

Internet of Things (IoT)

Prototipe Sistem Monitoring dan Kendali Jarak Jauh Peralatan Bird Deterrent Berbasis LoRa

Diarni Oshinta Nurullah*, Eriyandi, Fawwaz Yusa Gifari

Program Studi D-IV Teknik Navigasi Udara, Politeknik Penerbangan Indonesia Curug, Tangerang, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Diterima Redaksi: 17 Juli 2026
Revisi Akhir: 18 Agustus 2026
Diterbitkan Online: 29 September 2026

KATA KUNCI

Bird Deterrent
LoRa
ESP32
Web Dashboard
Monitoring

KORESPONDENSI (*)

Phone: +62 888-0891-5626
E-mail: diarnioshinta91@gmail.com

A B S T R A K

Pengendalian burung di area airside bandar udara diperlukan untuk mengurangi potensi bird strike, tetapi peralatan bird deterrent yang digunakan umumnya masih berdiri sendiri, bekerja berdasarkan interval waktu, dan belum menyediakan pemantauan maupun kendali jarak jauh. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji prototipe sistem monitoring dan kendali jarak jauh berbasis LoRa yang terintegrasi dengan web dashboard. Sistem terdiri atas Transceiver A sebagai unit bird deterrent dan Transceiver B sebagai unit monitoring dan kendali. Pengembangan mengikuti model ADDIE dan pengujian mencakup komunikasi LoRa pada kondisi line of sight dan non-line of sight serta Black Box Testing terhadap sepuluh fungsi dashboard. Hasil pengujian menunjukkan data monitoring dapat diterima hingga 1000 m pada kondisi line of sight dan 600 m pada kondisi non-line of sight. Seluruh sepuluh skenario pengujian functional suitability pada web dashboard, meliputi akses dashboard, tampilan data monitoring, pemilihan mode manual dan otomatis, fungsi play dan stop, pengaturan volume, pembacaan input suara, aktivasi otomatis, serta pembaruan status secara real-time, berhasil dijalankan dengan tingkat keberhasilan 100%. Prototipe mampu menampilkan status perangkat, RSSI, SNR, jumlah paket, mode operasi, serta menjalankan perintah play, stop, manual, dan otomatis secara real-time pada skala prototipe.

PENDAHULUAN

Keselamatan penerbangan menuntut setiap bandar udara mengendalikan bahaya yang dapat muncul pada area *airside*. Salah satu bahaya yang perlu mendapat perhatian adalah *bird strike*, yaitu tabrakan antara burung dan pesawat pada saat lepas landas, mendarat, atau terbang pada ketinggian rendah. Dampaknya tidak hanya berupa kerusakan struktur dan mesin pesawat, tetapi juga gangguan operasional, keterlambatan penerbangan, serta peningkatan biaya perawatan. Penelitian mengenai penetapan area keselamatan dan penilaian kemungkinan *bird strike* menunjukkan bahwa pengendalian risiko harus didukung oleh identifikasi kondisi lapangan serta respons operasional yang tepat [1,2].

Bandar udara memiliki karakteristik lingkungan yang dapat menarik burung, antara lain area terbuka, vegetasi, genangan air, sumber makanan, dan ruang untuk bersarang. Oleh karena itu, pengelola bandar udara menerapkan *wildlife hazard management* melalui pengelolaan habitat, patroli, pemantauan populasi, serta pengusiran aktif. Salah satu peralatan yang digunakan adalah *bird deterrent* berbasis suara. Perangkat ini menghasilkan suara predator, *distress call*, sirene, atau suara impulsif untuk menimbulkan respons menghindari pada burung. Penelitian sebelumnya memperlihatkan bahwa perangkat berbasis mikrokontroler dapat mendukung pengusiran burung, tetapi efektivitasnya dipengaruhi oleh desain perangkat, sensor, catu daya, dan pola pengoperasian [3]. Strategi pengendalian di bandar udara juga harus mempertimbangkan kecepatan respons petugas terhadap laporan keberadaan burung pada area operasi [4].

Permasalahan yang ditemukan pada sistem yang menjadi objek penelitian adalah peralatan masih bersifat *stand-alone* dan bekerja berdasarkan interval waktu tertentu, serta belum terintegrasi dengan sistem monitoring dan kendali jarak jauh.

Kondisi tersebut menyebabkan teknisi belum dapat memantau status peralatan secara real-time dan mengaktifkan peralatan secara langsung, belum dapat memastikan apakah *horn speaker* sedang aktif, dan belum dapat mengaktifkan perangkat dari ruang siaga saat burung muncul di luar jadwal otomatis. Inspeksi juga masih dilakukan dengan mendatangi lokasi alat. Pada area *airside* yang luas, cara tersebut membutuhkan waktu dan tenaga serta berpotensi memperlambat respons. Sistem otomatis berbasis deteksi dapat meningkatkan kecepatan tindakan [5], tetapi tetap dibutuhkan mekanisme kendali manual agar petugas dapat mengambil alih operasi sesuai kondisi aktual.

Teknologi Long Range atau LoRa dipilih sebagai media komunikasi karena mampu mengirimkan data berukuran kecil pada jarak relatif jauh dengan konsumsi daya rendah. Komunikasi dapat dibangun langsung antara dua perangkat tanpa bergantung pada jaringan internet publik. Karakteristik tersebut sesuai untuk telemetri status alat dan pengiriman perintah kendali pada area terbuka. Penelitian sistem kendali peralatan berbasis LoRa dan analisis sinyal pada pita 433 MHz menunjukkan bahwa kualitas komunikasi dapat diamati melalui *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) dan *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) [7,8]. Namun, jangkauan efektif sangat dipengaruhi oleh jarak, penempatan antenna, daya pancar, serta keberadaan bangunan atau vegetasi.

