup untuk menciptakan lingkungan mikro bersuhu tinggi secara stabil. Teknologi ini memanfaatkan sifat termal dari material transparan seperti polycarbonate yang memungkinkan radiasi matahari masuk ke dalam ruangan, diserap oleh permukaan gelap, dan dikonversi menjadi panas. Efek rumah kaca ini meningkatkan suhu udara di dalam ruang pengering sehingga mempercepat proses penguapan air dari produk yang dikeringkan.

SDD digunakan sebagai alternatif dari metode pengeringan alami terbuka yang umumnya kurang higienis dan sangat bergantung pada kondisi cuaca. Bentuk desain SDD sangat beragam dan disesuaikan dengan kebutuhan serta skala produksi. Beberapa bentuk umum SDD antara lain:

- *Kubah (Dome)*: Struktur setengah bola, tahan angin dan mampu menyebarkan panas merata.
- *Atap Rumah (Gable Roof)*: Atap pelana seperti rumah kaca, efisien dan umum digunakan.
- *Tunnel Dryer*: Bentuk lorong panjang, cocok untuk kapasitas besar.
- *Cabinet Dryer*: Bentuk kotak kecil bertingkat, digunakan skala rumah tangga.
- *Greenhouse Dryer*: Gabungan rumah kaca dan ruang pengering, bentuk parabola.

Keunggulan teknologi SDD meliputi efisiensi energi, kestabilan suhu dan kelembapan dalam ruang pengering, serta keamanan produk dari kontaminasi lingkungan. Teknologi ini cocok untuk mengeringkan hasil pertanian dan perikanan seperti cabai, jahe, rumput laut, tomat, udang, dan ikan (Rusydi *et al.*, 2024).



Gambar 2. 1. Solar Dryer Dome (SDD).

2.1.1. Prinsip Kerja Pengering Tenaga Surya

Prinsip kerja SDD melibatkan penyerapan energi matahari oleh permukaan gelap, konduksi panas ke udara sekitar bahan yang dikeringkan, evaporasi air dari bahan, dan sirkulasi udara panas untuk mengeluarkan uap air. Udara panas yang terbentuk diarahkan menggunakan ventilasi alami atau *blower* untuk menjaga efisiensi pengeringan.

2.1.2. Karakteristik Desain SDD

SDD memiliki desain menyerupai kubah atau rumah kaca tertutup yang terbuat dari rangka besi hollow antikorosi dan penutup polycarbonate tahan UV. Ukuran umumnya sekitar 800 x 600 x 380 cm dengan kapasitas 400–500 kg per siklus. Desain ini mendukung penyerapan radiasi dari berbagai arah, memberikan pemanasan merata dan perlindungan dari cuaca ekstrem (Hasibuan, 2024).

2.1.3. Parameter Penting dalam Pengeringan SDD

Beberapa parameter penting yang memengaruhi pengeringan SDD adalah:

- Suhu: Ideal 40–50 °C.
- Kelembaban relatif: Rendah, mempercepat pengeringan.
- Laju aliran udara: Mengontrol kecepatan pengeluaran uap air.
- Waktu dan ketebalan produk: Memengaruhi durasi dan efektivitas proses.

Sistem kontrol otomatis membantu menstabilkan parameter ini menggunakan sensor dan aktuator seperti *heater* dan *blower*. Meskipun kelembapan merupakan salah satu faktor penting dalam proses pengeringan, sistem ini

difokuskan hanya pada pengendalian suhu karena keterbatasan perangkat dan tujuan penelitian (Imran *et al.*, 2024).

2.1.4. Aplikasi SDD

SDD banyak digunakan untuk pengeringan hasil pertanian dan perikanan seperti biji-bijian, buah, sayuran, rempah, ikan, dan rumput laut. Teknologi ini membantu meningkatkan nilai jual produk, mengurangi limbah pascapanen, dan menyediakan metode pengeringan yang higienis dan hemat energi.

Sebagai teknologi yang bekerja berdasarkan perubahan suhu dan aliran udara, efektivitas SDD sangat ditentukan oleh kestabilan suhu selama proses pengeringan. Oleh karena itu, sistem pengendalian suhu otomatis diperlukan untuk menjaga efisiensi dan kualitas hasil (Rusydi *et al.*, 2024). Penjelasan mengenai sistem kontrol suhu ini akan dibahas pada subbab berikutnya.



Gambar 2. 2. Pengeringan Cabai menggunakan SSD

2.2. Kontrol Suhu

Suhu merupakan salah satu parameter terpenting dalam proses pengeringan menggunakan SDD. Stabilitas suhu sangat mempengaruhi kecepatan pengeringan, efisiensi energi, serta kualitas produk akhir.

Pengendalian suhu yang efektif tidak hanya mempercepat proses pengeringan, tetapi juga mencegah kerusakan pada produk akibat suhu yang terlalu tinggi atau fluktuasi ekstrem. Oleh karena itu, sistem kendali suhu otomatis berbasis mikrokontroler menjadi solusi ideal karena mampu merespons perubahan suhu secara real time dan menyesuaikan kerja pemanas atau *blower* sesuai kebutuhan.

Pada proyek ini, digunakan ESP32 sebagai pengendali utama untuk memproses data suhu dari sensor dan mengatur aktuator melalui algoritma kontrol

berbasis logika fuzzy. Sistem ini tidak mengontrol kelembapan secara langsung, karena pengaturan suhu dan aliran udara sudah cukup untuk menjaga kelembapan relatif tetap rendah secara alami dalam ruang pengering, sebagaimana juga didukung oleh studi termal dalam sistem pengeringan pasif.

Subbab ini akan membahas konsep dasar pengendalian suhu, sensor yang digunakan, serta sistem pemanas dan pengendalian aliran udara yang mendukung kinerja keseluruhan SDD. (Gunawan, 2022).

2.2.1. Pentingnya Kontrol Suhu pada Proses Pengeringan

Proses pengeringan melibatkan penghilangan kadar air dari bahan. Suhu yang tidak terkontrol atau terlalu tinggi dapat menyebabkan kerusakan termal pada produk seperti pencoklatan, kehilangan nutrisi, perubahan warna, dan denaturasi protein. Sebaliknya, suhu yang terlalu rendah atau fluktuatif akan memperlambat laju pengeringan secara signifikan dan dapat menyebabkan pertumbuhan jamur atau bakteri sebelum produk benar-benar kering.

Suhu yang terlalu tinggi dalam proses pengeringan dapat menyebabkan penurunan mutu bahan, baik dari segi warna, aroma, maupun kandungan gizinya. Sebaliknya, suhu yang terlalu rendah akan memperlambat laju pengeringan dan meningkatkan risiko pertumbuhan mikroorganisme akibat kelembapan yang masih tertahan dalam bahan (Owureku-asare *et al.*, 2022). Oleh karena itu, pengendalian suhu yang akurat sangat diperlukan untuk menjaga mutu dan efisiensi pengeringan. Penelitian menunjukkan bahwa distribusi suhu yang merata dalam ruang pengering berkontribusi langsung terhadap efisiensi dan kualitas hasil produk.

Menurut (Jabbar *et al.*, 2025), distribusi suhu yang merata dan stabil sangat penting untuk mencapai kualitas pengeringan yang baik. Sistem pengendalian suhu otomatis membantu menjaga suhu dalam rentang optimal sesuai dengan karakteristik bahan yang dikeringkan. Teknologi mikrokontroler seperti ESP32 dapat merespons perubahan suhu secara cepat, sehingga menjaga kondisi pengeringan tetap efisien dan aman.

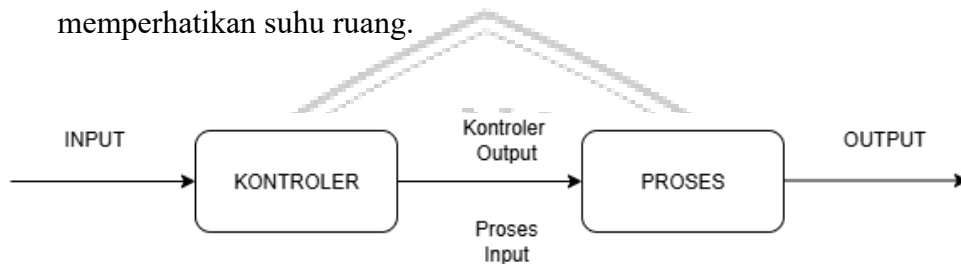
2.2.2. Konsep Dasar Sistem Kontrol

Sistem kontrol suhu otomatis bekerja berdasarkan prinsip umpan balik (*feedback*), di mana sistem secara terus-menerus memantau suhu aktual dan menyesuaikan aksi pengendalian untuk mencapai suhu yang diinginkan (*setpoint*).

Komponen utama dalam sistem ini meliputi sensor suhu, pengendali (mikrokontroler atau PLC), dan aktuator seperti pemanas atau kipas. Prinsip *closed loop* seperti ini terbukti efektif dalam menjaga kestabilan suhu pada sistem pemanas otomatis (Jakarta & Belakang, 2015).

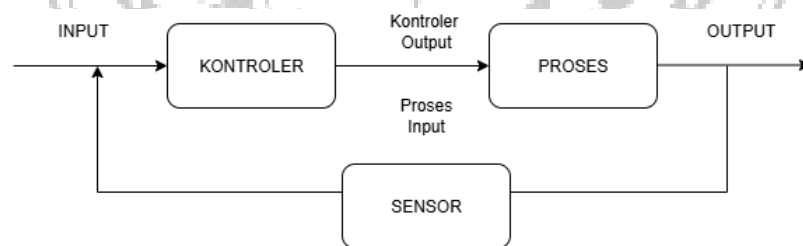
Terdapat dua jenis sistem kontrol utama, yaitu:

- Kontrol Terbuka (*Open Loop*): Sistem ini tidak memiliki umpan balik. Aksi kendali dilakukan tanpa mempertimbangkan kondisi aktual. Contohnya adalah sistem pemanas yang dinyalakan dalam waktu tetap tanpa memperhatikan suhu ruang.



Gambar 2. 3. Open Loop Control System

- Kontrol Tertutup (*Closed Loop*): Sistem ini menggunakan umpan balik dari sensor untuk memantau suhu aktual di dalam SDD. Alih-alih membandingkan nilai suhu terhadap setpoint eksplisit, sistem mengolah data suhu aktual secara langsung menggunakan logika fuzzy. Sistem ini lebih akurat dan efisien.



