Pengendalian Dan Pemantauan Hama Tanaman Padi

1st Dhanisa Zahratul Alya
Teknik Komputer
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
dhanisaz@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Roswan Latuconsina
Teknik Komputer
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
roswan@telkomuniversity.ac.id

3rd Hasbi Ash Shiddieqy
Teknik Komputer
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia
hasbisiddiq@telkomuniversity.ac.id

***Abstrak* — Serangan hama tikus dan burung di wilayah Bojongsari menyebabkan penurunan hasil panen padi hingga 30% dari target produksi. Sebagai respons terhadap masalah ini, penelitian ini mengembangkan sistem pengendalian dan pemantauan hama berbasis Internet of Things (IoT) yang ramah lingkungan sebagai solusi alternatif terhadap penggunaan pestisida kimia konvensional. Sistem yang dirancang memadukan teknologi audio pengusir ultrasonik dan sprayer cairan otomatis. Pengawasan sawah dilakukan secara real-time menggunakan mikrokontroler Orange Pi Zero 3 yang terhubung dengan webcam USB. Deteksi burung memanfaatkan model kecerdasan buatan dengan algoritma YOLOv5, sementara pengusiran tikus mengandalkan gelombang ultrasonik yang dipancarkan terus-menerus. Ketika kamera mendeteksi keberadaan burung, sistem secara otomatis memutar suara pengusir dalam waktu kurang dari satu detik. Sprayer dioperasikan secara terjadwal melalui antarmuka web yang dikembangkan dengan Python Flask. Pengujian menunjukkan sistem paling stabil dalam mendeteksi burung pada jarak 60 cm dengan rata-rata tingkat akurasi 0,709 dan deteksi maksimal hingga 130 cm. Frekuensi ultrasonik 18.000 Hz terbukti efektif memicu respons gelisah pada tikus. Uji coba sprayer memperlihatkan alat bekerja tepat waktu dengan kecepatan aliran 52,49 cm/detik dan jangkauan semprot 1 meter. Secara keseluruhan, sistem ini mampu beroperasi secara mandiri di lapangan, meski cakupan perlindungannya saat ini masih terbatas pada seperempat luas lahan pertanian.**

***Kata kunci*— hama padi; *internet of things*; *computer vision*; YOLOv5; gelombang ultrasonik; *sprayer* otomatis**

I. PENDAHULUAN

Hama padi merupakan salah satu masalah utama dalam pertanian Indonesia. Di wilayah Bojongsari, ancaman hama seperti tikus padi (Rattus argentiventer) dan burung pipit selalu mengganggu panen, terutama pada tahap pengisian biji dan pematangan. Menurut perkiraan Serangan Hama Tanaman (OPT) MT 2024, luas serangan tikus di Indonesia diperkirakan mencapai 53.971 hektar, sedangkan total serangan semua hama padi mencapai 194.713 hektar. Situasi ini mengakibatkan kerugian ekonomi yang cukup besar. Serangan hama dengan tingkat 40% dapat menyebabkan kehilangan hasil sekitar 4 ton per hektar.

Metode pengendalian tradisional yang menggunakan pestisida kimia telah terbukti memiliki dampak merugikan terhadap ekosistem padi, kesehatan petani, serta kualitas tanah dan air [5][6]. Teknik tradisional seperti gropyokan dan perangkap manual pun tampaknya tidak mampu mengatasi serangan hama berskala besar. Oleh karena itu, diperlukan solusi yang lebih modern, efisien, dan ramah lingkungan.

Penelitian ini menjelaskan desain dan implementasi sistem pengendalian hama berbasis IoT, yang menggabungkan dua mekanisme utama: (1) penyemprot otomatis terjadwal untuk penyemprotan cairan dan (2) sistem pengusir hama berbasis gelombang ultrasonik dan suara pengusir dengan deteksi Computer Vision menggunakan algoritma YOLOv5.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi kinerja teknis kedua subsistem tersebut dalam konteks sistem pengendalian hama padi terintegrasi. Kontribusi utama penelitian ini adalah tersedianya data kinerja kuantitatif mengenai efektivitas frekuensi audio terhadap perilaku tikus, karakteristik semprotan, ketepatan waktu aktivasi, serta kemampuan operasional mandiri dengan energi terbarukan.

