Jurnal Vocational Teknik Elektronika dan Informatika
http://ejournal.unp.ac.id/index.php/voteknika
Universitas Negeri Padang, Indonesia

ISSN 2302-3295 (Print)
ISSN 2716-3989 (Electronics)
Vol. 14, No. 1, 2026

Prototype of a Edge-AI Based Bird Repellent System Using YOLOv8n

Gustia Fernando[1*], Ilmiyati Rahmy Jasril[1], Almasri[1], Rido Putra[1]

[1] Universitas Negeri Padang, Padang, Indonesia

*Corresponding Author: gustiafernando08@gmail.com

Abstract – **Bird pest control in agricultural areas generally employs conventional methods that are susceptible to habituation processes and lack operational efficiency. Cloud-based computer vision implementations suffer from network latency vulnerabilities , while the utilization of standard Single Board Computers (SBCs) frequently triggers computational bottlenecks when processing deep learning algorithms. Therefore, this study proposes the design of a smart pest repellent prototype based on Edge Artificial Intelligence (Edge-AI) exploiting the Neural Processing Unit (NPU) on the Orange Pi 5 Pro platform. The object detection model was developed utilizing the YOLOv8nn architecture, trained on a dataset of 40,877 images, and executed locally. The system implements stochastic stimulus control logic through the integration of a pan-tilt green laser actuator and predator audio emissions to prevent habituation processes in pests. System performance testing results indicate that NPU acceleration is capable of yielding a stable inference throughput at 20 Frames Per Second (FPS). The model's performance evaluation achieved a Mean Average Precision (mAP@50) of 0.70037 , with an optimal visual detection range effectiveness of 4 meters. Under peak computational and actuation conditions (full load), the instrument recorded a power consumption of 21.09 W, equivalent to an estimated operational viability of 2.8 hours utilizing a 7,200 mAh battery supply. In conclusion, the proposed Edge-AI architecture proves robust in mitigating embedded computational limitations, yielding a control instrument that is responsive, accurate, and highly reliable for real-world environmental applications.**

Keywords – **Computer Vision, Edge-AI, NPU, Orange Pi 5 Pro, YOLOv8n.**

I. PENDAHULUAN

Penerapan teknologi elektronika dalam sistem pertanian terus berkembang salah satunya pengamanan dari gangguan hama. Upaya pengendalian hama terutama hama burung pada awalnya sangat bergantung pada metode tradisional, mulai dari penggunaan orang-orangan sawah (*scarecrows*), instalasi bunyi-bunyian kaleng, hingga penjagaan manual yang intensif. Namun, Teknik-teknik fisik ini memiliki keterbatasan signifikan berupa kebutuhan tenaga kerja yang tinggi serta efektivitas yang menurun drastis seiring waktu akibat kemampuan adaptasi kognitif burung. Sebagai alternatif modern, berbagai instrumen elektronika telah diterakan, namun perangkat konvensional yang mengandalkan sensor gerak sederhana seperti *passive infrared* (PIR) sering kali belum memberikan kinerja yang optimal.

Kelemahan mendasar dari sistem PIR terletak pada ketidakmampuannya dalam mengklasifikasikan fitur objek, yang berakibat pada tingginya tingkat alarm palsu (*false alarm*) karena gangguan lingkungan non-target[1], [2], [3]. Selain masalah akurasi, pola respons aktuator yang bersifat statis dan *repetitive* pada alat konvensional memicu fenomena habituasi, dimana sensitivitas respons objek target menurun seiring waktu [4], [5]. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan rekayasa baru untuk menciptakan sistem kendali yang tidak hanya otomatis, tetapi juga cerdas dan adaptif.

Seiring dengan kemajuan *algorithm* kecerdasan buatan, integrasi *computer vision* pada sistem tertanam (*embedded system*) menawarkan Solusi potensial untuk meningkatkan presisi deteksi visual. Namun, implementasi teknologi ini menghadapi tantangan teknis tersendiri, terutama terkait keterbatasan sumber daya komputasi dan konektivitas di lapangan. Pendekatan berbasis *cloud computing*, meskipun memiliki daya komputasi besar, sering terkendala oleh latensi jaringan yang tinggi dan ketidakstabilan koneksi internet di area terpencil [6], [7]. Di sisi lain, penggunaan *single board computer* (SBC) standar tanpa akselerator perangkat keras sering mengalami penurunan performa (*bottleneck)* saat dipaksa menjalankan beban kerja (*deep learning*) yang berat [8]. Kondisi ini mendorong perlunya desain arsitektur perangkat keras yang mampu memproses data secara mandiri di sisi perangkat edge dengan efisiensi tinggi.

Penelitian ini mengusulkan sistem pengusir hama cerdas berbasis edge AI yang memanfaatkan kemampuan *Neural Processing Unit* (NPU) pada platform Orange Pi 5 Pro. Penggunaan NPU memungkinkan eksekusi inferensi model YOLOv8n (*you only look once*) dilakukan dengan kecepatan tinggi dan konsumsi daya yang rendah, mengatasi keterbatasan

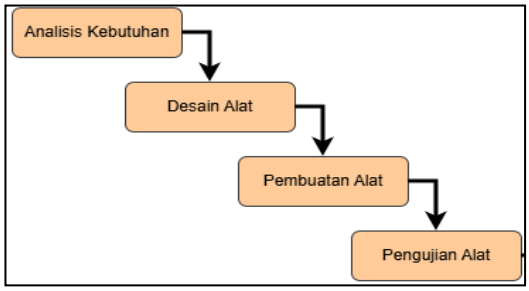
DOI: https://doi.org/10.24036/voteteknika.v14i1.137734
Received : 2026-02-26
Revised : 2026-04-24
Accepted : 2026-04-25
Published : 2026-04-30

For all articles published in VOTETEKNIKA https://ejournal.unp.ac.id/index.php/voteknika, © copyright is retained by the authors. This is an open-access article under the CC BY-SA license.

komparasi pada SBC lainnya [9], [10]. Selain peningkatan pada kemampuan deteksi, sistem ini juga dirancang dengan mengimplementasikan logika kendali stimulus stokastik. Logika ini berfungsi untuk memvariasikan pola keluaran audio dan visual secara dinamis, guna mencegah terjadinya proses habituasi pada hama burung. Melalui integrasi ini diharapkan dapat dihasilkan sebuah prototipe sistem kendali cerdas yang responsif, akurat, dan memiliki reliabilitas tinggi untuk aplikasi di lingkungan nyata.

II. METODE

Penelitian ini menggunakan model pengembangan *waterfall* yang bersifat sistematis dan sekuensial. Metode ini dipilih karena memberikan alur kerja yang terstruktur mulai dari definisi masalah hingga validasi sistem akhir. Menurut [11], tahapan penelitian dibagi menjadi empat fase utama sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1, yaitu: (A) Analisis kebutuhan, (B) Desain Alat, (C) Pembuatan Alat, dan (D) Pengujian Alat.



Gambar 1. Bagan alir metode *Waterfall* [11]

A. Tahap Analisis Kebutuhan

Tahap ini berfokus pada pengumpulan data dan penentuan spesifikasi perangkat keras serta perangkat lunak yang dibutuhkan untuk mendukung sistem edge AI.