Penelitian terkait pengusir burung berbasis Internet of Things telah memanfaatkan aplikasi jaringan untuk proses pemantauan dan pengoperasian [9]. Penelitian lain menggunakan *deep learning* untuk mengenali suara burung [10] serta menerapkan LoRa untuk pemantauan satwa pada lingkungan vegetasi [11]. Meskipun demikian, masih terdapat kebutuhan pengembangan yang secara khusus menggabungkan komunikasi LoRa dua arah, unit audio *bird deterrent*, deteksi akustik ringan pada mikrokontroler, dan *web dashboard* lokal yang dapat diakses melalui jaringan Wi-Fi tanpa layanan awan. Integrasi tersebut menjadi kebaruan praktis penelitian ini karena satu perangkat penerima sekaligus berfungsi sebagai *gateway*, *web server*, pusat monitoring, dan pengirim perintah menuju unit lapangan.

Penelitian terdahulu telah membahas beberapa aspek yang berkaitan dengan sistem pengendalian burung, seperti pengembangan perangkat bird repellent berbasis mikrokontroler, penggunaan audio sebagai media deterrent, monitoring burung berbasis suara, serta komunikasi LoRa untuk monitoring jarak jauh. Namun, penelitian-penelitian tersebut masih berfokus pada aspek tertentu dan belum mengintegrasikan fungsi komunikasi LoRa dua arah, deteksi akustik, unit audio bird deterrent, serta monitoring dan kendali melalui web dashboard dalam satu sistem. Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan prototipe yang mengintegrasikan fungsi tersebut dalam satu arsitektur, dengan Transceiver A sebagai unit bird deterrent dan Transceiver B sebagai unit monitoring serta kendali. Integrasi tersebut memungkinkan data kondisi perangkat dan hasil deteksi dikirim melalui LoRa, ditampilkan pada web dashboard, serta memungkinkan pengguna memberikan perintah kendali dari lokasi terpisah.

TINJAUAN PUSTAKA

Bird Strike dan Bird Deterrent

Bird strike merupakan kejadian tabrakan pesawat dengan burung yang dapat terjadi ketika pesawat berada di darat maupun di udara. Tingkat risiko dipengaruhi oleh ukuran dan jumlah burung, fase penerbangan, kecepatan pesawat, serta bagian pesawat yang terkena. Pengendalian risiko tidak cukup hanya mengandalkan patroli, tetapi memerlukan kombinasi pemantauan, pengelolaan habitat, pencatatan kejadian, dan metode pengusiran yang disesuaikan dengan kondisi setempat [2,4].

Bird deterrent adalah perangkat atau metode yang digunakan untuk mengurangi keberadaan burung pada suatu area. Metode akustik memanfaatkan suara yang menimbulkan persepsi ancaman atau ketidaknyamanan. Variasi suara diperlukan untuk mengurangi habituasi. Kajian terbaru mengenai solusi perlindungan area dari gangguan burung menekankan bahwa pemilihan metode perlu mempertimbangkan spesies sasaran, kondisi lingkungan, cakupan area, tingkat kebisingan, serta kemungkinan burung terbiasa terhadap stimulus [6]. Dalam penelitian ini, suara disimpan pada *microSD*, diputar melalui DFPlayer Mini, diperkuat oleh amplifier TPA3110, dan dikeluarkan melalui *horn speaker*.

LoRa SX1278 dan ESP32

LoRa menggunakan teknik modulasi *chirp spread spectrum* untuk meningkatkan ketahanan sinyal terhadap gangguan. Modul SX1278 pada penelitian ini bekerja pada frekuensi 433 MHz dengan *spreading factor* 7, *bandwidth* 125 kHz, *coding rate* 4/5, dan daya pancar 17 dBm. Nilai RSSI digunakan untuk menggambarkan daya sinyal yang diterima; nilai yang semakin mendekati 0 dBm menunjukkan sinyal yang relatif lebih kuat. SNR menunjukkan perbandingan sinyal terhadap derau. Nilai positif menggambarkan kondisi sinyal lebih kuat daripada derau, sedangkan nilai negatif

menunjukkan penerimaan berada pada kondisi yang lebih menantang. Analisis pada pita 433 MHz menunjukkan bahwa parameter RSSI dapat digunakan sebagai indikator perubahan kualitas hubungan komunikasi [8].

ESP32 digunakan sebagai pusat pemrosesan pada kedua transceiver karena menyediakan antarmuka SPI, UART, I2S, ADC, Wi-Fi, dan kemampuan menjalankan beberapa proses dalam satu perangkat. Pada Transceiver A, ESP32 mengolah data mikrofon, mengendalikan pemutar audio, dan bertukar data melalui LoRa. Pada Transceiver B, ESP32 menerima data LoRa, menjalankan server HTTP dan WebSocket, menampilkan informasi pada OLED, serta mengirimkan perintah dari dashboard. Arsitektur perangkat berbasis ESP32 banyak digunakan pada sistem IoT karena mampu menggabungkan konektivitas, pemrosesan, dan antarmuka jaringan dalam bentuk yang ringkas [12].

Deteksi Akustik RMS dan ZCR

Deteksi akustik ringan dilakukan menggunakan *Root Mean Square* (RMS) dan *Zero Crossing Rate* (ZCR). RMS mewakili energi sinyal dalam satu jendela sampel, sedangkan ZCR menghitung jumlah perubahan tanda dari positif ke negatif atau sebaliknya. Kombinasi keduanya digunakan sebagai penyaring awal agar sistem tidak hanya bergantung pada keras-lemahnya suara. Nilai RMS dikonversi menjadi desibel relatif terhadap nilai maksimum data audio 24-bit. Sistem menggunakan batas amplitudo dan rentang ZCR yang dapat diatur, kemudian menghitung jumlah *hit* pada jendela waktu. Saat jumlah *hit* memenuhi ambang, mode otomatis mengaktifkan suara pengusir. Pendekatan ini dirancang sebagai pemicu sederhana pada skala prototipe, bukan sebagai pengenalan spesies burung seperti pada sistem BirdNET [10].

Penelitian Terdahulu

Sebagai *state of the art* dalam penelitian ini, proses perancangan sistem dilakukan dengan mengkaji beberapa penelitian terdahulu yang memiliki keterkaitan sistem *monitoring* dan pengusir burung. Pada tabel I.1 memperlihatkan persamaan dan perbedaan dengan penelitian yang sejenis.

