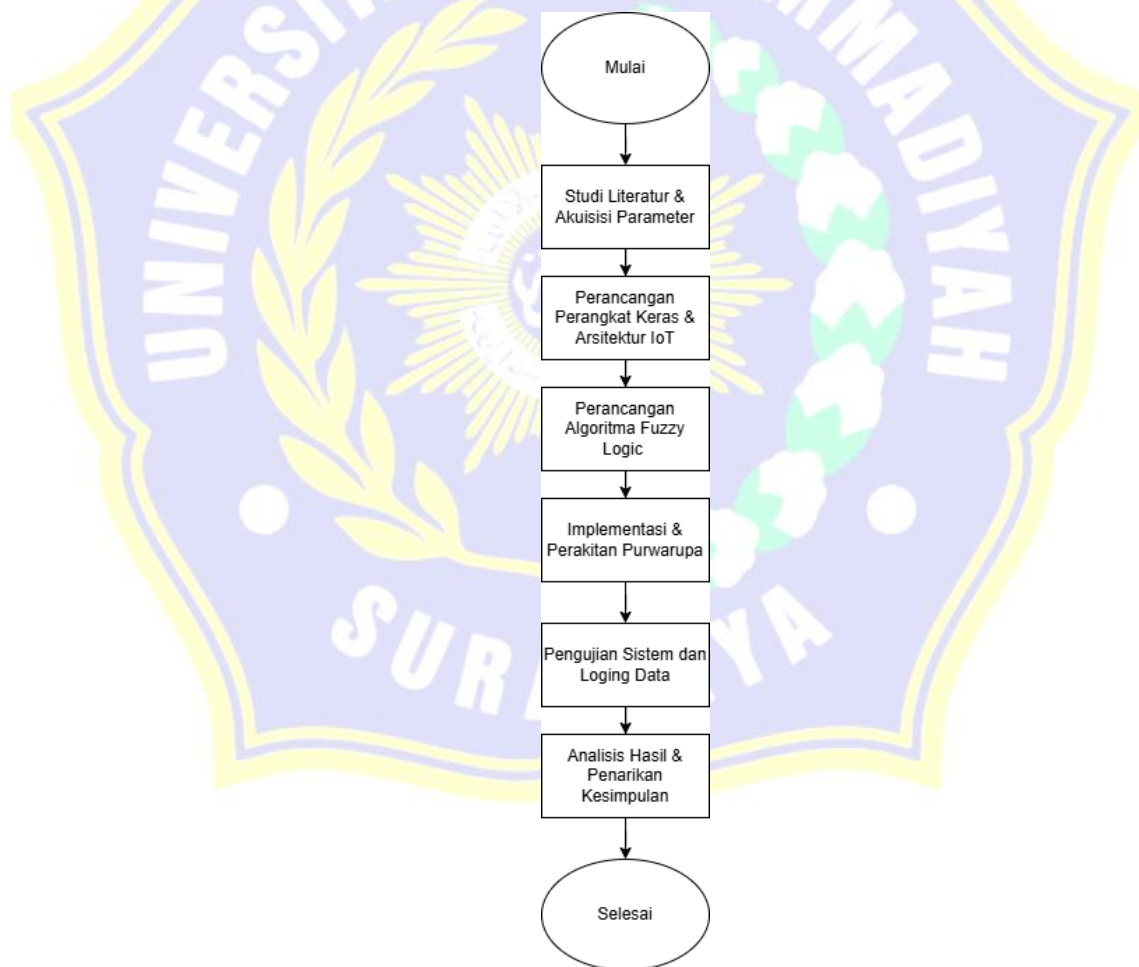


BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Alur metode penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui serangkaian langkah prosedural yang disusun secara sistematis dan terstruktur, dengan fokus utama pada pengembangan sistem kendali cerdas berbasis algoritma Logika Fuzzy untuk prototipe Smart Cold Storage. Kerangka penelitian dirancang untuk memastikan bahwa seluruh aspek perancangan dan pengembangan dapat dilaksanakan secara selaras dan tepat, mulai dari pengumpulan data dari sensor hingga pengoperasian aktuator. Diagram alur yang menunjukkan representasi visual dari keseluruhan proses penelitian ditampilkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Flowchart Alur Metode

Proses penelitian dimulai dengan perolehan pengetahuan mendalam berdasarkan diagram alur ini, yang mencakup tinjauan pustaka dan pengumpulan parameter ahli, dengan merujuk pada standar nasional SNI 2729:2013 serta berbagai sumber literatur biokimia perikanan. Tujuan tahap ini adalah untuk mengekstraksi dan menetapkan ambang batas suhu operasi ideal (0°C – 5°C) serta parameter emisi gas amonia yang akan menjadi acuan bagi sistem untuk mengidentifikasi tingkat degradasi kualitas ikan. Inti komputasi sistem ini adalah algoritma Sistem Inferensi Fuzzy (FIS) tipe Tsukamoto yang dijalankan secara intensif oleh mikrokontroler.

Prosedur komputasi dimulai dengan pengumpulan data numerik secara real-time dari sensor suhu DS18B20 dan sensor gas MQ-135, kemudian dilakukan tahap fuzzifikasi untuk mengubah masukan crisp menjadi derajat keanggotaan himpunan linguistik. Langkah algoritmik berikutnya adalah mengevaluasi aturan-aturan dengan fungsi implikasi monotonik pada sekumpulan aturan IF-THEN. Berbeda dengan metode inferensi lainnya, sistem ini tidak melibatkan proses agregasi area yang rumit secara komputasi dan memakan banyak memori, melainkan menghasilkan nilai-nilai crisp parsial secara langsung dari setiap aturan yang terpicu. Proses komputasi cerdas ini diakhiri dengan tahap defuzzifikasi yang menghasilkan satu nilai ambang batas urgensi absolut dengan menggunakan metode Rata-Rata Tertimbang yang berfungsi sebagai pemicu untuk instruksi digital ke aktuator.

Setelah arsitektur algoritma didefinisikan dan diuji secara teoritis, penelitian dilanjutkan dengan pemodelan sistem dalam lingkungan mikrokontroler ESP32, disertai serangkaian simulasi menggunakan data dummy untuk membuktikan bahwa keluaran matematis algoritma bebas dari kesalahan logika dan kegagalan sistem. Setelah akurasi dan konsistensi hasil komputasi diverifikasi, nilai keluaran defuzzifikasi diterapkan pada aktuator mekanis dengan mengirimkan data logika ke Modul Relay. Modul ini mengaktifkan/menonaktifkan catu daya ke pendingin Peltier dan pendingin cair berdasarkan hasil keputusan komputasi adaptif. Langkah terakhir dari proyek penelitian ini terdiri dari pengujian fungsional dan analisis hasil end-to-end, dengan fokus pada responsivitas sistem kontrol loop tertutup untuk menjaga kesegaran produk perikanan secara cerdas, objektif, dan berkelanjutan.

3.2 Pengumpulan data

Tahap pengumpulan data dalam penelitian ini bertujuan untuk memperoleh parameter numerik dan pengetahuan ahli yang akan menjadi landasan matematis bagi perancangan sistem inferensi Logika Fuzzy. Mengingat penelitian ini berfokus pada bidang sistem kendali cerdas, pengumpulan data dilakukan melalui tinjauan pustaka sistematis, standar industri, serta ekstraksi data sensor empiris melalui eksperimen langsung. Rincian metode pengumpulan data adalah sebagai berikut:

3.2.1 Studi Literatur dan Penentuan Parameter Algoritma

Metode tinjauan pustaka yang diterapkan dalam penelitian ini bukanlah sekadar kompilasi, melainkan landasan teoretis kritis untuk penentuan ambang batas dan ruang lingkup pembahasan yang akan diimplementasikan ke dalam fungsi keanggotaan algoritma Logika Fuzzy Tsukamoto. Tahap ini dilakukan untuk memastikan bahwa semua variabel yang ditangani oleh sistem kendali didukung oleh alasan yang ilmiah dan dapat dipertanggungjawabkan. Rinciannya sebagai berikut:

- 1 Parameter Suhu (Baseline Control): Tinjauan pustaka komprehensif terhadap Standar Nasional Indonesia (SNI) 2729:2013 tentang Ikan Segar dilakukan untuk menentukan standar kuantitatif suhu penyimpanan yang ideal (rentang pendinginan 15°C hingga 25°C). Batas-batas ini ditetapkan berdasarkan laju pertumbuhan mikroorganisme pembusuk pada suhu lingkungan. Data ini menjadi acuan utama untuk merancang dan menentukan batas-batas variabel dalam himpunan fuzzy “Dingin”, “Normal”, dan “Panas”. Proses ini memastikan bahwa algoritma dapat mengenali kondisi termal di dalam kompartemen penyimpanan secara tepat, sehingga kualitas ikan tetap optimal selama masa penyimpanan.
- 2 Parameter Emisi Gas Amonia (Adaptive Override): Tinjauan berbagai literatur ilmiah, artikel jurnal terkini, referensi biokimia, serta mekanisme degradasi protein ikan dan pelepasan senyawa volatil berupa gas amonia (NH_2) akibat aktivitas metabolik bakteri pengurai. Ekstraksi data dari literatur ini bertujuan untuk mengonversi hasil biokimia tersebut menjadi rentang konsentrasi gas amonia yang dapat diukur (bagian per juta, ppm). Rentang nilai ini digunakan untuk mendefinisikan himpunan fuzzy “Aman,” “Hati-hati,” dan “Rusak.” Dasar

teoretis ini memungkinkan sistem memprediksi titik kritis konsentrasi gas amonia yang menandakan penurunan kualitas biologis, sehingga intervensi pendinginan dapat dilakukan sebelum kerusakan yang tidak dapat dibalikkan terjadi.