1. Analisis data dan *dataset*

Persiapan *dataset* diawali dengan menggabungkan lebih dari lima *bird-detection datasets* yang tersedia secara publik dari *Roboflow* menjadi satu dataset terpadu. Dataset hasil penggabungan memuat 40.877 *images* yang kemudian dipartisi ke dalam *train*, *valid*, dan *test*. *Train set* terdiri dari 32.077 *images*, *valid set* berjumlah 5.890 *images*, dan *test set* mencakup 2.890 *images* [12], [13], [14]. Untuk tugas *object detection* ini didefinisikan empat *object classes*, yaitu *bird* untuk individu burung, *flock* untuk kelompok burung, *human* untuk subjek manusia yang muncul dalam konteks adegan pertanian, serta *fake-bird* untuk penghalang burung buatan.

Pelatihan model menggunakan arsitektur YOLOv8nn, varian *nano* yang dioptimalkan untuk *deployment* tertanam dengan jumlah parameter dan persyaratan komputasi yang lebih rendah dibandingkan varian YOLOv8n yang lebih besar [1], [15]. Pelatihan dilakukan dengan 100 *epoch* menggunakan *hiperparameter* YOLOv8n *default*, termasuk *mosaic augmentation*, *mixup augmentation*, serta *cosine learning-rate scheduling*. Proses pelatihan menghasilkan dua *file checkpoint*, best.pt yang berisi bobot dari *epoch* dengan mAP validasi tertinggi, dan last.pt yang berisi bobot dari *epoch* terakhir. Metrik pelatihan dicatat dalam *results.csv* dan divisualisasikan dalam *results.png* untuk analisis perilaku konvergensi [16].

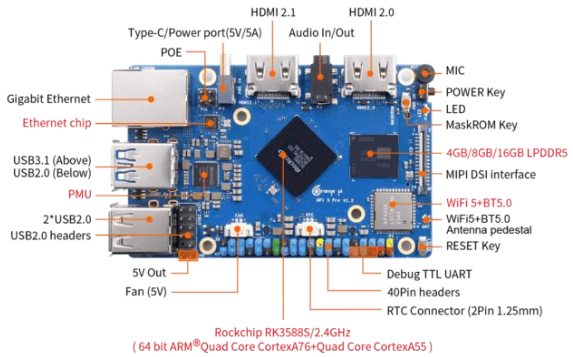
Validasi eksternal dilakukan melalui dua pendekatan utama yang meliputi penggunaan dataset video YouTube untuk simulasi variasi lingkungan serta uji coba lapangan terkontrol menggunakan burung asli guna mengevaluasi generalisasi model di luar distribusi pelatihan. Materi video dipilih secara spesifik untuk merepresentasikan kondisi pencahayaan yang beragam, variasi sudut kamera, dan kompleksitas latar belakang yang berbeda. Kinerja deteksi pada data eksternal ini dievaluasi secara kualitatif melalui inspeksi visual terhadap *bounding box* yang diprediksi serta secara kuantitatif melalui analisis distribusi skor kepercayaan atau *confidence score* mengingat tidak tersedianya anotasi *ground truth* pada dataset pengujian tersebut [17], [18].

Estimasi waktu operasional (*runtime*) dari sistem kendali hama burung ini dikalkulasikan menggunakan persamaan kapasitas baterai berbanding beban arus. Perhitungan tersebut mempertimbangkan parameter efisiensi konversi daya (η) dari modul regulator *step-down*, serta faktor *Depth of Discharge* (DoD) guna membatasi batas pengosongan baterai *Lithium-ion* 3S4P agar siklus hidup (*life-cycle*) sel baterai tetap terjaga [19].

2. Analisis kebutuhan perangkat keras

System dirancang untuk beroperasi secara mandiri dilingkungan persawahan dengan spesifikasi perangkat keras utama meliputi:

a. Unit pemrosesan utama yaitu Orange Pi 5 Pro, dipilih sebagai otak sistem karena spesifikasinya yang cukup tinggi untuk komputasi *edge*. Perangkat ini ditenagai oleh *SoC Rockchip* RK3588S yang mengintegrasikan CPU *Octa-core* dan NPU generasi terbaru dengan kinerja 6 TOPS [20]. Kemampuan ini sangat krusial untuk menjalankan inferensi model AI secara lokal tanpa bergantung pada koneksi internet. Visualisasi perangkat dapat dilihat pada Gambar 2 dan rincian spesifikasi pada tabel 1

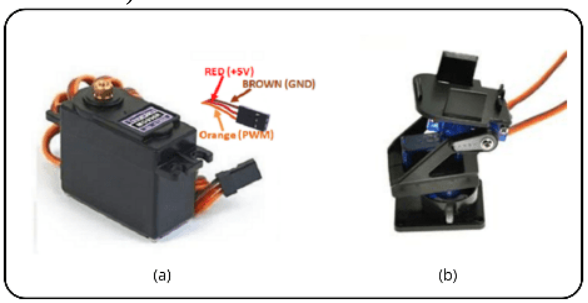


Gambar 2. Tampilan dan Dataset Rockchip RK3588s Orange Pi 5 Pro

b. Perangkat *Training* yaitu menggunakan leptop Lenovo LOQ 15IAX9E dengan spesifikasi proses intel® Core™ i5-12450HX dan GPU NVIDIA GeForce RTX 3050 (6gb GDDR6). Spesifikasi GPU ini krusial untuk menangani beban komputasi paralel saat melatih 39.000+ dataset [21].

c. Mekanisme Gerak *pan-titl* yaitu sistem yang dibangun dengan dua buah unit motor *servo* bertipe MG996R yang dipilih dikarenakan memiliki torsi yang kuat

sesuai dengan Gambar 3. Servo tersebut disusun dengan konfigurasi 2 DOF (*Degrees of Fredom*) yang dapat bergerak secara horizontal dan vertikal. Motor *servo* MG996R memiliki torsi sebesar 11 kg/cm dengan kecepatan operasi 0.17 detik/60 derajat dengan jangkauan rotasi 180 derajat [22]. Motor *servo* ini dikendalikan dengan sinyal PWM (*Pulsa Width Modulation*).



Gambar 3. Motor *servo* MG996R dan *bracket Pan-Tilt*

Keseluruhan sistem pengusir burung ini terdiri dari beberapa sub-sistem yang saling terintegrasi dalam satu kesatuan. Untuk pemrosesan utama, sistem bergantung pada *Micro SD card* yang memuat *OS Linux Armbian* agar perangkat Orange Pi dapat *booting* dan menyimpan data operasional. Fungsi pendeteksian bergantung pada *webcam* yang terus-menerus mengambil citra real-time untuk mengidentifikasi keberadaan burung melalui deteksi objek. Saat burung terdeteksi, eksekusi pengusiran dikendalikan oleh modul *relay* yang secara otomatis menyalakan laser sebagai stimulus visual, dan menghidupkan *amplifier Class D* tipe LM3116D2 guna memperkuat sinyal suara yang kemudian dikeluarkan melalui *speaker*. Agar sistem ini portabel dan tidak bergantung pada listrik utama, perangkat ditenagai oleh baterai dan BMS yang mengatur arus keluar-masuk daya. Kinerja sistem juga dijaga oleh sistem pendingin yang memastikan perangkat tidak *overheat* sehingga daya tahan komponen dan efisiensi baterai tetap terjaga. Sebagai antarmuka informasi, sebuah LCD *display* disematkan agar pengguna dapat memantau suhu perangkat serta total deteksi burung harian secara real-time.