Tabel 1. Penelitian Terdahulu

Penelitian	Fokus utama	Perbedaan dengan penelitian ini
Chandra dkk. [3]	Perangkat pengusir burung berbasis mikrokontroler, sensor, dan catu daya.	Penelitian ini menambahkan komunikasi LoRa dua arah serta dashboard monitoring dan kendali.
Sufaat dan Juliandri [9]	Pengusir burung pada persawahan berbasis IoT dan aplikasi jaringan.	Objek penelitian berada pada konteks airside dan menggunakan jaringan LoRa lokal tanpa layanan awan.
Kahl dkk. [10]	Identifikasi spesies burung dari rekaman suara dengan deep learning.	Deteksi penelitian ini menggunakan RMS dan ZCR sebagai pemicu ringan pada ESP32.
Ojo dkk. [11]	Evaluasi jaringan LoRa untuk pemantauan satwa di area vegetasi.	Penelitian ini menguji telemetri sekaligus perintah kendali ke peralatan audio deterrent.

METODOLOGI

Model Pengembangan dan Pengumpulan Data

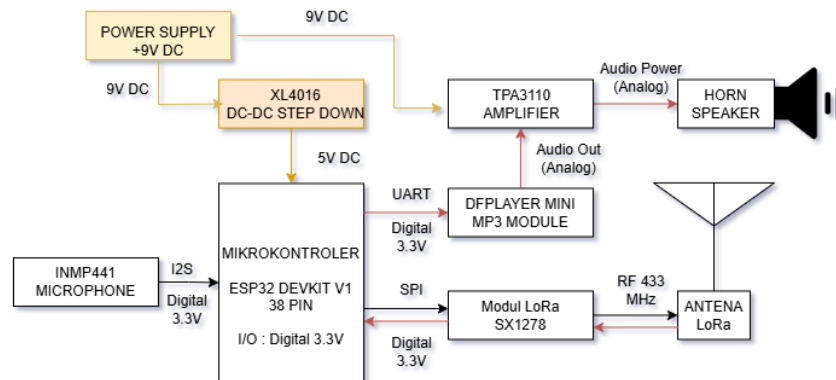
Penelitian menggunakan model ADDIE yang meliputi *analysis*, *design*, *development*, *implementation*, dan *evaluation*. Model tersebut dipilih agar proses pengembangan dimulai dari kebutuhan pengguna, diterjemahkan menjadi desain, dibangun menjadi prototipe, diterapkan pada skenario uji, dan dievaluasi berdasarkan hasil pengujian. Pengumpulan data dilakukan melalui studi literatur dan wawancara terstruktur maupun tidak terstruktur. Studi literatur digunakan untuk mengkaji *bird deterrent*, komunikasi LoRa, ESP32, pengolahan audio, dan pengujian perangkat lunak. Wawancara dilakukan dengan teknisi Unit Airport Technology untuk memperoleh informasi mengenai kondisi alat yang masih berdiri sendiri, kebutuhan status yang harus ditampilkan, serta kebutuhan kendali manual dari ruang siaga. Pemilihan metode literatur dan wawancara mengikuti prinsip penentuan metode penelitian serta penyusunan instrumen wawancara yang sistematis [15,16].

Arsitektur Sistem

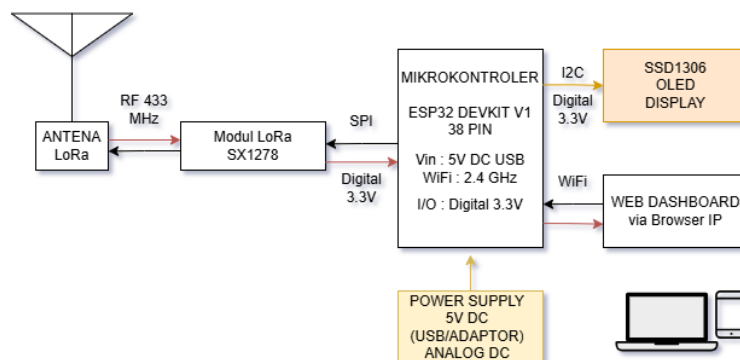
Sistem terdiri atas dua perangkat. Transceiver A ditempatkan sebagai representasi unit *bird deterrent* pada area lapangan. Perangkat ini menggunakan ESP32-WROOM-32, LoRa SX1278, mikrofon INMP441, DFPlayer Mini, amplifier TPA3110, dan *horn speaker*. Catu daya 9 V diturunkan menjadi 5 V untuk bagian logika, sedangkan jalur audio memperoleh daya sesuai kebutuhan amplifier. Transceiver B ditempatkan sebagai unit monitoring dan kendali. Perangkat

menggunakan ESP32 Lolin32 dengan OLED, LoRa SX1278, Wi-Fi, server HTTP, WebSocket, dan dashboard yang diakses dari komputer atau telepon seluler. Arsitektur kedua unit ditunjukkan pada Gambar 1.

(a) Transceiver A (unit bird deterrent)



(b) Transceiver B (unit monitoring dan kendali)



Gambar 1. Arsitektur Transceiver A dan Transceiver B

Aliran data berlangsung dua arah. Transceiver A mengirimkan identitas perangkat, status koneksi, nilai akustik, jumlah deteksi, status pemutaran suara, mode operasi, RSSI, SNR, dan nomor paket. Transceiver B menerima data tersebut lalu menyiarkannya ke browser melalui WebSocket sehingga perubahan dapat ditampilkan tanpa memuat ulang halaman. Perintah dari pengguna dikirim melalui API pada Transceiver B, dikemas menjadi pesan kendali, lalu diteruskan melalui LoRa menuju Transceiver A. Dengan mekanisme ini, jalur Wi-Fi hanya digunakan pada sisi lokal antara pengguna dan Transceiver B, sedangkan komunikasi jarak jauh menuju unit lapangan menggunakan LoRa.

