

**RANCANG BANGUN SISTEM DETEKSI KESEGARAN
DAGING SAPI BERBASIS INTERNET OF THINGS (IoT)
MENGGUNAKAN INTEGRASI MULTI-SENSOR**

PROPOSAL TUGAS AKHIR



**MUHAMAD RAFI TAFTAZANI
NIM 1122097000012**

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SYARIF HIDAYATULLAH
JAKARTA 1447 H / 2025 M**

**LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING
RANCANG BANGUN SISTEM DETEKSI KESEGARAN
DAGING SAPI BERBASIS INTERNET OF THINGS (IoT)
MENGGUNAKAN INTEGRASI MULTI-SENSOR**

PROPOSAL TUGAS AKHIR

**MUHAMAD RAFI TAFTAZANI
NIM 11220970000012**

Mengetahui,

Ketua Program Studi Fisika

**Muhammad Nafian, M.Si
NIP. 19850711202121002**

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, taufik, dan hidayah-Nya sehingga proposal tugas akhir berjudul “*RANCANG BANGUN SISTEM DETEKSI KESEGARAN DAGING SAPI BERBASIS INTERNET OF THINGS (IoT) MENGGUNAKAN INTEGRASI MULTI-SENSOR*” dapat diselesaikan. Solawat serta salam senantiasa tercurahkan kepada baginda alam, Nabi Muhammad SAW, beserta keluarga, sahabat, dan pengikutnya hingga akhir zaman.

Selama proses studi dan penyusunan proposal ini, penulis mendapatkan banyak bantuan, bimbingan, dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada:

1. Dr. Husni Teja Sukmana, S.T., M.Sc, Ph.D., selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negri Syarif Hidayatullah Jakarta.
2. Bapak Muhammad Nafian M.Si., selaku Ketua Program Studi Fisika.
3. Ibu Elvan Yuniarti, M.Si., dan Ibu Dewi Lestari, M.Si., selaku Dosen Fisika Instrumentasi atas ilmu, arahan, kritik, dan motivasi menyusun proposal ini.
4. Seluruh dosen program studi Fisika, atas segala ilmu yang diberikan selama perkuliahan.
5. Kedua orang tua penulis, atas kasih sayang, doa, dan dukungan tanpa henti yang menjadi motivasi besar penulis untuk terus berusaha.
6. Teman-teman Instrumentasi 2022 dan rekan Fisika angkatan 2022 atas kebersamaan, bantuan, dan dukungan yang tak terlupakan.

Penulis menyadari penyusunan proposal tugas akhir ini jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan guna melengkapi segala kekurangan dan keterbatasan dalam penyusunan proposal ini.

Jakarta, 28 September 2025
Penulis



Muhamad Rafi Taftazani
NIM. 11220970000012

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING	ii
KATA PENGANTAR	ii
DAFTAR ISI	iii
BAB I	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Masalah	3
BAB II	4
TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Penelitian terdahulu	4
2.2 Daging Sapi dan Proses Pembusukan	6
2.3 Sensor Gas (MQ-135)	7
2.4 Sensor Gas (MQ-136)	9
2.5 Sensor Warna (TCS34725)	11
2.6 Sensor Suhu (DHT22)	13
2.7 Sensor pH (pH-4502C)	15
2.8 Sistem berbasis aturan (Rules – Based System)	18
2.9 Mikrokontroller ESP32	20
2.10 Internet of Things	22
BAB III	24
METODOLOGI PENELITIAN	24
3.1 Rancangan waktu dan tempat penelitian	24
3.2 Peralatan Penelitian	25
3.3 Tahap dan Alur Penelitian	26
3.4 Prosedur Penelitian	29
KESIMPULAN	32
DAFTAR PUSTAKA	33

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Daging sapi merupakan sumber protein hewani berkualitas tinggi, kaya akan asam amino esensial, dan mengandung nutrisi penting seperti zat besi, seng, vitamin B12, dan kolin, yang berperan penting dalam fungsi kekebalan tubuh, pembentukan sel darah merah, dan menjaga kesehatan saraf. Konsumsi daging sapi yang cukup mendukung pertumbuhan dan perkembangan remaja serta menjaga massa otot pada populasi lanjut usia yang rentan terhadap sarcopenia. Namun, konsumsi daging sapi yang berlebihan dapat meningkatkan risiko penyakit metabolismik seperti obesitas, penyakit kardiovaskular, kanker kolorektal, dan gangguan pencernaan akibat lemak jenuh, kolesterol, dan senyawa karsinogenik tertentu yang terdapat dalam daging merah.

Konsumsi daging sapi di Indonesia terus meningkat sejalan dengan pertumbuhan populasi dan meningkatnya kesadaran masyarakat akan pentingnya asupan protein hewani, dengan rata-rata konsumsi mencapai 2,44–2,70 kg per kapita per tahun dalam beberapa tahun terakhir. Permintaan akan daging sapi segar sangat penting, namun di sisi lain, mengidentifikasi kesegaran daging sapi di pasar dan rumah tangga tetap menjadi tantangan besar.

Keamanan pangan merupakan aspek yang sangat penting dan harus ditangani dengan serius, terutama terkait dengan kualitas dan kesegaran produk daging sapi, yang sangat mempengaruhi kesehatan konsumen dan keberlanjutan usaha kuliner seperti UMKM dan restoran. Konsumsi daging sapi yang aman dan segar tidak hanya menjaga kesejahteraan masyarakat, tetapi juga mendukung industri pangan untuk tetap kompetitif dan dapat diandalkan dalam menyediakan bahan baku berkualitas.

Saat ini, sebagian besar konsumen menilai kesegaran daging sapi secara subjektif melalui indra penciuman dan penglihatan mereka (misalnya, bau amis, warna merah cerah) saja. Metode ini bersifat sementara dan rentan terhadap kesalahan, terutama dalam membedakan antara daging yang benar-benar segar, mulai membusuk, atau tidak layak dikonsumsi. Faktanya, daging yang mulai membusuk menghasilkan senyawa berbahaya (*VOCs*) seperti amonia (NH_3) dan hidrogen sulfida (H_2S) sebagai hasil dari dekomposisi mikroba. Senyawa

volatil ini tidak hanya mengurangi kualitas organoleptik (bau dan rasa), tetapi juga berpotensi membahayakan kesehatan jika terpapar secara berlebihan. Misalnya, amonia dikenal sebagai indikator pembusukan makanan, sedangkan H_2S memiliki bau busuk dan bersifat toksik. Oleh karena itu, diperlukan metode penilaian objektif dan kuantitatif untuk mendeteksi tingkat kesegaran daging secara cepat dan akurat.

Berbagai penelitian telah berusaha mengatasi masalah ini dengan menggunakan sensor elektronik, khususnya sensor gas, untuk memberikan pengukuran yang lebih objektif dalam mendeteksi kesegaran daging. Penggunaan sensor gas memungkinkan pengukuran senyawa volatil yang dihasilkan dari proses pembusukan. Namun, sensor tunggal seperti sensor gas masih memiliki keterbatasan dalam hal sensitivitas dan ketahanan terhadap variabel lingkungan seperti suhu dan kelembapan, sehingga akurasi deteksi belum optimal.

Kelemahan lain dari sistem sensor tunggal adalah ketidakmampuannya untuk mendeteksi semua aspek kerusakan daging secara holistik, seperti perubahan warna permukaan atau nilai pH, yang juga merupakan indikator penting kualitas daging. Batasan ini dapat menyebabkan interpretasi yang salah terhadap hasil dan ketidakandalan dalam aplikasi pemantauan yang memerlukan ketepatan.

Untuk mengatasi masalah ini, diperlukan desain sistem deteksi kesegaran daging sapi yang terintegrasi dengan multi-sensor. Sistem ini akan menggabungkan sensor gas, sensor warna, sensor suhu, dan sensor pH untuk mendapatkan gambaran komprehensif dan akurat mengenai kesegaran daging. Selain itu, sistem ini akan berbasis Internet of Things (IoT) untuk pemantauan secara real-time. Pengambilan keputusan akan menggunakan metode penilaian berbasis aturan yang dapat memproses data dari berbagai sensor secara bersamaan sebagai dasar untuk penilaian kesegaran daging yang objektif dan dapat diandalkan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, berbagai masalah dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana rancang bangun untuk sistem deteksi kesegaran daging sapi yang mengintegrasikan sensor gas, warna, suhu, dan pH dengan mikrokontroler ESP32 berbasis IoT?
2. Bagaimana karakteristik multi-sensor dalam detektor kesegaran daging sapi?
3. Bagaimana hasil analisis implementasi detektor kesegaran daging sapi terhadap lama penyimpanan?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, maka tujuan dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Merancang bangun detektor kesegaran daging sapi dengan integrasi multisensor.
2. Mendapatkan data karakterisasi dari setiap sensor mengenai perubahan kesegaran (sensor mq135, mq136, sensor warna, dan pH).
3. Menganalisis kesegaran sapi terhadap lama penyimpanan.

1.4 Manfaat Penelitian

Diharapkan penelitian ini akan memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan solusi detektor kesegaran sapi berbasis IoT yang dapat dimanfaatkan lebih lanjut untuk membantu konsumen, pedagang daging, atau UMKM dalam memastikan kualitas daging sapi secara objektif dan mudah.

1.5 Batasan Masalah

Berdasarkan rumusan masalah, tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Objek penelitian ini hanya berfokus pada daging sapi (spesifik daging sapi)
2. Sensor yang digunakan dalam penelitian ini adalah sensor gas (MQ-135 dan MQ-136), sensor warna (TCS34725), sensor suhu (DHT22), dan sensor pH (pH-4502C)
3. Sistem ini tidak menggunakan metode Machine Learning, melainkan sistem berbasis aturan dengan metode skorsing.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian terdahulu

No	Nama Peneliti & Tahun	Judul	Metode yang Digunakan	Hasil	Kelemahan/Keterbatasan
1	Damdam et al., 2023	IoT-Enabled Electronic Nose System for Beef Quality Monitoring	Sensor gas (CO_2 , NH_3 , C_2H_4), sensor suhu/kelembaban, ESP32-S3, cloud, validasi mikrobiologi & pH manual	Deteksi gas pembusukan, monitoring real-time, validasi dengan uji mikrobiologi	Tidak ada sensor warna & pH otomatis, tidak deteksi H_2S
2	Arifani et al., 2025	Analysis of Odor and Color Parameters in Meat Freshness Detection	Sensor gas (MQ-137, MQ-136), sensor warna (TCS3200), pH sensor, kinetika reaksi, Arduino	Deteksi NH_3 , H_2S , perubahan warna, klasifikasi segar/busuk, analisis kinetika pembusukan	Tidak ada sensor suhu, pH tidak terintegrasi real-time, belum IoT/cloud
3	Mazhar Iqbal et al., 2025	IoT-Enabled Food Freshness Detection Using Multi-Sensor Data Fusion and Mobile Sensing Interface	Sensor gas MOS (MQ-3, MQ-7, MQ-138), sensor suhu/kelembaban, machine learning (SVM, ANN, PCA, LDA)	E-nose membedakan jenis daging, deteksi kontaminasi babi, analisis aroma makanan	Tidak ada sensor pH & warna, fokus pada autentikasi halal, bukan kesegaran daging
4	E-Sniffer Team, 2024	E-Sniffer – Raw Meat Freshness Detection Tool Based on Odor Classification and Fuzzy Logic Utilizing Gas Fusion Sensor	Sensor gas (SGP40, MQ-137), DHT22, ESP32, fuzzy logic Mamdani, aplikasi mobile	Deteksi TVOC, NH_3 , H_2S , klasifikasi fresh/slightly spoiled/not fresh, akurasi 80%	Tidak ada sensor warna & pH, belum cloud, kalibrasi terbatas pada jenis daging tertentu