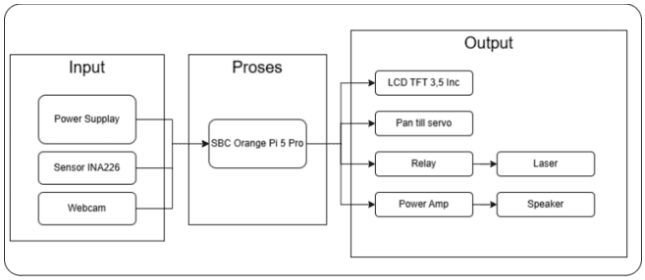
3. Analisis Kebutuhan perangkat Lunak

Analisis kebutuhan perangkat lunak pada sistem ini difokuskan pada optimalisasi sumber daya single-board computer. Sistem menggunakan sistem operasi *Armbian Server headless* untuk mereduksi beban komputasi secara masif [23], [24]. Pengembangan sistem mengintegrasikan bahasa *Python* untuk pemrosesan kecerdasan buatan tingkat tinggi, serta C/C++ untuk kendali antarmuka perangkat keras dengan latensi minimum [25], [26]. Untuk fungsi visi komputer, sistem mengimplementasikan algoritma pendeteksi objek YOLO (*Ultralytics*) secara real-time. Model tersebut dikembangkan melalui tahap prapemrosesan dataset di platform *Roboflow* dan pelatihan model menggunakan komputasi awan *Kaggle* [27]. Agar inferensi pada edge device dapat diakselerasi, kompilator *RKNN Toolkit* digunakan untuk mengonversi model berformat *ONNX* sehingga dapat dieksekusi langsung oleh *Neural Processing Unit* (NPU). Selain perangkat lunak sistem, perancangan purwarupa juga didukung oleh perangkat lunak Eagle untuk tata letak PCB dan *SketchUp* untuk pemodelan mekanis 3D.

B. Tahap desain

Tahap desain dimulai dari pembuatan blog diagram, skematik, *flowchart*, dan rancangan prototipe.

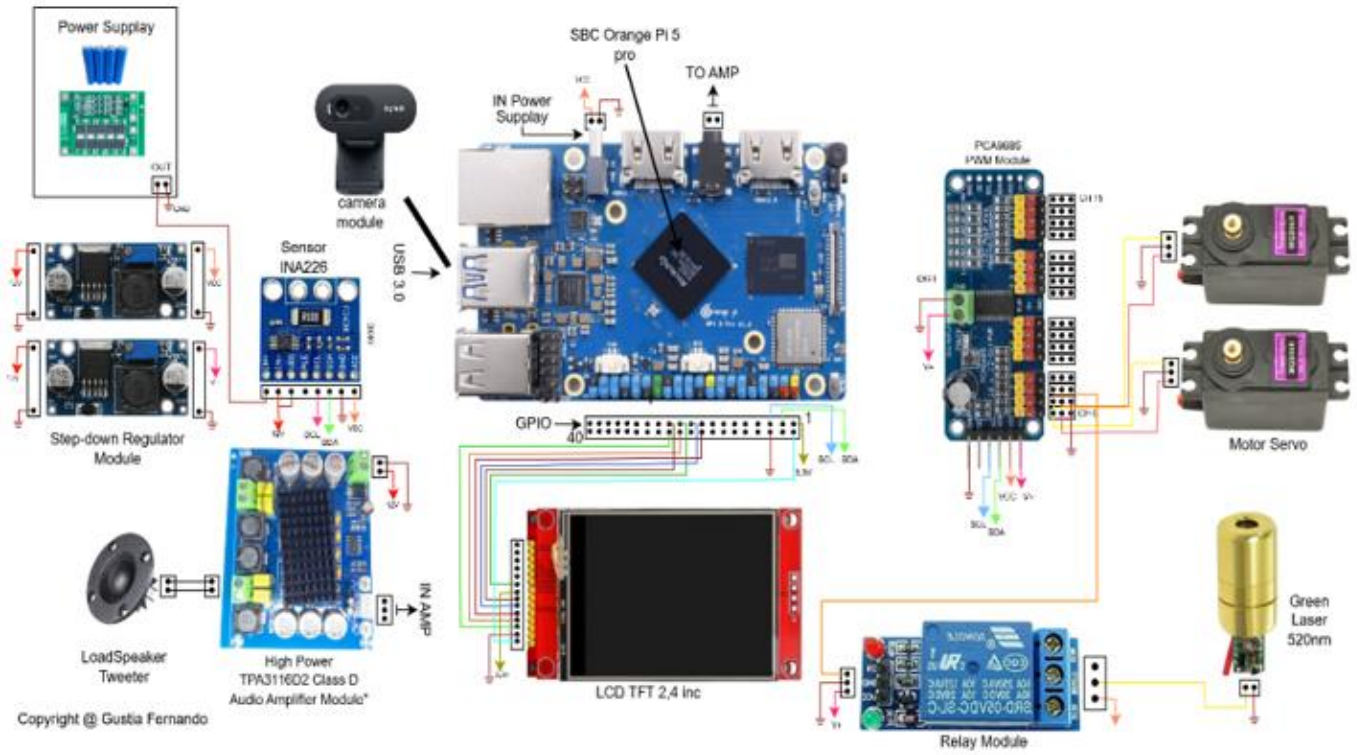
1. Blog diagram



Gambar 4. Blok Diagram Sistem Pengusir Burung Berbasis *Edge* AI

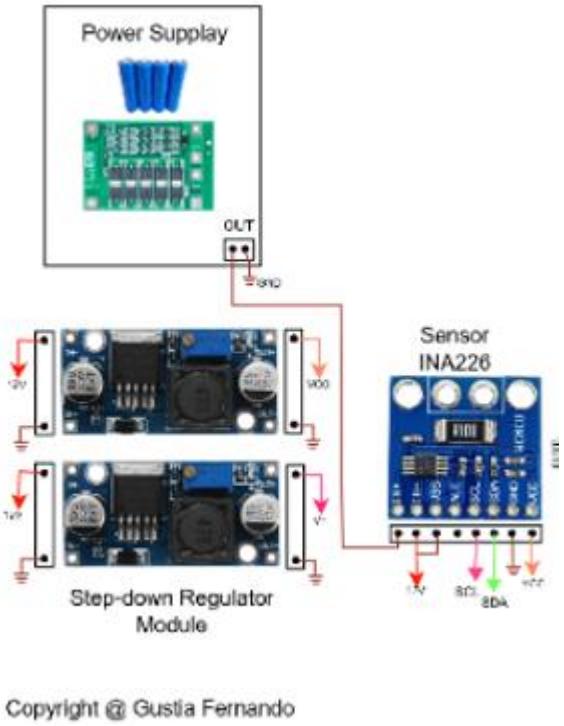
Gambar 4 merupakan integrasi alur *input*, pemrosesan, dan *output* yang diawali oleh *power supply* stabil dan webcam untuk menangkap visual area sawah secara *real-time*. Citra tersebut dianalisis oleh SBC Orange Pi 5 Pro yang kini mengandalkan NPU terintegrasi berkapasitas 6 TOPS untuk mengakselerasi algoritma deteksi objek YOLO dengan performa jauh lebih tinggi. Saat burung terdeteksi, unit pemrosesan segera menginstruksikan motor *servo* untuk mengarahkan laser hijau secara presisi serta menampilkan status pada layar LCD TFT. Secara bersamaan, amplifier akan memperkuat sinyal audio untuk memancarkan suara predator melalui speaker berdaya tinggi. Kombinasi stimulus visual dan audio yang terkoordinasi ini menciptakan metode pengusiran yang efektif sekaligus mencegah habituasi pada hama burung.