Konfigurasi dan Pengolahan Audio

Tabel 2. Parameter Utama Komunikasi dan Deteksi

Parameter	Nilai
Frekuensi LoRa	433 MHz
Spreading factor	SF7
Bandwidth	125 kHz

Parameter	Nilai
Coding rate	4/5
Daya pancar	17 dBm
Sample rate mikrofon	16 kHz
Jumlah sampel per jendela	1024 sampel
Ambang amplitudo awal	0,02
Ambang deteksi	5 hit dalam jendela 10 detik
Durasi pemutaran awal	10 detik

Sinyal audio dari INMP441 dibaca melalui I2S. Setiap jendela sampel dihitung nilai RMS, desibel relatif, dan ZCR. Persamaan RMS, konversi desibel, dan ZCR yang digunakan dinyatakan pada Persamaan (1) sampai (3), dengan $x(i)$ sebagai sampel audio dan N sebagai jumlah sampel.

$$RMS = \sqrt{[(1/N) \sum x(i)^2]} \quad (1)$$

$$dB = 20 \log_{10}(RMS / 8.388.607) \quad (2)$$

$$ZCR = (1/2N) \sum |sgn(x(i)) - sgn(x(i-1))| \quad (3)$$

Hasil penghitungan dibandingkan dengan parameter deteksi. Saat energi sinyal dan nilai ZCR berada pada rentang yang ditentukan, sistem menambah jumlah *hit*. Pemutaran otomatis dilakukan setelah jumlah *hit* mencapai ambang pada jendela waktu. Pengguna tetap dapat memilih mode manual dan menjalankan suara secara langsung. Penggunaan dua mode dimaksudkan agar sistem mampu merespons pemicu akustik, namun tetap memberikan otoritas kendali kepada teknisi.

Pengembangan Dashboard dan Prototipe

Dashboard ditanamkan pada memori program ESP32 dan terdiri atas empat halaman: Monitor, Control, Config, dan Info. Halaman Monitor menampilkan daftar transceiver, status online atau offline, nilai dB, jumlah *bird hit*, RSSI, SNR, paket, mode, dan status pemutaran. Halaman Control digunakan untuk memilih mode manual atau otomatis serta menjalankan *play* dan *stop*. Halaman Config digunakan untuk mengubah jenis suara, ambang *hit*, durasi pemutaran, dan konfigurasi jaringan. Halaman Info menampilkan informasi penerima, jumlah pemancar aktif, status Wi-Fi, dan parameter LoRa. Implementasi prototipe perangkat keras dan antarmuka ditunjukkan pada Gambar 2 dan Gambar 3.

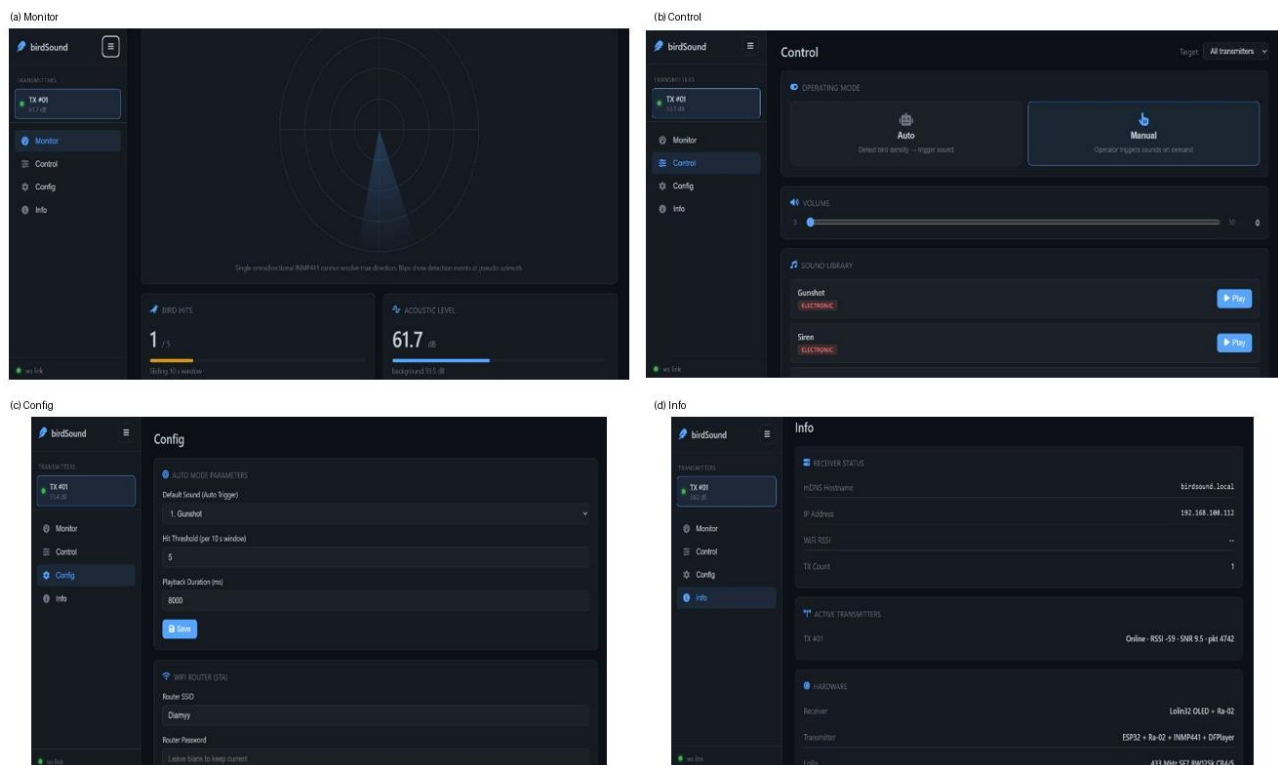
(a) Transceiver A



(b) Transceiver B



Gambar 2. Prototipe Perangkat Keras Transceiver A dan Transceiver B.



