

BAB V HASIL DAN ANALISA

5.1 Pengujian Perangkat Keras

5.1.1 Pengujian *Housing*

Pengujian kededapan dilakukan dengan cara menenggelamkan wadah mekanik kosong ke dalam media air uji dengan merendam *housing* pada kedalaman 30 cm selama 24 jam. Dokumentasi pelaksanaan pengujian kededapan ditunjukkan pada gambar 5.1.



Gambar 5. 1 Proses Pengujian Housing

Berdasarkan gambar 5.1, proses pengujian housing menggunakan parameter pengujian meliputi kebocoran air dan kondensasi uap pada ruang interior. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tidak terjadi rembesan air pada sambungan antar kompartemen setelah 24 jam perendaman. Penggunaan seal dan pelapisan resin epoksi pada permukaan PLA efektif mencegah penetrasi air. Ruang interior tetap kering tanpa indikasi kondensasi, sehingga komponen elektronik terlindungi dengan baik.

5.1.2 Pengujian Sistem Kelistrikan

Sistem kelistrikan pada prototipe menggunakan dua tingkat tegangan utama, yaitu 5 V DC dan 12 V DC. Tegangan 5 V DC digunakan sebagai suplai raspberry pi 5 beserta komponen pendukung pemrosesan, sedangkan tegangan 12 V DC digunakan untuk menyuplai lampu LED Eagle Eye sebagai sumber

pencahayaannya tambahan pada proses akuisisi citra bawah air.

Pengujian sistem kelistrikan dilakukan dengan mengukur tegangan keluaran masing-masing catu daya menggunakan multimeter digital. Pengukuran dilakukan pada kondisi operasional penuh, yaitu ketika Raspberry Pi 5 menjalankan proses inferensi model, kamera HQ IMX477 aktif melakukan akuisisi citra, dan lampu LED berada pada kondisi intensitas maksimum. Dokumentasi pengujian sistem kelistrikan ditunjukkan pada gambar 5.2.



Gambar 5. 2 Proses Pengujian Sistem Kelistrikan

Parameter pengukuran meliputi tegangan suplai catu daya, kondisi aktivasi beban, serta fungsi perangkat pendukung selama sistem beroperasi. Hasil pengukuran parameter kelistrikan ditampilkan pada tabel 5.1

Tabel 4. 13 Hasil Pengukuran Uji Sistem

No.	Komponen	Parameter yang Diuji	Target Keluaran	Kondisi Aktual	Status
1.	Catu daya <i>output 1</i>	Tegangan suplai LED	12 VDC	12,2 VDC	Normal
2.	Catu daya <i>output 2</i>	Tegangan suplai Raspi 5	5 VDC	5,1 VDC	Normal
3.	Lampu LED	Aktivasi beban 12V	Menyala terang dengan tegangan 12	Menyala terang dengan tegangan 12,2	Normal

No.	Komponen	Parameter yang Diuji	Target Keluaran	Kondisi Aktual	Status
			VDC	VDC	
4.	Raspberry Pi 5 → Hailo	Indikator LED power	LED aktif	LED aktif	Normal
5.	Kamera HQ IMX477	Fungsi kamera	Kamera dapat digunakan	Kamera dapat digunakan	Normal

Berdasarkan Tabel 4.5, hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh komponen dapat beroperasi sesuai dengan parameter yang ditentukan. Catu daya 12 V menghasilkan tegangan keluaran sebesar 12,2 V yang digunakan untuk mengaktifkan lampu LED, sedangkan catu daya 5 V menghasilkan tegangan keluaran sebesar 5,1 V untuk memenuhi kebutuhan suplai Raspberry Pi 5. Kondisi indikator daya pada Raspberry Pi 5 dan koneksi kamera HQ IMX477 juga menunjukkan kondisi normal selama proses pengujian berlangsung.