2. Skematik



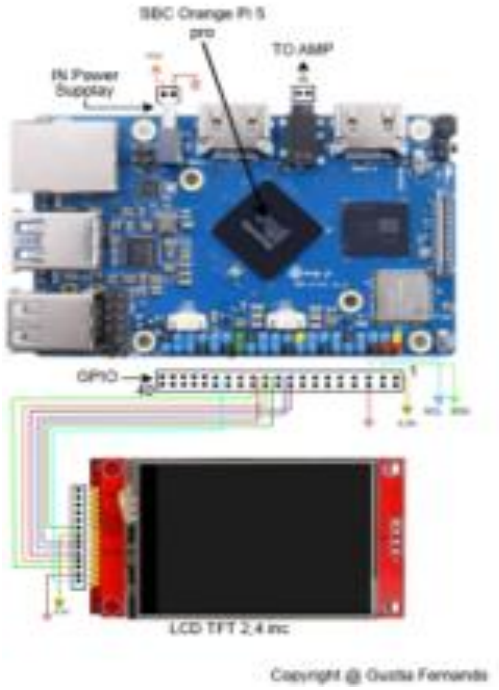
Gambar 5. Skematik Rangkaian

Berdasarkan Gambar 5 merupakan rangkaian pengendali utama pada sistem ini berpusat pada *Single Board Computer* (SBC) Orange Pi 5 Pro. Perangkat ini bertindak sebagai unit komputasi sentral yang menangani proses inferensi kecerdasan buatan (AI) sekaligus mengelola jalur input/output (I/O).



Gambar 6. Blok Rangkaian Catu Daya

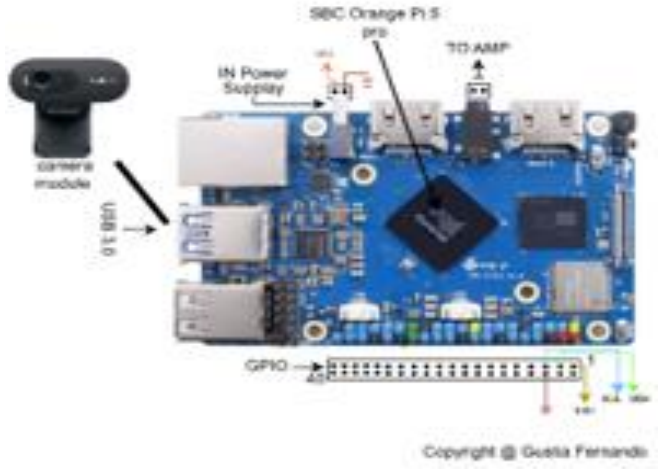
Gambar 6 menunjukkan distribusi daya sistem yang dikelola menggunakan modul regulator *step-down* untuk menyuplai tegangan secara terpisah ke Orange Pi 5 Pro dan modul *driver* PCA9685. Sementara itu, untuk pemantauan konsumsi daya sistem secara real-time, diimplementasikan modul sensor INA226 yang dihubungkan ke mikrokontroler melalui antarmuka komunikasi I2C.



Gambar 7. Blok Rangkaian LCD TFT 2,4 Inci

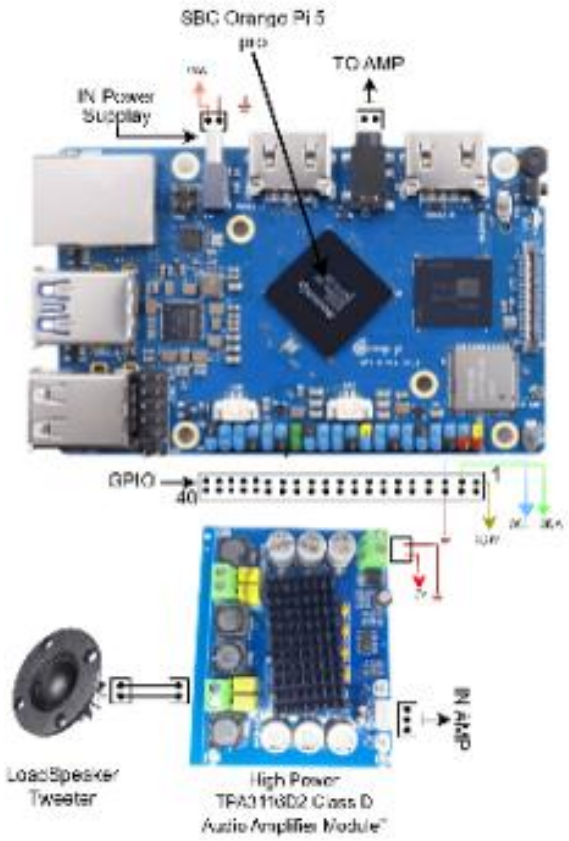
Gambar 7 merupakan antarmuka visual (*display*), sistem menggunakan LCD TFT 3.5 inch yang berkomunikasi melalui protokol SPI, di mana Pin 19 (MOSI) dan Pin 23 (SCK)

digunakan untuk transmisi data, sedangkan Pin 24 (CS), Pin 22 (RESET), dan Pin 18 (DC) berfungsi sebagai jalur kontrol. Sumber daya LCD diambil dari Pin 1 (3.3V) dan GND di Pin 6.

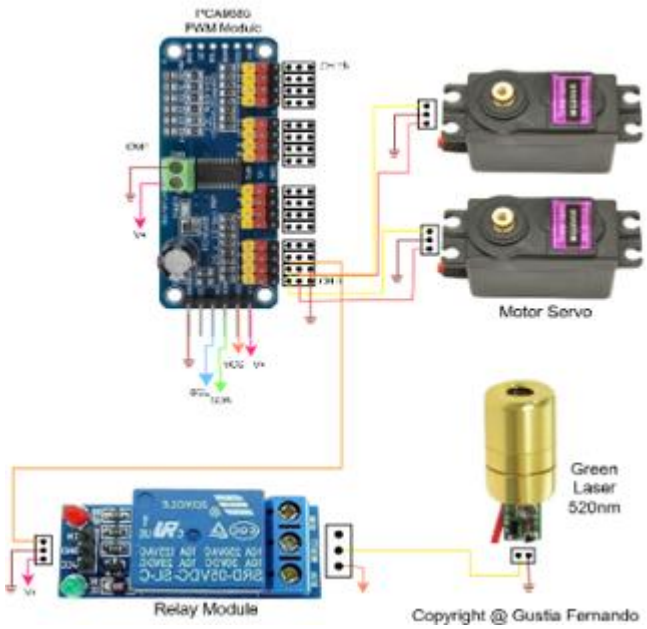


Gambar 8. Blok *Webcam*

Gambar 8 merupakan input visual utama ditangkap oleh *Webcam* yang terhubung langsung ke port USB 2.0 untuk memberikan data citra resolusi tinggi. Gambar 9 mengilustrasikan diagram blok untuk sub sistem keluaran audio. Sinyal suara predator ditransmisikan dari unit pemroses utama melalui antarmuka konektor *jack* audio 3,5 mm menuju modul penguat suara (*Power Amplifier*) *Class*-D. Untuk menghasilkan daya keluaran akustik yang maksimal, modul penguat tersebut mendapatkan suplai tegangan secara langsung dari jalur distribusi daya utama sistem.