Gambar 3. Tampilan Halaman Monitor, Control, Config, dan Info pada Web Dashboard

Skenario Pengujian

Evaluasi dilakukan melalui dua kelompok pengujian. Pertama, komunikasi LoRa diuji pada kondisi LOS dan N-LOS dengan variasi jarak. Transceiver A mengirimkan data secara berkala, sedangkan keberhasilan ditentukan dari penerimaan data pada dashboard, status online, nilai RSSI, nilai SNR, dan penambahan nomor paket. Pengujian LOS dilakukan hingga lebih dari 1000 m, sedangkan pengujian N-LOS dilakukan hingga lebih dari 600 m dengan keberadaan objek penghalang. Kedua, fungsi dashboard diuji menggunakan metode *Black Box Testing*. Pengujian berfokus pada kesesuaian keluaran terhadap masukan pengguna tanpa meninjau kode internal [17]. Sepuluh skenario meliputi akses dashboard, penerimaan data real-time, mode manual, *play*, *stop*, volume, mode otomatis, pembacaan input suara, aktivasi otomatis, dan pembaruan status.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Implementasi Sistem

Prototipe berhasil dirakit menjadi dua transceiver yang saling berkomunikasi. Saat catu daya diberikan, Transceiver A menginisialisasi mikrofon, DFPlayer Mini, LoRa, parameter deteksi, dan status perangkat. Transceiver B menginisialisasi OLED, koneksi Wi-Fi, server HTTP, WebSocket, dan LoRa. Alamat IP ditampilkan pada OLED sehingga pengguna dapat membuka dashboard tanpa menggunakan *serial monitor*. Setelah halaman diakses, browser membangun koneksi WebSocket ke Transceiver B. Status hubungan pada dashboard berubah menjadi online ketika data dari Transceiver A diterima secara periodik.

Pada mode manual, tombol *play* menghasilkan pesan kendali dari browser ke Transceiver B. Pesan diteruskan melalui LoRa dan diterima oleh Transceiver A. ESP32 kemudian memberikan perintah UART kepada DFPlayer Mini, keluaran audio diperkuat oleh amplifier, dan suara dikeluarkan melalui *horn speaker*. Tombol *stop* menghentikan pemutaran, sedangkan pengaturan volume mengubah level keluaran modul audio. Sistem juga mengirimkan status pemutaran kembali ke dashboard, sehingga pengguna tidak hanya menekan tombol tetapi dapat melihat perubahan kondisi perangkat.

Pada mode otomatis, sinyal mikrofon dibaca terus-menerus dan diproses dalam jendela sampel. Penggunaan RMS berfungsi menolak sinyal yang terlalu lemah, sedangkan ZCR membantu membedakan perubahan karakteristik sinyal. Ketika kriteria terpenuhi berulang kali, nilai *hit* mencapai ambang dan pemutaran suara dijalankan. Mekanisme beberapa *hit* dalam satu jendela dipilih untuk mengurangi aktivasi akibat satu impuls sesaat. Namun, karena metode ini tidak

melakukan klasifikasi spesies, suara lingkungan dengan energi dan pola perubahan yang serupa masih dapat menimbulkan *false trigger*. Dengan demikian, fitur otomatis pada prototipe lebih tepat diposisikan sebagai penyaring awal yang tetap didukung pengawasan operator.

Dashboard mampu menerima data JSON melalui WebSocket dan memperbarui elemen antarmuka tanpa *refresh*. Pemisahan jalur data monitoring dan API kendali membuat struktur sistem lebih mudah diuji. WebSocket digunakan untuk data yang berubah berulang, sedangkan permintaan HTTP digunakan untuk menyimpan konfigurasi atau mengirimkan perintah. Kombinasi tersebut sesuai dengan keterbatasan sumber daya ESP32 karena halaman, gaya, dan skrip disimpan pada memori program. Implementasi juga menunjukkan bahwa satu ESP32 pada Transceiver B mampu menjalankan fungsi penerima LoRa, OLED, Wi-Fi, server, dan WebSocket secara bersamaan. Hasil ini sejalan dengan penerapan ESP32 sebagai perangkat IoT terintegrasi yang memanfaatkan beberapa antarmuka komunikasi [12].

Hasil Pengujian Komunikasi LoRa

Tabel 3. Hasil pengujian komunikasi LoRa kondisi LOS

No.	Jarak (m)	Data diterima	RSSI (dBm)	SNR (dB)
1	50	Ya	-58	10.3
2	100	Ya	-62	10.0
3	200	Ya	-72	9.5
4	300	Ya	-84	9.5
5	400	Ya	-93	9.0
6	500	Ya	-99	8.3
7	600	Ya	-103	6.8
8	700	Ya	-105	5.3
9	800	Ya	-107	3.0
10	1000	Ya	-111	-3.5
11	>1000	Tidak	-	-

Pada kondisi LOS, data diterima mulai dari jarak 50 m hingga 1000 m. RSSI menurun dari -58 dBm menjadi -111 dBm, sedangkan SNR menurun dari 10,3 dB menjadi -3,5 dB. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa pelemahan sinyal meningkat seiring pertambahan jarak. Meskipun SNR pada 1000 m sudah bernilai negatif, paket masih dapat diterima dan status perangkat tetap online. Hal ini merupakan salah satu karakteristik komunikasi LoRa, yaitu masih dapat mendemodulasi sinyal pada kondisi SNR rendah. Nomor paket pada dashboard meningkat dari 987 pada jarak 50 m menjadi 3195 pada jarak 1000 m. Pertambahan nomor paket mengindikasikan bahwa data tidak hanya diterima satu kali, tetapi terus diperbarui selama pengamatan.

Pada jarak lebih dari 1000 m, data tidak diterima dan status berubah menjadi offline. Batas tersebut merupakan hasil pengujian konfigurasi prototipe, bukan nilai maksimum teoritis modul. Jangkauan aktual dipengaruhi oleh daya pancar 17 dBm, antena yang digunakan, ketinggian perangkat, orientasi antena, kondisi elektromagnetik, dan parameter SF7. Penggunaan *spreading factor* lebih tinggi berpotensi meningkatkan sensitivitas tetapi memperpanjang waktu transmisi dan mengurangi laju data. Oleh sebab itu, konfigurasi perlu disesuaikan dengan kebutuhan pembaruan real-time dan kondisi penempatan di lapangan.