II. KAJIAN TEORI

A. Prinsip Kerja Pengusir Audio Berbasis Frekuensi Tinggi

Kemampuan tikus dalam mendeteksi suara ditandai dengan frekuensi yang jauh lebih tinggi daripada manusia. Sementara manusia hanya dapat mendeteksi frekuensi antara 20 Hz dan 20.000 Hz, tikus dapat mendeteksi frekuensi antara 1 kHz dan 70 kHz dengan sensitivitas puncak antara 15 dan 50 kHz [12]. Karakteristik ini dimanfaatkan dalam teknologi perekaman audio, di mana gelombang suara pada rentang frekuensi yang mengganggu hama digunakan sebagai rangsangan aversif yang mendorong perilaku menghindar tanpa menimbulkan tekanan fisik atau dampak ekologis negatif.

Mekanisme gangguan audio bekerja melalui jalur saraf yang menghubungkan sistem pendengaran ke titik stres di

otak tikus. Paparan berkepanjangan terhadap frekuensi yang mengganggu ini memicu sekresi hormon kortisol (stres) yang menyebabkan perilaku gelisah, penurunan nafsu makan, dan pada akhirnya membuat tikus meninggalkan area paparan [12]. Efektivitas pengusir ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu: (a) ketepatan frekuensi terhadap zona sensitif pendengaran target, (b) intensitas suara yang cukup untuk menjangkau area sawah, (c) kontinuitas paparan untuk mencegah adaptasi, dan (d) variasi pola suara secara berkala.

Pada sistem yang dirancang, speaker aktif dipilih sebagai transduser akustik karena mampu menghasilkan rentang frekuensi yang luas dengan kualitas reproduksi suara yang lebih tinggi dibandingkan dengan buzzer piezoelektrik. Speaker tersebut terhubung ke unit pemrosesan, yaitu Orange Pi Zero 3, yang berjalan pada sistem operasi Linux berbasis ARM. Pemutaran audio dilakukan dengan sistem ALSA (Advanced Linux Sound Architecture) melalui perintah aplay di terminal, yang memberikan kontrol presisi atas reproduksi file audio WAV.

B. Prinsip Kerja Sprayer Otomatis Berbasis IoT

Sistem penyemprotan cairan otomatis dalam konteks pengendalian hama dikembangkan untuk menggantikan praktik penyemprotan manual yang tidak konsisten dan memerlukan keterlibatan langsung tenaga kerja. Prinsip kerja sistem penyemprot berbasis IoT ini didasarkan pada mekanisme kontrol elektromekanis yang menggunakan relay sebagai sakelar untuk mengaktifkan atau menonaktifkan pompa cairan berdasarkan logika kontrol yang dijalankan oleh mikrokontroler.

Pompa yang digunakan adalah pompa 12 V DC tipe STD (Standard Transfer Pump) dengan spesifikasi laju aliran 4,0 L/menit dan tekanan maksimum 100 PSI. Pompa jenis ini dipilih karena beroperasi pada tegangan yang kompatibel dengan sistem tenaga surya yang menghasilkan tegangan bus 12 V, sehingga dapat dioperasikan secara langsung tanpa konverter tegangan tambahan. Arus operasi pompa berada pada kisaran 2,0–3,5 A, sehingga daya aktif yang dikonsumsi berada pada kisaran 24 hingga 42 W.

Mekanisme penjadwalan diimplementasikan melalui program Python yang membaca parameter waktu dari berkas konfigurasi JSON dan secara berkala membandingkannya dengan cap waktu sistem operasi. Metode ini lebih sederhana dan lebih akurat daripada menggunakan Real Time Clock (RTC) eksternal karena memanfaatkan jam internal Orange Pi Zero 3 yang secara otomatis disinkronkan melalui protokol Network Time Protocol (NTP) saat sistem terhubung ke jaringan.

III. METODE

A. Arsitektur Sistem Terintegrasi

Kedua subsistem tersebut diintegrasikan ke dalam satu platform komputasi berbasis Orange Pi Zero 3. Mikrokontroler menjalankan tiga proses utama secara paralel menggunakan mekanisme multithreading: (1) utas loop audio yang terus-menerus memutar file rat.wav dan menangani transisi mode audio, (2) utas penjadwalan penyemprot yang memantau waktu sistem dan mengaktifkan relai pada waktu yang telah dikonfigurasi, dan (3) thread server web Flask yang melayani permintaan antarmuka pengguna berbasis web.

