

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Kesegaran Mutu Ikan

Ikan merupakan komoditas pangan yang sangat mudah busuk karena kandungan air dan proteinnya yang tinggi. Segera setelah ikan mati, proses degradasi biokimia dan mikrobiologis yang kompleks pun dimulai. Awal dari proses penurunan kualitas ini adalah fase autolisis, di mana enzim dalam tubuh ikan itu sendiri memecah struktur jaringan otot, diikuti oleh aktivitas bakteri pengurai yang mempercepat proses pembusukan dengan menghasilkan senyawa kimia yang mudah menguap. Stabilitas suhu penyimpanan dan konsentrasi beberapa gas yang dihasilkan selama pembusukan merupakan ukuran objektif kesegaran ikan. Ikan dianggap segar jika disimpan pada kisaran suhu optimal 15°C hingga 20°C, karena kisaran suhu ini memperpanjang periode rigor mortis, memperlambat aktivitas enzim, dan menghambat laju pertumbuhan mikroorganisme pembusuk. Tingkat amonia (NH_3), yang dihasilkan dari pemecahan senyawa nitrogen oleh bakteri, juga dapat dideteksi secara akurat. Ikan dianggap segar jika tingkat amonia berada antara 0 ppm dan 30 ppm, dan perubahan konsentrasi amonia dapat menjadi indikator ambang batas pembusukan.

Evaluasi subjektif dilakukan dengan menggunakan metode organoleptik sesuai dengan SNI 2729:2013 (Al Fatich et al., 2023). Parameter subjektif yang digunakan adalah pemeriksaan visual pada mata (harus cerah, dengan bola mata cembung dan kornea jernih), insang (berwarna merah cerah tanpa lendir berlebihan), dan lendir pada permukaan tubuh (harus transparan dan bebas dari bau busuk). Selain itu, daging ikan harus terasa padat dan elastis saat disentuh serta memiliki bau ikan segar (seperti rumput laut), bukan bau amonia yang menyengat. Pendekatan subjektif ini mudah dilakukan, namun penerapan teknologi sensor untuk memantau suhu dan kadar gas secara real-time sangat penting dalam rantai dingin guna memastikan data yang dihasilkan lebih akurat dan dapat diverifikasi secara digital.

2.2 Logika Fuzzy Metode Tsukamoto

Logika fuzzy adalah pendekatan komputasional dalam pemecahan masalah yang meniru proses pengambilan keputusan manusia dalam kondisi nilai kebenaran yang parsial, atau “fuzzy”. Logika fuzzy (FL) berbeda dari sistem kendali Boolean karena

mampu menggambarkan keadaan transisi yang kontinu, bukan hanya dua keadaan absolut (benar atau salah). Desain Smart Cold Storage ini menggunakan modul relai untuk mengendalikan aktuator pendingin secara absolut (hidup atau mati). Sistem ini tidak seketat termostat konvensional, yang hanya didasarkan pada satu parameter: ambang batas suhu. Sistem ini tidak seketat termostat konvensional, yang hanya didasarkan pada satu parameter: ambang batas suhu. Algoritma ini memungkinkan sistem untuk mengambil keputusan dengan cara yang jauh lebih cerdas, responsif, dan adaptif, sambil memperhitungkan fluktuasi gabungan dari berbagai parameter lingkungan. Secara khusus dalam penelitian ini, metode inferensi Tsukamoto diterapkan, karena arsitekturnya telah terbukti sangat efisien dalam memproses penggabungan data menjadi instruksi operasional yang ringan untuk mikrokontroler ESP32, sehingga memberikan waktu respons komputasi yang cepat tanpa membebani kapasitas memori sistem.

Berkenaan dengan arsitekturnya, implementasi algoritma Tsukamoto dalam ekosistem sistem tertanam ini terdiri dari tiga tahap komputasi utama yang saling terhubung. Tahap pertama adalah proses fuzzifikasi, di mana nilai-nilai numerik waktu nyata (input crisp) yang diperoleh dari sensor suhu DS18B20 dan sensor gas MQ-135 diubah menjadi variabel linguistik. Pada tahap ini, nilai-nilai fisik diubah menjadi derajat keanggotaan (μ) dalam rentang 0–1. Pemetaan ini didasarkan pada desain kurva fungsi keanggotaan. Desain ini memungkinkan sistem untuk mengklasifikasikan suhu ke dalam himpunan “Dingin”, “Normal”, atau “Panas”, serta fluktuasi konsentrasi gas amonia ke dalam kondisi “Aman”, “Peringatan”, atau “Busuk”.

Setelah data numerik dikonversi menjadi representasi linguistik, alur komputasi berlanjut ke tahap evaluasi aturan (mesin inferensi). Basis Aturan berisi sekumpulan matriks aturan logis “IF-THEN” yang digunakan sistem untuk memproses derajat keanggotaan. Salah satu ciri utama metode Tsukamoto adalah bahwa konsekuensi dari setiap aturan dijelaskan oleh himpunan fuzzy monotonik. Sistem memperoleh nilai minimum (predikat α) untuk memotong fungsi monotonik tersebut. Operator konjungsi logis (AND) digunakan untuk menggabungkan premis yang terdiri dari beberapa variabel masukan. Setiap aturan yang aktif segera memberikan nilai keluaran parsial yang tajam (Belman-flores et al., 2022).

Langkah terakhir dari siklus algoritmik ini adalah defuzzifikasi. Tahap ini bertujuan untuk mensintesis atau menggabungkan nilai-nilai keluaran parsial dari semua aturan yang terpicu guna memperoleh satu nilai kesimpulan yang lengkap. Metode Tsukamoto telah menghasilkan keluaran absolut untuk setiap aturannya sehingga proses penggabungan tidak memerlukan perhitungan integral, melainkan nilai-nilai tersebut diakumulasikan melalui perhitungan Rata-Rata Tertimbang. Persamaan matematis ini menghasilkan satu nilai urgensi absolut yang diskalakan (keluaran tajam). Nilai urgensi yang telah melalui defuzzifikasi kemudian dievaluasi terhadap ambang batas. Jika nilai yang dihitung melebihi batas toleransi yang ditetapkan, mikrokontroler akan segera mengirimkannya dalam bentuk instruksi digital, yaitu sinyal HIGH atau LOW. Mekanisme adaptif ini memastikan bahwa Modul Relai dapat dihidupkan atau dimatikan secara cerdas untuk mengontrol elemen pendingin Peltier dan menjaga kesejukan ikan. Keputusan untuk mengaktifkan atau menonaktifkan modul tersebut sepenuhnya ditentukan oleh kondisi biokimia dan termal di dalam kompartemen penyimpanan.