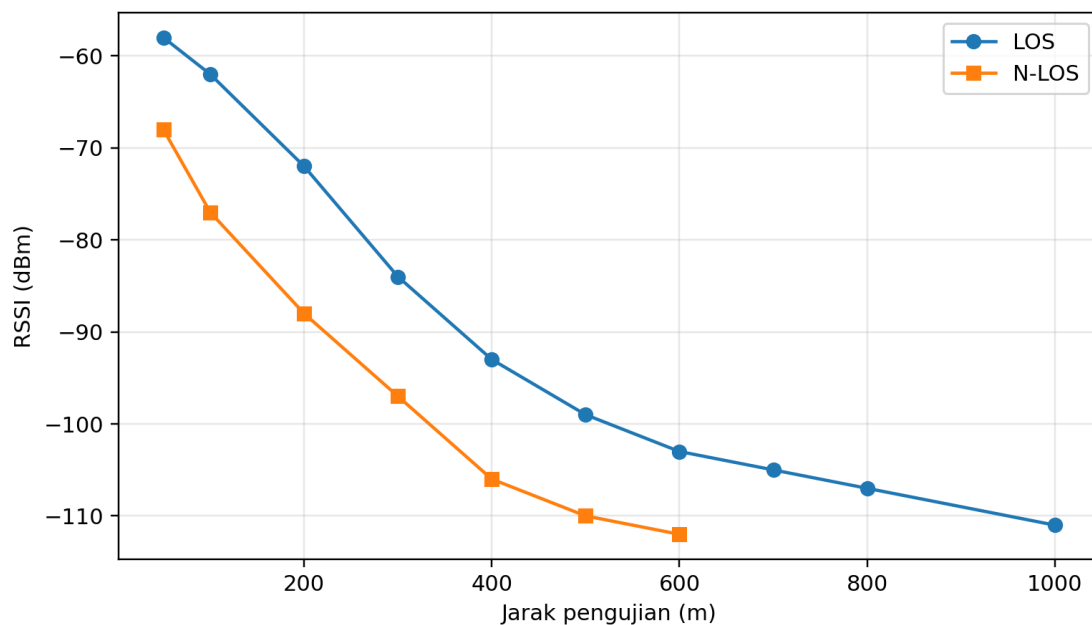
Tabel 4. Hasil pengujian komunikasi LoRa kondisi N-LOS

No.	Jarak (m)	Data diterima	RSSI (dBm)	SNR (dB)
1	50	Ya	-68	10.0
2	100	Ya	-77	9.3
3	200	Ya	-88	9.3
4	300	Ya	-97	9.3

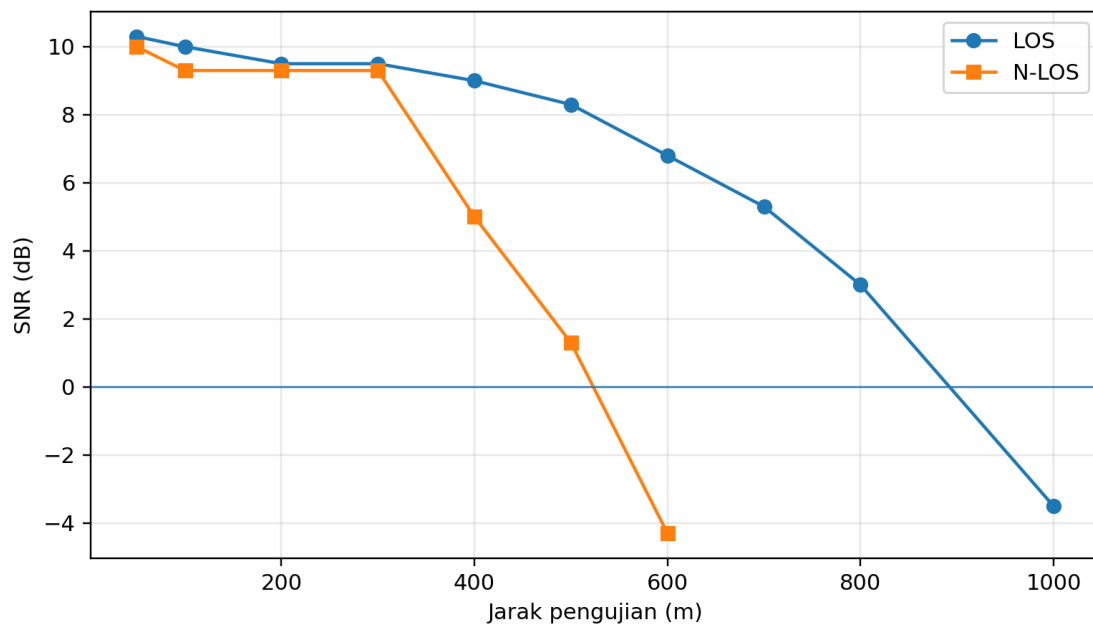
No.	Jarak (m)	Data diterima	RSSI (dBm)	SNR (dB)
5	400	Ya	-106	5.0
6	500	Ya	-110	1.3
7	600	Ya	-112	-4.3
8	>600	Tidak	-	-

Pada kondisi N-LOS, data masih diterima sampai 600 m. RSSI berubah dari -68 dBm pada 50 m menjadi -112 dBm pada 600 m, sedangkan SNR turun dari 10,0 dB menjadi -4,3 dB. Pada jarak lebih dari 600 m, dashboard tidak memperoleh pembaruan dan status menjadi offline. Jumlah paket tetap meningkat dari 478 pada 50 m menjadi 1195 pada 600 m, sehingga hubungan komunikasi masih berlangsung sampai batas tersebut. Dibandingkan LOS, kondisi N-LOS menghasilkan RSSI yang lebih lemah pada jarak yang sama. Selisih ini menunjukkan adanya rugi-rugi tambahan akibat bangunan, tembok, vegetasi, atau objek lain di antara antena. Hubungan antara RSSI, SNR, dan keberhasilan penerimaan data terlihat dari batas jangkauan pengujian. Pada LOS, komunikasi masih dapat berlangsung hingga 1000 m ketika RSSI mencapai -111 dBm dan SNR -3,5 dB. Sementara itu, pada N-LOS komunikasi berhenti pada jarak lebih dari 600 m ketika pada jarak 600 m RSSI telah mencapai -112 dBm dan SNR -4,3 dB. Dengan demikian, penurunan RSSI dan SNR seiring bertambahnya jarak menjadi indikator menurunnya kualitas komunikasi, sedangkan keberadaan halangan pada kondisi N-LOS memperkuat penurunan tersebut sehingga jarak efektif komunikasi menjadi lebih pendek, yaitu 600 m dibandingkan 1000 m pada kondisi LOS.