Sistem ini dirancang untuk menggunakan panel surya 60 W/12 V sebagai sumber energi utama, dikombinasikan dengan baterai SLA 12 V 8 Ah sebagai cadangan energi. Pengontrol Pengisian Daya Surya PWM mengatur proses pengisian daya dan mencegah pengisian berlebih atau pengosongan berlebih. Modulator step-down LM2596 menurunkan tegangan dari 12 V menjadi 5 V untuk mentransfer data ke Orange Pi Zero 3 dan perangkat USB. Setiap komponen elektronik ditempatkan dalam wadah logam aluminium dengan perlindungan IP65 terhadap debu dan polutan udara di lingkungan sawah.

TABEL 1
Spesifikasi Komponen Kedua Subsistem

Komponen	Spesifikasi	Fungsi dalam Sistem
Pompa DC STD	12 V, 4,0 L/min, 100 PSI	Mengalirkan cairan pestisida organik
Modul Relay	1 Kanal, Trigger 5 V	Sakelar elektromekanis pengendali pompa
Reservoir Cairan	Jerigen plastik 20 L	Penyimpanan larutan semprot
Selang Air	Diameter dalam 8 mm, 20 m	Distribusi cairan ke area target
Nosel Springkler	100 PSI tekanan kerja	Pendistribusian cairan secara presisi
Speaker Aktif	Rentang frekuensi 1 Hz - 40 kHz	Pemancar gelombang suara pengusir
Orange Pi Zero 3	1,5 GHz Quad-Core ARM, 1 GB RAM	Unit kendali dan pemroses utama
Panel Surya	60 W, 12 V nominal, 5 A	Sumber energi primer sistem
Aki Kering SLA	12 V, 8 Ah	Cadangan energi malam hari

B. Perancangan Sistem

Sistem terdiri dari tiga subsistem utama: (1) Subsistem Deteksi dan Audio, (2) Subsistem Sprayer, dan (3) Subsistem Web Control. Mikrokontroler utama yang digunakan adalah Orange Pi Zero 3 dengan sistem operasi Linux berbasis Debian yang menjalankan skrip Python untuk masing-masing fungsi. Seluruh sistem didukung oleh panel surya 60W/12V/5000mA yang mengisi baterai aki kering melalui modul PWM.

Subsistem audio dirancang dengan dua mode operasi: (a) Loop Background — pemutaran file rat.wav secara terus-menerus sebagai perlindungan pasif terhadap tikus menggunakan frekuensi 18.000–22.000 Hz; dan (b) Active Repellent — pemutaran file pengusir_burung.wav (suara kejut/predator) ketika YOLOv5 mendeteksi burung. Peralihan dikendalikan oleh fungsi stop_current_audio() dan play_bird_audio().

Subsistem sprayer menggunakan pompa DC 12V dengan debit aliran 4 liter/menit dan luas penampang pipa 1,27 cm². Kecepatan aliran (Vc) dihitung menggunakan rumus:

$$Vc = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

$$Vc = \frac{66{,}67\ cm^3/detik}{1{,}27\ cm^2} \approx 52{,}49\ cm/detik$$

Relay diaktifkan oleh pin GPIO Orange Pi Zero 3 melalui skrip relay_schedule.py dengan konfigurasi waktu disimpan dalam file relay_config.json. Antarmuka web dikembangkan menggunakan Python Flask, menyediakan fitur kontrol manual, penjadwalan sprayer, pemantauan status real-time, dan ekspor riwayat aktivitas.

C. Metodologi Pengujian

Pengujian sistem dilakukan dalam dua tahap: tahap pengujian terkontrol di laboratorium dan tahap pengujian lapangan. Selama tahap laboratorium, fokusnya adalah memvalidasi kinerja sistem audio terkait respons tikus dan karakteristik fisik alat penyemprot. Selama tahap lapangan, kedua sistem dievaluasi berdasarkan kondisi operasional, yaitu selama periode 24 jam, untuk menilai kinerja sistem terkait variasi cuaca (cerah dan hujan) serta kemampuan operasionalnya dalam memanfaatkan energi surya.

