

SISTEM PEMANTAUAN KUALITAS IKAN DAN PERINGATAN DINI YANG CERDAS BERDASARKAN INTEGRASI JARINGAN SYARAF KONVOLUSIONAL (CNN) DAN INTERNET OF THINGS (IoT)

Harry Rudolf Kountur¹, Devin Pitoy², Maksy Sendiang³, Robby Tangkudung⁴
^{1,2,3,4}Teknik Informatika, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Manado,
Sulawesi Utara, Indonesia

1harbeng20@gmail.com, 2devinpitoy40@gmail.com,
3maksy@elektro.polimdo.ac.id, 4robbytangkudung@gmail.com

ABSTRACT

Fish quality control in traditional Indonesian markets remains a serious challenge because inspection relies almost entirely on manual visual assessment by a limited number of field officers who cannot cover all locations simultaneously. The problem is compounded when vendors manipulate spoiled fish with artificial dyes on the gills, making visual inspection unreliable. This study presents an integrated fish quality monitoring system combining a Convolutional Neural Network (CNN) model using MobileNetV2 architecture with a portable Internet of Things (IoT) device based on the ESP32 microcontroller. The system operates through a crowdsourcing mechanism where community members submit fish photos through a React.js web platform for automatic AI classification. When unfit-fish reports from one location reach a predefined threshold, an Early Warning System (EWS) automatically sends WhatsApp alerts to Fishery Department officers and activates physical alarms at the department office. Field officers then validate findings with a portable IoT device equipped with an MQ-135 ammonia gas sensor compensated by a DHT22 environmental sensor. The CNN model achieved an overall accuracy of 92.9%, precision of 91.9%, recall of 93.8%, and F1-score of 92.8% on a 300-image test set collected from Manado fish markets. Sensor testing across 25 samples showed fresh fish registering below 50 PPM and spoiled fish exceeding 100 PPM, including chemically manipulated samples that appeared visually fresh. WhatsApp alert dispatch averaged 1.7 ± 0.3 seconds after threshold was reached. These results confirm that dual-modality integration effectively bridges large-scale public reporting with objective chemical field validation.

Keywords: CNN, MobileNetV2, IoT, ESP32, Fish Quality, Early Warning System, MQ-135, Food Safety

ABSTRAK

Pengawasan kualitas ikan di pasar tradisional Indonesia masih menjadi tantangan besar karena proses inspeksi hampir sepenuhnya bergantung pada penilaian visual manual oleh petugas lapangan yang jumlahnya terbatas dan tidak mampu mencakup seluruh area pasar sekaligus. Masalah semakin kompleks ketika

pedagang nakal memanipulasi penampilan ikan busuk menggunakan pewarna buatan pada insang, sehingga inspeksi visual manusia tidak dapat diandalkan sepenuhnya. Penelitian ini mengembangkan sistem pemantauan kualitas ikan terintegrasi yang menggabungkan model Convolutional Neural Network (CNN) arsitektur MobileNetV2 dengan perangkat Internet of Things (IoT) portabel berbasis ESP32. Sistem bekerja melalui mekanisme crowdsourcing di mana masyarakat mengirimkan foto ikan melalui platform web React.js untuk diklasifikasikan secara otomatis oleh model AI. Ketika laporan ikan tidak layak dari suatu lokasi mencapai ambang batas yang ditentukan, Early Warning System (EWS) secara otomatis mengirimkan notifikasi WhatsApp kepada petugas Dinas Perikanan dan mengaktifkan alarm fisik di kantor dinas. Petugas kemudian melakukan validasi lapangan menggunakan perangkat IoT portabel yang dilengkapi sensor gas amonia MQ-135 yang dikompensasi oleh sensor DHT22. Model CNN mencapai akurasi keseluruhan 92,9%, presisi 91,9%, recall 93,8%, dan F1-score 92,8% pada 300 gambar uji dari pasar ikan Manado. Pengujian sensor pada 25 sampel menunjukkan ikan segar di bawah 50 PPM dan ikan busuk di atas 100 PPM, termasuk sampel yang dimanipulasi secara kimiawi namun tampak segar secara visual. Rata-rata waktu pengiriman alert WhatsApp adalah $1,7 \pm 0,3$ detik setelah threshold tercapai.

Kata Kunci: CNN, MobileNetV2, IoT, ESP32, Kualitas Ikan, Sistem Peringatan Dini, MQ-135, Keamanan Pangan

A. Pendahuluan

Ikan merupakan sumber utama protein hewani di Indonesia, yang menyumbang lebih dari 57% dari asupan protein hewani nasional [1]. Sulawesi Utara, dengan posisinya sebagai provinsi pesisir di Indonesia Timur, sangat bergantung pada ikan baik secara ekonomi maupun gizi. Pasar tradisional seperti Pasar Karombasan dan Pasar 45 di Kota Manado merupakan saluran distribusi ikan utama bagi sebagian besar penduduk perkotaan, namun pasar-pasar tersebut beroperasi dengan pengawasan kualitas yang minim dan tidak terstruktur.