5	Ariadi, R. A. (2025)	Alat Pendekripsi Kualitas Ikan dan Daging Sapi Berbasis IoT	Sensor MQ3 &MQ135, pH, suhu, Arduino Mega, IoT (Telegram)	Deteksi dini kualitas dengan monitoring jarak jauh
---	-------------------------	--	---	---

Berdasarkan tabel di atas, sebagian besar studi sebelumnya hanya menggunakan satu atau dua jenis sensor (umumnya sensor gas atau sensor warna) dan cenderung mengandalkan pembelajaran mesin untuk menentukan klasifikasi tingkat kesegaran daging. Studi-studi ini seringkali tidak mempertimbangkan parameter penting lainnya seperti suhu dan pH, padahal kedua parameter tersebut sangat mempengaruhi hasil deteksi kesegaran dan sangat penting untuk validitas praktis di lapangan. Selain itu, kebanyakan sistem yang digunakan pada studi sebelumnya umumnya menggunakan machine learning (ML), sehingga sulit untuk diimplementasikan pada platform terbatas atau sulit dipahami oleh pengguna awam. Walaupun machine learning sangat diandalkan dalam proses penentuan kualitas kesegaran daging sapi, proposal penelitian ini lebih memilih untuk tidak menggunakan machine learning karena keterbatasan kemampuan dalam metode machine learning,

Keunikan penelitian ini terletak pada integrasi empat jenis sensor utama ke dalam satu sistem, yaitu sensor gas (MQ135 & MQ136), sensor warna (TCS34725), sensor suhu dan kelembaban (DHT22), dan sensor pH (pH-4502C), yang belum pernah diintegrasikan secara komprehensif dalam satu perangkat IoT untuk mendekripsi kesegaran daging sapi. Keuntungan lain adalah penggunaan metode skorsing berbasis aturan (non-ML), yang membuat sistem ini lebih transparan, mudah diadaptasi di lingkungan industri kecil dan UMKM, serta efisien dalam penggunaan sumber daya tanpa mengorbankan akurasi pengukuran. Dengan integrasi sensor dan manajemen data berbasis IoT, sistem ini juga memungkinkan pemantauan secara real-time yang praktis dan ramah pengguna.

Saran untuk penelitian lebih lanjut meliputi penambahan metode machine learning yang lebih ideal dan andal dalam proses deteksi kesegaran daging sapi, misalnya dengan menerapkan algoritma mendalam seperti *Convolutional Neural*

Network (CNN), *Artificial Neural Network* (ANN) dan algoritma lainnya, yang mampu melakukan klasifikasi yang lebih akurat berdasarkan pola data sensor yang kompleks seperti multisensor. Selain itu, penelitian lebih lanjut juga dapat dilengkapi dengan penggunaan sensor load cell untuk menghitung massa daging secara otomatis. Penambahan sensor ini bertujuan agar sistem tidak hanya dapat mendeteksi tingkat kesegaran berdasarkan emisi gas, tetapi juga mengukur berat daging yang akan dianalisis, sehingga hasil perhitungan menjadi lebih komprehensif, objektif, dan dapat diterapkan pada berbagai sampel daging dengan ukuran yang sama.

2.2 Daging Sapi dan Proses Pembusukan

Daging sapi adalah makanan yang sangat bergizi, terdiri dari air (66–80%), protein (16–22%), lemak (1,5–14%), dan jumlah kecil karbohidrat, mineral, dan vitamin. Kandungan air yang tinggi membuat daging menjadi media yang ideal untuk pertumbuhan mikroorganisme. Komposisi kimia daging dapat bervariasi tergantung pada spesies, usia, kondisi hewan, serta metode penyimpanan dan pengolahan. Protein dalam daging terdiri dari miofibril, sarcoplasma, dan jaringan ikat, masing-masing berperan penting dalam struktur dan tekstur daging.

Setelah penyembelihan, daging mengalami rigor mortis, perubahan biokimia yang menyebabkan otot mengeras akibat penurunan kadar ATP. Selama penyimpanan, aktivitas enzim dan mikroorganisme menyebabkan dekomposisi protein, lemak, dan karbohidrat menjadi senyawa yang lebih sederhana. Proses ini menghasilkan senyawa seperti indol, skatol, merkaptan, amonia, dan hidrogen sulfida (H_2S), yang menyebabkan daging berbau tidak sedap.

Aktivitas mikroba, terutama bakteri seperti *Pseudomonas*, *Salmonella* sp., *Staphylococcus aureus*, dan *Escherichia coli*, memainkan peran utama dalam proses dekomposisi. Mikroba ini memanfaatkan kandungan air dan nutrisi yang tinggi dalam daging untuk berkembang biak, sehingga mempercepat pembusukan daging. Selain itu, faktor lingkungan seperti suhu, kelembapan, dan oksigen juga mempengaruhi laju pertumbuhan mikroba dan proses dekomposisi.

Selama proses pembusukan, warna daging berubah dari merah cerah menjadi abu-abu kecokelatan atau kehijauan akibat oksidasi mioglobin dan aktivitas mikroba. Nilai pH daging segar umumnya berkisar antara 5,3 hingga 6,5, tetapi meningkat seiring waktu akibat penumpukan senyawa alkali yang dihasilkan dari dekomposisi protein oleh mikroba. Peningkatan pH ini juga berkorelasi dengan

penurunan kapasitas pengikatan air dan perubahan tekstur daging, menyebabkan daging menjadi lebih lembut dan berair.

Penelitian terbaru menyoroti pentingnya memantau parameter fisiko-kimia seperti pH, warna, dan kandungan air sebagai indikator utama kesegaran daging sapi. Studi oleh Chandraningtyas dkk. (2025) menegaskan bahwa H₂S merupakan salah satu senyawa utama yang dihasilkan dari dekomposisi protein oleh mikroorganisme dalam daging sapi. Sementara itu, studi lain menunjukkan bahwa perubahan pH dan warna daging dapat digunakan sebagai indikator objektif untuk mendeteksi tingkat kesegaran dan pembusukan daging sapi.

Dengan memahami perubahan biokimia dan fisik yang terjadi selama proses pembusukan, pengembangan sistem deteksi kesegaran daging berbasis sensor (seperti sensor gas, warna, suhu, dan pH) sangat relevan untuk meningkatkan keamanan pangan dan kualitas produk daging sapi.

2.3 Sensor Gas (MQ-135)

Sensor MQ135 adalah sensor gas semikonduktor yang diproduksi oleh Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd. Bahan sensitif sensor ini adalah oksida timah (SnO₂), yang memiliki konduktivitas rendah dalam udara bersih. Prinsip kerjanya didasarkan pada perubahan konduktivitas bahan semikonduktor saat terpapar gas target. Ketika gas polutan tertentu hadir di sekitarnya, konduktivitas sensor akan meningkat seiring dengan peningkatan konsentrasi gas. Perubahan konduktivitas ini dapat dikonversi menjadi sinyal output yang sesuai dengan konsentrasi gas melalui sirkuit elektronik sederhana (Winsen, 2015).

Menurut datasheet, sensor MQ135 memiliki sensitivitas tinggi terhadap amonia (NH₃), sulfida, dan uap benzene. Sensor ini juga dapat memantau asap dan berbagai gas beracun lainnya dengan baik. Rentang deteksinya adalah 10 hingga 1000 ppm untuk gas seperti amonia, toluena, hidrogen, dan asap. Karena kemampuannya mendeteksi berbagai gas beracun dengan biaya rendah, sensor ini banyak digunakan dalam alarm gas domestik, alarm gas industri, dan detektor gas portabel (Winsen, 2015).



Gambar 2.1 MQ-135

Sensor MQ135 memerlukan dua sumber tegangan untuk beroperasi, Tegangan Pemanas (VH) dan Tegangan Sirkuit (VC). Tegangan pemanas sebesar $5,0\text{ V} \pm 0,1\text{ V}$ (AC atau DC) digunakan untuk menyediakan suhu operasi standar bagi sensor. Tegangan sirkuit sebesar $5,0\text{ V} \pm 0,1\text{ V}$ DC menyediakan tegangan deteksi untuk resistansi beban (RL) yang dihubungkan secara seri dengan sensor. Nilai resistansi beban ini dapat disesuaikan. Sensor ini memiliki konsumsi daya pemanas (PH) $\leq 950\text{ mW}$ dan memerlukan waktu pemanasan awal (preheat time) lebih dari 48 jam dalam kondisi uji standar (suhu $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ dan kelembaban $55\% \pm 5\%$ RH) untuk mencapai stabilitas (Winsen, 2015).

Karakteristik sensitivitas sensor terhadap perubahan suhu dan kelembaban lingkungan juga perlu dipertimbangkan. Seperti yang ditunjukkan pada grafik karakteristik suhu/kelembaban dalam datasheet, nilai resistansi sensor (Rs) akan bervariasi tergantung pada kondisi lingkungan. Oleh karena itu, kondisi lingkungan selama pengukuran harus dikendalikan atau dicatat untuk memastikan konsistensi pembacaan (Winsen, 2015).

Sirkuit uji dasar untuk sensor MQ135 terdiri dari dua bagian utama: sirkuit pemanas dan sirkuit pengukuran sinyal. Pin 2 dan 5 terhubung ke tegangan pemanas (VH), sementara pin 4 dan 6 terhubung ke tegangan sirkuit (VC) melalui resistor beban (RL). Output sinyal (VRL) diambil dari tegangan di resistor beban ini. Peningkatan konsentrasi gas akan menurunkan resistansi sensor (RS), yang menyebabkan peningkatan tegangan keluaran VRL (Winsen, 2015)

Ada beberapa kondisi yang harus dihindari untuk memastikan kinerja dan umur panjang sensor, termasuk paparan uap silikon organik, konsentrasi tinggi gas korosif (seperti H_2S , SO_x , Cl_2 , HCl), paparan air atau alkali, dan pembekuan. Sensor juga tidak boleh diberi tegangan melebihi spesifikasi atau diberi tegangan pada pin yang salah (Winsen, 2015).

Relevansi sensor MQ135 dalam studi ini sangat tinggi dan langsung. Daging sapi yang mulai membusuk mengalami dekomposisi protein oleh mikroorganisme, yang menghasilkan senyawa volatil tertentu. Dua senyawa kunci yang menjadi indikator pembusukan adalah:

1. Amonia (NH_3): Gas ini merupakan produk utama dari dekomposisi protein. Peningkatan konsentrasi amonia di sekitar daging sangat korelasi dengan tingkat pembusukan.
2. Sulfida: Senyawa seperti hidrogen sulfida (H_2S), yang menghasilkan bau khas “telur busuk”, juga dihasilkan selama pembusukan.