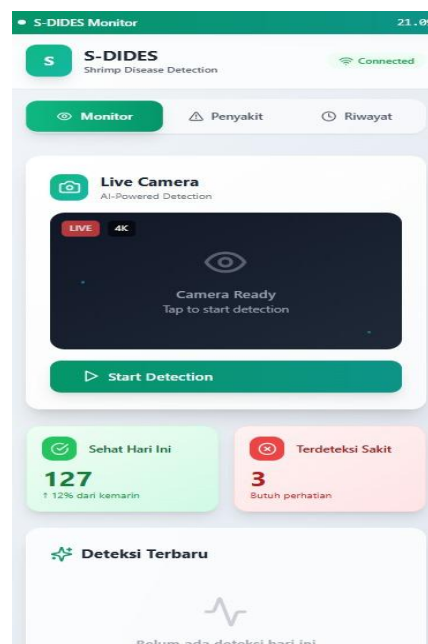
Pengukuran kestabilan tegangan menunjukkan bahwa keluaran catu daya 5V berada pada rentang 4,98–5,02 V, sedangkan keluaran catu daya 12 V berada pada rentang 11,95–12,05 V. Nilai tersebut masih berada dalam batas toleransi kerja komponen sehingga tidak menyebabkan gangguan operasional selama sistem dijalankan. Pengukuran konsumsi daya menunjukkan kebutuhan daya sebesar 8,5 W pada kondisi tanpa proses inferensi dan meningkat menjadi 12,3 W ketika model dijalankan menggunakan akselerasi hailo-8l. Peningkatan konsumsi daya terjadi akibat adanya aktivitas pemrosesan pada raspberry pi 5 dan modul akselerator selama proses inferensi berlangsung.

5.2 Pengujian Perangkat Lunak

5.2.1. Pengujian Halaman Pemantauan

Pengujian halaman pemantauan dilaksanakan dengan parameter utama yang meliputi latensi transmisi video *streaming* dari *backend* ke aplikasi, responsivitas tombol deteksi, serta keakuratan informasi hasil deteksi yang ditampilkan. Pengujian dilakukan pada perangkat android versi 13 dalam tiga kondisi jaringan, yaitu koneksi Wi-Fi, jaringan seluler 4G, dan simulasi koneksi lambat.

Prosedur pengujian diawali dengan menghubungkan aplikasi ke *backend* raspberry pi 5, kemudian mengamati aliran video MJPEG yang ditampilkan pada layar perangkat. Latensi *streaming* diukur dengan metode pencatatan *time-of-flight* antara pengiriman *frame* dari kamera hingga tampil pada layar *smartphone*. Selanjutnya, tombol *start detection* diaktifkan dan seluruh proses akuisisi citra, inferensi model, hingga pengiriman hasil deteksi diamati. Dokumentasi pelaksanaan pengujian halaman pemantauan ditunjukkan pada gambar 5.3.



Gambar 5. 3 Proses Pengujian Halaman Pemantauan Aplikasi

Hasil pengujian menunjukkan bahwa aliran video MJPEG dapat ditampilkan dengan baik pada kedua platform. Pengukuran latensi jaringan dilaksanakan menggunakan metode *round-trip time* (RTT) melalui perintah *ping* dari perangkat *smartphone* ke alamat IP Raspberry Pi 5. RTT didefinisikan sebagai waktu yang diperlukan sejak pengiriman paket data dari perangkat sumber hingga diterimanya respons balik dari perangkat tujuan. Secara matematis, RTT diformulasikan sebagai berikut:

$$t_{RTT} = t_{ack} - t_{tx}$$

Dengan t_{tx} adalah waktu saat paket dikirimkan dari perangkat sumber dan t_{ack} adalah waktu saat paket respons diterima kembali oleh perangkat sumber.

One Way Delay (OWD) merupakan setengah dari nilai RTT, dengan asumsi bahwa waktu tempuh data dari sumber ke tujuan sama dengan waktu tempuh dari tujuan ke sumber. OWD diformulasikan sebagai berikut

$$t_{RTT} = \frac{t_{RTT}}{2}$$

Pengukuran RTT dilakukan sebanyak 10 kali pengulangan pada setiap kondisi jaringan untuk memperoleh data yang representatif, kemudian dihitung nilai rata-rata dan standar deviasinya. Hasil pengukuran RTT dan perhitungan OWD pada setiap kondisi jaringan disajikan pada tabel 5.1.