2.3 Dasar Teori

Pengembangan sistem *Smart Cold Storage* untuk penyimpanan ikan berbasis *Fuzzy Logic* dan *Internet of Things* (IoT) tidak hanya berlandaskan pada kebutuhan praktis industri perikanan, tetapi juga merujuk pada standar mutu keamanan pangan serta pedoman teknis pengembangan teknologi otomasi. Secara hirarkis, ketentuan mengenai standar mutu ikan segar di (Nasional, 2013)Indonesia ditetapkan dalam Standar Nasional Indonesia (SNI) 2729:2013 tentang Ikan Segar. Dokumen ini menjadi rujukan utama dalam penentuan parameter kualitas objektif dan subjektif, yang mengatur spesifikasi teknis mengenai kondisi visual, tekstur, serta ambang batas cemaran pada komoditas ikan pascapanen (*SNI 27292013 (Ikan Segar) - Higiene Pengolahan Makanan Asal Hewan - UGM - Studocu*, n.d.)

Ketentuan pelaksanaan teknis terkait integrasi sistem kendali cerdas dan otomasi berbasis IoT pada sektor pertanian dan perikanan merujuk pada Peraturan Menteri Perindustrian Nomor 21 Tahun 2021 tentang Pembangunan Sumber Daya Manusia Industri dan Standar Kompetensi dalam Era Industri 4.0. Peraturan ini memberikan landasan hukum bagi penerapan teknologi cerdas, termasuk penggunaan sensor *fusi*

(sensor *fusion*) dan mikrokontroler dalam sistem produksi dan penyimpanan guna meningkatkan efisiensi serta akurasi data secara digital (Peraturan Menteri Perindustrian Nomor 21 Tahun 2021 Bab terkait pengembangan teknologi industri, 2021).

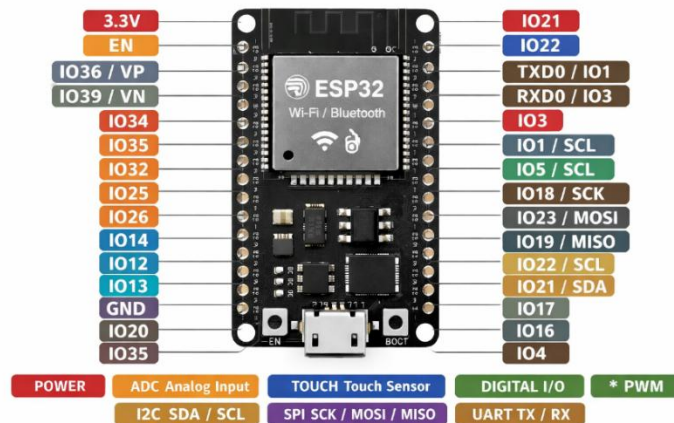
Dalam konteks operasional perangkat keras, pedoman teknis yang menjadi rujukan utama bagi implementasi sistem kendali otomatis berbasis mikrokontroler adalah Standar Internasional IEC 61131 tentang *Programmable Controllers*. Standar ini menetapkan persyaratan operasional bagi perangkat kendali logika yang digunakan dalam otomasi industri, mencakup spesifikasi perangkat keras, antarmuka komunikasi data, serta metode pemrograman algoritma kendali seperti *Fuzzy Logic* dan modulasi *Pulse Width Modulation* (PWM) yang diimplementasikan pada mikrokontroler ESP32 (*Standar IEC 61131-3: Fondasi Utama Pemrograman PLC Modern* | *Folks Automation*, n.d.).

1.3.1 Mikrokontroler ESP32

Mikrokontroler ESP32, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1, merupakan perangkat berbasis *System on Chip* (SoC) yang berfungsi sebagai pusat kendali utama dalam sistem cerdas. adalah perangkat System-on-Chip (SoC) yang berfungsi sebagai pusat kendali utama dalam suatu sistem pintar. Mikrokontroler ini memiliki tingkat logika 3,3 V DC berdasarkan spesifikasi listriknya, namun dapat menerima catu daya utama 5 V DC melalui antarmuka USB atau pin VIN berkat regulator internalnya. Salah satu keterbatasan teknis utama ESP32 adalah arus keluaran maksimum per pin GPIO hanya sekitar ~12 mA. Arus keluaran yang sangat rendah ini menjadikan ESP32, secara sederhana, sebagai pengendali logika atau pemancar sinyal. Karena mikrokontroler ini tidak dapat menggerakkan komponen berarus tinggi atau aktuator utama secara langsung, sistem mutlak memerlukan modul konverter perantara atau driver.

ESP32 memang memiliki batasan keluaran saat ini, namun chip ini didasarkan pada prosesor Xtensa® Dual-Core LX6 32-bit dengan frekuensi maksimum 240 MHz dan sangat efisien untuk implementasi algoritma kompleks seperti Logika Fuzzy (Arman dkk., 2023). Kelebihan lainnya adalah chip ini telah dilengkapi dengan modul WiFi (802.11 b/g/n) dan Bluetooth terintegrasi. ESP32 memiliki SRAM sebesar 520 KB serta berbagai antarmuka komunikasi seperti UART, SPI, dan I2C. Chip ini mampu melakukan

multitasking dengan sangat baik, mulai dari membaca data sensor secara paralel hingga mengirimkan data ke server atau aplikasi smartphone secara real-time, semuanya tanpa memerlukan modul tambahan.



Gambar 2. 1 Pinout Esp32

Tabel 2. 1 DataSheet ESP32

No	Parameter / Simbol	Deskripsi (Description)	Spesifikasi Teknis (Technical Specifications)
1.	CPU	Microprocessor	Xtensa single-/dual-core 32-bit LX6, up to 240 MHz
2.	ROM	Internal Memory	448 KB
3.	SRAM	Internal Memory	520 KB
4.	RTC SRAM	RTC Memory	16 KB
5.	Wi-Fi	Wireless Protocol	802.11 b/g/n, up to 150 Mbps
6.	Bluetooth	BT / BLE Protocol	Bluetooth v4.2 BR/EDR and BLE