Berdasarkan datasheet, MQ135 secara khusus disebutkan memiliki sensitivitas tinggi terhadap amonia dan sulfida, menjadikannya pilihan ideal sebagai “hidung elektronik” untuk mendeteksi tahap awal hingga lanjut pembusukan daging. Polanya peningkatan keluaran sensor seiring waktu selama penyimpanan daging akan menjadi fitur utama yang digunakan untuk melatih model Machine Learning dalam mengklasifikasikan tingkat kesegaran daging (segar, tidak segar, busuk). Dengan demikian, MQ135 berfungsi sebagai komponen instrumentasi yang mengubah fenomena kimia (emisi gas) menjadi besaran listrik yang dapat diukur dan dianalisis.

2.4 Sensor Gas (MQ-136)

Sensor MQ136 adalah sensor gas semikonduktor yang dirancang khusus untuk mendeteksi hidrogen sulfida (H_2S). Bahan sensitif sensor ini, seperti sensor seri MQ lainnya, adalah oksida timah (SnO_2), yang memiliki konduktivitas rendah dalam udara bersih. Prinsip kerjanya memanfaatkan perubahan sifat listrik bahan semikonduktor ini. Ketika gas H_2S hadir, konduktivitas sensor meningkat sebanding dengan konsentrasi gas tersebut. Perubahan konduktivitas ini kemudian dapat diubah menjadi sinyal keluaran tegangan yang sebanding dengan konsentrasi gas melalui sirkuit elektronik sederhana (Winsen, 2015).

Berdasarkan datasheet, sensor MQ136 memiliki spesifikasi tinggi terhadap gas hidrogen sulfida (H_2S). Sensor ini juga dapat memantau uap organik yang mengandung belerang dengan baik. Rentang deteksinya adalah 1 hingga 200 ppm H_2S , yang menunjukkan kemampuannya untuk mendeteksi keberadaan gas ini pada konsentrasi relatif rendah. Aplikasi utama sensor MQ136 adalah pada alarm kebocoran gas H_2S domestik dan industri, serta detektor gas H_2S portabel, yang menegaskan perannya dalam mendeteksi gas berbahaya spesifik (Winsen, 2015).



MQ136 Hydrogen Sulfide Sensor

Gambar 2.2 MQ-135

Secara teknis, sensor MQ136 memerlukan dua sumber tegangan untuk beroperasi, yaitu Tegangan Pemanas (VH) sebesar $5,0\text{ V} \pm 0,1\text{ V}$ (AC atau DC) dan Tegangan Sirkuit (VC) sebesar $5,0\text{ V} \pm 0,1\text{ V}$ DC. Konsumsi daya pemanasannya (PH) adalah $\leq 900\text{ mW}$. Seperti kebanyakan sensor gas semikonduktor, MQ136 memerlukan periode pemanasan awal yang panjang (waktu pemanasan) lebih dari 48 jam dalam kondisi uji standar (suhu $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ dan kelembaban $55\% \pm 5\%$ RH) untuk menstabilkan kinerjanya sebelum pengukuran dilakukan (Winsen, 2015).

Karakteristik sensor ini juga dipengaruhi oleh kondisi lingkungan. Grafik dalam datasheet menunjukkan bahwa rasio resistansi (R_s/R_{so}) sensor berubah seiring perubahan suhu dan kelembaban. Oleh karena itu, pemantauan atau pengendalian kondisi lingkungan selama pengambilan data sangat dianjurkan untuk memastikan konsistensi dan akurasi pembacaan (Winsen, 2015).

Sirkuit dasar untuk mengoperasikan MQ136 memerlukan tegangan pemanas (VH) yang diterapkan pada pin 2 dan 5, serta tegangan sirkuit (VC) yang diterapkan pada pin 4 dan 6 melalui resistor beban (R_L). Sinyal keluaran berupa tegangan (VRL) diambil dari resistor beban ini. Kehadiran gas H_2S akan menurunkan resistansi sensor (R_s), menyebabkan peningkatan tegangan keluaran VRL. Perubahan tegangan ini (ΔV_s) diukur dan dikorelasikan dengan konsentrasi gas (Winsen, 2015).

Ada beberapa larangan dan hal yang harus dihindari untuk menjaga sensor, seperti paparan uap silikon, gas korosif berkonsentrasi tinggi, air, alkali, dan halogen. Memberikan tegangan yang melebihi spesifikasi atau ke pin yang salah dapat merusak sensor secara permanen (Winsen, 2015).

Pentingnya sensor MQ136 dalam studi ini bersifat spesifik dan strategis. Hidrogen sulfida (H_2S) adalah gas yang dihasilkan oleh bakteri pengurai sulfat selama dekomposisi daging, terutama pada tahap dekomposisi yang lebih lanjut.

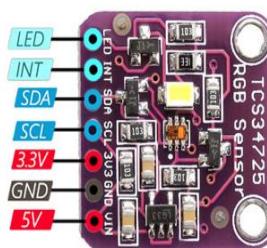
Gas ini bertanggung jawab atas bau khas “telur busuk” yang identik dengan daging yang telah membusuk.

Dengan mengintegrasikan MQ136 ke dalam sistem multisensor bersama MQ135 (yang mendeteksi amonia), penelitian ini dapat membangun profil deteksi gas yang lebih komprehensif dan akurat. Respons spesifik MQ136 terhadap H₂S akan menjadi indikator kunci yang membedakan antara daging “tidak segar” (ditandai dengan peningkatan amonia) dan daging “busuk” (ditandai dengan adanya H₂S selain konsentrasi amonia yang tinggi). Kombinasi tersebut akan menyediakan fitur yang dapat diandalkan dan beragam apalagi ditambahkan dengan algoritma Machine Learning, sehingga secara signifikan meningkatkan akurasi klasifikasi. Dengan demikian, MQ136 berperan sebagai penentu akhir yang memperkuat validitas sistem dalam menentukan tingkat kerusakan daging sapi.

2.5 Sensor Warna (TCS34725)

Sensor TCS34725 adalah konverter cahaya – warna ke digital yang diproduksi oleh Texas Advanced Optoelectronic Solutions (TAOS). Sensor ini menghasilkan keluaran digital untuk sensitivitas cahaya merah, hijau, biru (RGB), dan cahaya transparan. Prinsip kerjanya didasarkan pada array fotodioda 3×4 yang terdiri dari fotodioda dengan filter merah, hijau, biru, dan transparan (TAOS, 2012).

Chip ini dilengkapi dengan filter blokir inframerah (IR) terintegrasi yang terletak pada fotodioda penginderaan warna. Filter ini meminimalkan komponen spektral inframerah dari cahaya masuk, memungkinkan pengukuran warna yang akurat. Empat konverter analog-ke-digital (ADC) terintegrasi secara bersamaan mengubah arus fotodioda yang diperkuat menjadi nilai digital 16-bit. Sensitivitas tinggi, rentang dinamis luas (3.800.000:1), dan filter pemblokir IR menjadikan TCS34725 solusi sensor warna ideal untuk digunakan dalam berbagai kondisi pencahayaan (TAOS, 2012).



Gambar 2.3 TCS34725

Sensor TCS34725 beroperasi pada tegangan suplai (VDD) antara 2,7 V dan 3,6 V untuk model dengan antarmuka I²C V_{bus} = VDD. Konsumsi dayanya sangat

rendah, hanya $2,5 \mu\text{A}$ dalam mode tidur dan $65 \mu\text{A}$ dalam mode tunggu. Komunikasi data dilakukan melalui antarmuka bus serial I²C yang kompatibel dengan Mode Cepat hingga 400 kbit/s, dengan alamat perangkat I²C untuk TCS34725 adalah 0x29 (TAOS, 2012).

Fitur utama sensor ini meliputi gain analog yang dapat diprogram (AGAIN) dengan opsi 1x, 4x, 16x, dan 60x, serta waktu integrasi yang dapat diprogram (ATIME) dari 2,4 ms hingga 614 ms. Waktu integrasi ini secara langsung memengaruhi resolusi dan sensitivitas pembacaan RGBC. Sensor ini juga dilengkapi dengan interupsi yang dapat diaktifkan/dinonaktifkan (enable/disable) dengan ambang batas atas dan bawah yang dapat diprogram, yang mempermudah efisiensi sistem dengan menghilangkan kebutuhan untuk memeriksa sensor secara berkala (TAOS, 2012).

Menurut datasheet, aplikasi utama TCS34725 meliputi pengendalian pencahayaan LED RGB, pengukuran suhu warna cahaya, pemantauan cahaya ambient untuk pengendalian backlight layar, analisis cairan dan gas, serta verifikasi dan penyortiran warna produk (TAOS, 2012).

Data yang dihasilkan oleh sensor disimpan dalam register data 16-bit untuk setiap kanal: Clear (CDATA), Red (RDATA), Green (GDATA), dan Blue (BDATA). Data Clear mewakili intensitas cahaya total yang diterima (luminansi), sementara data RGB memberikan informasi komponen warna spesifik. Kombinasi data ini memungkinkan analisis kuantitatif warna dan intensitas cahaya suatu objek (TAOS, 2012).

Relevansi sensor TCS34725 dalam studi ini terletak pada kemampuannya mendeteksi perubahan warna pada permukaan daging sapi, yang merupakan indikator visual utama kesegaran. Daging sapi segar memiliki warna merah cerah khas akibat kandungan mioglobin (oksimioglobin)nya. Seiring berjalannya proses pembusukan, terjadi perubahan kimia, seperti oksidasi mioglobin menjadi metmioglobin, yang menyebabkan warna daging berubah menjadi lebih gelap, kecokelatan, atau kehijauan.

Sensor TCS34725 dapat mengukur perubahan warna ini secara objektif. Dalam sistem multisensor yang diusulkan:

1. Nilai Clear (CDATA) dapat dikorelasikan dengan tingkat kecerahan atau kekeruhan permukaan daging.

2. Perbandingan Red/Green/Blue (RGB) dapat digunakan untuk mengidentifikasi pergeseran warna. Misalnya, penurunan perbandingan Red/Green dapat menandakan pudarnya warna merah segar dan munculnya warna kebiruan-hijau akibat pertumbuhan bakteri tertentu
3. Penggabungan dengan Data Gas: Data warna dari TCS34725 dapat digabungkan dengan data gas dari sensor MQ-135 dan MQ-3 sebagai fitur tambahan dalam model Machine Learning. Hal ini menciptakan sistem klasifikasi yang lebih tangguh, karena menggabungkan indikator visual (perubahan warna) dengan indikator penciuman (emisi gas).

Dengan demikian, TCS34725 berfungsi sebagai “mata elektronik” yang melengkapi “hidung elektronik” sensor gas, memberikan dimensi data yang lebih lengkap untuk membedakan tingkat kesegaran daging sapi (segar, tidak segar, busuk) dengan akurasi yang lebih tinggi. Pendekatan multisensor (warna + gas) ini merupakan nilai tambah dan keunikan dari penelitian ini.

2.6 Sensor Suhu (DHT22)

Sensor DHT22 (dikenal sebagai AM2302) adalah sensor digital yang mengukur kelembaban relatif dan suhu secara bersamaan. Sensor ini diproduksi oleh Aosong Electronics Co., Ltd. dan menghasilkan sinyal digital yang telah dikalibrasi. DHT22 menggunakan teknik pengumpulan sinyal digital eksklusif dan teknologi pengukuran kelembaban untuk memastikan keandalan dan stabilitas (Aosong Electronics, n.d.).