- 3 Karakteristik Aktuator dan Kendali Daya: Analisis terperinci mengenai spesifikasi listrik elemen termoelektrik Peltier TEC1-12706 (elemen aktuator utama), efisiensi sirkulasi sistem Pendingin Cairan, serta spesifikasi operasional Modul Relai. Analisis data teknis ini mutlak diperlukan untuk memahami batas arus, tegangan, dan kapasitas panas yang dapat ditangani oleh sistem. Hasil analisis ini kemudian digunakan untuk merancang variabel keluaran algoritma fuzzy yang menentukan logika keputusan penggerak (ON/OFF). Hal ini menjamin bahwa setiap keputusan perhitungan yang dibuat oleh mikrokontroler dapat dicapai dan dapat dieksekusi dengan aman oleh perangkat keras tanpa kerusakan listrik, serta adanya sinkronisasi yang akurat antara logika kontrol dan kemampuan operasional komponen mekanis di lapangan.

3.2.2 Pengumpulan Data Pengujian Skala Purwarupa (Data Logging)

Selain studi literatur, pengumpulan data primer dilakukan melalui metode eksperimen langsung pada purwarupa *Smart Cold Storage* yang telah dirakit. Data dikumpulkan dengan membaca nilai *crisp input* secara *real-time* dari sensor suhu DS18B20 dan sensor gas amonia MQ-135. Proses ini ditujukan untuk mendapatkan *log data* aktual terkait dinamika perubahan suhu dan fluktuasi gas di dalam boks isolasi tertutup, yang kemudian direkam untuk memvalidasi akurasi perhitungan dari matriks *Rule Base* yang telah ditanamkan pada mikrokontroler ESP32.

3.3 Analisis kebutuhan sistem

Dalam pelaksanaan rancang bangun *Smart Cold Storage* pendeteksi kesegaran ikan ini, perangkat keras (*hardware*) yang digunakan bertindak sebagai fondasi fisik untuk akuisisi parameter lingkungan, pemrosesan kecerdasan buatan, eksekusi aktuator mekanis, dan transmisi data nirkabel. Seluruh komponen ini diintegrasikan membentuk suatu sistem kendali siklus tertutup (*closed-loop control*).

3.3.1 Perangkat Lunak (*Software*)

Perangkat lunak pada penelitian ini memiliki peran vital sebagai unit komputasi logika cerdas dan antarmuka pemantauan data jarak jauh, yang secara keseluruhan menjadi fondasi operasional bagi purwarupa *Smart Cold Storage*. Fokus utama dari pengembangan lapisan perangkat lunak ini adalah pada penggunaan *Integrated Development Environment* (IDE) berbasis *Arduino* yang digunakan untuk memprogram mikrokontroler ESP32 secara mendalam. Melalui lingkungan pengembangan ini, struktur algoritma *Fuzzy Logic* metode Tsukamoto disusun menggunakan bahasa pemrograman C/C++ yang kemudian ditanamkan (*embedded*) secara permanen ke dalam memori mikrokontroler. Seluruh tahapan komputasi—mulai dari proses fuzzifikasi untuk mengonversi data sensor yang bersifat stokastik menjadi variabel linguistik, evaluasi matriks *Rule Base* dengan fungsi implikasi monoton yang logis, hingga proses defuzzifikasi menggunakan metode Rata-rata Berbobot (*Weighted Average*)—diprogram sedemikian rupa melalui optimalisasi alokasi memori (*memory allocation*). Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa setiap baris kode dieksekusi secara sangat efisien, stabil, dan cepat, sehingga mikrokontroler mampu mengambil keputusan kendali aktuator secara tepat waktu (*real-time*) tanpa adanya kendala latensi komputasi yang dapat mengganggu responsivitas sistem kendali tertutup.

Sebagai fasilitas pendukung visibilitas data dan pemantauan kondisi komoditas, sistem ini juga memanfaatkan arsitektur *Internet of Things* (IoT) berbasis *cloud* yang modern. Infrastruktur perangkat lunak ini dirancang secara modular untuk menerima *payload* data yang dikirimkan secara berkala oleh ESP32 melalui protokol komunikasi HTTP. Untuk menjaga integritas data selama proses transmisi dari perangkat ke basis data, sistem menerapkan mekanisme validasi data sebelum data tersebut disimpan atau diproses lebih lanjut. Di sisi hilir, antarmuka aplikasi (*dashboard*) yang dibangun pada perangkat *smartphone* dirancang dengan menerapkan prinsip desain antarmuka yang minimalis, intuitif, namun sangat informatif. Antarmuka tersebut berfungsi murni sebagai jendela visualisasi untuk menampilkan grafik tren suhu historis, pemantauan fluktuasi konsentrasi gas amonia secara *real-time*, serta menyajikan sistem notifikasi *Early Warning System* (EWS) yang terintegrasi secara dinamis.

Notifikasi tersebut secara cerdas disinkronkan dengan hasil klasifikasi keputusan akhir dari mesin inferensi *Fuzzy Tsukamoto* yang sedang berjalan di dalam sistem kontrol *Smart Cold Storage*. Melalui sinkronisasi ini, sistem mampu memberikan peringatan secara proaktif apabila nilai urgensi komputasi mencapai ambang batas yang mengindikasikan penurunan mutu. Dengan integrasi perangkat lunak yang komprehensif ini, pengguna tidak hanya mendapatkan data mentah berupa angka numerik, melainkan informasi status kesegaran ikan yang objektif, terukur, dan mudah diinterpretasikan. Hal ini memungkinkan pengguna atau pemilik komoditas untuk mengambil tindakan penyelamatan maupun distribusi komoditas dengan cepat dan tepat, sebelum terjadi penurunan kualitas yang signifikan yang berpotensi memicu kerugian finansial maupun risiko kesehatan bagi konsumen akhir.

3.3.2 Perangkat Keras (*Hardware*)

Pusat kendali dan komputasi utama pada prototipe ini menggunakan mikrokontroler ESP32. Perangkat ini dipilih karena memiliki memori dan kecepatan pemrosesan (hingga 240 MHz) yang sangat memadai untuk mengeksekusi algoritma Fuzzy Logic tipe Tsukamoto secara mandiri, sekaligus telah terintegrasi dengan modul WiFi internal untuk kebutuhan komunikasi Internet of Things (IoT). Untuk menjamin konektivitas sistem ke database server tetap stabil terutama saat alat ditempatkan di lokasi pelelangan ikan yang minim infrastruktur kabel statis, sistem ini dilengkapi dengan perangkat Mobile WiFi (MiFi). MiFi berfungsi sebagai penyedia akses poin internet independen yang memanfaatkan jaringan seluler (GSM/4G), memastikan transmisi data rekam jejak suhu dan status kesegaran ikan dapat berjalan secara berkelanjutan (real-time). (Franceschelli et al., 2021).

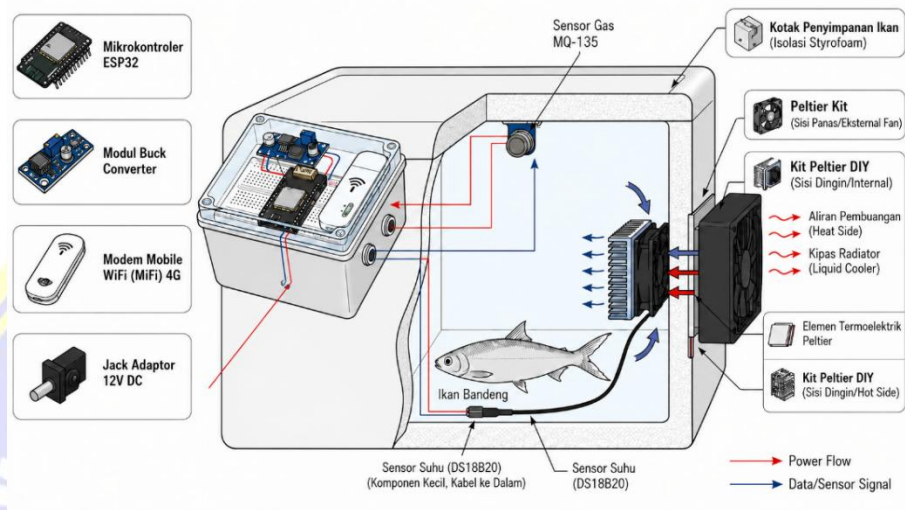
Pada lapisan persepsi (*sensor*), sistem mengintegrasikan dua instrumen utama yang bekerja secara sinergis. Pertama, sensor suhu DS18B20 berjenis *waterproof* (kedap air) dengan material baja tahan karat. Karakteristik fisik sensor ini sangat esensial karena lingkungan internal boks penyimpanan yang beroperasi pada suhu rendah memiliki kelembapan relatif tinggi, sehingga rawan memicu kondensasi atau embun yang dapat merusak sirkuit elektronik. Sensor ini mengadopsi protokol komunikasi digital 1-Wire yang memungkinkan transmisi data suhu aktual (rentang target 0°C hingga 5°C) secara

presisi dan stabil menuju mikrokontroler ESP32. Kedua, sensor gas MQ-135 diimplementasikan sebagai detektor elektrokimia untuk mengukur konsentrasi gas amonia yang merepresentasikan tingkat degradasi biokimia atau proses pembusukan ikan secara objektif. Nilai resistansi analog yang dihasilkan oleh sensor ini dibaca melalui pin *Analog-to-Digital Converter* (ADC) pada ESP32 untuk kemudian dikalibrasi secara matematis menjadi besaran konsentrasi dalam satuan *part per million* (ppm), di mana kedua data sensor ini secara simultan menyuplai *crisp input* untuk diolah oleh mesin inferensi *fuzzy*.

Untuk sistem aktuasi pendinginan aktif, penelitian ini mengandalkan elemen termoelektrik Peltier yang difungsikan sebagai pendingin solid-state tanpa menggunakan kompresor konvensional maupun bahan pendingin kimia (*refrigerant*). Agar performa Peltier tetap optimal dan stabil saat menjaga rantai dingin (*cold chain*) ikan, sisi panas (*hot side*) dari elemen tersebut diintegrasikan dengan sistem pendingin cairan (*Liquid Cooler*). Sistem ini terdiri atas komponen *water block* yang menempel erat pada sisi panas Peltier, pompa air mini untuk menyirkulasikan cairan pendingin (*coolant*), serta radiator eksternal yang dilengkapi dengan kipas (*fan*) untuk mempercepat pembuangan kalor melalui proses konveksi paksa ke udara luar. Tanpa adanya sistem pembuangan kalor yang masif dan efisien di sisi panas, sisi dingin Peltier tidak akan mampu mencapai titik suhu rendah yang ditargetkan untuk menghambat laju aktivitas bakteri pembusuk pada ikan.