Ikan merupakan komoditas yang sangat mudah busuk. Begitu ikan mati, aktivitas bakteri dan enzim endogen segera mulai memecah protein otot, menghasilkan senyawa volatil seperti amonia (NH_3), trimetilamina (TMA), dan hidrogen sulfida (H_2S) [2]. Kim dkk. (2023) menetapkan bahwa Total Volatile Base Nitrogen (TVB-N), yang komponen utamanya adalah amonia, meningkat dari di bawah 15 mg/100g pada ikan segar menjadi lebih dari 35 mg/100g pada ambang batas ketidaklayakan menurut peraturan UE EC No. 2074/2005 [3]. Kerusakan ini terjadi lebih cepat di iklim tropis seperti

Manado di mana suhu lingkungan secara rutin melebihi 30°C.

Pemeriksaan manual oleh petugas Dinas Perikanan merupakan standar yang berlaku saat ini dalam penegakan kualitas ikan di pasar-pasar Indonesia. Namun, jumlah petugas yang terbatas dibandingkan dengan skala pasar menyebabkan cakupan pemeriksaan menjadi tidak menyeluruh dan tidak konsisten. Kesenjangan ini membuka peluang bagi ikan berkualitas rendah untuk sampai ke konsumen tanpa terdeteksi. Komplikasi lebih lanjut muncul karena dilaporkan bahwa beberapa pedagang telah mengoleskan pewarna sintetis pada insang ikan busuk agar tampak segar, sebuah praktik yang sepenuhnya mengalahkan penilaian visual manusia [4].

Kemajuan dalam deep learning dan penglihatan komputer telah membuka solusi praktis untuk klasifikasi kualitas makanan secara otomatis. Hanifa dkk. (2023) mengembangkan aplikasi Fishku menggunakan MobileNetV2 untuk mengklasifikasikan kesegaran tiga spesies ikan dari gambar insang, dengan akurasi 93–97% [5]. Namun, model yang hanya mengandalkan penglihatan secara inheren rentan

terhadap manipulasi penampilan fisik. Di sisi sensor, Easterline dkk. (2024) menunjukkan bahwa sensor gas MQ-135 pada ESP32 dapat memantau konsentrasi gas secara andal dalam penerapan IoT waktu nyata [6].

Tidak ada satu pun pendekatan yang cukup: model visual tidak dapat mendeteksi manipulasi kimia; sensor gas yang berdiri sendiri tidak dapat ditingkatkan untuk mencakup area pasar yang luas.

Kesenjangan penelitian spesifik yang diatasi oleh studi ini adalah belum adanya sistem yang menggabungkan klasifikasi visual dan sensor kimia dalam arsitektur praktis yang dapat diterapkan di lapangan untuk lingkungan pasar di Indonesia. Keunikan penelitian ini terletak pada integrasi crowdsourcing publik berbasis kecerdasan buatan (AI) untuk cakupan luas dengan sensor kimia Internet of Things (IoT) guna validasi objektif, di mana keduanya menjadi masukan bagi alur peringatan otomatis yang terhubung langsung dengan otoritas Direktorat Jenderal Perikanan.

B. Metode Penelitian

1. Desain dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan Penelitian dan Pengembangan (R&D) berdasarkan model Sugiyono (2019), yang mencakup pembuatan, implementasi, dan pengujian sistematis terhadap prototipe produk [7]. Penelitian ini dilaksanakan pada periode Januari hingga April 2026 di Manado, Sulawesi Utara. Pengamatan lapangan dan pengujian sensor IoT dilakukan secara langsung di Pasar Karombasan dan Pasar 45. Platform web dan model CNN dikembangkan di laboratorium Teknik Informatika Politeknik Negeri Manado.

2. Model CNN: Kumpulan Data, Arsitektur, dan Pelatihan

Kumpulan data gambar dikumpulkan dengan memotret sampel ikan secara langsung di kedua lokasi pasar selama empat minggu dari Januari hingga Februari 2026. Sebanyak 1.200 gambar dikumpulkan: 600 diklasifikasikan sebagai layak konsumsi dan 600 sebagai tidak layak. Kategori tidak layak konsumsi mencakup ikan yang membusuk secara alami dan ikan dengan insang yang diwarnai secara buatan, yang dikonfirmasi melalui

perbandingan silang dengan pembacaan MQ-135. Gambar diambil dalam kondisi pencahayaan yang bervariasi untuk meningkatkan generalisasi model. Dataset dibagi: 70% untuk pelatihan (840), 20% untuk validasi (240), dan 10% untuk pengujian (120 per kelas). Sebanyak 60 gambar tambahan yang disisihkan menjadikan ukuran pengujian efektif menjadi 300 gambar.