DHT22 bekerja berdasarkan elemen sensor kapasitor polimer untuk mengukur kelembapan. Perubahan kelembapan udara menyebabkan perubahan kapasitansi elemen sensor ini. Elemen sensor terhubung ke komputer tunggal 8-bit yang memproses sinyal. Setiap sensor model ini dikompensasi suhu dan dikalibrasi di ruang kalibrasi yang akurat. Koefisien kalibrasi disimpan dalam memori OTP (One-Time Programmable) dan merujuk pada sensor selama proses pengukuran (Aosong Electronics, n.d.).

Komunikasi antara mikrokontroler (MCU) dan DHT22 menggunakan protokol bus tunggal. Proses komunikasi dimulai ketika MCU mengirim sinyal mulai dengan menurunkan tegangan bus data dari tinggi ke rendah selama setidaknya 1 ms. DHT22 kemudian merespons dengan sinyal rendah selama 80 μ s, diikuti oleh sinyal tinggi selama 80 μ s sebagai persiapan untuk transmisi data. Data 40-bit yang berisi informasi kelembaban dan suhu kemudian ditransmisikan bit

demi bit, di mana durasi sinyal tinggi berikutnya menentukan nilai bit tersebut ('0' atau '1') (Aosong Electronics, n.d.).



Gambar 2.4 DHT22

Menurut datasheet, DHT22 memiliki rentang operasi yang luas untuk kelembapan dari 0 hingga 100% RH dan suhu dari -40 hingga 80 derajat Celsius. Sensor ini memiliki akurasi $\pm 2\%$ RH (maksimum $\pm 5\%$ RH) untuk kelembapan dan $<\pm 0,5$ derajat Celsius untuk suhu. Resolusi pengukurnya adalah 0,1% RH untuk kelembapan dan 0,1 derajat Celsius untuk suhu (Aosong Electronics, n.d.).

Sensor ini memerlukan sumber daya DC antara 3,3V dan 6V. Konsumsi dayanya cukup rendah, yaitu 1-1,5 mA selama pengukuran dan 40-50 μ A dalam mode standby. Periode pengukuran rata-rata adalah 2 detik, artinya pembacaan data tidak dapat dilakukan lebih cepat dari interval ini. DHT22 tersedia dalam dua ukuran (ukuran kecil 14x18x5,5 mm dan ukuran besar 22x28x5 mm) dan dikemas dengan 4 pin yang sepenuhnya dapat dipertukarkan (Aosong Electronics, n.d.).

Setelah dinyalakan, sensor tidak boleh diberi perintah apa pun selama detik pertama untuk melewati keadaan tidak stabil. Kapasitor 100 nF dapat ditambahkan antara VDD dan GND untuk penyaringan gelombang. Untuk komunikasi yang sukses, kualitas kabel penghubung sangat memengaruhi kualitas dan jarak komunikasi, di mana kabel berlapis pelindung berkualitas tinggi direkomendasikan (Aosong Electronics, n.d.).

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam aplikasi meliputi: menghindari penggunaan sensor di luar rentang operasi yang dinyatakan, menghindari paparan uap kimia yang dapat mengganggu elemen sensitif, menghindari paparan cahaya kuat dan ultraviolet dalam waktu lama, dan suhu penyolderan tidak boleh melebihi 260 derajat Celsius. Sensor juga harus dipasang jauh dari bagian yang dapat menyebabkan perubahan suhu untuk akurasi yang lebih baik (Aosong Electronics, n.d.).

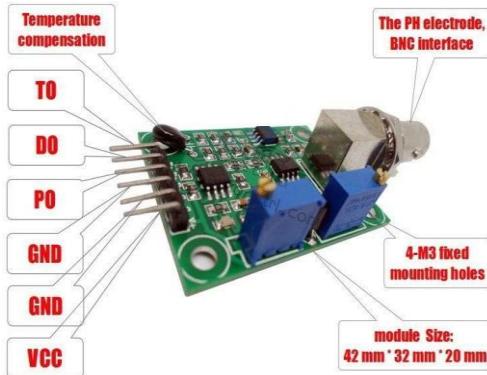
Relevansi sensor DHT22 dalam studi ini sangat penting dan multifungsi, terutama dalam hal pemantauan dan pengendalian kondisi lingkungan selama proses pengumpulan data.

1. Pengendalian Kondisi Uji: Proses pembusukan daging sangat dipengaruhi oleh suhu dan kelembapan. Suhu yang lebih tinggi mempercepat pertumbuhan mikroba yang menyebabkan pembusukan. Dengan menggunakan DHT22, kondisi lingkungan di dalam ruang uji atau wadah uji dapat dipantau. Hal ini memastikan bahwa perbandingan data sensor gas (MQ-135, MQ-3) dari sampel daging yang berbeda dilakukan dalam kondisi lingkungan yang konsisten dan terkendali, sehingga meningkatkan validitas eksperimen.
2. Kompensasi Sensor Gas: Seperti yang disebutkan dalam datasheet sensor MQ, karakteristik respons sensor gas dipengaruhi oleh suhu dan kelembapan lingkungan. Data suhu dan kelembapan yang direkam oleh DHT22 dapat digunakan dalam analisis data lebih lanjut untuk mengkompensasi drift atau variasi pembacaan sensor gas yang disebabkan oleh faktor lingkungan, bukan hanya oleh emisi gas dari daging.

2.7 Sensor pH (pH-4502C)

Sensor pH-4502C adalah modul sensor pH yang terdiri dari papan modul elektronik dan elektroda probe pH dengan konektor BNC. Modul ini dirancang untuk memudahkan mikrokontroler dalam membaca nilai Ph larutan. Prinsip kerjanya didasarkan pada potensimetri, di mana elektroda probe Ph menghasilkan tegangan listrik analog yang berbanding lurus dengan keasaman atau kebasaan larutan (Ph Sensor Tutorial, n.d.).

Elektroda probe Ph bekerja dengan mengukur perbedaan potensial listrik antara elektroda referensi internal dan elektroda kaca yang sensitif terhadap ion Hidrogen (H^+). Perbedaan potensial ini kemudian diproses oleh papan modul Ph-4502C. Idealnya, modul ini dikonfigurasi sedemikian rupa sehingga Ph 0 setara dengan 0V dan Ph 14 setara dengan 5V pada keluaran analognya, sehingga mencakup seluruh rentang Ph pada skala tegangan 0-5V yang dapat dibaca oleh mikrokontroler. Namun, secara default, modul seringkali menetapkan Ph netral (7) dekat dengan 0V, sehingga memerlukan proses kalibrasi offset untuk menyesuaikannya (Ph Sensor Tutorial, n.d.).



Gambar 2.5 pH-4502C

Berdasarkan manual pengguna, modul pH-4502C memerlukan sumber daya DC 5V. Modul ini memiliki beberapa pin fungsional, yaitu:

- VCC dan GND untuk sumber daya.
- PO (Ph Analog Output): Pin output analog yang menghasilkan tegangan proporsional dengan nilai Ph. Pin ini terhubung ke pin input analog mikrokontroler seperti ESP32.
- TO (Output Suhu): Pin output untuk sensor suhu terintegrasi (jika tersedia).
- DO (Output Digital): Pin output digital yang akan memberikan sinyal 3.3V saat nilai Ph tertentu tercapai, yang dapat disetel melalui potensio batas. Fitur ini dapat digunakan sebagai alarm sederhana.

Modul ini dilengkapi dengan dua potensio untuk kalibrasi:

- a. POT 1 (Offset): Potensio yang terletak paling dekat dengan konektor BNC, digunakan untuk menyesuaikan offset tegangan sehingga Ph 7 dibaca sebagai 2.5V.
- b. POT 2 (Limit): Digunakan untuk mengatur nilai ambang Ph yang akan mengaktifkan atau menonaktifkan output digital (DO) (Tutorial Sensor Ph, n.d.).

Untuk pembacaan yang akurat, modul dan probe Ph-4502C harus dikalibrasi. Kalibrasi dilakukan menggunakan larutan buffer dengan nilai Ph yang diketahui, seperti Ph 4.01, 6.86, atau 9.18. Proses ini melibatkan dua langkah utama:

- a. Kalibrasi Offset Modul: Probe dilepas dan konektor BNC dihubungkan secara singkat untuk mensimulasikan Ph 7. Potensiometer offset kemudian disesuaikan hingga keluaran tegangan (PO) menunjukkan 2,5V, yang dapat diukur dengan multimeter atau dibaca melalui program mikrokontroler.
- b. Kalibrasi Probe: Probe direndam dalam larutan buffer. Nilai Ph yang dibaca pada sistem kemudian disesuaikan dengan nilai buffer sebenarnya dengan

mengubah variabel kalibrasi dalam program (kalibrasi perangkat lunak). Sangat penting untuk membilas probe dengan air suling saat berpindah antara larutan yang berbeda untuk mencegah kontaminasi silang (Ph Sensor Tutorial, n.d.).

Pembacaan probe Ph tidak instan dan memerlukan waktu stabilisasi minimal 2 menit dalam larutan. Nilai yang dibaca juga dapat berfluktuasi sedikit pada digit terakhir.

Relevansi sensor Ph-4502C dalam studi “Desain Sistem Deteksi Kesegaran Daging Sapi Berbasis Internet of Things (IoT) Menggunakan Integrasi Multi-Sensor” terletak pada kemampuannya untuk mengukur perubahan kimia pada permukaan daging, yang merupakan indikator fundamental proses pembusukan.

Daging sapi segar umumnya memiliki Ph sekitar 5,4 hingga 5,8. Setelah hewan disembelih, terjadi rigor mortis yang menurunkan Ph. Selama pembusukan, aktivitas enzim dan pertumbuhan bakteri menyebabkan pemecahan protein dan pelepasan senyawa alkali seperti amonia. Hal ini menyebabkan nilai Ph daging yang membusuk meningkat secara signifikan dibandingkan dengan daging segar.

Dalam sistem multi-sensor yang diusulkan, data dari Ph-4502C berfungsi sebagai sumber data kuantitatif tambahan yang sangat berharga:

- Korelasi dengan Data Gas: Data peningkatan Ph dari sensor ini dapat dikorelasikan dengan peningkatan konsentrasi gas amonia (yang bersifat alkali) yang terdeteksi oleh sensor MQ-135. Konfirmasi silang antara peningkatan Ph dan peningkatan amonia akan sangat memperkuat validitas klasifikasi “daging busuk”.
- Komplementer terhadap Data Warna: Perubahan Ph sering kali berkorelasi dengan perubahan warna daging. Dengan mengintegrasikan data Ph dari Ph-4502C, data warna dari TCS34725, dan data gas dari sensor MQ, sistem menciptakan profil deteksi holistik yang mencakup indikator kimia (Ph, gas) dan fisik (warna).
- Pembedaan yang Kuat: Nilai Ph memberikan informasi yang lebih langsung tentang kondisi kimia daging dibandingkan dengan fluktuasi sensor gas saja. Hal ini dapat membantu sistem membedakan dengan lebih akurat antara daging “tidak segar” dan “busuk”.