Pengendalian aktuator mekanis tersebut diatur melalui Modul Relay yang berfungsi sebagai sakelar elektronik berkecepatan tinggi. Perangkat ini menerima sinyal instruksi digital (HIGH/LOW) yang dihasilkan dari keputusan hasil defuzzifikasi pada mikrokontroler ESP32, lalu mengeksekusi penyaluran daya listrik menuju pendingin Peltier dan sistem *liquid cooler* secara mutlak (ON/OFF) berdasarkan logika adaptif terhadap kebutuhan lingkungan boks. Seluruh rangkaian elektronik dan aktuator mekanis ini ditenagai oleh adaptor *power supply* 12V arus searah (DC) yang bersumber langsung dari listrik jala-jala PLN guna menjamin suplai daya yang besar, stabil, dan kontinu. Semua instrumen tersebut dirakit secara teliti dan ditanamkan ke dalam sebuah boks insulasi termal (*cool box*) skala kecil berbahan material insulatif berkualitas (seperti

polyurethane atau *styrofoam* padat) yang dirancang khusus dengan kerapatan tinggi guna meminimalisir kebocoran suhu ruang. Integrasi desain fisik dan arsitektur perangkat keras ini memastikan efisiensi pendinginan dapat tercapai secara maksimal, yang kemudian disatukan ke dalam satu rancangan purwarupa utuh sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Ilustrasi Tata Letak Perangkat Smart Cold Storage

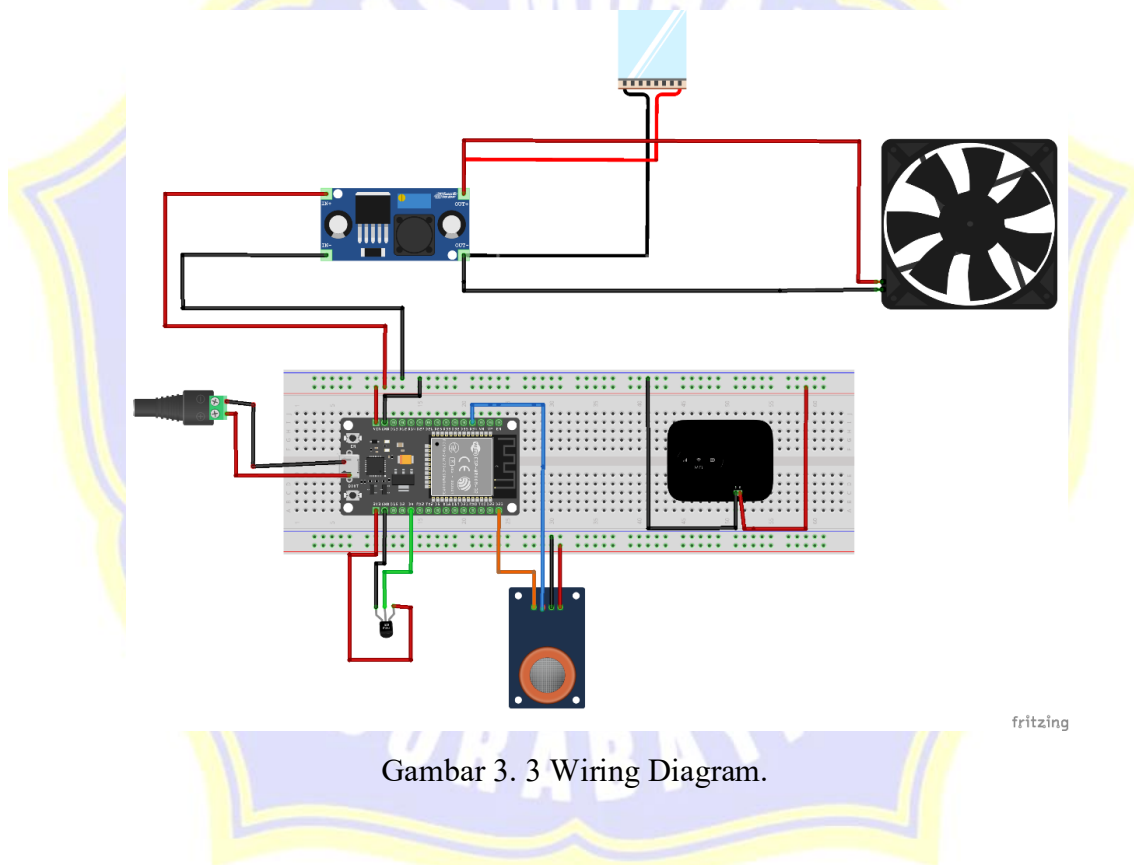
3.4 Perancangan Sistem

Tahap perancangan sistem memegang peranan krusial dalam merealisasikan purwarupa *Smart Cold Storage* secara terstruktur. Fase ini menjembatani hasil analisis kebutuhan dengan implementasi fisik dan logis, merangkum desain arsitektur perangkat keras, rancang bangun komputasi kecerdasan buatan, hingga rekayasa perangkat lunak berbasis Internet of Things (IoT). Perancangan ini dibagi menjadi beberapa domain utama yang saling terintegrasi untuk memastikan fungsi pemantauan parameter fisik dan pengendalian suhu secara cerdas dapat berjalan optimal.

3.4.1 Alat dan Bahan

Perancangan fisik berfokus pada topologi interkoneksi antar komponen elektronik dengan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pemrosesan utama. Diagram pengkabelan (*wiring diagram*) memetakan jalur komunikasi data dan distribusi daya kelistrikan secara presisi. Sensor suhu DS18B20 dihubungkan melalui antarmuka 1-Wire ke salah satu pin GPIO digital ESP32, dilengkapi dengan resistor *pull-up* untuk menjaga stabilitas

transmisi data. Pin keluaran analog dari sensor gas MQ-135 dihubungkan ke pin *Analog-to-Digital Converter* (ADC) ESP32 guna membaca fluktuasi resistansi yang merepresentasikan konsentrasi gas amonia. Pada sisi aktuasi kelistrikan daya, pin GPIO digital ESP32 dihubungkan ke terminal *input* (IN) pada Modul Relay. Perangkat *relay* ini bertugas sebagai sakelar elektronik untuk menyalurkan daya searah (DC) dari adaptor 12V menuju elemen termoelektrik Peltier dan sistem pendingin, menyesuaikan dengan instruksi logika cerdas yang diperintahkan oleh mikrokontroler. Seluruh perangkat keras ini beroperasi dalam satu ekosistem tertutup, didukung oleh *liquid cooler* yang membuang kalor dari sisi panas Peltier secara terus-menerus, serta perangkat MiFi yang memfasilitasi komunikasi nirkabel.



Gambar 3. 3 Wiring Diagram.

Untuk memperjelas visualisasi pada Gambar 3.3, adapun rincian fungsional dan letak masing-masing perangkat keras pada topologi rangkaian tersebut dijelaskan sebagai berikut:

- A. A. Mikrokontroler ESP32: Berfungsi sebagai otak komputasi algoritma Fuzzy Logic dan transmisi data Internet of Things (IoT).

- B. Modul Relay: Bertugas menerima sinyal digital dari mikrokontroler sebagai sakelar pengontrol untuk menghidupkan atau mematikan elemen pendingin Peltier dan *Liquid cooler* secara mutlak.
- C. Modem Mobile WiFi (MiFi) 4G: Berfungsi sebagai penyedia jaringan seluler mandiri (*gateway*) untuk menjembatani komunikasi ke *database*.
- D. Sensor Gas MQ-135: Modul biru dengan sensor silinder berlapis jaring logam di bagian bawah tengah, difungsikan untuk mendeteksi emisi gas amonia.
- E. Sensor Suhu DS18B20: Komponen kecil berwarna hitam (dengan tiga kaki) di sudut kiri bawah breadboard, difungsikan sebagai pembaca suhu ruang berakurasi tinggi.
- F. Kipas Radiator (Liquid Cooler): Kipas pendingin berwarna hitam di ujung kanan atas, bertugas menarik dan membuang akumulasi kalor ke udara bebas.
- G. Elemen Termoelektrik Peltier: Komponen persegi yang terhubung dengan sirkuit di bagian atas tengah, bertindak sebagai aktuator pendingin utama (sisi dingin) sekaligus menyerap panas.
- H. Jack Adaptor 12V DC: Konektor listrik di sisi paling kiri, berfungsi sebagai penghubung seluruh sistem kelistrikan dengan sumber daya utama (PLN).