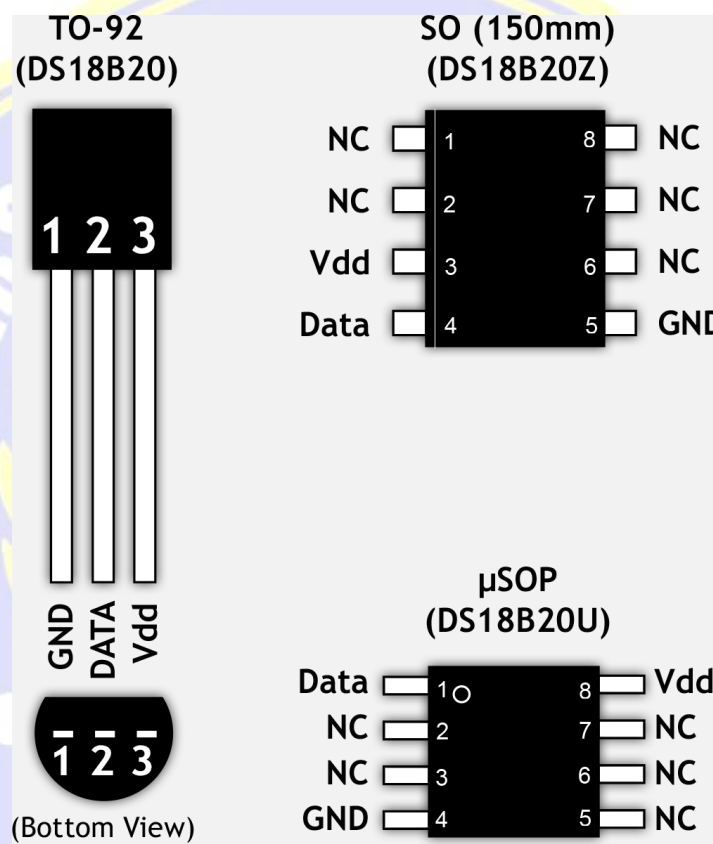
No	Parameter / Simbol	Deskripsi (Description)	Spesifikasi Teknis (Technical Specifications)
7.	V_{DD}	Operating Voltage	2.3 V ~ 3.6 V
8.	I_{VDD}	Current delivered by external power supply	≥ 0.5 A (Minimal 500 mA)
9.	T	Operating Temperature	-40°C ~ 125°C
10.	GPIO	General Purpose Input / Output	34 programmable GPIOs

1.3.2 Sensor Suhu DS18B20

Sensor suhu DS18B20 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 adalah perangkat sensor suhu digital yang menggunakan protokol komunikasi 1-Wire, di mana transmisi data hanya memerlukan satu kabel data dan ground untuk berkomunikasi dengan mikrokontroler. Berdasarkan karakteristik listriknya, perangkat ini beroperasi dalam rentang tegangan operasional 3,0 V hingga 5,5 V DC, sehingga sangat kompatibel untuk disuplai langsung melalui pin tegangan mikrokontroler. Sensor ini juga sangat hemat daya. Hanya diperlukan arus aktif sekitar 1 mA selama proses pembacaan data. Cara kerjanya secara internal adalah dengan mengubah suhu secara langsung menjadi sinyal digital dengan resolusi yang dapat diatur dari 9 hingga 12 bit, sehingga data yang dihasilkan jauh lebih stabil dan tidak memerlukan konverter analog ke digital (ADC) eksternal (Nugroho dkk., 2023). Selain itu, tingkat akurasi yang ditawarkan sangat tinggi, yaitu $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ pada rentang suhu dari -10°C hingga $+85^{\circ}\text{C}$, dengan kemampuan batas pengukuran total dari -55°C hingga $+125^{\circ}\text{C}$ (de Albuquerque Neto et al., 2025).

Dalam konteks implementasi pada *smart cold storage* ikan, DS18B20 sangat ideal karena umumnya tersedia dalam kemasan probe baja tahan karat yang kedap air

(*waterproof*). Desain fisik ini membuatnya sangat tahan terhadap kelembapan tinggi, kondensasi embun, maupun kontak langsung dengan es yang sering terjadi di dalam ruang pendingin (Pratikto et al., 2023). Keunggulan teknis lainnya adalah keberadaan alamat ID 64-bit unik yang tertanam di dalam setiap chip sensor. Fitur ini memungkinkan integrasi beberapa sensor sekaligus secara paralel pada satu pin GPIO mikrokontroler yang sama, sehingga pemantauan distribusi suhu di berbagai titik sudut boks penyimpanan dapat dilakukan secara presisi dan efisien tanpa memerlukan banyak jalur kabel data tambahan.



Gambar 2. 2 Sensor Suhu DS18B20

Tabel 2. 2 DataSheet Sensor Suhu DS18B20

No	PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
1.	Supply Voltage	V_{DD}	Local power	3		5.5	V
2.		V_{PU}	Parasite power	3		5.5	V

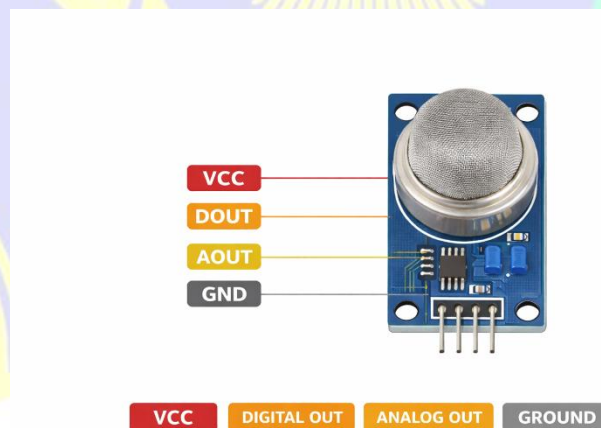
No	PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
	Pullup Supply Voltage		Local power	3		V_{DD}	V
3.	Thermometer Error	t_{ERR}	-10°C to +85°C			± 0.5	°C
			-30°C to +100°C			± 1	°C
			-55°C to +125°C			± 2	°C
4.	Input Logic-Low	V_{IL}		-0.3		0.8	V
5.	Input Logic-High	V_{IH}	Local power	2.2		The lower of 5.5 or $V_{DD} + 0.3$	V
			Parasite power	3			V
6.	Sink Current	I_L	$V_{I/O} = 0.4V$	4			mA
7.	Standby Current	I_{DDs}			750	1000	nA
8.	Active Current	I_{DD}	$V_{DD} = 5V$		1	1.5	mA
9.	DQ Input Current	I_{DQ}			5		μA
10	Drift				± 0.2		°C

2.3.3 Sensor Gas MQ-135

Sensor gas MQ-135 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 adalah sensor elektrokimia untuk mendeteksi berbagai jenis gas polutan di udara, seperti amonia (NH_3), senyawa sulfida, dan uap benzena. Sensor ini bekerja berdasarkan perubahan nilai resistansi bahan sensor, yaitu lapisan tipis Tin Dioksida (SnO_2) pada substrat keramik. Bahan ini memiliki konduktivitas rendah dalam kondisi udara bersih, tetapi ketika

terpapar gas amonia di udara bebas, terjadi proses reduksi yang melepaskan elektron, sehingga nilai resistansi internal sensor menurun secara signifikan seiring dengan meningkatnya konsentrasi gas. Sensor ini dilengkapi dengan pemanas internal untuk mengatur bahan sensor ke suhu operasi optimal agar reaksi kimia antara permukaan sensor dan molekul gas berlangsung secara stabil. Berdasarkan spesifikasi teknisnya, komponen pemanas ini memerlukan suplai tegangan mutlak (heater voltage) sebesar $5,0 \text{ V} \pm 0,1 \text{ V AC/DC}$ dengan konsumsi daya maksimum $\leq 800 \text{ mW}$. Selain itu, sistem pembacaan pada sensor ini menggunakan tegangan sirkuit (loop voltage) standar 5 V DC untuk menjamin stabilitas sinyal keluaran yang dikirim ke mikrokontroler.