Gambar 2. 4. Closed Loop Control System

Dalam proyek ini digunakan sistem *closed loop* dengan mikrokontroler ESP32 sebagai pengendali utama. Sensor suhu mendeteksi perubahan suhu di dalam SDD, kemudian ESP32 memproses data tersebut menggunakan algoritma logika fuzzy dan mengatur pemanas serta aktuator lainnya untuk menjaga suhu tetap dalam rentang optimal. Mikrokontroler seperti ESP32 sangat sesuai untuk

sistem ini karena memiliki kemampuan pemrosesan cepat, kemudahan pemrograman, dan mendukung komunikasi nirkabel untuk sistem berbasis IoT (Sistem & Elektronik, 2018).

2.2.3. Metode Kontrol Suhu Umum

Dalam sistem pengendalian suhu, terdapat beberapa metode kontrol yang umum digunakan, baik secara manual maupun otomatis. Metode-metode ini memiliki kelebihan dan keterbatasan masing-masing dalam menjaga kestabilan suhu sesuai kebutuhan proses. Beberapa metode kontrol suhu yang umum antara lain:

- Kontrol *ON/OFF*

Metode ini merupakan bentuk pengendalian suhu paling sederhana. Sistem akan menyalakan pemanas saat suhu berada di bawah batas bawah (setpoint) dan mematikannya saat suhu mencapai batas atas. Meskipun mudah diimplementasikan, metode ini cenderung menyebabkan fluktuasi suhu yang besar dan tidak cocok untuk sistem yang membutuhkan presisi tinggi. Dalam penelitian oleh (Sistem & Elektronik, 2018) metode *ON/OFF* menghasilkan performa respons yang sederhana tetapi fluktuatif pada pengendalian suhu ruangan .

- Kontrol *Proportional Integral Derivative* (PID)

Kontrol PID digunakan secara luas karena kemampuannya untuk menghasilkan respon yang cepat, stabil, dan presisi. Metode ini bekerja dengan menghitung *error* antara suhu aktual dan suhu *setpoint*, kemudian menghasilkan sinyal kendali berdasarkan besaran proporsional (P), akumulasi kesalahan (I), dan prediksi perubahan (D). Namun, tuning parameter PID yang tepat membutuhkan proses yang kompleks dan tidak selalu cocok untuk sistem nonlinier. Hal ini dibuktikan dalam penelitian oleh (Jakarta & Belakang, 2015) di mana tuning PID yang tidak tepat dapat menyebabkan *overshoot* atau *delay* pada sistem pengeringan suhu berbasis pemanas listrik.

- Kontrol Berbasis Logika Fuzzy

Metode ini menggunakan pendekatan linguistik dan aturan berbasis pengetahuan pakar. Logika fuzzy dapat menangani ketidakpastian dan

nonlinieritas sistem dengan baik, serta tidak membutuhkan model matematis yang rumit. Dalam konteks sistem pengering tenaga surya seperti SDD, *logika fuzzy* cocok karena mampu mengontrol suhu berdasarkan beberapa masukan yang dinamis, seperti suhu udara masuk dan suhu udara keluar. Penelitian oleh (Abdenouri *et al.*, 2021) menunjukkan bahwa *logika fuzzy* menghasilkan distribusi suhu yang lebih stabil dibandingkan metode PID dalam sistem pengering tidak langsung.

2.2.4. Sensor Suhu PT100

Dalam sistem kontrol suhu SDD ini, pengukuran suhu aktual di dalam ruang pengering merupakan *input* krusial bagi sistem logika fuzzy. Untuk mendapatkan data suhu yang akurat dan representatif, digunakan empat buah sensor suhu PT100. Dengan menggunakan kombinasi sensor PT100 dan modul PTA8D08, sistem pengering dapat memperoleh data suhu yang akurat dan *real time*, yang menjadi dasar utama dalam pengambilan keputusan oleh logika fuzzy untuk mengendalikan suhu secara optimal.



Gambar 2. 5. Sensor Suhu PT100

2.2.4.1. Prinsip Kerja Sensor PT100

PT100 adalah jenis Detektor Suhu Resistansi (*Resistance Temperature Detector/RTD*) yang terbuat dari platinum. Penamaan "PT100" mengacu pada fakta bahwa resistansinya adalah 100 Ohm pada suhu 0°C. Prinsip kerjanya didasarkan pada perubahan resistansi listrik material platinum yang memiliki hubungan linier dan dapat diprediksi terhadap perubahan suhu. Ketika suhu meningkat, resistansi platinum juga akan meningkat secara proporsional. Dengan mengukur resistansi ini, suhu dapat ditentukan dengan akurasi tinggi. PT100 dikenal karena akurasinya yang tinggi, stabilitas jangka panjang, dan rentang suhu operasi yang luas, menjadikannya ideal untuk aplikasi yang membutuhkan pengukuran suhu presisi. (Hasibuan, 2024) . Untuk membaca sinyal dari sensor PT100 tersebut, digunakan

modul akuisisi data berbasis Modbus RTU yang kompatibel dengan sistem kontrol (SinoInst, 2024).

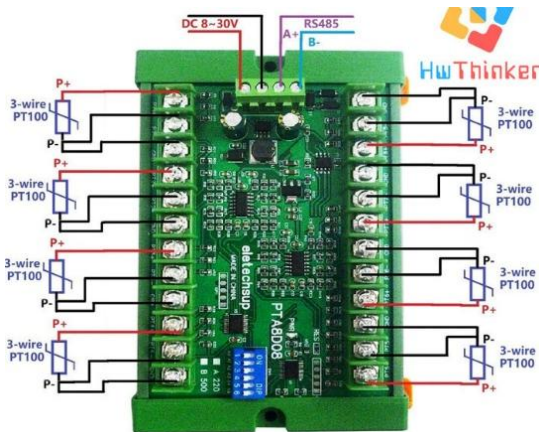
Tabel 2. 1. Datasheet Sensor Suhu PT100

Parameter	Spesifikasi
Tipe Sensor	PT100 RTD (<i>Resistance Temperature Detector</i>) 3 Wire
Elemen Sensor	Platinum (Pt)
Nilai Resistansi	100 Ohm pada 0°C
Kelas Akurasi	Class B ($\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ @ 0°C) sesuai IEC 60751
Rentang Suhu Operasional	-50°C hingga +400°C
Bahan Selubung (<i>Sheath</i>)	<i>Stainless Steel</i> 304 atau 316
Respon Waktu	2 hingga 8 detik (tergantung kondisi dan media)
Tegangan Maks Sensor	$\leq 5\text{V}$ (untuk sistem pembacaan eksitasi)
Kalibrasi Standar	IEC 60751
Aplikasi Umum	<i>Furnace, oven industri, burner, drying system, dll.</i>

2.2.4.2. Modul Akuisisi Data Modbus RTU untuk PT100

Modul akuisisi data ini berfungsi sebagai perantara antara sensor PT100 dan sistem kontrol (mikrokontroler atau HMI). Modul ini secara internal melakukan pengkondisian sinyal, linearisasi karakteristik PT100, dan konversi sinyal analog resistansi menjadi nilai suhu digital. Data suhu yang sudah digital ini kemudian disediakan melalui protokol komunikasi Modbus RTU 8 Channel, memungkinkan sistem kontrol untuk membaca nilai suhu dari modul melalui antarmuka serial. Modul semacam ini umumnya dirancang untuk ketahanan lingkungan industri dan memberikan solusi *plug and play* untuk integrasi sensor RTD ke dalam sistem berbasis Modbus.

Penggunaan modul PTA8d08 ini secara signifikan menyederhanakan akuisisi data sensor PT100, karena seluruh proses konversi dan komunikasi data sudah ditangani oleh modul itu sendiri, meminimalkan beban komputasi pada mikrokontroler utama (Zhao, 2012). Modul PTA8D08 berfungsi sebagai jembatan antara sensor dan ESP32 yang menjalankan logika fuzzy, serta menyediakan data ke HMI melalui komunikasi serial Modbus.



Gambar 2. 6. Modul PTA8D08

Tabel 2. 2. Datasheet Module PTA8D08

Parameter	Spesifikasi
Nama Produk	PT100 Temperature Acquisition Module PTA8D08
Jenis Sensor yang Didukung	RTD PT100, 3-wire (Class B)
Jumlah Channel Input	8 Channel independen (CH1–CH8)
Sinyal Input	Resistansi PT100 (Ω)
Rentang Pembacaan Suhu	-200°C hingga +850°C
Resolusi Pengukuran	0.1°C
Akurasi Pengukuran	$\pm 0.5^\circ\text{C}$ atau $\pm 0.2\%$ FS (tergantung kalibrasi)
Kompensasi Jalur Kabel	Otomatis untuk sistem 3-wire
Jenis Komunikasi	RS485, Modbus RTU
Baud rate	1200, 2400, 4800, 9600, 19200, 38400, 57600, 115200 bps (dapat dipilih)
Alamat Modbus (Slave ID)	1–247 (dipilih melalui saklar DIP atau perangkat lunak)
Protokol Komunikasi	Modbus RTU (Function Code 02 dan 04)
Format Data	8 data bits, 1 stop bit, no parity (default)
Indikator LED	Power, TX (transmit), RX (receive), Error
Power Supply Input	DC 12–24V (typical 24V DC)
Konsumsi Daya	< 2W
Proteksi Input	Proteksi arus lebih dan ESD
Konektor Input Sensor	Terminal screw 3 pin per channel
Konektor RS485	Terminal screw A/B/GND (diferensial)
Suhu Operasional	-20°C hingga +60°C
Kompatibilitas Perangkat	PLC, HMI, ESP32, Arduino RS485, Raspberry Pi, SCADA, dll.
Alamat Modbus (Slave ID)	2

2.2.4.3. Konfigurasi dan Penempatan Sensor PT100

Empat buah sensor PT100 digunakan untuk mendapatkan gambaran suhu yang komprehensif di berbagai lokasi strategis di dalam ruangan SDD. Penempatan sensor yang tersebar bertujuan untuk:

- Representasi Suhu Rata-rata: Dengan mengambil rata-rata pembacaan dari beberapa titik, sistem dapat mendapatkan nilai suhu rata-rata yang lebih akurat dan mengurangi dampak variasi lokal atau hotspot.
- Deteksi Gradien Suhu: Memungkinkan pemantauan distribusi suhu di dalam dome, yang penting untuk memastikan pengeringan yang seragam (Jabbar *et al.*, 2025).