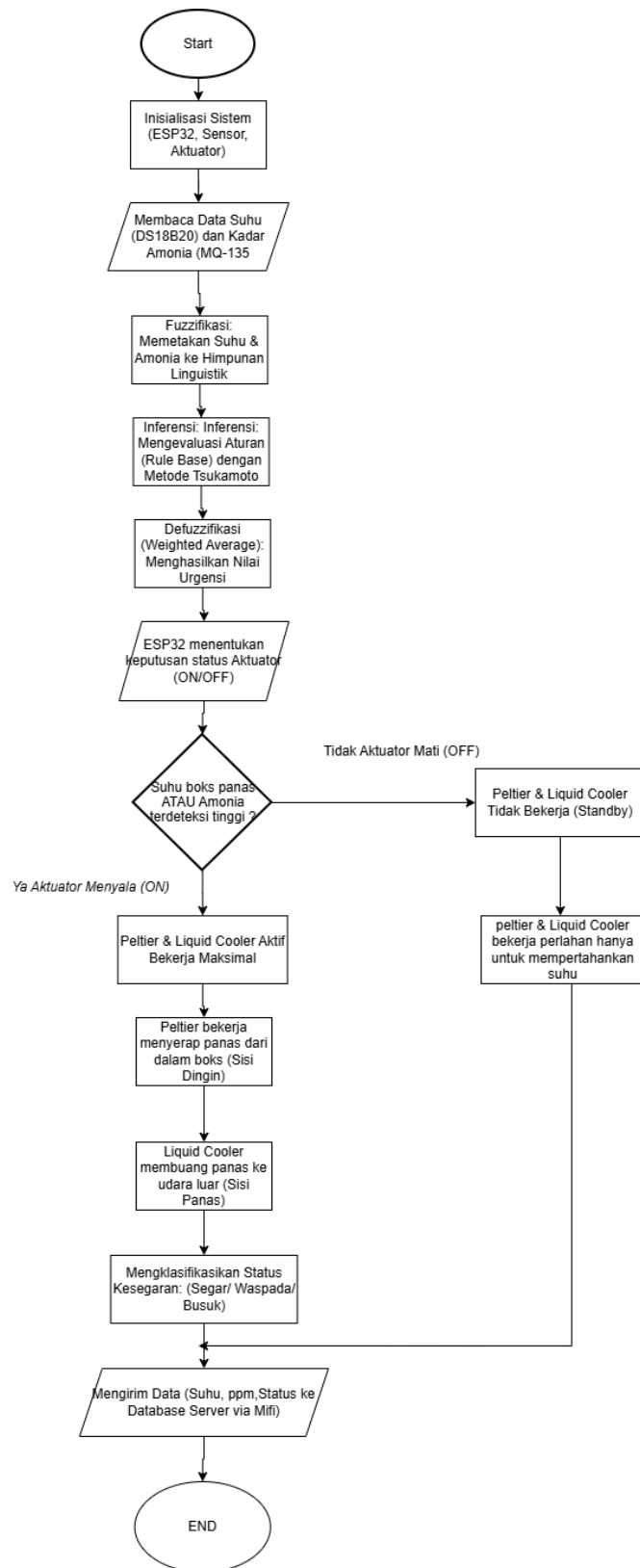
3.4.2 Perancangan Alur Logika Sistem Flowchart

Alur operasional sistem kendali pada purwarupa ini diawali secara sistematis dan terstruktur melalui tahap akuisisi data. Pada fase krusial ini, sensor suhu DS18B20 dan sensor gas MQ-135 berperan sangat vital dalam mengekstraksi parameter termal serta konsentrasi amonia aktual yang ada di dalam ruang penyimpanan secara kontinu dan *real-time*. Seluruh nilai numerik tegas (*crisp input*) yang berhasil diperoleh dari sensor selanjutnya ditransmisikan menuju mikrokontroler ESP32 untuk diolah lebih lanjut melalui komputasi algoritma *Fuzzy Logic* metode Tsukamoto yang efisien. Di dalam unit pemrosesan sentral, data mentah tersebut terlebih dahulu melewati tahap fuzzifikasi guna dikonversi menjadi representasi variabel linguistik yang dapat dipahami oleh mesin logika. Variabel-variabel linguistik hasil fuzzifikasi tersebut kemudian dievaluasi secara komprehensif di dalam mesin inferensi dengan mencocokkan kondisi riil di lapangan

terhadap sekumpulan basis aturan (*Rule Base*) yang telah ditetapkan, guna merumuskan keputusan mitigasi yang paling presisi.

Pasca-penyelesaian proses penalaran logika tersebut, arsitektur sistem secara otomatis membagi penanganan luaran (*output*) ke dalam dua cabang eksekusi paralel yang berjalan secara sinkron, yaitu jalur aktuasi perangkat keras dan jalur pemantauan berbasis *Internet of Things* (IoT). Pada ranah perangkat keras, hasil inferensi diproses melalui tahap defuzzifikasi dengan metode Rata-rata Berbobot (*Weighted Average*) untuk dikembalikan menjadi nilai numerik mutlak dalam bentuk nilai batas (*threshold*) pemicu sakelar. Sinyal kontrol digital hasil dari tahap defuzzifikasi ini diinstruksikan langsung kepada Modul Relay untuk menyalurkan atau memutus daya searah (DC) menuju elemen termoelektrik Peltier serta sistem *Liquid Cooler* sesuai dengan status logika (HIGH/LOW) yang dihasilkan.

Secara simultan, pada ranah IoT, sistem secara cerdas menerjemahkan hasil pemrosesan tersebut menjadi klasifikasi status kesegaran ikan yang objektif, yakni dikategorikan ke dalam status "Segar", "Waspada", atau "Busuk" berdasarkan parameter biokimia yang terbaca. Status kesegaran ini kemudian diakumulasikan bersama metrik data lainnya seperti suhu aktual, kadar amonia, dan status kerja aktuator ke dalam satu *payload* data yang terstruktur untuk ditransmisikan secara nirkabel melalui *gateway* Mobile WiFi (MiFi) menuju *database server* terpusat. Pada hilir sistem, seluruh rekam jejak data tersebut divisualisasikan melalui aplikasi *smartphone* pengguna, yang telah dilengkapi dengan fitur peringatan dini (*Early Warning System*). Fitur ini akan memicu notifikasi otomatis secara *push notification* manakala komoditas terdeteksi telah memasuki fase degradasi mutu, sehingga pengguna dapat segera melakukan tindakan preventif atau pengambilan keputusan distribusi. Untuk memperjelas seluruh tahapan komputasi dan eksekusi tersebut, alur operasional sistem divisualisasikan secara komprehensif pada bagan alir (*flowchart*) yang tertera pada Gambar 3.4.



Gambar 3. 4 Flowchart

3.4.3 Perancangan Logika Fuzzy (*Fuzzification*)

Fuzzifikasi merupakan tahapan awal dalam sistem inferensi fuzzy di mana nilai masukan numerik tegas (*crisp input*) yang diperoleh dari pembacaan sensor fisik secara *real-time* dipetakan ke dalam bentuk himpunan fuzzy beserta derajat keanggotaannya (*degree of membership*). Berdasarkan karakteristik biokimiawi ikan dan termodinamika *Smart Cold Storage*, perancangan diagram *membership* dipisahkan berdasarkan masing-masing parameter sebelum digabungkan dalam basis aturan.

1. Semesta pembicaraan (*universe of discourse*) untuk variabel suhu ditetapkan pada rentang operasional 15°C hingga 40°C. Variabel suhu difuzzifikasi ke dalam tiga himpunan linguistik: "Dingin", "Normal", dan "Panas". Untuk penentuan parameter ini, peneliti mengambil referensi dari jurnal mengenai pengaruh suhu penyimpanan terhadap jumlah total bakteri pada ikan, yang menyatakan bahwa rentang suhu 15°C hingga 20°C (Delivery et al., 2021), terbukti sebagai batas aman pendinginan yang mampu menghambat aktivitas mikroba dan mempertahankan kesegaran daging ikan.

Kurva fungsi keanggotaan pada himpunan "Normal" dirancang secara asimetris. Hal ini didasarkan pada tinjauan fisik di mana transisi suhu dari kondisi "Dingin" menuju suhu ruang memicu lonjakan aktivitas bakteri pembusuk secara eksponensial (fase logaritmik) yang akan memuncak secara ekstrem pada kisaran suhu 30°C hingga 35°C, sehingga sistem harus lebih sensitif merespons kenaikan suhu di area transisi tersebut. Secara spesifik, rentang keanggotaan untuk variabel suhu didefinisikan sebagai berikut:

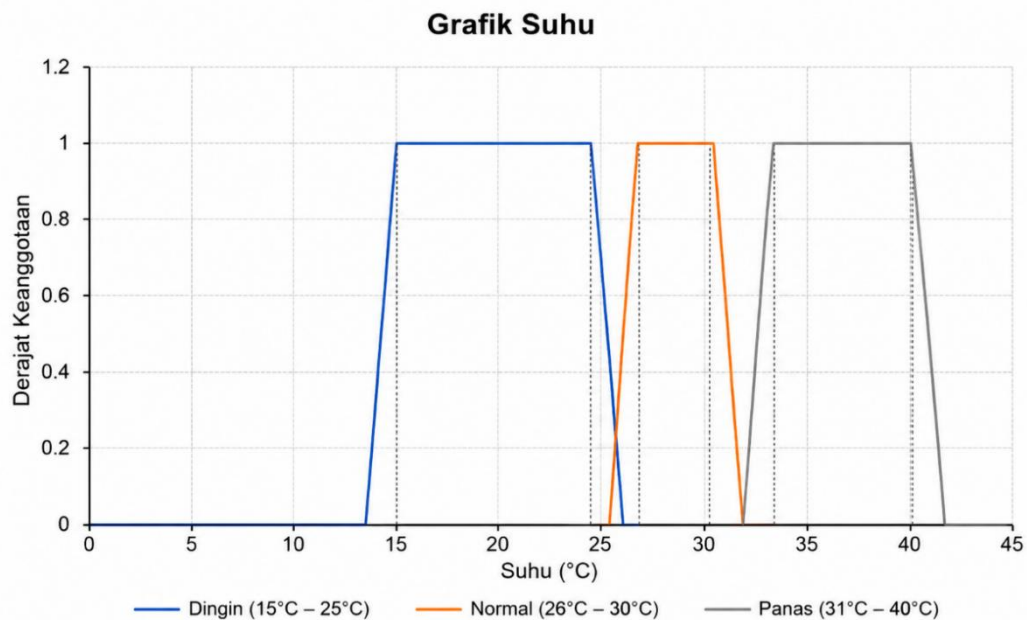
A. Dingin: 15°C – 25°C (nilai keanggotaan penuh pada rentang 15°C – 20°C)(Muliana Sitakar et al., n.d.-a).