Nilai resistansi analog yang dibaca oleh mikrokontroler harus dikonversi melalui proses kalibrasi untuk memperoleh data yang akurat dalam satuan part per million (ppm), (Mansyur et al., 2022) Proses tersebut dilakukan dengan membandingkan resistansi sensor saat terpapar gas (R_s) dengan resistansi sensor di udara bersih (R_0). Hubungan antara rasio R_s/R_0 dan konsentrasi gas bersifat logaritmik, sehingga persamaan *curve fitting* atau algoritma linearisasi harus diimplementasikan ke dalam kode program mikrokontroler. Dengan menggunakan konstanta kemiringan (*slope*) yang diperoleh dari kurva karakteristik sensor yang terdapat pada *datasheet*, data mentah berupa tegangan analog dapat dikonversi menjadi nilai digital dalam satuan ppm yang secara objektif merepresentasikan tingkat pembusukan ikan.



Gambar 2. 3 Sensor Suhu MQ-135

Tabel 2. 3 DataSheet Sensor MQ-135

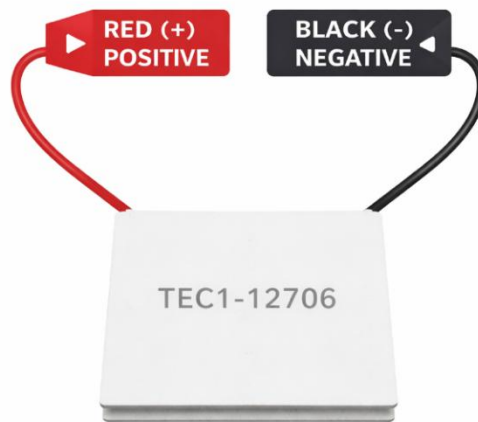
No	Simbol	Nama Parameter (Parameter Name)	Kondisi Teknis (Technical Condition)	Keterangan (Remarks)
1.	V_c	Tegangan Sirkuit (<i>Circuit voltage</i>)	$5V \pm 0.1$	AC OR DC
2.	V_H	Tegangan Pemanas (<i>Heating voltage</i>)	$5V \pm 0.1$	AC OR DC
3.	R_L	Hambatan Beban (<i>Load resistance</i>)	Dapat diatur (<i>Can adjust</i>)	-
4.	R_H	Hambatan Pemanas (<i>Heater resistance</i>)	$33\Omega \pm 5$	Room Tem
5.	P_H	Konsumsi Daya Pemanas (<i>Heating consumption</i>)	$< 800mW$	-
6.	T_{ao}	Suhu Operasional (<i>Using Tem</i>)	$-10^{\circ}C \sim 45^{\circ}C$	-
7.	T_{as}	Suhu Penyimpanan (<i>Storage Tem</i>)	$-20^{\circ}C \sim 70^{\circ}C$	-
8.	-	Rentang Deteksi Amonia NH_3	$10ppm \sim 300ppm$	-
9.	-	Waktu Pemanasan Awal (<i>Preheat time</i>)	$> 24Jam$ (<i>Over 24 hour</i>)	-

2.3.4 Termoelektrik Peltier

Perangkat termoelektrik Peltier ditunjukkan pada Gambar 2.4. Perangkat ini merupakan perangkat semikonduktor yang memanfaatkan efek elektrotermal untuk menghasilkan perbedaan suhu saat arus listrik dialirkan melaluinya. Prinsip kerja utama perangkat ini didasarkan pada efek Peltier, yaitu penyerapan atau pelepasan panas pada sambungan dua jenis bahan semikonduktor yang berbeda (tipe-p dan tipe-n) saat arus searah (DC) dialirkan. Pada sambungan ini, suhu menurun (menjadi lebih dingin) karena energi kinetik diserap di satu sisi saat elektron berpindah dari satu tingkat energi ke tingkat energi lainnya. Di sisi lain, energi panas dilepaskan (menjadi lebih hangat). Efek ini memungkinkan panas ditransfer secara aktif dari satu sisi ke sisi lain, tanpa menggunakan kompresor atau refrigeran kimia. Penelitian ini menggunakan modul Peltier seri TEC1-12706 sebagai aktuator utama pendinginan dalam Smart Cold Storage. Bagian ini beroperasi pada tegangan 12V DC sesuai dengan spesifikasi listriknya. Modul jenis ini harus disuplai dengan arus yang cukup besar untuk mencapai kapasitas transfer panas optimalnya, dengan arus maksimum (I_{max}) berkisar antara 5,8 A hingga 6 A. Profil catu daya ini mampu menghasilkan kapasitas pendinginan maksimum (Q_{max}) sekitar 50 W hingga 60 W dengan modul Peltier TEC1-12706. Dalam implementasi sebenarnya,

sisi dingin modul Peltier bersentuhan dengan kotak penyimpanan untuk mendinginkan bagian dalam kotak penyimpanan ikan, sedangkan sisi panas harus dilengkapi dengan heatsink dan kipas untuk membuang panas ke luar guna memastikan efek pendinginan yang optimal. Daya perangkat Peltier dikendalikan secara adaptif oleh mikrokontroler ESP32 menggunakan perintah digital absolut (HIGH/LOW) ke modul relai, memastikan pengoperasian pendinginan yang akurat sesuai dengan perhitungan logika fuzzy yang dilakukan. Teknologi ini sangat cocok untuk pembuatan prototipe karena ukurannya yang kecil, tidak bergetar, dan suhu rendah yang stabil, yang berkontribusi dalam menjaga rantai dingin ikan tetap utuh

(Sadighi et al., 2024).