Dengan konfigurasi dan distribusi penempatan sensor seperti ini, sistem kontrol suhu berbasis logika fuzzy dapat bekerja secara optimal dalam menjaga kestabilan suhu di seluruh ruang pengering SDD.

2.2.5. Sistem Aktuator Pemanas

Sistem aktuator pemanas berfungsi untuk menambah panas di dalam SDD guna mencapai suhu pengeringan yang diinginkan. Komponen utama dalam sistem ini terdiri dari elemen pemanas (*heater*), *temperature controller*, dan *solid state relay* (SSR). Ketiga komponen ini bekerja secara berurutan, di mana *temperature controller* mengatur aktivasi SSR untuk menghubungkan daya ke *heater* sesuai kebutuhan suhu.

2.2.5.1. Heater

Elemen pemanas yang digunakan adalah *heater* tubular bersirip (*finned*) berbentuk huruf U. Jenis *heater* ini dipilih karena cocok untuk aplikasi pemanas udara dalam ruang tertutup seperti SDD maupun ruang industri. Sirip logam yang mengelilingi tabung pemanas berfungsi meningkatkan luas permukaan sehingga efisiensi perpindahan panas meningkat (Bhatti, 2019).

Pengaturan suhu *heater* dapat mencapai hingga 80–100 °C untuk memastikan distribusi panas yang cukup (Shimpy *et al.*, 2022). Suhu heater hingga 100 °C bertujuan menyediakan cadangan energi termal saat cuaca lembap atau saat dibutuhkan pemanasan cepat, dengan tetap mengandalkan *blower* dan pengontrol suhu untuk menjaga suhu ruang.



Gambar 2. 7. Heater Tubular Finned U

Tabel 2. 3. Datasheet Heater Tubular Finned U

Parameter	Spesifikasi
Jenis Pemanas	Heater Tubular Vinned (bersirip) bentuk U
Daya Pemanas (<i>Power</i>)	500 W
Tegangan Operasi	220–240 V AC (standar)
Material Selubung (<i>Sheath</i>)	Stainless Steel 304 / 316
Diameter Tabung	8 mm – 12 mm (umum: 10 mm)
Temperatur Operasi Maksimal	400–500°C
Tingkat Perlindungan (IP)	IP20 – IP54
Waktu Pemanasan	Cepat (± 30 detik – 2 menit, tergantung beban termal dan sirkulasi udara)
Aplikasi Umum	SDD, duct heater, pemanas udara, oven industri kecil
Toleransi Daya	$\pm 10\%$ (standar industri)
Umur Operasi	>5000 jam (tergantung <i>duty cycle</i> dan suhu kerja)

2.2.5.2. Temperatur Controller Autonics TX4S-24S

Temperatur controller merupakan perangkat elektronik yang dirancang khusus untuk menjaga suhu pada nilai setpoint yang telah ditentukan. Perangkat ini bekerja dengan menerima sinyal dari sensor suhu (misalnya PT100), membandingkan suhu aktual dengan setpoint, dan kemudian menghasilkan sinyal *output* untuk mengendalikan aktuator seperti pemanas atau pendingin. Banyak *temperatur controller* modern telah dilengkapi dengan algoritma kontrol PID, yang memungkinkan pengaturan suhu yang stabil dan presisi. Selain itu, perangkat ini biasanya memiliki antarmuka digital untuk memudahkan pengaturan parameter serta menampilkan suhu secara *real time* (Distribution & Power, n.d.).

Dalam sistem ini, pengaturan suhu *heater* dilakukan secara independen menggunakan temperatur controller Autonics TX4S-24S. Perangkat ini menerima *input* dari sensor PT100 dan mengontrol pemanas melalui *Solid State Relay* (SSR)

berdasarkan nilai suhu *setpoint* yang telah ditentukan, terpisah dari sistem kendali berbasis logika fuzzy (Tadeus *et al.*, 2018).



Gambar 2. 8. Temperatur Controller Autonics TX4S-24S

Tabel 2. 4. Datasheet Temperatur Controller Autonics TX4S-24S

Parameter	Spesifikasi
Tipe	Autonics TX4S-24S
Input	RTD (PT100), Thermocouple
Output	SSR Drive 12V DC, Relay
Komunikasi	Opsional RS485 (Modbus RTU)
Mode Kontrol	ON/OFF, PID
Output Alarm	PV $\pm 0.3\%$ (atau $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$), luar suhu ruang $\pm 0.5\%/\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$
Akurasi	$\pm 0.3\%$ FS

2.2.5.3. Solid State Relay (SSR) SR-1225-N

Solid State Relay (SSR) adalah perangkat sakelar elektronik yang berfungsi untuk menghidupkan dan mematikan sirkuit beban AC atau DC tanpa menggunakan bagian bergerak fisik seperti pada relay elektromekanis. SSR menggunakan semikonduktor (misalnya, TRIAC, SCR, atau MOSFET) untuk melakukan *switching*. Keunggulan utama SSR meliputi operasi yang senyap, umur pakai yang lebih panjang karena tidak ada keausan mekanis, kecepatan *switching* yang sangat tinggi, dan isolasi listrik antara sirkuit kontrol tegangan rendah dengan sirkuit beban tegangan tinggi (Bramanta & Santosa, n.d.).

SSR digunakan sebagai perantara antara temperatur controller dan *heater*, berfungsi sebagai saklar elektronik berkecepatan tinggi tanpa komponen mekanis. Dengan keunggulan tersebut, SSR mendukung kontrol suhu yang lebih presisi dan bebas suara klik.



Gambar 2. 9. SSR SR-1225-N

Tabel 2. 5. Datasheet SSR SR-1225-N

Parameter	Spesifikasi
Model	Autonics SR1 1225 N (<i>Single phase</i>)
Tipe Output	SSR AC, Penyalaan <i>Zero Cross</i>
Input Tegangan Kontrol	4–30 V DC
Input Arus	Max 18 mA
Voltase beban (<i>Output AC</i>)	24–240 V AC
<i>On state Voltage Drop</i>	Maksimum 1,6 V pada beban terukur
Pendingin	<i>Ceramic PCB + detachable heatsink</i>

2.2.6. Sistem Kontrol Aliran Udara

Selain mengontrol sumber panas (*heater*), pengaturan aliran udara di dalam SDD juga memegang peranan penting dalam proses pengeringan. Aliran udara berfungsi untuk mendistribusikan panas secara merata dari *heater* ke seluruh ruang pengering dan membawa uap air yang dilepaskan dari bahan keluar dari sistem. Untuk tujuan ini, digunakan *centrifugal blower* yang kecepatan putarannya diatur oleh inverter atau *Variable frequency drive* (VFD) (Inverter, 2020).

2.2.6.1. Centrifugal Blower

Centrifugal blower adalah jenis kipas yang menggunakan *impeller* berputar untuk menarik udara ke dalam dan membuangnya keluar secara radial. Kipas ini dikenal mampu menghasilkan tekanan statis yang tinggi dan aliran udara yang stabil, menjadikannya ideal untuk aplikasi yang membutuhkan pemindahan volume udara yang besar atau mengatasi hambatan aliran udara dalam saluran. Dalam sistem pengeringan, *centrifugal blower* digunakan untuk menciptakan sirkulasi

udara paksa, mendistribusikan panas secara merata, dan membantu mengeluarkan uap air lembab dari ruang pengering. Penggunaan motor 3 *phase* pada *blower* memberikan keuntungan dalam hal efisiensi dan daya tahan, serta memungkinkan kontrol kecepatan yang presisi (Thandar *et al.*, 2019).



Gambar 2. 10. Centrifugal Blower

Tabel 2. 6. Datasheet Centrifugal Blower

Parameter	Spesifikasi
Model / Kode Produk	MC-DE/M150R 1 NO
Tipe	Mini Centrifugal blower / Blower Fan "Keong"
Tegangan Operasi <i>blower</i>	220 V AC
Tipe Motor	YE3-632-2
Jenis Motor	3 Phase Induction Motor
<i>Duty</i>	S1/S2 (Continuous Operation)
Tegangan	380 V
Frekuensi	50 Hz
Daya	0.33 HP / 0.25 kW
Arus	0.9 A
Kecepatan (Putaran)	2900 rpm
Efisiensi (EFF)/ performa energi motor.	75%
Faktor Daya (Cos ϕ)	0.75

2.2.6.2. Inverter (*Variable frequency drive/VFD*) HS350

Inverter, atau *Variable frequency drive* (VFD), adalah perangkat elektronik daya yang digunakan untuk mengontrol kecepatan motor listrik AC dengan cara mengubah frekuensi dan tegangan suplai listrik ke motor. Dengan mengatur frekuensi, VFD dapat mengatur kecepatan putaran motor secara halus dan efisien.

Penggunaan VFD pada *blower* memberikan kontrol presisi terhadap aliran udara, mengurangi konsumsi energi, dan memungkinkan fitur soft start/stop untuk memperpanjang umur motor.

Dalam sistem ini, mode *multi speed* digunakan untuk mengatur tiga tingkat kecepatan motor *blower* berdasarkan sinyal digital dari PLC Outseal V3 Standard PN yang memiliki relay internal. Relay ini digunakan untuk mengaktifkan terminal *input* digital inverter HS350 pada S3, S4, dan S5 yang dikonfigurasi untuk menjalankan frekuensi berbeda sesuai pengaturan parameter F1.17, F1.18, dan F1.19. Pendekatan ini menggantikan penggunaan sinyal analog atau komunikasi langsung, namun tetap memberikan kendali kecepatan yang efisien dan andal (Inverter, 2020).