B. Normal: 25°C – 32°C (dengan titik puncak keanggotaan pada 28°C)(Muliana Sitakar et al., n.d.-a).

C. Panas: 32°C – 40°C (nilai keanggotaan penuh pada rentang 35°C – 40°C)(Muliana Sitakar et al., n.d.-a).

Penentuan rentang suhu yang digunakan dalam sistem kendali *cold storage* ini, yaitu kategori Dingin (15°C – 25°C), Normal (25°C – 32°C), dan Panas (32°C – 40°C),

didasarkan pada penerapan Logika Histeresis (Aulia et al., 2025) untuk menjaga stabilitas sistem. Metode Logika Histeresis ini berfungsi untuk memberikan batas toleransi atas dan batas bawah pada aktuator agar tidak terjadi *switching* atau hidup-mati secara berulang akibat fluktuasi kecil pada nilai sensor. Agar implementasi batas rentang suhu tersebut dapat tereksekusi dengan valid, pembacaan data lingkungan mutlak diperlukan melalui penempatan sensor yang presisi. Karena sensor DS18B20 hanya membaca suhu udara tepat pada titik penempatannya, lokasinya di dalam ruang pendingin harus ditentukan secara cermat agar dapat merepresentasikan suhu lingkungan secara keseluruhan. Sebagai referensi terkait strategi penempatan ini, pada penelitian sebelumnya mengenai sistem kendali suhu di dalam ruang tertutup berdimensi 40 cm x 30 cm x 35 cm, sensor DS18B20(SANTOSO, 2018) diletakkan secara terpisah pada titik atas, tengah, dan bawah untuk mendapatkan hasil pembacaan suhu yang akurat dan merata. Representasi visual dari pemetaan derajat keanggotaan untuk masing-masing kategori rentang suhu tersebut dapat dilihat secara lebih jelas pada grafik kurva fungsi keanggotaan pada gambar 3.5.



Gambar 3. 5 Kurva Fungsi Keanggotaan Variabel Input Suhu

2. Semesta pembicaraan (*universe of discourse*) untuk variabel konsentrasi gas amonia ditetapkan pada rentang operasional 0 hingga 120 ppm. Variabel gas amonia difuzzifikasi ke dalam tiga himpunan linguistik: "Aman", "Waspada", dan "Busuk". Untuk penentuan parameter ini, peneliti mengambil referensi dari penelitian sebelumnya mengenai pemantauan sensor MQ-135, yang menetapkan rentang deteksi mulai dari 1 ppm hingga 25 ppm (Satria & Dwipayana, n.d.). Namun, pada ekosistem tertutup untuk komoditas pascapanen (*cold storage*), batas aman diekstraksi dari standar TVB-N (*Total Volatile Base Nitrogen*), di mana emisi gas hasil degradasi protein hingga 30 ppm masih dapat ditoleransi dan dikategorikan sebagai ikan segar.

Oleh karena itu, penetapan rentang 0 ppm hingga 30 ppm untuk himpunan "Aman" didasarkan pada penerapan Logika Histeresis. Metode ini berfungsi untuk memberikan batas toleransi bawah dan atas guna mencegah terjadinya *switching* (hidup-mati) secara berulang pada sistem peringatan akibat fluktuasi kecil pembacaan nilai sensor. Selain itu, kurva fungsi keanggotaan pada himpunan "Waspada" diformulasikan menggunakan kurva trapesium beratap datar (*flat-top*). Rentang yang lebar pada fase transisi ini sengaja dirancang untuk memberikan *buffer* atau jeda waktu intervensi sebagai *early warning system*, sebelum lonjakan gas amonia benar-benar melampaui batas toleransi (Busuk). Secara spesifik, rentang keanggotaan untuk variabel kadar gas amonia didefinisikan sebagai berikut:

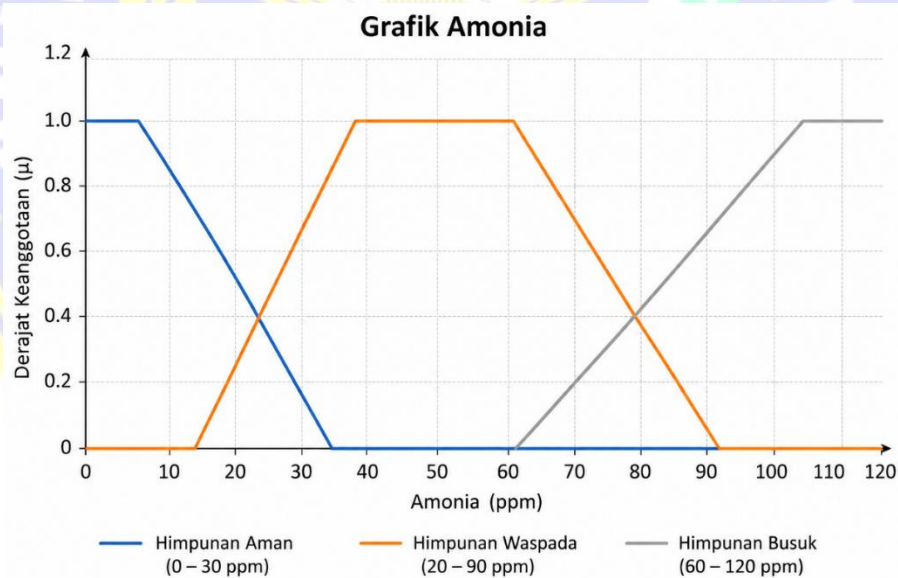
A. Aman: 0 ppm – 30 ppm (nilai keanggotaan penuh mendekati 0 ppm – 20 ppm)(Satria et al., n.d.-a).

B. Waspada: 20 ppm – 90 ppm (membentuk atap trapesium datar pada rentang 40 ppm – 60 ppm)(Satria et al., n.d.-a).

C. Busuk: 60 ppm – 120 ppm (dengan nilai keanggotaan penuh mulai dari rentang 90 ppm ke atas)(Satria et al., n.d.-a).

Penentuan rentang gas amonia yang digunakan dalam sistem kendali *cold storage* ini, yaitu kategori Aman 0 ppm – 30 ppm, Waspada 20 ppm – 90 ppm, dan Busuk 60 ppm – 120 ppm, didasarkan pada penerapan Logika Histeresis untuk menjaga stabilitas sistem. Metode Logika Histeresis ini berfungsi untuk memberikan batas toleransi atas dan batas bawah pada aktuator agar tidak terjadi *switching* atau hidup-mati secara berulang akibat fluktuasi kecil pada nilai sensor. Agar implementasi batas rentang amonia tersebut dapat

tereksekusi dengan valid, pembacaan data lingkungan mutlak diperlukan melalui penempatan sensor yang presisi. Karena sensor MQ-135 hanya membaca konsentrasi gas tepat pada titik paparan atau sirkulasi udaranya, lokasinya di dalam ruang pendingin harus ditentukan secara cermat agar dapat merepresentasikan kadar gas amonia secara keseluruhan. Sebagai referensi terkait strategi penempatan dan pengintegrasian perangkat keras ini, pada penelitian sebelumnya mengenai sistem monitoring berbasis IoT, komponen kontrol disatukan di dalam satu *box* berdimensi panjang 14,5 cm, lebar 5 cm, dan tinggi 9 cm (Satria & Dwipayana, n.d.). Pada ruang lingkup perangkat tersebut, sensor MQ-135 difungsikan untuk mendeteksi rentang kadar amonia mulai dari 1 ppm hingga 25 ppm guna mendapatkan hasil pembacaan gas yang akurat dan responsif. Berdasarkan parameter serta rentang keanggotaan yang telah dijabarkan di atas, pemetaan derajat keanggotaan (*membership function*) untuk variabel input konsentrasi gas amonia divisualisasikan secara grafis pada Gambar 3.6.



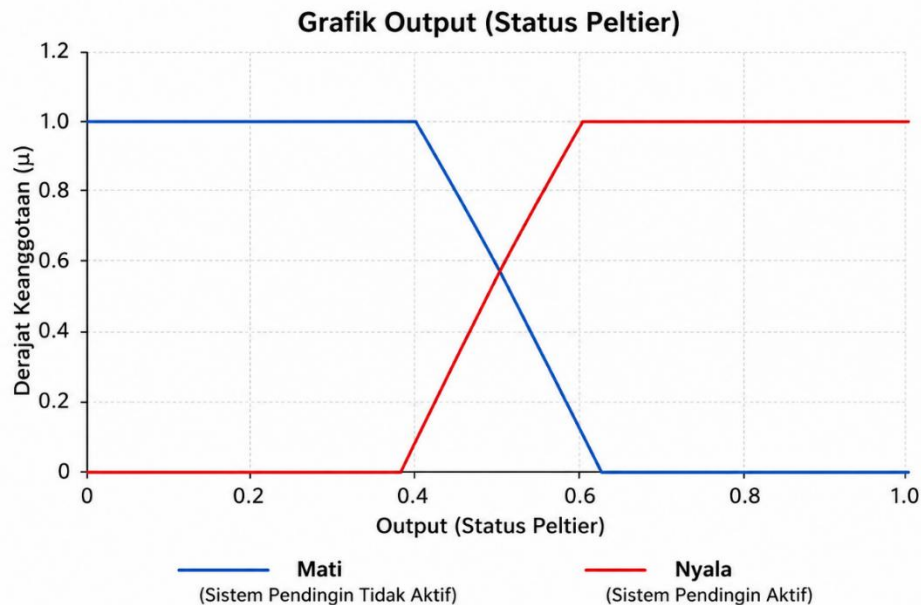
Gambar 3. 6 Kurva Fungsi Keanggotaan Variabel Input Gas Amonia

3. Fungsi Keanggotaan Variabel Keluaran: Variabel keluaran dirancang untuk menentukan status operasional aktuator pendingin (*Peltier*) sebagai hasil akhir dari mesin

inferensi. Berbeda dengan pendekatan sebelumnya yang menggunakan modulasi lebar pulsa (*Pulse Width Modulation*), variabel ini menetapkan keputusan tegas berupa status "Mati" atau "Nyala" untuk menyederhanakan logika kendali pada sistem. Semesta pembicaraan variabel keluaran ini dipetakan ke dalam dua himpunan linguistik yang merepresentasikan instruksi operasional bagi perangkat keras:

A. Mati: Himpunan ini merepresentasikan kondisi di mana sistem tidak memerlukan intervensi pendinginan aktif. Kondisi ini dipicu ketika parameter lingkungan berada pada status ideal atau aman, di mana suhu ruang penyimpanan masih terjaga dan kadar gas amonia tidak menunjukkan indikasi degradasi biokimia. Dengan status "Mati", aktuator pendingin tidak menerima suplai daya, sehingga konsumsi energi dapat ditekan seminimal mungkin.