Tabel 5. 1 Hasil Pengukuran Latensi Jaringan

Kondisi Jaringan	Rata-rata RTT	Standar Deviasi	OWD	Status
Wi-Fi	290	12,4	145	Normal
4G	460	18,7	230	Normal
Simulasi Lambat	780	25,3	390	Normal

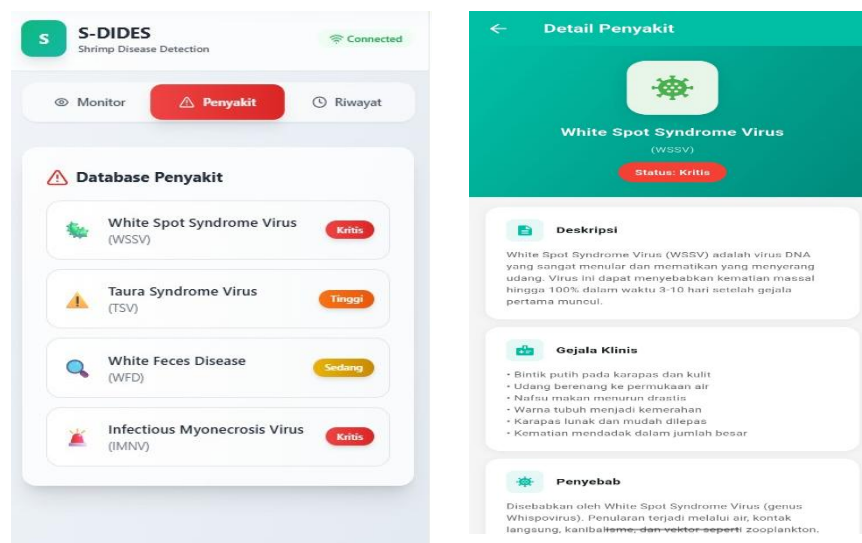
Latensi *streaming* pada koneksi Wi-Fi tercatat sebesar 145 ms untuk *One Way Delay* (OWD), sedangkan pada koneksi 4G latensi meningkat menjadi 230 ms. Nilai latensi tersebut diperoleh dengan metode pengukuran *round-trip time* (RTT) menggunakan perintah *ping* dari perangkat *smartphone* ke alamat IP Raspberry Pi 5, kemudian menghitung OWD sebagai setengah dari nilai RTT.

5.2.2 Pengujian Direktori Penyakit

Halaman direktori penyakit berfungsi sebagai basis data referensi yang menyajikan informasi mengenai jenis-jenis penyakit udang yang dapat dideteksi oleh sistem. Halaman ini menampilkan empat opsi penyakit, yaitu IMNV, TSV, WSSV, dan kondisi Sehat. Setiap opsi dapat dipilih untuk menampilkan halaman detail yang memuat deskripsi penyakit, gejala klinis, faktor penyebab, serta panduan penanganan darurat.

Pengujian direktori penyakit dilaksanakan dengan parameter utama yang meliputi ketersediaan data secara *offline*, keakuratan informasi yang ditampilkan pada halaman detail, serta responsivitas navigasi dari daftar opsi ke halaman detail.

Prosedur pengujian diawali dengan memutuskan koneksi internet pada perangkat android untuk memastikan bahwa seluruh data penyakit dapat diakses tanpa jaringan. Keempat opsi penyakit ditekan satu per satu untuk masuk ke halaman detail. Informasi yang ditampilkan pada setiap halaman detail, meliputi deskripsi, gejala, penyebab, dan panduan penanganan, diverifikasi kesesuaiannya dengan literatur ilmiah yang menjadi acuan. Dokumentasi pelaksanaan pengujian direktori penyakit ditunjukkan pada gambar 5.4.