Gambar 2. 11. Inverter VFD HS350

Tabel 2. 7. Datasheet Inverter VFD HS350

Parameter	Spesifikasi dan <i>Setting</i>
Model	HS350-2S0007
<i>Input</i> Tegangan	1 Phase 220 V AC $\pm 15\%$, 50/60 Hz
<i>Output</i> Tegangan	3 Phase 0–220 V AC
<i>Output</i> Arus	4.5 A
<i>Output</i> Frekuensi Maksimum	0.00–400.00 Hz
Kapasitas Daya <i>Output</i>	0.75 kW (1 HP)
Frekuensi <i>Default</i> Motor	50 Hz
Kontrol Motor	V/F Control, Sensorless Vector Control
Mode Operasi	Run via Terminal (<i>External Multi Speed</i>)
Parameter <i>Multi speed</i> (F1.17–F1.19)	- F1.17 = 35 Hz (<i>Speed</i> 1)

	- F1.18 = 40 Hz (<i>Speed 2</i>) - F1.19 = 50 Hz (<i>Speed 3</i>)
Terminal <i>Input</i> Digital	S3, S4, S5 (<i>multi speed</i>)
Terminal <i>Run/Stop</i>	S2 = <i>Run Forward</i> , COM sebagai referensi
<i>Setting</i> Sumber <i>Run Command</i> (P0.01)	1 = Terminal (aktifkan kontrol via <i>input</i> digital)
<i>Setting</i> Sumber Frekuensi (P0.06)	8 = <i>Multi Speed</i> Terminal
<i>Setting Acceleration Time</i> (P0.10)	5.0 s (<i>default</i> atau disesuaikan kebutuhan)
<i>Setting Deceleration Time</i> (P0.11)	5.0 s (<i>default</i> atau disesuaikan)
<i>Overload Protection</i>	150% selama 1 menit
Proteksi Umum	<i>Over voltage, over current, overload, overheat, under voltage</i>
Komunikasi Modbus RTU	Tersedia (via RS485), Baudrate: 9600 default, format 8N1
Display Panel	4 digit LED display (frekuensi, parameter, <i>error code</i>)
Ukuran Unit	123 × 85 × 152 mm (L × W × H)
Pendingin	Kipas internal dan heatsink aluminium
Aplikasi Umum	<i>Blower</i> , pompa, conveyor, kipas industri

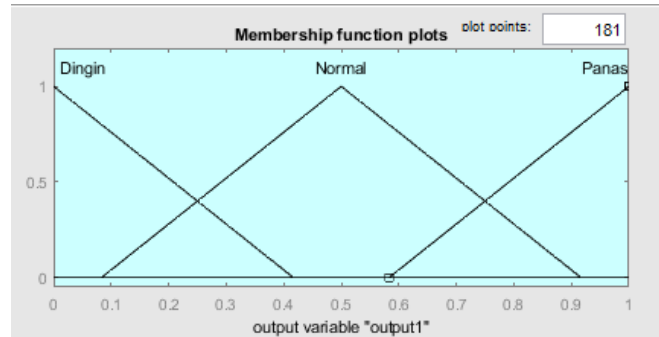
2.3. Logika Fuzzy

Logika Fuzzy, yang diperkenalkan oleh Lotfi A. Zadeh pada tahun 1965, merupakan perluasan dari logika Boolean klasik yang hanya mengenal nilai benar atau salah (1 atau 0). Logika Fuzzy memungkinkan adanya nilai kebenaran parsial, di mana suatu elemen dapat menjadi anggota dari lebih dari satu himpunan dengan derajat keanggotaan tertentu. Pendekatan ini sangat cocok untuk sistem yang melibatkan ketidakpastian, ambiguitas, atau data yang bersifat linguistik dan tidak presisi, seperti dalam kasus kontrol suhu SDD yang dipengaruhi oleh kondisi lingkungan yang bervariasi (Ross & Ross, 2010).

2.3.1. Konsep Dasar Logika Fuzzy

Berbeda dengan logika biner yang menyatakan suatu pernyataan hanya benar atau salah, Logika Fuzzy memungkinkan suatu pernyataan memiliki nilai kebenaran di antara 0 dan 1. Nilai 0 menunjukkan sepenuhnya salah, nilai 1 menunjukkan sepenuhnya benar, dan nilai di antaranya menunjukkan derajat

kebenaran. Ini merefleksikan cara berpikir manusia yang sering menggunakan istilah-istilah linguistik seperti "panas", "dingin", "sedang", atau "banyak" dll, yang bersifat kabur (Robson *et al.*, 2021).



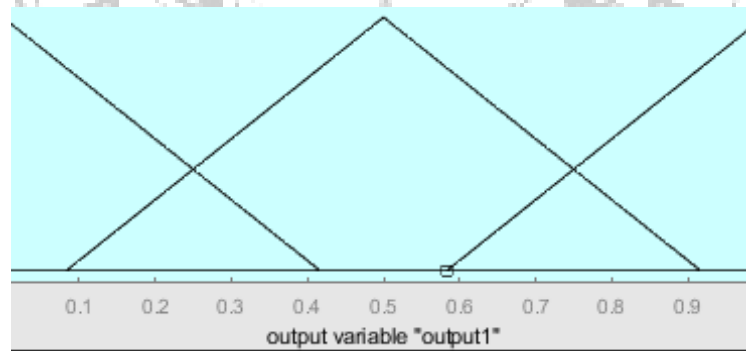
Gambar 2. 12. Istilah Linguistik Dingin-Normal-Panas

2.3.2. Komponen Sistem Inferensi Fuzzy

Sistem inferensi fuzzy (*Fuzzy Inference System/FIS*) terdiri dari 4 komponen utama yang bekerja secara sekuensial untuk mengubah *input* numerik menjadi *output* numerik, ke 4 komponen tersebut merupakan inti dari kontroler fuzzy yaitu:

2.3.2.1. Fuzzifikasi

Proses mengubah nilai numerik (*crisp*) menjadi nilai linguistik fuzzy. Nilai tersebut kemudian dimasukkan ke dalam fungsi keanggotaan, seperti bentuk segitiga, trapesium, atau Gaussian, untuk menentukan derajat keanggotaannya (Sumber: [Referensi tentang Fuzzifikasi, misalnya: Wang, 1997]).



Gambar 2. 13. Fungsi Keanggotaan Berbentuk Segitiga

2.3.2.2. Basis Aturan (*Rule base*)

Basis aturan adalah Merupakan kumpulan aturan *IF-THEN* yang mendeskripsikan bagaimana sistem merespons berbagai kondisi *input*. Contoh

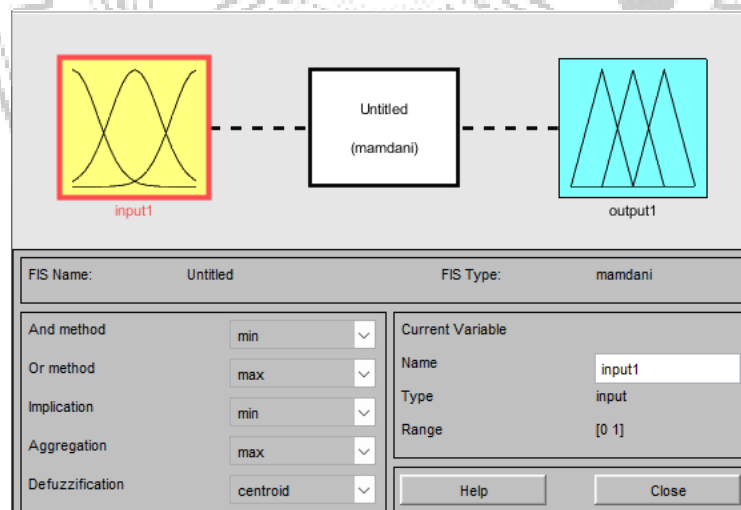
aturan: "JIKA suhu dingin DAN kelembaban tinggi MAKA pemanas hidup DAN kipas cepat (Hartanto *et al.*, n.d.).

2.3.2.3. Mesin Inferensi (*Inference Engine*)

Mesin inferensi fuzzy adalah Bagian inti dari sistem fuzzy yang mengaplikasikan aturan-aturan menggunakan operator logika fuzzy (seperti AND, OR) dan menghasilkan *output* fuzzy. Dua jenis mesin inferensi yang umum adalah:

1. Mamdani: Metode ini menghasilkan *output* berupa himpunan fuzzy, yang kemudian perlu didefuzzifikasi. Prosesnya melibatkan:

- **Aplikasi Operator Fuzzy:** Menerapkan operator logika (AND, OR) pada bagian antecedent (IF) dari aturan. Operator AND umumnya menggunakan min (minimum) dan operator OR menggunakan max (maksimum).
- **Implikasi:** Menggabungkan nilai keanggotaan hasil operator fuzzy dengan fungsi keanggotaan *output*. Umumnya menggunakan operator min (disebut juga *min implication*).
- **Agregasi:** Menggabungkan semua *output* fuzzy dari setiap aturan menjadi satu himpunan fuzzy *output* gabungan. Umumnya menggunakan operator

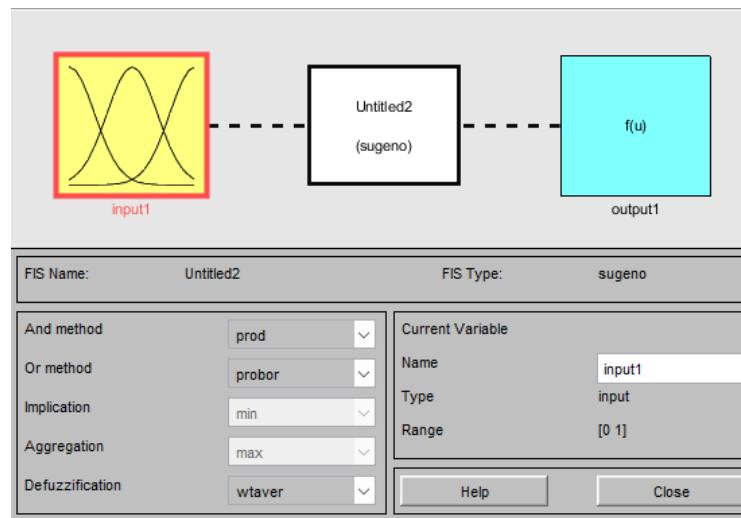


Gambar 2. 14. Fuzzy Mamdani

Metode ini sering digunakan karena hasil *output*nya lebih intuitif.

2. Sugeno: Menghasilkan nilai crisp atau fungsi linier sebagai *output* dari setiap aturan, yang kemudian dihitung rata-ratanya. Metode ini cocok untuk sistem yang memerlukan komputasi lebih cepat karena *Output* dari setiap

aturan biasanya adalah konstanta atau fungsi linear dari *input* (Sarimuthu *et al.*, 2016).