Gambar 2. 4 Tec1-12706

Tabel 2. 4 Spesifikasi Fungsional Termoelektrik Peltier

No	Parameter Spesifikasi	Suhu Sisi Panas (Th) = 25°C	Suhu Sisi Panas (Th) = 50°C	Keterangan untuk Rancang Bangun
1.	Qmax (Kapasitas Pendinginan)	50 Watts	57 Watts	Daya serap panas maksimal dari dalam boks cold storage.
2.	Delta Tmax (Selisih Suhu Max)	66°C	75°C	Batas selisih suhu antara sisi panas dan sisi dingin. Ini adalah alasan mutlak mengapa Liquid Cooler wajib dipasang di sisi luar.

No	Parameter Spesifikasi	Suhu Sisi Panas (Th) = 25°C	Suhu Sisi Panas (Th) = 50°C	Keterangan untuk Rancang Bangun
3.	Imax (Arus Input Maksimal)	6.4 Amperes	6.4 Amperes	Batas arus yang ditarik oleh Peltier. Rangkaian pengontrol daya harus kuat menangani beban ini.
4.	Vmax (Tegangan Input Maksimal)	14.4 Volts	16.4 Volts	Batas tegangan aman (Power Supply standar yang digunakan biasanya 12V).
5.	Module Resistance (Hambatan)	1.98 Ohms	2.30 Ohms	Nilai hambatan internal dari elemen semikonduktor di dalamnya.

2.3.5 Liquid cooler

Sistem ini disebut Liquid Cooler, atau sistem pendingin berbasis cairan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5. Ini adalah metode perpindahan panas yang memanfaatkan konduktivitas termal cairan (biasanya air atau cairan pendingin) untuk menyerap dan mendistribusikan panas dari suatu komponen secara lebih efektif daripada pendinginan udara konvensional. Komponen utama sistem ini adalah blok air yang terpasang pada sumber panas, pompa untuk mengalirkan cairan, radiator untuk membuang panas ke udara luar, dan kipas untuk mempercepat proses konveksi pada sirip radiator. Pompa mengalirkan cairan pendingin melalui blok air dalam sistem sirkulasi loop tertutup. Energi panas diserap melalui konduksi dan diangkut ke radiator untuk didinginkan. Pompa kemudian memompa kembali cairan pendingin melalui sistem.

Dalam aplikasi Smart Cold Storage yang menggunakan Peltier, diperlukan pendingin cair untuk sisi panas elemen Peltier. Kinerja pendinginan sisi dingin sangat bergantung pada seberapa efektif panas dibuang dari sisi panas. Jika panas menumpuk, panas tersebut akan ditransfer kembali ke sisi dingin dan secara signifikan mengurangi efisiensi sistem. Pendingin cair memiliki kapasitas panas yang jauh lebih tinggi daripada heatsink udara, sehingga dapat menjaga suhu sisi panas tetap rendah dan stabil saat elemen Peltier beroperasi pada daya penuh melalui modul relai dan logika fuzzy (Li et al., 2024). Dengan sistem pendingin cair ini, rantai dingin ikan akan selalu dijaga pada rentang suhu optimal 15°C–25°C tanpa risiko perangkat keras mengalami panas berlebih.



Gambar 2. 5 Liquid cooler

Tabel 2. 5 Spesifikasi Fungsional Liquidcooler

No	Parameter Spesifikasi	Nilai Berdasarkan Pabrikan	Keterangan untuk Rancang Bangun Sistem
1.	Dimensi Radiator	159 x 120 x 27 mm	Ukuran referensi untuk melubangi boks luar pendingin agar sirkulasi udara panas lancar.

No	Parameter Spesifikasi	Nilai Berdasarkan Pabrik	Keterangan untuk Rancang Bangun Sistem
2.	Material Radiator	Aluminium	Penghantar panas yang ringan dan cepat melepas kalor ke udara bebas.
3.	Tegangan Operasional (Pompa & Kipas)	12 VDC	Sangat ideal! Bisa digabung satu sumber dengan catu daya Peltier dan Buck Converter.
4.	Arus Listrik Pompa (Pump Current)	0.2 A	Pompa menyedot daya sangat kecil, tidak akan membebani Power Supply utama.
5.	Kecepatan Pompa (Pump Speed)	2400 RPM $\pm$ 10%	Putaran konstan untuk memastikan air terus mengalir membuang panas dari keramik Peltier.
6.	Dimensi Kipas (Fan Dimensions)	120 x 120 x 25 mm	Ukuran kipas standar, mudah diganti jika terjadi kerusakan di kemudian hari.
7.	Kecepatan Kipas (Fan Speed)	500 - 2250 RPM $\pm$ 10%	Berputar sangat cepat saat suhu panas untuk membuang kalor dari radiator.
8.	Arus Listrik Kipas (Fan Current)	0.25 A	Arus maksimal kipas. Total arus Liquid Cooler (Pompa

No	Parameter Spesifikasi	Nilai Berdasarkan Pabrik	Keterangan untuk Rancang Bangun Sistem
			+ Kipas) hanya 0.45 Ampere.

2.3.6 Modul Relay

Modul relai 2-saluran 5 V yang ditunjukkan pada Gambar 2.6 merupakan papan antarmuka kontrol digital tipe Low Level Trigger yang digunakan untuk menghubungkan sistem mikrokontroler berdaya rendah dengan perangkat berarus tinggi. Modul ini dilengkapi isolasi optocoupler untuk setiap saluran dan arus penggerak sebesar 15 hingga 20 mA, sehingga memberikan perlindungan interferensi yang sangat baik bagi rangkaian kontrol. Modul ini (50,5 mm × 38,5 mm × 18,5 mm) sangat andal untuk mengendalikan berbagai peralatan rumah tangga dan industri hingga 250 V AC pada 10 A atau 30 V DC pada 10 A per saluran menggunakan logika TTL langsung dari mikrokontroler seperti Arduino atau Raspberry Pi. Untuk pengoperasiannya, modul ini menggunakan elektromagnet internal yang diaktifkan dan menarik armatur ketika pin input (IN1/IN2) menerima sinyal logika rendah (LOW). Perubahan mekanis ini menyebabkan terminal Common (COM) terhubung ke terminal Normally Open (NO) untuk menyalurkan daya ke beban, dan indikator LED pada papan akan menyala untuk menunjukkan status aktif. Sistem catu daya dapat dikonfigurasi melalui pin JD-VCC, yang dapat dipisahkan dari catu daya utama mikrokontroler menggunakan jumper bawaan jika diperlukan untuk menjaga stabilitas sistem saat mengendalikan beban berdaya tinggi. Dalam penelitian ini, arsitektur perangkat keras mencakup modul relai, yang dirancang sebagai sakelar digital utama yang dikendalikan oleh ESP32 untuk menyediakan dan mengontrol aliran daya ke elemen termoelektrik Peltier. Selain itu, relai ini juga menyalakan sirkuit periferai pendukung secara bersamaan, seperti pompa sirkulasi pada pendingin cairan dan kipas pembuangan panas, untuk memastikan proses pendinginan dan pembuangan panas berjalan pada tingkat optimal berdasarkan instruksi logika fuzzy (Hasan, 2024).