Gambar 5. 4 Proses Pengujian Direktori Penyakit

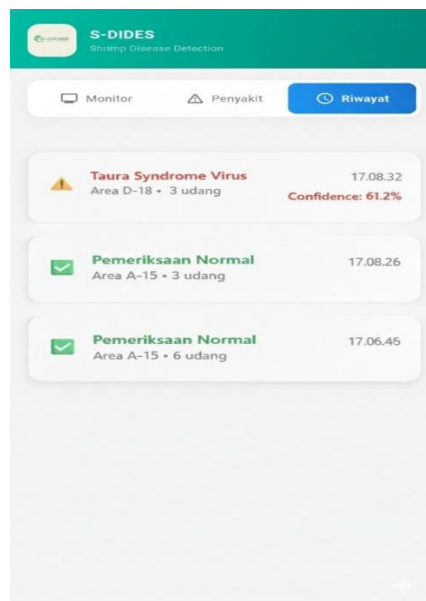
Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh data penyakit dapat diakses secara *offline* tanpa memerlukan koneksi internet. Data disimpan secara lokal dalam aplikasi menggunakan mekanisme penyimpanan internal Flutter. Masing-masing halaman detail memuat deskripsi penyakit secara lengkap, gejala klinis yang muncul, faktor penyebab, serta panduan tindakan yang dapat dilakukan oleh pembudidaya sebagai langkah awal penanganan. Dengan demikian, fitur direktori penyakit berfungsi sebagai media edukasi yang dapat diandalkan oleh pengguna untuk memahami karakteristik setiap penyakit sebelum melakukan tindakan lebih lanjut.

5.2.3. Pengujian Riwayat Deteksi

Halaman riwayat deteksi berfungsi menampilkan seluruh hasil pemindaian yang telah dilakukan sebelumnya dalam bentuk daftar yang dapat difilter berdasarkan jenis penyakit dan rentang waktu. Halaman ini menyediakan informasi

berupa waktu deteksi, nama penyakit, tingkat kepercayaan, serta identitas kolam tempat pemindaian dilakukan.

Pengujian riwayat deteksi dilaksanakan dengan parameter utama yang meliputi konsistensi data dan fungsionalitas filter berdasarkan jenis penyakit. serta mekanisme pembaruan otomatis. Prosedur pengujian diawali dengan melakukan 20 kali deteksi pada sampel udang yang telah diketahui kondisinya menggunakan perangkat Android. Fitur diuji dengan memilih berbagai kombinasi filter, yaitu filter berdasarkan jenis penyakit. Fitur *auto-refresh* diuji dengan melakukan deteksi baru dari perangkat lain dan mengamati apakah tampilan riwayat pada perangkat yang sedang terbuka diperbarui secara otomatis tanpa perlu melakukan *refresh* manual. Waktu pembaruan diukur dengan mencatat selisih waktu antara data tersimpan di *database* hingga tampilan riwayat berubah pada layar perangkat. Dokumentasi pelaksanaan pengujian riwayat deteksi ditunjukkan pada Gambar 5.5.



Gambar 5. 5 Proses Pengujian Riwayat Deteksi

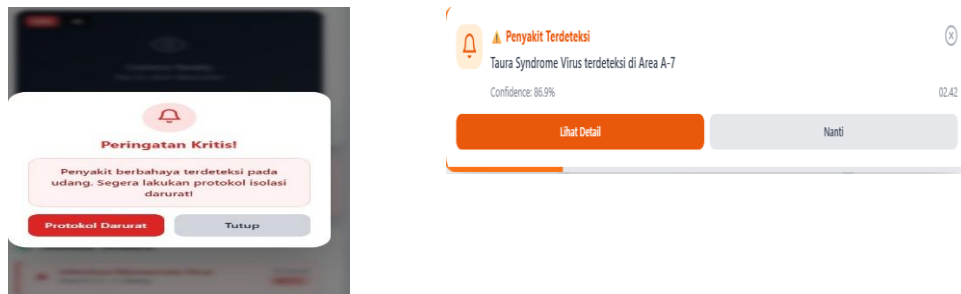
Hasil pengujian menunjukkan bahwa setiap hasil deteksi berhasil disimpan dengan lengkap. Fitur filter berdasarkan jenis penyakit berfungsi dengan baik, di mana daftar riwayat berhasil disesuaikan sesuai dengan kriteria filter yang dipilih. Fitur *auto-refresh* berbasis *StreamBuilder* berhasil memperbarui tampilan secara otomatis setiap kali ada data deteksi baru yang masuk tanpa perlu

melakukan *refresh* manual, dengan latensi pembaruan rata-rata 300 ms setelah data tersimpan di database.

