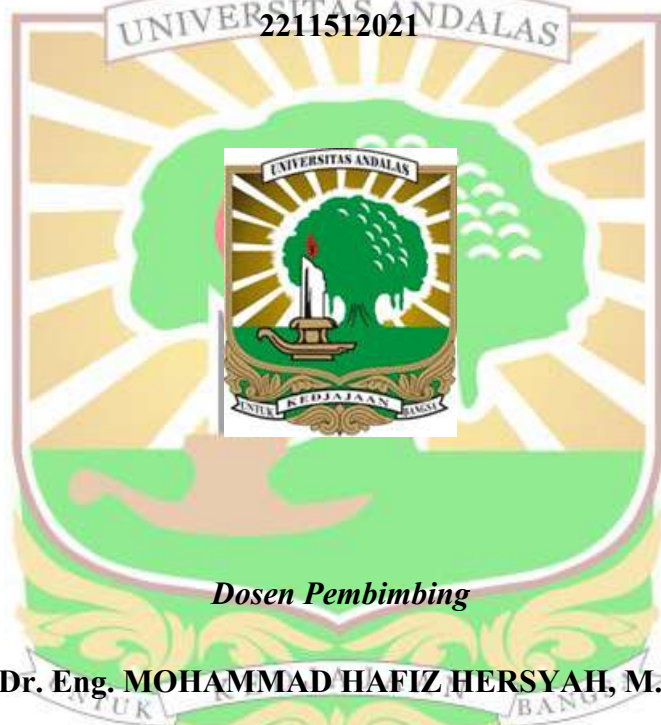


**SISTEM DETEKSI DAN MITIGASI KELELAWAR BERBASIS *FUZZY*
LOGIC PADA LINGKUNGAN KAMPUS DENGAN INTEGRASI WEB
*DASHBOARD***

LAPORAN TUGAS AKHIR TEKNIK KOMPUTER

DAUD KURNIAWAN

2211512021



Dosen Pembimbing

Dr. Eng. MOHAMMAD HAFIZ HERSYAH, M.T

NIP : 198511022008121003

DEPARTEMEN TEKNIK KOMPUTER

FAKULTAS TEKNOLOGI INFORMASI

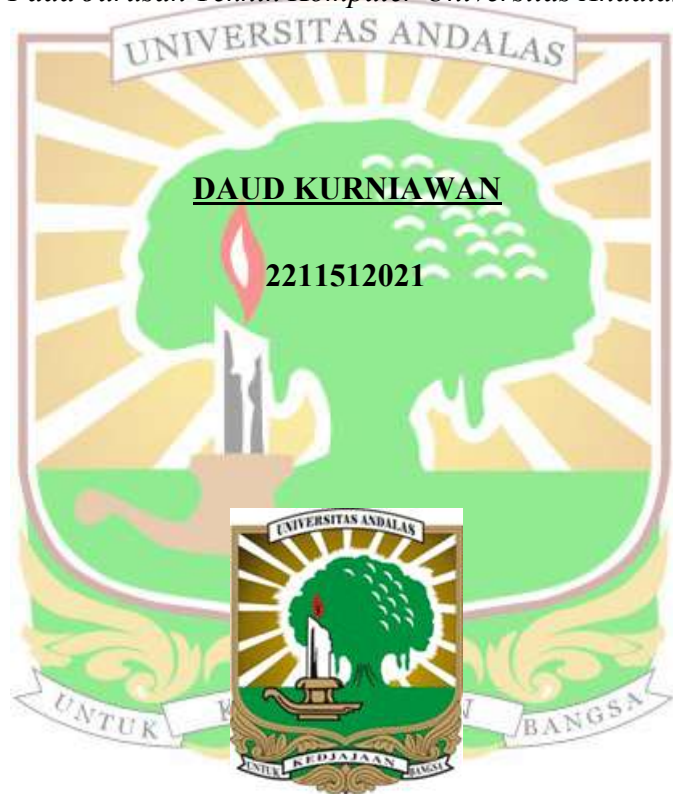
UNIVERSITAS ANDALAS

2026

SISTEM DETEKSI DAN MITIGASI KELELAWAR BERBASIS *FUZZY LOGIC* PADA LINGKUNGAN KAMPUS DENGAN INTEGRASI WEB DASHBOARD

LAPORAN TUGAS AKHIR

*Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Menyelesaikan Program Sarjana
Pada Jurusan Teknik Komputer Universitas Andalas*



DEPARTEMEN TEKNIK KOMPUTER

FAKULTAS TEKNOLOGI INFORMASI

UNIVERSITAS ANDALAS

2026

HALAMAN PENGESAHAN

Nama : Daud Kurniawan
No.BP : 2211512021
Judul Tugas Akhir : **SISTEM DETEKSI DAN MITIGASI
KELELAWAR BERBASIS FUZZY LOGIC
PADA LINGKUNGAN KAMPUS DENGAN
INTEGRASI WEB DASHBOARD**

Tugas Akhir ini disetujui oleh Dosen Pembimbing dan disahkan oleh Ketua Departemen Teknik Komputer, Fakultas Teknologi Informasi Universitas Andalas.

Demikianlah lembaran pengesahan ini dibuat untuk diketahui bersama.

Padang, 20 Agustus 2026

Menyetujui,

Pembimbing I

(Dr. Eng. Mohammad Hafiz Hersyah, M.T.)

NIP. 198511022008121003

Mengetahui :

Ketua Departemen Teknik Komputer
Fakultas Teknologi Informasi
Universitas Andalas

Padang, 20 Agustus 2026

(Dr. Eng. Tati Erlina, M.T.)

NIP. 197804142002122003

LEMBARAN PERSETUJUAN TUGAS AKHIR

Dengan ini dinyatakan bahwa :

Nama : Daud Kurniawan

No.BP : 2211512021

Judul Tugas Akhir : **SISTEM DETEKSI DAN MITIGASI KELELAWAR
BERBASIS *FUZZY LOGIC* PADA LINGKUNGAN
KAMPUS DENGAN INTEGRASI WEB
DASHBOARD**

telah melaksanakan ujian sidang Tugas Akhir dan telah disetujui Tugas Akhirnya sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T) melalui Sidang Tugas Akhir (TA) yang diadakan pada tanggal 20 Juli 2026 berdasarkan ketentuan yang berlaku.

Demikianlah halaman pengesahan ini dibuat untuk digunakan sebagaimana mestinya.

Mengetahui :

Ketua Departemen Teknik Komputer
Fakultas Teknologi Informasi
Universitas Andalas
Padang, 20 Agustus 2026



PERNYATAAN

Dengan ini menyatakan bahwa :

1. Tugas Akhir dengan judul “Sistem Deteksi dan Mitigasi Kelelawar Berbasis *Fuzzy Logic* Pada Lingkungan Kampus Dengan Integrasi Web Dashboard” adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik (Sarjana, Magister, dan Doktor), baik di Universitas Andalas maupun di perguruan tinggi lainnya.
2. Tugas Akhir ini murni gagasan dan rancangan saya sendiri, tanpa bantuan tidak sah dari pihak lain, kecuali bantuan dan arahan dari tim pembimbing.
3. Tugas Akhir ini tidak terdapat hasil karya atau pendapat yang ditulis atau dipublikasikan oleh orang lain, kecuali dikutip secara tertulis dengan jelas dan dicantumkan sebagai acuan dalam tulisan saya dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya, dan apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik serta sanksi lainnya sesuai dengan norma dan ketentuan lain yang berlaku.

Demikianlah surat ini dibuat, untuk dapat dipergunakan sebagaimana mestinya.

Padang, 20 Agustus 2026

Yang membuat pernyataan,



Daud Kurniawan
No.BP. 2211512021

LEMBAR PERSEMBAHAN



Segala puji bagi Allah yang telah memberikan rahmat, berkah, petunjuk, bimbingan, kemudahan dan ilmu-Nya yang tiada terhingga hingga akhirnya sampai pada tahap penyelesaian tugas akhir ini. Salawat serta salam kepada suri tauladan umat manusia, baginda Rasulullah Nabi Muhammad SAW, Allahumma sholli Ala Sayyidina Muhammad Wa Ala Ali Sayyidina Muhammad.

Keluarga

Kepada orang tua tercinta, terima kasih yang tak terhingga atas segala jasa, kasih sayang, dan pengorbanan yang telah kalian berikan kepada anak tengahmu ini. Tidak ada rangkaian kata yang mampu mewakili perasaan ini. Terima kasih banyak telah mengantarkan anakmu ini menjadi seorang Sarjana. Tanpa do'a dan dukungan orang tua, baik dalam finansial, moral, dan emosional, aku mungkin tidak akan mampu mencapai titik ini. Untuk **Abang**, **Adikku**, dan **Aya**, terima kasih banyak telah hadir, memberikan bantuan, serta dukungan tiada henti selama masa perkuliahan. Aku menyayangi kalian semua. Semoga keluarga kita senantiasa dilimpahi kebahagiaan, kesehatan, rasa syukur, dan perlindungan dari Allah SWT.

Teman-Teman Seperjuangan

Terima kasih kepada “Domba Tersesat” yang sudah menemani saya di masa yang baik maupun buruk karena Aan, Ikhsan, Alif, Lucky, Abil, Austin, Iman, Abe, Ebit, Haykal, Imam, Fikri, Fadhli, Mirando, Fajri, Fikra Sahabat selamanya

Dosen Departemen Teknik Komputer

Untuk Dosen Departemen Teknik Komputer Rasa terima kasih yang mendalam penulis ucapkan kepada Bapak **Dr. Eng Mohammad Hafiz Hersyah, M.T** selaku dosen pembimbing. Terima kasih telah membimbing saya dengan sabar selama proses pembuatan laporan ini, mulai dari seminar proposal hingga sidang tugas akhir, serta atas saran dan jawaban luar biasa dari setiap pertanyaan yang saya ajukan. Terima kasih juga saya ucapkan kepada dosen Pembimbing Akademik saya, **Yoan Purbolingga, M.T.**, yang telah membimbing alur akademik penulis dari tahap mahasiswa baru hingga akhir masa perkuliahan.

Daud Kurniawan

Teruntuk Diriku Sendiri, semoga kedepannya bisa lebih lancar lagi dan masih memungkinkan untuk menggapai lebih tinggi lagi

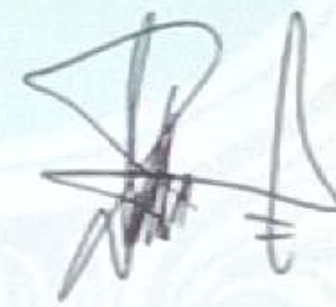


KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul “Sistem Deteksi dan Mitigasi Kelelawar Berbasis *Fuzzy Logic* Pada Lingkungan Kampus dengan Integrasi Web Dashboard”. Laporan ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan Tugas Akhir di Departemen Teknik Komputer, Universitas Andalas.

Penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada Bapak Rifki Suwandi, M.T. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan dan bimbingan kepada penulis selama proses penyelesaian tugas akhir ini. Dan juga kepada kedua orang tua serta teman-teman yang selalu memberikan dukungan dan semangat kepada penulis. Penulis berharap semoga Laporan Tugas Akhir ini bermanfaat bagi kita semua. Akhir kata, penulis mengucapkan terimakasih.

Padang, 20 Agustus 2026



Daud Kurniawan

SISTEM DETEKSI DAN MITIGASI KELELAWAR BERBASIS *FUZZY LOGIC* PADA LINGKUNGAN KAMPUS DENGAN INTEGRASI WEB DASHBOARD

Daud Kurniawan ¹, Dr. Eng. Mohammad Hafiz Hersyah, M.T. ²

¹ Mahasiswa Teknik Komputer, Fakultas Teknologi Informasi, Universitas Andalas

² Dosen Teknik Komputer, Fakultas Teknologi Informasi, Universitas Andalas

ABSTRAK

Kehadiran kelelawar di dalam struktur tertutup seperti auditorium kampus menyebabkan gangguan kenyamanan, risiko kerusakan struktural karena sifat biokorosif dari guano, dan potensi bahaya kesehatan zoonotik. Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan sistem deteksi dan mitigasi kelelawar berbasis analisis akustik ultrasonik, yang mengintegrasikan mikrokontroler ESP32-S3, sensor mikrofon digital INMP441, algoritma *Fast Fourier Transform* (FFT), dan Logika Fuzzy Mamdani sebagai metode pengambilan keputusan. Ketika sinyal ekolokasi kelelawar terdeteksi dengan skor keyakinan *fuzzy* di atas ambang batas, sistem mengaktifkan aktuator *piezo tweeter* yang memancarkan gelombang ultrasonik menggunakan metode sapuan frekuensi (*frequency-sweeping*) untuk mengganggu navigasi kelelawar secara non-lethal (tanpa membunuh). Data deteksi ditransmisikan melalui protokol ESP-NOW ke *gateway* dan diteruskan ke dasbor web berbasis Firebase Realtime Database untuk pemantauan jarak jauh. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor mampu menangkap sinyal ekolokasi pada radius hingga 5 meter dengan persentase kesalahan frekuensi di bawah 15%, latensi pemrosesan keseluruhan (FFT dan inferensi *fuzzy*) di bawah 100 ms, dan rata-rata waktu transmisi data *end-to-end* sebesar 1,2–1,8 detik pada jarak hingga 30 meter tanpa halangan. Aktuator berhasil menghasilkan intensitas suara hingga 90 dB SPL pada jarak 1 meter. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem yang dirancang layak untuk diimplementasikan sebagai solusi mitigasi kelelawar yang adaptif, *real-time*, dan non-destruktif untuk lingkungan kampus.

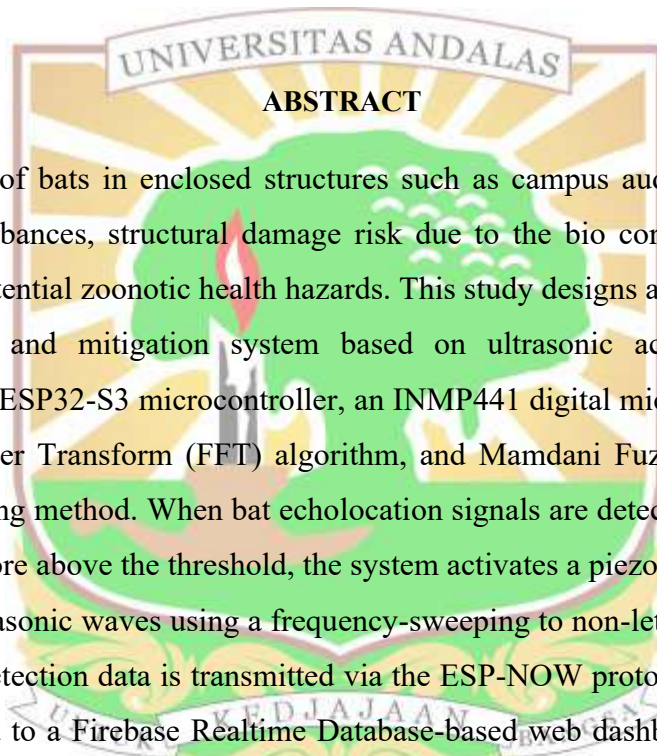
Kata Kunci: deteksi kelelawar, logika *fuzzy*, ESP32, akustik ultrasonik, IoT

FUZZY LOGIC-BASED BAT DETECTION AND MITIGATION SYSTEM FOR CAMPUS ENVIRONMENTS WITH WEB DASHBOARD INTEGRATION

Daud Kurniawan¹, Dr. Eng. Mohammad Hafiz Hersyah, M.T²

¹ Undergraduate Student, Computer Engineering Major, Information Technology
Faculty, Andalas University

² Computer Engineering, Information Technology Faculty, Andalas University



The presence of bats in enclosed structures such as campus auditoriums causes comfort disturbances, structural damage risk due to the bio corrosive nature of guano, and potential zoonotic health hazards. This study designs and implements a bat detection and mitigation system based on ultrasonic acoustic analysis, integrating an ESP32-S3 microcontroller, an INMP441 digital microphone sensor, the Fast Fourier Transform (FFT) algorithm, and Mamdani Fuzzy Logic as the decision-making method. When bat echolocation signals are detected with a fuzzy confidence score above the threshold, the system activates a piezo tweeter actuator that emits ultrasonic waves using a frequency-sweeping to non-lethally disrupt bat navigation. Detection data is transmitted via the ESP-NOW protocol to a gateway and forwarded to a Firebase Realtime Database-based web dashboard for remote monitoring. Test results show that the sensor is able to capture echolocation signals at a radius of up to 5 meters with a frequency error below 15%, an overall processing latency (FFT and fuzzy inference) below 100 ms, and an average end-to-end data transmission time of 1.2–1.8 seconds at distances up to 30 meters without obstruction. The actuator successfully produced sound intensity of up to 90 dB SPL at a distance of 1 meter. These results indicate that the designed system is feasible for deployment as an adaptive, real-time, and non-destructive bat mitigation solution for campus environments.

Keywords: bat detection, fuzzy logic, ESP32, ultrasonic acoustics, IoT

DAFTAR ISI

DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xv
BAB I	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Pengenalan Masalah.....	1
1.1.1 Informasi Pendukung Masalah.....	4
1.1.2 Analisis Masalah Dan Konstrain.....	9
1.1.3 Kebutuhan yang harus dipenuhi.....	16
1.1.4 Tujuan	16
1.2 Solusi.....	16
1.2.1 Karakteristik Produk	17
1.2.2 Usulan Solusi	19
1.2.3 Analisis Usulan Solusi	32
1.2.4 Solusi Yang Dipilih.....	36
BAB II.....	39
SPESIFIKASI	39
2.1 Spesifikasi Produk.....	39
2.1.1 Spesifikasi Produk Sub-Sistem Mitigasi Kelelawar	39
2.2 Analisis Kebutuhan Daya.....	61

2.2.1 Perhitungan Kebutuhan Daya	61
2.2.2 Analisa dan Pemilihan PSU	62
2.3 Verifikasi.....	63
2.3.1 Verifikasi Sub-Sistem Mitigasi Kelelawar.....	63
2.4 Perencanaan Pasar	66
2.4.1 Perkiraan Biaya Sistem Mitigasi Kelelawar	66
BAB III RANCANGAN.....	72
3.1 Rancangan Umum Sistem	72
3.1.1 Rancangan Umum Sub Sistem Mitigasi Kelelawar	72
3.2 Rancangan Proses	76
3.2.1 Rancangan Proses Sub-Sistem Mitigasi Kelelawar	76
3.3 Rancangan Detail Komponen Sistem.....	80
3.4 Rencana Jadwal Pengerjaan	90
BAB IV IMPLEMENTASI.....	92
4.1 Implementasi Sistem	92
4.1.1 Implementasi Perangkat Keras.....	92
4.1.2 Implementasi Perangkat Lunak.....	96
4.2 Pengujian Sistem.....	117
4.2.1 Pengujian Sensor (INMP441)	117
4.2.2 Pengujian Aktuator <i>Piezo Tweeter</i> (Sistem Pengusiran)	122

4.2.3 Pengujian Transmisi Data (ESP-NOW dan Website <i>Dashboard</i>).....	126
4.2.4 Pengujian ESP32.....	129
4.2.5 Pengujian Daya Alat	135
4.2.6 Pengujian Keseluruhan Sistem.....	137
BAB V PENUTUP.....	142
5.1 Kesimpulan	142
5.2 Saran.....	142
DAFTAR PUSTAKA	144
LAMPIRAN.....	150

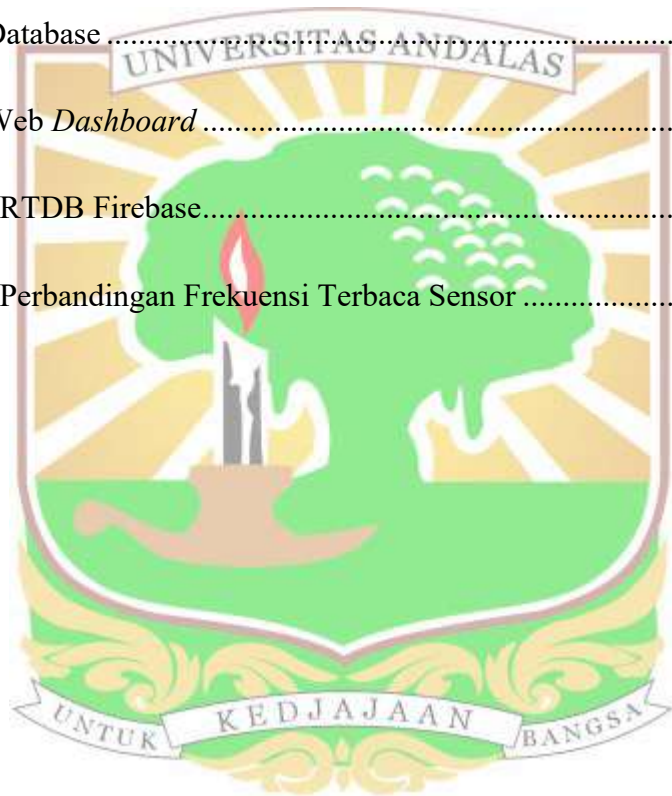


DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Persentase kelelawar yang melakukan <i>roosting</i> pada bangunan berdasarkan spesiesnya [1].....	2
Gambar 1. 2 Tanda-Tanda Keberadaan Kelelawar pada Auditorium.....	6
Gambar 1. 3 <i>Ultrasonic Microphone</i> [9].....	20
Gambar 1. 4 Cara Kerja <i>Fuzzy Logic</i> [10]	21
Gambar 1. 5 <i>Ultrasonic Transmitter</i> [9]	23
Gambar 1. 6 Cara Kerja IR-Cut [10].....	24
Gambar 1. 7 Beda PIR dan IR [11]	28
Gambar 1. 8 karakteristik sensor suhu jenis NTC thermistor [12]	29
Gambar 1. 9 Mekanisme untuk menangkap kelelawar	31
Gambar 1. 10 <i>Fuzzy Logic</i> (Mamdani) [14].....	37
Gambar 2. 1 SPH0645 [17].....	44
Gambar 2. 2 INMP441 [18]	44
Gambar 2. 3 ADMP401 [19].....	44
Gambar 2. 4 NodeMCU ESP32 [21].....	46
Gambar 2. 5 Raspberry Pi 4 [22]	47
Gambar 2. 6 Arduino Uno [23]	47
Gambar 2. 7 Transduser Ultrasonik PZT-4 [24]	50
Gambar 2. 8 Transduser Linear [25]	50
Gambar 2. 9 Piezo Tweeter [26]	51

Gambar 2. 10 Modul MicroSD Card [27].....	53
Gambar 2. 11 SPIFFS [28].....	53
Gambar 2. 12 Cloud Storage [29]	53
Gambar 2. 13 Adaptor Daya 12V 5A [32].....	56
Gambar 2. 14 Li-ion Pack [31]	56
Gambar 2. 15 Adapter PoE [30].....	57
Gambar 2. 16 LM2596 [33].....	59
Gambar 2. 17 XL4016 [34].....	59
Gambar 2. 18 MP1584 [35]	59
Gambar 3. 1 Blok Diagram Sistem Mitigasi Kelelawar	72
Gambar 3. 2 Gambar Teknik Sistem Mitigasi Kelelawar	74
Gambar 3. 3 Gambar 3D Sistem Mitigasi Kelelawar	75
Gambar 3. 4 Gambar 3D Aplikasi Sistem Mitigasi Kelelawar.....	76
Gambar 3. 5 <i>Flowchart</i> Rancangan Proses Sistem Mitigasi.....	77
Gambar 3. 6 <i>Flowchart</i> Sistem <i>Fuzzy Logic</i>	78
Gambar 3. 7 Skematik Rangkaian Hardware Mitigasi Kelelawar	80
Gambar 3. 8 Fungsi Keanggotaan.....	86
Gambar 3. 9 Hasil Defuzzifikasi.....	90
Gambar 3. 10 Gantt Chart Kegiatan.....	91
Gambar 4. 1 Implementasi keseluruhan sistem	92
Gambar 4. 2 Gambar teknik casing baru.....	93

Gambar 4. 3 Casing Versi Baru	93
Gambar 4. 4 Implementasi Sistem	94
Gambar 4. 5 Implementasi Perangkat Keras Pada Casing (a) Komponen Pada Dalam Casing (b) Komponen Pada Luar Casing	95
Gambar 4. 6 <i>Flowchart</i> sistem baru	103
Gambar 4. 7 Tampilan Web <i>Dashboard</i>	104
Gambar 4. 8 Database	104
Gambar 4. 9 Web <i>Dashboard</i>	116
Gambar 4. 10 RTDB Firebase	117
Gambar 4. 11 Perbandingan Frekuensi Terbaca Sensor	121



DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Hasil Survei Keberadaan Kelelawar pada Auditorium	5
Tabel 1. 2 Himpunan <i>Fuzzy</i>	21
Tabel 1. 3 Keterangan Hubungan Simbol HoQ	32
Tabel 1. 4 <i>House of Quality</i> Sub-Sistem Mitigasi Kelelawar	32
Tabel 2. 1 Spesifikasi Produk.....	42
Tabel 2. 2 Perbandingan Spesifikasi Sensor Akustik	44
Tabel 2. 3 Perbandingan Spesifikasi Platform Komputasi	47
Tabel 2. 4 Perbandingan Spesifikasi Transduser (Aktuator)	51
Tabel 2. 5 Perbandingan Metode Penyimpanan Data	54
Tabel 2. 6 Perbandingan Metode Catu Daya	57
Tabel 2. 7 Perbandingan modul step down	59
Tabel 2. 8 Verifikasi Kebutuhan Sistem	63
Tabel 2. 9 <i>Product Cost</i>	67
Tabel 2. 10 <i>Development Cost</i>	68
Tabel 3. 1 Pin Out sistem	82
Tabel 3. 2 Himpunan <i>Fuzzy</i> Variabel Intensitas Sinyal	84
Tabel 3. 3 Himpunan <i>Fuzzy</i> Variabel Frekuensi	84

Tabel 3. 4 Himpunan <i>Fuzzy</i> Variabel Durasi Pulsa	85
Tabel 3. 5 Himpunan <i>Fuzzy</i> Variabel Tingkat Keyakinan	85
Tabel 3. 6 Rencana Jadwal Pengerjaan	90
Tabel 4. 1 Himpunan <i>Fuzzy</i> Variabel Waktu (Jam)	96
Tabel 4. 2 Aturan <i>Fuzzy</i>	97
Tabel 4. 3 Proses Monitoring dan Pengusiran Kelelawar	105
Tabel 4. 4 Pengiriman Data ke Database Website	113
Tabel 4. 5 Pengujian INMP441 Terhadap Suara Kelelawar (Chirovox)	118
Tabel 4. 6 Hasil Pengujian Rentang Frekuensi dan Waktu Siklus <i>Sweeping</i>	123
Tabel 4. 7 Hasil Pengujian Intensitas Suara Aktuator terhadap Jarak	124
Tabel 4. 8 Pengujian Transmisi Data (ESP-NOW dan <i>Website Dashboard</i>)	127
Tabel 4. 9 Pengujian Waktu Eksekusi ESP32	129
Tabel 4. 10 Keputusan <i>Fuzzy</i> Terhadap Suara Inputan	130
Tabel 4. 11 Hasil Pengujian Daya Alat	136
Tabel 4. 12 Hasil Pengujian Keseluruhan Sistem	138

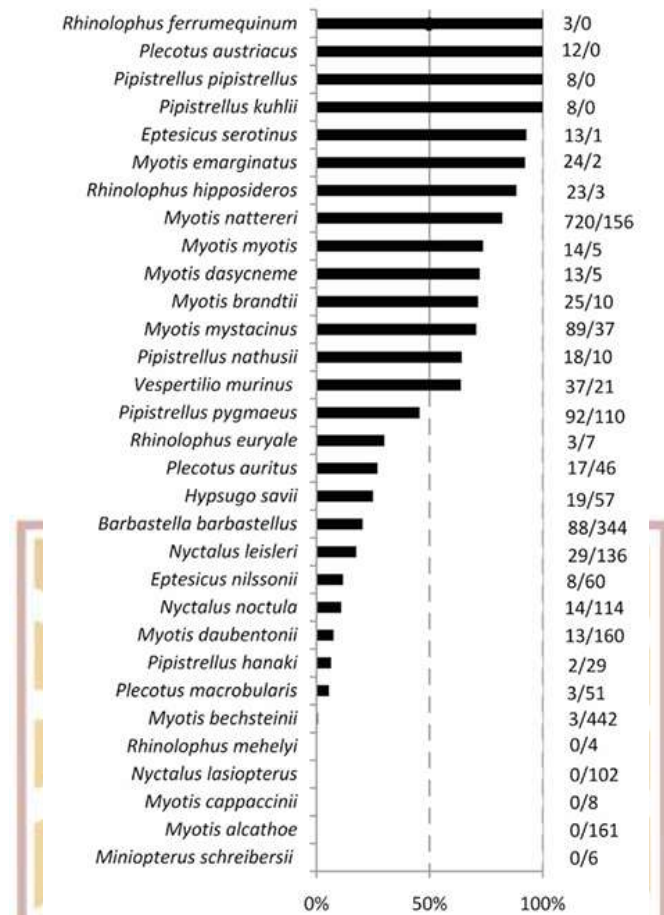
BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Pengenalan Masalah

Lingkungan kampus harusnya menjadi ruang akademik yang aman, tertib, serta mampu menunjang seluruh proses pendidikan secara optimal. Universitas Andalas sebagai salah satu institusi pendidikan tinggi memiliki komitmen dalam menciptakan lingkungan akademik yang kondusif bagi seluruh warga universitas. Namun, dalam praktiknya kompleksitas aktivitas kampus yang tinggi berpotensi menimbulkan berbagai permasalahan apabila tidak didukung oleh sistem tata kelola, pengawasan, dan pengendalian lingkungan yang optimal. Kondisi tersebut dapat berdampak pada kualitas proses pembelajaran, kenyamanan warga universitas, serta citra institusi.

Gangguan muncul pada berbagai aspek lain di lingkungan kampus. Pada salah satu bangunan besar seperti auditorium yang memiliki luas 7.003,65 m dengan panjang 75 m, lebar 60 m, sering terjadi masuknya kelelawar yang menimbulkan bau menyengat, kotoran hewan, serta risiko penyakit dan kerusakan plafon, menunjukkan lemahnya pengawasan ruang tertutup. Kelelawar merupakan kelompok mamalia dengan kemampuan adaptasi tinggi terhadap lingkungan buatan manusia. Sekitar 40% spesies kelelawar tercatat mampu memanfaatkan struktur antropogenik seperti gedung, jembatan, dan rumah sebagai lokasi *roosting* atau tempat bertengger.[1][2] Kondisi ruang tertutup dengan pencahayaan rendah dan ventilasi terbatas, seperti halnya auditorium akan menarik keberadaan kelelawar. Hal ini menunjukkan bahwa bangunan publik berpotensi besar menjadi tempat aktivitas kelelawar, terutama ketika faktor lingkungan mendukung.



Gambar 1. 1 Persentase kelelawar yang melakukan *roosting* pada bangunan berdasarkan spesiesnya [1]

Selain dari aspek kehadiran, faktor yang tidak kalah penting adalah karakteristik guano kelelawar. Analisis kimia menunjukkan guano yang menua dapat memiliki pH sangat asam berkisar 2,1–5,6, dan pada kondisi kering pH dapat turun hingga 2,7–4,1 [3]. Keasaman ini berkontribusi pada proses biokorosi yang mempercepat kerusakan material karbonat maupun logam pada struktur bangunan. Dampak tersebut menyebabkan biaya pemeliharaan bangunan meningkat, serta menurunkan umur material. Dari sisi kesehatan, paparan guano juga berisiko menimbulkan penyakit zoonotik. Beberapa kasus histoplasmosis yang tercatat dalam literatur klinis secara langsung dikaitkan dengan paparan guano kelelawar di ruang publik [5]. *Histoplasma capsulatum*, jamur yang sering ditemukan dalam guano, dapat menghasilkan spora mikroskopis yang menyebar ke udara dan menimbulkan infeksi pernapasan pada manusia. Meskipun proporsinya relatif kecil dari total kasus

histoplasmosis, bukti epidemiologis ini cukup kuat untuk menganggap keberadaan kelelawar di auditorium sebagai ancaman kesehatan nyata.