TABEL 2
Skenario Pengujian Subsistem

Subsistem	Parameter Pengujian	Metode Pengukuran
Audio Pengusir Tikus	Respons perilaku tikus pada 18 kHz dan 22 kHz selama 0, 60, 120 menit	Observasi visual dengan skala ordinal Level 1-4
Audio Pengusir Tikus	Waktu peralihan mode audio (tikus ke burung dan sebaliknya)	Pengukuran waktu dengan stopwatch digital
Sprayer Otomatis	Ketepatan waktu aktivasi relay sesuai konfigurasi JSON	Verifikasi log timestamp sistem dan observasi fisik
Sprayer Otomatis	Kecepatan aliran cairan dari ujung selang	Pengukuran jarak tempuh aliran per satuan waktu
Sprayer Otomatis	Jangkauan semprotan nosel springkler	Pengukuran menggunakan pita ukur
Sistem Daya	Tegangan baterai pada mode stand-by dan cyclic	Pengukuran dengan multimeter digital

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengujian Subsistem Audio Pengusir Tikus

Pengujian respons perilaku tikus dilakukan dengan menggunakan empat ekor tikus laboratorium yang ditempatkan dalam kandang pengamatan berukuran 60 x 40 x 30 cm. Sistem tersebut secara bergantian memutar suara dengan dua frekuensi berbeda selama sesi-sesi yang berbeda: 18.000 Hz dan 22.000 Hz. Dengan menggunakan skala tingkatan perilaku yang telah ditetapkan sebelumnya, respons tikus dicatat setiap satu jam selama dua jam pengamatan.

TABEL 3
Hasil Pengamatan Respons Perilaku Tikus terhadap Frekuensi Audio

Waktu Uji	Tikus A (18 kHz)	Tikus B (18 kHz)	Tikus C (22 kHz)	Tikus D (22 kHz)
0 Menit (Awal)	2 (Sedikit terganggu)	1 (Tidak berubah)	1 (Tidak berubah)	1 (Tidak berubah)
60 Menit	3 (Mulai gelisah)	2 (Sedikit terganggu)	2 (Sedikit terganggu)	1 (Tidak berubah)
120 Menit	4 (Gelisah aktif)	3 (Mulai gelisah)	1 (Tidak berubah)	2 (Sedikit terganggu)

Keterangan skala level: 1 = Tidak ada perubahan perilaku; 2 = Sedikit terganggu namun masih beraktivitas normal; 3 = Mulai tampak gelisah dan mengurangi aktivitas makan; 4 = Gelisah aktif, sering bergerak dan mencoba menghindari sumber suara.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa, dibandingkan dengan frekuensi 22.000 Hz (Tikus C, D), frekuensi 18.000 Hz memiliki efek yang lebih konsisten dan progresif terhadap perilaku tikus (Tikus A, B). Pada pengamatan pertama (0 menit), Tikus A telah merespons hingga Level 2, yang mengindikasikan adanya gangguan akustik yang terdeteksi, sedangkan ketiga tikus dalam kelompok 22.000 Hz masih berada di Level 1. Progresivitas respons Tikus A yang mencapai Level 4 pada jam ke-2 menegaskan bahwa tingkat stres akustik subjek secara bertahap meningkat seiring dengan frekuensi paparan pada 18.000 Hz.

Variabilitas responsivitas yang lebih besar pada kelompok 22.000 Hz, di mana Tikus C kembali ke Level 1 pada jam ke-2 sementara Tikus B meningkat ke Level 3, menunjukkan adanya faktor-faktor individu seperti ketebalan rambut, usia, dan kondisi pendengaran yang memengaruhi sensitivitas terhadap frekuensi yang berbeda. Berdasarkan data deviasi standar yang diperoleh, kelompok 18.000 Hz menunjukkan deviasi standar yang lebih tinggi (1,5) dibandingkan dengan kelompok 22.000 Hz (0,18), yang mengindikasikan peningkatan respons yang lebih signifikan dari waktu ke waktu.

B. Hasil Pengujian Peralihan Mode Audio

Tujuan pengujian mode audio adalah untuk memvalidasi keakuratan dan konsistensi peralihan mode dalam kondisi pengoperasian di dunia nyata. Skenario pengujian mencakup simulasi kemunculan burung di depan kamera dan pencatatan waktu yang dibutuhkan sistem untuk menghentikan audio pengusir tikus dan memulai audio pengusir burung, serta sebaliknya.