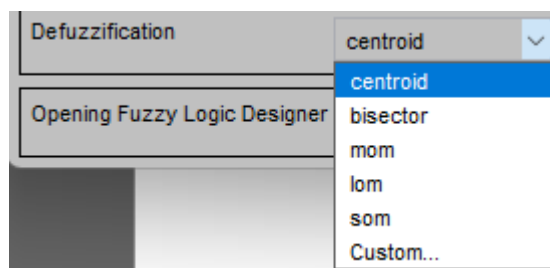


Gambar 2. 15. Fuzzy Sugeno

2.3.2.4. Defuzzifikasi (Defuzzification)

Defuzzifikasi adalah proses kebalikan dari fuzzifikasi, yaitu mengubah fuzzy set *output* yang dihasilkan oleh mesin inferensi kembali menjadi nilai crisp (numerik) yang dapat digunakan oleh aktuatur. Ada beberapa metode defuzzifikasi, yang paling umum adalah:

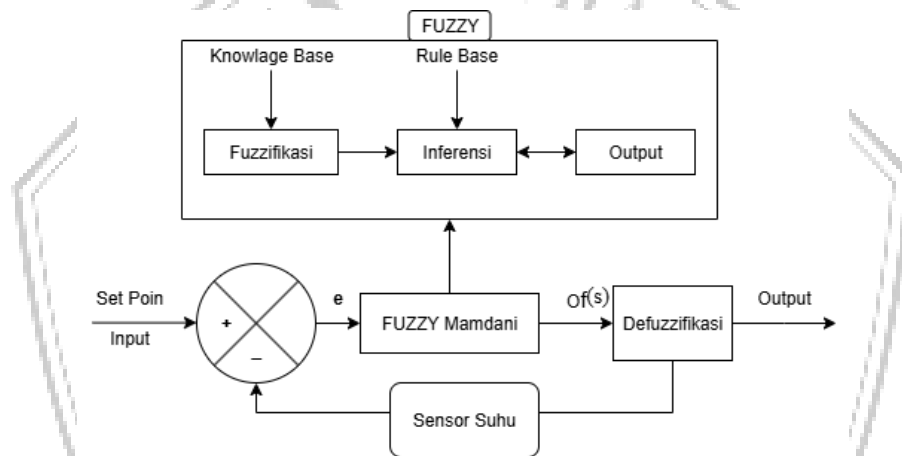
1. *Centroid* (Pusat Gravitasi): Menghitung pusat area di bawah kurva fuzzy set *output* gabungan. Metode ini menghasilkan nilai *output* yang halus dan berkelanjutan.
2. *Mean of Maximum* (MOM): Menghitung rata-rata dari nilai-nilai crisp yang memiliki derajat keanggotaan maksimum.
3. Metode *Bisector*: Membagi luasan di bawah kurva fungsi keanggotaan menjadi dua bagian yang sama (Waspada *et al.*, n.d.).



Gambar 2. 16. Opsi Defuzzifikasi

2.3.3. Diagram Blok Sistem Fuzzy

Diagram blok sistem kontrol fuzzy menggambarkan alur dari *input* sensor hingga *output* ke aktuator. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.17, proses dimulai dari pembacaan data suhu aktual dari sensor, yang kemudian digunakan secara langsung sebagai *input* bagi sistem fuzzy. Melalui proses fuzzifikasi, nilai suhu aktual tersebut diubah menjadi nilai derajat keanggotaan dalam himpunan fuzzy, yang selanjutnya diproses oleh mesin inferensi menggunakan basis aturan yang telah ditentukan. *Output* fuzzy hasil inferensi kemudian diubah kembali menjadi nilai crisp melalui proses defuzzifikasi, dan digunakan untuk mengendalikan aktuator seperti kipas (*blower*) guna menyesuaikan suhu di dalam SDD secara otomatis. (Muttaqi *et al.*, 2024).



Gambar 2. 17. Diagram Blok Sistem Fuzzy

2.3.4. Keunggulan Logika Fuzzy Dalam Sistem Kontrol

Setelah dibandingkan dengan metode kontrol lainnya, berikut ini adalah rangkuman keunggulan logika fuzzy secara teoritis yang membuatnya sangat cocok digunakan dalam sistem kontrol suhu SDD. Logika Fuzzy menawarkan beberapa keunggulan dalam aplikasi sistem kontrol, terutama untuk sistem yang kompleks, non linier, atau sulit dimodelkan secara matematis:

1. Kemampuan Menangani Ketidakpastian: Dapat bekerja dengan *input* yang tidak presisi atau tidak lengkap, mendekati cara berpikir manusia.
2. Representasi Pengetahuan Manusia: Memungkinkan integrasi pengetahuan ahli dalam bentuk aturan linguistik yang mudah dipahami, tanpa perlu model matematis yang rumit.

3. Robustness: Kurang sensitif terhadap variasi parameter sistem atau gangguan eksternal, sehingga kinerja tetap stabil.
4. Fleksibilitas: Mudah untuk menambah, mengurangi, atau memodifikasi aturan dan fungsi keanggotaan untuk tuning kinerja sistem.
5. Implementasi yang Relatif Mudah: Meskipun konsepnya tampak kompleks, implementasi algoritma fuzzy dalam mikrokontroler atau perangkat lunak relatif mudah (Sarimuthu *et al.*, 2016).

2.4. Human Machine Interface (HMI)

Human Machine Interface (HMI), atau antarmuka manusia dengan mesin, adalah jembatan komunikasi antara operator manusia dan sistem mesin atau proses. Dalam sistem kontrol, HMI berfungsi sebagai panel kontrol terpusat di mana operator dapat memantau status sistem, memasukkan perintah, menyesuaikan parameter, dan menerima umpan balik mengenai kinerja sistem. Keberadaan HMI sangat esensial dalam sistem kontrol suhu SDD karena memungkinkan operator untuk memonitor kondisi suhu pengeringan secara *real time* dan melakukan intervensi jika diperlukan (Jeecae *et al.*, 2023).

2.4.1. Fungsi HMI

HMI berfungsi sebagai jembatan yang menerjemahkan data kompleks dari sistem menjadi informasi yang mudah dipahami oleh operator, dan sebaliknya, menerjemahkan perintah operator menjadi instruksi yang dapat dieksekusi oleh mesin. Fungsi-fungsi utama HMI meliputi:

- Pemantauan (*monitoring*) parameter proses
- Pengaturan parameter dan setpoint
- Pemberian alarm dan peringatan
- Visualisasi data historis (Jeecae *et al.*, 2023).

2.4.2. Komponen Dasar HMI

Komponen dasar sebuah HMI bervariasi tergantung jenisnya, namun umumnya mencakup:

1. Layar Tampilan: Untuk menampilkan informasi grafis atau tekstual.
2. *Input Device*: Misalnya, tombol fisik, layar sentuh, keyboard, atau mouse untuk interaksi operator.

3. Unit Pemroses: Mikrokontroler atau komputer *embedded* yang menjalankan perangkat lunak HMI.
4. Port Komunikasi: Untuk terhubung dengan PLC, mikrokontroler, atau perangkat lain (misalnya, serial, Ethernet, USB).
5. Perangkat Lunak: Aplikasi yang berjalan pada HMI untuk menampilkan antarmuka dan mengelola data (*Interface*, n.d.).

2.4.3. Pentingnya HMI dalam Kontrol Suhu SDD

Dalam konteks sistem kontrol suhu SDD, HMI memiliki peran yang sangat penting karena memberikan manfaat signifikan:

1. Kemudahan Pengoperasian: Antarmuka yang intuitif mengurangi kompleksitas pengoperasian sistem, bahkan bagi operator yang kurang familiar dengan detail teknis kontrol.
2. Pemantauan *Real time* yang Efisien: Operator dapat dengan cepat memahami status keseluruhan sistem, seperti suhu aktual di berbagai titik, status *heater* dan *blower*, serta mengidentifikasi potensi masalah.
3. Pengaturan Parameter: Memungkinkan operator untuk memilih mode operasi seperti kecepatan *blower* secara manual, serta menyesuaikan parameter lain yang berkaitan dengan pemantauan dan kontrol proses pengeringan.
4. Diagnosis dan Pemecahan Masalah Cepat: Visualisasi data dan sistem alarm memungkinkan identifikasi cepat terhadap anomali atau *error*, meminimalkan downtime.
5. Peningkatan Keamanan dan Efisiensi: Operator dapat mengambil tindakan korektif atau menghentikan proses secara cepat dalam situasi darurat, serta memonitor data untuk optimasi proses. (Jeecae *et al.*, 2023).

2.4.4. Jenis-jenis HMI yang Umum Digunakan

HMI hadir dalam berbagai bentuk, disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi. Jenis HMI antara lain:

1. Panel Operator: Perangkat *stand alone* dengan layar kecil dan tombol fisik, sering digunakan untuk mengontrol mesin tunggal atau proses sederhana.
2. Layar Sentuh (*Touch Panel HMI*): Lebih fleksibel dengan antarmuka grafis yang dapat disesuaikan, memungkinkan interaksi langsung melalui

sentuhan. Ini adalah jenis yang paling umum digunakan dalam berbagai aplikasi industri dan otomasi. *Interface* ini akan digunakan dalam sistem kontrol dan *monitoring* suhu SDD seperti HMI Haiwel C7H-EW.

3. Sistem SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*): HMI berbasis komputer (PC atau *embedded system*) yang digunakan untuk memantau dan mengendalikan sistem berskala besar atau kompleks. SCADA dapat menampilkan data dari banyak titik pengukuran secara simultan, menyimpan data historis, memberikan alarm, dan menghasilkan laporan. SCADA biasanya digunakan bersama HMI konvensional untuk memberikan kontrol dan pemantauan yang lebih luas dan terpusat (Solusindo, D.M., 2012).

Dalam sistem kontrol suhu SDD ini, pendekatan SCADA digunakan untuk menampilkan data suhu secara *real time*, mengatur parameter fuzzy, dan mengirimkan perintah kontrol dari antarmuka grafis ke perangkat di lapangan seperti PLC, ESP32, dan inverter.

2.4.5. HMI Haiwell C7H-EW

Penggunaan HMI Haiwell seri C7E dalam sistem pengendalian suhu didasarkan pada berbagai keunggulan teknis dan fungsional yang dimilikinya. HMI ini menyediakan solusi antarmuka modern yang handal, fleksibel, dan terjangkau untuk aplikasi industri berskala kecil hingga menengah yaitu:

- **Layar Sentuh Interaktif**
Mendukung layar sentuh kapasitif/resistif, memudahkan interaksi langsung dalam sistem pengendalian suhu.
- **Kompatibel dengan Modbus RTU/TCP**
Dapat berkomunikasi dengan ESP32, PLC, dan perangkat lain menggunakan protokol industri standar seperti Modbus RTU RS485.
- **Multi Port Komunikasi**
Memiliki beberapa port serial dan Ethernet, memungkinkan komunikasi ke beberapa perangkat secara simultan.
- **User Interface Profesional**
Software desain HMI Haiwell Touch dan Haiwell Cloud SCADA mendukung pembuatan antarmuka visual yang *user friendly* dan responsif.