B. Nyala: Himpunan ini merepresentasikan kondisi di mana sistem memerlukan intervensi pendinginan aktif. Status "Nyala" diaktifkan apabila hasil inferensi *Fuzzy Logic* mendeteksi adanya anomali lingkungan, seperti peningkatan suhu yang melampaui batas "Dingin" atau deteksi konsentrasi gas amonia yang masuk dalam kategori "Waspada" maupun "Busuk". Dengan mengaktifkan status "Nyala", sistem segera mengoperasikan elemen termoelektrik Peltier dan kipas sirkulasi untuk menghentikan laju degradasi bakteri. Untuk memperjelas batasan nilai dan titik perpotongan antara himpunan instruksi Mati dan Nyala, representasi fungsi keanggotaan untuk variabel keluaran (*output*) ini divisualisasikan secara grafis pada Gambar 3.7 Berikut.



Gambar 3. 7 Kurva Fungsi Keanggotaan Variabel Output

4. Gabungan Interaksi Parameter (Pemetaan Permukaan Fuzzy dan Basis Aturan): Setelah masing-masing parameter input didefinisikan secara independen melalui fungsi keanggotaan (*membership function*), kedua variabel masukan utama—yaitu data *Suhu* dan *Amonia*—kemudian diintegrasikan ke dalam satu dapur komputasi menggunakan operator konjungsi logika (*AND*) di dalam Mesin Inferensi Tsukamoto. Pada ruang matriks keputusan ini, bobot prioritas tertinggi terbentuk ketika sistem mendeteksi pertemuan antara parameter suhu yang berada pada domain "Panas" dengan konsentrasi amonia yang berada pada domain "Waspada" atau "Busuk". Kombinasi kondisi kritis ini akan secara otomatis memicu luaran tegas bagi sistem untuk mengambil tindakan korektif berupa keputusan "Aktuator Nyala" guna menurunkan laju degradasi. Sebaliknya, apabila sistem mendeteksi pertemuan pada kondisi lingkungan yang stabil, yakni ketika parameter suhu berada pada domain "Dingin" dan konsentrasi gas amonia terdeteksi pada domain "Aman", sistem akan secara konsisten menghasilkan keputusan keluaran berupa "Aktuator Mati". Proses pemetaan ini memastikan bahwa setiap transisi kondisi lingkungan dapat direspons oleh mikrokontroler dengan logika yang terukur, sehingga efisiensi energi tetap terjaga tanpa mengabaikan aspek keamanan kualitas komoditas.

Tabel 3. 1 Matriks Basis Aturan (Rule Base) Kendali Daya

No	Kondisi Suhu (T)	Kondisi Amonia (PPM)	Relay Peltier	Relay Kipas	Alasan Teknis & Cara Kerja Sistem	reverensi
1	Panas ($T > 30^{\circ}\text{C}$ s.d 40°C)	Segar / Bersih (0 s.d 30 PPM)	(ON)	(ON)	Fokus Pendinginan: Suhu boks panas tapi udara masih segar. Peltier aktif mendinginkan boks. Kipas wajib ON untuk membuang panas heatsink luar agar Peltier tidak terbakar.	(Muliana Sitakar et al., n.d.-b)
2	Panas ($T > 30^{\circ}\text{C}$ s.d 40°C)	Busuk / Bahaya (> 30 PPM)	(ON)	(ON)	Kondisi Kritis Ganda: Suhu panas dan ikan mulai mengeluarkan bau pembusukan. Peltier & Kipas menyala penuh. Kipas bekerja ganda membuang panas alat sekaligus membuang uap amonia.	(Satria et al., n.d.-b)
3	Dingin / Ideal ($15^{\circ}\text{C} \leq T \leq 30^{\circ}\text{C}$)	Segar / Bersih (0 s.d 30 PPM)	(OFF)	(OFF)	Kondisi Sempurna: Suhu boks sudah dingin (mendekati 15°C) dan udara di dalam segar. Semua alat dimatikan total untuk menghemat daya	(Muliana Sitakar et al., n.d.-b)

No	Kondisi Suhu (T)	Kondisi Amonia (PPM)	Relay Peltier	Relay Kipas	Alasan Teknis & Cara Kerja Sistem	reverensi
					listrik dan mengistirahatkan komponen.	
4	Dingin / Ideal ($15^{\circ}\text{C} \leq T \leq 30^{\circ}\text{C}$)	Busuk / Bahaya (> 30 PPM)	(ON)	(ON)	Kipas Tetap Menyala: Suhu boks sudah dingin (Peltier nyala), tetapi amonia terdeteksi tinggi (>30 PPM). Kipas dipaksa tetap ON khusus untuk menyedot gas amonia keluar boks agar bau hilang.	(Satria et al., n.d.-b)
5	Batas Alat ($T < 15^{\circ}\text{C}$)	Segar / Bersih (0 s.d 30 PPM)	(OFF)	(OFF)	Proteksi Maksimal: Suhu sudah menyentuh batas kemampuan Peltier TEC1. Semua alat dimatikan agar komponen tidak bekerja paksa (overwork) dan mencegah kerusakan alat.	(Muliana Sitakar et al., n.d.-b)

No	Kondisi Suhu (T)	Kondisi Amonia (PPM)	Relay Peltier	Relay Kipas	Alasan Teknis & Cara Kerja Sistem	reverensi
6	Batas Alat ($T < 15^{\circ}\text{C}$)	Busuk / Bahaya ($> 30 \text{ PPM}$)	(ON)	(ON)	Proteksi Peltier + Buang Gas: Suhu sudah di bawah 15°C sehingga Peltier wajib ON demi keamanan. Namun, karena udara bau ($>30 \text{ PPM}$), kipas hidup mandiri khusus untuk sirkulasi membuang gas.	(Satria et al., n.d.-b)

3.4.4 Basis Aturan (*Rule Base*)

Tahap krusial selanjutnya setelah nilai masukan fisik dikonversi menjadi representasi variabel linguistik melalui proses fuzzifikasi adalah perancangan Basis Aturan (*Rule Base*). Pada purwarupa *Smart Cold Storage* ini, metode inferensi komputasi yang diterapkan secara eksklusif menggunakan algoritma *Fuzzy Logic* metode Tsukamoto. Mesin inferensi berperan sebagai "otak" sistem yang bertugas memproses seluruh kombinasi derajat keanggotaan dari dua variabel masukan utama, yakni Suhu (dengan kategori: Dingin, Normal, Panas) dan Kadar Gas Amonia (dengan kategori: Aman, Waspada, Busuk), dengan mengimplementasikan operator logika konjungsi "AND" sebagai syarat terpenuhinya sebuah kondisi. Karena masing-masing variabel masukan memiliki tiga himpunan linguistik yang berbeda, peneliti merumuskan total 9 (3×3) kombinasi pernyataan logis berbentuk implikasi *IF-THEN* yang terstruktur. Konstruksi ke-9 aturan ini tidak disusun secara acak, melainkan melalui proses kalibrasi empiris yang ketat, merujuk pada prinsip-prinsip termodinamika serta logika pencegahan degradasi biokimiawi pada komoditas perikanan.

Sistem ini dioperasikan dengan menerapkan paradigma preventif, di mana parameter suhu ditempatkan sebagai acuan dasar (*baseline control*) dalam menjaga

stabilitas lingkungan kabin. Dalam skenario operasional yang ideal, sistem akan secara konsisten mengeksekusi aturan dasar seperti, "JIKA Suhu Dingin AND Amonia Aman, MAKA Aktuator Mati". Logika efisiensi ini secara otomatis memerintahkan aktuator untuk berhenti beroperasi guna mengoptimalkan konsumsi energi ketika ambang batas suhu *chilling* yang diinginkan telah tercapai. Namun, untuk menangani kompleksitas kerusakan biologis, parameter amonia difungsikan sebagai pemicu intervensi adaptif (*adaptive override*). Apabila sensor menangkap kondisi transisi yang mencurigakan, misalnya "JIKA Suhu Dingin AND Amonia Waspada", sistem akan secara cerdas mengesampingkan fakta bahwa suhu ruang masih tergolong stabil dan segera mengubah instruksi logisnya menjadi "MAKA Aktuator Nyala". Respons yang agresif terhadap peningkatan tipis gas volatil ini sangat penting bagi algoritma untuk menekan laju reaksi enzimatik yang menjadi penyebab utama pembusukan ikan.

Di sisi lain, perancangan aturan untuk kondisi lingkungan yang ekstrem juga mempertimbangkan efektivitas serta rasionalitas tindakan pengawetan. Berdasarkan evaluasi kelayakan mutu yang mendalam, apabila sistem mendeteksi kondisi kritis seperti "JIKA Suhu Panas AND Amonia Busuk", maka upaya mendinginkan ruang secara maksimal tidak lagi memiliki urgensi teknis karena jaringan otot ikan telah mengalami kerusakan yang bersifat *irreversible*. Oleh karena itu, sistem dirancang untuk tidak memaksakan aktuator agar terus bekerja, guna menghindari pemborosan energi yang sia-sia, melainkan membangkitkan nilai klasifikasi "Busuk" yang terintegrasi secara langsung dengan infrastruktur IoT. Mekanisme ini akan memicu peringatan darurat tingkat tinggi (*Critical EWS*) pada aplikasi *smartphone* secara *real-time*, yang menginstruksikan pengguna untuk melakukan evakuasi komoditas. Seluruh keputusan kualitatif yang dihasilkan dari proses inferensi ini kemudian diagregasi dan dikalkulasi secara matematis pada tahap akhir komputasi, yaitu defuzzifikasi menggunakan metode Rata-rata Berbobot (*Weighted Average*), guna menghasilkan nilai *crisp* yang presisi untuk pengambilan keputusan aktuasi.