Perbandingan RSSI dan SNR ditampilkan pada Gambar 4 dan Gambar 5. Kurva RSSI menunjukkan penurunan relatif konsisten pada kedua kondisi. Pada N-LOS, nilai mencapai sekitar -106 dBm pada 400 m, sedangkan kondisi LOS pada jarak yang sama masih berada pada -93 dBm. Kurva SNR pada LOS menurun lebih bertahap dan tetap positif sampai 800 m. Pada N-LOS, SNR turun menjadi 1,3 dB pada 500 m dan negatif pada 600 m. Hasil tersebut memperlihatkan bahwa keberadaan jalur langsung antara antena memberikan pengaruh nyata terhadap kualitas hubungan. Temuan ini konsisten dengan penggunaan LoRa untuk pemantauan pada lingkungan terbuka yang kualitasnya dipengaruhi vegetasi dan kondisi propagasi [11].



Gambar 4. Perbandingan RSSI Terhadap Jarak pada Kondisi LOS dan N-LOS



Gambar 5. Perbandingan SNR Terhadap Jarak pada kondisi LOS dan N-LOS

Dari sisi kebutuhan sistem, jangkauan 1000 m pada LOS dan 600 m pada N-LOS telah menunjukkan kelayakan komunikasi untuk skala prototipe. Namun, implementasi pada bandar udara memerlukan survei radio, penentuan titik pemasangan, evaluasi interferensi, serta pengujian kompatibilitas elektromagnetik sesuai ketentuan yang berlaku. Penggunaan pita 433 MHz pada prototipe tidak serta-merta berarti perangkat dapat langsung dioperasikan di area *airside*. Izin frekuensi, daya pancar, jenis antena, dan prosedur keselamatan harus dikaji oleh pihak berwenang. Oleh karena itu, hasil penelitian ini terbatas pada pembuktian fungsi komunikasi dan tidak menyatakan kelayakan operasional penuh.

Hasil Black Box Testing Web Dashboard

Tabel 5. Hasil Black Box Testing Web Dashboard

No.	Skenario	Hasil yang diharapkan	Hasil
1	Membuka dashboard	Halaman dapat diakses melalui alamat IP.	Berhasil
2	Menampilkan data monitoring	Status, RSSI, SNR, paket, mode, dan dB tampil real-time.	Berhasil
3	Memilih mode manual	Sistem berpindah ke mode manual.	Berhasil
4	Menjalankan Play	Horn speaker mengeluarkan suara.	Berhasil
5	Menjalankan Stop	Pemutaran suara berhenti.	Berhasil
6	Mengatur volume	Volume berubah sesuai pengaturan.	Berhasil
7	Memilih mode otomatis	Sistem berpindah ke mode otomatis.	Berhasil
8	Memberikan input suara	Nilai dB dan ZCR terbaca.	Berhasil
9	Aktivasi otomatis	Horn aktif saat kriteria threshold terpenuhi.	Berhasil
10	Pembaruan status	Perubahan kondisi tampil secara real-time.	Berhasil

Sepuluh skenario pengujian memperoleh hasil berhasil, sehingga tingkat keberhasilan fungsi pada sepuluh scenario Black Box Testing mencapai 100%. Akses halaman melalui alamat IP berjalan, data monitoring dapat diperbarui, perubahan mode diterima oleh Transceiver A, dan perintah audio dijalankan. Hasil ini menunjukkan kesesuaian antara masukan pengguna dan keluaran sistem pada fungsi utama. Metode *Black Box Testing* sesuai digunakan karena fokus pengujian terletak pada perilaku antarmuka dan respons perangkat terhadap perintah [17].

Keberhasilan 100% tidak berarti sistem bebas dari seluruh kemungkinan kegagalan. Pengujian dilakukan pada skenario yang telah ditentukan dan lingkungan prototipe. Faktor seperti koneksi Wi-Fi terputus, dua pengguna mengirimkan perintah bersamaan, data konfigurasi tidak valid, catu daya turun, kartu microSD gagal terbaca, atau paket LoRa hilang belum diuji secara mendalam. Dashboard telah memiliki mekanisme penyambungan ulang WebSocket, tetapi strategi pengulangan perintah, konfirmasi paket, dan penyimpanan riwayat masih perlu dikembangkan. Pengujian lanjutan perlu memasukkan *stress test*, uji durasi panjang, uji pemulihan setelah gangguan daya, dan uji keamanan akses.

Pembahasan Ketercapaian Tujuan

Tujuan pertama, yaitu membangun komunikasi dua arah antara unit lapangan dan unit monitoring, tercapai melalui pertukaran paket LoRa. Data status dapat diterima dan perintah kendali dapat dikirim kembali. Tujuan kedua, yaitu menyediakan informasi real-time, tercapai melalui integrasi WebSocket yang menampilkan parameter tanpa memuat ulang halaman. Tujuan ketiga, yaitu menyediakan mode otomatis dan manual, tercapai melalui pemrosesan RMS-ZCR serta API kontrol. Tujuan keempat, yaitu mengetahui kinerja komunikasi, tercapai melalui pengujian LOS dan N-LOS yang menghasilkan batas jarak efektif berbeda.

Dibandingkan penelitian pengusir burung berbasis IoT pada area pertanian [9], sistem ini tidak bergantung pada aplikasi awan dan menggunakan LoRa sebagai jalur utama menuju perangkat lapangan. Dibandingkan sistem identifikasi burung berbasis pembelajaran mendalam [10], beban komputasi pada penelitian ini jauh lebih ringan, tetapi kemampuan deteksinya juga lebih terbatas. Dibandingkan penelitian jaringan LoRa untuk pemantauan satwa [11], rancangan ini tidak hanya mengirim telemetri, tetapi juga menjalankan kontrol aktuator audio. Kombinasi tersebut sesuai dengan permasalahan teknis yang membutuhkan status perangkat dan kemampuan mengaktifkan alat segera dari lokasi terpisah. Keterbatasan utama penelitian terdapat pada metode deteksi dan cakupan pengujian. RMS dan ZCR belum dapat memastikan bahwa sinyal yang diterima benar-benar berasal dari burung. Pengujian menggunakan sumber suara simulasi karena penelitian tidak dilakukan pada populasi burung di area operasional. Efektivitas suara pengusir terhadap spesies tertentu juga tidak dievaluasi. Selain itu, pengujian jarak dilakukan pada konfigurasi antena dan parameter tertentu, sehingga hasil tidak dapat digeneralisasi untuk seluruh kondisi bandar udara. Walaupun demikian, prototipe telah menunjukkan bahwa arsitektur yang diusulkan dapat menjalankan aliran monitoring dan kendali dari ujung ke ujung.