Kelelawar aktif pada malam hari dan mengandalkan ekolokasi ultrasonik untuk navigasi. Hal ini membuka peluang penggunaan teknologi akustik untuk mendeteksi keberadaan mereka. Penelitian menunjukkan bahwa koloni kelelawar dalam bangunan dapat mencapai puluhan hingga ribuan individu, tergantung ukuran ruang dan spesies [5]. Aktivitas dalam jumlah besar ini bukan hanya memperkuat gangguan bagi pengguna, tetapi juga meningkatkan akumulasi kotoran guano secara signifikan. Meskipun kelelawar dikenal sebagai satwa nokturnal, pada siang hari mereka tidak sepenuhnya hilang dari gedung auditorium. Hal ini terjadi karena kelelawar menggunakan auditorium sebagai lokasi roosting atau tempat istirahat siang hari. Struktur atap yang tinggi, minimnya cahaya alami, dan kondisi relatif tenang menjadikan auditorium tempat yang ideal bagi koloni kelelawar untuk menetap pada siang hari. Dengan demikian, keberadaan kelelawar dapat ter-amati sepanjang hari, meskipun tingkat aktivitas terbang lebih tinggi pada malam hari.

Dengan demikian, masalah kelelawar di gedung auditorium bukan hanya sekedar gangguan kenyamanan, melainkan memiliki dimensi ekologis, struktural, dan kesehatan yang terukur secara ilmiah. Fakta ini menguatkan urgensi perlunya solusi berbasis teknologi yang dapat mendeteksi, memantau, dan mengendalikan keberadaan kelelawar secara adaptif serta berkelanjutan

Capstone Project ini dikerjakan secara berkelompok dengan mengangkat beberapa permasalahan, sehingga dalam implementasi project yang ditargetkan, akan menghasilkan empat produk dengan tujuan penyelesaian yang berbeda. Keempat permasalahan yang telah dijabarkan, diperlukan adanya pendekatan baru yang tidak hanya mengandalkan pengawasan manual manusia atau infrastruktur fisik yang mahal.

Stakeholder yang terkait dengan permasalahan ini adalah Mahasiswa dan dosen, Pengelola Fasilitas dan Kebersihan Kampus, Manajemen Universitas, Keamanan Kampus / Satuan Pengamanan (Satpam)

1. Mahasiswa Dan Dosen

Mahasiswa dan dosen sebagai pengguna utama ruang belajar, auditorium, dan fasilitas kampus akan memperoleh lingkungan akademik yang lebih nyaman apabila berbagai gangguan seperti kebisingan, ancaman keselamatan, atau kondisi ruang yang tidak terawasi dapat diatasi. Kenyamanan belajar meningkat, risiko gangguan kesehatan berkurang, dan kegiatan akademik maupun non-akademik dapat berlangsung lebih efektif tanpa interupsi dari faktor-faktor eksternal yang seharusnya dapat dicegah.

2. Pengelola Fasilitas dan Kebersihan Kampus

Petugas pengelola gedung dan kebersihan kampus sangat bergantung pada kesiapan sistem pengawasan. Dengan adanya perbaikan tata kelola dan sistem deteksi otomatis, beban kerja mereka dalam menangani kerusakan fasilitas, pembersihan akibat gangguan hewan, maupun pemantauan area rawan dapat berkurang secara signifikan. Hal ini juga berdampak pada efisiensi biaya pemeliharaan jangka panjang.

3. Manajemen Universitas

Pihak manajemen memerlukan data, keamanan, dan pengawasan yang baik untuk menjaga kualitas layanan kepada civitas akademika. Ketika masalah seperti kebisingan, pelanggaran etika, atau kerusakan fasilitas dapat diminimalkan melalui sistem yang terintegrasi, maka komitmen universitas terhadap kenyamanan, keamanan, serta standar kualitas kampus akan semakin kuat. Hal ini juga berdampak positif pada citra institusi di mata mahasiswa, dosen, serta pihak eksternal.

1.1.1 Informasi Pendukung Masalah

Permasalahan menurunnya kualitas lingkungan akademik di kampus diperkuat oleh berbagai data survei, kajian ilmiah, serta fakta lapangan yang berasal dari aspek kebisingan, keamanan fasilitas, kesehatan lingkungan, hingga perilaku sosial warga univ. Setiap permasalahan yang muncul tidak berdiri sendiri, tetapi saling berkaitan dan menunjukkan lemahnya tata kelola serta kurangnya sistem pengawasan

terpadu. Berikut adalah informasi pendukung yang memperkuat urgensi masalah tersebut

1.1.1.1 Gangguan Fasilitas Kampus oleh Kelelawar di Auditorium

Berdasarkan observasi, kerusakan oleh kelelawar telah mencapai tahap yang dapat disadari oleh pengguna auditorium. Metode konvensional seperti pembersihan manual dinilai tidak efektif dan boros anggaran operasional kampus. Juga ada beberapa faktor kenapa kelelawar menetap di Auditorium:

1. Faktor Lingkungan Gedung Yang Mempunyai Banyak Sudut Yang Tinggi Dan Minim Penerangan

Tabel 1. 1 Hasil Survei Keberadaan Kelelawar pada Auditorium

Area	Kondisi	Foto
Tangga Kanan Belakang	Plafon dan dinding yang berubah warna dan tepat di bawahnya terdapat guano	
Sayap Kanan Tribun	Plafon berlubang dan dinding yang berubah warna dan tepat di bawahnya terdapat guano	

Belakang Tribun	Plafon dan dinding yang berubah warna dan tepat di bawahnya terdapat guano	
-----------------	--	---

Auditorium UNAND memiliki luas 7.003,65 m dengan panjang 75 m, lebar 60 m, dan tinggi interior yang mencapai 15 m dengan pencahayaan yang merata pada lantai 1, tetapi pada lantai 2 sangat bergantung cahaya dari luar dan ada beberapa sudut yang gelap terlebih lagi malam hari penerangan tetap dimatikan untuk penghematan, dan relatif sejuk. Kondisi ini sangat sesuai dengan preferensi kelelawar untuk *roosting*.



Gambar 1. 2 Tanda-Tanda Keberadaan Kelelawar pada Auditorium

Pada survei langsung ke gedung auditorium juga didapati bahwa daerah yang ditempati kelelawar biasanya terdapat pada sudut gedung, contohnya seperti pada

foto yaitu daerah tangga di belakang kiri gedung. Faktor seperti ventilasi yang ada sepanjang gedung juga sangat berkontribusi besar terhadap keberadaan kelelawar pada auditorium

2. Faktor Biologis dan Perilaku Kelelawar Yang Dapat Terganggu Dengan Cahaya Dan Suara Frekuensi Tinggi

Penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa kelelawar insektivora menghasilkan panggilan ekolokasi dengan *peak frequency* dan *bandwidth* yang variatif, misalnya studi di Kolombia (2024) mencatat nilai-nilai spektral untuk beberapa spesies yang berkisar antara 20–120 kHz dalam panggilan ultrasonik mereka [6]. Lebih lanjut, penelitian molekuler pada spesies *Rhinolophus ferrumequinum* dan *Myotis pilosus* menunjukkan adaptasi kepekaan telinga terhadap frekuensi tinggi [7], mendukung kebutuhan sensor pendeteksi ultrasonik dengan rentang frekuensi minimum hingga sekitar 100 kHz atau lebih. Karena ruang auditorium memiliki kondisi khusus (pantulan, minim cahaya, *noise* manusia) yang dapat mempengaruhi sinyal, sistem yang dikembangkan perlu diuji secara lokal agar spesifikasi sensor cocok dengan kondisi nyata. Contohnya pada penggunaan *Song Meter SM4BAT* pada salah satu penelitian sehingga dapat di monitor aktivitas kelelawar di area tertentu

Selain kemampuan ekolokasi yang memungkinkan kelelawar untuk bernavigasi dan mencari makan, perilaku mereka juga sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan sekitarnya. Salah satu faktor yang paling dominan adalah cahaya. Sebagai hewan nokturnal, kelelawar umumnya sangat sensitif terhadap paparan cahaya terang karena dapat meningkatkan risiko predator. Penelitian menunjukkan bahwa cahaya buatan dengan intensitas tinggi, seperti lampu sorot atau LED putih, dapat mengganggu pola terbang dan menghambat aktivitas mencari makan mereka. Namun, gangguan ini tidak selalu bersifat permanen. Terdapat temuan bahwa beberapa spesies kelelawar memiliki kemampuan adaptasi terhadap paparan cahaya terus-menerus, yang menyebabkan metode pengusiran berbasis cahaya seringkali menjadi kurang efektif dalam jangka panjang .

Selain cahaya, gelombang ultrasonik menjadi faktor krusial lain yang mempengaruhi perilaku kelelawar. Karena mereka sangat bergantung pada

ekolokasi dengan frekuensi ultrasonik (umumnya 20–120 kHz), keberadaan suara buatan pada rentang frekuensi serupa dapat menimbulkan interferensi akustik [6]. Gangguan ini dapat mengakibatkan disorientasi, kesulitan navigasi, hingga memaksa kelelawar menjauh dari lokasi tersebut. Hal inilah yang mendasari mengapa perangkat pengusir berbasis ultrasonik dinilai lebih konsisten dibandingkan cahaya sebagai metode penanganan.

Untuk mengatasi permasalahan akibat dari kelelawar, sudah dilakukan beberapa upaya baik untuk mencegah ataupun penanganan langsung. Berikut beberapa metode atau solusi yang sudah ada sebelumnya:

1. Pemasangan Jaring atau Penutup Plafon

Metode ini dilakukan dengan cara menutup area yang sering digunakan kelelawar untuk masuk menggunakan jaring maupun penutup permanen. Kelebihannya adalah solusi ini dapat secara langsung mencegah kelelawar masuk ke area tertentu dan relatif efektif dalam jangka panjang. Akan tetapi, kelemahan dari metode ini adalah sulit diaplikasikan di seluruh area auditorium yang memiliki struktur luas dan tinggi. Selain itu, pemasangan jaring juga dapat mengurangi estetika bangunan serta membutuhkan biaya instalasi dan pemeliharaan yang tidak sedikit [8].

2. Penggunaan Cahaya Terang

Solusi lain yang sering digunakan adalah pemasangan lampu sorot untuk membuat area menjadi terang, sehingga kelelawar enggan tinggal di dalamnya. Kelebihan dari pendekatan ini adalah relatif mudah diterapkan, karena kelelawar umumnya menghindari area terang. Namun, kelemahannya adalah efek yang ditimbulkan hanya bersifat sementara. Beberapa spesies kelelawar dapat beradaptasi terhadap cahaya, sehingga metode ini menjadi kurang efektif dalam jangka panjang. Selain itu, penggunaan lampu sorot secara terus-menerus juga meningkatkan konsumsi energi listrik, yang berdampak pada biaya operasional gedung [3].

3. Pembersihan Manual Rutin

Pendekatan tradisional lainnya adalah melakukan pembersihan rutin terhadap kotoran kelelawar atau guano yang menumpuk di area auditorium. Kelebihan metode ini adalah dapat mengurangi bau tidak sedap dan menjaga kebersihan

ruangan dalam jangka pendek. Namun, kelemahannya adalah pembersihan manual tidak menyelesaikan sumber permasalahan karena kelelawar tetap akan kembali. Selain itu, kegiatan pembersihan memerlukan tenaga kerja tambahan, biaya operasional berulang, serta menimbulkan risiko kesehatan bagi petugas yang terpapar guano dalam jumlah besar [4].

Dari ketiga solusi tersebut, dapat dilihat bahwa upaya penanggulangan dan pencegahan kelelawar pada gedung ataupun bangunan lainnya, tetapi belum ada sistem yang sepenuhnya mampu menyelesaikan masalah ini dengan akurat, efisien, skalabilitas tinggi serta terjangkau untuk berbagai jenis bangunan. Inilah yang kemudian mendorong kebutuhan akan inovasi baru yang lebih efisien dan dapat diimplementasikan secara luas.

1.1.2 Analisis Masalah Dan Konstrain

1. Aspek Ekonomi dalam Konstrain keterjangkauan Harga Sistem

Aspek ekonomi dalam perancangan Sistem Tata Kelola Kampus berfokus pada keterjangkauan biaya pengembangan, implementasi, operasional dan pemeliharaan sistem agar solusi yang dirancang dapat direalisasikan secara berkelanjutan. Perancangan sistem harus menggunakan komponen perangkat keras dengan harga yang relatif terjangkau serta mudah diperoleh di pasaran. Penggunaan mikrokontroler, sensor dan modul komunikasi harus mempertimbangkan keseimbangan antara harga dan kinerja.

Untuk implementasi sistem nantinya, diperhatikan jumlah perangkat yang dipasang harus disesuaikan dengan kebutuhan area pemantauan agar tidak menimbulkan pemborosan anggaran. Penempatan perangkat harus mempertimbangkan cakupan deteksi optimal sehingga jumlah node sensor dapat diminimalkan. Seperti untuk sistem deteksi knalpot tidak standar ditempatkan pada beberapa portal utama kampus, sistem mitigasi kelelawar ditempatkan pada ruangan auditorium kampus, sistem keamanan kotak amal di tempatkan di masjid atau mushola sekitar kampus, dan untuk sistem pencegahan kasus kekerasan seksual itu digunakan secara

wearable oleh civitas akademika. Selain itu sistem juga harus dirancang dengan konsumsi daya listrik yang rendah untuk mengurangi biaya operasional jangka panjang, seperti dengan maksimal daya yang digunakan 9 Watt. Pemilihan teknologi komunikasi juga harus mempertimbangkan efisiensi penggunaan bandwidth serta biaya layanan jaringan. Sistem juga diharapkan mampu bekerja secara otomatis untuk meminimalkan kebutuhan tenaga operasional tambahan.

Selain itu sistem juga harus dirancang agar dapat digunakan oleh civitas akademika tanpa memerlukan perangkat tambahan berbiaya tinggi. Penggunaan aplikasi atau website berbasis smartphone menjadi solusi yang lebih ekonomis karena memanfaatkan perangkat yang sudah dimiliki pengguna, sehingga biaya produksi (*product cost*) untuk satu unit pada masing masing sistem ditargetkan berada pada kisaran maksimal Rp 2.000.000,00 yang mana sudah dipertimbangkan dengan biaya pengadaan perangkat keras, biaya instalasi dan implementasi sistem, biaya operasional serta biaya aksesibilitas pengguna sistem.

- a. Konstrain 1 (biaya) : Total biaya pengadaan dan implementasi untuk satu unit sistem dibatasi maksimal Rp 2.000.000,00. Batasan ini ditetapkan untuk memastikan efisiensi anggaran institusi pendidikan dan memungkinkan pengadaan dalam jumlah banyak sesuai kebutuhan area pemantauan kampus tanpa membebani neraca keuangan operasional tahunan.

2. Aspek Lingkungan dalam Konstrain Lingkungan Penggunaan

Dalam perancangan Sistem Tata Kelola Kampus aspek lingkungan menjadi batasan penting yang harus dipertimbangkan untuk memastikan bahwa implementasi teknologi tidak hanya berjalan efektif, namun juga ramah terhadap lingkungan fisik dan ekosistem kampus. Secara khusus, penggunaan sensor serta perangkat keras lainnya untuk deteksi kebisingan knalpot, mitigasi kelelawar, pengamanan kotak amal dan pencegahan kekerasan seksual harus memperhatikan dampak terhadap kualitas lingkungan dan makhluk hidup di sekitar kampus. Sistem pemantauan kebisingan knalpot harus dapat memastikan apakah knalpot motor kebisingannya melebihi 55 dB, sehingga ekosistem kampus tidak merasa terganggu.

Selain itu, mitigasi kelelawar dan interaksi manusia -satwa harus dirancang agar tidak merusak habitat alami dan mendukung keberlanjutan keanekaragaman hayati, sejalan dengan prinsip mitigasi konflik manusia-satwa yang menuntut keseimbangan antara kebutuhan manusia dan pelestarian spesies lokal tanpa gangguan berlebihan pada aktivitas biologis mereka. Implementasi pada sistem juga menghadirkan tantangan terhadap konsumsi energi, jejak karbon dan limbah elektronik, oleh karena itu sistem harus mempertimbangkan arsitektur hemat energi, desain perangkat yang efisien, serta strategi pengelolaan siklus hidup perangkat untuk meminimalkan dampak lingkungan dari produksi, penggunaan dan pembuangan komponen elektronik. Dengan demikian, batasan lingkungan ini tidak hanya memastikan teknologi berfungsi dengan baik, tetapi juga sejalan dengan prinsip keberlanjutan, pelestarian lingkungan kampus serta perlindungan terhadap kesehatan dan keseimbangan ekosistem di dalam dan sekitar kampus.

- b. Konstrain 2 (Sustainabilitas) : Guna mendukung pelestarian lingkungan dari ancaman limbah elektronik. Modul sistem yang ditempatkan di lingkungan terbuka harus dilengkapi dengan *casing* yang *waterproof* agar komponen di dalamnya tidak rentan mengalami korosi atau korsleting akibat hujan dan kelembapan tinggi. Selain itu, sistem yang bersifat *mobile* seperti perangkat *wearable* wajib menggunakan baterai yang dapat diisi ulang, dan rancangan perangkat keras (PCB) sebaiknya dibuat modular agar perbaikan dapat difokuskan pada komponen yang rusak tanpa perlu membuang keseluruhan unit alat serta hal tersebut juga sejalan dengan konsep sustainabilitas pada pengurangan limbah elektronik yang semakin marak pada saat ini.

3. Aspek Keberlanjutan dalam Konstrain Jangka Pengoperasian Sistem

Aspek keberlanjutan dalam konstrain jangka pengoperasian sistem menekankan pada kemampuan Sistem Tata Kelola Kampus untuk beroperasi secara stabil, andal dan berkesinambungan dalam periode penggunaan yang panjang. Sistem yang dirancang tidak hanya berfungsi dengan baik pada tahap implementasi awal, tetapi juga harus mampu mempertahankan performa operasionalnya meskipun terjadi

perubahan kondisi lingkungan, intensitas penggunaan serta perkembangan teknologi.

Dalam konstrain jangka pengoperasian, sistem harus menggunakan perangkat keras yang memiliki ketahanan terhadap kondisi lingkungan kampus seperti perubahan suhu, kelembaban, debu serta gangguan sehari-hari. Selain itu, perangkat harus memiliki umur pakai yang cukup panjang untuk mengurangi frekuensi penggantian komponen yang dapat mengganggu kontinuitas sistem. Sistem juga perlu dilengkapi dengan mekanisme pemantauan kondisi perangkat dan deteksi kesalahan agar gangguan operasional dapat diidentifikasi dan ditangani lebih cepat.

Konstrain jangka pengoperasian juga mencakup efisiensi penggunaan energi, dimana sistem harus dirancang dengan konsumsi daya yang rendah agar dapat beroperasi secara terus-menerus tanpa menimbulkan beban operasional yang tinggi. Penggunaan manajemen daya seperti model hemat energi dan optimasi data menjadi batasan penting dalam menjaga keberlanjutan operasional sistem.

Selain itu, sistem harus dirancang dengan arsitektur yang fleksibel dan modular sehingga memungkinkan pemeliharaan, perbaikan serta pengembangan sistem tanpa menghentikan keseluruhan operasional. Hal ini penting untuk memastikan sistem tetap relevan terhadap kebutuhan pengguna dalam jangka panjang. Dengan adanya batasan tersebut, sistem tata kelola kampus diharapkan mampu memberikan layanan pemantauan dan keamanan lingkungan secara berkelanjutan, efektif serta adaptif terhadap perubahan kondisi operasional di masa mendatang.

- c. konstrain 3 (*Power Efficient*) : Sistem dirancang dengan konsumsi daya kelistrikan yang efisien untuk menjamin operasional jangka panjang tanpa membebani biaya operasional. Pada perangkat stasioner (node deteksi knalpot, modul mitigasi kelelawar, dan pengaman kotak amal), konsumsi daya maksimal dibatasi ≤ 50 watt per unit melalui penerapan arsitektur *event-driven*, transisi otomatis ke mode *sleep* saat tidak ada pemicu deteksi. Sementara itu,

untuk perangkat *wearable* (pencegahan kekerasan seksual), sistem wajib menggunakan baterai isi ulang (*rechargeable*) dengan efisiensi daya yang mampu memberikan waktu operasional minimal 8 hingga 12 jam dalam satu kali pengisian penuh, guna memastikan perlindungan pengguna tetap aktif selama durasi kegiatan akademis harian tanpa interupsi.

4. Aspek Manufakturabilitas dalam Konstrain Produksi Sistem

Aspek manufakturabilitas dalam konstrain produksi sistem menekankan pada batasan perancangan agar sistem yang dikembangkan dapat diproduksi, dirakit dan direalisasikan secara teknis dengan proses yang efisien dan realistis. Konstrain ini bertujuan untuk memastikan bahwa desain sistem tidak hanya berfungsi secara teoritis, tetapi juga dapat diwujudkan menggunakan metode produksi yang tersedia, dengan mempertimbangkan kemudahan perakitan, ketersediaan komponen serta efisiensi waktu dan biaya produksi.

Dalam konstrain produksi, sistem harus dirancang menggunakan komponen perangkat keras yang mudah diperoleh di pasaran dan memiliki standar spesifikasi yang jelas. Pemilihan komponen harus mempertimbangkan kompatibilitas antar perangkat sehingga proses integrasi sistem dapat dilakukan tanpa memerlukan modifikasi yang kompleks. Selain itu, desain fisik perangkat seperti casing, tata letak rangkaian elektronik dan sistem pemasangan harus mendukung kemudahan proses produksi serta mengurangi potensi kesalahan perakitan.

Selain itu, sistem harus dirancang agar memungkinkan proses pengujian dan kontrol kualitas secara mudah. Hal ini penting untuk memastikan setiap perangkat yang diproduksi memiliki performa yang konsisten dan memenuhi standar operasional sistem. Dengan adanya batasan tersebut, sistem yang dikembangkan diharapkan dapat diproduksi secara berulang, memiliki kualitas yang seragam, serta mendukung implementasi sistem secara lebih luas di lingkungan kampus.

d. Konstrain 4 (Produksi Sistem) : Perancangan perangkat keras wajib menggunakan komponen yang tersedia secara luas di pasaran (seperti mikrokontroler standar, modul sensor *plug-and-play*, dan modul komunikasi umum) untuk menghindari kebutuhan modifikasi fabrikasi khusus yang memakan waktu dan biaya. Desain tata letak rangkaian harus diimplementasikan pada *Printed Circuit Board* (PCB) cetak ber standar, dipadukan dengan *casing* pelindung (baik menggunakan *3D printing* maupun kotak utilitas standar) yang mendukung sistem pemasangan sederhana. Selain itu, arsitektur perangkat keras harus menyertakan antarmuka pengujian atau titik uji yang mudah diakses guna memfasilitasi proses kalibrasi sensor dan kontrol kualitas secara cepat sebelum sistem diimplementasikan di lingkungan kampus.

5. Aspek Etika dalam Konstrain Privasi Pengguna

Aspek etika dalam konstrain privasi pengguna menekankan pada perlindungan data dan hak individu dalam penggunaan Sistem Tata Kelola Kampus. Sistem yang dirancang harus memastikan bahwa proses pengumpulan, pengolahan, penyimpanan dan distribusi data pengguna dilakukan secara bertanggung jawab serta tidak melanggar hak privasi civitas akademika. Konstrain ini bertujuan untuk mencegah penyalahgunaan data, menjaga kerahasiaan informasi pribadi, serta meningkatkan kepercayaan pengguna terhadap sistem yang dikembangkan.

Dalam penerapannya, sistem harus membatasi jenis data yang dikumpulkan hanya pada data yang benar-benar dibutuhkan untuk mendukung fungsi sistem. Pengumpulan data yang bersifat sensitif harus dihindari atau dilakukan dengan mekanisme perlindungan khusus seperti enkripsi dan data autentikasi pengguna. Selain itu, sistem harus memastikan bahwa akses terhadap data hanya dapat dilakukan oleh pihak yang memiliki otoritas serta sesuai dengan kebutuhan operasional sistem.

Konstrain privasi pengguna juga mencakup transparansi pengguna data, dimana pengguna harus mengetahui tujuan pengumpulan data serta bagaimana data tersebut digunakan. Sistem harus dirancang agar tidak melakukan pemantauan yang berlebihan yang dapat menimbulkan rasa tidak nyaman atau pelanggaran hak individu. Selain itu, sistem harus menyediakan mekanisme pengamanan data untuk mencegah kebocoran informasi akibat serangan siber atau kesalahan pengelolaan data.

Dalam konteks Sistem Tata Kelola Kampus, aspek etika ini sangat penting terutama pada subsistem yang berkaitan dengan pemantauan lingkungan dan sistem notifikasi darurat. Sistem harus dirancang untuk mendukung keamanan dan keselamatan pengguna tanpa mengurangi kebebasan dan hak privasi individu. Dengan adanya konstrain etika dalam perlindungan privasi pengguna, sistem diharapkan dapat memberikan manfaat secara optimal sekaligus menjaga kepercayaan dan kenyamanan civitas akademika dalam penggunaannya.

- e. Konstrain 5 (Keamanan Data Privasi) : Sistem wajib menerapkan prinsip di mana perekaman dan transmisi data dibatasi secara ketat hanya pada parameter yang esensial untuk memicu fungsi alat, tanpa melakukan pengawasan visual atau audio yang persisten (*non-intrusive surveillance*). Khusus pada subsistem pencegahan kekerasan seksual (*wearable*), transmisi data pelacakan lokasi dan identitas pengguna hanya boleh teraktivasi saat pemicu darurat ditekan, serta wajib diamankan menggunakan protokol enkripsi (seperti TLS/SSL pada transmisi IoT) untuk mencegah intersepsi. Selain itu, seluruh basis data pemantauan di sisi *server*—termasuk log peringatan knalpot dan notifikasi keamanan kotak amal—harus dikelola menggunakan sistem Kontrol Akses Berbasis Peran (*Role-Based Access Control / RBAC*) dan autentikasi berlapis, sehingga informasi log hanya dapat diakses dan dievaluasi oleh pemangku kepentingan atau otoritas kampus yang berwenang, guna menjamin integritas data dan menghormati hak privasi civitas akademika.

1.1.3 Kebutuhan yang harus dipenuhi

Berdasarkan analisis di atas maka didapatlah beberapa kebutuhan yang harus dipenuhi antara lain:

1. Diperlukan sistem pengawasan terintegrasi fisik dan digital.
2. Sistem harus bisa bekerja secara *real-time* agar mampu mengirimkan notifikasi atau pemberitahuan kepada pengurus/pihak keamanan kampus.
3. Sistem harus terjangkau secara biaya agar dapat diimplementasikan secara nyata dan mudah dalam penggunaannya tanpa harus memerlukan pengetahuan teknis yang rumit.

1.1.4 Tujuan

Berdasarkan analisis masalah dan kebutuhan yang harus dipenuhi maka tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Merancang sistem pengawasan yang menggabungkan keamanan fisik dengan sistem digital sehingga seluruh aktivitas dan kondisi fasilitas dapat dipantau secara terpusat.
2. Mengimplementasikan sistem yang mampu bekerja secara *real-time* untuk mendeteksi kejadian atau kondisi tertentu dan secara otomatis mengirimkan notifikasi atau peringatan kepada pengurus atau pihak keamanan kampus agar dapat segera ditindaklanjuti.
3. Mengembangkan sistem keamanan yang memiliki biaya implementasi yang terjangkau, mudah dioperasikan oleh pengguna tanpa memerlukan keahlian teknis khusus, serta dapat diterapkan secara nyata di lingkungan kampus.

1.2 Solusi

Berdasarkan permasalahan yang ditemukan di lingkungan kampus seperti penggunaan knalpot yang menimbulkan kebisingan, pencurian kotak amal di masjid kampus, tindakan pelecehan/kekerasan seksual serta gangguan kelelawar yang mengganggu kebersihan dan kenyamanan auditorium. Maka dibuatlah sebuah

sistem berbasis teknologi yang diharapkan mampu menjadi solusi dari permasalahan-permasalahan yang ada di kampus.

1.2.1 Karakteristik Produk

Berdasarkan permasalahan yang telah dijabarkan, alat atau produk yang akan dirancang memiliki berbagai fitur dasar. Fitur dasar merupakan fitur wajib yang perlu dimiliki alat atau produk yang akan dirancang agar performa yang dihasilkan memadai atau sesuai dengan tujuan perancangan. Adapun fitur dasar dari alat yang akan dirancang, antara lain:

A. Fitur Dasar

Pada keempat permasalahan yang diangkat, diperlukan fitur dasar yang berbeda. Fitur dasar menyesuaikan dengan kebutuhan dalam pengimplementasian, sehingga sistem jauh lebih efektif dalam menyelesaikan permasalahan masing-masing.

1) Fitur Dasar Sub-Sistem Mitigasi Kelelawar

a. *Sensing Capability*

Pondasi dari sistem ini, yang berfungsi sebagai indra untuk mendeteksi keberadaan dan aktivitas kelelawar. Sistem ini tidak hanya sekedar mendeteksi adanya gerakan atau suara, tetapi juga memiliki kecerdasan untuk membedakan sinyal spesifik dari kelelawar dengan gangguan lainnya, seperti kehadiran manusia, suara lingkungan, atau hewan lain. Untuk mencapai efisiensi ini, sistem dapat mengintegrasikan berbagai jenis sensor. Misalnya, sensor akustik ultrasonik dapat secara spesifik "mendengarkan" panggilan ekolokasi kelelawar pada frekuensi tinggi yang tidak dapat didengar manusia, sementara sensor inframerah pasif (PIR) dapat mendeteksi pancaran panas tubuh dari hewan yang bergerak.

b. *Computing Methode*

Metode Komputasi merujuk pada algoritma atau logika inti yang menjadi "kecerdasan" di balik operasional sistem. Ini adalah metode yang digunakan oleh Unit Kontrol Pusat untuk memproses data mentah dari sensor dan

mengubahnya menjadi keputusan yang dapat ditindaklanjuti. Tingkat kerumitan metode ini dapat bervariasi tergantung pada desain solusi.

c. Networking Capability

Sistem harus dapat bekerja dengan beberapa node sensor terhubung dalam jaringan yang dikontrol oleh central control unit untuk memastikan data deteksi terdistribusi secara efisien dan mengatasi kekurangan pada jangkauan sensor maupun aktuator.

d. Data Logging & Analytics Capability

Sistem dapat menyimpan data deteksi kelelawar dalam jangka waktu tertentu untuk analisis pola aktivitas kelelawar. Dikarenakan kelelawar cenderung memiliki jangkauan untuk mencari makan lebih pendek saat musim hujan sehingga akan lebih sering menetap di dekat sarang, di Indonesia yang memiliki iklim tropis maka ada 6 bulan musim kemarau (April - September) dan hujan (Oktober - Maret) dan tergantung dari musim dan musim berbuahnya tanaman disekitar audit.[73]. Sehingga dibutuhkan *data logging* setidaknya 1 tahun penuh agar pola dapat lebih diprediksi.

e. Self-Diagnosis & Notification Capability

Fitur ini memungkinkan sistem mendeteksi kesalahan internal misalnya sensor gagal berfungsi atau koneksi antar node terputus dan memberi notifikasi ke pengguna.

f. Actuation Capability

Merujuk pada kapasitas sistem untuk memberikan respons fisik yang dirancang untuk mengusir kelelawar. Setelah sistem mendeteksi dan mengonfirmasi keberadaan kelelawar, subsistem aktuasi akan diaktifkan secara otomatis. Aktuator ini bukanlah perangkat yang membahayakan, melainkan dirancang untuk menciptakan lingkungan yang tidak nyaman dan mengganggu bagi kelelawar.

1.2.2 Usulan Solusi

1.2.2.1 Usulan Solusi Sub-Sistem Mitigasi Kelelawar

Berikut adalah usulan solusi dari sistem mitigasi kelelawar:

1.2.2.1.1 Solusi 1: Sistem Mitigasi Kelelawar dengan Analisis Akustik Berbasis Logika *Fuzzy*

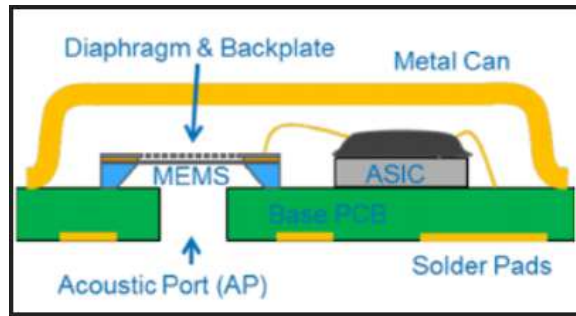
Solusi 1 memanfaatkan pendeteksian berbasis akustik ultrasonik yang meniru prinsip ekolokasi alami kelelawar. Sistem ini menggunakan mikrofon ultrasonik untuk menangkap sinyal suara berfrekuensi tinggi (20–120 kHz), kemudian menganalisis karakteristiknya menggunakan metode komputasi berbasis Logika *Fuzzy*. Setelah keberadaan kelelawar terdeteksi dengan tingkat keyakinan tinggi, sistem mengaktifkan aktuator berupa pemancar suara ultrasonik (*ultrasonic emitter*) dengan frekuensi acak untuk mengganggu mekanisme ekolokasi kelelawar.