Gambar 2. 6 Modul Relay

Tabel 2. 6 Spesifikasi Fungsional Modul Relay

Kategori Spesifikasi	Parameter	Simbol	Nilai Min	Nilai Maks	Satuan
Kelistrikan Utama	Tegangan Masukan (Power Supply)	V_{in}	5	12	V (DC)
	Arus Pemicu (Driver Current per Channel)	I_{in}	15	20	mA
	Arus Operasional Keseluruhan	I	100	-	mA
Batas Beban (Load)	Tegangan Beban Arus Bolak-balik	V_{AC}	-	250	V
	Arus Beban Bolak-balik Maksimal	I_{AC}	-	10	A
	Tegangan Beban Arus Searah	V_{DC}	-	30	V
	Arus Beban Searah Maksimal	I_{DC}	-	10	A

Kategori Spesifikasi	Parameter	Simbol	Nilai Min	Nilai Maks	Satuan
Fisik & Mekanik	Panjang Modul	L	-	50.5	mm
	Lebar Modul	W	-	38.5	mm
	Tinggi Modul	H	-	18.5	mm
	Berat Modul	m	-	31	g
	Diameter Lubang Pemasangan	d	-	3.1	mm

2.3.7 Arsitektur IoT dan Sistem Komunikasi Nirkabel

Arsitektur Internet of Things (IoT) merupakan ekosistem terintegrasi di mana data dikirimkan dari sensor fisik ke server atau platform cloud melalui internet. Gambar 2.7 Proses ini dimulai pada lapisan persepsi. Pada lapisan ini, sensor-sensor (suhu, sensor gas) mengumpulkan parameter lingkungan, memprosesnya menggunakan mikrokontroler, dan mengirimkannya melalui lapisan jaringan menggunakan protokol komunikasi tertentu (Mahrous dkk., 2022). Di lapangan, infrastruktur internet kabel, khususnya di lokasi-lokasi tetap seperti gudang penyimpanan atau tempat lelang ikan, seringkali terbatas. Salah satu cara untuk mengatasi hal ini adalah dengan menggunakan sistem komunikasi nirkabel berbasis Mobile WiFi (MiFi). Perangkat MiFi menghubungkan mikrokontroler ESP32 ke internet secara mandiri melalui jaringan seluler GSM/4G, tanpa memerlukan penyedia layanan internet kabel. Dalam sistem ini, MiFi berfungsi sebagai titik akses Wi-Fi yang fleksibel, mendukung mobilitas data, dan menjaga kelangsungan transmisi informasi ke basis data bahkan di lokasi terpencil, selama perangkat berada dalam jangkauan sinyal seluler. Integrasi MiFi memungkinkan data suhu historis dan status kesehatan ikan dikirim secara real-time ke server MySQL atau MariaDB, yang dapat diakses pengguna kapan saja dan dari mana saja melalui

aplikasi smartphone. Fleksibilitas ini memastikan sistem peringatan dini tetap berfungsi pada tingkat optimal, tanpa batasan geografis dan tanpa penurunan kualitas ikan selama penyimpanan.



Gambar 2. 7 Modul MIFI

Tabel 2. 7 Spesifikasi Fungsional MIFI

No	Parameter Spesifikasi	Nilai Berdasarkan Manual Produk	Fungsi pada Sistem Smart Cold Storage
1.	Model Perangkat	4G LTE USB WiFi Modem (UFI)	Berfungsi sebagai Gateway seluler portabel yang menyediakan akses poin internet (Hotspot) untuk modul ESP32.
2.	Antarmuka & Tegangan Daya (Charging Mode)	USB 5V 1A	Sangat efisien, dapat langsung dicolokkan ke sirkuit penurun tegangan (step-down) 5V utama tanpa memerlukan baterai internal (bebas risiko baterai kembung).

No	Parameter Spesifikasi	Nilai Berdasarkan Manual Produk	Fungsi pada Sistem Smart Cold Storage
3.	Standar Jaringan Nirkabel (WiFi Standard)	IEEE 802.11 b/g/n	Bekerja di frekuensi 2.4 GHz, yang mana kompatibel 100% dengan antena internal ESP32 untuk komunikasi lokal nirkabel.
4.	Kecepatan Transmisi (Data Rate)	FDD-LTE: Download 150 Mbps, Upload 50 Mbps	Menyediakan kapasitas pita lebar (bandwidth) yang sangat memadai untuk mengirimkan data payload sensor suhu dan amonia secara real-time ke database.
5.	Pita Frekuensi Seluler (Frequency Band)	FDD: B1/B3/B5/B7/B8/B20	Memastikan perangkat dapat membaca berbagai kartu SIM dari operator seluler lokal di Indonesia untuk menjaga kontinuitas koneksi di lokasi terpencil.
6.	Mekanisme Jaringan	Plug and Play (Colok dan Menyalakan)	Memudahkan proses booting sistem; saat Power Supply utama dinyalakan, modem otomatis menyiarkan sinyal WiFi tanpa perlu konfigurasi ulang.

2.3.8 Metode/ Teori/ Algoritma (kekurangan metode/teori/algoritma yang lain, dan alasan menggunakan metode tersebut dalam penelitian)

Pendekatan yang paling umum dalam perancangan sistem pendingin untuk produk perikanan adalah sistem pengendalian konvensional berbasis termostat. Sistem pengendalian dasar ini didasarkan pada prinsip sakelar biner, dengan hanya satu parameter (pembacaan suhu). Namun, kelemahan utama dari metode konvensional ini adalah tidak adanya respons terhadap kondisi biokimia produk yang disimpan. Termostat

akan mematikan unit pendingin begitu titik setel suhu tercapai, terlepas dari apakah ikan di dalam ruang penyimpanan telah mulai melepaskan gas amonia akibat proses dekomposisi. Atau sebagai alternatif, terdapat metode kontrol linier matematis seperti PID (Proportional-Integral-Derivative). Pengontrol PID akurat dalam melacak suhu yang diinginkan. Namun, pengontrol ini memiliki kelemahan mendasar saat menangani sistem multi-input. Penggunaan PID pada dua domain fisik yang berbeda, yaitu suhu termodinamika dan konsentrasi gas biologis, memerlukan pemodelan diferensial dan matriks yang sangat kompleks sehingga membuatnya tidak efisien (Belman-flores et al., 2022).