- Kapasitas Penyimpanan Cukup Besar
Mendukung penyimpanan data historis, alarm, dan logging suhu jika dibutuhkan.
- Harga Terjangkau dan Tahan Lingkungan
Cocok untuk aplikasi pengering seperti SDD yang beroperasi di lingkungan semi *outdoor* (Iot & Dtu, n.d.).



Gambar 2. 18. HMI Haiwell C7H-EW

Tabel 2. 8. Datasheet HMI Haiwel C7H-EW

Parameter	Spesifikasi
Model	Haiwell C7H-EW
Ukuran Layar	7 inci TFT LCD
Resolusi Layar	800 × 480 piksel
Warna Tampilan	16,7 juta warna (True Color)
Jenis Layar Sentuh	<i>Resistive</i> atau <i>Capacitive</i> (tergantung model)
Protokol Komunikasi	Modbus RTU, Modbus TCP, Haiwell PLC, OPC, dll.
Port Komunikasi	RS232, RS485, Ethernet (LAN RJ45)
Memori Internal	128 MB Flash, 64 MB RAM
Penyimpanan Eksternal	Mendukung SD Card (tergantung model)
Tegangan Operasi	DC 24V (18–30V DC)
Temperatur Operasional	0°C – 50°C
Perangkat Lunak	HaiwellTouch (gratis), mendukung Haiwell Cloud SCADA
Fitur Tambahan	<i>Real time</i> clock, Data Logging, Alarm Sistem

2.4.6. Integrasi SCADA dalam Sistem HMI

Sistem HMI pada proyek ini tidak hanya menggunakan panel lokal pada HMI C7H-EW, tetapi juga memanfaatkan Haiwell Cloud SCADA, sebuah platform

Supervisory Control dan Data Acquisition berbasis awan (*cloud*). Penggunaan sistem SCADA ini memberikan sejumlah keunggulan tambahan:

- Akses Jarak Jauh: Operator dapat mengakses data suhu, status perangkat, dan grafik proses pengeringan dari mana saja menggunakan laptop, tablet, atau smartphone.
- Pemantauan dan *Logging* Berbasis Cloud: Data suhu dan status sistem direkam secara historis dan dapat diakses untuk analisis performa maupun laporan kegiatan.
- Visualisasi Proses Interaktif: Grafik suhu, animasi status pemanas dan *blower*, serta indikator sistem ditampilkan secara *real time* dalam antarmuka SCADA yang intuitif.
- Peningkatan Keamanan Sistem: SCADA dilengkapi dengan sistem login dan hak akses pengguna, sehingga hanya personel berwenang yang dapat melakukan perubahan parameter penting.
- Responsif terhadap Alarm: Sistem alarm otomatis dapat dikonfigurasi untuk mengirim notifikasi ke pengguna jika terjadi penyimpangan suhu atau kegagalan sistem.

Dengan menggabungkan HMI fisik dan SCADA berbasis cloud, sistem ini menjadi lebih fleksibel, informatif, dan mampu mendukung pemantauan serta pengendalian suhu SDD secara efisien dan adaptif terhadap kebutuhan lapangan (Rifky *et al.*, 2024).

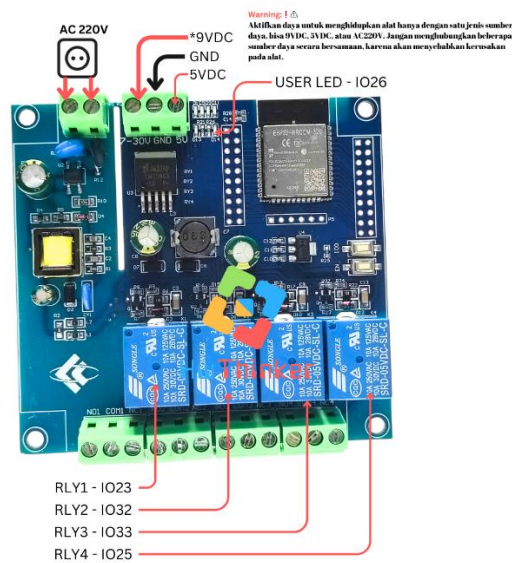
2.5. Hardware Utama Sistem

Sub-bab ini menjelaskan perangkat keras utama sistem secara umum (yang ada di pasaran) dan pondasi komunikasi yang digunakan. Detail implementasi spesifik model dan pengkabelan akan dijelaskan lebih lanjut di Bab 3.

2.5.1. Modul ESP32 WROOM 32-E with Relay 4 Channel

Mikrokontroler adalah "otak" dari sistem kontrol yang bertanggung jawab untuk memproses data, menjalankan algoritma kontrol, dan mengelola komunikasi dengan perangkat lain. **ESP32** adalah sebuah *System on Chip* (SoC) yang dikembangkan oleh Espressif Systems, dikenal luas karena integrasinya yang kuat antara kemampuan komputasi mikroprosesor *dual core* dengan konektivitas

nirkabel Wi-Fi dan Bluetooth Low Energy (BLE) pada satu *chip*. Kemampuan ini menjadikannya pilihan populer untuk aplikasi *Internet of Things* (IoT) dan sistem kontrol yang membutuhkan konektivitas. ESP32 dilengkapi dengan berbagai *General Purpose Input/Output* (GPIO) multifungsi, *Analog to Digital Converter* (ADC), *Universal Asynchronous Receiver Transmitter* (UART), dan antarmuka komunikasi lainnya (misalnya SPI, I2C), yang memungkinkannya berinteraksi dengan berbagai sensor dan aktuator (Imran *et al.*, 2024).



Gambar 2. 19. Modul ESP32 WROOM 32-E with Relay 4 Channel

Tabel 2. 9. Datasheet Modul ESP32 WROOM 32-E with Relay 4 Channel

Parameter	Spesifikasi
Mikrokontroler	ESP32-WROOM-32
CPU	Dual core 32 bit Xtensa LX6, hingga 240 MHz
Memori	520 KB SRAM, 4 MB Flash
Konektivitas	Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth 4.2 BLE
Jumlah Relay	4 channel (SRD-05VDC-SL-C)
Tegangan <i>Trigger</i> Relay	3.3 V (dikontrol langsung oleh ESP32)
Kapasitas Kontak Relay	10 A 250 VAC / 10 A 30 VDC
Tipe Kontak Relay	NO (<i>Normally Open</i>), COM (<i>Common</i>), NC (<i>Normally Closed</i>)
Catu Daya <i>Input</i>	85–265 V AC (<i>universal input</i>)
Catu Daya <i>Output</i>	5 V DC via <i>switching Power Supply</i> internal
Terminal Power	3 pin: AC (L), AC (N), GND / 5V (tergantung jalur)
Header ESP32	38 pin (2x19), cocok dengan pinout DevKit ESP32
Header GPIO Tambahan	18 pin (untuk sensor/ekspansi tambahan)

LED Indikator	4 buah (menandai status <i>ON/OFF</i> masing-masing relay)
Tombol	2 tombol (<i>BOOT</i> dan <i>RESET/EN</i> untuk upload <i>firmware</i>)
Ukuran PCB (estimasi)	$\pm 85 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$
Fitur Tambahan	Kompatibel Arduino IDE / ESP-IDF / PlatformIO
Aplikasi Umum	<i>Smart Home</i> , Kontrol Beban AC, Proyek IoT, Otomasi Industri Ringan

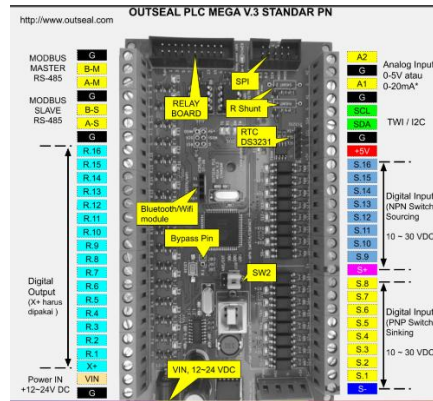
2.5.2. Programmable Logic Controller (PLC)

PLC adalah perangkat elektronik digital yang dirancang khusus untuk digunakan dalam lingkungan industri guna mengotomatisasi proses kontrol. PLC memiliki kemampuan untuk menerima sinyal *input* dari berbagai sensor, memproses logika berdasarkan program yang telah diprogramkan, dan menghasilkan *output* untuk mengendalikan aktuator seperti motor, lampu, relay, atau sistem kontrol lainnya.

PLC memiliki karakteristik utama berupa:

- Pemrograman logika berbasis ladder diagram (LD), function block (FBD), atau structured text (ST).
- Tahan terhadap kondisi industri, seperti getaran, suhu ekstrem, dan gangguan elektromagnetik.
- Mendukung komunikasi dengan protokol industri, seperti Modbus, Profibus, Ethernet/IP, dll.
- Modular dan fleksibel, sehingga dapat dikembangkan sesuai dengan kebutuhan sistem.

Dalam konteks sistem kontrol suhu dan *blower* pada SDD, PLC Outseal V.3 Standard PN digunakan sebagai aktuator digital untuk mengatur pemilihan frekuensi inverter dan aktivasi motor *blower*. PLC menerima *input* dari HMI, kemudian mengontrol *output* sesuai dengan logika ladder diagram yang telah diprogram, seperti menyalakan *blower*, memilih frekuensi (35 Hz, 40 Hz, 50 Hz), dan mengatur kondisi *heater* berdasarkan logika sistem (Outseal. n.d., Akses 2025).