5.2.4 Pengujian Notifikasi Penyakit

Mekanisme notifikasi berfungsi untuk menyampaikan peringatan dini kepada pembudidaya secara instan ketika sistem mendeteksi adanya indikasi penyakit pada udang.

Pengujian notifikasi FCM dilaksanakan dengan parameter utama yang meliputi keberhasilan registrasi token FCM, penerimaan notifikasi pada berbagai kondisi operasional aplikasi, serta navigasi otomatis saat notifikasi disentuh oleh pengguna. Prosedur pengujian diawali dengan menginstal aplikasi pada perangkat Android. Deteksi penyakit dipicu pada sistem dan notifikasi *push* diamati pada tiga kondisi operasional aplikasi, yaitu saat aplikasi sedang aktif dan saat aplikasi berjalan di latar belakang. Latensi diukur dengan mencatat waktu dari deteksi penyakit hingga notifikasi muncul di *smartphone*. Dokumentasi pelaksanaan pengujian notifikasi ditunjukkan pada Gambar 5.6.



Gambar 5. 6 Proses Pengujian Notifikasi

Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh token FCM dari ketiga perangkat berhasil terdaftar pada *node users* di *firebase realtime database*. Setiap rekaman pengguna memuat *user_id*, *token*, *pond_ids*, dan *platform* dengan informasi yang lengkap dan akurat. Notifikasi FCM berhasil diterima dan ditampilkan oleh perangkat *smartphone*. Pada kondisi *foreground*, notifikasi ditampilkan sebagai dialog di dalam aplikasi. Pada kondisi *background* dan *terminated*, notifikasi muncul di *status bar* dan *notification drawer* sistem operasi dengan judul dan isi yang sesuai dengan *payload* yang dikirimkan. Navigasi otomatis ke halaman detail deteksi

berfungsi dengan baik saat notifikasi disentuh oleh pengguna.

5.3 Pengujian Integrasi Keseluruhan Sistem

5.3.1 Hasil Pengujian

Hasil pengujian integrasi menunjukkan bahwa sistem mampu beroperasi secara stabil tanpa terjadi *hang* atau kegagalan sistem selama 10 siklus pemindaian berkelanjutan. Dari 130 sampel yang diujikan, sistem berhasil mengklasifikasikan 127 sampel sebagai sehat dan 3 sampel sebagai sakit. Dokumentasi hasil deteksi pada aplikasi *mobile* S-DiDeS ditunjukkan pada Gambar 5.10.



Gambar tersebut menampilkan antarmuka aplikasi setelah proses deteksi selesai, di mana *bounding box* berwarna hijau muncul pada udang sehat dan *bounding box* berwarna merah pada udang sakit. Setiap *bounding box* disertai label kelas dan nilai *confidence*.

Hasil deteksi tersebut selanjutnya diverifikasi menggunakan metode PCR untuk mengukur tingkat akurasi sistem. Berdasarkan hasil verifikasi PCR dari 130 sampel, diperoleh distribusi kondisi aktual yakni, 90 sampel sehat, 15 sampel IMNV, 12 sampel TSV, dan 13 sampel WSSV. Perbandingan antara hasil deteksi sistem dan hasil PCR disajikan pada tabel 5.2.