Dengan pendekatan ini, sistem tidak hanya mampu mendeteksi keberadaan kelelawar secara akurat, tetapi juga mengganggu orientasi navigasi mereka secara non-letal, membuat area auditorium tidak nyaman bagi koloni untuk menetap.

Kelelawar mengandalkan ekolokasi untuk bernavigasi dalam gelap. Mereka memancarkan pulsa ultrasonik dan mendengarkan pantulan dari objek di sekitarnya untuk menentukan jarak, ukuran, dan arah objek. Frekuensi panggilan kelelawar bervariasi antara 20–120 kHz, tergantung spesiesnya [6], di mana gelombang suara f memiliki panjang gelombang λ yang berbanding terbalik dengan kecepatannya:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (1.1)$$

dengan v = kecepatan suara di udara (≈ 343 m/s). Semakin tinggi frekuensi, semakin kecil panjang gelombang, dan semakin baik resolusi spasial ekolokasi. Dengan memahami rentang frekuensi ini, sistem dapat menggunakan sensor dan aktuator ultrasonik yang bekerja dalam frekuensi 25–100 kHz untuk mendeteksi dan sekaligus mengganggu aktivitas kelelawar.



Gambar 1. 3 Ultrasonic Microphone [9]

Mikrofon ultrasonik berfungsi sebagai transduser, mengubah energi akustik menjadi sinyal listrik. Mikrofon jenis MEMS *Ultrasonic Microphone* atau *piezoelectric microphone* memiliki diafragma tipis yang bergetar akibat tekanan gelombang suara ultrasonik. Getaran tersebut menimbulkan tegangan melalui efek piezoelektrik, yang kemudian diperkuat dan dikonversi menjadi sinyal digital oleh mikrokontroler. Persamaan dasar hubungan tekanan suara dan tegangan keluaran adalah:

$$V_{out} = S \times P_{in} \quad (1.2)$$

dengan V_{out} = tegangan keluaran (volt), S = sensitivitas mikrofon (volt/Pa), dan P_{in} = tekanan suara (Pascal). Tekanan suara P_{in} sendiri dapat dihitung dari amplitudo gelombang:

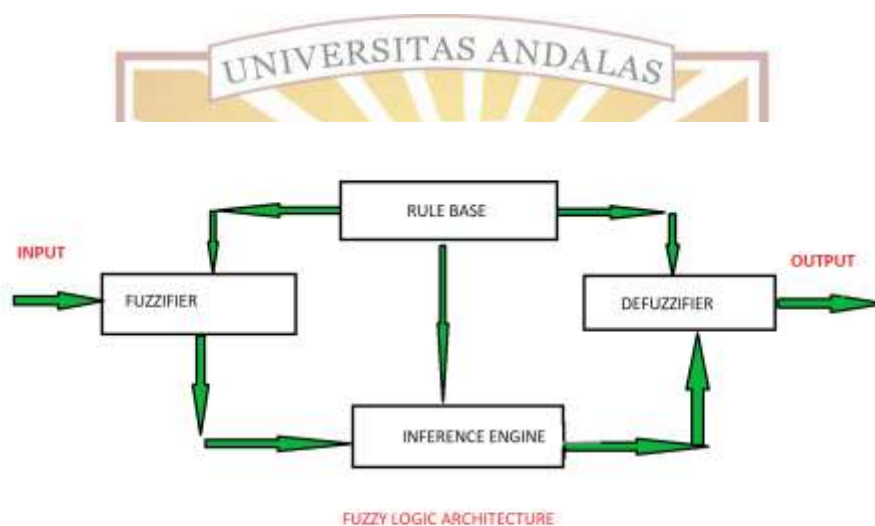
$$P_{in} = \rho c v \quad (1.3)$$

dengan ρ = densitas udara ($1,2 \text{ kg/m}^3$), c = kecepatan suara (343 m/s), dan v = kecepatan partikel udara akibat osilasi suara. Mikrofon ultrasonik dengan bandwidth lebar memungkinkan sistem menangkap berbagai pola panggilan kelelawar, termasuk variasi intensitas dan durasi yang menjadi ciri khas tiap spesies.

Setelah sinyal ultrasonik ditangkap, mikrokontroler akan mengekstrak beberapa fitur utama, seperti:

1. Intensitas sinyal (A): amplitudo atau kekuatan suara yang diterima (volt atau dB).
2. Frekuensi dominan (f): hasil analisis spektral menggunakan algoritma *Fast Fourier Transform (FFT)*.
3. Durasi pulsa (t_p): lamanya setiap sinyal ultrasonik terekam.

Karena data dari lingkungan sering kali tidak pasti dan tumpang tindih (*noise* dari peralatan, serangga, atau pantulan dinding), sistem menggunakan Logika *Fuzzy* untuk menilai kemungkinan bahwa sinyal tersebut berasal dari kelelawar. [10]



Gambar 1. 4 Cara Kerja *Fuzzy Logic* [10]

Pada tahap Fuzzifikasi, nilai numerik (*crisp*) dari setiap parameter diubah menjadi himpunan *fuzzy* menggunakan fungsi keanggotaan. Contohnya:

Tabel 1. 2 Himpunan *Fuzzy*

Parameter	Himpunan <i>Fuzzy</i>	Rentang
Intensitas (A)	Rendah, Sedang, Tinggi	0-1 V
Frekuensi (F)	Rendah, Sedang, Tinggi	20-120Khz
Durasi (t_p)	Pendek, Sedang, Panjang	1-10 ms

Sebagai contoh, fungsi keanggotaan segitiga untuk frekuensi dapat didefinisikan sebagai:

$$\mu_{Tinggi}(f) = \{0, f < 60\}, \{\frac{f - 60}{30}, 60 \leq f \leq 90\}, \{1, f > 90\} \quad (1.4)$$

Inferensi, Tahap ini menggunakan aturan IF–THEN yang dirancang berdasarkan karakteristik umum panggilan kelelawar:

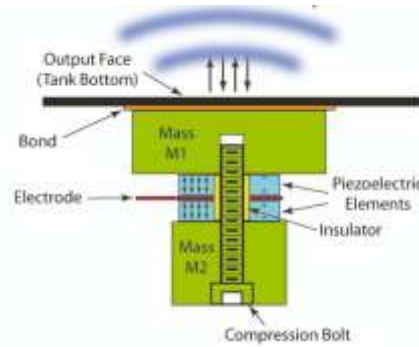
1. IF intensitas *tinggi* AND frekuensi *tinggi* AND durasi *pendek* → THEN “kemungkinan kelelawar sangat tinggi”.
2. IF intensitas *rendah* AND frekuensi *rendah* → THEN “kemungkinan *noise* lingkungan”.
3. IF frekuensi *sedang* AND durasi *panjang* → THEN “kemungkinan non-bat suara elektronik”.

Setiap aturan menghasilkan derajat kebenaran (truth value) berdasarkan fungsi keanggotaan input. Mesin inferensi *fuzzy* (biasanya metode *Mamdani*) kemudian menggabungkan semua hasil aturan menjadi satu keluaran *fuzzy* agregat.

Defuzzifikasi, Langkah terakhir adalah mengubah keluaran *fuzzy* menjadi nilai *crisp* menggunakan metode *Center of Gravity (COG)*:

$$y^* = \frac{\int y \mu(y) dy}{\int \mu(y) dy} \quad (1.5)$$

Nilai y^* ini merepresentasikan tingkat keyakinan bahwa sinyal berasal dari kelelawar, dengan rentang 0–100. Jika $y^* > 80$, sistem menilai deteksi valid dan mengaktifkan aktuator pengusir.



Gambar 1. 5 Ultrasonic Transmitter [9]

Aktuator utama sistem ini berupa pemancar suara ultrasonik (*ultrasonic emitter*) yang untuk interferensi akustik. Untuk mencegah kelelawar beradaptasi terhadap pola suara, emitter diatur untuk menyapu (sweep) frekuensi secara acak antara 20–100 kHz:

$$f(t) = f_{min} + (f_{max} - f_{min}) \times R(t) \quad (1.6)$$

dengan $R(t)$ = fungsi acak antara 0–1. Pola acak ini menciptakan lingkungan akustik yang tidak stabil dan membuat kelelawar enggan kembali.

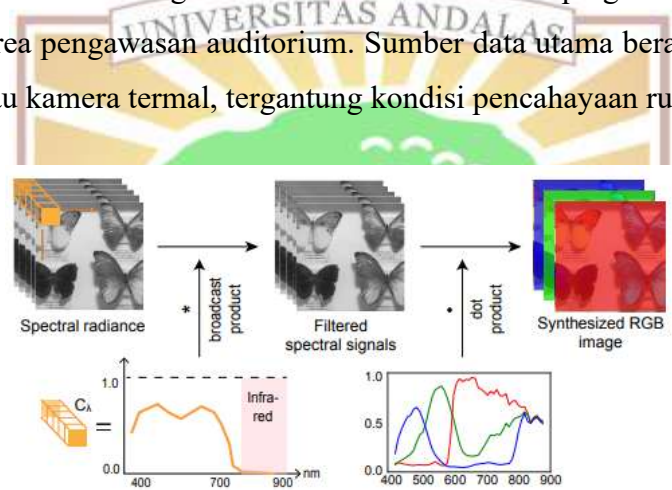
Setiap node sensor-aktuator dikendalikan oleh mikrokontroler yang memiliki kemampuan komputasi sinyal dasar (*FFT, fuzzy inference*, dan kontrol aktuator). Data antar node dapat dikirim menggunakan jaringan sensor nirkabel untuk sinkronisasi atau logging terpusat. Pendekatan ini memastikan sistem bekerja secara terdistribusi dan real-time, dengan latensi sangat rendah karena tidak memerlukan koneksi internet.

1.2.2.1.2 Solusi 2: Sistem Mitigasi Kelelawar Presisi *Computer Vision* dengan Aktuator Cahaya Terarah

Solusi ketiga mengusulkan sistem mitigasi kelelawar berbasis penglihatan komputer (*Computer Vision*) yang berfungsi mendeteksi keberadaan kelelawar melalui pengolahan citra real-time menggunakan kamera inframerah (IR) atau termal. Data visual yang diperoleh akan diproses oleh algoritma deteksi objek untuk mengenali bentuk, pergerakan, dan pola terbang kelelawar. Setelah objek kelelawar

terdeteksi, sistem mengaktifkan aktuator berupa lampu sorot atau laser berintensitas terarah yang diarahkan langsung ke area keberadaan kelelawar untuk menciptakan disrupsi visual. Sistem ini menggabungkan teknologi persepsi visual, komputasi tepi (edge computing), dan komunikasi melalui jaringan sensor nirkabel, menghasilkan solusi pengendalian kelelawar yang cerdas, adaptif, dan tidak merusak ekosistem.

Computer Vision merupakan bidang ilmu yang berfokus pada ekstraksi informasi bermakna dari citra atau video secara otomatis. Dalam konteks ini, sistem berfungsi untuk mendeteksi dan mengenali kelelawar berdasarkan pergerakan serta bentuk tubuhnya di area pengawasan auditorium. Sumber data utama berasal dari kamera inframerah atau kamera termal, tergantung kondisi pencahayaan ruangan:



Gambar 1. 6 Cara Kerja IR-Cut [10]

1. Kamera Inframerah (IR Camera) digunakan pada kondisi cahaya rendah. Sensor IR bekerja berdasarkan deteksi pantulan cahaya inframerah aktif yang dipancarkan oleh LED IR.
2. Kamera Termal (Thermal Camera) mendeteksi radiasi inframerah pasif yang dipancarkan oleh tubuh kelelawar, berdasarkan prinsip radiasi benda hitam (black-body radiation).

Hubungan antara suhu permukaan (T) dan intensitas energi yang dipancarkan (E) dijelaskan oleh Hukum Stefan–Boltzmann:

$$E = \sigma T^4 \quad (1.7)$$

dengan $\sigma=5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$. Kelelawar, dengan suhu tubuh sekitar 37°C (310 K), memancarkan energi lebih tinggi dibandingkan suhu lingkungan malam hari (sekitar 300 K). Perbedaan ini memungkinkan kamera termal menangkap citra berbasis kontras suhu, di mana kelelawar terlihat lebih terang dibanding latar belakang. Data video dari kamera akan diolah oleh mikrokontroler berperforma tinggi menggunakan algoritma untuk menentukan respon sistem.

Model rekognisi dapat dilatih menggunakan dataset hasil observasi kelelawar di lingkungan serupa. Dataset tersebut mencakup berbagai pose dan ukuran kelelawar untuk meningkatkan akurasi deteksi. Untuk meningkatkan performa dalam kondisi minim cahaya atau kabut, citra dapat melalui proses Image Enhancement seperti *Histogram Equalization* atau *Gaussian Filtering*. Begitu kelelawar terdeteksi oleh algoritma, sistem akan mengaktifkan aktuator berupa lampu sorot berintensitas tinggi atau laser pointer yang diarahkan langsung ke lokasi deteksi. Prinsip kerja aktuator ini didasarkan pada konsep optical deterrence, di mana intensitas cahaya tinggi dan pergerakan cahaya cepat menyebabkan gangguan visual terhadap sistem navigasi kelelawar.

Untuk memastikan arah sorotan tepat sasaran, sistem menggunakan mekanisme servo motor atau pan-tilt platform yang dikendalikan oleh mikrokontroler. Koordinat objek dari sistem deteksi (x,y) dikonversi menjadi sudut rotasi motor (θ_x, θ_y) menggunakan transformasi linier:

$$\theta_x = kx(x - x_c), \theta_y = ky(y - y_c) \quad (1.8)$$

di mana x_c, y_c adalah titik tengah bidang pandang kamera, dan kx, ky adalah faktor skala konversi. Servo kemudian mengarahkan sorotan cahaya tepat ke posisi kelelawar untuk menciptakan stimulus pengusir yang efektif.

Mikrokontroler utama menerima data deteksi dari modul pengolahan citra dan menerapkan logika kendali terintegrasi, seperti berikut:

IF (deteksi_kelelawar == TRUE AND confidence > 0.8) THEN

```
    arahkan_servo(koordinat_x, koordinat_y)
    nyalakan_lampu_dalam(3 detik)
    catat_data_deteksi()
ENDIF
```

Logika ini memastikan sistem hanya merespons objek dengan tingkat keyakinan tinggi, mencegah aktivasi palsu akibat burung, serangga besar, atau debu. Seluruh node pengamatan yang terdiri atas kamera IR/termal dan modul pemancar cahaya dihubungkan melalui jaringan sensor nirkabel. Komunikasi sensor nirkabel memungkinkan setiap node kamera mengirimkan data deteksi (misalnya waktu, lokasi, confidence) ke Central Control Unit (CCU) tanpa memerlukan infrastruktur Internet. Satu unit CCU dapat memantau seluruh area auditorium melalui beberapa node kamera. Struktur komunikasi antar node digambarkan sebagai:

Node_01 → CCU : DETEKSI_BAT (confidence = 0.92)

Node_02 → CCU : NO_ACTIVITY

Data dari setiap node disinkronkan secara waktu menggunakan Real-Time Clock (RTC) agar sistem dapat membangun peta temporal aktivitas kelelawar. Setiap deteksi kelelawar akan dicatat ke database lokal bersama timestamp, lokasi, confidence score, dan snapshot citra yang terdeteksi. Data tersebut dapat digunakan untuk:

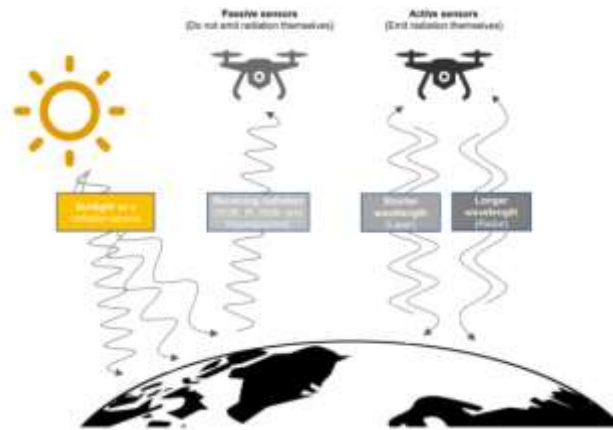
1. Analisis perilaku dan pola pergerakan kelelawar
2. Penentuan zona rawan untuk pemasangan alat tambahan
3. Evaluasi efektivitas sistem pengusiran

Dengan memanfaatkan metode image logging, sistem dapat melakukan pelatihan ulang model algoritma secara periodik untuk meningkatkan akurasi terhadap kondisi nyata lingkungan.

1.2.2.1.3 Solusi 3: Roosting Box, Pengalihan Sarang Kelelawar dengan Monitoring Sensor dan Pengambilan Keputusan Berbasis Logika *Fuzzy*

Solusi ini berfokus pada pembuatan *roosting box* yang tidak hanya berfungsi sebagai tempat alternatif bagi kelelawar untuk berpindah dari auditorium, tetapi juga dilengkapi dengan sistem pemantauan kondisi lingkungan dan aktivitas di dalamnya. Sistem ini bekerja dengan mengintegrasikan mikrokontroler, sensor PIR, sensor suara, sensor suhu dan kelembaban, serta komunikasi nirkabel yang semuanya dikendalikan menggunakan logika *fuzzy* sebagai metode pengambilan keputusan. Prinsip utamanya adalah menciptakan lingkungan buatan yang menyerupai habitat alami kelelawar, sambil memantau tingkat kenyamanan dan aktivitas di dalam roost untuk menilai apakah kelelawar mulai beradaptasi dan berpindah ke lokasi tersebut.

Mikrokontroler berfungsi sebagai otak sistem yang mengendalikan seluruh proses akuisisi data, pemrosesan logika *fuzzy*, serta pengiriman informasi ke unit pusat (Central Control Unit). Dalam konteks ini, mikrokontroler yang sesuai digunakan akan memiliki konsumsi daya rendah, modul ADC (Analog-to-Digital Converter) untuk membaca sensor analog, dan dukungan komunikasi nirkabel. Mikrokontroler bekerja dengan membaca sinyal dari berbagai sensor, mengubahnya menjadi data digital yang dapat diolah, dan kemudian mengambil keputusan berdasarkan aturan yang ditetapkan. Ketika sistem aktif, mikrokontroler secara periodik keluar dari mode tidur hemat energi untuk membaca data lingkungan seperti suhu, kelembaban, intensitas suara, serta jumlah deteksi gerakan dari sensor PIR. Seluruh data ini kemudian diolah menggunakan logika *fuzzy* untuk menentukan status “kenyamanan” atau “daya tarik” roost box.



Gambar 1. 7 Beda PIR dan IR [11]

Sensor PIR berfungsi sebagai pendeteksi gerakan berdasarkan radiasi panas yang dipancarkan oleh objek hidup seperti kelelawar. Prinsip kerja sensor PIR didasarkan pada efek piroelektrik, di mana material piroelektrik di dalam sensor menghasilkan tegangan listrik ketika menerima perubahan fluks energi inframerah. Saat kelelawar bergerak di dekat atau di dalam *roost box*, perubahan suhu lokal akibat pergerakan tubuhnya menyebabkan perubahan distribusi radiasi inframerah yang diterima sensor. Sensor kemudian menghasilkan sinyal digital “HIGH” yang menunjukkan adanya aktivitas. Tegangan keluaran sensor PIR berbanding lurus dengan perubahan suhu terhadap waktu, sesuai dengan persamaan:

$$V_{out} = k \frac{dT}{dt} \quad (1.9)$$

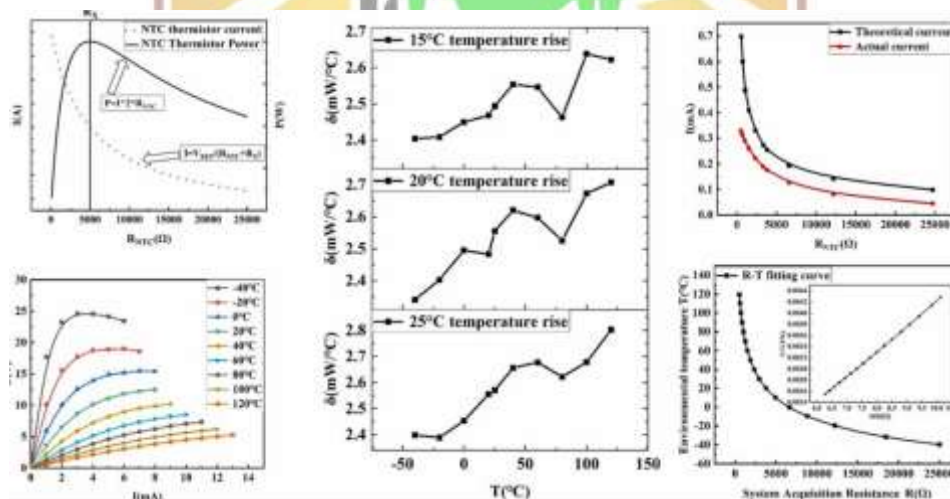
di mana V_{out} adalah tegangan keluaran, k adalah konstanta sensitivitas sensor, dan dT/dt adalah laju perubahan suhu. Dengan demikian, semakin sering gerakan terdeteksi, semakin tinggi nilai aktivitas yang tercatat oleh sistem. Sensor PIR ini sangat hemat daya dan cocok untuk sistem yang beroperasi terus-menerus di luar ruangan.

Selain deteksi gerakan, sistem juga dilengkapi dengan sensor suara atau mikrofon untuk mendeteksi keberadaan kelelawar melalui aktivitas akustik. Kelelawar dikenal menggunakan ekolokasi ultrasonik untuk bernavigasi, tetapi mereka juga

menghasilkan suara sosial dengan intensitas yang dapat terdeteksi oleh mikrofon konvensional berfrekuensi tinggi (hingga 20–30 kHz). Prinsip kerja mikrofon adalah mengubah gelombang suara (energi mekanik) menjadi sinyal listrik melalui getaran diafragma. Amplitudo sinyal yang dihasilkan sebanding dengan intensitas tekanan suara yang diterima, dan dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$V_{out} = S \times P_{in} \quad (1.10)$$

dengan V_{out} adalah tegangan keluaran mikrofon, S adalah sensitivitas sensor, dan P_{in} adalah tekanan suara. Nilai tekanan suara P_{in} dapat dihitung dari amplitudo gelombang udara dengan rumus $P_{in} = \rho c v$, di mana ρ adalah densitas udara, c adalah kecepatan suara, dan v adalah kecepatan partikel udara akibat getaran. Dengan menganalisis perubahan amplitudo dan frekuensi suara di sekitar roost, sistem dapat mengenali pola aktivitas kelelawar, seperti suara masuk, keluar, atau komunikasi antar individu.



Gambar 1. 8 karakteristik sensor suhu jenis NTC thermistor [12]

Kondisi iklim merupakan salah satu faktor terpenting yang mempengaruhi pemilihan tempat tinggal kelelawar. Karena itu, sensor suhu dan kelembaban digunakan untuk memantau lingkungan internal *roost box*. Prinsip kerja sensor suhu digital biasanya menggunakan elemen termistor atau sensor resistansi semikonduktor, di mana perubahan suhu menyebabkan perubahan resistansi yang

kemudian dikonversi menjadi data suhu. Sensor kelembaban bekerja berdasarkan perubahan kapasitas listrik akibat variasi kadar uap air di udara. Nilai suhu (T) dan kelembaban relatif (RH) digunakan untuk menentukan tingkat kenyamanan dalam roost, dengan kisaran optimal biasanya sekitar 25–35°C dan kelembaban 50–80%. Data dari sensor ini akan menjadi salah satu masukan utama dalam sistem logika *fuzzy* untuk menentukan apakah kondisi roost sesuai bagi kelelawar.

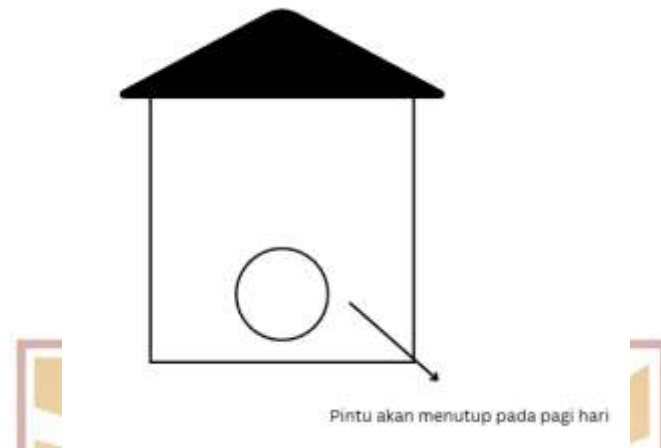
Agar setiap *roost box* dapat dipantau tanpa kabel dan dengan konsumsi daya rendah, sistem menggunakan komunikasi nirkabel. Teknologi yang memungkinkan pengiriman data secara nirkabel dengan daya rendah dan ketahanan tinggi terhadap interferensi. Setiap node *roost box* dilengkapi dengan modul *bluetooth* yang dihubungkan ke mikrokontroler. Data hasil pembacaan sensor dikirim dalam bentuk paket digital berisi identitas node, waktu pengambilan data, serta nilai hasil pengukuran. Komunikasi nirkabel memungkinkan setiap node berinteraksi langsung dengan unit pusat (*Central Control Unit*) tanpa memerlukan infrastruktur jaringan tambahan seperti Internet.

Untuk menentukan apakah roost box dalam kondisi menarik bagi kelelawar, sistem menggunakan logika *fuzzy* sebagai metode pengambilan keputusan. Logika *fuzzy* dipilih karena mampu menangani data yang tidak pasti dan bersifat gradual, seperti “sedikit hangat” atau “cukup lembab”, yang tidak dapat dijelaskan secara tegas oleh logika biner. Setiap input dari sensor seperti frekuensi deteksi PIR, intensitas suara, suhu, dan kelembaban akan diubah menjadi nilai keanggotaan (membership) pada beberapa kategori, misalnya “rendah”, “sedang”, dan “tinggi”. Proses ini disebut fuzzifikasi. Setelah itu, aturan logika *fuzzy* (*fuzzy rules*) digunakan untuk menggabungkan informasi tersebut, contohnya:

1. *Jika* suhu optimal dan kelembaban optimal dan suara aktivitas tinggi → maka kemungkinan roost terisi tinggi.
2. *Jika* suhu rendah atau kelembaban terlalu tinggi → maka kemungkinan roost tidak nyaman.

Hasil dari inferensi *fuzzy* ini menghasilkan nilai keluaran (output) berupa tingkat keyakinan atau skor kelayakan roost dalam skala 0–100. Nilai ini

kemudian diubah kembali ke bentuk numerik melalui proses defuzzifikasi, biasanya menggunakan metode *Center of Gravity (COG)*.



Gambar 1. 9 Mekanisme untuk menangkap kelelawar

Lalu untuk menambah keefektifan dari roosting box ini, selain dari dapat di monitornya kecocokan keadaan roosting box dengan keadaan optimal untuk menjadi sarang kelelawar maka penggunaan social calls kelelawar juga dilakukan. Social calls pada kelelawar adalah jenis vokalisasi non-navigasi yang digunakan untuk berkomunikasi antar individu dalam koloni. Berbeda dengan *echolocation calls* yang berfungsi untuk orientasi dan berburu, *social calls* digunakan untuk menarik perhatian kelelawar lain, menandai lokasi *roosting* yang aman, memperkuat ikatan sosial, atau mengatur jarak antar individu saat terbang berkelompok. Frekuensinya umumnya masih berada dalam rentang ultrasonik (20–100 kHz), namun memiliki pola ritme dan durasi yang khas tergantung spesiesnya. Dalam konteks rekayasa, simulasi *social calls* dapat dimanfaatkan untuk menarik kelelawar mendekati area tertentu, seperti roosting box buatan, dengan meniru kondisi akustik alami koloni yang aktif. Dengan tambahan untuk menangkap kelelawar maka akan digunakan sistem “*hatch*” pada pintu masuk yang akan tertutup pada pagi hari sehingga kelelawar tidak bisa keluar dan dapat menjadi objek analisa. [13]

1.2.3 Analisis Usulan Solusi

Berdasarkan usulan solusi yang telah ditawarkan sebelumnya pada masing-masing permasalahan, perlu dilakukan analisis untuk menentukan solusi yang akan dipilih untuk menyelesaikan kedua permasalahan ini. Analisis dilakukan dengan menggunakan metode *House Of Quality* untuk membandingkan setiap solusi yang ditawarkan berdasarkan parameter yang telah ditentukan, yaitu fitur dasar dan fitur tambahan, yang telah dijelaskan pada bagian 1.2.1. Dalam menjelaskan hubungan dari *House of Quality*, digunakan parameter yang dijelaskan pada Tabel 1.3 berikut.

Tabel 1. 3 Keterangan Hubungan Simbol HoQ

Simbol	Nilai	Hubungan
	5	Berhubungan erat
	3	Berhubungan normal
	1	Berhubungan jauh
Kosong	0	Tidak berhubungan

Relationship adalah sebuah keterkaitan antar fitur dasar dengan fitur tambahan tentang nilai usulan solusi. Relationship diatur menjadi 3 level antara lain: *Strong* yang ditandai dengan simbol lingkaran dengan titik hitam tebal di dalamnya dengan nilai 5, *Medium* yang ditandai dengan simbol lingkaran dengan nilai 3, dan *Weak* yang ditandai dengan simbol segitiga dengan nilai 1.

1.2.3.1 Analisis Usulan Solusi Sub-Sistem Mitigasi Kelelawar

Berdasarkan solusi-solusi yang telah diberikan, berikut merupakan analisis usulan solusi dengan menggunakan *House of Quality* (HoQ).

Tabel 1. 4 *House of Quality* Sub-Sistem Mitigasi Kelelawar

penyesuaian sensor terhadap kondisi ruangan masih berada pada batas moderat. Sementara itu, hubungannya lemah dengan *Computing* dan *Self-Diagnosis* karena logika komputasi internal tidak terpengaruh langsung oleh kondisi eksternal ruangan.

Konstrain Produksi Sistem memiliki pola hubungan yang serupa dengan aspek keterjangkauan harga; yaitu sangat kuat dipengaruhi oleh *Sensing*, *Computing*, *Networking*, dan *Actuation*. Tingkat kesulitan perakitan dan produksi fisik sangat ditentukan oleh integrasi modul-modul *hardware* ini. Sebaliknya, *Data Logging* dan *Self-Diagnosis* memiliki hubungan yang lemah karena hanya berupa implementasi *coding* di tahap akhir yang tidak menghambat proses produksi.

Konstrain Privasi Pengguna berhubungan kuat secara spesifik dengan *Data Logging & Analytics Capability* serta *Self-Diagnosis & Notification Capability*. Isu privasi menjadi sangat krusial terkait bagaimana data direkam, dianalisis, dan dilaporkan ke luar sistem agar tidak bocor. Hubungannya dinilai lemah terhadap kapabilitas fisik (*Sensing*, *Computing*, *Networking*, dan *Actuation*) karena komponen mekanik dan elektronik dasar tersebut tidak bertugas menyimpan atau menyebarkan data secara permanen.

Berikut perhitungan menggunakan *house of quality* ketiga solusi terhadap fitur dasar yaitu:

1. Solusi 1

$$\begin{aligned}
 & (5 \times 18,9\%) + (5 \times 17,98\%) + (5 \times 14,02\%) + (5 \times 15,54\%) + (5 \times 11,89\%) + (3 \times 21,64\%) \\
 &= (0,945) + (0,899) + (0,701) + (0,777) + (0,5945) + (0,6492) \\
 &= 4,56
 \end{aligned}$$

2. Solusi 2

$$\begin{aligned}
 & (3 \times 18,9\%) + (3 \times 17,98\%) + (3 \times 14,02\%) + (5 \times 15,54\%) + (5 \times 11,89\%) + (3 \times 21,64\%) \\
 &= (0,567) + (0,5394) + (0,4206) + (0,777) + (0,5945) + (0,6492) \\
 &= 3,54
 \end{aligned}$$

3. Solusi 3

$$\begin{aligned}
& (1 \times 18,9\%) + (5 \times 17,98\%) + (3 \times 14,02\%) + (3 \times 15,54\%) + (3 \times 11,89\%) + (5 \times 21,64\%) \\
&= (0,189) + (0,899) + (0,4206) + (0,4662) + (0,3567) + (1,082) \\
&= 3,41
\end{aligned}$$

Ketiga solusi yang ditawarkan memiliki karakteristik dan tingkat pemenuhan yang berbeda terhadap kapabilitas teknis sistem. Penilaian ini membantu dalam memahami keunggulan dan kelemahan masing-masing pendekatan secara objektif berdasarkan pembobotan matriks HoQ.