3.4.5 Mesin Inferensi (*Inference Engine*)

Mesin inferensi merupakan inti komputasi dari sistem kendali kecerdasan buatan, di mana seluruh alur penalaran logis dieksekusi secara *real-time* oleh mikrokontroler

ESP32 untuk mengambil keputusan adaptif yang presisi. Setelah data aktual dari sensor suhu DS18B20 dan sensor gas MQ-135 dikonversi menjadi representasi variabel linguistik pada tahap fuzzifikasi, mesin inferensi bertugas mengevaluasi derajat keanggotaan tersebut terhadap matriks *Rule Base* yang telah dirumuskan. Pada rancang bangun *Smart Cold Storage* ini, metode penalaran yang diimplementasikan secara spesifik adalah metode Tsukamoto. Pemilihan metode Tsukamoto didasarkan pada karakteristiknya yang unik dibandingkan metode *fuzzy* lainnya, di mana setiap aturan (*IF-THEN*) akan menghasilkan luaran tegas (*crisp*) parsial secara langsung. Karakteristik ini sangat menguntungkan karena sistem tidak lagi memerlukan proses agregasi luasan area yang secara komputasi sangat intensif dan memakan memori, sehingga beban kerja pada mikrokontroler menjadi jauh lebih ringan dan efisien (Moosavi-nasab & Khoshnoudi-nia, 2021).

Pada tahapan inferensi, setiap aturan ke-*i* dalam *Rule Base* akan menghasilkan nilai luaran parsial z_i berdasarkan nilai α -predikat (derajat keanggotaan) yang diperoleh dari fungsi implikasi. Mengingat premis pada rancangan sistem ini menggunakan kata hubung "AND" (konjungsi) untuk menggabungkan dua variabel masukan, maka nilai α -predikat untuk setiap aturan ke-*i* (α_i) ditentukan dengan mengambil nilai minimum dari derajat keanggotaan masing-masing masukan, yang diformulasikan sebagai berikut:

$$\alpha_i = \min(\mu_{Suhu}[x_i], \mu_{Amonia}[y_i])$$

Sebagai ilustrasi konkret, apabila sensor mendeteksi kondisi lingkungan yang memicu aturan "JIKA Suhu Normal AND Amonia Waspada, MAKA Aktuator Nyala", dan dari proses fuzzifikasi didapatkan bahwa derajat keanggotaan suhu pada domain "Normal" adalah 0,6 serta amonia pada domain "Waspada" adalah 0,4, maka nilai α -predikat yang dihasilkan untuk aturan tersebut adalah:

$$\alpha_i = \min(0,6; 0,4) = 0,4$$

Nilai 0,4 inilah yang kemudian digunakan untuk menentukan besaran kontribusi nilai tegas z_i pada variabel keluaran "Aktuator Nyala". Dalam kerangka kerja metode Tsukamoto, setiap aturan yang terpicu akan langsung memberikan kontribusi nilai tegas parsial yang terukur, sehingga sistem dapat memberikan respon kendali yang bersifat deterministik. Kontribusi nilai-nilai tegas parsial dari seluruh aturan yang aktif ini selanjutnya akan dikalkulasi secara kolektif pada tahap defuzzifikasi akhir, guna

menghasilkan satu keputusan tunggal yang menentukan status operasional Modul Relay secara mutlak—apakah harus berada pada posisi *High* (ON) atau *Low* (OFF)—sehingga performa pendinginan selalu berada pada kondisi optimal sesuai dengan kebutuhan aktual di dalam ruang penyimpanan.

3.4.6 Defuzzifikasi (*Defuzzification*)

Defuzzifikasi merupakan tahapan pamungkas sekaligus tahap krusial dalam algoritma sistem inferensi fuzzy yang bertujuan untuk mengonversi hasil penalaran logika dari setiap aturan yang aktif menjadi satu nilai numerik tegas (*crisp output*) yang definitif, yang nantinya akan dijadikan sebagai acuan eksekusi oleh perangkat keras. Berbeda secara fundamental dengan metode Mamdani yang mengharuskan komputasi luasan area yang sangat kompleks dan memakan sumber daya sistem, metode Tsukamoto yang diimplementasikan secara spesifik pada Smart Cold Storage ini menggunakan teknik Rata-rata Terbobot (*Weighted Average*). Teknik ini dipandang jauh lebih unggul dan efisien untuk diimplementasikan pada mikrokontroler ESP32 karena tidak memerlukan perhitungan integral atau integrasi numerik yang berat. Sebaliknya, metode ini hanya mengandalkan operasi aritmatika dasar yang jauh lebih cepat, sangat hemat dalam penggunaan memori (*memory-efficient*), serta memiliki latensi eksekusi yang sangat rendah, sehingga sangat ideal untuk aplikasi sistem kendali real-time (Belman-flores et al., 2022). Dalam metode ini, nilai tegas akhir (Z) diperoleh dengan menghitung rata-rata tertimbang dari setiap nilai luaran tegas (z_i) yang dikalikan dengan bobot kontribusi masing-masing (α_i). Nilai z_i merupakan parameter nilai tegas yang dihasilkan oleh aturan ke- i berdasarkan fungsi keanggotaan pada variabel keluaran, sedangkan α_i adalah nilai α -predikat (kekuatan aturan atau bobot pemicu) yang telah diperoleh dari tahap inferensi sebelumnya. Secara matematis, formulasi defuzzifikasi yang diterapkan untuk sistem kendali ini dinyatakan melalui persamaan berikut:

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

Dalam persamaan tersebut, variabel Z merepresentasikan nilai *crisp output* final yang menjadi acuan keputusan absolut sistem; α_i adalah derajat keanggotaan (bobot pemicu) dari aturan ke- i ; dan z_i adalah nilai tegas luaran dari aturan ke- i .

Nilai crisp hasil perhitungan matematis algoritma ini kemudian ditransmisikan oleh pin GPIO ESP32 menuju terminal masukan pada Modul Relay sebagai instruksi kendali. Mikrokontroler menetapkan sebuah nilai ambang batas (threshold) yang dinamis dari hasil defuzzifikasi tersebut; apabila nilai Z melampaui ambang batas yang ditentukan—sebagai akibat dari terdeteksinya lonjakan suhu ruang atau peningkatan emisi gas amonia yang menjadi indikasi awal pembusukan—maka Modul Relay akan segera merespons dengan mengaktifkan (ON) elemen termoelektrik Peltier dan pompa Liquid Cooler secara instan. Sebaliknya, jika kondisi ikan tetap berada dalam status "Segar" dan suhu target telah tercapai dengan stabil tanpa adanya gangguan emisi amonia, sistem akan secara otomatis mematikan (OFF) Modul Relay untuk melakukan penghematan energi. Mekanisme defuzzifikasi ini memastikan bahwa intervensi pendinginan tidak sekadar berupa sistem on-off statis yang kaku, melainkan sebuah pengambilan keputusan yang sangat adaptif, terukur, dan cerdas dalam merespons dinamika kondisi biologis di dalam boks penyimpanan secara komprehensif, konsisten, dan berkelanjutan.

3.4.7 Klasifikasi Keputusan Akhir

Selain menghasilkan luaran berupa kendali mekanis terhadap aktuator pendingin, sistem kecerdasan buatan pada purwarupa *Smart Cold Storage* ini dirancang untuk menghasilkan luaran informasional berupa klasifikasi keputusan akhir terkait status kesegaran ikan. Jika proses defuzzifikasi menghasilkan keputusan digital untuk meregulasi kinerja perangkat keras melalui Modul Relay, maka klasifikasi keputusan akhir ini bertindak sebagai penerjemah kondisi biokimiawi ruang penyimpanan menjadi informasi digital yang objektif dan mudah dipahami oleh pengguna. Proses klasifikasi ini menjadi fondasi utama beroperasinya fitur sistem peringatan dini (*early warning system*) yang membedakan purwarupa ini dengan ruang pendingin konvensional.

Logika penentuan status ini dititikberatkan pada pembacaan konsentrasi gas amonia secara aktual dari sensor MQ-135, yang dikomparasikan dengan stabilitas suhu dari sensor DS18B20. Mikrokontroler ESP32 diprogram untuk mengklasifikasikan hasil pembacaan tersebut ke dalam tiga tingkatan status yang objektif: "Segar", "Waspada", dan "Busuk" (Franceschelli et al., 2021). Status "Segar" ditetapkan ketika konsentrasi gas amonia berada pada ambang batas terendah dan suhu ruang stabil pada rentang ideal, menandakan bahwa tidak ada indikasi awal proses dekomposisi. Status "Waspada"

diaktifkan sebagai bentuk mitigasi preventif ketika sistem mendeteksi adanya tren kenaikan tipis pada kadar amonia, meskipun secara visual atau organoleptik ikan mungkin masih terlihat baik. Terakhir, status "Busuk" dideklarasikan apabila konsentrasi senyawa volatil telah melampaui batas toleransi keamanan pangan, yang merepresentasikan bahwa proses autolisis dan aktivitas bakteri pengurai telah merusak jaringan otot ikan secara signifikan.

Setelah mikrokontroler menetapkan klasifikasi status tersebut, data keputusan akhir ini tidak hanya disimpan secara lokal, melainkan dikemas menjadi *payload* data bersama dengan nilai numerik suhu, status aktif Modul Relay, dan kadar amonia aktual. Memanfaatkan konektivitas jaringan seluler independen dari perangkat *Mobile WiFi* (MiFi), ESP32 mentransmisikan *payload* ini menuju *database server* (MySQL/MariaDB) secara *real-time*. Klasifikasi status inilah yang kemudian ditampilkan secara visual pada antarmuka aplikasi *smartphone* pengguna. Apabila algoritma menetapkan status menjadi "Waspada" atau "Busuk", aplikasi akan secara otomatis memicu *push notification* ke perangkat pengguna. Melalui mekanisme klasifikasi digital ini, kelemahan unsur subjektivitas dari pengujian organoleptik tradisional yang diatur dalam SNI 2729:2013 dapat diatasi, memberikan jaminan rekam jejak (*traceability*) mutu yang terukur dan memungkinkan pengguna mengambil tindakan penyelamatan komoditas sebelum kerugian finansial terjadi (Al Fatich et al., 2023).