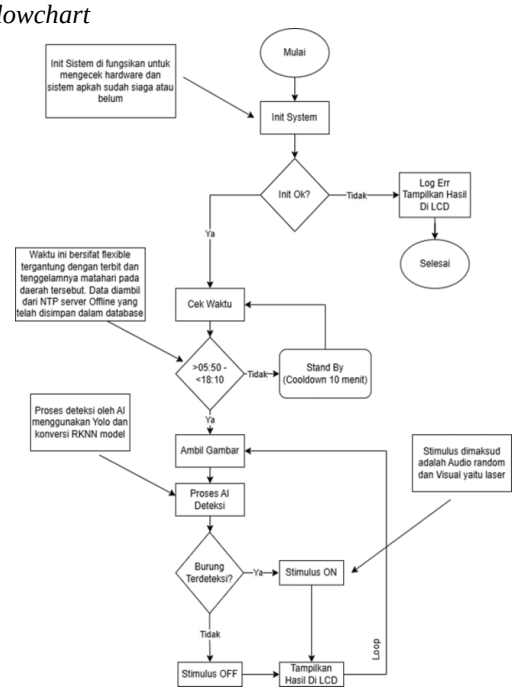
Gambar 9. Blok Pengeras Suara



Gambar 10. Blok Rangkaian Aktuator

Gambar 8 merupakan bagian aktuator penggerak, sistem ini menggunakan modul *driver* PWM PCA9685 16-channel untuk mengontrol pergerakan motor servo secara presisi dan mengurangi beban pada pin GPIO utama. Modul PCA9685 ini terhubung ke Orange Pi 5 Pro melalui antarmuka I2C pada Pin 3 (SDA) dan Pin 5 (SCL). Motor Servo *Pan* dan Servo *Tilt* masing-masing dihubungkan ke Channel 0 dan Channel 1 pada *output* modul PCA9685 tersebut. Selain itu, untuk stimulus laser, sistem menggunakan *Relay* Modul yang dikendalikan juga melalui PCA9685 dengan Channel 2. Prinsip kerjanya, apabila NPU mendeteksi objek burung, Orange Pi 5 Pro akan mengirimkan perintah posisi ke PCA9685 dan sinyal pemicu ke *Relay* untuk menyalakan laser secara bersamaan.

3. *Flowchart*



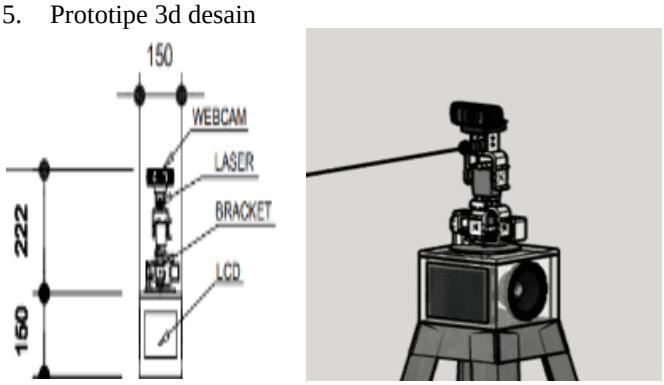
Gambar 11. *Flowchart*

Berdasarkan gambar 11 sistem pengusir burung ini diawali dengan tahap inisialisasi pada Orange Pi 5 Pro yang melakukan *self-check* komponen serta pemuatan model YOLO dalam format RKNN untuk akselerasi NPU. Operasional sistem dibatasi pada waktu aktif burung (05.50-18.10 WIB), di mana sistem akan masuk ke mode *standby* hemat daya di luar jam tersebut. Saat aktif, *webcam* mengambil citra secara kontinu untuk diproses oleh NPU guna mendeteksi keberadaan burung dengan *threshold confidence* minimal 0,5. Jika terdeteksi, sistem secara otomatis mengaktifkan stimulus audio predator acak dan mengarahkan laser hijau melalui *servo Pan-Tilt* secara presisi berdasarkan koordinat *bounding box*. Sebaliknya, jika tidak ada burung, sistem akan menonaktifkan seluruh stimulus dan menggerakkan servo horizontal 0-180 derajat kontinu dan servo vertikal 85-95 derajat secara *random* untuk memantau area sekitar guna efisiensi energi. Seluruh status deteksi dan log aktivitas ditampilkan secara real-time melalui layar LCD untuk memudahkan pemantauan lapangan.

4. Perancangan Perangkat Lunak

Dalam perancangan perangkat lunak sistem pengusir hama burung memerlukan beberapa perangkat lunak sekaligus yang saling terintegrasi yaitu *balena etcher* untuk *install OS Armbian server*, Pemrograman *python* di *visual studio code*, pelatihan model *training*, konversi model YOLO ke ONNX, dan konversi ONNX ke RKNN menggunakan RKNN-*toolkit*.

5. Prototipe 3d desain



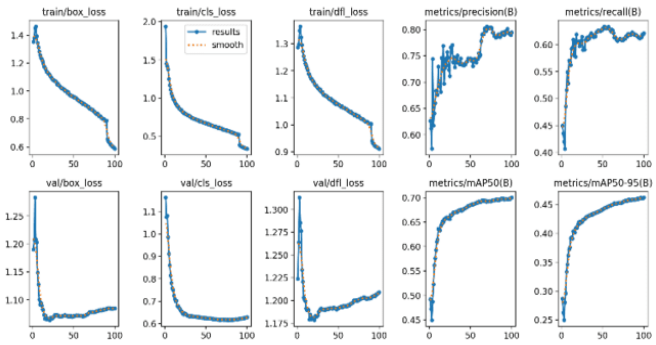
Gambar 12. Prototipe Alat

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil pelatihan Model

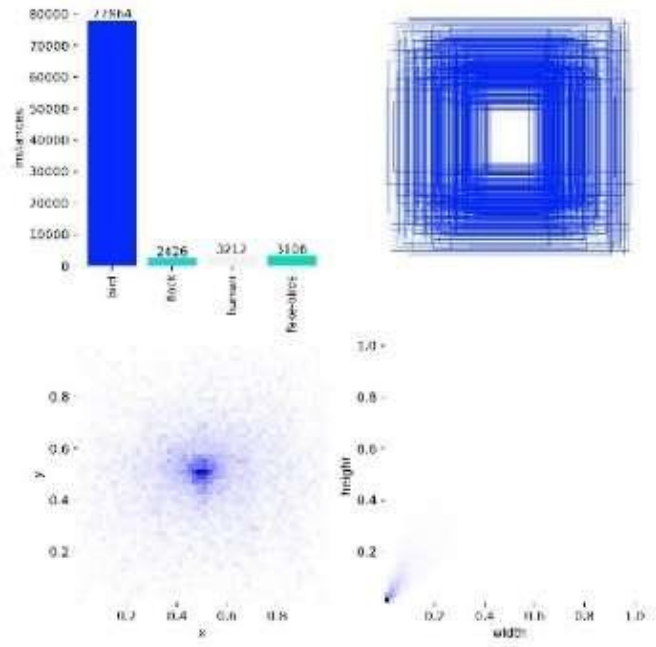
Dua alur pemrosesan inferensi *end-to-end* diimplementasikan dengan tahap prapemrosesan dan pascapemrosesan yang identik untuk memastikan perbandingan yang adil. Kedua alur pemrosesan memuat bobot model best.pt yang sama dan menerapkan prapemrosesan gambar yang identik, termasuk penyesuaian resolusi masukan 640x640 pixel, normalisasi, dan pembentukan saraf.

Evaluasi awal dilakukan terhadap kinerja model YOLOv8n yang dilatih pada *dataset* gabungan di mana kinerja deteksi diukur menggunakan metrik *Mean Average Precision* (mAP) sesuai dengan persamaan standar evaluasi deteksi objek. Metrik pelatihan dicatat secara rinci untuk menganalisis perilaku konvergensi model selama 100 *epoch* [15].