Dengan demikian, integrasi sensor Ph-4502C ke dalam sistem multi-sensor tidak hanya menambah parameter pengukuran, tetapi juga meningkatkan keandalan

dan akurasi keseluruhan sistem dalam mendeteksi kesegaran daging sapi secara non-destruktif dan objektif.

2.8 Sistem berbasis aturan (Rules – Based System)

Sistem Berbasis Aturan (RBS) merupakan salah satu pendekatan tertua dan paling mendasar dalam bidang Kecerdasan Buatan (AI) dan sistem pakar. Konsep dasarnya berpusat pada representasi pengetahuan dalam bentuk kumpulan aturan “IF-THEN”, yang memungkinkan sistem meniru cara manusia mengambil keputusan atau menarik kesimpulan berdasarkan fakta yang diketahui.

Inti dari setiap Sistem Berbasis Aturan adalah logika kondisional “IF (jika kondisi tertentu terpenuhi), THEN (lakukan tindakan atau tarik kesimpulan)”. Struktur ini sangat intuitif dan mewakili hubungan sebab-akibat atau korelasi antara data.

- Bagian IF (Antecedent/Kondisi): Bagian ini mendefinisikan kondisi atau serangkaian kondisi yang harus terpenuhi agar aturan dapat “dieksekusi”. Kondisi-kondisi ini biasanya berupa perbandingan nilai, status variabel, atau kombinasi beberapa ekspresi logika (misalnya, IF A DAN B, atau IF C ATAU D).
- Bagian THEN (Akibat/Tindakan): Bagian ini mendefinisikan tindakan yang harus diambil atau kesimpulan yang harus ditarik jika kondisi di bagian IF terpenuhi. Tindakan dapat mencakup pembaruan status, penambahan informasi baru ke basis pengetahuan, atau pemicu prosedur lain.

Sebagai contoh sederhana, dalam konteks diagnosis medis, sebuah aturan mungkin berbunyi: “IF pasien memiliki demam tinggi DAN pasien memiliki batuk kering, THEN pasien kemungkinan besar menderita infeksi pernapasan.” Di sini, “demam tinggi” dan “batuk kering” adalah kondisi, sementara “kemungkinan infeksi pernapasan” adalah kesimpulan.

Sebuah RBS umumnya terdiri dari beberapa komponen esensial:

1. Basis Pengetahuan: Ini adalah kumpulan semua aturan IF-THEN yang telah ditentukan oleh ahli domain. Kualitas dan kelengkapan basis pengetahuan sangat menentukan kinerja sistem.
2. Basis Fakta / Memori Kerja: Ini adalah kumpulan informasi atau data spesifik tentang situasi saat ini yang sedang diproses oleh sistem. Fakta-fakta ini dapat berasal dari masukan pengguna, sensor, atau kesimpulan dari aturan yang telah dijalankan.

3. Mesin Inferensi: Ini adalah “otak” dari RBS. Mesin inferensi bertanggung jawab untuk memproses fakta yang ada dan mencocokkannya dengan aturan dalam basis pengetahuan. Ada dua strategi utama yang digunakan oleh mesin inferensi:

- Forward Chaining (Penalaran Maju): Memulai dari fakta yang diketahui dan mencari aturan-aturan yang kondisi IF-nya terpenuhi untuk menarik kesimpulan baru. Proses ini berlanjut hingga tidak ada lagi aturan yang dapat dieksekusi atau tujuan tercapai. Pendekatan ini cocok untuk masalah di mana semua masukan sudah diketahui dan sistem perlu menemukan semua kesimpulan yang mungkin (data-driven).
- Backward Chaining (Penalaran Mundur): Memulai dari tujuan atau hipotesis, lalu mencari aturan yang bagian THEN-nya dapat menghasilkan tujuan tersebut. Jika kondisi IF aturan belum diketahui, sistem akan mencari aturan lain untuk membuktikan kondisi tersebut (berbasis tujuan). Pendekatan ini cocok untuk masalah diagnostik.

4. Antarmuka Pengguna: Untuk interaksi antara pengguna dan sistem, seperti memasukkan fakta atau melihat hasil keputusan.

Dalam konteks pengambilan keputusan, Sistem Berbasis Aturan bekerja secara iteratif:

- a. Pengumpulan Fakta: Sistem mengumpulkan semua informasi relevan dari masukan (misalnya, pembacaan sensor, data dari basis data).
- b. Pencocokan Aturan: Mesin inferensi secara terus-menerus memindai basis pengetahuan untuk menemukan aturan yang kondisi IF-nya cocok atau terpenuhi oleh fakta yang ada.
- c. Penerapan Aturan: Jika satu atau lebih aturan terpenuhi, mesin inferensi memilih salah satu aturan tersebut (berdasarkan strategi resolusi konflik jika beberapa aturan cocok) dan “menerapkannya”.
- d. Aksi/Kesimpulan: Aksi yang tercantum dalam bagian THEN aturan kemudian dieksekusi. Ini dapat berarti memperbarui basis fakta, menghasilkan laporan, atau memulai aksi fisik.
- e. Iterasi: Proses ini berulang dengan fakta yang diperbarui hingga tidak ada lagi aturan yang dapat dieksekusi atau keputusan akhir telah dibuat.

Kelebihan dari metode ini adalah logika pengambilan keputusan mudah dipahami dan dijelaskan, karena setiap keputusan dapat dilacak kembali ke aturan yang menyebabkan terjadinya keputusan tersebut. Pendekatan ini dikenal sebagai pendekatan “white box”, aturan dapat ditambahkan, dihapus, atau dimodifikasi secara individual tanpa secara drastis mempengaruhi seluruh sistem, asalkan basis pengetahuan terstruktur dengan baik, efektif dalam bidang-bidang di mana pengetahuan dapat diwakili secara jelas sebagai kumpulan aturan yang terpisah.

Kekurangan dari metode ini adalah ketika jumlah aturan menjadi sangat besar, mengelola dan mencocokkan aturan dapat menjadi rumit dan lambat. Sulit untuk menangani data yang ambigu atau tidak pasti tanpa mekanisme tambahan (seperti faktor kepercayaan). Sistem ini tidak memiliki kemampuan untuk belajar atau beradaptasi dari data baru secara mandiri; setiap perubahan memerlukan intervensi manual dari pengembang.

Dalam penelitian ini, Sistem Berbasis Aturan akan digunakan untuk mengklasifikasikan tingkat kesegaran daging sapi berdasarkan data yang diperoleh dari integrasi multi-sensor (sensor gas MQ-135, sensor gas MQ-136, sensor Ph, sensor warna TCS34725, dan sensor suhu DHT22). Setiap sensor akan memiliki ambang batas yang telah ditentukan melalui studi eksperimental awal. Aturan IF-THEN akan dibentuk untuk mengevaluasi pembacaan dari setiap sensor dan memberikan bobot tertentu (skor). Skor-skor ini kemudian akan diakumulasikan untuk menghasilkan skor total. Berdasarkan skor total, sistem akan mengambil keputusan akhir mengenai status kesegaran daging (misalnya, “Segar,” “Kurang Segar,” atau “Busuk”), yang kemudian akan ditampilkan melalui platform IoT. Pendekatan ini memastikan objektivitas dan konsistensi dalam menilai kesegaran daging tanpa kompleksitas metode machine learning.

2.9 Mikrokontroller ESP32

Mikrokontroler ESP32 merupakan salah satu perangkat utama yang banyak digunakan dalam pengembangan sistem Internet of Things (IoT) berkat kemampuannya yang tinggi, konsumsi daya yang rendah, serta dukungan konektivitas Wi-Fi dan Bluetooth yang terintegrasi. ESP32 dilengkapi dengan prosesor dual-core, memori yang cukup besar, dan berbagai pin input/output yang memungkinkan integrasi dengan berbagai jenis sensor, seperti sensor gas MQ135/MQ136, sensor warna TCS34725, sensor suhu DHT22, dan sensor pH-4502C. Dalam penelitian terbaru, ESP32 terbukti mampu mengelola data dari

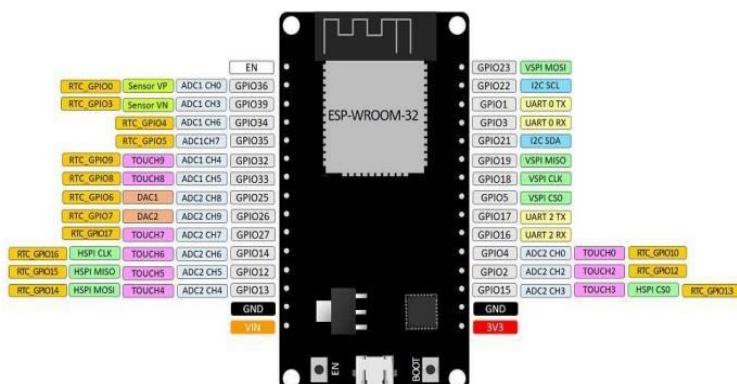
multiple sensor secara real-time, memproses hasil pengukuran, dan mengirimkan data ke platform pemantauan berbasis web atau aplikasi seluler melalui internet.

ESP32 adalah mikrokontroler System on Chip (SoC) yang terintegrasi dengan WiFi 802.11 b/g/n, Bluetooth versi 4.2, dan berbagai periferal. Komponen ESP32 yang digunakan adalah mikroprosesor dual-core 32-bit Xtensa LX6. Ruang alamat untuk data dan instruksi adalah 4 GB, sementara ruang alamat untuk periferal adalah 512 kB. Kapasitas memori terdiri dari 448 kB ROM, 520 kB SRAM, dua memori RTC (Real Time Clock) 8 kB, dan 4 MB memori flash. ESP32 dilengkapi dengan 18 pin ADC (12-bit), 4 pin SPI (Serial Peripheral Interface), dan dua pin I2C (Inter Integrated Circuit). ESP32 memiliki keunggulan seperti harga yang terjangkau, kemudahan pemrograman, jumlah pin I/O yang memadai, dan dilengkapi dengan adaptor WiFi internal yang berfungsi untuk koneksi internet.

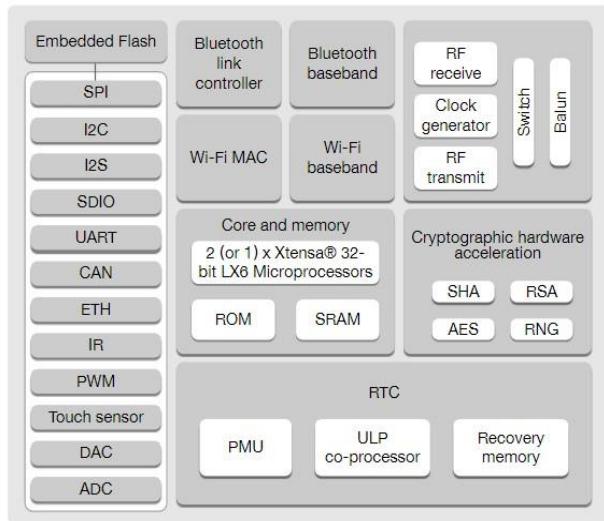


Gambar 2.6 ESP32

ESP32 memiliki beberapa board, termasuk NodeMCU-32S, Wemos LoLin32, DOIT ESP32, Sparkfun ESP32, dan AdafruitESP32. Papan-papan ini tersedia dalam dua versi, 30 dan 36 GPIO. Keduanya berfungsi dengan cara yang sama, tetapi versi 30 GPIO lebih disukai karena memiliki dua pin GND. Semua pin dilabeli di bagian atas papan, sehingga mudah diidentifikasi. Papan ini dilengkapi dengan antarmuka USB-ke-UART, sehingga mudah diprogram menggunakan perangkat lunak pengembangan aplikasi seperti Arduino IDE atau lainnya. Daya untuk papan dapat disuplai melalui konektor micro-USB.