Solusi 1 (*Fuzzy Audio + Ultrasonik*) Dari perhitungan *House of Quality*, solusi ini memperoleh skor tertinggi yaitu 4,56. Solusi ini menunjukkan hubungan yang sangat kuat pada hampir seluruh kapabilitas teknis, meliputi *Sensing Capability*, *Computing Methode*, *Networking Capability*, *Data Logging & Analytics Capability*, serta *Self-Diagnosis & Notification Capability*. Hal ini menunjukkan bahwa sistem analisis suara dipadukan dengan aktuator ultrasonik dan logika *fuzzy* sangat andal dan komprehensif dalam memenuhi berbagai konstrain sistem. Hubungannya dinilai normal hanya pada *Actuation Capability*.

Solusi 2 (*ComVis + Cahaya Terarah*) Dari perhitungan *House of Quality*, solusi 2 memperoleh skor akhir 3,54. Solusi ini memiliki hubungan yang kuat pada *Computing Methode*, *Data Logging & Analytics Capability*, dan *Self-Diagnosis & Notification Capability*. Penggunaan *Computer Vision* (*ComVis*) secara logis menuntut proses komputasi algoritma dan analisis data gambar yang lebih berat. Sementara itu, hubungannya dinilai normal pada *Sensing Capability*, *Networking Capability*, dan *Actuation Capability*, yang menunjukkan bahwa implementasi kamera, transmisi jaringan, serta pemicu cahaya terarah berada pada tingkat kebutuhan standar.

Solusi 3 (*Roosting Box + Fuzzy*) Dari perhitungan *House of Quality*, solusi 3 memperoleh skor paling rendah yaitu 3,41. Solusi ini memiliki hubungan yang kuat pada *Computing Methode*, *Data Logging & Analytics Capability*, dan *Actuation Capability*. Penggunaan *roosting box* sangat bergantung pada aktuasi pengalihan sarang yang tepat dan komputasi data *monitoring*. Hubungannya dinilai normal

pada *Networking Capability* dan *Self-Diagnosis & Notification Capability*. Berbeda dengan solusi lainnya, solusi ini memiliki hubungan yang lemah pada *Sensing Capability*, karena cakupan deteksi sensor pada area kotak buatan lebih sempit dan tidak sekompleks pemindaian ruangan secara keseluruhan.

1.2.4 Solusi Yang Dipilih

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan dari solusi yang telah diberikan pada masing-masing sub-sistem, telah didapatkan solusi terbaik yang akan diimplementasikan untuk menyelesaikan masing-masing permasalahan. Lebih lanjut akan dijelaskan pada bagian ini.

1.2.4.2 Solusi yang Dipilih untuk Sub-Sistem Mitigasi Kelelawar

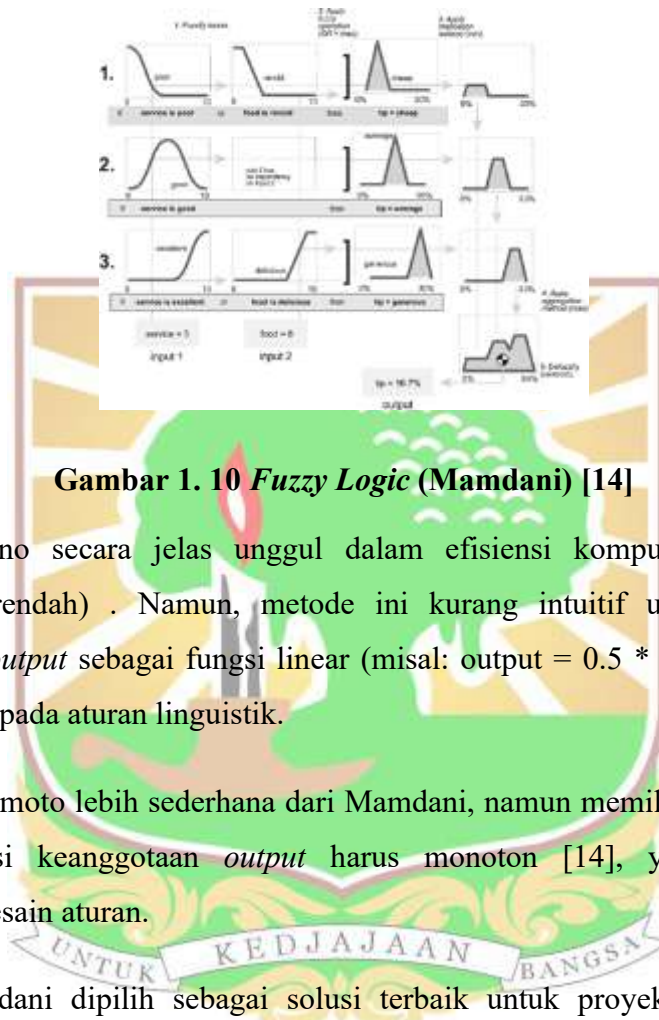
Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan menggunakan *House of Quality* (HoQ) dengan menganalisa hubungan seluruh usulan solusi terhadap fitur-fitur yang dibutuhkan, diperoleh Solusi 1 yaitu Sistem Mitigasi Kelelawar Berbasis Audio dan Ultrasonik merupakan solusi terbaik untuk menyelesaikan masalah. Solusi 1 memiliki nilai akhir 7,97 yang merupakan skor tertinggi dan lebih unggul dibandingkan solusi lainnya.

Solusi 1 dipilih karena sistem ini menggunakan deteksi akustik cerdas berbasis Logika *Fuzzy*. Metode ini memungkinkan sistem untuk menganalisis berbagai karakteristik suara dan secara efektif membedakan panggilan ekolokasi kelelawar dari *noise* atau kebisingan lingkungan. Hal ini menghasilkan tingkat akurasi deteksi yang tinggi dan meminimalkan pemicu alarm palsu.

Setelah data frekuensi diekstrak oleh FFT, sistem membutuhkan metode komputasi yang cerdas untuk mengambil keputusan. Logika *Fuzzy* dipilih karena kemampuannya menangani ketidakpastian data sinyal di lingkungan yang bising .

Namun, Logika *Fuzzy* memiliki beberapa metode sistem inferensi (penarikan kesimpulan) utama. Metode yang paling umum adalah Mamdani, Sugeno, dan Tsukamoto. Ketiga metode ini berbeda secara fundamental dalam cara mereka merepresentasikan konsekuensi (bagian *THEN* dari aturan) dan cara mereka

melakukan defuzzifikasi (mengubah hasil *fuzzy* kembali menjadi nilai pasti) [14]. Untuk memilih metode yang paling efisien dan sesuai untuk implementasi pada mikrokontroler ESP32 dalam konteks deteksi sinyal, dilakukan analisis perbandingan.



Gambar 1. 10 Fuzzy Logic (Mamdani) [14]

Metode Sugeno secara jelas unggul dalam efisiensi komputasi (kebutuhan komputasi terendah) . Namun, metode ini kurang intuitif untuk dirancang. Menentukan *output* sebagai fungsi linear (misal: $output = 0.5 * intensitas + 0.2$) lebih sulit daripada aturan linguistik.

Metode Tsukamoto lebih sederhana dari Mamdani, namun memiliki batasan kaku dimana fungsi keanggotaan *output* harus monoton [14], yang membatasi fleksibilitas desain aturan.

Metode Mamdani dipilih sebagai solusi terbaik untuk proyek ini. Meskipun memiliki kebutuhan komputasi tertinggi (karena defuzzifikasi COG) , metode ini adalah yang paling intuitif dan mirip cara berpikir manusia . Hal ini sangat penting dalam merancang aturan deteksi sinyal yang "kabur" (misal:IF frekuensi TINGGI AND intensitas SEDANG THEN deteksi MUNGKIN). Seperti yang telah dibahas pada 2.1.2, mikrokontroler ESP32 memiliki *clock speed* 240 MHz yang lebih dari mampu untuk menangani perhitungan COG metode Mamdani secara *real-time*.

Berdasarkan analisis tersebut, dipilih Metode Mamdani karena paling sesuai dengan spesifikasi yang ditetapkan. Metode ini memberikan interpretasi aturan

yang paling jelas dan intuitif, yang merupakan prioritas dalam perancangan sistem deteksi berbasis logika .

Selain itu, solusi 1 menggunakan aktuator suara ultrasonik yang menghasilkan gelombang frekuensi acak. Pendekatan ini secara langsung mengganggu indra navigasi utama kelelawar dan, yang terpenting, mencegah mereka beradaptasi terhadap gangguan tersebut. Fitur ini memastikan efektivitas sistem dalam jangka panjang untuk membuat auditorium menjadi area yang tidak nyaman bagi kelelawar untuk menetap. Dengan terpilihnya Solusi 1, diharapkan sistem ini dapat secara efektif dan berkelanjutan menjaga kebersihan, kenyamanan, dan kesehatan di lingkungan Auditorium.



BAB II

SPESIFIKASI

2.1 Spesifikasi Produk

2.1.1 Spesifikasi Produk Sub-Sistem Mitigasi Kelelawar

Berdasarkan hasil *House of Quality* (HoQ) yang telah dilakukan pada Bab I, solusi yang dipilih untuk diimplementasikan adalah Solusi 1: Sistem Mitigasi Kelelawar Berbasis Audio Ultrasonik dan Logika *Fuzzy*. Sesuai dengan fungsinya, produk ini dirancang untuk mendeteksi keberadaan kelelawar secara *real-time* di dalam auditorium dan memberikan respons pengusiran otomatis untuk menjaga kebersihan dan kenyamanan gedung .

Sistem ini bekerja dengan inputan berupa sensor mikrofon ultrasonik. Nilai inputan ini harus mampu menangkap frekuensi pada rentang 20 kHz hingga 120 kHz . Kebutuhan rentang yang lebar ini sangat krusial karena merupakan rentang frekuensi panggilan ekolokasi yang umum digunakan oleh berbagai spesies kelelawar , seperti spesies dari famili *Rhinolophidae* (kelelawar ladam) yang menggunakan *Constant Frequency* (CF) tinggi, atau *Vespertilionidae* (kelelawar biasa) yang menggunakan *Frequency Modulated* (FM) [15]. Data audio yang ditangkap harus bersifat digital (via antarmuka I2S) untuk memastikan sinyal yang diterima mikrokontroler bersih dari *noise* listrik (EMI) yang umum ada di gedung besar, yang dapat merusak sinyal analog frekuensi tinggi .

Nilai inputan yang didapatkan akan diproses oleh mikrokontroler. Mikrokontroler harus memiliki frekuensi CPU minimal 240 Mhz dan latensi komputasi yang sangat rendah (diharapkan < 100 ms). Spesifikasi ini diperlukan agar mikrokontroler mampu menjalankan dua tugas komputasi berat secara *real-time*: pertama, algoritma *Fast Fourier Transform* (FFT) untuk mengubah data audio mentah yang datang terus-menerus (streaming) menjadi spektrum frekuensi; dan kedua, menjalankan inferensi Logika *Fuzzy* . Logika *Fuzzy* akan dibagi menjadi beberapa *member function* (himpunan keanggotaan) dan *rule* (aturan) untuk menganalisis parameter sinyal (misal: intensitas frekuensi X, durasi pulsa), sehingga

menghasilkan nilai tegas (keputusan) apakah sinyal tersebut adalah kelelawar atau hanya *noise* acak .

Transduser dengan intensitas output minimal 90 dB juga dibutuhkan dengan dasar pada karakteristik fisik propagasi gelombang ultrasonik di udara dan ambang batas gangguan biologis kelelawar. dengan dasar “Evaluating the effectiveness of an *ultrasonic* acoustic deterrent for reducing bat fatalities at wind turbines ” Target intensitas 90 dB ditetapkan untuk mencapai efek *Acoustic Masking* atau *Jamming*. Studi mengenai *Ultrasonic Acoustic Deterrent* (UAD) pada mitigasi kelelawar di infrastruktur turbin angin menunjukkan bahwa penembakan gelombang ultrasonik *broadband* dengan intensitas tinggi efektif mengganggu penerimaan gema ekolokasi. Karena kelelawar memancarkan panggilan navigasi dengan intensitas tinggi (100-120 dB SPL), alat pengusir harus mampu menghasilkan *noise floor* yang cukup signifikan untuk mengacaukan rasio *signal-to-noise* (SNR) navigasi mereka, yang memaksa kelelawar meninggalkan area tersebut karena disorientasi spasial.[16]

Selanjutnya, pada sistem dibutuhkan pengendali *output* (driver) sebagai penghubung dan pemutus daya ke aktuator. Bagian ini adalah tantangan teknis utama. *Driver* ini harus mampu mengendalikan satu saluran daya 12V DC (atau 24V DC) untuk aktuator berdaya tinggi . Tidak seperti *driver* motor standar yang lambat (berbasis BJT) , *driver* ini harus mampu melakukan *switching* sinyal AC pada frekuensi sangat tinggi (40 kHz, 80 kHz, dan 120 kHz) . *Switching loss* pada frekuensi ini sangat besar. Oleh karena itu, diperlukan *driver* H-Bridge berbasis MOSFET dan IC *Gate Driver* khusus . IC *Gate Driver* ini mutlak diperlukan untuk menyediakan arus sesaat yang tinggi guna mengisi *gate* MOSFET dengan cepat, agar transisi *switching* tetap tajam dan efisien di atas 100 kHz [15].

Untuk memenuhi kebutuhan daya pada komponen lainnya, dibutuhkan modul *step-down* yang dapat menurunkan tegangan dari 12V DC ke 5V DC . Ini penting untuk memberikan daya yang stabil ke komponen logika seperti mikrokontroler (via pin VIN), IC *Gate Driver*, dan sensor. Pada sistem ini juga dibutuhkan catu daya utama yang dapat mengubah tegangan AC 220V ke 12V DC . Hal ini karena sumber daya

keseluruhan sistem berasal dari tegangan rumah (gedung auditorium) , dan *driver* H-Bridge serta modul *step-down* memerlukan input 12V DC. Catu daya ini harus mampu menangani daya total sistem, terutama lonjakan arus saat aktuator 30W pertama kali diaktifkan .

Terakhir, untuk kebutuhan analisis pola, sistem harus mampu menyimpan data *log* . Sistem akan menggunakan media penyimpanan data lokal (non-volatile) untuk mencatat informasi berupa *timestamp* dan frekuensi terdeteksi setiap kali terjadi deteksi . Penyimpanan lokal dipilih untuk keandalan (robustness), agar data tidak hilang jika koneksi Wi-Fi di auditorium terputus . Untuk integrasi di masa depan, sistem memanfaatkan konektivitas 2.4 GHz dari mikrokontroler yang mendukung protokol transfer data *client-server* (seperti MQTT atau HTTP) , memungkinkan data *log* dikirim ke *cloud* saat terhubung ke internet. Penetapan spesifikasi kapasitas penyimpanan data log selama satu tahun didasarkan pada kebutuhan krusial untuk memvalidasi efektivitas sistem terhadap siklus musiman kelelawar. Mengingat pola aktivitas dan *roosting* kelelawar sangat fluktuatif dan dipengaruhi oleh perubahan musim (kemarau dan penghujan), pemantauan berdurasi pendek tidak cukup untuk memberikan representasi data yang akurat bebas dari bias musim. Selain itu, rentang waktu satu tahun diperlukan untuk menguji ketahanan fitur yang diterapkan; data jangka panjang akan membuktikan apakah algoritma *frequency sweep* berhasil mencegah kelelawar beradaptasi terhadap gangguan ultrasonik seiring berjalannya waktu. Secara teknis, estimasi volume data log teks selama satu tahun telah diperhitungkan dan masih berada di bawah batas kapasitas memori internal (SPIFFS) mikrokontroler, sehingga spesifikasi ini dapat dicapai secara efisien tanpa penambahan biaya perangkat keras, sekaligus menyelaraskan jadwal pengambilan data dengan siklus pemeliharaan tahunan fasilitas gedung.

Secara keseluruhan, akan dilakukan proses deteksi dan pengusiran kelelawar yang diatur dengan Logika *Fuzzy*. Spesifikasi didasarkan pada analisis kebutuhan yang diperlukan untuk merancang alat ini. Adapun kebutuhan yang menjadi spesifikasi adalah deteksi frekuensi ultrasonik, pemrosesan data *real-time*, metode komputasi cerdas, *driver* frekuensi tinggi, konversi daya, catu daya utama, dan penyimpanan data. Tentunya untuk spesifikasi dapat terlihat pada tabel dibawah berikut ini.

Tabel 2. 1 Spesifikasi Produk

Kebutuhan	Spesifikasi
Mendeteksi aktivitas kelelawar secara akurat.	Mampu mendeteksi kelelawar dengan memanfaatkan sinyal audio ekolokasi pada rentang frekuensi ultrasonik 20kHz – 120 kHz menggunakan sensor akustik dengan akurasi $\geq 85\%$.
Memproses data sensor secara <i>real-time</i> untuk pengambilan keputusan deteksi.	Mikrokontroler dengan kemampuan komputasi memadai untuk menjalankan analisis FFT dan inferensi Logika <i>Fuzzy</i> secara <i>real-time</i> yang membutuhkan ram setidaknya 256 kb agar sampling rate tercapai dan memiliki Dual-core untuk meminimalkan latensi dan kemampuan untuk berkomunikasi antar nodenya sehingga struktur multinode setidaknya 3 node dapat dicapai untuk mengatasi masalah jangkauan alat untuk deteksi dan mitigasi kelelawar.
Dapat menghasilkan <i>output</i> pengusiran yang efektif untuk mencegah kelelawar beradaptasi.	Mengaktifkan aktuator ultrasonik dengan suara di intensitas 90 dB pada lebih dari satu frekuensi di rentang 20 kHz - 120 kHz saat kelelawar terdeteksi, dan dapat mengganggu ekolokasi kelelawar.
Menyimpan data aktivitas untuk analisis pola.	Memberikan <i>output</i> berupa <i>log</i> data (timestamp, frekuensi terdeteksi) yang disimpan setiap kali terjadi deteksi dan memiliki kapasitas yang cukup untuk 1 tahun operasi.
Dapat beroperasi secara terus-menerus di dalam ruangan.	Sistem ditenagai oleh adaptor 12V DC dan terhubung ke sumber listrik gedung sehingga dapat mengakomodir kebutuhan daya diatas 30 W pada puncak operasi.

Memiliki jalur tegangan berbeda apabila daya untuk aktuator yang dibutuhkan tidak dapat di-supply oleh mikrokontroler	modul <i>step-down</i> yang dapat menurunkan tegangan dari 12V DC ke 5V DC
---	--

2.1.1.1 Mendeteksi aktivitas kelelawar secara akurat

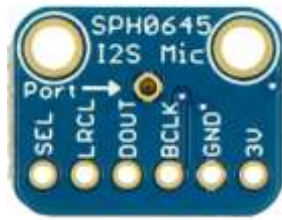
Aktivitas kelelawar diidentifikasi melalui panggilan ekolokasi mereka, yang mayoritas berada pada frekuensi ultrasonik (20 kHz hingga 120 kHz) . Oleh karena itu, dibutuhkan sensor akustik yang mampu secara sensitif menangkap sinyal pada rentang frekuensi ini dan mengirimkannya ke mikrokontroler untuk diolah . Kebutuhan untuk menangkap sinyal pada rentang frekuensi yang sangat lebar ini menjadi tantangan teknis utama.[1]

Informasi frekuensi dan intensitas dari sensor ini akan menjadi *input* krusial bagi sistem Logika *Fuzzy* untuk memvalidasi sinyal . Sinyal ini harus dapat dibedakan secara akurat dari kebisingan (*noise*) lingkungan auditorium, seperti suara manusia, gema, atau peralatan elektronik . Kesalahan pembacaan sensor (misalnya, *noise* yang dianggap sebagai sinyal kelelawar) akan menyebabkan kegagalan pada logika inferensi dan memicu alarm palsu. Oleh karena itu, pemilihan sensor audio yang tepat menjadi aspek paling penting dalam perancangan sistem ini.

Untuk memilih komponen sensor audio yang mampu memenuhi kebutuhan pada spesifikasi 2.1.1, maka dilakukan analisis perbandingan dari tiga komponen mikrofon MEMS yang umum digunakan . Berdasarkan ketersediaan di pasar dan kesesuaian teknis untuk audio digital frekuensi tinggi, terdapat tiga kandidat utama yang akan dianalisis: mikrofon analog (seperti ADMP401), mikrofon digital I2S standar (seperti INMP441), dan mikrofon digital I2S *broadband* (seperti SPH0645).

Ketiga sensor ini memiliki perbedaan fundamental dalam tipe *output* (analog vs digital I2S) dan karakteristik *filter* frekuensi internal mereka, yang sangat

mempengaruhi kemampuan mereka menangkap sinyal ultrasonik . Perbandingan ketiga komponen tersebut dapat dilihat pada Tabel berikut.



Gambar 2. 1 SPH0645 [17]



Gambar 2. 2 INMP441 [18]

Gambar 2. 3 ADMP401 [19]

Tabel 2. 2 Perbandingan Spesifikasi Sensor Akustik

Spesifikasi	SPH0645 [17]	INMP441 [18]	ADMP401 [19]
Tipe Output	Digital	Digital	Analog
Antarmuka	I2S (3-pin)	I2S (3-pin)	Tegangan Analog (1-pin)

Rentang Frekuensi	50 Hz – 112kHz	60 Hz – 15 kHz	100 Hz – 15 kHz
Tegangan Kerja	1.6V – 3.6V	1.8V – 3.3V	1.5V – 3.3V
Arus Kerja	0,8 mA	1,4 mA	0,025 mA
S/N Ratio (SNR)	65 dB	61 dBA	62 dBA
Harga	Rp 150.000	Rp 55.000	Rp 40.000

Berdasarkan analisis perbandingan pada Tabel di atas, ketiga sensor tersebut memiliki karakteristik yang berbeda untuk memenuhi kebutuhan sistem. Kebutuhan utama sistem ini adalah kemampuan mendeteksi frekuensi ultrasonik (di atas 20 kHz) dengan *noise* yang rendah.

Sensor ADMP401 secara jelas tidak memenuhi kebutuhan karena memiliki output analog. Sinyal analog sangat rentan terhadap *noise* listrik, yang akan sangat mengganggu analisis sinyal audio frekuensi tinggi. Selain itu, amplifier pada modul breakout ADMP401 seringkali membatasi frekuensi di 15 kHz.

Sensor INMP441 memiliki keunggulan antarmuka I2S digital yang bersih dan sangat umum digunakan. Namun, sensor ini dirancang khusus untuk audio fidelitas tinggi (suara manusia) dan memiliki filter low-pass internal yang secara aktif memotong frekuensi di atas 20 kHz. Hal ini membuatnya "tuli" terhadap sinyal ekolokasi kelelawar yang menjadi target.

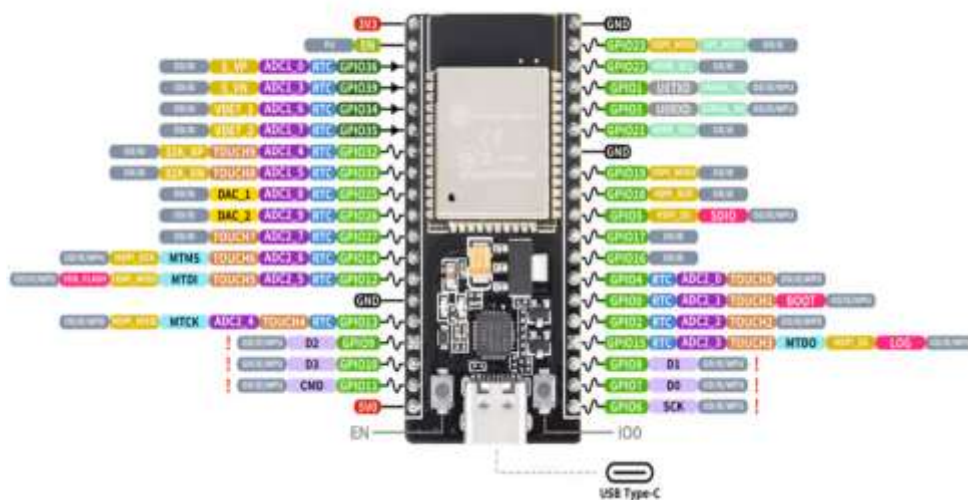
Sensor SPH0645 dipilih sebagai solusi terbaik. SPH0645 tidak memiliki filter low-pass internal yang agresif. Berbagai proyek bioacoustics telah membuktikan bahwa dengan mengatur sampling rate I2S ke tingkat yang sangat tinggi (misalnya 192 kHz), sensor ini mampu menangkap sinyal ultrasonik secara efektif hingga 80 kHz [20]. Antarmuka I2S digitalnya juga memastikan sinyal yang diterima ESP32 bersih dari *noise* untuk dianalisis oleh Logika Fuzzy.

2.1.1.2 Memproses data sensor secara *real-time* untuk pengambilan keputusan deteksi

Sistem ini membutuhkan unit pemrosesan pusat (mikrokontroler) yang mampu melakukan beberapa tugas komputasi berat secara *real-time*. Mikrokontroler harus mampu:

1. Mengakuisisi aliran data audio digital berkecepatan tinggi dari sensor I2S (SPH0645).
2. Menjalankan algoritma Fast Fourier Transform (FFT) pada data audio tersebut untuk mengekstrak fitur frekuensi.
3. Menjalankan inferensi Logika *Fuzzy* berdasarkan hasil FFT untuk memvalidasi deteksi.
4. Menghasilkan sinyal PWM (Pulse Width Modulation) berfrekuensi tinggi (40-120 kHz) untuk mengendalikan *driver* aktuator.

Untuk memilih mikrokontroler yang mampu memenuhi kebutuhan komputasi ini, dilakukan analisis perbandingan dari tiga *platform* yang umum digunakan. Perbandingan ketiga komponen tersebut dapat dilihat pada Tabel berikut.



Gambar 2. 4 NodeMCU ESP32 [21]



Gambar 2. 5 Raspberry Pi 4 [22]



Gambar 2. 6 Arduino Uno [23]

Tabel 2. 3 Perbandingan Spesifikasi Platform Komputasi

Spesifikasi	Arduino Uno R3[23]	Raspberry Pi 4 [22]	NodeMCU ESP32 [21]
Tipe Platform	Mikrokontroler	Mikrokomputer	Mikrokontroler
Kecepatan Clock	16 MHz	1.5 GHz (1500 MHz)	240 MHz (Dual-Core)
SRAM (RAM)	2 kB	1 GB	512 kB
Dukungan I2S	Tidak Ada	Ada	Ada

Wi-Fi / Bluetooth	Tidak Ada	Ada	Ya
Tegangan Kerja	5V	5V (Input) / 3.3V (GPIO)	3.3V
Arus	50-200 mA	600 - 1000 mA	80 - 500 mA
Sistem Operasi	Tidak ada	Linux	FreeRTOS
Harga	Rp 150.000	Rp 750.000	Rp 65.000

Berdasarkan analisis perbandingan pada Tabel di atas, ketiga platform tersebut memiliki karakteristik yang sangat berbeda untuk memenuhi kebutuhan sistem. Kebutuhan utama sistem ini adalah kecepatan pemrosesan tinggi untuk FFT/Logika *Fuzzy* dan ketersediaan *peripheral* I2S.

Arduino Uno secara jelas tidak memenuhi kebutuhan. Kecepatan *clock* 16 MHz dan SRAM 2 kB sangat tidak memadai untuk menjalankan analisis sinyal audio *real-time* [23]. Keterbatasan ini akan menyebabkan kehilangan data (data loss) saat akuisisi. Selain itu, Arduino Uno tidak memiliki *peripheral* I2S bawaan, sehingga tidak dapat terhubung secara efisien dengan sensor SPH0645.

Raspberry Pi 4 memiliki keunggulan performa yang masif (1500 MHz CPU dan 1GB RAM), yang lebih dari cukup untuk semua tugas komputasi dan telah memiliki I2S bawaan [22]. Namun, Raspberry Pi adalah *mikrokomputer* yang menjalankan sistem operasi Linux. Hal ini membuatnya lebih kompleks, membutuhkan waktu *booting* yang lama, dan memiliki konsumsi daya yang jauh lebih tinggi. Untuk tugas spesifik yang berulang (deteksi dan aktuasi), penggunaan Raspberry Pi menjadi tidak efisien (overkill).

NodeMCU ESP32 memiliki keunggulan di kedua sisi. Dengan *clock speed* 240 MHz dan SRAM 512 kB, ESP32 cukup kuat untuk menangani FFT dan Logika *Fuzzy* secara *real-time* tanpa *overhead* sistem operasi penuh [21]. Yang paling penting, ESP32 memiliki *peripheral* I2S bawaan untuk sensor SPH0645 dan *controller* PWM canggih untuk aktuator [21]. Tegangan kerjanya (3.3V) juga sesuai dengan sensor.

Berdasarkan analisis tersebut, dipilih NodeMCU ESP32 karena komponen ini paling ideal. ESP32 menyeimbangkan antara performa komputasi yang memadai (tidak seperti Arduino) dan efisiensi *embedded system* (tidak seperti Raspberry Pi), sehingga paling sesuai dengan spesifikasi yang ditetapkan.

2.1.1.3 Dapat menghasilkan output pengusiran yang efektif

Sistem ini membutuhkan output (aktuator) yang mampu menghasilkan suara ultrasonik yang sangat keras, yaitu 90 dB, untuk menciptakan stres pada kelelawar. Spesifikasi 90 dB dipilih karena intensitas ini cukup untuk menciptakan gangguan pendengaran yang signifikan, mengacaukan kemampuan ekolokasi mereka, dan membuat area tersebut tidak nyaman untuk dijadikan tempat roosting. Selain itu, aktuator harus efektif di berbagai pita frekuensi untuk mendukung metode *frequency sweep* (sapuan frekuensi) pada 40 kHz, 80 kHz, dan 120 kHz. Kebutuhan multi-frekuensi ini sangat penting untuk mencegah adaptasi. Banyak perangkat pengusir hama komersial gagal karena hanya menggunakan satu frekuensi tetap (misal: 40 kHz), yang seiring waktu dapat diabaikan atau ditoleransi oleh hewan. Dengan melakukan *frequency sweep* pada tiga pita yang berbeda, sistem menciptakan lingkungan akustik yang tidak stabil, kacau, dan tidak dapat diprediksi, sehingga memaksa kelelawar untuk menjauh. Tantangan teknisnya adalah menemukan satu komponen yang dapat beroperasi secara efisien (menghasilkan 90 dB) di semua frekuensi target tersebut.

Target intensitas 90 dB ditetapkan untuk mencapai efek *Acoustic Masking* atau *Jamming*. Studi mengenai *Ultrasonic Acoustic Deterrent* (UAD) pada mitigasi kelelawar di infrastruktur turbin angin menunjukkan bahwa penembakan gelombang ultrasonik *broadband* dengan intensitas tinggi efektif mengganggu

penerimaan gema ekolokasi. Karena kelelawar memancarkan panggilan navigasi dengan intensitas tinggi (100-120 dB SPL), alat pengusir harus mampu menghasilkan *noise floor* yang cukup signifikan untuk mengacaukan rasio *signal-to-noise* (SNR) navigasi mereka, yang memaksa kelelawar meninggalkan area tersebut karena disorientasi spasial.[16]

Kebanyakan transduser piezoelektrik bersifat narrowband, artinya mereka hanya efisien pada satu titik resonansi saja. Untuk memilih komponen aktuator yang mampu memenuhi kebutuhan daya tinggi dan frekuensi multi-band ini, dilakukan analisis perbandingan dari tiga komponen transduser ultrasonik yang umum: Transduser Tahan Air (narrowband), Piezo Tweeter (broadband audio), dan Transduser PZT-4 (multi-resonance). Perbandingan ketiga komponen tersebut dapat dilihat pada Tabel berikut. [24]



Gambar 2. 7 Transduser Ultrasonik PZT-4 [24]



Gambar 2. 8 Transduser Linear [25]



Gambar 2. 9 Piezo Tweeter [26]

Tabel 2. 4 Perbandingan Spesifikasi Transduser (Aktuator)

Spesifikasi	Transduser Linear (HC-SR) [25]	Piezo Tweeter [26]	Triple Frequency Transduser PZT-4 [24]
Prinsip Kerja	Piezoelektrik (Narrowband)	Piezoelektrik (Broadband)	Piezoelektrik (Multi-Resonance)
Frekuensi Resonansi	40 kHz	5 kHz - 40 kHz	40, 80, dan 120 kHz
Intensitas (dB)	90 dB	70 dB	90 dB di frekuensi 40, 80, 120 kHz
Kemampuan Sweep	-	Cukup Baik	Baik
Harga	Rp 138.000	Rp.102.000	Rp 250.000

Berdasarkan analisis perbandingan pada Tabel di atas, ketiga aktuator memiliki karakteristik yang berbeda. Kebutuhan utama sistem adalah daya tinggi (dB) dan efektivitas pada tiga frekuensi spesifik.