Gambar 13. Hasil Pelatihan Model Burung

Berdasarkan Gambar 13 hasil pelatihan menunjukkan konvergensi model yang sukses di mana metrik *epoch* akhir menampilkan presisi 0.79492 dan *recall* 0.62143. mAP pada ambang batas IoU 0.5 mencapai 0.70037 sedangkan pada ambang batas 0.5 hingga 0.95 sebesar 0.46247. Kerugian pelatihan pada *epoch* akhir meliputi kerugian lokalisasi kotak sebesar 0.58628 dan kerugian klasifikasi sebesar 0.33791 serta kerugian fokus distribusi sebesar 0,91154. Kerugian validasi pada *epoch* akhir meliputi kerugian kotak sebesar 1.08467 kemudian kerugian klasifikasi sebesar 0.62946 dan kerugian fokus distribusi sebesar 1.20911 [16], [28], [29].



Gambar 14. Kelas Distribusi Pelatihan Model

Gambar 14 merupakan *Class distribution* memperlihatkan kelas ketidakseimbangan yang jelas, dengan 77.864 *bird instances*, 2.426 *flock instances*, 3.212 *human instances*, dan 3.106 *fake-bird instances*. Ketidakseimbangan ini terutama berdampak pada kelas flock karena proporsinya yang relatif jarang dalam *training* data, sehingga berpotensi menurunkan stabilitas pembelajaran dan kualitas generalisasi pada kelas tersebut [28], [29].

Pascapemrosesan mencakup penekanan non-maksimum dengan ambang batas IoU 0.7 dan mAP 0.35, yang ditentukan dari analisis F1-kepercayaan. alur pemrosesan kerja CPU menjalankan semua operasi pada inti CPU ARM menggunakan *runtime PyTorch*. alur pemrosesan NPU memindahkan operasi

saraf ke unit pemrosesan neural menggunakan *toolchain RKNN-Toolkit2* dengan mode kuantisasi FP16 (*Floating Point 16-bit*) . Jika konversi NPU memerlukan konversi representasi *intermediate* seperti ONNX ke format RKNN (*Rockchip Neural Network*), proses konversi dijelaskan sebagai *Black-box* karena verifikasi yang tidak memadai dari dokumentasi yang tersedia. Ukuran *batch* ditetapkan tetap pada 1 untuk kedua alur pemrosesan guna menghilangkan efek *batching* pada pengukuran latensi [15], [16].

B. Pengujian alat

Evaluasi konsumsi daya menunjukkan fluktuasi serapan yang proporsional dengan beban komputasi dan aktuasi sistem. Pada kondisi siaga (*idle*), sistem mengonsumsi daya sebesar 4,98 W (415 mA). Pemanfaatan *Neural Processing Unit* (NPU) untuk pemrosesan visual secara real-time pada fase pemantauan (*monitoring*) meningkatkan serapan arus menjadi 742 mA. Puncak konsumsi daya terjadi pada kondisi pembebanan penuh (*full load*) saat motor servo, laser, dan penguat suara aktif beroperasi yang mencapai 21,09 W dengan tarikan arus 1.850 mA. Berdasarkan profil beban puncak tersebut, kapasitas catu daya mandiri yang digunakan mampu menunjang operasional sistem secara kontinu selama estimasi 2,8 jam.

Pengujian fungsional dilakukan terhadap modul PCA9685 I2C yang berfungsi sebagai pengendali sinyal PWM untuk servo *Pan* dan *Tilt* serta *relay*. Parameter yang diukur meliputi tegangan pada pin masukan (SDA, SCL, V+, VCC, dan GND) serta pin keluaran (V+, GND, dan PWM). Rincian hasil pengukuran tersebut disajikan sebagai Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1.
Pengujian Pada Modul PWM PCA9685

No	port	Kondisi (H/L)	Teg terukur
1	V+	H	5,4
2	VCC	H	3,3
3	SDA	H	3,3
4	SCL	H	3,3
5	GND	L	0
6	PWM	H	3,3
7	PWM	L	0

Tabel 1 merupakan pengujian respons motor servo *Pan* dan *Tilt* dilakukan dengan menetapkan frekuensi sinyal kendali sebesar 1000 Hz. Pengujian ini menerapkan metode pengambilan sampel acak (*random sampling*) pada berbagai besaran sudut posisi. Untuk memvalidasi akurasi pergerakan, pengukuran sudut aktual dilakukan secara manual menggunakan busur derajat.

Tabel 2.
Pengujian sudut *Pan-Tilt bracket*

No	Sudut	PAN	Tilt
1	0	0	0
2	45	45	47
3	90	90	93
4	135	135	135
5	180	180	180

Tabel 2 merupakan pengujian fungsional dilakukan pada modul *relay* yang bertugas mengendalikan aktivasi (*on/off*) laser. Untuk keperluan ini, *relay* dihubungkan secara langsung pada Channel 3 dari modul *driver* PCA9685. Berikut ini tabel 3 hasil pengujian *relay*.

Tabel 3.
Pengujian pada modul *relay*

No	Logika *Relay*	Kondisi (H/L)	Teg Terukur (V)
1	*Relay* ON	H	5
2	*Relay* OFF	L	0

Tabel 4 merupakan pengujian fungsionalitas *webcam* dilakukan melalui antarmuka komunikasi serial USB 2.0. Prosedur pengujian mencakup uji coba akuisisi citra dan perekaman video guna memverifikasi kualitas serta *output resolution* yang dihasilkan oleh perangkat tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4.
Pengujian tangkapan gambar dari *webcam*

No.	Mode Pengujian	Resolusi Terukur (pixel)	Format *File*	*Frame Rate* (fps)	Keterangan
1	Akuisisi Citra	1280 x 720 (HD)	.JPG	-	Gambar jernih, fokus otomatis berfungsi
2	Perekaman Video	640 x 480 (VGA)	.MP4	30 fps	Gerakan lancar, *latency* rendah
3	Perekaman Video	1920 x 1080 (FHD)	.AVI	15 fps	Detail tinggi, terdapat sedikit *delay*

Tabel 5 merupakan pengujian karakteristik termal pada sistem dilakukan untuk mengevaluasi profil suhu *System on Chip* (SoC) Orange Pi 5 Pro di bawah berbagai tingkat pembebanan komputasi. Akuisisi data suhu dilakukan secara langsung dengan memanfaatkan sensor termal terintegrasi (*embedded temperature sensor*) pada perangkat tersebut. Observasi dilakukan pada tiga keadaan operasional utama, yakni: kondisi siaga (*idle*), kondisi pemantauan visual (*monitoring*), dan kondisi beban puncak (*full load*) saat seluruh sistem aktuasi bekerja secara simultan. Rangkuman data hasil pengukuran suhu untuk masing-masing kondisi operasional tersebut diuraikan pada penyajian tabel 5 berikut ini.

Tabel 5.
Pengujian Suhu *Chip* Orange Pi 5 Pro

No	Kondisi Operasional	Suhu Rata-rata (°C)	Suhu Puncak Maksimal (°C)	Status Disipasi Panas
1	*Idle* (Siaga)	43,5	45,2	Stabil tanpa *thermal throttling*
2	*Monitoring* (Pemantauan)	58,2	61,0	Peningkatan termal akibat NPU aktif
3	Aktif Penuh (*Full Load*)	71,8	74,5	Suhu maksimal sistem beban penuh

C. Pengujian Deteksi

Pada tabel 6 merupakan tahapan pengujian deteksi pada penelitian ini diklasifikasikan ke dalam dua skenario utama, yaitu pengujian simulasi menggunakan rekaman video sampel sebanyak 300 *frame*, dan pengujian lapangan menggunakan objek burung pada kondisi yang terkontrol. Ruang lingkup

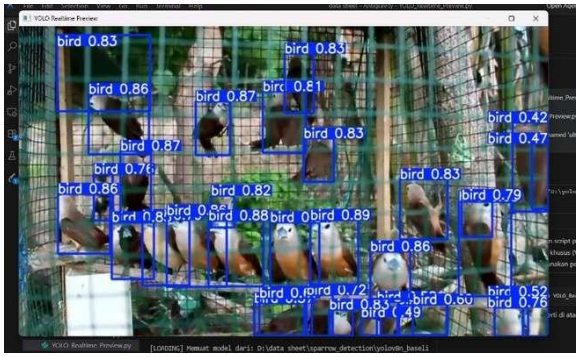
evaluasi mencakup persentase keberhasilan deteksi, jangkauan jarak deteksi maksimal *(maximum detection range)*, serta sinkronisasi respons aktuator ketika objek teridentifikasi, yakni pengaktifan modul laser dan sistem audio. Berdasarkan hasil pengujian awal menggunakan 300 *frame* sampel tersebut, sistem mampu melakukan pemrosesan visual dengan *throughput* rata-rata sebesar 20 *Frame Per Second* (FPS).