Gambar 2.7 Pin ESP32



Gambar 2.8 Diagram blok ESP32

Sebagai contoh, penelitian oleh SMK Negeri 3 Lhokseumawe (2025) mengembangkan sistem pemantauan dan deteksi polusi udara berbasis IoT menggunakan ESP32 yang terhubung dengan sensor gas MQ-135, MQ-7, GP2Y1010AU0F, dan DHT22. Sistem ini mampu mengirimkan data sensor secara real-time ke server dan menampilkan hasilnya melalui situs web dan LCD, dengan hasil uji menunjukkan kinerja stabil dan akurat dalam klasifikasi kualitas udara. Keunggulan ESP32 dalam penelitian ini terletak pada kemampuannya untuk mengintegrasikan beberapa sensor secara bersamaan, melakukan pemrosesan data adaptif, dan mendukung komunikasi data yang efisien dan aman.

Oleh karena itu, ESP32 sangat relevan untuk digunakan dalam penelitian “Desain Sistem Deteksi Kesegaran Daging Sapi Berbasis Internet of Things (IoT) Menggunakan Integrasi Multi-Sensor” karena dapat mengakomodasi kebutuhan integrasi sensor gas, warna, suhu, dan pH, serta mendukung transmisi data real-time untuk pemantauan jarak jauh dan pengambilan keputusan berbasis aturan.

2.10 Internet of Things

Internet of Things (IoT) adalah paradigma teknologi yang menghubungkan berbagai perangkat fisik (seperti sensor, aktuator, peralatan rumah tangga, kendaraan, dan perangkat industri) ke internet untuk bertukar data dan berinteraksi secara otomatis tanpa intervensi manusia secara langsung. Konsep dasar IoT bertujuan untuk menciptakan ekosistem di mana perangkat dapat berkomunikasi, memantau lingkungan, mengumpulkan, dan menganalisis data untuk mendukung

pengambilan keputusan yang lebih efektif dan otomatis di berbagai bidang, mulai dari industri, pertanian, kesehatan, hingga keamanan pangan.

Arsitektur umum dalam sistem IoT biasanya terdiri dari tiga lapisan utama, yaitu sensor (persepsi), gateway/edge (jaringan), dan cloud (aplikasi). Lapisan sensor merupakan ujung tombak yang mendeteksi dan mengumpulkan data fisik dari lingkungan, seperti suhu, kelembapan, gas, Ph, dan parameter lain yang relevan dengan aplikasi tertentu. Data yang diperoleh oleh sensor-sensor ini diteruskan ke lapisan gateway atau edge, yang dapat berupa mikrokontroler, mikrokontroler (misalnya NodeMCU, ESP32, Raspberry Pi), atau perangkat khusus lainnya yang mengonsolidasikan data, melakukan prapemrosesan, dan meneruskan data secara aman ke lapisan cloud menggunakan berbagai protokol komunikasi (Wi-Fi, LoRa, Zigbee, Bluetooth, dll.).

Pada lapisan cloud, data yang dikirim dari gateway akan disimpan, dianalisis, dan divisualisasikan untuk mengambil keputusan atau mengirim pemberitahuan real-time kepada pengguna. Cloud menyediakan infrastruktur berskala besar yang dirancang untuk mendukung komputasi, basis data, dan aplikasi layanan berbasis IoT yang memungkinkan pemantauan dan pengendalian jarak jauh terhadap perangkat. Banyak penelitian dalam lima tahun terakhir telah menyoroti pentingnya mengintegrasikan kecerdasan buatan (AI) dengan awan IoT untuk mempercepat penelitian dalam deteksi anomali, prediksi, atau pengambilan keputusan otomatis pada aplikasi kritis seperti pemantauan makanan dan kesehatan.

Penelitian terbaru juga menyebutkan beberapa tantangan yang masih perlu diatasi dalam sistem IoT, termasuk keamanan data, interoperabilitas perangkat, pengelolaan jaringan dalam skala besar, dan ketersediaan layanan cloud yang andal dan efisien energi, terutama untuk aplikasi di sektor pertanian dan pemantauan keamanan pangan berbasis IoT di negara-negara berkembang.

Penelitian oleh Damdam dkk. (2023) merancang sistem IoT untuk pemantauan kualitas makanan, menggunakan arsitektur sensor-gateway-cloud dengan sensor gas dan fitur integrasi real-time ke dalam aplikasi web. Studi lain juga menegaskan bahwa arsitektur tiga lapis ini semakin relevan dalam mendukung implementasi IoT yang aman dan efisien, baik di lingkungan skala industri maupun di tingkat mikro, seperti UMKM dan rumah tangga.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Rancangan waktu dan tempat penelitian

Penelitian berjudul “Desain Sistem Deteksi Kesegaran Daging Sapi Berbasis Internet of Things (IoT) Menggunakan Integrasi Multi-Sensor” akan dilaksanakan selama empat bulan, dari Tanggal 1 November hingga 28 Februari 2025. Penelitian ini akan dilakukan di rumah untuk desain, pengembangan, dan pengujian alat.

Nov-2025						
S	S	R	K	J	S	M
					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30

Des-2025						
S	S	R	K	J	S	M
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31	1	2	3	4

Jan-2026						
S	S	R	K	J	S	M
29	30	31	1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	31	1

Feb-2026						
S	S	R	K	J	S	M
26	27	28	29	30	31	1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	1

Keterangan	
	Persiapan Materi, Alat dan Bahan
	Perancangan Alat
	Uji coba dan pengambilan data
	Penulisan Hasil Penelitian dan Pembahasan

3.2 Peralatan Penelitian

Penelitian ini membutuhkan beberapa peralatan agar bekerja sebagaimana mestinya, beberapa diantaranya adalah perangkat keras dan perangkat lunak:

- a. Perangkat Keras (Hardware)
 - 1. Laptop, (untuk membuat wiring sistem, memprogram, mengolah data, dan menulis hasil penelitian)
 - 2. ESP32, (sebagai otak pada sistem untuk mengolah data dari berbagai sensor yang kemudian dikirim ke aplikasi IoT (Blynk atau Thingspeak) menggunakan wifi)
 - 3. Sensor gas (MQ-135), (untuk mendeteksi gas amonia dan senyawa organik volatil lainnya)
 - 4. Sensor gas (MQ-136), (untuk mendeteksi gas hidrogen sulfida secara spesifik)
 - 5. Sensor suhu dan kelembaban / lingkungan (DHT22), (untuk mengukur suhu dan kelembaban udara di sekitar sampel)
 - 6. Sensor pH (pH-4502C), (untuk menngukur nilai pH pada permukaan daging)

7. Sensor warna (TCS34725), (untuk mendeteksi warna pada sampel daging dengan teknologi RGB pada TCS34725)
 8. Sensor ADC (ADS1115), (untuk membaca nilai analog dari sensor MQ-135, MQ-136, dan pH dengan akurasi dan presisi yang tinggi)
 9. Power supply 5 V, 2 A, (untuk menyalakan seluruh komponen atau sistem secara stabil)
 10. Oled, (untuk menampilkan data aktual secara real time)
 11. Komponen pendukung: 21 sampel daging dengan ukuran yang sama, PCB berlubang, kabel jumper, kotak enclosure, solder dan timah.
- b. Perangkat Lunak (Software)
1. Arduino IDE
 2. Spreadsheet / excel
 3. Circuit designer / fritzing
 4. Thingspeak

3.3 Tahap dan Alur Penelitian



Gambar 2.9 Tahapan dan Alur Penelitian

Tahap awal penelitian dimulai dengan formulasi masalah utama, yaitu subjektivitas dan kurangnya standarisasi dalam menentukan kesegaran daging sapi secara konvensional. Untuk mengatasi masalah ini, diusulkan solusi berupa pengembangan alat deteksi berbasis Internet of Things (IoT) dengan pendekatan multi-sensor. Setelah masalah didefinisikan, proses dilanjutkan dengan studi

literatur mendalam. Pada tahap ini, studi-studi sebelumnya yang relevan dicari dan ditinjau melalui basis data jurnal ilmiah seperti IEEE Xplore, Google Scholar, dan ScienceDirect. Tujuannya adalah untuk memahami metode yang telah digunakan, mengidentifikasi kelebihan dan kelemahannya, serta, yang paling penting, menemukan celah penelitian. Dari studi literatur, ditemukan bahwa banyak studi masih berfokus pada sensor tunggal atau belum mengoptimalkan integrasi multi-sensor dengan metode non-machine learning. Hasil studi ini menjadi landasan yang kuat untuk merumuskan keunikan penelitian dan menentukan komponen serta metodologi yang paling sesuai untuk digunakan.

Setelah dasar teoretis dan posisi penelitian diperkuat, proses dilanjutkan ke tahap merancang dan membuat perangkat secara fisik dan fungsional. Tahap ini dibagi menjadi desain hardware dan software. Desain hardware dimulai dengan membuat diagram blok sistem untuk memvisualisasikan alur kerja dari input, pemrosesan hingga output. Selanjutnya, dibuat skema wiring detail untuk menghubungkan semua komponen, yaitu mikrokontroler ESP32, sensor gas MQ-135 dan MQ-136, sensor pH, sensor suhu DHT22, sensor warna TCS34725, modul ADC ADS1115, dan layar OLED. Desain ini juga mencakup desain fisik ruang uji terintegrasi atau casing, dengan mempertimbangkan tata letak sensor yang optimal untuk memastikan lingkungan pengukuran yang terkontrol dan konsisten.

Secara paralel, desain perangkat lunak dilakukan dengan membuat diagram alur program. Diagram ini menggambarkan logika yang akan diimplementasikan dalam mikrokontroler, termasuk proses inisialisasi sensor, pembacaan data secara berkala, implementasi logika Sistem Berbasis Aturan, perhitungan skor akhir, hingga transmisi data ke platform IoT Blynk atau Thingspeak dan tampilan status secara aktual di layar OLED. Setelah kedua desain final, perangkat dibangun dengan merakit semua komponen elektronik pada papan PCB dan mengintegrasikannya ke dalam casing yang dirancang.