Transduser Linear (Tipe HC-SR04) secara jelas tidak memenuhi kebutuhan. Transduser ini dirancang untuk *sensing* (daya rendah), bukan *repelling* (daya tinggi). Intensitas suaranya tidak akan cukup untuk mengganggu kelelawar dan hanya efektif di 40 kHz.[25]

Piezo Tweeter memiliki keunggulan *broadband*, namun dirancang untuk audio. Performanya di frekuensi ultrasonik tinggi (80 kHz atau 120 kHz) tidak dijamin dan kemungkinan besar tidak akan mencapai intensitas 90 dB yang dibutuhkan.[26]

Transduser PZT-4 memiliki keunggulan yang spesifik. Dengan memiliki tiga titik resonansi alami (40, 80, 120 kHz) . Ini berarti ia akan bergetar sangat efisien dan menghasilkan suara yang sangat keras tepat di tiga frekuensi target yang akan digunakan sistem untuk *frequency sweep*. Berdasarkan analisis tersebut, dipilih Transduser Ultrasonik PZT-4 karena komponen ini satu-satunya yang memenuhi dua spesifikasi utama: Intensitas 90 dB dan efisiensi multi-frekuensi (40, 80, 120 kHz) .[24]

2.1.1.4 Menyimpan data aktivitas untuk analisis pola

Sistem ini membutuhkan kemampuan untuk menyimpan *log* data setiap kali aktivitas kelelawar divalidasi . Data ini (minimal *timestamp* dan frekuensi yang terdeteksi) sangat penting untuk analisis pola di kemudian hari, seperti menentukan jam aktif kelelawar atau efektivitas sistem pengusir . Penyimpanan data harus bersifat *non-volatile* (data tidak hilang saat listrik padam) dan dapat diakses untuk dianalisis .

Kapasitas penyimpanan data log selama satu tahun didasarkan pada kebutuhan krusial untuk memvalidasi efektivitas sistem terhadap siklus musiman kelelawar. Mengingat pola aktivitas dan *roosting* kelelawar sangat fluktuatif dan dipengaruhi oleh perubahan musim (kemarau dan penghujan), pemantauan berdurasi pendek tidak cukup untuk memberikan representasi data yang akurat bebas dari bias musim. Selain itu, rentang waktu satu tahun diperlukan untuk menguji ketahanan fitur yang diterapkan; data jangka panjang akan membuktikan apakah algoritma *frequency sweep* berhasil mencegah kelelawar beradaptasi terhadap gangguan ultrasonik

seiring berjalannya waktu. Secara teknis, estimasi volume data log teks selama satu tahun telah diperhitungkan dan masih berada di bawah batas kapasitas memori internal (SPIFFS) mikrokontroler, sehingga spesifikasi ini dapat dicapai secara efisien tanpa penambahan biaya perangkat keras, sekaligus menyelaraskan jadwal pengambilan data dengan siklus pemeliharaan tahunan fasilitas gedung. [28]

Untuk memilih metode penyimpanan yang paling sesuai untuk ESP32, dilakukan analisis perbandingan dari tiga opsi penyimpanan data utama. Perbandingan ketiganya dapat dilihat pada Tabel berikut.



Gambar 2. 10 Modul MicroSD Card [27]



Gambar 2. 11 SPIFFS [28]



Gambar 2. 12 Cloud Storage [29]

Tabel 2. 5 Perbandingan Metode Penyimpanan Data

Spesifikasi	SPIFFS (Internal Flash)[28]	Modul MicroSD Card [27]	Cloud Storage [29]
Lokasi Media	Internal (On-Chip ESP32)	Eksternal	Remote (Server/Cloud)
Kapasitas	4 MB	2 GB	Tergantung langganan
Antarmuka	Internal Bus	SPI (4-pin)	Wi-Fi (HTTP/MQTT)
Ketergantungan	Tidak ada.	Membutuhkan modul eksternal.	Wajib ada koneksi Wi-Fi/Internet.
Akses Data	Manual (via kabel USB/progra m).	Manual (Kartu dilepas, dibaca di PC).	Real-time (Web).
Kekurangan	Kapasitas kecil, batas siklus tulis.	Data tidak bisa diakses <i>real-time</i> dari jauh.	Data akan tidak terkirim jika Wi-Fi mati.
Harga	-	Rp 40.000	Rp 200 /Gb/ bulan

Berdasarkan analisis perbandingan pada Tabel di atas, ketiga metode memiliki keunggulan yang sangat berbeda. Kebutuhan utama sistem ini adalah keandalan (robustness) dan kapasitas besar untuk logging jangka panjang.

Sistem ini membutuhkan kemampuan untuk menyimpan log data setiap kali aktivitas kelelawar divalidasi. Data ini penting untuk analisis pola di kemudian hari.

Penyimpanan data harus bersifat non-volatile namun tetap efisien dari segi biaya dan ruang. Untuk memilih metode penyimpanan yang paling sesuai, dilakukan analisis perbandingan dari tiga opsi penyimpanan data utama.

1. Cloud Storage adalah metode yang paling canggih untuk pemantauan real-time. Namun, metode ini memiliki kelemahan fatal yaitu ketergantungan penuh pada koneksi Wi-Fi. Jika koneksi internet di auditorium terputus, data akan hilang dan tidak tercatat. Ini tidak memenuhi syarat keandalan sistem stand-alone.
2. Modul MicroSD Card menawarkan kapasitas penyimpanan yang sangat besar (GB) dan portabilitas data. Namun, penggunaan modul ini menambah biaya produksi dan kompleksitas rangkaian. Mengingat data yang disimpan hanya berupa teks sederhana (timestamp dan frekuensi), kapasitas Gigabyte seringkali berlebihan untuk kebutuhan proyek ini.
3. Internal Flash (SPIFFS) memanfaatkan memori bawaan mikrokontroler ESP32. Meskipun kapasitasnya terbatas (1.5 MB) dan memiliki batas siklus tulis, kapasitas ini sebenarnya mampu menampung hingga >50.000 baris data log teks. Jika diasumsikan ada 100 deteksi per hari, memori ini baru akan penuh setelah lebih dari 1 tahun. Selain itu, opsi ini tidak memerlukan biaya tambahan dan menyederhanakan desain perangkat keras.

Kesimpulan, Berdasarkan analisis perbandingan di atas, dipilih Internal Flash (SPIFFS). Meskipun memiliki keterbatasan kapasitas dibandingkan MicroSD, metode ini dinilai paling efisien karena tidak memerlukan biaya tambahan, tidak bergantung pada koneksi internet, dan kapasitas 1.5 MB sudah lebih dari cukup untuk menyimpan riwayat data aktivitas kelelawar selama periode operasional yang dibutuhkan. Risiko keausan memori (write cycle) dianggap sebagai kompromi yang dapat diterima mengingat rendahnya harga unit mikrokontroler ESP32 jika penggantian diperlukan di masa depan.

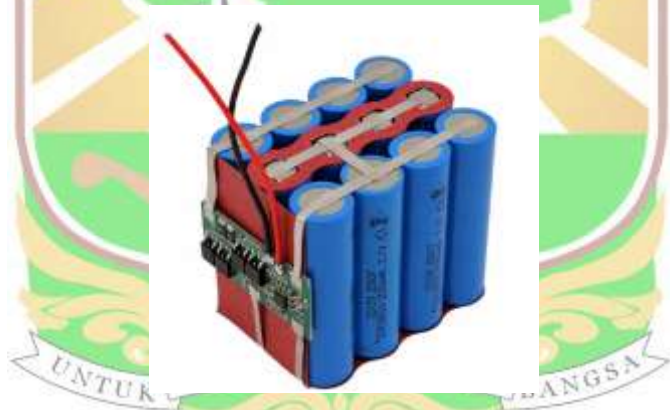
2.1.1.5 Dapat beroperasi secara terus-menerus di dalam ruangan

Sistem ini dirancang untuk menjadi perangkat stasioner yang terpasang di dalam auditorium dan harus beroperasi 24/7 tanpa interupsi . Kebutuhan ini menuntut

sumber daya yang konstan, andal, dan mampu menangani total konsumsi daya sistem. Kebutuhan daya utama berasal dari driver dan transduser PZT-4 (30W), yang memerlukan suplai 12V , serta mikrokontroler ESP32 dan sensor yang memerlukan 5V/3.3V . 49 Untuk memilih metode catu daya yang paling sesuai, dilakukan analisis perbandingan dari tiga opsi suplai daya. Perbandingan ketiganya dapat dilihat pada Tabel berikut.



Gambar 2. 13 Adaptor Daya 12V 5A [32]



Gambar 2. 14 Li-ion Pack [31]



Gambar 2. 15 Adapter PoE [30]

Tabel 2. 6 Perbandingan Metode Catu Daya

Spesifikasi	Baterai Isi Ulang (Li-ion Pack) [31]	Power over Ethernet (PoE) [30]	Adaptor Daya AC/DC [32]
Sumber Daya	Internal	Kabel Ethernet (dari Switch PoE)	Eksternal (Listrik PLN 220V)
Waktu Operasi	Terbatas (misal: 4-8 jam) dan perlu diisi ulang.	24/7	24/7
Tegangan Output	11.1V - 12.6V	Standar 48V (Perlu <i>PoE Splitter</i>)	12V DC
Harga	Rp 130.000	Rp 60.000	Rp 75.000

Berdasarkan analisis perbandingan pada Tabel di atas, ketiga metode memiliki karakteristik yang berbeda. Kebutuhan utama sistem adalah operasi kontinu (24/7) di dalam ruangan .

Baterai Isi Ulang secara jelas tidak memenuhi kebutuhan. Meskipun cocok untuk perangkat portabel, baterai tidak dapat beroperasi secara terus-menerus tanpa siklus pengisian ulang yang kompleks, yang tidak praktis untuk perangkat stasioner.

Power over Ethernet (PoE) adalah solusi profesional yang menarik karena menyediakan daya dan data (jika diperlukan) melalui satu kabel. Namun, ini menambah kompleksitas dan biaya, karena memerlukan infrastruktur jaringan dengan *Switch PoE* dan modul *PoE Splitter* di sisi perangkat untuk menurunkan tegangan 48V.

Adaptor Daya AC/DC dipilih sebagai solusi terbaik. Karena alat ini akan dipasang di dalam auditorium, ketersediaan sumber listrik PLN 220V dapat dipastikan . Adaptor 12V 5A (60W) adalah solusi yang sederhana, andal, dan sangat umum. Seperti yang dihitung sebelumnya , transduser 30W membutuhkan 2.5A. Adaptor 5A menyediakan *headroom* daya yang sangat aman untuk menangani beban puncak dan memberi daya ke semua komponen (L298N, LM2596, ESP32) secara kontinu. Berdasarkan analisis tersebut, dipilih Adaptor Daya 12V 5A karena merupakan solusi yang paling sederhana, andal, dan efisien secara biaya untuk memenuhi kebutuhan operasi 24/7 di dalam ruangan, serta mampu menyediakan daya 60W yang dibutuhkan oleh sistem.

2.1.1.6 Memiliki Jalur Tegangan Berbeda Apabila Daya Untuk Aktuator Yang Dibutuhkan Tidak Dapat Di-supply Oleh Mikrokontroler

Dalam sistem ini, diperlukan konversi tegangan dari sumber utama 12 V DC menjadi 5 V DC untuk menyuplai berbagai komponen seperti mikrokontroler, sensor, driver relay, dan display. Proses ini membutuhkan modul step-down yang efisien, stabil, serta memiliki kapasitas arus keluaran sesuai kebutuhan sistem.

Tiga kandidat modul DC-DC converter yang dianalisis adalah LM2596, XL4016, dan MP1584. Ketiganya memiliki prinsip kerja serupa, yaitu menurunkan tegangan input dengan teknik switching, namun memiliki karakteristik berbeda dari segi kapasitas arus, efisiensi, frekuensi switching, dan ukuran modul. Perbandingan spesifikasi ketiganya dapat dilihat pada tabel di bawah ini



Gambar 2. 16 LM2596 [33]



Gambar 2. 17 XL4016 [34]

Gambar 2. 18 MP1584 [35]

Tabel 2. 7 Perbandingan modul step down

Spesifikasi	LM2596 [33]	XL4016 [34]	MP1584 [35]
Jenis Modul	Buck Converter Non-Synchronous	Buck Converter Non-Synchronous	Buck Converter High-Frequency

Tegangan Input	4.5 - 40 V DC	6 - 40 V DC	4.5 - 28 V DC
Tegangan Output (Adjustable)	1.23 - 37 V DC	1.25 - 36 V DC	0.8 - 20 V DC
Arus Keluaran Maksimum	3 A	8 A	3 A
Frekuensi Switching	150 kHz	180 kHz	1.5 MHz
Efisiensi Tipikal	80 - 92%	90 - 96%	90 - 95%
Proteksi	<i>Over-current, Thermal Shutdown</i>	<i>Over-current, Thermal, Adjustable Current Limit</i>	<i>Over-current, Thermal Shutdown</i>
Ukuran Modul	45×20 mm	60×35 mm	22×17
Harga	Rp9.000	Rp25.000	Rp9.000

3 A dan efisiensi mencapai sekitar 90%, LM2596 mampu menyuplai daya secara stabil kepada seluruh komponen sistem seperti mikrokontroler, sensor, dan rangkaian relay tanpa memerlukan pendinginan berlebih. Selain itu, modul ini juga dilengkapi proteksi terhadap kelebihan arus dan suhu, sehingga aman untuk pengoperasian jangka panjang. Dari segi biaya dan ketersediaan, LM2596 lebih ekonomis dan mudah diperoleh dibandingkan dua kandidat lainnya. Oleh karena itu, berdasarkan hasil analisa teknis dan kebutuhan sistem, LM2596 dipilih sebagai modul penurun tegangan (step-down converter) yang paling efisien dan tepat digunakan pada perancangan alat.

2.2 Analisis Kebutuhan Daya

Untuk menentukan *Power Supply Unit* (PSU) yang paling tepat untuk sistem yang akan dibangun, perlu dilakukan analisis kebutuhan daya total.

2.2.1 Perhitungan Kebutuhan Daya

Perhitungan kebutuhan daya total dibagi menjadi dua jalur suplai utama yang berasal dari adaptor 12V:

- a. Jalur 12V (Daya Tinggi): Menyuplai daya ke *H-Bridge* untuk menggerakkan aktuator PZT-4.
- b. Jalur 5V (Daya Logika): Menyuplai daya ke modul LM2596, yang kemudian memberi daya ke ESP32 dan komponen logika lainnya.

1. Kebutuhan Arus pada Jalur 12V

Beban utama adalah transduser PZT-4 30W. H-Bridge berbasis MOSFET dan Gate Driver membutuhkan daya :

- $P_{input_driver} = P_{output} / \text{efisiensi driver}$
- $P_{input_driver} = 30 / 0.9 = 33 \text{ W}$

Arus yang ditarik oleh H-Bridge dari sumber 12V adalah:

- $I_{driver} = P_{input_driver} / V_{input} = 2,78 \text{ A}$

2. Kebutuhan Arus pada Jalur 5V (Beban Logika)

Total arus yang dibutuhkan oleh semua komponen logika 5V adalah:

- $I_{logika} = I_{esp32} + I_{gate_driver_logic}$
- $I_{logika} = 400 \text{ mA} + 50 \text{ mA} = 450 \text{ mA} (0,45 \text{ A})$

Daya yang dikonsumsi oleh jalur 5V adalah:

- $P_{logika} = V \times I_{logika}$
- $P_{logika} = 5V \times 0,45 \text{ A} = 2,25 \text{ W}$

3. Konversi Beban Logika ke 12V

Beban logika 2.25 W ini disuplai oleh modul LM2596 , yang ditenagai oleh adaptor 12V. Dengan efisiensi LM2596 90% , daya input yang ditarik LM2596 adalah:

- $P_{input_konverter} = P_{logika} / \text{efisiensi}$
- $P_{input_konverter} = 2,25 \text{ W} / 0.90 = 2.5 \text{ W}$

Arus yang ditarik LM2596 dari sumber 12V adalah:

- $I_{konverter} = P_{input_konverter} / V_{input}$
- $I_{konverter} = 2,5 \text{ W} / 12 \text{ V} = 0,208 \text{ A}$

4. Total Kebutuhan Arus Puncak Sistem

Total arus puncak yang akan ditarik sistem dari adaptor 12V adalah gabungan dari beban utama (driver) dan beban logika (konverter).

- $I_{total} = I_{driver} + I_{konverter}$
- $I_{total} = 2,78 \text{ A} + 0,208 \text{ A} = 2,98 \text{ A}$

2.2.2 Analisa dan Pemilihan PSU

Berdasarkan perhitungan, sistem membutuhkan suplai daya 12V yang stabil dengan kemampuan arus puncak minimal 2.98 A pada saat aktuator aktif.

PSU yang dipilih pada bagian 2.1.7 adalah Adaptor Daya 12V 5A (60W) . Pilihan ini dianalisis sebagai berikut:

- Kapasitas Adaptor: 5 A
- Kebutuhan Puncak Sistem: 2,98 A
- Kebutuhan Daya Puncak: 35,76 W
- Persentase Beban: $2,98 \text{ A} / 5 \text{ A} \times 100\% = 59.6\%$

Analisis ini memvalidasi pemilihan adaptor 12V 5A (60W) . Mengoperasikan PSU pada 60% dari kapasitas maksimumnya memberikan *headroom* (daya cadangan) sebesar 40%. *Headroom* ini sangat penting untuk

memastikan adaptor tidak bekerja terlalu keras, tetap dingin, dan memberikan tegangan yang stabil, sehingga memperpanjang umur pakai adaptor dan menjamin keandalan sistem untuk operasi 24/7 .

2.3 Verifikasi

Berdasarkan spesifikasi produk yang telah dijelaskan pada bagian 2.1, maka dibutuhkan pengujian terhadap komponen apakah telah memenuhi kebutuhan atau belum. Pengujian ini digunakan untuk memverifikasi setiap spesifikasi agar produk dapat berjalan dengan baik. Verifikasi menjelaskan kebutuhan alat, rincian perangkat yang digunakan, prosedur pengujian, dan metode pengukuran.

2.3.1 Verifikasi Sub-Sistem Mitigasi Kelelawar

Verifikasi dijelaskan pada tabel dibawah ini:

Tabel 2. 8 Verifikasi Kebutuhan Sistem

No.	Kebutuhan	Rincian Perangkat	Prosedur Pengujian	Metode Pengukuran
1.	Mendeteksi aktivitas kelelawar secara akurat .	INMP441	Melakukan pengujian dengan audio <i>file</i> uji (ekolokasi kelelawar dari database ChiroVox) dari <i>transducer</i> di depan sensor	Sistem <i>real-time</i> (FFT) pada plot harus menunjukkan adanya puncak (spike) sinyal yang jelas pada frekuensi 20 Hz dan 120 kHz saat audio uji diputar.

2.	Pendeteksian aktivitas kelelawar secara eksperimental	INMP441	Melakukan pengujian dengan kondisi yang sudah di kondisikan optimal bagi aktivitas kelelawar	Pengidentifikasi an dengan perangkat sistem
3.	Memproses data sensor secara <i>real-time</i> .	Mikrokontroler NodeMCU ESP32 .	Menjalankan program utama yang mencakup akuisisi audio I2S, pemrosesan FFT, dan inferensi Logika <i>Fuzzy</i> secara <i>looping</i> kontinu.	Mikrokontroler ESP32 mampu menjalankan analisis FFT dan inferensi Logika <i>Fuzzy</i> dengan latensi < 100 ms.
4.	Menghasilkan <i>output</i> pengusiran yang efektif .	Piezo Tweeter	1. Diaktifkan <i>driver</i> secara manual untuk mengeluarkan frekuensi di rentang 20 - 120 kHz secara bergantian dan dihubungkan ke osiloskop untuk melihat hasil frekuensi dan tegangan 2. Digunakan <i>ultrasonic receiver</i> untuk mengukur	1. Osiloskop harus menampilkan gelombang AC kotak (<i>square wave</i>) yang stabil dengan frekuensi di rentang 20 - 120 kHz , dan tegangan <i>peak-to-peak</i> 24V (jika

			apakah intensitas diatas 90 dB pada jarak 1m	menggunakan suplai 12V). 2. menggunakan metode pengukuran tegangan puncak (<i>Peak-to-Peak Voltage</i>) yang diterima oleh sensor penerima (<i>receiver</i>) yang terhubung pada osiloskop. Metode ini mengonversi besaran tegangan listrik menjadi satuan tekanan suara logaritmik berdasarkan nilai sensitivitas transduser [36]
--	--	--	---	--



5.	Menyimpan data aktivitas untuk analisis pola .	Internal Flash ESP32 (SPIFFS) .	1. Picu sistem 3-4 kali (simulasi deteksi). 2. Matikan daya, lalu nyalakan kembali. 3. Baca <i>file log</i> dari memori internal via Serial Monitor.	Sistem harus mampu menampilkan kembali 3-4 baris <i>log</i> data (timestamp dan frekuensi) yang tersimpan di memori internal, membuktikan data tidak hilang saat daya mati (<i>non-volatile</i>).
6.	Dapat beroperasi secara terus-menerus .	Adaptor Daya 12V 5A & LM2596 .	Sistem dinyalakan secara penuh (deteksi dan aktuasi) selama 30 menit (stress test) dan diukur tegangan <i>output</i> LM2596 dengan multimeter.	1. Tegangan <i>output</i> LM2596 harus tetap stabil di <5V. 2. Adaptor daya 12V dan <i>heatsink</i> driver tidak boleh <i>overheating</i>.

2.4 Perencanaan Pasar

2.4.1 Perkiraan Biaya Sistem Mitigasi Kelelawar

Perkiraan biaya yang dibutuhkan untuk mengembangkan produk dan solusi atas tantangan keberadaan kelelawar di gedung auditorium dibuat secara rinci. Hal ini bertujuan agar sistem dapat menyelesaikan masalah dengan anggaran yang terukur.

2.4.2.1 Perkiraan Biaya

1. *Product Cost*

Product Cost merupakan biaya dengan rincian komponen yang akan digunakan untuk membuat satu unit alat sistem mitigasi kelelawar berbasis ultrasonik dan logika *fuzzy*.

Tabel 2. 9 *Product Cost*

No	Perangkat	Jumlah	Harga Satuan	Estimasi Harga	Referensi
1	Mikrokontroler NodeMCU ESP32	1	Rp 65.000	Rp 65.000	[21]
2	Sensor Mikrofon MEMS SPH0645	1	Rp 150.000	Rp 150.000	[17]
3	Transduser Ultrasonik PZT-4 (30W)	1	Rp 250.000	Rp 250.000	[24]
4	Driver Aktuator	1	Rp 150.000	Rp 150.000	[24]
5	Modul Step-Down LM2596	1	Rp 25.000	Rp 25.000	[33]
6	Adaptor Daya 12V 5A (PSU)	1	Rp 75.000	Rp 75.000	[32]
7	Kabel, Konektor DC, dan Jumper	1 set	Rp 20.000	Rp 20.000	
8	Casing	1	Rp 50.000	Rp 50.000	

Tot al				Rp 785.000	
-----------	--	--	--	---------------	--

Dari tabel di atas maka didapatkan hasil perhitungan biaya kebutuhan komponen sebesar Rp 785.000 untuk biaya yang harus dikeluarkan untuk membuat satu unit sistem mitigasi kelelawar.

2. Development Cost

Development Cost merupakan biaya yang dikeluarkan untuk perancangan, pengembangan, dan pengujian untuk alat sistem mitigasi kelelawar ini.

Tabel 2. 10 Development Cost

No	Perangkat	Jumlah	Harga Satuan	Estimasi Harga	Referensi
1.	Biaya Programmer	1	Rp 300.000	Rp 300.000	[37]
2.	Biaya Pengujian	1	Rp 300.000	Rp 300.000	[38]
3.	Biaya Tidak Terduga	1	Rp 400.000	Rp 400.000	[38]
Total				Rp 1.000.000	

Berdasarkan tabel 2.10 didapatkan biaya yang dibutuhkan selama pengembangan solusi termasuk biaya operasional dan biaya lainnya, dibutuhkan biaya sebesar Rp Rp 1.000.000 untuk biaya pengembangan.

2.4.2.2 Analisis Finansial

2.4.2.2.1 Analisis SWOT

1. *Strength* (Kekuatan)

- Performa : Menggunakan *frequency sweep* (40, 80, 120 kHz) pada daya tinggi (30W) yang terbukti lebih efektif mencegah adaptasi kelelawar dibandingkan alat konvensional satu frekuensi.

- Anti False-Positive : Penerapan Logika *Fuzzy* meminimalkan alarm palsu (*false alarm*) akibat kebisingan gedung, sehingga alat hanya aktif saat benar-benar diperlukan (hemat energi dan umur komponen).
- Monitoring: Fitur *data logging* ke internal flash memudahkan pengelola gedung memantau pola kedatangan kelelawar untuk evaluasi jangka panjang.

2. *Weakness* (Kelemahan)

- Ketergantungan Daya: Sistem ini membutuhkan sumber listrik PLN 220V secara kontinu dan tidak dapat beroperasi maksimal hanya dengan baterai cadangan kecil.
- Jangkauan Directional: Sifat gelombang ultrasonik frekuensi tinggi cenderung terarah (*directional*), sehingga untuk auditorium yang sangat luas mungkin dibutuhkan lebih dari satu unit untuk cakupan menyeluruh.

3. *Opportunities* (Peluang)

- Pasar Niche: Banyak gedung tinggi, gudang, dan aula universitas menghadapi masalah kelelawar namun solusi yang ada (racun/jaring) seringkali tidak manusiawi atau merusak estetika.
- Regulasi Kesehatan: Meningkatnya kesadaran akan penyakit zoonotik (histoplasmosis dari kotoran kelelawar) mendorong institusi mencari solusi sanitasi gedung yang efektif.

4. *Threat* (Ancaman)

- Kompetitor Murah: Terdapat alat pengusir hama ultrasonik murah di pasaran, meskipun efektivitasnya rendah, harga yang jauh lebih murah bisa menjadi distorsi pasar bagi konsumen awam.

2.4.2.2 Analisis Kelayakan Finansial

Untuk menentukan analisis kelayakan finansial pada sistem yang dibuat maka ditentukan terlebih dahulu asumsi proyeksi sebagai berikut:

- Proyeksi penjualan per tahun: 5 unit (Target: Kampus, Gedung Pemerintahan, Gudang)
- Total Biaya Produksi (5 unit): Rp 785.000 x 5 = Rp 3.925.000
- Investasi Awal: Product Cost (untuk 5 unit) + Development Cost = Rp 3.925.00 + 1.000.000 = Rp 4.925.000
- ROI : 25%

Analisis kelayakan finansial dapat ditentukan berdasar:

1. *Return On Investment (ROI)*

Return On Investment adalah rasio keuntungan dan juga kerugian dari suatu investasi yang dibandingkan dengan jumlah uang yang diinvestasikan.

$$ROI = \frac{\text{Harga Jual} - \text{Investasi}}{\text{Investasi}} \times 100\%$$

$$0,25 = \frac{\text{Harga Jual} - 4.925.000}{4.925.000}$$

$$\text{Harga Jual} = \text{Rp } 6.156.250$$

Dari perhitungan ROI, didapatkan harga jual yaitu Rp 6.156.250 untuk 5 unit

2. *Net Present Value (NPV)*

Net Present Value (NPV) merupakan metode untuk mengevaluasi profitabilitas suatu proyek. Diasumsikan proyek berjalan selama 3 tahun dengan arus kas masuk bersih (Net Cash Flow) per tahun sebesar Rp 3.663.750 (Profit tahunan) dan suku bunga (discount rate) $r = 5\%$.

$$NPV = \sum \frac{C_t}{(1 + r)^t} - C_0$$

Dimana:

- C_t = Arus Kas per Tahun (Keuntungan Bersih) = Rp 3.663.750
- C_0 = Nilai Investasi Awal = Rp 4.925.000
- $r = 5\%$ (0,05)

$$NPV = \frac{3.489.286}{(1 + 0,05)^1} + \frac{3.323.129}{(1 + 0,05)^2} + \frac{3.164.885}{(1 + 0,05)^3} - 4.925.000$$

$$NPV = 3.489.286 + 3.323.129 + 3.164.885 - 4.925.000$$

$$NPV = 9.997.300 - 4.925.000$$

$$NPV = Rp\ 5.052.300$$

Dari perhitungan NPV, didapatkan nilai positif sebesar Rp 5.052.300 NPV yang positif menunjukkan bahwa investasi ini layak (*feasible*) karena diproyeksikan menghasilkan keuntungan melebihi biaya modal yang dikeluarkan.

3. B/C Rasio (*Benefit Cost Ratio*)

Benefit Cost Ratio adalah metode perbandingan antara manfaat (pendapatan) dengan biaya.

$$\text{Analisis B/C Ratio} = \frac{PV[\text{Benefits}]}{PV[\text{Cost}]}$$

Menggunakan *Present Value* (PV) dari total pendapatan selama 3 tahun dibandingkan dengan investasi awal.

- PV Pendapatan (3 tahun) $\approx 3.489.286 + 3.323.129 + 3.164.885 = Rp\ 9.997.300$
- PV Biaya (Investasi) = Rp 4.945.000

$$\text{Analisis B/C Ratio} = \frac{9.997.300}{4.945.000} = 2.02$$

Analisis B/C Ratio menunjukkan nilai 2,02 (lebih besar dari 1). Ini dapat diartikan bahwa usulan solusi ini sangat menguntungkan, di mana setiap Rp 1 yang dikeluarkan berpotensi memberikan manfaat sebesar Rp 2,02.

BAB III

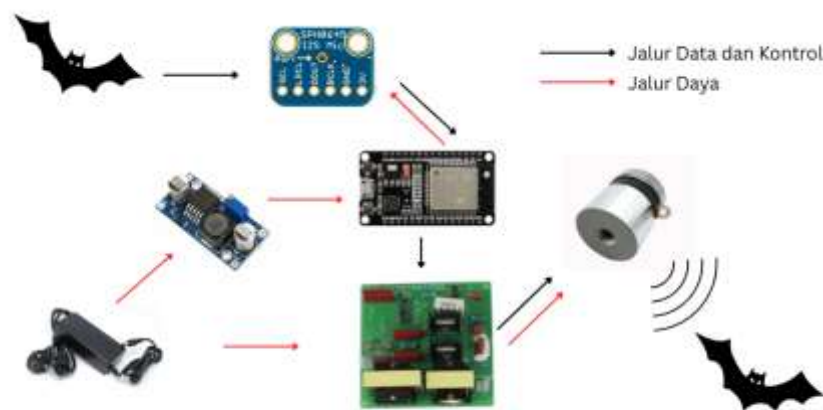
RANCANGAN

3.1 Rancangan Umum Sistem

Rancangan proses sistem bertujuan untuk melihat hubungan seluruh sistem mulai dari input, pemrosesan, hingga output agar sistem mampu bekerja dengan baik dan dapat mencapai tujuan fungsional sistem. Rancangan proses atau alur kerja dari sistem secara umum

3.1.1 Rancangan Umum Sub Sistem Mitigasi Kelelawar

Rancangan umum Sub Sistem Mitigasi Kelelawar bertujuan untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai arsitektur perangkat keras, alur kerja sistem, dan desain fisik alat yang akan diimplementasikan di Gedung Auditorium. Sistem ini dirancang sebagai perangkat *embedded standalone* yang berfungsi mendeteksi keberadaan kelelawar melalui sinyal ultrasonik dan melakukan pengusiran secara otomatis menggunakan gelombang suara berintensitas tinggi. Secara garis besar, rancangan umum sistem ini dibagi menjadi tiga bagian utama: arsitektur blok sistem, desain *casing*, dan strategi penempatan.



Gambar 3. 1 Blok Diagram Sistem Mitigasi Kelelawar

Diagram blok pada Gambar 3.1 menggambarkan arsitektur perangkat keras sistem yang terbagi menjadi dua jalur utama: jalur distribusi daya dan jalur sinyal kontrol.

Pemisahan ini dirancang untuk menjaga kestabilan mikrokontroler dari fluktuasi tegangan yang disebabkan oleh beban induktif transduser.

1. Jalur Distribusi Daya

Jalur ini ditenagai oleh sumber daya eksternal berupa Adaptor DC 12V dengan kapasitas arus 5 Ampere. Tegangan 12V ini didistribusikan ke dua cabang utama:

- Cabang Daya Tinggi: Tegangan 12V disalurkan secara langsung ke blok Driver . Jalur ini menyediakan arus besar yang dibutuhkan untuk *Transduser Ultrasonik PZT-4* agar dapat menghasilkan suara. Driver ini tidak membebani regulator mikrokontroler, melainkan mengambil daya murni langsung dari *Power Supply*.
- Cabang Daya Rendah: Tegangan 12V juga masuk ke modul *Step-Down Converter* (LM2596) yang berfungsi menurunkan tegangan menjadi 5V yang stabil. Tegangan 5V ini kemudian digunakan untuk menyuplai daya ke otak sistem, yaitu ESP32, serta sensor mikrofon.