Tabel 6.
Pengujian Deteksi

No	Skenario Pengujian	Jumlah *Frame* Input	Total Waktu Pemrosesan (s)	Rata-rata *Throughput* (FPS)	Keterangan
1	Pengujian Video Sampel 1	300	15,0	20	Pemrosesan stabil pada NPU
2	Pengujian Video Sampel 2	300	14,8	20,2	Pemrosesan stabil pada NPU
3	Pengujian Video Sampel 3	300	15,2	19,7	Pemrosesan stabil pada NPU

Berdasarkan Tabel 6, pengujian kecepatan pemrosesan sistem (*throughput*) dilakukan menggunakan masukan berupa video sampel berdurasi 300 *frame*. Pengujian yang diulang sebanyak tiga kali iterasi tersebut menunjukkan hasil komputasi yang sangat konsisten. NPU pada Orange Pi 5 Pro mampu menyelesaikan proses inferensi dalam rentang waktu 14,8 hingga 15,2 detik untuk keseluruhan *frame*. Hal ini menghasilkan rata-rata kecepatan deteksi di kisaran 20 *Frame Per Second* (FPS). Stabilitas *throughput* pada angka 20 FPS ini mengindikasikan bahwa kinerja *System on Chip* (SoC) sangat memadai untuk menjalankan algoritma deteksi objek secara waktu nyata (real-time), tanpa mengalami kendala *bottleneck* atau penundaan pemrosesan yang signifikan.

Gambar 15 merepresentasikan evaluasi kualitatif dari kinerja algoritma deteksi objek YOLO saat dijalankan secara *real-time*. Pada tangkapan layar tersebut, sistem mendemonstrasikan kapabilitas yang sangat baik dalam mengenali populasi target (*dense object detection*). Sistem terbukti memiliki tingkat ketahanan yang tinggi terhadap gangguan visual (*visual noise*) dan oklusi parsial (penghalang visual) yang disebabkan oleh struktur jaring kawat. Algoritma tetap mampu memosisikan *bounding box* secara akurat pada masing-masing individu burung (*multiple instances*). Rentang nilai probabilitas prediksi (*confidence score*) yang dihasilkan cukup bervariasi, dengan skor tertinggi mencapai 0,89 (89%) pada objek yang terlihat utuh, hingga 0,42 (42%) pada objek yang berada di latar belakang atau terhalang signifikan. Hasil inferensi ini memvalidasi keandalan model kecerdasan buatan untuk mengklasifikasikan hama burung pada kondisi lingkungan yang kompleks.



Gambar 15. Hasil Deteksi Hama Burung

Berdasarkan Tabel 7, pengujian jarak jangkauan (*detection range*) dilakukan secara inkremental dari jarak 1 meter hingga 5 meter menggunakan objek target burung dalam kondisi statis. Hasil observasi menunjukkan bahwa sistem visi komputer mampu mengidentifikasi objek dengan tingkat akurasi dan *confidence score* yang memadai hingga pada radius 3 meter. Pada jarak optimal tersebut, modul NPU berhasil melakukan inferensi yang secara simultan memicu (*triggering*) aktuator laser dan audio untuk beroperasi.

Penurunan kinerja deteksi yang signifikan teramati pada pengujian di jarak 4 meter dan seterusnya. Pada radius ini, sistem gagal mengenali objek target secara visual (*false negative*). Hal ini secara teknis disebabkan oleh berkurangnya resolusi spasial objek pada sensor kamera, sehingga fitur-fitur visual (*visual features*) dari objek burung tidak lagi mencukupi untuk diproses oleh model kecerdasan buatan. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa jangkauan operasional efektif dari prototipe alat pengusir hama ini adalah sejauh 3 meter dari titik penempatan kamera ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7.
Pengujian Deteksi dan Sistem Pengusiran

No	Jarak Objek (m)	Objek Target	Status Deteksi	*Confidence Score* (%)	Respons Laser	Respons Audio	Ket
1	1	Burung	Terdeteksi	92	Aktif	Aktif	Sistem merespons dengan sangat cepat
2	2	Burung	Terdeteksi	88	Aktif	Aktif	Sistem merespons normal
3	3	Burung	Terdeteksi	75	Aktif	Aktif	Sistem merespons normal
4	4	Burung	Tidak Terdeteksi	-	Tidak Aktif	Tidak Aktif	Objek terlalu kecil/di luar jangkauan efektif
5	5	Burung	Tidak Terdeteksi	-	Tidak Aktif	Tidak Aktif	Objek terlalu kecil/di luar jangkauan efektif

D. Bentuk Fisik Alat

Pada Gambar 11 merupakan bentuk gambar alat yang sudah dibuat dengan menggunakan besi L dan tutup PVC Paralon ukuran 4 inc, dengan bentuk balok ukuran 20cm.



Gambar 16. Bentuk Fisik Alat

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem yang telah diuraikan, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Prototipe pengusir hama burung cerdas berbasis *Edge-AI* berhasil direalisasikan menggunakan model YOLOv8n pada Orange Pi 5 Pro. Akselerasi perangkat keras NPU memungkinkan kecepatan inferensi lokal yang stabil di 20 FPS tanpa memerlukan jaringan cloud.
2. Kinerja model deteksi menghasilkan nilai mAP@50 sebesar 0,70037 dan presisi 0,79492. Sistem teruji mampu mengidentifikasi objek secara optimal hingga jarak operasional 4 meter dan tangguh terhadap gangguan visual.
3. Sistem aktuasi beroperasi sesuai rancangan; deteksi objek secara otomatis memicu pergerakan motor servo (laser hijau) dan suara predator acak secara simultan untuk mencegah adaptasi (habituasi) pada kawanan burung.
4. Pada kondisi beban penuh, sistem mengonsumsi daya puncak sebesar 21,09 W (1.850 mA). Dengan menggunakan catu daya baterai *Lithium-ion* berkapasitas 7.200 mAh, instrumen dapat beroperasi secara kontinu selama 2,8 jam.

V. SARAN

Berdasarkan simpulan serta keterbatasan yang diidentifikasi selama proses perancangan dan pengujian sistem, riset selanjutnya direkomendasikan untuk melakukan beberapa langkah penyempurnaan berikut.