Sistem yang dirakit tidak dapat langsung digunakan untuk pengumpulan data. Perangkat harus menjalani pengujian dan kalibrasi untuk memastikan semua komponen berfungsi dengan baik dan memberikan data yang akurat. Proses ini dimulai dengan pengujian fungsional masing-masing sensor secara individu untuk memverifikasi konektivitas dan responsivitasnya. Tahap paling penting adalah kalibrasi, terutama untuk sensor analog. Proses kalibrasi sensor gas MQ-135 dan MQ-136 diawali dengan menjalani proses burn-in (dinyalakan secara terus-

menerus selama 1-3 jam) untuk stabilisasi pembacaan sensor. Proses kalibrasi sensor pH dengan membaca nilai dari larutan buffer standar (pH 4,0 dan 7,0) untuk memetakan nilai tegangan keluaran ke nilai pH aktual. Sensor digital seperti DHT22 dan TCS34725 diuji untuk memastikan pembacaan data sesuai dengan kondisi lingkungan dan warna secara aktual. Tahap ini memastikan alat ukur yang digunakan valid dan dapat diandalkan.

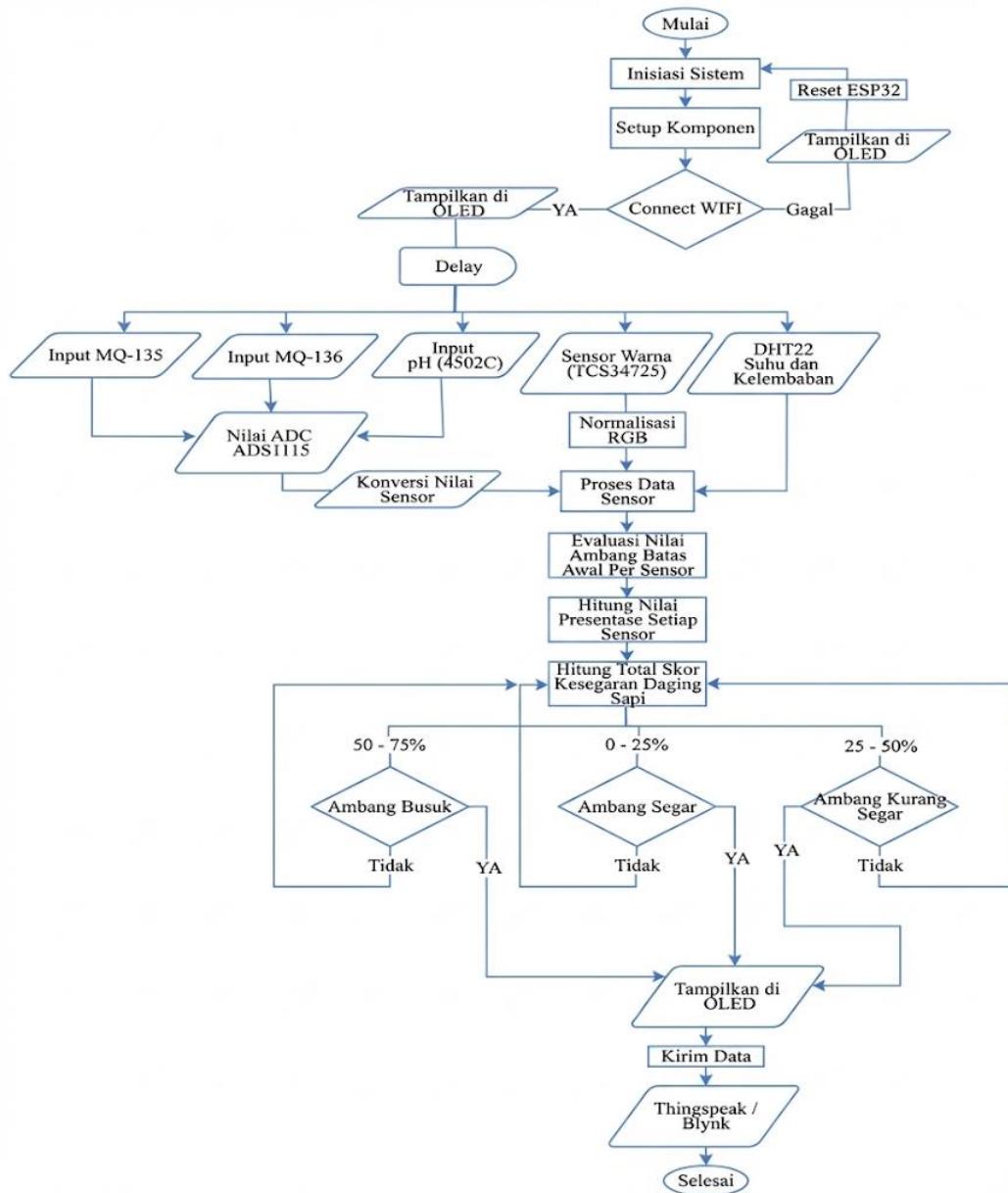
Setelah perangkat dikalibrasi, penelitian masuk ke tahap inti, yaitu pengumpulan data atau karakterisasi sensor terhadap perubahan kesegaran daging. Sebuah sampel daging sapi segar ditempatkan dalam ruang uji. Sistem kemudian diaktifkan untuk mengambil pengukuran secara berkala, misalnya setiap 1-3 jam dilakukan selama 7 hari dalam rentang 1 hari tiga kali, misal pagi, siang dan sore selama 7 hari berturut-turut. Pada setiap interval pengukuran, sistem mencatat serangkaian data dari semua sensor, seperti konsentrasi gas dari MQ-135 dan MQ-136, nilai pH sampel, nilai warna RGB dari TCS34725, dan nilai suhu dan kelembaban dari DHT22. Secara bersamaan, data dicatat melalui pengamatan, yang meliputi perubahan warna visual, bau, dan tekstur daging. Proses ini diulang selama 7 hari hingga daging menunjukkan tanda-tanda kerusakan yang jelas. Hasil tahap ini adalah dataset komprehensif yang berisi korelasi antara data sensor numerik dan tahap kerusakan fisik yang diamati, yang akan menjadi dasar untuk analisis lebih lanjut.

Tahap analisis hasil adalah proses mengubah dataset mentah menjadi sistem cerdas. Di sinilah Sistem Berbasis Aturan dibangun. Pertama, dataset dari tahap sebelumnya dianalisis untuk menemukan “titik kritis” atau ambang batas. Misalnya, dengan melihat waktu pertama kali bau asam terdeteksi, pembacaan sensor gas pada waktu tersebut ditetapkan sebagai ambang batas untuk tingkat “Peringatan”. Proses yang sama dilakukan untuk semua sensor dan semua tingkat kondisi (Normal, Peringatan, Bahaya).

Setelah semua ambang batas ditentukan, aturan IF-THEN diformulasikan dan logika penilaian berbasis persentase diimplementasikan ke dalam program mikrokontroler. Sistem kemudian diuji ulang dengan sampel daging baru untuk validasi. Analisis pada tahap ini berfokus pada perbandingan output klasifikasi sistem (misalnya, “Kurang Segar” atau “Busuk”) dengan kondisi sebenarnya daging untuk mengukur akurasi dan keandalan prototipe yang telah dibuat.

Tahap akhir alur penelitian adalah menarik kesimpulan. Berdasarkan semua data dan analisis yang telah dilakukan, kesimpulan ditarik yang secara jelas menjawab masalah yang diajukan di awal penelitian. Kesimpulan akan menjelaskan keberhasilan desain alat, efektivitas metode Sistem Berbasis Aturan yang digunakan, dan akurasi alat dalam mendeteksi kesegaran daging. Selain itu, bagian ini juga memaparkan batasan penelitian dan saran untuk pengembangan di masa depan. Seluruh proses dari awal hingga akhir kemudian didokumentasikan secara sistematis dan komprehensif dalam format laporan skripsi yang siap untuk pertanggungjawaban.

3.4 Prosedur Penelitian



Gambar 2.10 Flowchart Proses Deteksi Kesegaran Daging Sapi

Setelah sistem berhasil diinisialisasi dan koneksi WiFi terhubung, ESP32 akan masuk ke siklus pengumpulan data yang dilakukan secara berkala, misalnya setiap 5 atau 10 menit, sesuai dengan interval yang diprogram.

Pembacaan Sensor Gas (MQ-135 dan MQ-136): Kedua sensor gas ini akan menghasilkan sinyal tegangan analog yang proporsional dengan konsentrasi gas tertentu (seperti amonia dan hidrogen sulfida) di dalam ruang uji. Sinyal analog dari MQ-135 dan MQ-136 akan disalurkan ke pin masukan analog pada modul ADS1115. Modul ADC ini akan mengubah sinyal-sinyal tersebut menjadi data digital 16-bit yang lebih akurat dan stabil dibandingkan dengan ADC internal ESP32. Data digital ini akan dibaca oleh ESP32 dan dikonversi lebih lanjut menjadi satuan konsentrasi gas (ppm) menggunakan kurva kalibrasi yang dibuat dari data eksperimental awal.

Pembacaan Sensor pH (melalui ADS1115): Probe sensor pH akan menyentuh sampel daging, dan modul pH-4502C akan menghasilkan tegangan analog yang mewakili tingkat keasaman atau kebasaan daging. Sinyal analog ini juga akan disalurkan ke modul ADS1115, dikonversi menjadi nilai digital, dan kemudian diinterpretasikan oleh ESP32 sebagai nilai pH aktual (skala 0-14) berdasarkan titik kalibrasi pH 4.0 dan pH 7.0 yang disimpan.

Pembacaan Sensor Warna (TCS34725): ESP32 akan berkomunikasi dengan sensor warna TCS34725 melalui protokol I2C. Sensor ini akan mengukur intensitas cahaya merah, hijau, dan biru yang dipantulkan dari permukaan daging. Nilai RGB ini akan berfungsi sebagai indikator kuantitatif perubahan warna daging selama dekomposisi.

Pembacaan Sensor Suhu dan Kelembaban (DHT22): Sensor DHT22 akan membaca suhu udara dalam derajat Celsius ($^{\circ}\text{C}$) dan kelembaban relatif (RH%) di dalam ruang uji. Data digital ini akan dikumpulkan oleh ESP32 dan digunakan sebagai parameter lingkungan penting yang memengaruhi laju pembusukan daging.

Setelah semua data dari berbagai sensor berhasil diperoleh, ESP32 akan memulai tahap pemrosesan data utama menggunakan logika Sistem Penilaian Berbasis Aturan yang dirancang. Untuk setiap data sensor yang masuk, program akan menjalankan serangkaian pernyataan kondisional IF-THEN:

- Setiap nilai sensor (konsentrasi gas, pH, nilai RGB, suhu, kelembapan) akan dibandingkan dengan nilai ambang batas yang telah ditetapkan berdasarkan

hasil eksperimen awal. Nilai ambang batas ini mengkategorikan pembacaan menjadi tingkat kondisi seperti “Normal,” “Peringatan,” atau “Bahaya.”

- Berdasarkan tingkat kondisi yang terpenuhi, setiap sensor akan memberikan kontribusi skor persentase tertentu ke skor total. Misalnya, jika pH mencapai tingkat “Bahaya,” ia akan memberikan kontribusi 30% dari skor total maksimum.
- Program akan menjumlahkan semua kontribusi skor dari setiap sensor untuk mendapatkan Skor Kesegaran Total kumulatif (skala 0-100).

Skor Kesegaran yang dihitung pada langkah sebelumnya akan menjadi dasar untuk mengklasifikasikan status kesegaran daging. ESP32 akan membandingkan Skor Total ini dengan rentang nilai ambang batas yang didefinisikan untuk setiap kategori kesegaran. Contoh kategori yang digunakan adalah “Segar,” “Kurang Segar,” dan “Busuk.” Hasil klasifikasi ini adalah status teks yang mudah dipahami oleh pengguna.