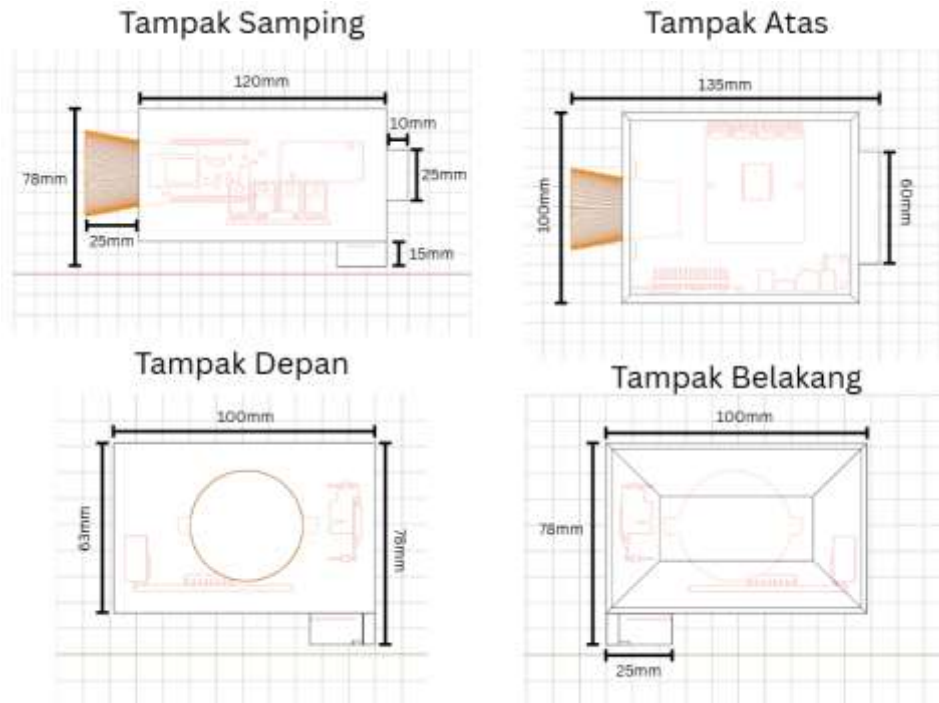
2. Jalur Data dan Kontrol

Alur logika sistem berpusat pada mikrokontroler ESP32 yang mengendalikan perifer input dan output:

- Input Sensing: Sensor akustik SPH0645 mengirimkan data audio digital ke ESP32 melalui protokol komunikasi I2S . Jalur ini memungkinkan transmisi data suara berkecepatan tinggi yang meminimalkan *noise* analog.
- Output (Actuating): Berdasarkan hasil pemrosesan sinyal, ESP32 mengirimkan sinyal kendali berupa gelombang kotak PWM ke Driver. Sinyal logika dari ESP32 ini berfungsi sebagai pemicu *trigger* untuk memerintahkan MOSFET pada driver agar membuka dan menutup aliran listrik 12V ke transduser sesuai frekuensi ultrasonik yang diinginkan.

3. Transduser Piezoelektrik (PZT)

Transduser PZT-4 bertindak sebagai aktuator akhir yang mengubah energi listrik menjadi suara ultrasonik. Komponen ini terisolasi dari mikrokontroler dan hanya terhubung secara fisik ke output driver untuk memastikan keamanan sistem digital dari beban balik yang mungkin terjadi



Gambar 3. 2 Gambar Teknik Sistem Mitigasi Kelelawar

Gambar diatas menjelaskan dimensi rancangan *casing* dengan bentuk persegi panjang. Pada bagian dalam terdapat komponen seperti aktuator dan drivernya, ESP32, dan LM2596 yang disusun pada tiap sisinya agar memiliki tujuan berbeda seperti pada sisi kiri merupakan tempat driver aktuator yang akan menjadi panas seiring pemakaian sehingga dibutuhkan ventilasi pada bagian tersebut dan pada sisi kanan adalah tempat LM2596 dan esp32 agar performa mikrokontroler tidak terpengaruh dari panas driver. Pada bagian belakang ada slot untuk dipasangkan ke pengait pada dinding dan sistem *pod* pada bagian bawah casing adalah sebagai tempat untuk sensor akustik agar membuat performanya lebih baik dibandingkan berada di dalam *casing*



Gambar 3. 3 Gambar 3D Sistem Mitigasi Kelelawar

Desain mekanikal perangkat dikonstruksi berdimensi estimasi 100 mm x 135 mm x 78 mm yang dicetak menggunakan teknologi 3D Printing berbahan filamen tahan panas (PETG/ABS) untuk menjamin *durabilitas* di lingkungan plafon auditorium. Manajemen termal sistem menerapkan mekanisme ventilasi pasif yang di mana udara dingin ditarik masuk melalui perforasi dasar *casing* dan panas dari komponen daya dibuang secara alami melalui kisi-kisi ventilasi vertikal pada dinding samping, didukung oleh penggunaan *standoff* PCB untuk memaksimalkan sirkulasi udara. Guna menjamin akurasi deteksi, sensor mikrofon diisolasi secara mekanik di sudut *casing* (*recessed corner mount*) menggunakan peredam busa untuk meminimalisir saturasi sinyal akibat getaran transduser PZT. Fleksibilitas instalasi *non-destructive* difasilitasi oleh desain *mounting* menggunakan pengait kipas dinding universal, sementara adaptor daya diposisikan secara eksternal di sisi belakang untuk menjaga keseimbangan titik berat alat.



Gambar 3. 4 Gambar 3D Aplikasi Sistem Mitigasi Kelelawar

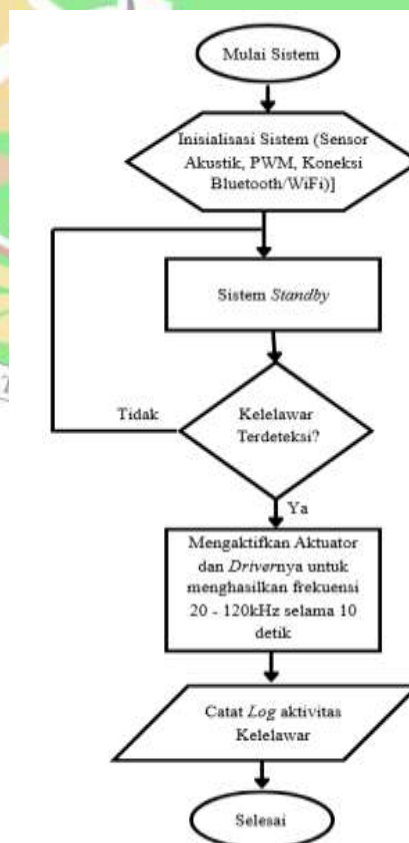
Gambar di atas menampilkan simulasi visual dalam bentuk 3D aplikasi nyata. Gambar ini memberikan gambaran tentang bagaimana alat yang dirancang akan berfungsi di lingkungan sebenarnya. Melalui visualisasi ini, diharapkan dapat lebih memahami bagaimana alat akan terlihat dan beroperasi saat diimplementasikan, serta bagaimana interaksi antar komponen terjadi dalam kondisi nyata.

3.2 Rancangan Proses

Rancangan proses sistem bertujuan untuk melihat hubungan seluruh sistem mulai dari input, pemrosesan, hingga output agar sistem mampu bekerja dengan baik dan dapat mencapai tujuan fungsional sistem.

3.2.1 Rancangan Proses Sub-Sistem Mitigasi Kelelawar

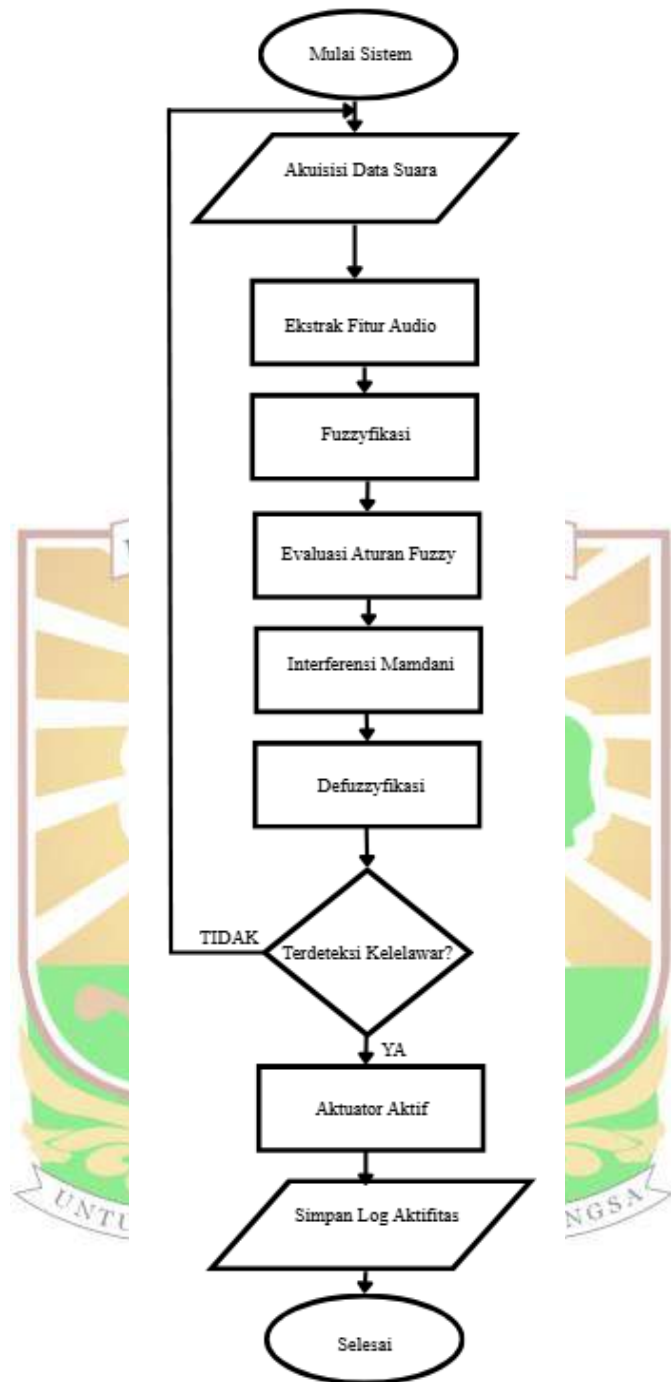
Berikut rancangan proses yang terdiri dari *flowchart* rancangan proses



Gambar 3. 5 *Flowchart* Rancangan Proses Sistem Mitigasi

Flowchart pada Gambar 3.5 di atas menggambarkan alur kerja perangkat pada sub-sistem mitigasi kelelawar. Proses dimulai dari tahapan inisialisasi sistem, yaitu saat perangkat mendapatkan catu daya dan mikrokontroler mulai beroperasi. Selanjutnya, sistem melakukan inisiasi seluruh variabel dan antarmuka, meliputi konfigurasi pin GPIO , pengaturan kanal PWM untuk frekuensi suara, serta pembentukan koneksi komunikasi nirkabel. Tahap inisiasi ini bertujuan untuk memastikan modul driver transduser dan jalur komunikasi siap menerima instruksi dari sub-sistem deteksi. Setelah inisiasi berhasil, sistem masuk ke kondisi *standby* atau menunggu data. Pada tahap ini, sistem secara kontinu memeriksa apakah terdapat sinyal *trigger* atau data masuk yang menyatakan status "Kelelawar Terdeteksi". Apabila tidak ada data deteksi yang diterima, sistem akan tetap bertahan pada mode *standby* untuk menghemat penggunaan daya.

Sebaliknya, apabila sistem menerima data valid bahwa kelelawar terdeteksi, mikrokontroler akan segera mengaktifkan driver transduser. Sistem kemudian membangkitkan gelombang ultrasonik dengan metode *frequency sweeping* pada rentang 20kHz hingga 120kHz. Teknik ini digunakan sebagai mekanisme gangguan agar kelelawar tidak dapat beradaptasi terhadap satu frekuensi konstan dan apabila durasi mitigasi telah melebihi batas waktu yang ditentukan (10 detik), sistem secara otomatis mematikan transduser untuk mencegah *overheat* pada komponen. Selanjutnya, sistem mengirimkan status waktu dan titik deteksi pada log aktivitas.



Gambar 3. 6 Flowchart Sistem Fuzzy Logic

Proses diawali dengan akuisisi sinyal suara menggunakan sensor mikrofon yang berfungsi menangkap suara kelelawar. Sinyal suara yang diperoleh masih berupa data mentah, sehingga perlu dilakukan tahap ekstraksi fitur audio untuk memperoleh parameter-parameter yang relevan. Parameter yang diekstraksi meliputi intensitas suara (dB) sebagai indikator tingkat kebisingan, frekuensi

dominan (Hz) yang menunjukkan karakter spektrum suara, stabilitas amplitudo untuk menilai kestabilan energi suara dalam selang waktu tertentu, serta rasio harmonik yang mencerminkan posisi kelelawar.

Nilai-nilai parameter hasil ekstraksi selanjutnya diproses pada tahap fuzzifikasi, yaitu mengubah nilai numerik (*crisp*) menjadi derajat keanggotaan pada masing-masing himpunan *fuzzy*. Tahap ini memungkinkan satu nilai masuk ke lebih dari satu himpunan dengan tingkat keanggotaan tertentu, sehingga dapat mengakomodasi ketidakpastian dan variasi sinyal suara di lingkungan nyata.

Setelah fuzzifikasi, sistem melakukan evaluasi aturan *fuzzy* yang disusun dalam bentuk aturan *IF-THEN*. Aturan-aturan tersebut merepresentasikan pengetahuan pakar mengenai karakteristik suara knalpot standar dan tidak standar. Proses evaluasi aturan dilakukan menggunakan metode inferensi Mamdani, di mana derajat keanggotaan dari setiap parameter digabungkan untuk menghasilkan keluaran *fuzzy*.

Tahap selanjutnya adalah defuzzifikasi, yang bertujuan mengubah keluaran *fuzzy* menjadi nilai tegas (*crisp*). Metode yang digunakan adalah centroid (*center of gravity*) karena mampu memberikan hasil keluaran yang representatif terhadap keseluruhan area *fuzzy*. Nilai hasil defuzzifikasi kemudian dibandingkan untuk menentukan keputusan akhir klasifikasi.

Pada tahap keputusan, sistem mengelompokkan suara knalpot ke dalam dua kategori. Apabila hasil klasifikasi menunjukkan tidak terdeteksi kelelawar, maka sistem kembali ke proses monitoring suara. Sebaliknya, apabila hasil klasifikasi menunjukkan terdeteksi kelelawar, sistem akan melakukan tindak lanjut berupa pengaktifan aktuator yaitu *ultrasonic transducer* serta penyimpanan data kejadian ke dalam memori sistem.

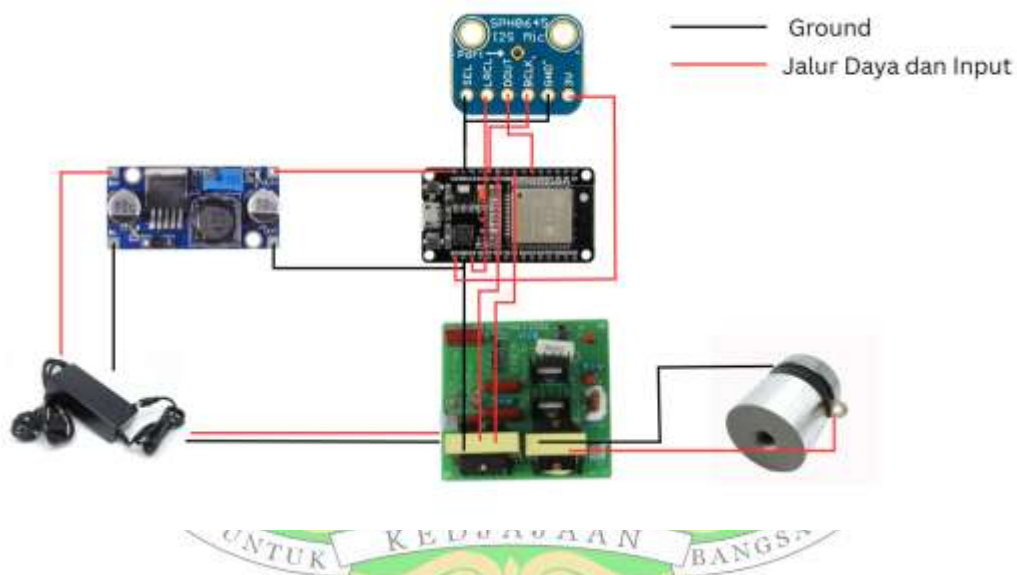
Dengan alur tersebut, *flowchart* sistem *fuzzy logic* tidak hanya berfungsi sebagai mekanisme klasifikasi suara, tetapi juga terintegrasi dengan sistem dokumentasi sehingga mendukung pemantauan kelelawar yang terstruktur

3.3 Rancangan Detail Komponen Sistem

3.3.1 Rancangan Perangkat Keras

3.3.1.1 Sub-Sistem Mitigasi Kelelawar

Perangkat keras pada sub-sistem mitigasi kelelawar ini dirancang untuk membangkitkan gelombang ultrasonik dengan frekuensi tertentu, menerima perintah dari sistem deteksi, serta memastikan operasional perangkat berjalan stabil. Komponen utama yang digunakan meliputi sensor akustik SPH0645, mikrokontroler ESP32, driver + transduser ultrasonik, dan *power supply*. Berikut ini adalah gambar skematik dari perangkat keras sistem.



Gambar 3. 7 Skematik Rangkaian Hardware Mitigasi Kelelawar

Dari Gambar di atas dapat dilihat beberapa perangkat keras yang digunakan pada sub-sistem mitigasi kelelawar. Berikut ini penjelasan tentang perangkat keras dari komponen yang digunakan.

a. Sensor Akustik (SPH0645)

Digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan kelelawar di sekitar sistem sehingga nantinya data dari sensor dapat menjadi penentu apakah sistem mitigasi akan berjalan atau tidak

b. ESP32

Digunakan sebagai pusat pengendali utama (mikrokontroler) yang bertanggung jawab untuk mengatur pembangkitan frekuensi dan komunikasi data. ESP32 menerima perintah aktivasi dari sub-sistem deteksi melalui protokol komunikasi nirkabel (WiFi/*Bluetooth*). Selain itu, ESP32 bertugas menghasilkan sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) yang akan dikirimkan ke driver transduser.

c. Driver dan *Ultrasonic* Transducer

Driver transduser berfungsi sebagai penguat sinyal dan jembatan antara mikrokontroler dengan transduser ultrasonik. Karena sinyal keluaran dari pin GPIO ESP32 memiliki arus yang kecil, driver ini diperlukan untuk mengamplifikasi arus dan tegangan dari power supply agar mampu menggerakkan membran speaker dengan daya yang cukup untuk menghasilkan suara yang keras. Transduser ultrasonik berfungsi sebagai aktuator utama untuk mengubah sinyal listrik menjadi gelombang suara. Komponen ini dirancang khusus untuk menghasilkan frekuensi tinggi di atas ambang pendengaran manusia (ultrasonik). Transduser ini akan memancarkan gelombang suara hasil *sweeping frequency* untuk mengganggu sistem ekolokasi kelelawar dan mengusir mereka dari area target.

d. *Power Supply*

Power Supply berfungsi menyuplai tegangan listrik yang stabil ke seluruh komponen. Mengingat driver transduser membutuhkan daya yang cukup besar untuk menghasilkan gelombang ultrasonik yang kuat, catu daya ini mendistribusikan tegangan untuk memastikan sistem mitigasi dapat beroperasi secara kontinu tanpa penurunan performa.

Tabel 3. 1 Pin Out sistem

No	Komponen Asal	Pin Asal	Komponen Tujuan	Pin Tujuan	Keterangan / Fungsi
1	Power Supply	12V (+)	Driver	12V	Suplai daya utama untuk penguat sinyal.
2	Power Supply	GND (-)	Driver	GND	Common Ground.
3.	SPH0645	3 V	ESP32	3.3V	Daya Sensor
4.	SPH0645	GND	ESP32	GND	Common Ground.
5.	SPH0645	BCLK	ESP32	GPIO 14	Serial Clock untuk sinkronisasi pengiriman data audio per bit.
6	SPH0645	LRCLK	ESP32	GPIO 15	Menentukan data audio untuk kanal Kiri atau Kanan.
7	SPH0645	DOUT	ESP32	GPIO 32	Mengirimkan data digital suara dari sensor ke ESP32.
8	SPH0645	SEL	ESP32	GND	Memilih Channel

9	ESP32	VIN / 5V	LM2596	5V (+)	Suplai daya untuk mikrokontroler.
10	ESP32	GND	<i>Driver</i>	GND	<i>Common Ground</i> .
11	ESP32	GPIO 25 (D25)	<i>Driver</i>	IN1	Mengirim sinyal PWM.
12	ESP32	GPIO 27 (D27)	<i>Driver</i>	ENA	Mengaktifkan/mematikan driver (Enable).
13	Driver L298N	OUT1	<i>Transducer</i>	Positif (+)	Output sinyal ultrasonik ke speaker.
14	Driver L298N	OUT2	<i>Transducer</i>	Negatif (-)	Output sinyal ultrasonik ke speaker.

3.3.2 Rancangan Perangkat Lunak

3.3.2.1 Rancangan Perangkat Lunak Sub-Sistem Mitigasi Kelelawar

Sistem dirancang untuk diproses menggunakan metode komputasi *Fuzzy Logic*, dengan jenis yang digunakan adalah *Fuzzy Logic Mamdani* karena pada *fuzzy mamdani* memiliki aturan linguistik dan *output* linguistik yang mudah untuk disesuaikan. Metode ini dulunya digunakan untuk mengendalikan mesin uap dan *boiler* yang dikombinasikan dengan sekumpulan aturan kontrol linguistik yang dapat di peroleh melalui operator yang berpengalaman dalam bidang tersebut.

Terdapat beberapa tahapan untuk menentukan *output* diantaranya ada defuzzifikasi, aturan *fuzzy*, inferensi, dan defuzzifikasi.

1. Fuzzifikasi

Pada proses *fuzzyfikasi* terdapat 3 variabel masukan pada sistem ini, yaitu variabel tekanan dengan nilai Rendah, Sedang, dan Tinggi, dan variabel Intensitas, Frekuensi, dan Durasi. Kemudian ada 1 variabel *output* yaitu variabel kondisi penggunaan dengan *noise*, kemungkinan rendah, ada kelelawar

Tabel 3. 2 Himpunan *Fuzzy* Variabel Intensitas Sinyal

Kondisi (Linguistik)	Range (Nilai ADC I2S)
Rendah	0 - 4500
Sedang	3500 - 13000
Tinggi	10000 - 32768

Tabel 3. 3 Himpunan *Fuzzy* Variabel Frekuensi

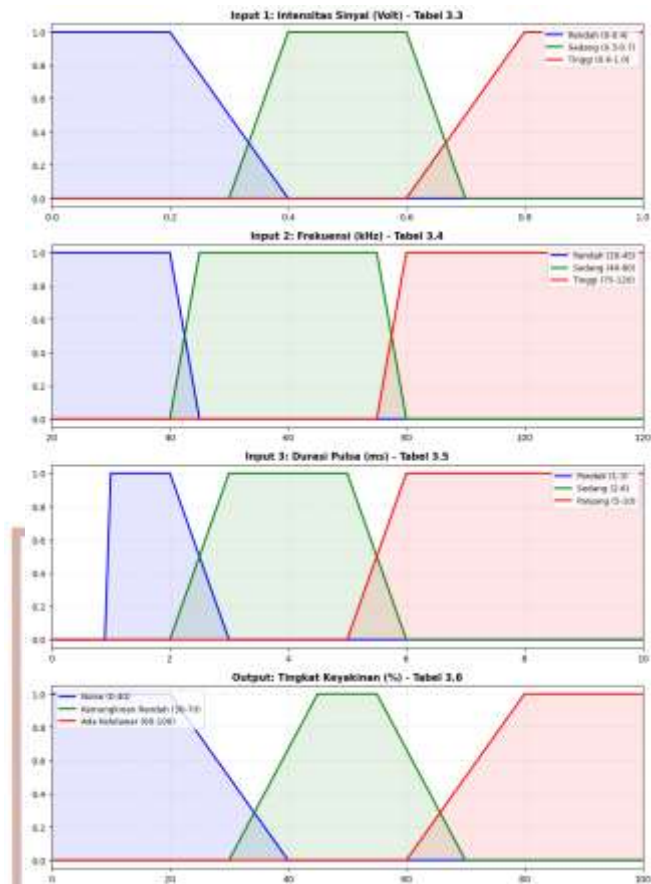
Kondisi	Range (kHz)
Rendah	0 - 9 kHz
Sedang	8 - 16 kHz
Tinggi	14 - 22 kHz
Ultrasonik	21 - 50 kHz

Tabel 3. 4 Himpunan *Fuzzy* Variabel Durasi Pulsa

Kondisi (Linguistik)	Range (Satuan ms)
Pendek	0 - 18 ms
Sedang	18 - 190 ms
Panjang	180 - 1000 ms

Tabel 3. 5 Himpunan *Fuzzy* Variabel Tingkat Keyakinan

Kondisi (Linguistik)	Range (Nilai Keyakinan 0-100)
<i>Noise</i>	0 - 50
Tidak Yakin	40-65
Ada kelelawar	75 - 100



Gambar 3. 8 Fungsi Keanggotaan

2. Aturan *Fuzzy*

Pada aturan *Fuzzy*, pemetaan suatu input menjadi output berdasarkan aturan IF-THEN, dengan *rule* didapatkan berdasarkan dari jumlah himpunan *fuzzy* yang digunakan dari masing-masing variabel input (Intensitas, Frekuensi, Durasi Pulsa) dan variabel output (Tingkat Keyakinan). Pengambilan keputusan untuk output *fuzzy* di sini ditentukan sendiri oleh penulis yang mengacu pada karakteristik biologis suara ekolokasi kelelawar dan *noise* lingkungan.

Berikut adalah representasi aturan inferensi yang digunakan:

1. IF Intensitas adalah Rendah AND Frekuensi adalah Rendah AND Durasi Pulsa adalah Pendek, THEN Tingkat Keyakinan adalah *Noise*.

2. IF Intensitas adalah Rendah AND Frekuensi adalah Sedang AND Durasi Pulsa adalah Panjang, THEN Tingkat Keyakinan adalah *Noise*.
3. IF Intensitas adalah Sedang AND Frekuensi adalah Rendah AND Durasi Pulsa adalah Sedang, THEN Tingkat Keyakinan adalah *Noise*.
4. IF Intensitas adalah Sedang AND Frekuensi adalah Tinggi AND Durasi Pulsa adalah Panjang, THEN Tingkat Keyakinan adalah Tidak Yakin (Kemungkinan Gangguan Elektronik).
5. IF Intensitas adalah Tinggi AND Frekuensi adalah Rendah AND Durasi Pulsa adalah Panjang, THEN Tingkat Keyakinan adalah *Noise* (Kemungkinan Suara Mesin).
6. IF Intensitas adalah Tinggi AND Frekuensi adalah Sedang AND Durasi Pulsa adalah Sedang, THEN Tingkat Keyakinan adalah Tidak Yakin.
7. IF Intensitas adalah Tinggi AND Frekuensi adalah Tinggi AND Durasi Pulsa adalah Panjang, THEN Tingkat Keyakinan adalah Tidak Yakin.
8. IF Intensitas adalah Sedang AND Frekuensi adalah Tinggi AND Durasi Pulsa adalah Pendek, THEN Tingkat Keyakinan adalah Valid (Kelelawar).
9. IF Intensitas adalah Tinggi AND Frekuensi adalah Tinggi AND Durasi Pulsa adalah Pendek, THEN Tingkat Keyakinan adalah Valid (Kelelawar).

3. Inferensi

Pada tahap inferensi, aturan-aturan yang telah disusun pada tahap sebelumnya dievaluasi berdasarkan input yang diterima dari sensor. Metode yang digunakan adalah metode Max-Min. Fungsi MIN digunakan untuk implikasi (menentukan nilai α -predikat setiap aturan berdasarkan operator AND), dan fungsi MAX digunakan untuk agregasi (menggabungkan semua hasil aturan).

Sebagai simulasi pengujian sistem, diambil contoh sampel data input sensor saat mendeteksi keberadaan kelelawar sebagai berikut:

1. Intensitas Sinyal = 0.85 Volt (Kategori: Tinggi)
2. Frekuensi = 95 kHz (Kategori: Tinggi)
3. Durasi Pulsa = 2 ms (Kategori: Pendek)

A. Penentuan Nilai Keanggotaan (μ)

Berdasarkan grafik fungsi keanggotaan yang telah dibuat, nilai input tersebut dipetakan menjadi derajat keanggotaan:

- Intensitas (0.85 V)
 - $\mu_{sedang}(0.85) = 0.0$
 - $\mu_{tinggi}(0.85) = 0.7$
- Frekuensi (95 kHz)
 - $\mu_{sedang}(95) = 0.2$
 - $\mu_{tinggi}(95) = 0.6$
- Durasi (2 ms)
 - $\mu_{rendah}(2) = 0.8$
 - $\mu_{sedang}(2) = 0.0$

B. Evaluasi Aturan

Sistem mengevaluasi aturan yang relevan (aturan yang memiliki nilai keanggotaan > 0). Dalam kasus ini, aturan yang paling aktif adalah Rule 9 (Kondisi Kelelawar Valid).

Rule 9: IF Intensitas Tinggi AND Frekuensi Tinggi AND Durasi Pendek THEN Keyakinan Valid.

$$\alpha_9 = \min(\mu_{intensitasTinggi}, \mu_{FrekuensiTinggi}, \mu_{DurasiPendek}) \quad (3.1)$$

$$\alpha_9 = \min(0,7;0,6;0,8)$$

$$\alpha_9 = 0,6$$

Hasil: Nilai kekuatan aturan ke-9 adalah 0.6. Maka, himpunan output "Valid" akan dipotong (clipping) pada ketinggian 0.6.

Pengecekan Rule Lain (Contoh Rule 4 - *Noise*/Elektronik): IF Intensitas Sedang AND Frekuensi Tinggi AND Durasi Panjang. Karena $\mu_{intensitasSedang} = 0$ dan $\mu_{DurasiPanjang} = 0$, maka:

$$\alpha_9 = \min(0; 0,6; 0) = 0 \quad (3.2)$$

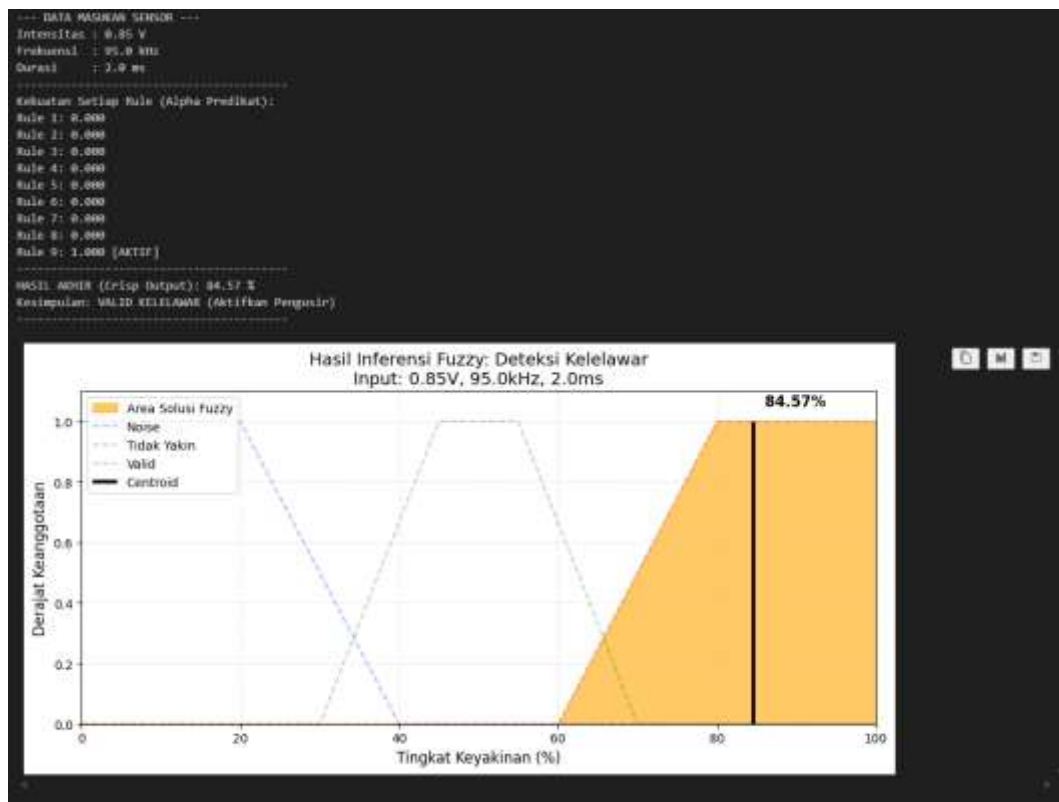
Rule tidak aktif

C. Agregasi

Setelah semua aturan dievaluasi, dilakukan proses agregasi menggunakan metode MAX untuk menggabungkan daerah *fuzzy* dari semua aturan yang aktif.

$$\mu_{agregasi}(y) = \max(\alpha_{Rule1}, \alpha_{Rule2}, \dots, \alpha_{Rule9}) \quad (3.3)$$

Karena pada contoh ini hanya Rule 9 yang dominan menghasilkan output "Valid" dengan nilai 0.6, maka daerah solusi *fuzzy* yang terbentuk adalah daerah pada himpunan "Valid" yang terpotong pada ketinggian 0.6. Daerah inilah yang selanjutnya akan diproses pada tahap Defuzzifikasi



Gambar 3. 9 Hasil Defuzzifikasi

3.4 Rencana Jadwal Pengerjaan

Pada jadwal pengerjaan ini dijelaskan timeline pembuatan laporan berdasarkan waktu pembuatan alat. Rincian durasi penulisan laporan dan proses pembuatan alat dapat dilihat pada tabel 3.14 berikut.