3.5 Pengujian Dan Validasi

Tahap pengujian dan validasi merupakan fase pembuktian empiris yang krusial untuk memastikan bahwa purwarupa *Smart Cold Storage* yang telah difabrikasi mampu beroperasi sesuai dengan spesifikasi rancangan dan analisis kebutuhan. Fokus utama dari tahapan ini adalah melakukan validasi fungsional secara komprehensif, baik pada responsivitas pembacaan instrumen sensor maupun efisiensi termal aktuator yang dikendalikan oleh komputasi kecerdasan buatan. Seluruh skenario pengujian dirancang untuk dieksekusi secara langsung menggunakan komponen aktual pada lingkungan operasional nyata dengan menggunakan sampel uji riil. Pendekatan pengujian empiris ini memastikan bahwa evaluasi kinerja alat dapat diukur secara objektif berdasarkan log data aktual yang direkam secara kontinu.

3.5.1 Skenario Pengujian Sistem

pengujian difokuskan pada pengambilan data secara *real-time* dari dalam kabin penyimpanan. Skenario pengujian dibagi menjadi dua tahapan utama:

1. Pengujian Keandalan Sensor Akuisisi Data Real:

Menguji kemampuan sensor suhu DS18B20 dan sensor gas MQ-135 dalam membaca parameter lingkungan secara presisi di dalam ruang tertutup. Sistem akan mengukur kecepatan penurunan suhu aktual dan melacak fluktuasi gas amonia yang diproduksi oleh sampel uji berupa ikan selar secara terus-menerus.

2. Pengujian Komparasi Sistem Kendali (Fuzzy Logic vs On-Off Konvensional:

Pengujian ini bertujuan untuk mengukur responsibilitas mikrokontroler ESP32 dalam mengatur aktuator pendingin berbasis algoritma Fuzzy Logic (yang memproses fusi data suhu dan amonia) dibandingkan dengan sistem kendali On-Off konvensional (yang hanya merespons suhu tunggal melalui relay). Kedua sistem diuji dengan memberikan beban uji berupa sampel ikan selar selama rentang waktu pengamatan 1,5 jam (90 menit). Efektivitas diukur dari kemampuan sistem dalam mencapai dan mempertahankan rentang suhu target ideal (15°C – 20°C) serta kemampuan dalam melakukan tindakan mitigasi saat terdeteksi kenaikan kadar gas amonia, tanpa menyebabkan siklus hidup-mati (switching) yang tidak perlu pada perangkat relay.

3.5.2 Tata Cara Pengujian dan Pengambilan Data

Prosedur pengujian dan perekaman data komputasi algoritma ini dilaksanakan secara langsung (*hardware-in-the-loop*) dengan langkah-langkah sistematis sebagai berikut:

1. Persiapan Perangkat dan Datalogger: Menghubungkan mikrokontroler ESP32 ke komputer lokal menggunakan kabel antarmuka serial (USB). Selanjutnya, perangkat lunak *datalogger* CoolTerm diaktifkan untuk siap menangkap dan merekam aliran data komunikasi serial (suhu, konsentrasi amonia, dan status aktif Modul Relay) secara otomatis ke dalam format *Comma Separated Values* (CSV).
2. Peletakan Sampel Uji: Sampel ikan selar dimasukkan ke dalam kabin *Smart Cold Storage*. Boks pendingin kemudian ditutup rapat untuk memastikan tidak ada kebocoran insulasi termal selama proses pengujian berlangsung.
3. Eksekusi Pengujian Komparatif:

A. Pengujian Sistem Konvensional (Kontrol *On-Off* Sederhana): Sistem dihidupkan dengan mengimplementasikan logika kontrol konvensional berbasis termostat digital standar. Dalam konfigurasi ini, aktuator diprogram untuk bekerja secara biner, yaitu menyala penuh (ON) saat suhu di dalam kabin penyimpanan melampaui ambang batas atas yang telah ditentukan, dan mati total (OFF) secara instan tepat ketika suhu telah mencapai target pendinginan. Metode ini tidak melibatkan proses perhitungan dinamis, sehingga aktuator sepenuhnya bergantung pada satu titik acuan suhu tunggal tanpa mempertimbangkan laju perubahan suhu maupun parameter eksternal lainnya. Pada pengujian ini, diharapkan terekam grafik profil suhu yang menunjukkan fluktuasi tajam atau pola osilasi yang signifikan akibat mekanisme pensaklaran yang bersifat kaku dan tidak adaptif terhadap kondisi lingkungan maupun perubahan beban panas di dalam kabin secara keseluruhan. Ketidakteraturan pola suhu ini nantinya akan digunakan sebagai tolok ukur komparatif untuk membuktikan efektivitas sistem kendali cerdas yang dikembangkan dalam penelitian ini.

B. Pengujian Sistem Cerdas (*Fuzzy Logic*): Sistem kemudian dikembalikan pada rancangan arsitektur utama untuk diuji kinerjanya dalam menangani beban kerja yang dinamis. Dalam fase ini, mikrokontroler ESP32 secara proaktif dan berkelanjutan menghitung nilai *error* dari pembacaan sensor suhu serta gas amonia secara *real-time*. Data masukan tersebut selanjutnya diproses melalui tahapan komputasi yang sistematis, mulai dari tahap fuzzifikasi untuk konversi linguistik, inferensi menggunakan metode Tsukamoto yang efisien, hingga tahap defuzzifikasi menggunakan metode Rata-rata Terbobot (*Weighted Average*) untuk menghasilkan keputusan akhir. Berdasarkan hasil komputasi tersebut, sistem secara otomatis mengirimkan instruksi sakelar (HIGH/LOW) ke Modul Relay untuk mengontrol aktuator pendingin. Diharapkan pada pengujian ini akan terekam kurva profil suhu yang jauh lebih stabil dan presisi dibandingkan sistem konvensional, karena sistem cerdas ini memiliki kapabilitas untuk melakukan intervensi aktif yang bersifat antisipatif. Sebagai contoh, sistem mampu menyalakan perangkat pendingin

lebih awal atau meningkatkan durasi siklus pendinginan saat konsentrasi gas amonia terdeteksi meningkat tinggi, bahkan sebelum suhu internal kabin melampaui batas toleransi yang ditetapkan. Respons yang adaptif dan proaktif ini menunjukkan bahwa algoritma *fuzzy* yang dikembangkan mampu mengintegrasikan dua parameter yang berbeda untuk mencapai performa *cold chain* yang lebih optimal, stabil, dan andal dalam menjaga mutu komoditas perikanan di dalam ruang penyimpanan.

4. Validasi Antarmuka IoT: Secara simultan, peneliti melakukan pemantauan pada *Web Dashboard* untuk memastikan sinkronisasi data *real-time* yang dikirimkan oleh modul komunikasi nirkabel (MiFi). Pengujian ini memvalidasi perubahan status peringatan dini (*Early Warning System*) menjadi "Aman", "Waspada", atau "Busuk" berdasarkan fluktuasi gas amonia yang dibaca oleh sensor.

3.6 Analisis hasil dan Kesimpulan

Tahap analisis hasil dan penarikan kesimpulan merupakan fase sintesis komprehensif di mana seluruh data empiris yang direkam melalui *CoolTerm* dan platform IoT dievaluasi secara kritis untuk mengukur tingkat keberhasilan purwarupa *Smart Cold Storage* serta memberikan jawaban atas rumusan masalah penelitian.

3.6.1 Teknik Analisis Data

Data empiris yang diakuisisi selama pengujian purwarupa dievaluasi untuk mengukur keberhasilan komputasi kecerdasan buatan dan aktuasi termalnya. Analisis data difokuskan pada metrik berikut:

1. Analisis Responsivitas Kendali Termal: Mengevaluasi efektivitas sistem dalam mengambil keputusan aktivasi (ON/OFF) melalui Modul Relay berdasarkan instruksi komputasi dari algoritma *Fuzzy Logic*. Indikator keberhasilan diukur dengan membandingkan kurva grafik stabilitas suhu; sistem cerdas harus terbukti lebih mampu menjaga suhu agar tetap berada pada rentang target (15°C – 20°C) dengan melakukan intervensi aktif saat terdeteksi anomali (kenaikan amonia), dibandingkan dengan sistem *On-Off* konvensional yang hanya merespons perubahan suhu secara pasif.

2. Analisis Sensitivitas Pembacaan Biokimia: Menganalisis plot data dari sensor MQ-135 untuk membuktikan kemampuan sistem dalam merespons indikasi awal pembusukan ikan selar. Tren konsentrasi gas amonia yang terekam menjadi tolok ukur keandalan sistem dalam membedakan fase ikan segar dan fase degradasi, serta membuktikan bahwa algoritma mampu memberikan respons pendinginan lebih awal sebelum komoditas benar-benar membusuk.
3. Analisis Validasi Transmisi IoT: Mengevaluasi keandalan arsitektur jaringan *Internet of Things*. Analisis membuktikan bahwa fusi data melalui logika *Fuzzy* mampu diterjemahkan menjadi keputusan status kesegaran pada *Web Dashboard* secara tepat waktu tanpa adanya kendala kehilangan paket data (*data loss*) selama proses transmisi nirkabel berlangsung.

3.6.2 Penarikan Kesimpulan

Berdasarkan sintesis dan evaluasi performa dari keseluruhan instrumen aktual, penarikan kesimpulan dirumuskan secara lugas untuk membuktikan:

1. Keberhasilan integrasi arsitektur perangkat keras (Sensor, Peltier, *Buck Converter*) dan ESP32 dalam membentuk ekosistem *Smart Cold Storage* fungsional secara empiris.
2. Keberhasilan algoritma *Fuzzy Logic* dalam meningkatkan kecerdasan sistem kendali dibandingkan sistem On-Off konvensional. Hal ini dibuktikan melalui kemampuan sistem untuk melakukan intervensi pendinginan yang adaptif berdasarkan fusi data suhu dan gas amonia, sehingga sistem mampu menjaga stabilitas kualitas ikan secara lebih proaktif dan responsif terhadap indikasi degradasi mutu.
3. Keberhasilan sistem dalam mentransformasi metode penilaian mutu ikan secara organoleptik subjektif menjadi sistem deteksi objektif berbasis digital yang terukur dan dapat dipantau dari jarak jauh, sehingga jaminan keamanan pangan dan pencegahan kerugian finansial dapat direalisasikan.