Gambar 2. 20. Outseal Mega V.3 Standard PN

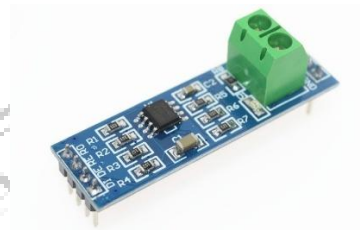
Tabel 2. 10. Datasheet PLC Outseal

Parameter	Spesifikasi
Model	Outseal Mega V.3 Standard PN
Mikrokontroler	ATmega128A
Tegangan Operasi	12–24V DC
Jumlah <i>Input</i> Digital	8–16 kanal (tergantung konfigurasi)
Jumlah <i>Output</i> Digital	8 kanal (NPN <i>open collector</i>)
Jenis <i>Output</i> Digital	Transistor NPN + diode proteksi internal
Jumlah <i>Input</i> Analog	2 kanal
Tipe <i>Input</i> Analog	0–5V DC / 0–20mA (dengan shunt resistor)
Komunikasi	RS485 <i>Master</i> dan <i>Slave</i> , USB, Bluetooth (opsional)
Port Komunikasi	RS-485, USB, TTL, Bluetooth (modul tambahan)
Proteksi <i>Output</i>	Dioda proteksi internal per kanal
Metode Pemrograman	<i>Ladder Logic</i> via Outseal Studio
Memori Program	512 KB (flash memory internal)
Koneksi Serial	2x RS485 (1 <i>master</i> , 1 <i>slave</i>)
Ukuran Fisik	±115mm x 90mm x 40mm
Fitur Tambahan	<i>Real time</i> debugging, LED status, port ekspansi
Operasi Software	Outseal Studio

2.5.3. Arsitektur Komunikasi Modbus RTU (RS485)

Komunikasi yang handal antar komponen merupakan fondasi utama dalam sistem kontrol yang efektif. Dalam sistem ini, digunakan arsitektur komunikasi Modbus RTU yang berjalan pada lapisan fisik RS485, karena RS485 memungkinkan transmisi data yang stabil untuk jarak jauh dan lingkungan industri yang bising.

Untuk menghubungkan mikrokontroler ESP32 (yang menggunakan sinyal logika TTL 3.3V/5V) dengan perangkat RS485, digunakan modul *transceiver* MAX485. Modul ini berfungsi untuk mengonversi sinyal TTL menjadi sinyal RS485 dan sebaliknya, memungkinkan komunikasi dua arah (*half duplex*) antar perangkat seperti ESP32, HMI, dan modul akuisisi suhu PT100 (PTAB008), yang semuanya menggunakan protokol Modbus RTU melalui RS485 (Lanka *et al.*, 2020).



Gambar 2. 21. MAX485 to TTL

Tabel 2. 10. Datasheet MAX485

Parameter	Spesifikasi
Nama IC / Modul	MAX485 / Modul MAX485 TTL to RS485
Fungsi Utama	<i>Transceiver</i> TTL ↔ RS485 (<i>half duplex</i>)
Tegangan Operasi (Vcc)	5 V DC (standar TTL)
Tegangan TTL <i>Interface</i>	0 – 5 V TTL
Arus Operasi	< 500 μ A (<i>low power operation</i>)
Kecepatan Data Maksimum	Hingga 2.5 Mbps
Mode Transmisi	Half duplex (1 jalur data bergantian TX/RX)
Jarak Komunikasi Maksimum	Hingga 1200 meter (dengan kabel twisted pair dan terminasi yang tepat)
Jumlah <i>Node</i> (<i>Multi drop</i>)	Maks. 32 <i>transceiver</i> pada satu bus RS485
Proteksi	\pm 15 kV ESD <i>protection</i> (dalam versi IC aslinya)
Pin Penting Modul	<ul style="list-style-type: none"> ▪ RO (<i>Receiver Out</i>), ▪ DI (<i>Driver In</i>), ▪ DE (<i>Driver Enable</i>), ▪ RE (<i>Receiver Enable</i>), ▪ A, ▪ B, ▪ Vcc, ▪ GND.
Koneksi RS485 ke perangkat lain	Terminal A dan B

Dimensi Modul	$\pm 44 \times 15$ mm (modul umum)
Aplikasi	Modbus RTU, komunikasi antar ESP32, sensor industri, HMI, PLC, dll.

2.5.3.1. Protokol Modbus RTU

Modbus RTU adalah salah satu protokol komunikasi serial yang paling banyak digunakan di industri untuk menghubungkan berbagai perangkat elektronik dalam sistem otomasi. Protokol ini menggunakan arsitektur *master slave*, di mana satu perangkat (*master*) bertugas memulai komunikasi dan mengirimkan permintaan data atau perintah ke satu atau lebih perangkat *slave*. Perangkat *slave* hanya akan merespons ketika alamatnya dikenali oleh *master*.

Modbus RTU menggunakan format data biner ringkas yang efisien, menjadikannya cocok untuk komunikasi *real time* di lingkungan industri. Data dikemas dalam struktur *frame* tertentu dan dikelola melalui berbagai jenis *register*, seperti:

- Menyimpan nilai analog atau parameter yang dapat dibaca dan ditulis, seperti nilai frekuensi kontrol, status sistem, atau parameter lain yang dibutuhkan untuk pengaturan proses.
- *Input Register*: menyimpan nilai sensor analog yang hanya bisa dibaca.
- Coil dan *Discrete Input*: masing-masing untuk sinyal digital *output* dan *input*.

Keunggulan Modbus RTU terletak pada kesederhanaan implementasi, ketahanan terhadap *noise* (robustness), dan dukungan luas di perangkat industri seperti HMI, PLC, sensor, hingga mikrokontroler. Karakteristik ini menjadikannya pilihan ideal untuk sistem kendali berbasis ESP32 seperti pada proyek pengering SDD.

Struktur *Frame* Modbus RTU. *Frame* data dalam Modbus RTU dapat di lihat pada tabel 2.11 :

Tabel 2. 11. Struktur *Frame* Modbus RTU

Komponen	Fungsi
<i>Address</i>	Alamat <i>slave</i> (rentang 1–247)
<i>Function Code</i>	Menentukan jenis permintaan, seperti membaca coil atau menulis <i>register</i>

Data	Informasi aktual yang dikirim atau diminta (nilai, alamat <i>register</i> , dll)
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i> , digunakan untuk verifikasi integritas data

Tabel 2. 11. Jenis Register dalam Modbus

Tipe Register	Fungsi	Keterangan
Coil (00001–09999)	<i>Digital Output</i> (ON/OFF)	Bisa dibaca dan ditulis
<i>Discrete Input</i>	<i>Digital Input</i>	Hanya dapat dibaca
<i>Input Register</i>	<i>Analog Input</i> (misal suhu/arus)	Hanya dapat dibaca
<i>Holding Register</i>	<i>Analog Output</i> / Nilai kontrol	Bisa dibaca dan ditulis

2.5.3.2. *Transceiver* RS485 (MAX485) dan *Repeater Hub* RS485

RS485 adalah standar lapisan fisik untuk komunikasi serial yang sangat cocok untuk lingkungan industri karena kemampuan transmisi data jarak jauh (hingga 1.2 km) dan ketahanan terhadap *noise* yang tinggi. RS485 menggunakan sinyal diferensial untuk transmisi data, yang membuatnya kurang rentan terhadap interferensi elektromagnetik dibandingkan sinyal *single ended*. Untuk menghubungkan mikrokontroler (yang umumnya menggunakan sinyal level TTL/CMOS) ke bus RS485, diperlukan konverter RS485 ke TTL (*Transceiver*). Perangkat ini berfungsi sebagai jembatan level sinyal, mengubah sinyal TTL menjadi sinyal RS485 dan sebaliknya (Lanka *et al.*, 2020).

Dalam jaringan RS485 yang memiliki banyak perangkat atau mencakup jarak yang sangat panjang, *Repeater Hub* RS485 digunakan untuk memperkuat sinyal data. *Repeater* ini menerima sinyal RS485 yang mungkin sudah melemah atau terdistorsi, membersihkan *noise* (jika ada), dan mengirimkannya kembali dengan kekuatan sinyal penuh ke segmen jaringan selanjutnya. *Repeater Hub* juga dapat menyediakan isolasi galvanis antar segmen, meningkatkan keandalan,

keamanan, dan kapasitas jumlah *node* dalam satu bus RS485 dengan mengatasi batasan jumlah unit beban (Description, n.d.).



Gambar 2. 22. Repeater Hub RS485

2.5.3.3. Topologi Jaringan Komunikasi

Dalam sistem tugas akhir ini, protokol komunikasi Modbus RTU digunakan sebagai jalur utama pertukaran data antara perangkat-perangkat utama, seperti HMI Haiwell C7H-EW, ESP32 WROOM-32E, dan modul pembaca suhu PTAB008. Komunikasi fisik menggunakan standar RS485, yang memungkinkan koneksi antar perangkat dalam jaringan jarak jauh dan multipoint secara efisien. Sistem ini menerapkan model topologi *master-slave*, di mana HMI Haiwell berperan sebagai *master* tunggal, yang menginisiasi semua proses komunikasi dan pengambilan data. HMI membaca data suhu dari ESP32 dan mengatur logika kerja sistem berdasarkan mode operasi yang dipilih pengguna seperti pilih mode manual/auto.

Sementara itu, ESP32 berperan sebagai *slave* terhadap HMI, yaitu merespons permintaan data dari HMI melalui *register* Modbus RTU. Namun secara bersamaan, ESP32 juga menjalankan peran Modbus *master* sekunder untuk mengakses modul PTAB008, yang merupakan *slave* murni dalam jaringan ini. PTAB008 bertugas membaca nilai suhu dari tiga sensor PT100, dan nilainya dikirim ke ESP32 untuk diproses oleh logika fuzzy. Dalam sistem ini juga digunakan RS485 *Repeater* untuk memperkuat dan menjaga stabilitas sinyal komunikasi, terutama jika kabel komunikasi cukup panjang atau banyak *node* terhubung. *Repeater* ini tidak berperan aktif dalam pengolahan data, melainkan hanya bertugas memperpanjang jangkauan fisik komunikasi RS485 (Lanka *et al.*, 2020).

Dengan konfigurasi ini, komunikasi antar perangkat berlangsung secara terstruktur dan efisien, memisahkan peran *master slave* secara jelas. HMI hanya berkomunikasi dengan ESP32, sementara ESP32 bertugas menghubungkan logika

fuzzy dan akuisisi data suhu dari PTAB008. Hal ini membuat sistem lebih modular dan fleksibel dalam pengembangannya.

Tabel 2. 12. Model 1 Master dan Multi slave

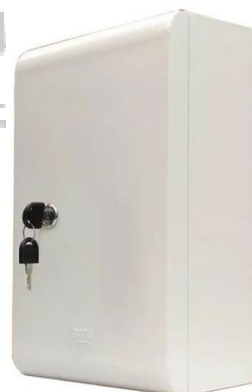
Perangkat	Peran dalam Modbus RTU
HMI Haiwell C7H-EW	<i>Master</i>
ESP32 WROOM-32E	<i>Slave</i>
PTAB008 (PT100 Reader)	<i>Slave</i>
RS485 <i>Repeater</i> (jika aktif sebagai <i>node</i>)	<i>Slave</i> (pasif/relay sinyal)

2.5.4. Komponen Catu Daya dan Pengaman Sistem

Untuk memastikan operasional sistem kontrol yang aman, stabil, dan andal, diperlukan komponen pendukung yang mengatur catu daya, menyediakan fitur pengaman, dan memfasilitasi instalasi pengkabelan yang rapi.