Tabel 3. 6 Rencana Jadwal Pengerjaan

No	Rencana Pengerjaan	Waktu Pelaksanaan
1	Menentukan dan fiksasi CEP	26 Agustus - 13 September 2025
2	Menentukan dan fiksasi solusi	14 September - 18 Oktober 2025
3	Membuat spesifikasi sistem, verifikasi dan perencanaa pasar produk	19 Oktober - 22 November 2025
4	Membuat dan fiksasi rancangan sistem	23 November - 31 Desember 2025
5	Pembuatan Alat	8 Januari - 7 Maret 2026

6	Menulis BAB 4	8 Maret - 7 April 2026
7	Menulis BAB 5	8 April - 9 Mei 2026

Tabel 3.8 di atas menunjukkan rencana jadwal pengerjaan yang meliputi berbagai tahapan, mulai dari penentuan CEP hingga penulisan laporan. Setiap tahapan dilengkapi dengan waktu pelaksanaan yang jelas, yang memberikan gambaran mengenai alur kerja dan durasi masing-masing kegiatan dalam pengembangan alat.



Gambar 3. 10 Gantt Chart Kegiatan

Gambar 3.49 di atas merupakan gantt chart yang menggambarkan jadwal kegiatan proyek secara visual. Gantt chart ini menunjukkan durasi dan hubungan antar kegiatan, serta membantu dalam memantau kemajuan proyek berdasarkan waktu yang telah direncanakan.

BAB IV

IMPLEMENTASI

4.1 Implementasi Sistem

Berikut merupakan implementasi sistem yang terdiri dari implementasi perangkat keras, implementasi perangkat lunak, dan implementasi sistem dari mitigasi kelelawar dibuat.



Gambar 4. 1 Implementasi keseluruhan sistem

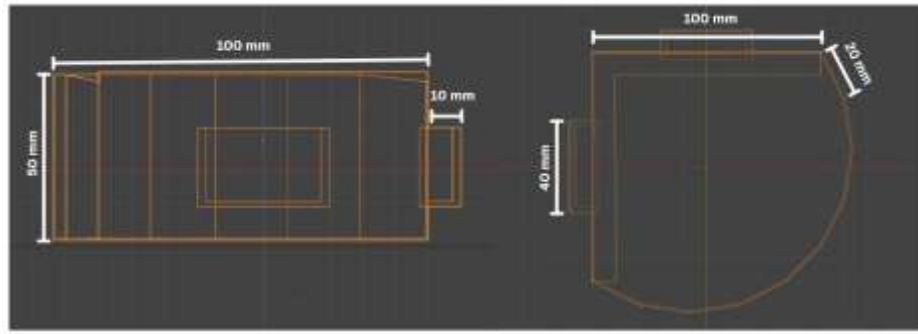
Hasil implementasi berupa alat yang dapat diletakkan di pojok ruangan dan website yang akan menampilkan informasi yang dibutuhkan untuk melihat statistik aktivitas dan pengusiran kelelawar. Implementasi perangkat keras dan perangkat lunak dapat dilihat pada gambar 4.1.

4.1.1 Implementasi Perangkat Keras

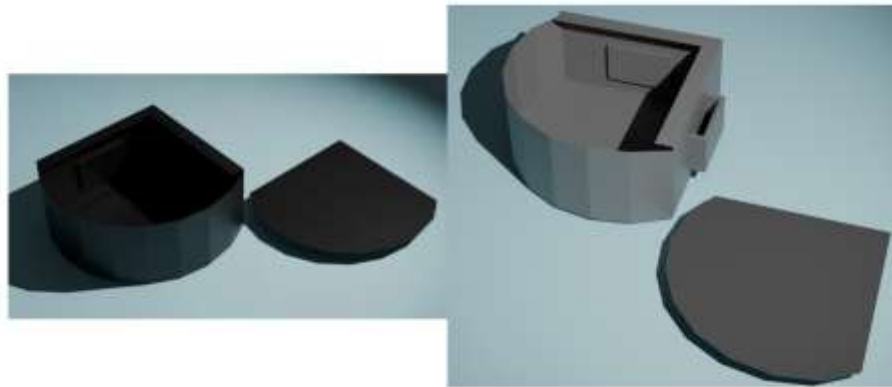
Terdapat beberapa perubahan pada implementasi perangkat keras, yaitu:

1. Perubahan Pada Casing

Perangkat keras sistem diimplementasikan pada casing yang memiliki bentuk seperempat lingkaran untuk efisiensi desain dan implementasi, sehingga saat alat dipasang pada sudut manapun tidak akan terjadi alat yang terbalik dan menjaga efisiensi alat pada peletakan yang berbeda - beda.



Gambar 4. 2 Gambar teknik casing baru



Gambar 4. 3 Casing Versi Baru

Casing dibuat dengan 3d printing dan menjaga kesan *stealthy* dengan membuat casing berwarna gelap dan memiliki desain yang simpel. Selain itu, sensor dan aktuator diletakkan pada bagian luar agar menjaga kinerja tiap komponen sehingga menjadi lebih maksimal.

2. Mengubah sensor dari SPH0645 ke INMP441.

Perubahan sensor dilakukan dikarenakan penggunaan SPH0645 dengan memaksa *sampling rate* yang sangat tinggi dapat memperpendek usia dari sensor tersebut sehingga dibutuhkan penggantian sensor. Namun, sensor SPH0645 cukup sulit untuk didapatkan secara lokal sehingga INMP441 adalah pengganti yang patut dipertimbangkan sehingga dengan beberapa konfigurasi ulang sistem deteksi kelelawar melalui suara tetap dapat dilakukan walaupun dengan sensor yang berbeda seperti penempatan di luar dilakukan agar hasil pembacaan tidak terganggu dan sensor dapat lebih sensitif dalam menangkap respons suara dari kelelawar.

3. Mengubah jenis aktuator menjadi *piezo tweeter* dari PZT-4.

Perubahan ini dilakukan karena *piezo tweeter* memiliki respons frekuensi yang lebih lebar dan mampu menghasilkan suara dengan intensitas tinggi tanpa harus menggunakan daya yang terlalu besar. Ditambah dengan aktuator yang dipilih sebelumnya juga sangat sulit untuk ditemukan secara lokal dan dengan waktu yang ada sangat sulit untuk di konfigurasi sebagai aktuator yang harusnya mengusir kelelawar

4. Menambahkan MOSFET IRFZ44N.

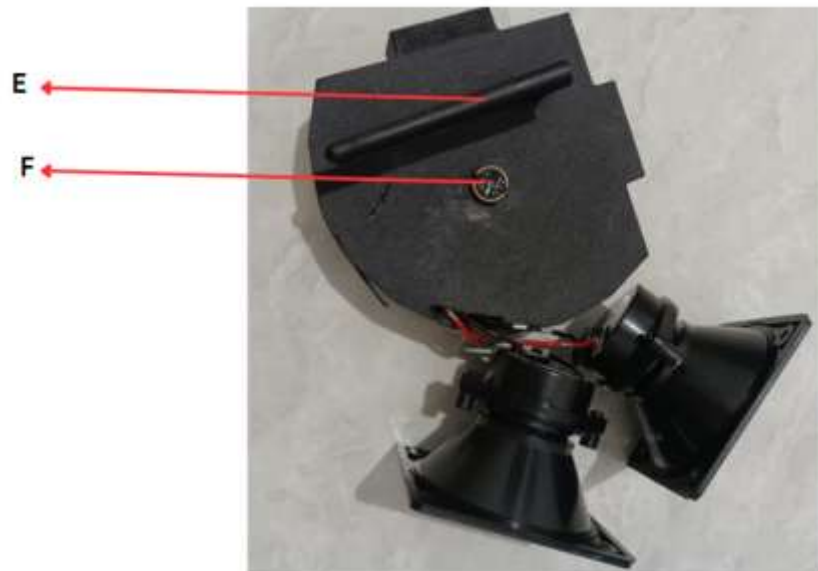
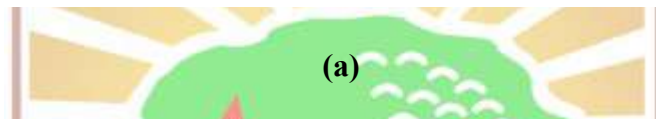
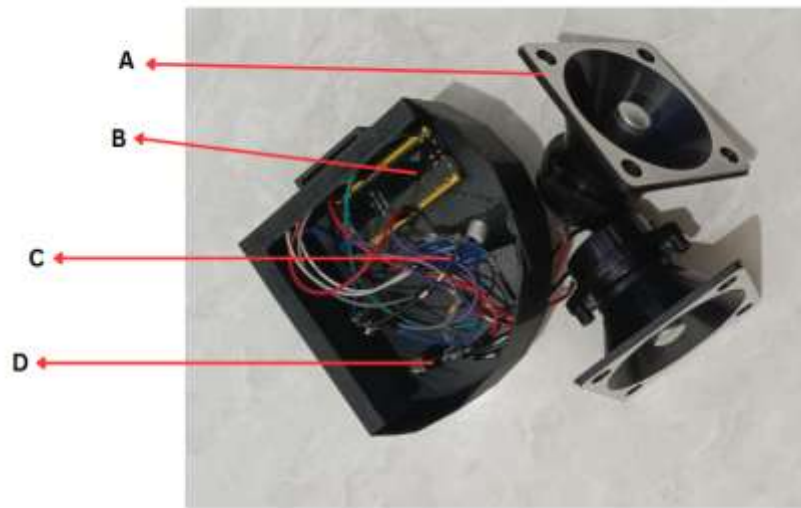
Pada awalnya PZT-4 sudah memiliki *driver* sendiri karna sudah se-paket sehingga pada *piezo tweeter* komponen ini digunakan sebagai *gate* penghubung dari mikrokontroler ke aktuator agar sistem kendali aktuator tetap aman, meskipun beroperasi pada rentang voltase yang lebih tinggi.

5. Mengganti mikrokontroler dari ESP32 menjadi ESP32S3.

Perubahan mikrokontroler ini dilakukan karena sistem membutuhkan jangkauan sinyal Wi-Fi yang lebih luas, dengan tetap menggunakan adaptor 12V 5A sebagai sumber daya utamanya.



Gambar 4. 4 Implementasi Sistem



(b)

Gambar 4. 5 Implementasi Perangkat Keras Pada Casing (a) Komponen Pada Dalam Casing (b) Komponen Pada Luar Casing

Keterangan gambar 4.5 :

- a. Piezo Tweeter berfungsi sebagai aktuator untuk menghasilkan suara yang dapat mengusir kelelawar

- b. ESP32S3 berfungsi sebagai mikrokontroler utama dari sistem
- c. LM2596 berfungsi sebagai penurun tegangan dari 12V ke 5V agar mikrokontroler dan sensor mendapat daya tanpa harus dari sumber lain
- d. IRF44N berfungsi sebagai penerima sinyal kontrol dari esp32 ke aktuator agar dapat dilakukan aktuasi pengusiran
- e. Antena 2,4 Ghz berfungsi untuk memperluas jangkauan Wi-Fi dari tiap unit pengusiran
- f. INMP441 berfungsi sebagai sensor yang menangkap suara dari aktivitas kelelawar dan mengirim data hasil tangkapan ke mikrokontroler

4.1.2 Implementasi Perangkat Lunak

Terdapat beberapa perubahan pada implementasi perangkat lunak, yaitu:

1. Penambahan Anggota Himpunan Waktu (Jam)

Tabel 4. 1 Himpunan *Fuzzy* Variabel Waktu (Jam)

Kondisi (Linguistik)	Range (Jam)
Dini Hari	0 - 7
Siang	6-18
Malam	17 - 24

Penambahan fungsi keanggotaan waktu dilakukan dikarenakan perilaku dari kelelawar setelah diamati tidak beraktivitas pada siang hari, sehingga dilakukan penambahan untuk menghindari *fail-positive* dapat terjadi pada siang hari. Penambahan ini juga membantu sistem agar dapat membedakan burung walet dan kelelawar pemakan buah yang memiliki suara mirip karena jam aktivitas mereka yang berbeda

Parameter waktu ini didapat dengan menggunakan *library* Arduino yaitu Wifi.H sehingga mikrokontroler dapat meminta informasi waktu yang dapat di

sinkronisasi melalui internet dan dapat menjamin bahwa waktu yang ada pada mikrokontroler tetap akurat

2. Penambahan Aturan *Fuzzy* dari 9 ke 32.

Tabel 4. 2 Aturan *Fuzzy*

No.	Aturan Logika (<i>Fuzzy Rules</i>)	Alasan Ditambahkan
Grup A	Positif Kelelawar	
1.	IF Waktu adalah Malam AND Frekuensi adalah Tinggi AND Sinyal Ultrasonik adalah Kuat AND Durasi Pulsa adalah Kelelawar AND Intensitas adalah Sedang, THEN Tingkat Keyakinan adalah Valid (Positif Kelelawar).	Kondisi ideal malam (jam 17-24)
2.	IF Waktu adalah Malam AND Frekuensi adalah Tinggi AND Durasi Pulsa adalah Kelelawar AND Intensitas adalah Kuat, THEN Tingkat Keyakinan adalah Valid (Positif Kelelawar).	Kelelawar dekat sensor saat malam
3.	IF Waktu adalah Dini Hari AND Frekuensi adalah Tinggi AND Sinyal Ultrasonik adalah Kuat AND Durasi Pulsa adalah Kelelawar AND Intensitas adalah Sedang, THEN Tingkat Keyakinan adalah Valid (Positif Kelelawar).	Kondisi ideal dini hari (jam 24 -7)
4.	IF Waktu adalah Dini Hari AND Frekuensi adalah Tinggi AND Durasi Pulsa adalah Kelelawar AND Intensitas adalah Kuat, THEN Tingkat Keyakinan adalah Valid (Positif Kelelawar).	Kelelawar dekat sensor saat dini hari

5.	IF Sinyal Ultrasonik adalah Kuat AND Frekuensi adalah Tinggi AND Intensitas adalah Kuat AND Durasi Pulsa adalah Kelelawar, THEN Tingkat Keyakinan adalah Valid (Positif Kelelawar).	Sinyal ultrasonik sangat kuat
6.	IF Waktu adalah Malam AND Frekuensi adalah Tinggi AND Sinyal Ultrasonik adalah Kuat AND Intensitas adalah Kuat AND Durasi Pulsa adalah Kelelawar, THEN Tingkat Keyakinan adalah Valid (Positif Kelelawar).	Kelelawar jumlah besar saat malam dengan vol sangat kuat
7.	IF Waktu adalah Dini Hari AND Frekuensi adalah Tinggi AND Sinyal Ultrasonik adalah Kuat AND Intensitas adalah Kuat AND Durasi Pulsa adalah Kelelawar, THEN Tingkat Keyakinan adalah Valid (Positif Kelelawar).	Kelelawar jumlah besar saat dini hari
8.	IF Waktu adalah Malam AND Frekuensi adalah Sedang AND Sinyal Ultrasonik adalah Kuat AND Intensitas adalah Kuat AND Durasi Pulsa adalah Kelelawar, THEN Tingkat Keyakinan adalah Valid (Positif Kelelawar).	Malam frek sedang + US kuat + vol kuat
9.	IF Waktu adalah Dini Hari AND Frekuensi adalah Sedang AND Sinyal Ultrasonik adalah Kuat AND Intensitas adalah Kuat AND Durasi Pulsa adalah Kelelawar, THEN Tingkat Keyakinan adalah Valid (Positif Kelelawar).	Dini hari frek sedang + US kuat + vol kuat
10.	IF Sinyal Ultrasonik adalah Kuat AND Frekuensi adalah Sedang ke Tinggi AND Intensitas adalah Kuat AND Durasi Pulsa adalah Kelelawar, THEN Tingkat Keyakinan adalah Valid (Positif Kelelawar).	Frekuensi tinggi + vol kuat semua waktu

Grup B	Abaikan: <i>Noise</i>	
11.	IF Durasi Pulsa adalah Kilat, THEN Tingkat Keyakinan adalah <i>Noise</i> (Abaikan).	<i>Noise</i> suara decitan
12.	IF Frekuensi adalah Rendah, THEN Tingkat Keyakinan adalah <i>Noise</i> (Abaikan).	Suara manusia / mesin
13.	IF Durasi Pulsa adalah Panjang, THEN Tingkat Keyakinan adalah <i>Noise</i> (Abaikan).	<i>Noise</i> durasi panjang
14.	IF Intensitas adalah Lemah, THEN Tingkat Keyakinan adalah <i>Noise</i> (Abaikan).	<i>Noise</i> intensitas lemah
15.	IF Frekuensi adalah Rendah AND Intensitas adalah Kuat AND Durasi Pulsa adalah Kilat, THEN Tingkat Keyakinan adalah <i>Noise</i> (Abaikan).	Langkah kaki / benturan berat
16.	IF Frekuensi adalah Sedang AND Intensitas adalah Kuat AND Durasi Pulsa adalah Kilat, THEN Tingkat Keyakinan adalah <i>Noise</i> (Abaikan).	Tepuk tangan
17.	IF Frekuensi adalah Tinggi AND Intensitas adalah Sedang AND Durasi Pulsa adalah Kilat, THEN Tingkat Keyakinan adalah <i>Noise</i> (Abaikan).	Suara kunci / benda logam
18.	IF Frekuensi adalah Rendah AND Intensitas adalah Kuat AND Durasi Pulsa adalah Singkat, THEN Tingkat Keyakinan adalah <i>Noise</i> (Abaikan).	Suara jatuh / benturan keras
Grup C	Abaikan: <i>Noise</i> Elektronik	

19.	IF Frekuensi adalah Tinggi AND Intensitas adalah Lemah, THEN Tingkat Keyakinan adalah <i>Noise</i> (Abaikan).	<i>Noise</i> EMI frekuensi tinggi lemah
20.	IF Frekuensi adalah Sedang AND Intensitas adalah Lemah AND Durasi Pulsa adalah Panjang, THEN Tingkat Keyakinan adalah <i>Noise</i> (Abaikan).	<i>Noise</i> switching PSU
21.	IF Frekuensi adalah Sedang AND Durasi Pulsa adalah Panjang, THEN Tingkat Keyakinan adalah <i>Noise</i> (Abaikan).	Kipas angin / motor brushless
22.	IF Frekuensi adalah Tinggi AND Intensitas adalah Lemah AND Durasi Pulsa adalah Panjang, THEN Tingkat Keyakinan adalah <i>Noise</i> (Abaikan).	Suara buzz elektronik dengan frekuensi tinggi
23.	IF Sinyal Ultrasonik adalah Lemah AND Intensitas adalah Lemah, THEN Tingkat Keyakinan adalah <i>Noise</i> (Abaikan).	Suara frekuensi rendah dengan intensitas rendah
24.	IF Sinyal Ultrasonik adalah Lemah AND Frekuensi adalah Sedang AND Intensitas adalah Lemah, THEN Tingkat Keyakinan adalah <i>Noise</i> (Abaikan).	Suara frekuensi sedang dengan intensitas rendah
Grup D	Abaikan: Kondisi Biologis Tidak Mungkin	
25.	IF Waktu adalah Siang AND Frekuensi adalah Rendah, THEN Tingkat Keyakinan adalah <i>Noise</i> (Abaikan).	Siang + frek rendah
26.	IF Waktu adalah Siang AND Durasi Pulsa adalah Panjang, THEN Tingkat Keyakinan adalah <i>Noise</i> (Abaikan).	Siang + durasi panjang
27.	IF Waktu adalah Siang AND Frekuensi adalah Tinggi AND Intensitas adalah Lemah, THEN Tingkat Keyakinan adalah <i>Noise</i> (Abaikan).	Siang + frek tinggi + vol lemah

28.	IF Waktu adalah Siang AND Sinyal Ultrasonik adalah Lemah AND Intensitas adalah Lemah, THEN Tingkat Keyakinan adalah <i>Noise</i> (Abaikan).	<i>noise</i> elektronik siang
29.	IF Sinyal Ultrasonik adalah Tidak Ada AND Frekuensi adalah Rendah, THEN Tingkat Keyakinan adalah <i>Noise</i> (Abaikan).	Tidak ada ciri akustik kelelawar sama sekali
30.	IF Waktu adalah Siang AND Frekuensi adalah Sedang AND Intensitas adalah Sedang, THEN Tingkat Keyakinan adalah <i>Noise</i> (Abaikan).	Frek sedang + vol sedang + siang
31.	IF Waktu adalah Siang AND Frekuensi adalah Rendah AND Durasi Pulsa adalah Kelelawar, THEN Tingkat Keyakinan adalah <i>Noise</i> (Abaikan).	Durasi kelelawar tapi frek rendah + siang
32.	IF Sinyal Ultrasonik adalah Tidak Ada AND Intensitas adalah Lemah, THEN Tingkat Keyakinan adalah <i>Noise</i> (Abaikan).	kondisi sunyi

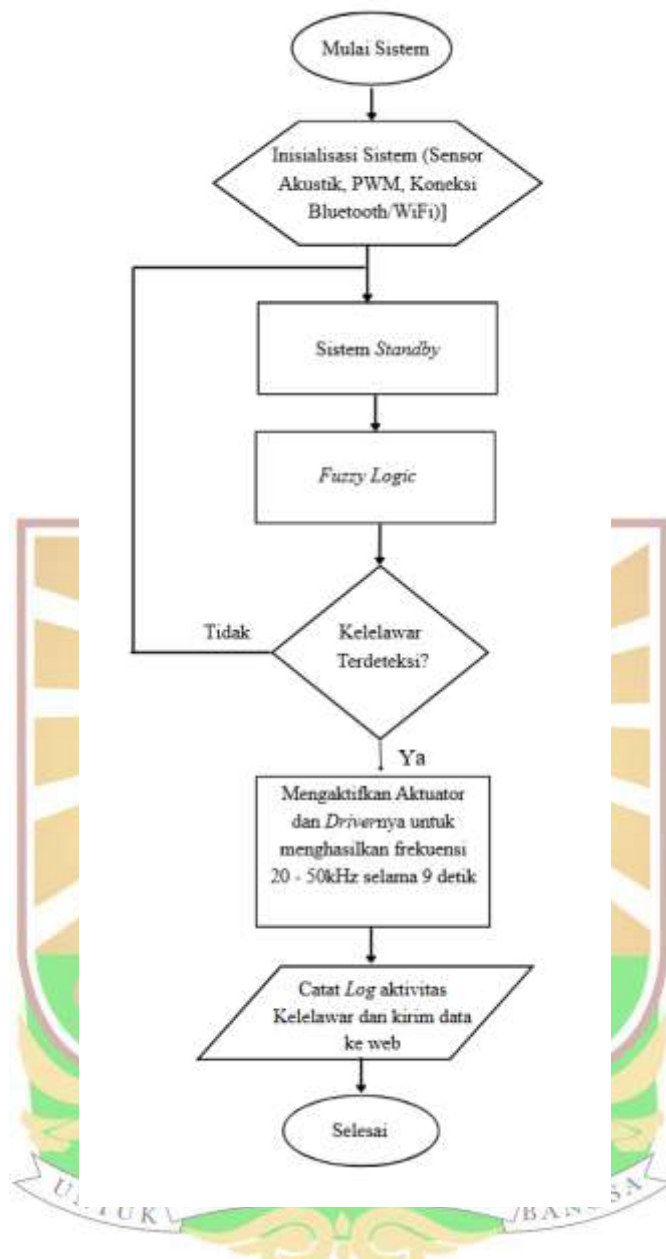
Proses *fuzzy logic* pada sistem deteksi kelelawar ini dimulai dengan tahap fuzzifikasi, yaitu mengubah nilai input terukur yang bersifat *crisp* menjadi derajat keanggotaan dalam himpunan *fuzzy*. Sistem menerima lima variabel input dari hasil pembacaan sensor: frekuensi audible dari FFT mikrofon INMP441 (0–22.000 Hz), durasi event suara (0–1.000 ms), volume amplitudo ADC raw (0–32.768), dan waktu dalam jam (0–24). Setiap nilai input kemudian dicocokkan terhadap fungsi keanggotaan berbentuk trapesium milik masing-masing himpunan linguistiknya misalnya frekuensi 19.000 Hz akan memiliki derajat keanggotaan tertentu di himpunan "Tinggi", dan derajat nol di himpunan "Rendah". Setelah seluruh derajat keanggotaan diperoleh, mesin inferensi Mamdani mengevaluasi 32 rules menggunakan operasi AND (minimum) untuk menggabungkan kondisi dalam satu rule, lalu operasi OR (maksimum) untuk menggabungkan semua rule yang menuju

output yang sama, menghasilkan dua nilai kekuatan aktivasi: satu untuk himpunan output "Abaikan" dan satu untuk "Positif Kelelawar".

Tahap terakhir adalah defuzzifikasi, yaitu mengubah kembali hasil inferensi yang masih bersifat *fuzzy* menjadi satu nilai tegas sebagai keluaran sistem. Metode yang digunakan adalah *weighted average* (rata-rata terbobot), di mana kekuatan aktivasi himpunan "Abaikan" (dengan centroid 22,5) dan himpunan "Positif Kelelawar" (dengan centroid 90) masing-masing dikalikan dengan nilai centroid-nya, lalu dibagi total kekuatan aktivasi keduanya menghasilkan satu angka score *fuzzy* dalam rentang 0–100. Jika score yang dihasilkan mencapai atau melebihi threshold 83,0, sistem memutuskan bahwa suara yang terdeteksi adalah kelelawar dan memicu aktuator piezo sweep ultrasonik 3–50 kHz selama sekitar 9 detik sekaligus mengirimkan data ke gateway ESP32-S3 via ESP-NOW. Jika score di bawah threshold, event tersebut diklasifikasikan sebagai *noise* dan diabaikan tanpa memicu respons apapun.

3. Perubahan Alur Kerja Keseluruhan Sistem





Gambar 4. 6 Flowchart sistem baru

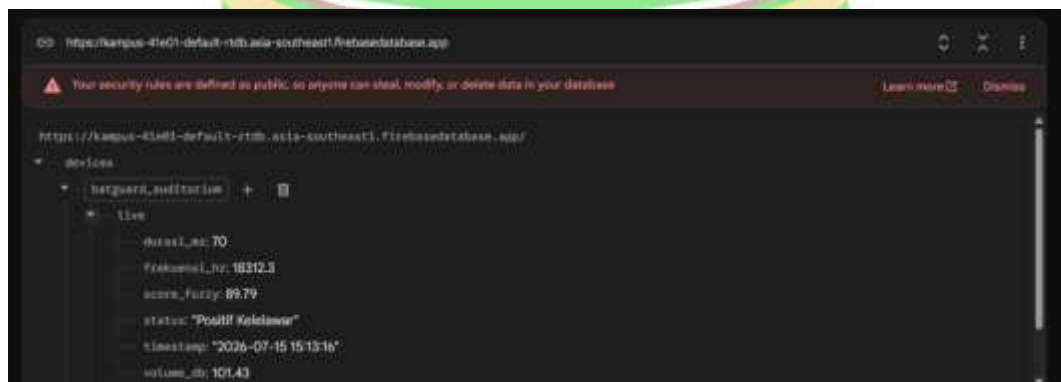
Penambahan yaitu pada penjelasan dimana *fuzzy* dieksekusi dan data juga dikirimkan pada web sebelum siklus dari sistem selesai

4. Implementasi Web Integrasi



Gambar 4. 7 Tampilan Web Dashboard

Web *dashboard* BatGuard menampilkan antarmuka monitoring real-time yang terdiri dari panel status utama di bagian atas yang menunjukkan total deteksi hari ini, waktu deteksi terakhir (10:01:00), dan indikator status *gateway* yang menunjukkan kondisi OFFLINE. Di bagian tengah terdapat tiga gauge meter yang menampilkan nilai *Fuzzy Confidence Score* (88.9), Intensitas Suara dalam dB SPL (100.3), dan Frekuensi Dominan dalam Hz (19.900.9) secara visual. Bagian bawah menampilkan tabel log data historis yang merekam seluruh riwayat deteksi.



Gambar 4. 8 Database

Data hasil deteksi berhasil tersimpan di Firebase Realtime Database dengan struktur hierarki /deteksi/batguard_auditorium/live. Setiap node menyimpan atribut lengkap satu kejadian deteksi, meliputi *durasi_ms*, *frekuensi_hz*, *score_fuzzy* (89.79), *status*

("Positif Kelelawar"), timestamp ("2026-07-15 18:13:19"), dan volume_db (101.43). Peringatan kuning pada tampilan Firebase menunjukkan bahwa aturan keamanan database masih bersifat publik, yang merupakan konfigurasi sementara selama fase pengujian penelitian.

1. Proses Monitoring dan Pengusiran Kelelawar

Berikut adalah implementasi source code terhadap keseluruhan sistem *edge* yang digunakan untuk mendeteksi dan mengusir kelelawar

Tabel 4. 3 Proses Monitoring dan Pengusiran Kelelawar

Tahapan Implementasi	Penggalan Kode	Penjelasan
1. Konfigurasi Pin dan Parameter Antarmuka I2S	<pre>// --- KONFIGURASI PIN --- #define I2S_WS 15 #define I2S_SCK 16 #define I2S_SD 17 #define I2S_PORT I2S_NUM_0 const int mosfetPin = 4; const uint16_t samples = 512; const double samplingFrequency = 44100;</pre>	Program memulai akuisisi data dengan melakukan konfigurasi pin dan parameter komunikasi I2S melalui struktur <code>i2s_config_t</code> dan <code>i2s_pin_config_t</code>. Pin terhubung pada ESP32 (pin 15 sebagai WS, pin 16 sebagai SCK, pin 17 sebagai SD). Sistem mengatur sampling rate sebesar 44.100 Hz dengan ukuran blok 512 sampel, serta presisi data diatur pada 32-bit per sampel untuk ditangkap.

2. Pembacaan Data Audio Mentah, Penyesuaian Format Data, dan Deteksi Amplitudo	<pre>void loop() { size_t bytesIn = 0; esp_err_t result = i2s_read(I2S_PORT, &sBuffer, sizeof(sBuffer), &bytesIn, portMAX_DELAY); int16_t samplesRead = bytesIn / 4; int16_t maxSample = -32768, minSample = 32767; for (int i = 0; i < samplesRead && arrayIndex < samples; i += 2) { int16_t sample = sBuffer[i] >> 16; // ... (ekstraksi nilai max & min) } int16_t volumeAsli = maxSample - minSample; }</pre>	Mikrokontroler membaca data secara kontinu menggunakan fungsi <code>i2s_read()</code> dan memasukkannya ke dalam memori <code>sBuffer</code>. Karena data masih sebesar 32-bit, sistem mengekstrak sampel suara menggunakan teknik operasi geser bit (bit shifting) <code>>> 16</code>. Selama proses ekstraksi data, sistem sekaligus mencari nilai amplitudo tertinggi (<code>maxSample</code>) dan terendah (<code>minSample</code>), di mana selisih dari kedua nilai ini dievaluasi melewati ambang batas 3.000 untuk menyaring kebisingan normal.
3. Pencatatan Waktu Kejadian Suara (Pulse Timing)	<pre>if (volumeAsli > volumeThreshold) { if (!isMendengar) { isMendengar = true; waktuMulaiPulsa = millis(); frekTertinggiPulsa = 0; volTertinggiPulsa = 0; } waktuSuaraTerakhir = millis(); }</pre>	Apabila amplitudo suara berhasil melewati nilai <code>threshold</code>, sistem akan mendeteksi status "mendengar". Pada momen ini, fungsi <code>millis()</code> dipanggil untuk mencatat waktu mulai terjadinya suara, dan selama suara masih berlangsung waktu pencatatan akan terus diperbarui. Mekanisme stopwatch ini penting untuk mendapatkan durasi pulsa sinyal.