TABEL 4
Hasil Pengujian Peralihan Mode Audio

Kondisi Pemicu	Mode Audio Aktif	Waktu Respons	Status
Program dijalankan (inisialisasi)	rat.wav (loop kontinu)	Instan saat startup	Berhasil
Burung terdeteksi (confidence > 0,45)	pengusir_burung.wav	< 1 detik	Berhasil
Burung tidak terdeteksi > 10 detik	Kembali ke rat.wav	< 1 detik	Berhasil
Shutdown sistem (CTRL+C)	Semua audio dihentikan	< 0,5 detik	Berhasil

Semua skenario pemrosesan audio diselesaikan dalam waktu kurang dari satu hari. Keberhasilan ini dapat tercapai berkat penggunaan arsitektur non-blocking yang memanfaatkan subproses melalui fungsi Popen, sehingga proses pemutaran dapat dimulai dan diselesaikan tanpa mengganggu utas utama. Penggunaan FSM memastikan tidak terjadi situasi persaingan antara proses-proses audio, sehingga transisi dapat berlangsung lancar tanpa gangguan.

C. Hasil Pengujian Subsistem Sprayer

Kinerja subsistem penyemprot ditentukan oleh dua faktor: kinerja fungsional (jadwal aktivitas) dan kinerja fisik (aliran dan jangkauan). Pengujian fungsional dilakukan dengan mengatur waktu aktivasi pada pukul 07:30:00 setiap 10 detik, serta mengamati dan mencatat waktu aktual saat relai menyala dan mati, beserta log sistem.

TABEL 5
Hasil Pengujian Kinerja Subsistem Sprayer

Parameter Pengujian	Hasil Terukur	Keterangan
Waktu aktivasi relay	Pukul 07:30:00 (tepat sasaran)	Sesuai konfigurasi JSON waktu_menyala
Durasi penyemprotan	10 detik (relay aktif 10 s)	Sesuai konfigurasi durasi_detik = 10
Kecepatan aliran cairan	52,49 cm/detik	Diukur dari ujung selang pada tekanan penuh
Jangkauan semprotan horizontal	1 meter	Pada tekanan operasional pompa 100 PSI
Laju alir volumetrik pompa	4,0 L/menit	Sesuai spesifikasi teknis pompa DC
Aktivasi ganda per hari	Tidak terjadi (0 kejadian)	Flag relay_sudah_aktif_hari_ini berfungsi
Konsumsi daya pompa saat aktif	24 - 42 W (2,0 - 3,5 A × 12 V)	

Data pengujian fungsional menunjukkan ketepatan aktivasi relay yang sangat baik, dengan relay menyala tepat pada pukul 07:30:00 sesuai konfigurasi yang ditetapkan. Durasi percobaan adalah 10 hari, yang dikonfirmasi melalui verifikasi cap waktu log yang secara akurat mencatat waktu ON dan OFF relai. Mekanisme aktivasi satu kali sehari telah berhasil mencegah penggunaan pestisida secara berlebihan pada satu hari tertentu dalam kalender, penting untuk mencegah keracunan pestisida pada tanaman padi.

Kecepatan aliran terukur rata-rata sebesar 52,49 cm/detik di ujung selang menghasilkan jarak horizontal seluas 1 meter saat sistem beroperasi pada kapasitas penuh. Laju aliran debit air sebesar 4,0 L/menit ditentukan oleh teknologi pompa DC khusus yang digunakan. Untuk aplikasi lapangan berskala lebih besar, diperlukan desain distribusi jangka panjang dan nosel yang tepat guna memastikan cakupan yang memadai.

D. Hasil Pengujian Ketahanan Daya

Sistem tersebut diuji dalam kondisi operasional selama 24 jam dengan menggunakan kombinasi panel surya dan baterai aki kering. Tegangan diukur menggunakan multimeter digital pada beberapa titik kritis.