2.5.4.1. Panel Kontrol dan Enclosure

Panel kontrol atau enclosure adalah kabinet atau kotak pelindung yang digunakan untuk menempatkan dan melindungi komponen-komponen elektronik dan listrik dari lingkungan eksternal seperti debu, kelembaban, atau kerusakan fisik. Selain fungsi proteksi, panel ini juga menyediakan struktur yang terorganisir untuk pengkabelan dan penempatan perangkat, serta seringkali menjadi titik akses utama bagi operator untuk interaksi dengan sistem. Pemilihan material dan spesifikasi enclosure (misalnya, rating IP) disesuaikan dengan lingkungan operasional (Johnson, 2002).



Gambar 2. 23. Panel Kontrol

2.5.4.2. *Miniature Circuit Breaker (MCB)*

Miniature Circuit Breaker (MCB) adalah perangkat proteksi arus lebih yang dirancang untuk secara otomatis memutus sirkuit listrik ketika arus yang mengalir melebihi batas aman yang ditentukan (beban lebih) atau ketika terjadi hubungan singkat (korsleting). MCB berfungsi untuk melindungi peralatan listrik dari kerusakan dan mencegah bahaya kebakaran atau sengatan listrik. Mereka juga dapat berfungsi sebagai sakelar manual untuk mengisolasi sebagian sirkuit untuk tujuan perawatan atau pengaktifan sistem secara aman (Size *et al.*, 2019).



Gambar 2. 24. MCB C4 dan C6

Tabel 2. 13. Datasheet MCB C4 dan C6

Kategori	C6 (2-pole, 6 A)	C4 (2-pole, 4 A)
Karakteristik trip	C (trip pada $5-10 \times I_n$)	C (trip pada $5-10 \times I_n$)
Arus nominal (I_n)	6 A	4 A
Tegangan isolasi (U_i)	440 VAC	440 VAC

2.5.4.3. Tombol *Push Emergency Stop*

Tombol *push Emergency Stop* adalah komponen keselamatan kritis yang dirancang untuk menghentikan operasional seluruh mesin atau sistem secara cepat dalam situasi darurat. Karakteristiknya adalah mudah diakses, berwarna merah, dan memiliki mekanisme penguncian (*latching*) sehingga tetap pada posisi "off" sampai di reset secara manual. Fungsi utamanya adalah untuk memutus daya ke aktuator yang berpotensi berbahaya dan mencegah cedera pada operator atau kerusakan serius pada peralatan. Selain fungsi darurat, *push button* juga sering digunakan sebagai sakelar *ON/OFF* untuk mengontrol status daya sistem dalam operasional normal (Stop, n.d.)



Gambar 2. 25. Emergency Stop

2.5.4.4. Power Supply 24V DC (LRS-150-24)

Power Supply (catu daya) adalah perangkat yang mengkonversi energi listrik dari sumber utama (umumnya AC) menjadi tegangan DC yang stabil dan sesuai untuk kebutuhan operasional komponen elektronik dalam sistem kontrol. Catu daya yang stabil dengan kapasitas arus yang memadai sangat penting untuk mencegah malfungsi pada mikrokontroler, sensor, dan *device* elektronik lainnya yang sensitif terhadap fluktuasi tegangan, memastikan kinerja optimal dan keandalan sistem secara keseluruhan (Samuel & Samuel, 2025).



Gambar 2. 26. Power Supply LRS-150-24

Tabel 2. 14. Datasheet Power Supply LRS-150-24

Parameter	Spesifikasi
Model	LRS-150-24
Produsen	Mean Well Enterprises Co., Ltd.
Jenis	Switching Power Supply AC to DC
Input Voltage	85–264 VAC (47–63 Hz), 120–370 VDC
Output Voltage	24 VDC
Output Current (Rated)	6.5 A
Output Power (Rated)	156 W
Efisiensi (Efficiency)	Hingga 89%
Proteksi	Overload, Overvoltage, Overtemperature
Ripple & Noise (max)	150 mVp-p

Toleransi Tegangan <i>Output</i>	±1%
Suhu Operasional	-30°C ~ +70°C (derating di atas 50°C)
Pendingin	Pendingin pasif (konveksi udara alami, tanpa kipas)
Ukuran Fisik	159 × 97 × 30 mm
Berat	±480 gram
Isolasi <i>Input - Output</i>	3 kVAC
Standar Keamanan	UL60950-1, TUV EN60950-1, IEC60950-1
Kesesuaian EMC	EN55032 <i>Class B</i> , EN61000-3-2, EN61000-4-2, -3, -4, -5, -6, -8, -11
Kelebihan Fitur	<i>Low cost, high reliability, low profile design</i>
Aplikasi Umum	Sistem kontrol industri, PLC, HMI, <i>LED Display</i> , <i>IoT Devices</i>

2.5.4.5. Pilot Lamp

Pilot lamp atau lampu indikator adalah komponen visual yang digunakan untuk memberikan informasi status operasional dari suatu sistem atau perangkat kepada operator. Lampu ini dipasang di panel kontrol dan berfungsi sebagai indikator cepat bagi operator untuk mengetahui kondisi sistem, seperti status *ON/OFF*, status alarm, atau status operasional lainnya. Penggunaan pilot lamp membantu meningkatkan keamanan operasional dan efisiensi pemantauan dengan memberikan feedback visual yang jelas (Johnson, 2002).



Gambar 2. 27. Pilot Lamp Merah Kuning Hijau

2.5.4.6. Terminal Block UK 3N

Terminal blok adalah komponen modular yang menyediakan titik koneksi listrik yang aman dan terorganisir untuk kabel-kabel dalam suatu sistem. Mereka terdiri dari blok insulasi dengan konduktor logam yang memungkinkan dua atau lebih kabel disambungkan. Penggunaan terminal blok memastikan koneksi yang rapi, terisolasi, mudah diidentifikasi, serta mempermudah proses instalasi, *troubleshooting*, dan pemeliharaan sistem kelistrikan dan kontrol. Berbagai jenis

terminal blok tersedia, disesuaikan dengan ukuran kawat, tegangan, dan metode koneksi (Sumber: [Referensi tentang terminal block dan instalasi listrik industri, misalnya: IEC 60947-7-1]).



Gambar 2. 28. Terminal Block UK 3N

Tabel 2. 15. Datasheet Terminal Block UK-3N

Parameter	Spesifikasi
Type	UK-3N
Colour	Grey
Wire flexible lead	0.2~2.5mm
Rigidity lead	0.2~4mm
Voltage	AC 800V

2.6. Platform Software

Sub-bab ini membahas platform perangkat lunak yang digunakan dalam perancangan dan implementasi algoritma kontrol serta pemrograman mikrokontroler.

2.6.1. Arduino IDE 2.3.6

Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) adalah lingkungan pengembangan perangkat lunak open source yang dirancang untuk memprogram papan mikrokontroler berbasis Arduino dan kompatibel seperti ESP32. Lingkungan ini mendukung bahasa pemrograman berbasis C/C++ serta menyediakan antarmuka pengguna yang sederhana, menjadikannya sangat populer di kalangan mahasiswa, peneliti, maupun pengembang sistem embedded.

Dalam penelitian ini, Arduino IDE digunakan sebagai platform utama untuk:

- Pemrograman Mikrokontroler ESP32: Arduino IDE digunakan untuk mengembangkan *firmware* yang bertugas membaca data suhu dari modul

akuisisi data PTAB008 melalui protokol Modbus RTU, menjalankan logika fuzzy langsung pada mikrokontroler, serta mengendalikan aktuator berupa SSR dan inverter kecepatan *blower* melalui sinyal digital GPIO.

- Integrasi Perangkat Keras: Arduino IDE memfasilitasi komunikasi antara ESP32 dengan perangkat eksternal seperti *Transceiver* RS485, relay, dan HMI, menggunakan berbagai pustaka (*library*) pendukung seperti *ModbusMaster*, *HardwareSerial*, dan *Wire*.
- Penggunaan Arduino IDE mempermudah implementasi sistem kontrol suhu berbasis logika fuzzy karena dukungan komunitas yang luas, dokumentasi lengkap, serta kompatibilitas tinggi dengan berbagai modul dan sensor (Ide, n.d.).



Gambar 2. 29. Logo Arduino IDE

2.6.2. Modbus Poll / Modbus Slave

Modbus Poll dan Modbus *Slave* adalah aplikasi perangkat lunak berbasis Windows yang berfungsi sebagai alat debugging dan pengujian untuk komunikasi Modbus RTU.

- Modbus Poll: Berfungsi sebagai simulasi perangkat Modbus *Master*. Perangkat lunak ini memungkinkan pengguna untuk membaca dan menulis *register* (*coil*, *input*, *holding*, *discrete input*) pada perangkat Modbus *slave* yang terhubung. Dalam konteks proyek ini, Modbus Poll dapat digunakan untuk:
 - Memverifikasi pembacaan data suhu dari Modul Akuisisi Data PTA8D08 (yang berperan sebagai *slave*).
 - Memantau status *register* pada HMI Haiwell jika HMI dikonfigurasi sebagai *slave* untuk keperluan *debugging*.
 - Menguji *firmware* ESP32 jika ESP32 diatur sebagai *slave* Modbus untuk pengujian.

- Modbus *Slave*: Berfungsi sebagai simulasi perangkat Modbus *Slave*. Aplikasi ini memungkinkan komputer bertindak sebagai Modbus *Slave*, merespons permintaan dari perangkat *master* yang terhubung. Modbus *Slave* dapat digunakan untuk:
 - Menguji fungsi Modbus *master* pada ESP32 dengan mensimulasikan respons dari Modul PTA8D08 atau PLC Outseal.
 - Menguji HMI Haiwell jika HMI dikonfigurasi sebagai *master* yang membaca data dari komputer yang mensimulasikan ESP32 atau PLC.

Penggunaan kedua alat ini sangat membantu dalam proses pengembangan dan *troubleshooting* sistem komunikasi Modbus, memastikan bahwa setiap perangkat Modbus berkomunikasi dengan benar dan data dipertukarkan sesuai harapan sebelum integrasi penuh dilakukan.

(Sumber: [Situs web atau dokumentasi Modbus Poll/Modbus *Slave*; referensi tentang pengujian komunikasi Modbus])