Status kesegaran daging yang diklasifikasikan, beserta Skor Kesegaran Total, akan ditampilkan secara real-time pada layar OLED yang terintegrasi ke dalam prototipe. Hal ini memberikan umpan balik visual langsung kepada pengguna. Selain itu, sistem dapat dikonfigurasi untuk mengaktifkan pemberitahuan lokal tambahan, seperti menyalakan lampu indikator LED atau membunyikan bunyi peringatan, jika status kesegaran mencapai tingkat kritis (misalnya, “Busuk”), sebagai peringatan dini.

Langkah terakhir dari setiap siklus pengukuran adalah transmisi data ke platform IoT. ESP32 akan mengemas data klasifikasi kesegaran (misalnya, string “Busuk”), Skor Kesegaran Total, dan beberapa parameter sensor kunci (misalnya, nilai pH, konsentrasi H₂S) ke dalam paket data. Paket ini kemudian dikirim secara nirkabel melalui koneksi Wi-Fi ke server platform IoT yang telah dikonfigurasi, seperti Blynk atau ThingSpeak. Di platform IoT, data disimpan secara otomatis dalam basis data, ditampilkan dalam bentuk grafik atau dasbor interaktif, dan dapat diakses oleh pengguna melalui aplikasi smartphone atau browser web. Platform ini juga dapat diatur untuk mengirim pemberitahuan push ke smartphone pengguna jika terjadi perubahan signifikan dalam status kesegaran, memastikan pemantauan dapat dilakukan secara jarak jauh dengan efektif dan efisien. Siklus ini akan berulang sesuai interval waktu yang telah ditentukan, memastikan pemantauan kesegaran daging terus berlanjut hingga prototipe dimatikan.

KESIMPULAN

Berdasarkan ide penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa sistem deteksi kesegaran daging sapi berbasis Internet of Things (IoT) dengan integrasi multi-sensor telah berhasil dirancang dan diimplementasikan untuk mengatasi masalah subjektivitas dalam penilaian kesegaran daging konvensional. Sistem ini mengintegrasikan sensor gas MQ-135 dan MQ-136 untuk mendeteksi senyawa volatil yang menandakan pembusukan, seperti amonia dan hidrogen sulfida, sensor warna TCS34725 untuk mengukur perubahan warna permukaan daging, sensor pH-4502C untuk memantau tingkat keasaman, dan sensor DHT22 untuk memantau kondisi suhu dan kelembaban lingkungan.

Keunikan penelitian ini terletak pada penerapan sistem berbasis aturan non-machine learning yang menggunakan metode penilaian berdasarkan nilai ambang batas masing-masing sensor, menghasilkan klasifikasi kesegaran daging yang objektif, transparan, dan mudah disesuaikan. Sistem yang dikembangkan mampu memproses data sensor secara real-time, menghitung skor kesegaran total, mengklasifikasikan daging ke dalam kategori segar, kurang segar, atau busuk, dan menampilkan hasilnya melalui layar OLED serta mengirimkannya ke platform IoT seperti Blynk atau ThingSpeak untuk pemantauan jarak jauh.

Dengan integrasi multi-sensor dan pendekatan berbasis aturan, sistem ini tidak hanya meningkatkan akurasi dan keandalan deteksi kesegaran daging sapi, tetapi juga menyediakan solusi praktis, efisien, dan terjangkau bagi konsumen, pedagang, dan UMKM dalam memastikan kualitas dan keamanan pangan. Penelitian ini juga membuka peluang untuk pengembangan lebih lanjut, seperti penambahan algoritma pembelajaran mesin untuk analisis yang lebih kompleks dan integrasi sensor tambahan seperti sel beban untuk pengukuran yang lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- Abounasr, J., Gharbi, M. El, García, R. F., & Gil, I. (2025). A High-Sensitivity Inkjet-Printed Flexible Resonator for Monitoring Dielectric Changes in Meat. *Sensors*, 25(5). <https://doi.org/10.3390/s25051338>
- Ballout, R., Toufeili, I., Kharroubi, S. A., & Kassem, I. I. (2024). Raw Meat Consumption and Food Safety Challenges: A Survey of Knowledge, Attitudes, and Practices of Consumers in Lebanon. *Foods*, 13(1), 1–14. <https://doi.org/10.3390/foods13010118>
- Binson, V. A., & Thomas, S. (2023). The Development of a Mobile E-Nose System for Real-Time Beef Quality Monitoring and Spoilage Detection. *Engineering Proceedings*, 56(1), 1–6. <https://doi.org/10.3390/ASEC2023-15960>
- Damdam, A. N., Ozay, L. O., Ozcan, C. K., Alzahrani, A., Helabi, R., & Salama, K. N. (2023). IoT-Enabled Electronic Nose System for Beef Quality Monitoring and Spoilage Detection. *Foods*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/foods12112227>
- Denih, A., & Anggraeni, I. (2023). Beef Freshness Detection Device Based on Gas and Color Sensors using the K- Nearest Neighbor Method. 2539–2545. <https://doi.org/10.46254/an13.20230690>
- Eka P, D. (2021). No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における 健康関連指標に関する共分散構造分析Title. 2(4), 1147–1152.
- Febriana, S. D., Mutiara, G. A., & Erfianto, B. (2025). E-Sniffer: Raw Meat Freshness Detection Tool Based on Odor Classification and Fuzzy Logic Utilizing Gas Fusion Sensor. *Instrumentation Mesure Metrologie*, 24(2), 97–109. <https://doi.org/10.18280/i2m.240201>
- Garcia, A. R., Filipe, S. B., Fernandes, C., Estevão, C., & Ramos, G. (n.d.). No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における 健康関連指標に関する共分散構造分析Title. 1–4.
- Liu, T. (2015). Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22 (DHT22 also named as AM2302). *Aosong Electronics Co.,Ltd*, 22, 1–10. <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf>
- Lovita, W. (2019). *Sensor Bau Dan Warna*. 11, 1–7.
- Moustafa, K., Metawie, H., Hany, A., Ehab, A., Sherif, O., & Saed, O. (2023). A Smart-home Electronic-Nose for Detecting Hazardous Gases. *Journal of Computing and Communication*, 2(1), 29–39. <https://doi.org/10.21608/jocc.2023.282088>
- Nurdayati dkk. (2021). No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における 健康関連指標に関する共分散構造分析Title. 3(5), 6.
- Ober, W. B. (1986). Mini Review. *Human Reproduction*, 1(8), 553–557. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.humrep.a136472>
- Pantha, D., Poudel, S., Koju, R., & Ghimire, B. (2025). A Design of IoT-based Monitoring System for Intelligent Meat Quality in Vyas Municipality, Nepal. *Journal of Engineering Issues and Solutions*, 4(1), 168–186. <https://doi.org/10.3126/joeis.v4i1.81573>
- Pristianto, F. H., Ardi, M. A., Nurkahfi, M., & Yasi, R. M. (2019). 597-Article Text-803-1-10-20191011. *Zetroem*, 01, 20.
- Qian, K., Bao, Y., Zhu, J., Wang, J., & Wei, Z. (2021). Development of a portable electronic nose based on a hybrid filter-wrapper method for identifying the Chinese dry-cured ham of different grades. *Journal of Food Engineering*,

- 290(October 2019), 110250. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110250>
- Rahmawati, A., Safitri, A. A., Mutaqin, B. K., & Yogaswara, A. S. (2025). Pemetaan Kondisi Pemerataan Pemenuhan Gizi Sumber Protein Hewani (Studi kasus di Dusun Cidawung Desa Margacinta Pangandaran). *Farmers : Journal of Community Services*, 6(1), 7–11. <https://doi.org/10.24198/fjcs.v6i1.60069>
- Rusdianto, A. S., Amilia, W., & Malik, L. A. P. (2023). Design of an E-Nose Detector for Contaminated Gas in Cow Farming Waste. *International Journal on Food, Agriculture and Natural Resources*, 4(4), 62–69. <https://doi.org/10.46676/ij-fanres.v4i4.213>
- Sanislav, T., Mois, G. D., Zeadally, S., Folea, S., Radoni, T. C., & Al-Suhaimi, E. A. (2025). A Comprehensive Review on Sensor-Based Electronic Nose for Food Quality and Safety. *Sensors*, 25(14), 1–49. <https://doi.org/10.3390/s25144437>
- Santaefiigenia. (2017). *How to use a PH probe and sensor*. 6, 0–5. <https://www.botshop.co.za/how-to-use-a-ph-probe-and-sensor/>
- Saputro, T. A. (2020). Variasi Profil Protein Daging Sapi yang Dibungkus Daun Pepaya dengan Elektrophoresis SDS-Page. *Jurnal Biosains Pascasarjana*, 22(2), 46. <https://doi.org/10.20473/jbp.v22i2.2020.46-49>
- Sarno, R., & Wijaya, D. R. (2019). Recent development in electronic nose data processing for beef quality assessment. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 17(1), 337–348. <https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.v17i1.10565>
- Shtepliuk, I., Domènech-Gil, G., Almqvist, V., Kautto, A. H., Vågsholm, I., Boqvist, S., Eriksson, J., & Puglisi, D. (2025). Electronic nose and machine learning for modern meat inspection. *Journal of Big Data*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s40537-025-01151-4>
- Texas Advanced Optoeletronic Solutions Inc. (2012). TCS34725 - Color Light-to-Digital Converter with IR Filter. *Data Sheet*, 972, 1–26. www.taosinc.com
- Utami, M. D., Zahra, A. A., & Sudjadi, S. (2020). Perancangan Dan Analisa Kinerja Sistem Akuisisi Data Sensor Tcs34725 Dan Pengendalian Pompa Motor Dc Pada Alat Pencampur Warna. *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 9(3), 360–367. <https://doi.org/10.14710/transient.v9i3.360-367>
- Weng, X., Luan, X., Kong, C., Chang, Z., Li, Y., Zhang, S., Al-Majeed, S., & Xiao, Y. (2020). A Comprehensive Method for Assessing Meat Freshness Using Fusing Electronic Nose, Computer Vision, and Artificial Tactile Technologies. *Journal of Sensors*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8838535>
- Wijaya, D. R., Sarno, R., Zulaika, E., & Sabil, S. I. (2017). Development of mobile electronic nose for beef quality monitoring. *Procedia Computer Science*, 124, 728–735. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.12.211>
- Winsen Electronics. (2021). *Hydrogen Sulfide Gas Sensor*. 1–6. www.winsen-sensor.com
- Xu, Y., Liu, Z., Lin, J., Zhao, J., Hoa, N. D., Hieu, N. Van, Ganeev, A. A., Chuchina, V., Jouyban, A., Cui, D., Wang, Y., & Jin, H. (2023). Integrated Smart Gas Tracking Device with Artificially Tailored Selectivity for Real-Time Monitoring Food Freshness. *Sensors*, 23(19). <https://doi.org/10.3390/s23198109>
- Zhengzhou Winsen Electronics Technology. (2015). *Air Quality Gas Sesnor MQ-135: Manual*. 6–21. <https://shop.controleverything.com/products/nh3-amonia-benzene-alcohol-gas-sensor>