TABEL 6
Hasil Pengujian Sistem Daya Mandiri

Parameter	Hasil Pengukuran	Keterangan
Tegangan baterai mode stand-by	13,5 - 13,8 V	Sesuai spesifikasi aki kering SLA
Tegangan baterai mode cyclic (pengisian)	14,5 - 14,9 V	Sesuai spesifikasi PWM controller
Output panel surya (paparan penuh)	12 V / 5 A (60 W)	Sesuai spesifikasi nominal panel
Operasi 24 jam dengan solar + aki	Berhasil tanpa gangguan daya	Panel siang + aki malam
Suhu casing pada kondisi cerah siang	Maks. 31°C (panel box)	Di bawah batas operasional 45°C
Suhu saat hujan	26°C (panel box)	Tidak ada error, sistem stabil

Semua parameter telah disesuaikan agar sesuai dengan spesifikasi. Tegangan aki kering pada kedua mode (stand-by dan cycle) berada dalam rentang yang sesuai dengan spesifikasi, yang menegaskan bahwa Pengatur Pengisian Tenaga Surya PWM berfungsi dengan baik dalam proses pengisian. Sistem ini telah beroperasi selama 24 jam tanpa pemadaman listrik, dengan panel surya memasok energi pada siang hari sambil mengisi aki, dan aki menyediakan daya yang cukup untuk operasional sepanjang hari. Suhu casing yang dipantau dalam berbagai kondisi cuaca tidak pernah melebihi batas maksimum operasional 45°C, yang menunjukkan bahwa desain casing termal dari logam efektif dalam menyerap panas dari lingkungan sekitar. Sistem ini

dirancang untuk beroperasi dalam kondisi dingin dan basah. Pada hari musim panas yang terik, suhu kamera mencapai 38°C sedangkan kotak panel mencapai 31°C, keduanya tanpa terjadi kesalahan. Perbedaan suhu menjadi lebih terlihat pada cuaca panas. Tidak terjadi kegagalan komponen selama seluruh sesi.

E. Pengujian Validasi Pengguna

Validasi pengguna dilakukan melalui demonstrasi langsung kepada dua petani. Pengguna pertama (Agus) mengkonfirmasi efektivitas alat mengusir tikus dan burung dalam jarak 2 meter serta sprayer dalam jarak 3 meter belum cukup efektif. Pengguna kedua (Dede) menyatakan alat sepadan namun perlu diperbanyak unitnya untuk sawah yang luas, dengan estimasi harga Rp 1.500.000 per unit.

F. Pembahasan Komparatif dan Relevansi terhadap Kebutuhan Lapangan

Dari perspektif penerapan di lapangan persawahan, kombinasi kedua subsistem memberikan strategi perlindungan berlapis yang bersifat saling melengkapi. Subsistem pengusir tikus berfungsi sebagai mekanisme perlindungan preventif yang beroperasi secara berkala untuk mengurangi kecenderungan tikus mendekati area sawah, sedangkan subsistem penyemprot memberikan perlindungan kuratif melalui penyemprotan biopestisida yang terukur dan terjadwal. Pendekatan berlapis ganda ini didasarkan pada prinsip IPM, yang menggabungkan metode non-kimia dan kimia secara proporsional untuk memaksimalkan efisiensi dan mengurangi kerusakan lingkungan.

Dibandingkan dengan metode konvensional, sistem yang dikembangkan ini menawarkan beberapa keunggulan kompetitif yang signifikan. Pertama, dalam hal efisiensi tenaga kerja, sistem ini beroperasi secara otomatis tanpa memerlukan intervensi manusia secara terus-menerus, yang merupakan manfaat signifikan mengingat penurunan produktivitas tenaga kerja di banyak daerah pedesaan. Kedua, dalam hal pembangkitan energi, penggunaan panel surya sebagai sumber energi utama mengurangi ketergantungan pada jaringan PLN yang sering kali tidak tersedia atau tidak dapat dijangkau di daerah terpencil.

Keterbatasan yang perlu diatasi dalam pengembangan selanjutnya meliputi cakupan area proteksi yang saat ini masih terbatas (diperkirakan mencakup seperempat luas lahan pertanian), serta potensi tikus yang terbiasa dengan frekuensi audio yang konsisten. Pengembangan algoritma variasi frekuensi adaptif dan kebutuhan akan jaringan distribusi penyemprot dengan konfigurasi yang lebih tepat akan menjadi fokus pada iterasi sistem selanjutnya.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan, menerapkan, dan mengevaluasi efisiensi operasional sistem penyemprot otomatis serta sistem pengusir hama tikus berbasis suara dalam sistem pengendalian hama tanaman berbasis Internet of Things (IoT). Berdasarkan serangkaian pengujian yang telah diselesaikan di laboratorium dan lahan sawah, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

Dibandingkan dengan frekuensi 22.000 Hz, sistem pengusir tikus berbasis suara dengan frekuensi 18.000 Hz dapat menimbulkan kegelisahan yang semakin meningkat. Tikus subjek A mencapai Level 4 (gelisah aktif) setelah terpapar selama 2 jam, yang menunjukkan efektivitas gangguan akustik yang optimal, sedangkan kelompok 22.000 Hz menunjukkan respons individu yang lebih bervariasi dan kurang konsisten.