Oleh karena itu, algoritma Logika Fuzzy yang didasarkan pada metode inferensi Tsukamoto dipilih sebagai solusi utama yang paling rasional untuk sistem Smart Cold Storage dalam penelitian ini. Alasan pemilihan metode ini adalah karena secara intuitif metode ini cocok untuk sistem multi-input, mirip dengan penalaran manusia. Metode Tsukamoto lebih efisien dalam sistem tertanam dibandingkan metode Mamdani yang memerlukan proses defuzzifikasi yang lebih intensif secara komputasi yang melibatkan perhitungan luas dan secara langsung menghasilkan keluaran tajam melalui nilai rata-rata terpusat dengan menggunakan fungsi implikasi monotonik. Hal ini memungkinkan mikrokontroler ESP32 untuk memutuskan aktivasi relai dengan kecepatan respons yang lebih tinggi dan penggunaan memori yang lebih optimal.

Aktuator dalam penelitian ini memiliki keluaran tajam (ON atau OFF) menggunakan modul relai. Namun, keputusan untuk menyalakan relai didasarkan pada matriks evaluasi fuzzy yang sangat cerdas dan adaptif. Logika ini memungkinkan mikrokontroler untuk mengendalikan sistem: jika lonjakan gas amonia terdeteksi dalam kategori “Alert” atau “Rotten”, sistem dapat memerintahkan relai pendingin atau kipas sirkulasi untuk tetap menyala penuh guna menghambat pertumbuhan bakteri dan mengeluarkan gas, meskipun suhu ruangan aktual telah mencapai ambang batas pendinginan. Oleh karena itu, Logika Fuzzy di sini berfungsi sebagai otak pengambil keputusan penuh bagi perangkat yang dapat mengambil langkah-langkah mitigasi penurunan kualitas secara objektif, yang tidak dapat dilakukan oleh pengontrol suhu tradisional. Implementasi algoritma Fuzzy pada mikrokontroler ESP32 untuk pengendalian Smart Cold Storage memiliki tiga tahap utama:

1. Fuzzifikasi: Langkah pertama adalah mengubah nilai numerik (crisp) yang diperoleh dari sensor suhu DS18B20 (dalam derajat Celcius) dan sensor gas MQ-135 (dalam ppm) menjadi variabel linguistik menggunakan fungsi keanggotaan.
2. Evaluasi Aturan (Inferensi): Sistem memproses variabel linguistik ini melalui serangkaian aturan logika tipe “IF-THEN”. Dalam metode Tsukamoto, digunakan fungsi implikasi monotonik; setiap aturan menghasilkan nilai crisp (z_k) tergantung pada derajat keanggotaan pemicu (α -predikat). Logika ini memungkinkan sistem untuk secara cerdas menentukan tingkat urgensi status kesegaran ikan dengan menggabungkan parameter sensor.
3. Defuzzifikasi (Rata-rata Terpusat): Tujuan tahap ini adalah memperoleh nilai crisp akhir (Z) dari rata-rata tertimbang semua aturan yang aktif. Nilai Z yang dihasilkan (skala 0–255) digunakan sebagai ambang batas aktivasi untuk Modul Relai. Jika nilai Z berada di atas ambang batas yang ditentukan oleh logika fuzzy, sistem akan mengirimkan sinyal HIGH (ON) untuk mengaktifkan elemen termoelektrik Peltier, sehingga memungkinkan pendinginan yang proporsional dan adaptif sesuai dengan kondisi biokimia ikan.

2.4 Penelitian Terdahulu

Tabel 2. 8 Perbandingan Metode

Judul Penelitian	Tahun	Rank	Metode	Fokus / Tujuan / Objek	Hasil/Temuan Utama	Kelebihan	Kekurangan	Relevansi / Kebaruan Penelitian Anda
Determining the Freshness of Milkfish (<i>Chanos chanos</i>) Using Electronic Nose.	2025	Q3	<i>K-Nearest Neighbor</i> (KNN).	Pengenalan pola emisi gas pembusukan	E-Nose dengan algoritma KNN (K=3) berhasil mengklasifikasi kesegaran ikan bandeng dengan akurasi 92,2%	Deteksi cepat (1 menit) dan klasifikasi objektif	hanya mendeteksi, tanpa <i>cold storage</i> atau aktuator	Memvalidasi secara ilmiah bahwa sensor gas efektif menentukan kesegaran ikan.
Pendeteksi Kesegaran Ikan menggunakan Sensor MQ-135	2022	Sinta 3	Thresholding statis (On-Off).	Deteksi kesegaran ikan melalui gas amonia.	Mampu mendeteksi perubahan kadar amonia.	Pemanfaatan sensor MQ-135 spesifik untuk amonia.	Hanya bergantung pada 1 parameter , kendali tidak presisi , butuh WiFi tetap.	Mendorong pemakaian PWM untuk presisi aktuator serta jaringan IoT mandiri (MiFi).

Judul Penelitian	Tahun	Rank	Metode	Fokus / Tujuan / Objek	Hasil/Temuan Utama	Kelebihan	Kekurangan	Relevansi / Kebaruan Penelitian Anda
DESIGN OF A WEB-BASED COLD STORAGE TEMPERATURE MONITOR...	2023	Sinta 3	Logika pemrograman dasar tanpa kecerdasan buatan.	Monitoring suhu dan kelembaban cold storage umum.	Data ditampilkan pada LCD dan Web.	Sangat memudahkan teknisi dalam memantau jarak jauh.	Bersifat pasif tanpa otomatisasi aktuator , tidak spesifik untuk komoditas ikan.	Motivasi transisi dari sistem yang sekadar "memantau" menjadi sistem kendali suhu "aktif".
Mackerel Tuna Freshness Identification Based on Eye Color...	2024	Sinta 2	K-Nearest Neighbor (KNN).	Identifikasi kesegaran tuna makarel.	Mampu mengklasifikasi tingkat kesegaran dari citra mata.	Memanfaatkan image processing yang objektif.	Tidak ada pencegahan pembusukan (pasif) , tidak berbasis real-time IoT.	Membuktikan pentingnya deteksi dini biologis (gas) sebelum pembusukan terlihat oleh mata.
Classifying the freshness of large yellow croaker...	2025	Q1	Convolutional Neural Network (CNN).	Klasifikasi kesegaran ikan melalui teknik visi komputer.	Mengidentifikasi kerusakan fisik ikan utuh.	Memakai algoritma kecerdasan buatan kelas atas.	Hanya bersifat analitik/pasif , fokus pada kerusakan visual.	Menyoroti perlunya pendekatan multi-parameter tertutup dan fitur kendali lingkungan (active cooling).