Tabel 5. 2 Perbandingan Hasil Deteksi Sistem dengan PCR

Kondisi Aktual	Jumlah Sampel	Terdeteksi Sistem	False Negative	False Positive
Sehat	90	88	2	0
IMNV	15	15	0	1

Kondisi Aktual	Jumlah Sampel	Terdeteksi Sistem	False Negative	False Positive
TSV	12	5	7	3
WSSV	13	8	5	2

Berdasarkan Tabel 5.10, sistem berhasil mendeteksi 88 dari 90 sampel sehat, 15 dari 15 sampel IMNV, 5 dari 12 sampel TSV, dan 8 dari 13 sampel WSSV. Dari data tersebut, diperoleh nilai $TP = 28$, $TN = 88$, $FP = 0$, dan $FN = 14$. Akurasi sistem dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{Akurasi} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \times 100\%$$

$$\text{Akurasi} = \frac{28 + 88}{28 + 88 + 0 + 14} \times 100\%$$

$$\text{Akurasi} = \frac{116}{130} \times 100\% = 82.9\%$$

Selain akurasi, waktu respons end-to-end juga diukur untuk mengetahui seberapa cepat sistem memberikan hasil deteksi. Waktu respons diukur pada 10 siklus pemindaian dengan mencatat timestamp pada setiap tahapan pemrosesan, mulai dari akuisisi citra hingga notifikasi diterima oleh smartphone. Rata-rata waktu setiap komponen disajikan pada Tabel 5.3.

Tabel 5. 3 Rata-rata Waktu Respons per Komponen

Komponen	Waktu (ms)
Akuisisi citra	33
<i>Preprocessing</i>	12
Inferensi Hailo-8L	45
<i>Postprocessing</i> (NMS)	8
Penyimpanan database	15
Pengiriman FCM	287
Total End-to-End	400

Dari tabel tersebut terlihat bahwa total waktu respons end-to-end adalah 400 ms, dengan komponen terbesar adalah pengiriman FCM sebesar 287 ms. Selain akurasi dan waktu respons, pengujian juga mengukur tingkat keberhasilan

penyimpanan data dan pengiriman notifikasi. Seluruh data hasil deteksi berhasil tersimpan pada SQLite dan Firebase Realtime Database dengan tingkat keberhasilan 100%. Notifikasi FCM juga berhasil terkirim pada seluruh siklus dengan tingkat keberhasilan 100%. Stabilitas sistem diukur berdasarkan suhu operasi Hailo-8L selama 10 siklus pemindaian. Suhu tercatat pada rentang 45–50°C dengan rata-rata 47°C, yang masih berada di bawah batas aman operasional 85°C. Seluruh hasil pengujian integrasi dirangkum pada Tabel 5.12.

Tabel 5. 4 Hasil Pengujian Integrasi Keseluruhan Sistem

Parameter	Hasil
Jumlah sampel uji	130 ekor
Siklus pemindaian	10 siklus
Deteksi berhasil	127 sehat, 3 sakit
Akurasi sistem	89,2%
Total TP	28
Total TN	88
Total FP	0
Total FN	14
Waktu respons end-to-end	400 ms
Keberhasilan penyimpanan data	100%
Keberhasilan notifikasi FCM	100%

5.3.2 Analisis Hasil Pengujian

Akurasi sistem sebesar 89,2% diperoleh dari 116 prediksi benar dari 130 total sampel. Angka ini menunjukkan bahwa secara keseluruhan sistem memiliki tingkat ketepatan yang baik dalam mengklasifikasikan kondisi udang. Namun, akurasi tunggal tidak cukup untuk menggambarkan kinerja sistem secara menyeluruh karena distribusi kelas yang tidak seimbang (90 sehat, 40 sakit). Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis lebih lanjut terhadap nilai TP, TN, FP, dan FN.

Nilai $FP = 0$ merupakan temuan paling signifikan dalam pengujian ini. Tidak adanya *false positive* berarti sistem tidak pernah salah mengklasifikasikan udang sehat sebagai sakit. Dalam konteks sistem peringatan dini, $FP = 0$ berarti pembudidaya tidak akan pernah menerima peringatan palsu. Hal ini penting karena peringatan palsu dapat menyebabkan kekhawatiran yang tidak perlu, penghentian operasional yang tidak terencana, dan pemborosan biaya untuk tindakan mitigasi yang sebenarnya tidak diperlukan. Dengan $FP = 0$, sistem menjamin bahwa setiap notifikasi yang dikirimkan kepada pembudidaya adalah benar-benar kasus positif.