Model ini menggunakan MobileNetV2 yang diinisialisasi dengan bobot yang telah dilatih sebelumnya oleh ImageNet [8]. Lapisan dasar dibekukan selama 10 epoch awal. Sebuah kepala khusus ditambahkan: Rata-rata Global Pooling, Dense (256 unit, ReLU), Dropout (0,4), dan Dense terakhir (2 unit, Softmax). Penyesuaian halus selama 30 epoch dengan 20 lapisan terakhir tidak dibekukan menggunakan optimizer Adam ($\text{lr} = 0,0001$) dan fungsi kerugian entropi silang biner. Augmentasi data mencakup pembalikan horizontal, rotasi $\pm 15^\circ$, dan penyesuaian kecerahan $\pm 20\%$. Operasi konvolusi inti adalah:

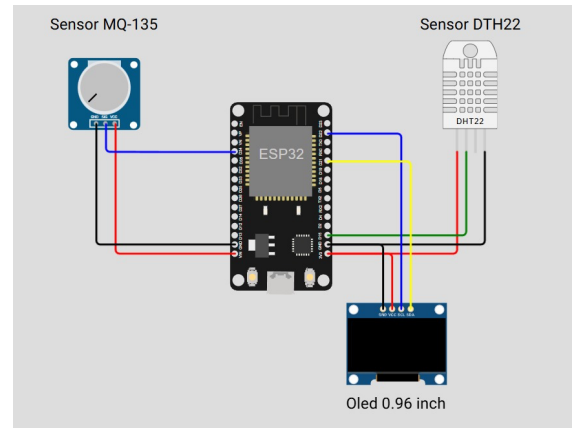
$$S(i,j) = \sum_m \sum_n I(m,n) \cdot K(i-m, j-n) \dots (1)$$

di mana I adalah matriks gambar masukan dan K adalah kernel filter

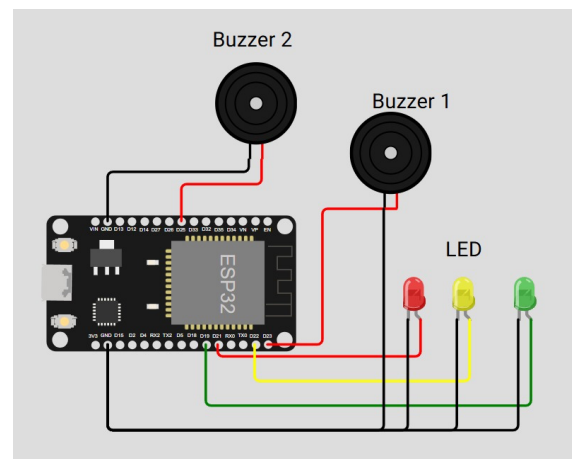
yang dapat dipelajari. Melalui proses ini, model secara otomatis belajar untuk membedakan fitur-fitur kesegaran visual seperti warna insang, tekstur mata, dan kilau kulit [9].

3. Desain Perangkat Keras IoT

Sistem IoT fisik terdiri dari dua modul. Unit detektor lapangan portabel dilengkapi dengan ESP32 DevKit V1 (CPU dual-core, ADC 12-bit, Wi-Fi terintegrasi), sensor gas MQ-135 (tipe SnO₂ yang mendeteksi NH₃ dan VOC, tegangan operasi 5V), sensor DHT22 ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, $\pm 2\%$ RH) untuk kompensasi lingkungan, dan layar OLED 0,96" untuk pembacaan real-time lokal. Unit alarm kantor stasioner di Departemen Perikanan menggunakan ESP32 yang mengendalikan dua buzzer dan tiga indikator LED (merah/kuning/hijau) melalui sirkuit yang digerakkan transistor, merespons peristiwa Supabase Realtime Engine melalui Wi-Fi. Skema pengkabelan ditunjukkan pada Gambar 2 dan 3.



**Gambar 1. Skema pengkabelan:
MQ-135, DHT22, dan OLED ke
ESP32 (unit pendeteksi lapangan)**



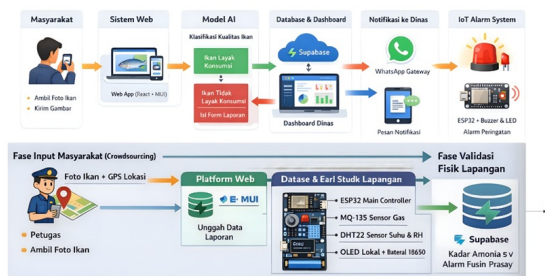
**Gambar 2. Skema pengkabelan:
Modul alarm kantor dengan buzzer
dan LED tiga warna**

4. Arsitektur Sistem

Arsitektur sistem secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 1. Pada tahap pelaporan publik, anggota komunitas mengunggah foto ikan melalui platform web React.js. Backend

MobileNetV2 mengklasifikasikan 4. **Arsitektur Sistem**

setiap foto. Hasil yang tidak sesuai akan meminta pengguna untuk mengirimkan laporan lokasi yang dilengkapi dengan tag GPS. Ketika laporan dari satu lokasi mencapai ambang batas (3 laporan per lokasi, ditentukan melalui pengujian empiris untuk menyeimbangkan sensitivitas dan tingkat alarm palsu), Supabase Edge Function memicu API WhatsApp Gateway dan menulis peristiwa alarm. Unit alarm IoT kantor menangkap ini secara real time dan mengaktifkan aktuator yang sesuai. Pada fase validasi lapangan, petugas membawa perangkat ESP32 portabel ke lokasi yang ditandai. MQ-135 membaca konsentrasi NH₃, dikompensasi oleh DHT22, ditampilkan pada OLED, dan diunggah ke Supabase sebagai bukti objektif.