1. Untuk mengatasi keterbatasan waktu operasional baterai (2,8 jam), disarankan mengintegrasikan panel surya sebagai energi sekunder. Efisiensi daya juga dapat dioptimalkan melalui implementasi fitur *deep sleep* berbasis sensor gerak berdaya rendah saat tidak ada target di area pantau.
2. Guna meningkatkan jangkauan deteksi optimal yang saat ini terbatas pada radius 4 meter, penelitian selanjutnya dapat mengaplikasikan kamera dengan fitur perbesaran optik (*optical zoom*) atau memodifikasi arsitektur *deep learning* khusus untuk deteksi objek skala kecil (*small object detection*).
3. Untuk mengatasi masalah ketidakseimbangan kelas (*class imbalance*) pada dataset, khususnya pada kelas kawanan burung (*flock*), diperlukan penambahan variasi sampel citra target dan penerapan teknik augmentasi data lanjutan guna meningkatkan generalisasi model di lingkungan dinamis.
4. Desain mekanis purwarupa perlu ditingkatkan menggunakan selungkup (*enclosure*) berstandar *Ingress Protection* (*IP-Rating*) yang memadai. Hal ini esensial untuk melindungi perangkat keras dari paparan cuaca, suhu, dan kelembapan ekstrem saat diimplementasikan jangka panjang di area pertanian terbuka.

DAFTAR PUSTAKA

[1] J. L. Mela and C. G. Sánchez, “Yolo-based power-efficient object detection on edge devices for USVs,” *J. Real. Time. Image Process.*, vol. 22, no. 3, Jun. 2025, doi: 10.1007/s11554-025-01682-2.

[2] W. I. Zen and I. R. Jasril, “Pengembangan Sistem Penyiangan Gulma Padi Berbasis IoT Menggunakan ESP32 untuk Meningkatkan Produktivitas Pertanian,” vol. 2, no. 2, 2024, doi: 10.24036/elektif.v2i2.51.

[3] R. Yauri, E. Campos, R. Yalico, and V. Gamero, “Development of an Electronic Bird Repellent System using Sound Emission,” *WSEAS Transactions on Systems and Control*, vol. 18, pp. 136–143, 2023, doi: 10.37394/23203.2023.18.14.

[4] P. Dhilleswararao, S. Boppu, M. S. Manikandan, and L. R. Cenkeramaddi, “Efficient Hardware Architectures for Accelerating Deep Neural Networks: Survey,” 2022, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.* doi: 10.1109/ACCESS.2022.3229767.

[5] D. K. Alqahtani, A. Cheema, and A. N. Toosi, “Benchmarking Deep Learning Models for Object Detection on Edge Computing Devices,” Sep. 2024, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2409.16808

[6] S. J. Poornashree, P. V. Joshi, K. M. Sudharshan, and T. M. George, “A Hybrid AI Pipeline for Real-Time Aerial Video Analytics on Resource-Limited Edge Devices with Performance Profiling,” *Engineering, Technology and Applied Science Research*, vol. 15, no. 6, pp. 29574–29579, Dec. 2025, doi: 10.48084/etasr.14396.

[7] J. L. Mela and C. G. Sánchez, “Correction: Yolo-based power-efficient object detection on edge devices for USVs (Journal of Real-Time Image Processing, (2025), 22, 3, (108), 10.1007/s11554-025-01682-2),” Dec. 01, 2025, *Springer Nature*. doi: 10.1007/s11554-025-01776-x.

[8] E. Manor and S. Greenberg, “Custom Hardware Inference Accelerator for TensorFlow Lite for Microcontrollers,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 73484–73493, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3189776.

[9] A. Garcia-Perez, R. Miñón, A. I. Torre-Bastida, and E. Zulueta-Guerrero, “Analysing Edge Computing Devices for the Deployment of Embedded AI,” *Sensors*, vol. 23, no. 23, Dec. 2023, doi: 10.3390/s23239495.

[10] C. Khelfa, H. Drias, I. Khennak, and K. Elleithy, “GPU-Accelerated Slime Mould Algorithm for Urgent Transportation in Disaster Response: A COVID-19 Application,” 2025.

[11] Ian. Sommerville, *Software engineering*. Pearson, 2016.

[12] sparrow, “sparrow Computer vision Dataset.” Accessed: Feb. 23, 2026. [Online]. Available: https://universe.roboflow.com/sparrow-0jml6/sparrow-qnulu

[13] Sparrow Bird, “sparrow Bird Computer Vision Dataset .” Accessed: Feb. 23, 2026. [Online]. Available: https://universe.roboflow.com/sparrow-bird/sparrow-bird-g6dxj
[14] universe, “Sparrow Object Detection Model by Project.” Accessed: Feb. 23, 2026. [Online]. Available: https://universe.roboflow.com/project-57vuf/sparrow-dgtbl
[15] Ultralytics, “Explore Ultralytics YOLOv8n - Ultralytics YOLO Docs.” Accessed: Feb. 25, 2026. [Online]. Available: https://docs.ultralytics.com/models/YOLOv8n/
[16] H. Rezatofighi, N. Tsoi, J. Gwak, A. Sadeghian, I. Reid, and S. Savarese, “Generalized Intersection over Union: A Metric and A Loss for Bounding Box Regression,” Apr. 2019, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/1902.09630
[17] X. Tu *et al.*, “Unveiling Energy Efficiency in Deep Learning: Measurement, Prediction, and Scoring Across Edge Devices,” in *Proceedings - 2023 IEEE/ACM Symposium on Edge Computing, SEC 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023, pp. 80–93. doi: 10.1145/3583740.3628442.
[18] N. Rai *et al.*, “Applications of deep learning in precision weed management: A review,” *Comput. Electron. Agric.*, vol. 206, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.compag.2023.107698.
[19] D. Andrea, “Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs,” 2010.
[20] Orange Pi Ltc, “Orange Pi 5 Pro.” Accessed: Feb. 23, 2026. [Online]. Available: http://www.orangepi.org/html/hardWare/computerAndMicrocontrollers/details/Orange-Pi-5-Pro.html
[21] Lenovo, “Lenovo LOQ 15IAX9.” Accessed: Feb. 23, 2026. [Online]. Available: https://www.lenovo.com/id/id/p/laptops/loq-laptops/lenovo-loq-15iax9/len101q0006?orgRef=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F&srsltid=AfmBOop7e-mwecEMrNhfbqxQGq7za9pISjG1ddnffTuLQ44348ZG_-tD
[22] “MG995 Datasheet(PDF) - List of Unclassifed Manufacturers.” Accessed: Feb. 23, 2026. [Online]. Available: https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1132435/ETC2/MG995.html
[23] “balenaEtcher - Flash OS images to SD cards & USB drives.” Accessed: Feb. 26, 2026. [Online]. Available: https://etcher.balena.io/
[24] Armbian, “Orange Pi - Armbian,” Armbian. Accessed: Dec. 22, 2025. [Online]. Available: https://www.armbian.com/orange-pi-3/
[25] A. Ramaditiya, S. Rahmatia, A. Munawar, and O. N. Samijayani, “Implementation chatbot whatsapp using python programming for broadcast and reply message automatically,” in *Proceeding - 2021 International Symposium on Electronics and Smart Devices: Intelligent Systems for Present and Future Challenges, ISESD 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jun. 2021. doi: 10.1109/ISESD53023.2021.9501523.
[26] Python, “Python.org Documentation.” Accessed: Feb. 26, 2026. [Online]. Available: https://www.python.org/doc/
[27] “Roboflow: Computer vision tools for developers and enterprises.” Accessed: Feb. 26, 2026. [Online]. Available: https://roboflow.com/
[28] M. Qian *et al.*, “Real time wire rope detection method based on Rockchip RK3588,” *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-16043-z.
[29] Q. Chen *et al.*, “An experimental study of acoustic bird repellents for reducing bird encroachment in pear orchards,” *Front. Plant Sci.*, vol. 15, 2024, doi: 10.3389/fpls.2024.1365275.