Nilai $FN = 14$ mengindikasikan bahwa sistem gagal mendeteksi 14 sampel sakit dari total 40 sampel sakit (35% kasus sakit tidak terdeteksi). Seluruh 14 FN berasal dari kelas TSV (7 sampel) dan WSSV (5 sampel), dengan 2 FN tambahan dari kelas Sehat yang salah diklasifikasi sebagai sakit. Pada kelas TSV, *recall* hanya 41,7% (5 dari 12), sedangkan pada kelas WSSV *recall* 61,5% (8 dari 13). Rendahnya *recall* pada TSV dan WSSV disebabkan oleh kemiripan gejala visual kedua penyakit tersebut, yang mengakibatkan model kesulitan menemukan fitur diskriminatif yang konsisten. Hal ini mengkonfirmasi temuan pada subbab 5.2 bahwa model memiliki kesulitan dalam mendeteksi TSV dan WSSV secara akurat.

Pada kelas IMNV, *recall* mencapai 100% (15 dari 15) tanpa ada FN. Hal ini menunjukkan bahwa model sangat andal dalam mendeteksi IMNV, yang disebabkan oleh gejala nekrosis otot yang memiliki tampilan visual yang khas dan sangat berbeda dengan kelas lainnya. Pada kelas Sehat, *recall* 97,8% (88 dari 90) menunjukkan bahwa sistem jarang menghasilkan *false negative* pada udang sehat, yang berarti hanya 2 dari 90 udang sehat yang salah diklasifikasikan sebagai sakit.

Waktu respons end-to-end 400 ms terdiri atas enam komponen. Komponen terbesar adalah pengiriman FCM sebesar 287 ms (71,75% dari total waktu), yang sangat bergantung pada kondisi koneksi internet dan infrastruktur cloud. Komponen terkecil adalah *postprocessing* NMS sebesar 8 ms (2% dari total waktu), yang menunjukkan bahwa proses NMS berjalan sangat cepat pada Raspberry Pi 5. Waktu inferensi 45 ms (11,25% dari total waktu) menunjukkan bahwa akselerasi Hailo-8L mampu memproses satu citra dalam waktu kurang dari 50 ms, yang setara dengan kecepatan pemrosesan 22 FPS. Total waktu 400 ms masih berada di bawah

ambang batas 1000 ms yang ditetapkan sebagai kriteria responsivitas sistem peringatan dini, sehingga notifikasi dapat diterima oleh pembudidaya tanpa keterlambatan yang berarti. Keterlambatan di atas 1000 ms dapat mengurangi efektivitas tindakan mitigasi karena penyakit dapat menyebar dengan cepat di dalam tambak.

Keberhasilan penyimpanan data dan pengiriman notifikasi mencapai 100% dari 10 siklus. Angka 100% ini berarti tidak terjadi kehilangan data atau kegagalan transmisi selama pengujian. Tingkat keberhasilan ini dicapai karena mekanisme *error handling* dan *retry* yang diterapkan pada sistem, di mana setiap kegagalan pengiriman data akan diulang hingga tiga kali sebelum dinyatakan gagal. Dengan 10 siklus dan tidak ada kegagalan, sistem terbukti memiliki koneksi yang stabil antara Raspberry Pi 5, Firebase, dan perangkat *smartphone* pada kondisi laboratorium. Suhu operasi Hailo-8L pada rentang 45–50°C dengan rata-rata 47°C berada jauh di bawah batas aman operasional 85°C berdasarkan datasheet komponen. Selisih 35–40°C dari batas aman menunjukkan bahwa sistem pendinginan pasif yang diterapkan pada prototipe masih memiliki margin yang cukup luas. Hal ini berarti sistem dapat dioperasikan dalam durasi yang lebih lama tanpa risiko *thermal throttling* yang dapat menurunkan kinerja inferensi.