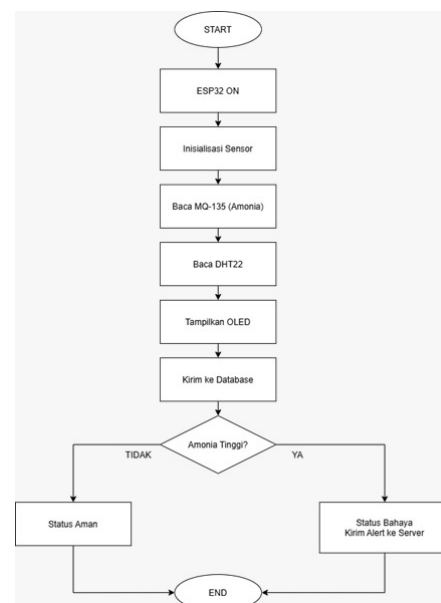


Gambar 3. Arsitektur sistem secara keseluruhan, mulai dari

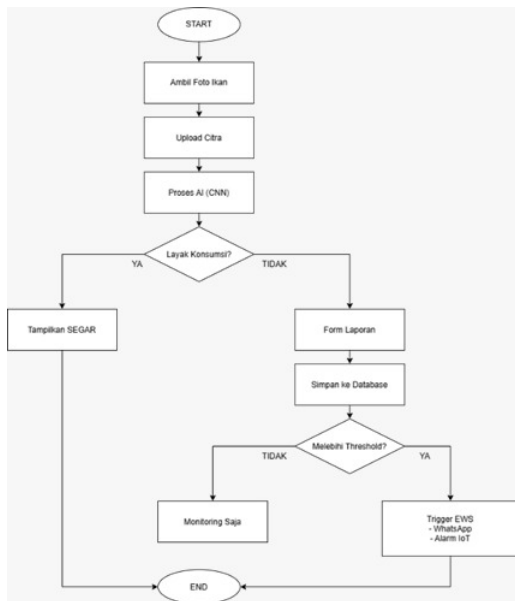
crowdsourcing publik hingga validasi lapangan IoT

5. Alur Kerja Sistem

Logika pengambilan keputusan pada alur kerja web dan AI ditampilkan pada Gambar 4, sedangkan logika operasional mandiri perangkat IoT ditampilkan pada Gambar 5. Perangkat IoT mengevaluasi pembacaan PPM berdasarkan tiga zona: di bawah 50 PPM (aman, LED hijau), 50–99 PPM (waspada, LED kuning), dan 100 PPM atau lebih (bahaya, LED merah + bunyi peringatan).



Gambar 4. Diagram alur: Aplikasi web, alur kerja AI, dan logika pemicu EWS



Gambar 5. Diagram alur: Logika operasional perangkat IoT portable

6. Protokol Pengujian Sensor

MQ-135 dipanaskan terlebih dahulu selama 24 jam sebelum pengujian sesuai dengan petunjuk pabrikan. Pembacaan dilakukan dengan menempatkan perangkat pada jarak 5 cm dari sampel ikan di dalam kotak karton semi-tertutup (20×15×10 cm) untuk memusatkan gas di ruang kepala. Setiap kategori sampel diuji sebanyak lima kali (n=5) dengan selang waktu 10 menit. Ambang batas TVB-N sebesar 35 mg/100 g dari peraturan UE No. 2074/2005 [3], yang divalidasi oleh Kim dkk. (2023) [2], berfungsi sebagai acuan kalibrasi untuk menentukan zona bahaya PPM.

C.Hasil Penelitian dan Pembahasan

1. Posisi Penelitian Sebelumnya

Hanifa dkk. (2023) [5] mencapai akurasi 93–97% dengan MobileNetV2 untuk menentukan kesegaran ikan, namun hanya mengandalkan klasifikasi visual tanpa lapisan validasi kimia. Kim dkk. (2023) [2] memvalidasi ambang batas kimia TVB-N secara ilmiah, namun melalui titrasi laboratorium, bukan IoT. Easterline dkk. (2024) [6] membuktikan bahwa MQ-135 bekerja secara andal pada ESP32 dalam penerapan nyata, namun untuk pemantauan kualitas udara, bukan konteks spesifik ikan. Mu dkk. (2024) [10] menegaskan dalam tinjauan komprehensif bahwa integrasi IoT + AI merupakan arah utama untuk sistem peringatan dini (EWS) keamanan pangan, namun mencatat kurangnya implementasi berbasis crowdsourcing yang dapat diterapkan di lapangan. Studi ini tepat mengisi celah tersebut dengan menggabungkan semua elemen menjadi prototipe yang berfungsi dan langsung melayani otoritas perikanan pemerintah.