Judul Penelitian	Tahun	Rank	Metode	Fokus / Tujuan / Objek	Hasil/Temuan Utama	Kelebihan	Kekurangan	Relevansi / Kebaruan Penelitian Anda
Fish Freshness Indicator for Sensing Fish Quality...	2023	Q1	Penilaian subjektif (kimia/warna).	Penilaian kualitas ikan selama waktu penyimpanan.	Menunjukkan degradasi kondisi ikan dari warna.	Pendekatan visual yang sangat sederhana.	Tidak otomatis (manual on/off), data hanya bisa diakses di lokasi uji.	Mendorong perlunya sensor digital objektif dan sistem IoT terintegrasi.
E-Sniffer: Raw Meat Freshness Detection Tool...	2025	Q3	Fuzzy Logic Mamdani (untuk klasifikasi bau).	Deteksi kesegaran daging mentah portabel.	Mengklasifikasikan kesegaran berbasis fusi sensor gas.	Pemanfaatan sensor fusion multigas.	Tidak mengontrol suhu (pasif), jangkauan komunikasi jarak dekat (Bluetooth).	Referensi algoritma Fuzzy yang ditingkatkan menjadi closed-loop control dengan koneksi 4G/MiFi.

Judul Penelitian	Tahun	Rank	Metode	Fokus / Tujuan / Objek	Hasil/Temuan Utama	Kelebihan	Kekurangan	Relevansi / Kebaruan Penelitian Anda
Combining Knowledge- and Data-Driven Fuzzy Approach...	2021	Q1	Fuzzy berbasis Knowledge & Data-Driven.	Mengevaluasi masa simpan produk seafood.	Menghasilkan Indeks kualitas (FQDI).	Analisis data berbasis indikator laboratorium yang mendalam.	Sistem pasif tanpa kendali fisik, memerlukan instrumen lab dan waktu panjang.	Menginspirasi pembuatan alat yang praktis, menggunakan sensor terjangkau dan real-time.
DESIGN OF AN AUTOMATIC TEMPERATURE RECORDER...	2024	Sinta 1	Perekaman IoT (tanpa metode AI).	Merekam suhu palka kapal secara otomatis.	Data rekaman suhu terkirim ke server lokal/web.	Sangat sesuai dengan regulasi pencatatan suhu palka.	Hanya bekerja sebagai perekam pasif, mengandalkan satu parameter (suhu).	Menjadi acuan inovasi sistem dua parameter (suhu + gas) dengan aktuator pendingin cerdas.

Judul Penelitian	Tahun	Rank	Metode	Fokus / Tujuan / Objek	Hasil/Temuan Utama	Kelebihan	Kekurangan	Relevansi / Kebaruan Penelitian Anda
A high-performance flexible ammonia sensor...	2025	Q1	Deep learning (Bi-LSTM) dengan sensor nanocomposite.	Pemantauan kesegaran ikan.	Memprediksi tingkat amonia dengan kompensasi suhu.	Presisi sensor material nano sangat tinggi.	Hanya untuk skala laboratorium (pasif), komputasi AI terlampau berat.	Bukti signifikansi gas amonia yang perlu dipadukan dengan Fuzzy Logic mikrokontroler agar sistem menjadi praktis.

2.5 Analisa Kebaruan Penelitian

Penelitian ini sangat inovatif karena pergeserannya dari sistem pemantauan pasif ke sistem pengendalian loop tertutup aktif dalam rantai dingin perikanan. Sebagian besar penelitian sebelumnya mengenai deteksi kesegaran ikan, misalnya yang menggunakan teknologi penglihatan komputer atau detektor gas portabel, umumnya bersifat pasif dan hanya digunakan sebagai alat klasifikasi, tanpa adanya kemungkinan untuk melakukan intervensi fisik guna menghentikan degradasi lebih lanjut (Febriana et al., 2025). Sebaliknya, sistem yang diusulkan dalam penelitian ini dapat secara objektif mendeteksi tingkat pembusukan dan juga dapat mengontrol stabilitas suhu ruang penyimpanan guna menjaga kualitas ikan di dalam ruang penyimpanan.

Penelitian ini menggunakan metode Sensor Fusion yang menggabungkan sensor suhu DS18B20 dan sensor gas amonia MQ-135 untuk mencapai objektivitas dan akurasi yang tinggi. Pendekatan ini mengatasi keterbatasan metode organoleptik konvensional (SNI 2729:2013) yang sangat subjektif serta melengkapi penelitian sebelumnya, yang sebagian besar hanya memantau parameter tunggal secara terpisah. Dengan mengukur kadar amonia secara real-time, sistem ini menawarkan sistem peringatan dini yang lengkap, yang mampu mendeteksi degradasi biokimia ikan jauh sebelum tanda-tanda fisik pembusukan terlihat oleh mata telanjang.

Kontribusi teknis utama yang menambah nilai pada penelitian ini adalah penerapan kecerdasan buatan melalui algoritma Logika Fuzzy dengan metode inferensi Tsukamoto, yang tertanam langsung dalam memori mikrokontroler ESP32 sebagai sistem kontrol tertanam. Sistem ini dirancang untuk memberikan hasil komputasi yang jauh lebih adaptif dan proaktif, berbeda dengan sistem kendali dalam penelitian sebelumnya yang masih sebagian besar didasarkan pada mekanisme kendali on-off konvensional menggunakan satu sensor yang lambat merespons perubahan kondisi lingkungan dan rentan menghasilkan fluktuasi suhu yang tidak stabil. Mekanisme Fuzzy menghasilkan nilai urgensi yang presisi dan

dapat diukur, berdasarkan hasil perhitungan fusi data yang sangat dinamis mengenai perubahan suhu kabin dan fluktuasi konsentrasi gas amonia secara real-time, serta mengatur waktu dan durasi aktivasi daya untuk elemen pendingin termoelektrik Peltier, yang efisiensi kinerjanya telah dimaksimalkan melalui integrasi sistem pendingin cair dan manajemen sakelar daya melalui Modul Relay. (Nugroho et al., 2023).

Selain itu, penelitian ini menawarkan solusi infrastruktur komunikasi data yang lengkap untuk mengatasi masalah konektivitas di lapangan. Pada perangkat ini, sistem IoT secara khusus terintegrasi dengan modul Mobile WiFi (MiFi) berbasis seluler, sehingga transmisi data untuk pelacakan suhu dan kesegaran ikan dapat dipertahankan di tempat-tempat seperti pelabuhan atau pasar lelang ikan yang seringkali tidak dilengkapi dengan koneksi internet kabel statis. Sistem pemantauan ini dapat diakses oleh pengguna kapan saja dan di mana saja melalui aplikasi ponsel cerdas dan basis data terpusat berkat fleksibilitasnya (Hermawan et al., 2023).