KESIMPULAN DAN SARAN

Prototipe sistem monitoring dan kendali jarak jauh peralatan *bird deterrent* berbasis LoRa berhasil dibangun menggunakan dua perangkat utama. Transceiver A berfungsi sebagai unit pengolah suara dan aktuator audio, sedangkan Transceiver B berfungsi sebagai penerima telemetri, server dashboard, dan pengirim perintah. Sistem mampu menampilkan status perangkat, RSSI, SNR, jumlah paket, nilai akustik, jumlah deteksi, mode operasi, dan status pemutaran. Perintah mode manual, mode otomatis, *play*, *stop*, volume, serta konfigurasi parameter dapat dijalankan melalui web dashboard. Seluruh sepuluh skenario *Black Box Testing* memperoleh hasil berhasil atau 100% pada kondisi pengujian prototipe.

Komunikasi LoRa dapat menerima data hingga 1000 m pada kondisi LOS dan 600 m pada kondisi N-LOS. Penurunan RSSI dan SNR menunjukkan bahwa jarak serta halangan memengaruhi kualitas hubungan. Pengembangan selanjutnya disarankan menggunakan pencatatan riwayat, notifikasi perangkat offline, mekanisme konfirmasi paket, autentikasi dashboard, dan dukungan beberapa Transceiver A. Metode deteksi perlu ditingkatkan menggunakan ekstraksi fitur atau klasifikasi suara yang tervalidasi, sedangkan pengujian lapangan harus melibatkan survei radio, evaluasi interferensi, uji durasi panjang, dan persetujuan operasional sebelum sistem digunakan di lingkungan bandar udara.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. M. Domo, A. Rossydi, and I. Sonhaji, "A Study on the Determination of Isolation Area on Taxiway Sierra Based on Aviation Safety and Security at Kualanamu International Airport," vol. 8, no. 2, pp. 42–51, 2025.
- [2] C. Ross, B. F. Blackwell, M. J. Begier, and T. L. DeVault, "Assessment of Bird Strike Likelihood to Refine Bird Strike Risk Models," *Proc. Vertebr. Pest Conf.*, vol. 31, pp. 1–5, 2024.
- [3] P. W. A. Chandra, R. Racahyo, Sunardi, M. I. Martadinata, and Y. Suprihartini, "Microcontroller-Based Bird Repellent Device at the Airport: Design, Sensor, and Power Supply," *J. Airport Eng. Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 135–149, 2025, doi: 10.52989/jaet.v5i2.205.

- [4] J. T. Saputri, A. Soebagio, and Y. Arnas, "Analysis of Bird Strike Management Strategies at Zainuddin Abdul Madjid International Airport Lombok to Improve Flight Safety," vol. 10, no. 2, pp. 116–121, 2025.
- [5] Y. C. Chen, J. F. Chu, K. W. Hsieh, T. H. Lin, and P. Z. Chang, "Automatic Wild Bird Repellent System Based on Deep-Learning Bird Detection and Integrated with a Laser Rotation Mechanism," *Sci. Rep.*, pp. 1–15, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-66920-2.
- [6] E. B. Micaelo, L. G. P. S. Lourenço, P. D. Gaspar, M. L. P. Caldeira, and V. N. G. J. Soares, "Bird Deterrent Solutions for Crop Protection: Approaches, Challenges, and Opportunities," pp. 1–29, 2023.
- [7] M. Ahsan, A. Based, and J. Haider, "Smart Monitoring and Controlling of Appliances Using LoRa Based IoT System," 2022.
- [8] R. S. Hadikusuma and L. Nurpulaela, "RSSI Analysis on CSS Modulation in the 433 MHz Frequency Band Using LoRa in Flood Sensor," vol. 8, no. 2, pp. 95–102, 2022.
- [9] I. Sufaat and J. Juliandri, "Rancang Bangun Alat Pengusir Hama Burung pada Padi Sawah Petani Berbasis Internet of Things (IoT)," vol. 5, no. 2, pp. 306–314, 2024, doi: 10.47065/josyc.v5i2.4921.
- [10] S. Kahl, C. M. Wood, M. Eibl, and H. Klinck, "BirdNET: A Deep Learning Solution for Avian Diversity Monitoring," *Ecol. Inform.*, vol. 61, p. 101236, 2021, doi: 10.1016/j.ecoinf.2021.101236.
- [11] M. O. Ojo, D. Adami, and S. Giordano, "Experimental Evaluation of a LoRa Wildlife Monitoring Network in a Forest Vegetation Area," pp. 1–22, 2021.
- [12] D. Hercog, T. Lerher, and M. TruntiĆ, "Design and Implementation of ESP32-Based IoT Devices," 2023.
- [13] S. Prakosa, A. Nugraha, and L. Sunuharjo, "Komunikasi Arduino I2C, SPI dan UART," no. 1, 2024.
- [14] F. G. Marpaung and D. Afriyanto, "Bird Strike Risk Assessment to Support Flight Safety: A Case Study at Kalimarau Airport," vol. 11, no. 2, pp. 72–80, 2026.
- [15] A. Febrianto and R. A. Siroj, "Studi Literatur: Landasan dalam Memilih Metode Penelitian yang Tepat," vol. 1, no. 2, pp. 259–263, 2024.
- [16] M. Sarib and A. Rasak, "Semi-Structured Interview: A Methodological Reflection on the Development of a Qualitative Research Instrument in Educational Studies," vol. 12, no. 1, pp. 22–29, 2022, doi: 10.9790/7388-1201052229.
- [17] A. Maspupah, "Literature Review: Advantages and Disadvantages of Black Box Testing," vol. 21, no. 2, 2024.