2. Kinerja Model CNN

Tabel 1 menyajikan kinerja klasifikasi MobileNetV2 yang

dievaluasi pada kumpulan data uji berisi 300 gambar yang dikumpulkan dalam kondisi pasar nyata.

**Tabel 1 Kinerja Klasifikasi
MobileNetV2 pada Kumpulan Data
Uji Berisi 300 Gambar**

Kelas	Akur asi	Pre sisi	Rec all	F1- Sco re	Sam ple Uji
Fresh / Fit	94.2 %	93.8 %	94. 7%	94. 2%	155 Gam bar
Unfit	91.6 %	90.1 %	92. 9%	91. 4%	145 iGam bar
Rata- rata tertimb ang	92.9 %	91.9 %	93. 8%	92. 8%	300 Gam bar

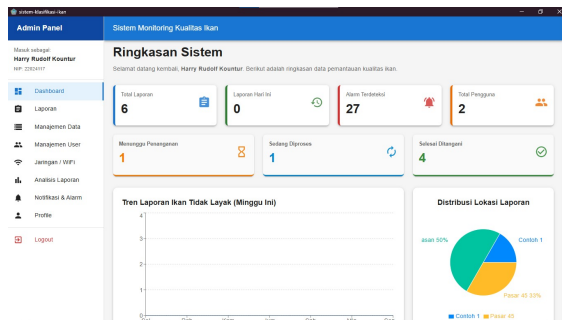
Model tersebut mencapai akurasi keseluruhan sebesar 92,9% dengan skor F1 sebesar 92,8%. Kinerja yang sedikit lebih rendah pada kelas yang tidak sesuai (F1 = 91,4%) sudah diperkirakan sebelumnya karena ikan yang dimanipulasi secara kimiawi dengan pewarna buatan memang lebih sulit untuk diklasifikasikan hanya dari gambar —

dan itulah alasan mengapa lapisan validasi kimiawi IoT ada. Yang penting, kumpulan data dikumpulkan dalam kondisi pasar nyata dengan pencahayaan yang bervariasi, sudut kamera, dan kualitas foto WhatsApp yang terkompresi. Mencapai 92,9% dalam kondisi seperti ini lebih bermakna secara ekologis daripada angka yang setara dari kumpulan data laboratorium yang telah dikurasi.

3. Platform Web dan Dashboard Admin

Platform web menggunakan React.js dan Material UI (MUI) dengan Supabase yang menangani otentikasi, basis data, dan penyiaran peristiwa real-time berbasis WebSocket. Kontrol Akses Berbasis Peran (RBAC) menerapkan tiga tingkat akses: Publik (hanya pengiriman laporan), Dinas (melihat dan memperbarui status laporan), dan Admin (pengelolaan sistem penuh). Dasbor Admin (Gambar 6) menampilkan ringkasan sistem secara real-time. Penghitung alarm dasbor menunjukkan total 27 peristiwa selama periode pengujian penuh, yang terdiri dari 14 uji simulasi terkontrol, 8 uji unit WhatsApp Gateway, dan 5 alarm fase produksi dari data pasar nyata — perbedaan ini

dijelaskan secara eksplisit di sini untuk transparansi metodologis penuh.



Gambar 6. Dasbor admin yang menampilkan ringkasan sistem pemantauan waktu nyata

Halaman Manajemen Laporan (Gambar 7) menampilkan catatan kronologis dari semua laporan yang mencakup jenis ikan, lokasi pasar, catatan, dan status penanganan, yang dapat disaring berdasarkan tanggal, lokasi, dan status.

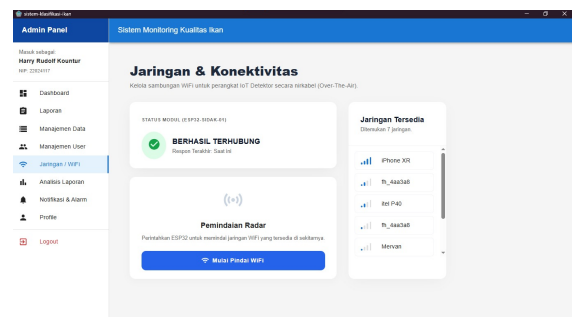
The screenshot shows the 'Daftar Laporan Masyarakat (Admin)' page. It includes a search bar with filters for 'Tanggal Laporan' and 'Cat Lokasi / Pasar'. Below the search bar is a table with the following columns: Waktu, Ikan, Lokasi, Kategori, Status, and Aksi. The table contains four rows of data:

Waktu	Ikan	Lokasi	Kategori	Status	Aksi
20/4/2026	Kampong	Pasar Karambaman	-	Selesai	
11/3/2026	Cekung	Pasar AS	-	Selesai	
16/3/2026	Penyakit	Pasar AS	Stok ada	Selesai	
15/3/2026	Makan	Pasar Karambaman	Isi	Selesai	

Gambar 7. Halaman pengelolaan laporan yang menampilkan daftar semua laporan publik yang masuk

4. Data Klasifikasi dan Manajemen Pengguna

Modul Manajemen Data Klasifikasi (Gambar 8) memungkinkan Admin mengedit kriteria kualitas yang ditampilkan kepada pengguna setelah proses klasifikasi, sehingga sistem ini tidak hanya berfungsi sebagai alat pendeteksi, tetapi juga sebagai alat pendidikan. Modul Manajemen Pengguna (Gambar 9) menghubungkan akun dengan nomor identitas pegawai (NIP) yang sebenarnya, sehingga memastikan pertanggungjawaban atas setiap tindakan yang dilakukan dalam sistem.



Gambar 8. Pengelolaan data klasifikasi dengan kriteria kualitas yang dapat diedit untuk ikan yang layak dan tidak layak

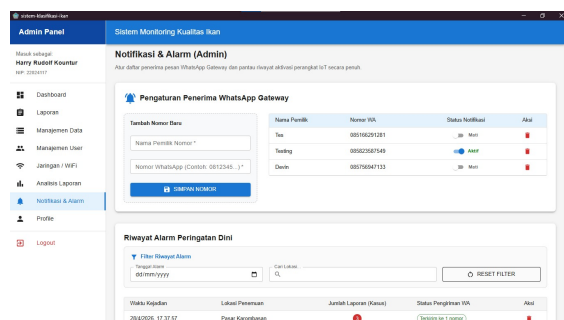
The screenshot shows the 'Manajemen User' page. It includes a 'TAMBAH USER' button. Below it is a table with the following columns: Nama Lengkap, NIP, Role, and Aksi. The table contains two rows of data:

Nama Lengkap	NIP	Role	Aksi
Devi Pity	22024127	Owner	
Harry Rudolf Kuntar	22024117	Admin	

Gambar 9. Halaman pengelolaan pengguna dengan pemisahan peran antara Admin dan Dinas Perikanan

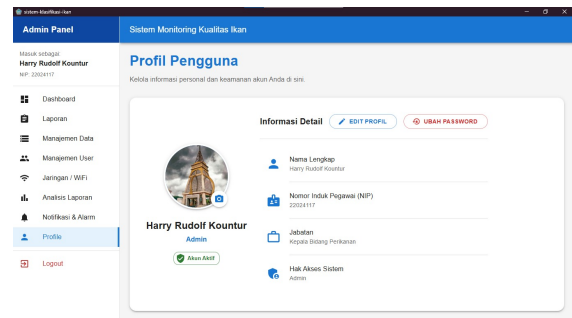
5. Sistem Peringatan Dini dan Manajemen Alarm

Modul Pemberitahuan dan Alarm (Gambar 10) mengelola daftar penerima WhatsApp Gateway dengan kontrol aktif/nonaktif per nomor, sehingga memungkinkan pengelolaan yang fleksibel terhadap siapa saja yang menerima peringatan darurat. Catatan riwayat alarm (Gambar 11) mencatat semua peristiwa dengan cap waktu tingkat detik, lokasi pemicu, jumlah laporan yang menyebabkan setiap alarm, serta status pengiriman WhatsApp. Kelima alarm pada fase produksi menunjukkan waktu pengiriman rata-rata $1,7 \pm 0,3$ detik dan tingkat keberhasilan pengiriman 100% dalam kondisi jaringan yang stabil di Manado.



Gambar 10. Pengaturan pemberitahuan dan alarm yang

menampilkan pengelolaan penerima WhatsApp



Gambar 11. Catatan riwayat alarm lengkap yang menampilkan semua peristiwa EWS beserta status pengirimannya

6. Statistik dan Manajemen Jaringan IoT

Modul Statistik (Gambar 12) menampilkan distribusi laporan berdasarkan lokasi pasar menggunakan diagram batang dan diagram lingkaran, sehingga memungkinkan departemen untuk mengalokasikan sumber daya inspeksi berdasarkan bukti yang didukung data. Fitur Manajemen Jaringan (Gambar 13) mendukung konfigurasi ulang Wi-Fi OTA untuk perangkat IoT, yang telah berhasil diuji di tiga jaringan Wi-Fi berbeda tanpa perlu melakukan reflashing firmware, sehingga mengurangi waktu persiapan per lokasi dari sekitar 20 menit (flashing USB) menjadi kurang dari 3 menit.