Dalam setiap skenario pengujian, mekanisme peralihan mode audio (dari pengusir tikus ke pengusir burung dan sebaliknya) berhasil dilakukan dalam waktu kurang dari satu detik, yang menunjukkan keefektifan arsitektur non-blocking berbasis pola FSM subproses dan arsitektur terbuka yang diterapkan.

Sistem penyemprot otomatis berhasil beroperasi dengan waktu aktivasi sesuai dengan JSON, menghasilkan jangkauan semprotan sepanjang satu meter dengan kecepatan aliran 52,49 cm/detik. Mekanisme pengaman yang membatasi aktivasi hanya sekali sehari berhasil mencegah terjadinya penyemprotan ganda yang tidak diinginkan.

Dua subsistem berhasil beroperasi secara mandiri menggunakan panel surya hemat energi 60 W yang dipadukan dengan aki kering 12 V 8 Ah, tanpa mengganggu jaringan PLN, selama 24 jam pengujian lapangan dengan stabilitas daya dan termal.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk menerapkan variasi frekuensi audio secara adaptif guna memutus kebiasaan tikus terhadap frekuensi tetap, serta mengembangkan sistem penyemprotan yang dapat menjangkau area lahan yang lebih luas melalui konfigurasi jalur selang dan nosel yang dioptimalkan.

REFERENSI

[1] Widarti, A. et al. 2024. Prakiraan Serangan OPT Utama Padi, Jagung, Kedelai, dan Akabi Di Indonesia MT. 2024. Kementerian Pertanian RI.

[2] Siahaan, P. E. dan Muklasin. Kehilangan Hasil Akibat Serangan Organisme Pengganggu Tanaman. BBPPTP Medan.

[3] Wati, D. H. 2022. Penerapan Pengendalian Hama Terpadu (PHT) dalam Meningkatkan Pendapatan Petani Padi. Jurnal Pertanian Cemara. 19:2.

[4] Septiadi, D. 2022. Prototipe Alat Pengusir Hama Burung Pemakan Padi Menggunakan Gelombang Ultrasonik Berbasis Internet of Things.

[5] De-Assis, M. P. et al. 2021. Health problems in agricultural workers occupationally exposed to pesticides. Associacao Nacional de Medicina do Trabalho.

[6] Pathak, V. M. et al. 2022. Current status of pesticide effects on environment, human health. Frontiers in Microbiology.

[7] Bakar, A. et al. 2023. IOT Based Smart Agriculture Monitoring System. doi: 10.13140/RG.2.2.14040.47367.

[8] Shahab, H. et al. 2024. IoT-based agriculture management techniques for sustainable farming. Computers and Electronics in Agriculture. Elsevier.

[9] Dhanaraju, M. et al. 2022. Smart Farming: Internet of Things (IoT)-Based Sustainable Agriculture. Agriculture. MDPI.

[10] Vikri, M. J. dan Rokhmah, R. 2022. Dynamic Ultrasonic Wave Generators as Alternative Technology to Field Rat Repellents. Ultima Computing. 14:2.

[11] Oka, I. K. D. A. et al. 2022. Model IoT Berbasis Fuzzy Tsukamoto untuk Penyemprotan Pestisida Otomatis. Progresif. 18:2.

[12] Alhan, M. et al. 2021. Pengusir Hama Tikus Sawah Berbasis Gelombang Ultrasonik. 20:1.

[13] Sulfiani R, N. dan Firmawati, N. 2019. Rancang Bangun Sistem Penyemprot Tanaman Otomatis Berdasarkan Waktu dengan RTC. Jurnal Ilmu Fisika Universitas Andalas. 11:2. pp. 62-71.