Gambar 12. Statistik distribusi laporan per wilayah pasar

Gambar 13. Manajemen jaringan: Konfigurasi ulang Wi-Fi melalui OTA untuk perangkat IoT

7. Hasil Pengujian Sensor IoT

Pengujian sensor dilakukan pada lima kategori sampel dengan masing-masing lima pengulangan ($n=5$, total 25 pengukuran). Tabel 2 merangkum hasilnya.

Tabel 2 Hasil Uji Sensor MQ-135 ($n=5$ per kategori, Pasar Karombasan & Pasar 45, Maret–April 2026)

Sampe	MQ-	Zo	Stat	Aktuator
I lkan	135	ne	us	
	(PP			
	M,			
	Mea			
	n ±			
	SD)			

Fresh	12.3	<	Ama	Hijau LED
Tilapia	±	50	n	
(Mujair)	1.8			

Fresh	18.7	<	Ama	Hijau LED
Macker	±	50	n	
el	2.4			
(Kembu				
ng)				

Cakala	58.4	50–	Hati-	Kuning
ng 24h	±	99	hati	LED
room	5.2			
temp				

Decaye	134.	≥	Baha	Merah+Bu
d	6 ±	100	ya	zzzer
Milkfish	9.1			
(Bande				
ng)				

Decaye 118. $\geq$ Baha Merah+Bu
d 2 ± 100 ya zzer
Macker 7.6
el +
Dye *

* Dimodifikasi secara visual: ikan tenggiri yang sudah tidak segar dengan pewarna merah buatan yang dioleskan pada insangnya

Hasil penelitian menunjukkan perbedaan yang jelas antara zona kesegaran. Ikan segar mencatat nilai jauh di bawah 50 PPM. Ikan Cakalang yang ditangkap 24 jam sebelumnya masuk ke zona peringatan dengan nilai 58,4 PPM. Ikan yang sudah membusuk melebihi 100 PPM, dengan ikan Bandeng mencapai 134,6 PPM. Temuan paling kritis adalah ikan Mackerel yang diwarnai secara artifisial: meskipun tampak segar secara visual, ikan ini mencatat 118,2 PPM — di atas ambang batas bahaya. Hal ini secara empiris menegaskan bahwa sensor kimia dapat mendeteksi kasus manipulasi yang tepat yang tidak dapat ditangani oleh AI visual. Kompensasi suhu menggunakan DHT22 mengurangi variasi dari ± 15 PPM (tanpa kompensasi) menjadi ± 5 –10 PPM pada rentang suhu lingkungan 28°C–

35°C di lingkungan pasar, sesuai dengan karakteristik sensor MOS yang diketahui [6].

8. Pengujian Black-box

Tabel 3 menunjukkan hasil pengujian kotak hitam untuk fungsi-fungsi inti sistem.

Tabel 3 Hasil Pengujian Kotak Hitam untuk Fitur-Fitur Utama Sistem

Skenario pengujian	Hasil yang diharapkan	Hasil Aktual	Status
Unggah foto → Klasifikasi	Layak/Tidak dalam < 3s	Hasil dalam < 2s dengan skor kepercayaan	Lulus
Kirim laporan tidak layak+GPS	Laporan disimpan di Supabase	Tercatat dengan cap waktu & koordinat	Lulus
3 laporan dari	Pemberitahuan	WA menerima ma	Lulus

Lokasi yang sama	whatsapp terkirim	pesan rata-rata 1.7 ± 0.3 detik	
IoT membaca a NH3 > 100 PPM	LED Merah + Buzzer aktif	Alarm aktif dalam < 2 detik melalui Supabas e	Lulus
admin memperbarui status laporan	Status → Terselesai kan real-time	UI diperbarui Dan tersimpan di databas e	Lulus
Konfigurasi ulang OTA Wi-Fi	ESP32 terhubung tanpa reflash	Diterapkan dalam waktu < 3 menit	Lulus

Keenam skenario tersebut telah memenuhi kriteria penerimaannya. Pemberitahuan yang dipicu ambang batas (baris 3) merupakan yang paling krusial secara

operasional dan secara konsisten berjalan dalam waktu 2 detik. Konfigurasi ulang OTA (baris 6) membuktikan bahwa staf pemerintah non-teknis dapat menerapkan sistem ini di lokasi pasar baru tanpa memerlukan peralatan pemrograman.

9. Pembahasan dan Keterbatasan

Sistem ini mengatasi kesenjangan operasional yang nyata dalam pemantauan pasar ikan di Indonesia. Pendekatan crowdsourcing memecahkan masalah cakupan. Lapisan AI menyediakan penyaringan awal yang cepat dalam skala besar. Lapisan IoT menyediakan bukti kimiawi objektif untuk kasus-kasus khusus di mana penilaian visual tidak dapat dilakukan. Bersama-sama, keduanya membentuk alur kerja yang dapat diterapkan dengan biaya marginal rendah per lokasi pasar tambahan.

Keterbatasan yang diakui: (1) Sensitivitas silang MQ-135 terhadap uap alkohol dan asap rokok terkadang dapat menyebabkan pembacaan zona peringatan palsu di pasar terbuka; (2) model CNN bersifat biner dan tidak memberikan peringkat tingkat kesegaran; (3) pengujian pada fase produksi hanya dilakukan dalam kondisi jaringan yang stabil. Penelitian

selanjutnya harus menyelidiki sensor NH₃ elektrokimia yang lebih selektif untuk menggantikan MQ-135, memperluas kumpulan data untuk penilaian multi-kelas, dan melakukan penerapan longitudinal di berbagai pasar.

D. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan dan menguji sistem pemantauan kualitas ikan dan peringatan dini terintegrasi yang menggabungkan tiga lapisan teknologi: crowdsourcing publik berbasis CNN (MobileNetV2, akurasi 92,9%, skor F1 92,8%), validasi kimia IoT portabel (ESP32 + MQ-135 + DHT22), dan EWS otomatis yang terhubung ke WhatsApp Gateway dan aktuator alarm fisik di Departemen Perikanan.

Pengujian IoT pada 25 sampel menunjukkan pemisahan yang jelas antara ikan segar (< 50 PPM), ikan batas (50–99 PPM), dan ikan busuk (≥ 100 PPM), termasuk sampel yang dimanipulasi secara kimiawi yang tidak terdeteksi melalui inspeksi visual. Pengiriman peringatan WhatsApp rata-rata $1,7 \pm 0,3$ detik. Keenam skenario uji kotak hitam tersebut lulus kriteria penerimaannya.

Kontribusi utama penelitian ini adalah menunjukkan bahwa alur kerja terintegrasi yang dapat diterapkan di lapangan ini secara teknis layak dan praktis secara operasional untuk kondisi pasar tradisional di Indonesia. Pekerjaan selanjutnya akan berfokus pada penilaian CNN multi-kelas, penginderaan gas yang lebih selektif, dan evaluasi penerapan longitudinal berkelanjutan di berbagai pasar di Sulawesi Utara.

DAFTAR PUSTAKA

Kementerian Kelautan dan Perikanan Republik Indonesia (KKP). (2023). Statistik Kelautan dan Perikanan 2022. Jakarta: KKP. Diakses dari <https://kkp.go.id>

Kim, D.-Y., Park, S.-W., & Shin, H.-S. (2023). Indikator Kesegaran Ikan untuk Mendeteksi Kualitas Ikan selama Penyimpanan. *Foods*, 12(9), 1801. <https://doi.org/10.3390/foods12091801>

Komisi Eropa. (2005). Peraturan Komisi (EC) No. 2074/2005. Jurnal Resmi Uni Eropa.

Mishra, A., Dey, A., & Roy, S. (2020). Sistem pemantauan makanan cerdas berbasis IoT menggunakan

sensor gas dan lingkungan. Jurnal Internasional Jaringan Sensor Terdistribusi, 16(5).
<https://doi.org/10.1177/1550147720929534>

Hanifa, M. F., Ramadhan, A. T., Husna, N., Widiyono, N. A., Mubarak, R. S., Putri, A. A., & Priyanta, S. (2023). Fishku Apps: Deteksi Kesegaran Ikan Menggunakan CNN dengan MobilenetV2. IJCCS, 17(1), 67–78.

<https://doi.org/10.22146/ijccs.80049>

Easterline, L. M., Diana, A. R., Nugroho, E. R., Wicaksono, S. R., & Azman, N. (2024). Pemantauan Udara Cerdas dengan Sensor MQ-2, MQ-7, MQ-8, dan MQ-135 Berbasis IoT Menggunakan NodeMCU ESP32. Procedia Computer Science, 245, 815–824.

Sugiyono. (2019). Metode Penelitian dan Pengembangan (R&D) (edisi ke-4). Bandung: Alfabeta.

Sandler, M., Howard, A., Zhu, M., Zhmoginov, A., & Chen, L.-C. (2018). MobileNetV2: Residual Terbalik dan Bottleneck Linear. CVPR 2018, hlm. 4510–4520.
<https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00474>

LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning.

Nature, 521, 436–444.
<https://doi.org/10.1038/nature14539>

Mu, R., Bertrand, A., Matthias, B., & Braun, P. (2024). Meningkatkan ketahanan sistem pangan terhadap risiko keamanan pangan dengan mengintegrasikan AI, big data, dan IoT ke dalam alat peringatan dini keamanan pangan. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 23(1), e13296.
<https://doi.org/10.1111/1541-4337.13296>

Mahata, B., Acharyya, S., Banerji, P., & Guha, P. K. (2024). Penilaian pemalsuan ikan menggunakan sensor gas berbasis nanopartikel SnO₂ dan pembelajaran mesin. Food Chemistry, 438, 138039.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138039>

Espressif Systems. (2024). ESP32 Technical Reference Manual v5.2. <https://www.espressif.com>