4. FFT, Windowing, dan Penentuan Frekuensi Dominan	<pre>// Hitung FFT mean = mean / samples; for (int i = 0; i < samples; i++) vReal[i] -= mean; FFT.windowing(FFTWindow::Hamming, FFTDirection::Forward); FFT.compute(FFTDirection::Forward); FFT.complexToMagnitude(); double peakFrequency = FFT.majorPeak();</pre>	Sinyal ternetralisasi (pemusatan) diproses menggunakan algoritma FFT melalui pustaka arduinoFFT. Fungsi FFT.windowing() dipanggil untuk menerapkan Hamming Window, dilanjutkan dengan FFT.compute() dan FFT.complexToMagnitude() untuk menghitung besar amplitudo setiap komponen frekuensi. Sistem mencari majorPeak sebagai representasi frekuensi dominan, dan menggunakan nilai pengali empiris untuk estimasi ultrasonik.
5. Perhitungan Durasi Pulsa dan Penyaringan	<pre>} else { if (isMendengar && (millis() - waktuSuaraTerakhir > 50)) { unsigned long durasiTotal = waktuSuaraTerakhir - waktuMulaiPulsa; isMendengar = false; // Filter anti-spam: buang event < 15ms if (durasiTotal < 15) return;</pre>	Saat volume suara turun di bawah batas selama lebih dari 50 ms, sistem menganggap pulsa suara berakhir. Durasi pulsa dihitung (waktu akhir dikurangi waktu mulai). Logika anti-spam membuang sinyal yang berdurasi kurang dari 15 ms untuk menghindari deteksi palsu akibat benturan sementara.

6. Konversi Amplitudo ke Desibel (dB SPL)	<pre>// Konversi volume ke dB SPL float volumeDB = 0.0; if (volTertinggiPulsa > 0) volumeDB = 120.0 + (20.0 * log10((float)volTertinggiPulsa / 32768.0));</pre>	Parameter volume puncak diubah ke standar yang dapat diterima <i>Fuzzy</i> , yakni ke dalam satuan desibel (dB SPL) melalui persamaan logaritmik berbasis resolusi 16-bit.
7. Inisialisasi Objek dan Himpunan <i>Fuzzy</i> Output	<pre>// --- OBJEK FUZZY --- Fuzzy *fuzzy = new Fuzzy(); FuzzySet *fsAbaikan = new FuzzySet(0, 0, 40, 50); FuzzySet *fsPositif = new FuzzySet(75, 85, 100, 100);</pre>	Mendeklarasikan objek <i>Fuzzy</i> global memanfaatkan <i>Fuzzy.h</i> . <i>Fuzzy</i> output (tingkat keyakinan) dipetakan dalam himpunan 'abaikan' dan 'positif' dengan menggunakan kurva fungsi trapesium dalam rentang skala 0 hingga 100.
8. Pembentukan Fungsi Keanggotaan Masukan (<i>Fuzzy</i> Input)	<pre>FuzzyInput *inFrekAudible = new FuzzyInput(1); FuzzySet *fAudRendah = new FuzzySet(0, 0, 6000, 9000); FuzzySet *fAudSedang = new FuzzySet(8000, 11000, 13000, 16000); FuzzySet *fAudTinggi = new FuzzySet(14000, 17000, 22000, 22000); inFrekAudible- >addFuzzySet(fAudRendah); // ... (ditambahkan ke objek <i>fuzzy</i>)</pre>	Sistem membangun empat buah variabel masukan (Frekuensi, Durasi, Volume, dan Waktu) beserta himpunan bagiannya masing-masing untuk digunakan sebagai evaluasi kondisi.

9. Penyusunan Basis Aturan (Rule Base) <i>Fuzzy Logic</i>	<pre>// Rule 1: Kondisi ideal malam { FuzzyRuleAntecedent *a = new FuzzyRuleAntecedent(); a->joinWithAND(wMalam, fAudTinggi); // ... (penggabungan kondisi bersarang) fuzzy->addFuzzyRule(new FuzzyRule(1, d, thenPositif)); }</pre>	Menyusun penalaran logika (rule base) bersarang menggunakan objek <i>FuzzyRuleAntecedent</i> dan penggabungan operator AND/OR. Aturan dibuat secara rinci untuk mendeteksi kondisi valid maupun mendeteksi pengecualian (filter <i>noise</i>) agar luaran terarah pada abaikan.
10. Proses Fuzzifikasi dan Defuzzifikasi (Centroid)	<pre>fuzzy->setInput(1, frekTertinggiPulsa); fuzzy->setInput(2, estUltrasonik); // ... (input sisa parameter) fuzzy->fuzzify(); float scoreFuzzy = fuzzy- >defuzzify(1);</pre>	Nilai aktual (<i>crisp value</i>) di-input ke mesin inferensi dan <i>fuzzy->fuzzify()</i> dipanggil untuk penghitungan derajat keanggotaan. Tahap akhir, <i>fuzzy->defuzzify(1)</i> akan mengeksekusi perhitungan area titik pusat (Centroid) untuk mendapatkan <i>scoreFuzzy</i>. Apabila melampaui angka > 80,0, maka status ditetapkan "Positif Kelelawar".

11. Struktur Data Transmisi (ESP-NOW)	<pre>// --- KONFIGURASI ESP-NOW --- uint8_t peerAddress[] = {0xDC, 0xB4, 0xD9, ...}; typedef struct struct_message { char timestamp[24]; float frekuensi; float volumeDB; // ... (parameter lainnya) } struct_message;</pre>	Untuk mengirimkan paket kejadian ke <i>Gateway</i>, protokol connectionless nirkabel ESP-NOW digunakan. Data ekstraksi (termasuk timestamp, frekuensi, hingga status) dikemas efisien menjadi objek data serentak via <code>struct_message</code>.
12. Inisialisasi Pin Aktuator	<pre>// Inisialisasi aktuator piezo (kondisi mati) ledcAttach(mosfetPin, 1000, 8); ledcWrite(mosfetPin, 0); if (!LittleFS.begin(true)) { return; }</pre>	Pada fungsi <code>setup()</code>, pin yang terhubung ke modul MOSFET (GPIO 4) disetel sebagai pin kendali PWM. Perintah <code>ledcWrite(mosfetPin, 0)</code> mengatur aktuator pada posisi idle mati / duty cycle 0% sejak awak demi menghemat daya dan keamanan sistem.

13. Pemicuan PWM dan Eksekusi Sapuan Frekuensi (Frequency Sweeping)	<pre> ledcAttach(mosfetPin, 3000, 8); ledcWrite(mosfetPin, 128); // Duty cycle 50% for (int i = 0; i < 3; i++) { for (long freq = 3000; freq <= 50000; freq += 500) { ledcChangeFrequency(mosfetPin , freq, 8); delay(16); } </pre>	Saat terpicu, pulsa diberikan tekanan tegangan 50% (ledcWrite 128). Perangkat lunak menerapkan sapuan dinamis selama 3 siklus (sweep up ke 50.000 Hz, dan sweep down ke 3.000 Hz) menggunakan perintah ledcChangeFrequency() agar kelelawar tidak dapat beradaptasi secara pendengaran.
14. Pemutusan Arus dan Pengurasan I2S (Buffer Flushing)	<pre> ledcWrite(mosfetPin, 0); // Flush I2S buffer i2s_stop(I2S_PORT); delay(100); i2s_start(I2S_PORT); </pre>	Setelah 3 siklus selesai, duty cycle aktuator instan diputus (0%) menggunakan ledcWrite(mosfetPin, 0). Pancaran intensitas gelombang yang besar dari speaker sering kali memunculkan gema (<i>noise</i>) lanjutan, sehingga operasional mikrofon di-stop secara temporal (i2s_stop()), lalu dimulai kembali (i2s_start()) untuk menjamin buffer input bersih kembali.

Pada implementasi perangkat lunak pada sistem dapat dibagi 3, yaitu :

1. *Sensing* (1-6)

Mencakup inisialisasi sensor dan sistem sehingga sistem dapat menangkap parameter yang dibutuhkan untuk pemrosesan pembeda ada kelelawar atau pun tidak dengan parameter mencakup frekuensi, intensitas, pulsa, dan waktu. Cara mendapatkan parameter tersebut adalah sebagai berikut:

Frekuensi, Sistem memproses sinyal suara yang masuk menggunakan algoritma *Fast Fourier Transform* (FFT) melalui pustaka *arduinoFFT*. Dengan menerapkan metode *Hamming Window* dan melakukan komputasi untuk menghitung besar amplitudo tiap komponen frekuensi, sistem mengekstrak frekuensi dominan (*major peak*) untuk mengestimasi gelombang ultrasonik.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (4.1)$$

Intensitas (Volume), Mikrokontroler membaca data audio mentah secara kontinu dari antarmuka I2S. Sistem kemudian mencari selisih antara nilai amplitudo tertinggi (*maxSample*) dan terendah (*minSample*), lalu mengubah parameter tersebut ke dalam standar desibel (dB SPL) melalui persamaan logaritmik agar dapat diproses oleh sistem *Fuzzy*.

Pulsa (Durasi Suara), Durasi dihitung dengan memanfaatkan fungsi *millis()* sebagai stopwatch. Sistem mencatat waktu mulai saat amplitudo suara melewati ambang batas bawah, dan menganggap pulsa berakhir ketika volume suara turun di bawah batas selama lebih dari 50 ms. Sistem juga menerapkan logika anti-spam untuk membuang sinyal yang berdurasi di bawah 15 ms agar terhindar dari deteksi palsu.

Waktu, Parameter waktu ini didapat dengan menggunakan *library* Arduino yaitu *Wifi.H* sehingga mikrokontroler dapat meminta informasi waktu yang dapat di sinkronisasi melalui internet dan dapat menjamin bahwa waktu yang ada pada mikrokontroler tetap akurat

2. Pemrosesan Data (7-10)

Mencakup tahapan evaluasi dari keempat parameter yang telah didapatkan pada tahap sensing ke dalam mesin inferensi logika *Fuzzy*. Parameter tersebut diolah melalui proses fuzzifikasi berdasarkan himpunan dan fungsi keanggotaan masukan yang telah ditentukan. Sistem kemudian mencocokkan data dengan basis aturan (*rule base*) bersarang untuk menyaring kebisingan, dan diakhiri dengan proses

defuzzifikasi (metode Centroid) untuk menghasilkan skor akhir yang menentukan apakah sistem bernilai "Positif Kelelawar" atau "Abaikan".

3. Tindakan Pengusiran dan Komunikasi Data (11 -14)

Mencakup tindakan pencegahan dan pengiriman hasil akhir deteksi. Apabila kelelawar terdeteksi, mikrokontroler akan memicu pin aktuator PWM (MOSFET) untuk membunyikan piezo. Sistem melakukan sapuan frekuensi dinamis (frequency sweeping) bolak-balik dari 3.000 Hz hingga 50.000 Hz selama 3 siklus agar kelelawar tidak sempat beradaptasi dengan suara tersebut. Secara paralel, rekaman kejadian ditransmisikan secara nirkabel ke *Gateway* menggunakan protokol komunikasi ESP-NOW secara efisien.

2. Implementasi Web *Dashboard* Integrasi

Berikut adalah implementasi source code terhadap sistem pengiriman data deteksi dan pengusiran kelelawar

Tabel 4. 4 Pengiriman Data ke Database Website

Tahapan Implementasi	Penggalan Kode	Penjelasan
1. Definisi Struktur Data Transmisi	<pre>typedef struct struct_message { char timestamp[24]; float frekuensi; float volumeDB; unsigned long durasi; float scoreFuzzy; char status[20]; }</pre>	Mendefinisikan struktur paket data (struct_message) yang susunan variabel dan tipe datanya dibuat persis sama dengan perangkat pengirim (node sensor) untuk mencegah kegagalan pembacaan memori (data korup). Terdapat variabel indikator dataBaru yang bertindak sebagai pemicu pengiriman.

	<pre> } struct_message; struct_message myData; volatile bool dataBaru = false; </pre>	
2. Fungsi Penerimaan Data ESP-NOW	<pre> void OnDataRecv(const esp_now_recv_info_t *info, const uint8_t *incomingData, int len) { if (len != sizeof(myData)) return; memcpy(&myData, incomingData, sizeof(myData)); // (Pencetakan Serial Monitor) dataBaru = true; } </pre>	Fungsi callback ini otomatis tereksekusi ketika <i>gateway</i> menerima paket dari jaringan lokal ESP-NOW. Sistem memvalidasi ukuran data masuk, menyalin byte informasi ke variabel lokal menggunakan fungsi <code>memcpy</code>, lalu mengubah status <code>dataBaru</code> menjadi <code>true</code>.

4. Konversi Data ke Format JSON	<pre>void kirimKeFirebase() { if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) return; char json[320]; snprintf(json, sizeof(json), "{\"timestamp\":\"%s\",\"frekuensi_hz\":%.2f,\" \"estimasi_us_hz\":%.2f,\"volume_db\":%.2f,\" \"durasi_ms\":%lu,\"score_fuzzy\":%.2f,\" \"status\":\"%s\"}\",", myData.timestamp, myData.frekuensi, ...); }</pre>	Memeriksa ketersediaan koneksi WiFi. Jika terhubung, seluruh parameter data dari struct digabungkan dan dikonversi menjadi string berformat JSON melalui fungsi <code>snprintf</code>. Konversi ini wajib dilakukan agar data dapat dibaca dan disimpan dengan benar oleh struktur Firebase.
5. Pengiriman Data (<i>HTTP Request</i> PUT dan POST)	<pre>// Pengiriman PUT /live.json HTTPClient http; String url = String(firebaseHost) + "/devices/" + deviceId + "/live.json?auth=" + firebaseAuth; http.begin(secureClient, url); http.addHeader("Content-Type", "application/json"); int code = http.PUT(json); http.end(); // (Metode POST untuk logs.json)</pre>	Melakukan permintaan HTTP (<i>HTTP Request</i>) menggunakan jaringan aman HTTPS ke server. Metode PUT pada endpoint <code>/live.json</code> difungsikan untuk menerima data secara tunggal (pembaruan indikator visual di <i>dashboard</i>), sedangkan metode POST pada endpoint <code>/logs.json</code> difungsikan untuk menambahkan baris rekaman baru secara berkelanjutan pada riwayat sistem.

Implementasi antarmuka pengguna pada sistem mitigasi kelelawar diwujudkan melalui sebuah *web dashboard* terintegrasi yang berfungsi sebagai pusat pemantauan jarak jauh. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.5, *dashboard* pemantauan dirancang untuk menampilkan berbagai informasi metrik secara *real-time*. Informasi utama yang disajikan meliputi akumulasi total deteksi harian, waktu deteksi terakhir, dan status konektivitas dari perangkat *gateway*. Selain itu, antarmuka ini menyediakan visualisasi indikator hasil pemrosesan algoritma berupa nilai tingkat keyakinan (*Fuzzy Confidence Score*), intensitas volume suara dalam satuan dB SPL, serta frekuensi dominan yang ditangkap oleh sensor.



Gambar 4. 9 Web Dashboard

Dashboard juga dilengkapi dengan panel log data mentah dan grafik riwayat parameter suara untuk mempermudah analisis data secara visual. Seluruh aliran data yang ditampilkan pada antarmuka web tersebut disinkronisasikan menggunakan layanan basis data *cloud*, yaitu Firebase Realtime Database (RTDB). Berdasarkan Gambar 4.5, data hasil deteksi dari mikrokontroler dikirim dan disusun secara hierarkis (berformat JSON) di dalam *database*. Setiap riwayat deteksi mencatat parameter komputasi yang krusial, meliputi durasi pulsa suara (*durasi_ms*), frekuensi dominan (*frekuensi_hz*), nilai keluaran fuzzy (*score_fuzzy*), status akhir (*status*), penanda waktu kejadian (*timestamp*), serta intensitas suara (*volume_db*).



Gambar 4. 10 RTDB Firebase

4.2 Pengujian Sistem

Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh sistem berjalan sesuai dengan fungsinya. Pengujian dilakukan berdasarkan spesifikasi serta kebutuhan yang digunakan.

4.2.1 Pengujian Sensor (INMP441)

Pengujian sensor INMP441 bertujuan untuk mengevaluasi sensitivitas dan akurasi mikrofon dalam menangkap sinyal suara, yang selanjutnya akan diolah sebagai parameter masukan utama bagi sistem pengambilan keputusan.

4.2.1.1 Langkah Pengujian

Proses pengujian dilakukan di dalam ruangan yang terkendali guna meminimalkan interferensi suara dari lingkungan sekitar. Langkah-langkah pengujian ditetapkan sebagai berikut:

1. Menyiapkan perangkat keras ESP32 yang telah terintegrasi dengan sensor INMP441 dan memastikan koneksi antarmuka I2S (pin WS, SCK, dan SD) berjalan dengan *sampling rate* 44.100 Hz.
2. Menggunakan perangkat *Signal Generator* eksternal yang dihubungkan ke *speaker tweeter* beresolusi tinggi untuk memancarkan sinyal gelombang sinus statis pada frekuensi referensi 18kHz. Frekuensi ini dipilih karena mendekati batas atas Teorema Nyquist dari sistem (22.050 Hz) sekaligus merepresentasikan rentang frekuensi bawah dari panggilan ekolokasi kelelawar.

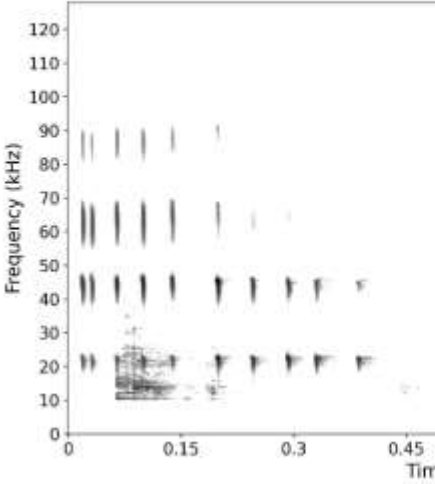
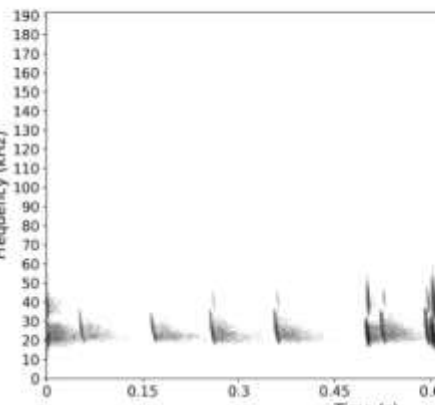
3. Menempatkan speaker sumber suara berhadapan langsung dengan sensor mikrofon pada variasi jarak ukur secara bertahap, mulai dari 1 meter, 3 meter, 5 meter, 8 meter, hingga 10 meter.
4. Mencatat parameter respons sistem, meliputi: nilai *frekTertinggiPulsa* (Hz), nilai *volTertinggiPulsa* (skala Peak-to-Peak 16-bit maksimal 32.768), keluaran *volumeDB* (dB SPL), serta status sistem (apakah memicu proses FFT atau diabaikan karena berada di bawah batas *threshold* 3.000).
5. Mengulangi pengujian tanpa memancarkan sinyal (kondisi ruangan sepi) untuk menguji penyaringan *noise* termal/lingkungan.

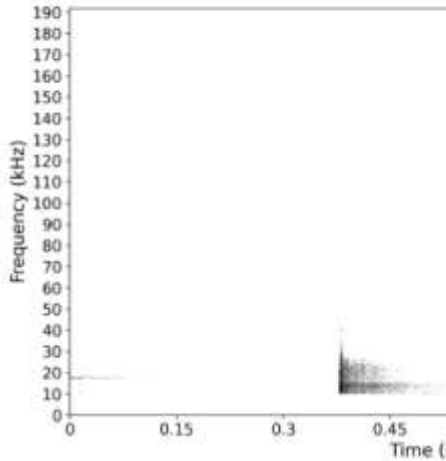
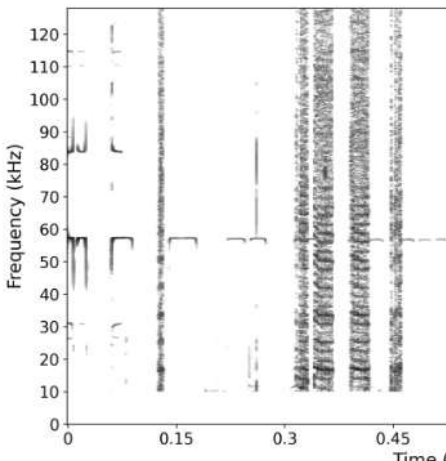
4.2.1.2 Hasil Pengujian

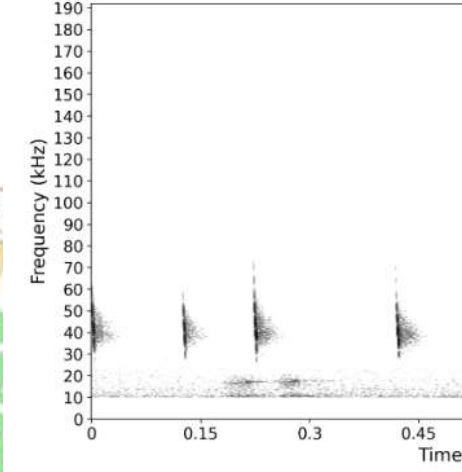
Berikut merupakan tabel hasil pengujian akuisisi data suara menggunakan sensor mikrofon INMP441 dengan variasi jarak dan kondisi.

Tabel 4. 5 Pengujian INMP441 Terhadap Suara Kelelawar (Chirovox)

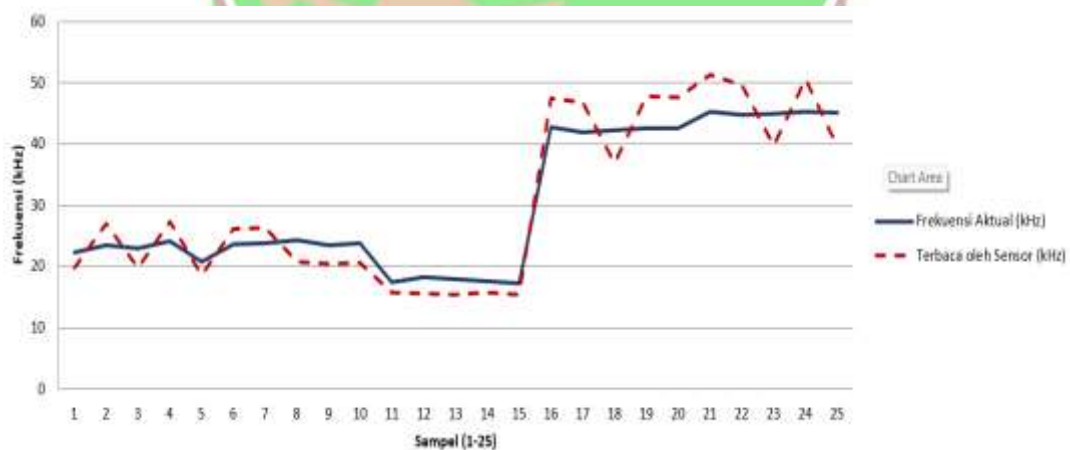
No. Uji	Spesies Kelelawar	Frekuensi Terbaca	Intensitas	Pulsa	Data Pada Web Chirovox
1	kerivoula papillosa	22.364 Hz	9.560	52 ms	
		23.456 Hz	8.956	60 ms	
		22.960 Hz	9.276	66 ms	

No. Uji	Spesies Kelelawar	Frekuensi Terbaca	Intensitas	Pulsa	Data Pada Web Chirovox
		24.120 Hz	8.245	58 ms	Sound 
		20.773	9.506	72 ms	
2	Mops Sarasinonum	23.670 Hz	8.540	76 ms	Sound 
		23.836 Hz	7.943	70 ms	
		24.290 Hz	8.213	72 ms	
		23.460 Hz	8.376	74 ms	
		23.786 Hz	7.890	80 ms	
3	Mosia Nigrescens	17.432 Hz	10.230	150 ms	
		18.234 Hz	9.843	144 ms	

No. Uji	Spesies Kelelawar	Frekuensi Terbaca	Intensitas	Pulsa	Data Pada Web Chirovox
		17.94 3 Hz	10. 330	158 ms	Sound 
		17.64 5 Hz	10. 221	146 ms	
		17.23 1 Hz	9.6 84	142 ms	
4	Rhinolophus Tatar	42.78 6 Hz	8.3 60	82 ms	Sound 
		41.98 4 Hz	9.1 25	80 ms	
		42.23 5 Hz	8.6 40	88 ms	
		42.56 4 Hz	8.7 65	78 ms	
		42.66 3 Hz	8.6 73	85 ms	
5.	Myotis Moluccarum	45.32 8 Hz	9.7 56	123 ms	
		44.76 3 Hz	10. 128	115 ms	

No. Uji	Spesies Kelelawar	Frekuensi Terbaca	Intensitas	Pulsa	Data Pada Web Chirovox
		44.956 Hz	9.589	125 ms	Sound 
		45.213 Hz	9.880	127 ms	
		45.063 Hz	9.976	117 ms	

4.2.1.3 Analisa Hasil Pengujian



Gambar 4. 11 Perbandingan Frekuensi Terbaca Sensor

Gambar 4.11 menunjukkan perbandingan antara nilai frekuensi aktual dengan nilai frekuensi yang terbaca oleh sensor ultrasonik dari total 25 sampel pengujian. Pengujian ini merangkum pembacaan frekuensi dari lima spesies kelelawar yang

berbeda, di mana masing-masing spesies diwakili oleh lima sampel data. Dari grafik tersebut, terlihat bahwa garis biru solid (Frekuensi Aktual) dan garis merah putus-putus (Terbaca oleh Sensor) menunjukkan tren yang selaras, membuktikan bahwa sensor mampu merespon dan mendeteksi suara ultrasonik dari rentang frekuensi terendah (sekitar 17–18 kHz pada sampel 11-15) hingga tertinggi (sekitar 42–45 kHz pada sampel 16-25). Meskipun pembacaan sensor mampu mengikuti pola

frekuensi aktual, terdapat simpangan fluktuatif pada setiap sampel uji di mana sensor terkadang membaca nilai yang sedikit lebih tinggi atau lebih rendah dari nilai aktual. Selisih pembacaan ini merepresentasikan *margin error* sistem yang berada pada kisaran 10% hingga 15%. Pada pengujian di frekuensi yang lebih rendah (sampel 1-15), deviasi antara nilai aktual dan pembacaan sensor terlihat tidak terlalu lebar secara absolut, namun pada frekuensi yang lebih tinggi (sampel 16-25), rentang fluktuasi *error* tampak sedikit lebih besar meskipun masih setia mengikuti tren grafik yang benar. Secara keseluruhan, hasil analisa menunjukkan bahwa sistem sensor ultrasonik yang dirancang telah berfungsi dengan baik dalam mendeteksi dan mengonversi sinyal suara kelelawar menjadi data frekuensi, serta tetap responsif membedakan karakteristik frekuensi dari setiap spesies walaupun terdapat toleransi *error* tersebut.

4.2.2 Pengujian Aktuator *Piezo Tweeter* (Sistem Pengusiran)

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja komponen *Piezo Tweeter* beserta rangkaian *driver* MOSFET IRFZ44N dalam menghasilkan gelombang suara bervolume tinggi, khususnya pada spektrum ultrasonik. Pengujian difokuskan pada validasi jangkauan frekuensi yang dihasilkan (*Frequency Sweeping* dari 3 kHz hingga 50 kHz), stabilitas modulasi lebar pulsa (PWM) pada mikrokontroler, serta durasi eksekusi dari algoritma sapuan frekuensi tersebut.

4.2.2.1 Langkah Pengujian

Mengingat frekuensi ultrasonik berada di luar batas pendengaran manusia (>20 kHz), pengujian memerlukan alat ukur Audio Spectrum Analyzer dan Sound Level

Meter ultrasonik eksternal. Langkah-langkah pengujian untuk kedua skenario adalah sebagai berikut:

Skenario A: Pengujian Siklus Sapuan Frekuensi (*Sweeping*)

1. Merangkai ESP32S3, MOSFET IRFZ44N, dan Piezo Tweeter, kemudian memprogram sistem untuk menjalankan blok kode fungsi aktuator secara berulang.
2. Menempatkan alat ukur frekuensi pada jarak 1 meter dari aktuator.
3. Mencatat nilai batas bawah frekuensi saat siklus dimulai dan nilai batas atas frekuensi sesaat sebelum nada kembali turun.
4. Menghitung durasi waktu penyelesaian 1 siklus sapuan penuh (dari 3 kHz ke 50 kHz, dan kembali ke 3 kHz) menggunakan stopwatch.

Skenario B: Pengujian Propagasi Frekuensi terhadap Jarak

1. Memodifikasi sementara kode mikrokontroler untuk memancarkan sinyal PWM statis dengan duty cycle 50% pada tiga titik frekuensi uji, yaitu: 20 kHz, 35 kHz, dan 50 kHz.
2. Menempatkan Sound Level Meter searah garis pandang (Line of Sight) dari Piezo Tweeter.
3. Mengukur tingkat tekanan suara / Sound Pressure Level (dalam satuan dB SPL) pada variasi jarak 1 meter, 3 meter, dan 5 meter untuk masing-masing frekuensi uji.

4.2.2.2 Hasil Pengujian

Berikut merupakan hasil pengujian aktuator yang dibagi menjadi tabel pengujian rentang siklus dan tabel pengujian intensitas terhadap jarak.

Tabel 4. 6 Hasil Pengujian Rentang Frekuensi dan Waktu Siklus *Sweeping*

Uji ke-	Target Bawah (kHz)	Target Atas (kHz)	Terukur Bawah (kHz)	Terukur Atas (kHz)	Waktu 1 Siklus (Detik)

1	3,0	50,0	3,01	49,85	3,02
2	3,0	50,0	3,00	49,90	3,01
3	3,0	50,0	2,98	49,95	3,02
4	3,0	50,0	3,02	49,88	3,01
5	3,0	50,0	3,01	49,92	3,02
Rata-rata	3,0	50,0	3,004	49,90	3,016

Tabel 4. 7 Hasil Pengujian Intensitas Suara Aktuator terhadap Jarak

Frekuensi Uji (kHz)	Pengujian Jarak (Meter)	Intensitas Suara (dB SPL)	Keterangan Jangkauan	Lampiran
3 kHz	1	110	Sangat Kuat	4.g - 4.i
	3	100,8	Kuat	
	5	95,7	Kuat	
20 kHz	1	108,5	Sangat Kuat	
	3	98,2	Kuat	
	5	86,4	Efektif	

35 kHz	1	102,1	Kuat
	3	89,5	Efektif
	5	74,8	Cukup Efektif
50 kHz	1	94,3	Efektif
	3	76,2	Cukup Efektif
	5	58,5	Lemah

4.2.2.3 Analisa Hasil Pengujian

Berdasarkan Tabel 4.3, sistem mikrokontroler berhasil mengeksekusi algoritma *frequency sweeping* dengan tingkat presisi yang tinggi. Modulasi PWM pada pin *Gate* MOSFET mampu merespons perubahan frekuensi dari 3 kHz hingga 50 kHz tanpa mengalami kegagalan *switching*. Frekuensi terukur pada batas atas rata-rata mencapai 49,90 kHz. Dari segi waktuan, durasi 1 siklus penuh yang tercatat adalah rata-rata 3,016 detik, sangat sesuai dengan perhitungan teoretis *delay* perulangan pada perangkat lunak (sekitar 3,008 detik murni ditambah jeda komputasi iterasi perangkat keras).

Analisis fisika akustik pada Tabel 4.4 menunjukkan adanya fenomena pelemahan sinyal (*atenuasi*) yang berbanding lurus dengan peningkatan frekuensi dan jarak. Sesuai dengan hukum akustik, gelombang berfrekuensi sangat tinggi (seperti 50 kHz) memiliki panjang gelombang yang sangat pendek, sehingga energi suara lebih cepat terserap oleh partikel udara. Pada jarak 1 meter, piezo mampu memancarkan suara hingga 108,5 dB pada 20 kHz, namun hanya 94,3 dB pada 50 kHz. Pada jarak 5 meter, sinyal 50 kHz melemah drastis hingga 58,5 dB.

Karakteristik atenuasi ini membuktikan bahwa pemilihan algoritma sapuan frekuensi (*sweeping*) dari 3 kHz hingga 50 kHz adalah solusi yang paling tepat. Rentang frekuensi menengah ke bawah (3 kHz - 25 kHz) berfungsi sebagai gelombang pendorong yang memiliki jangkauan jarak penetrasi lebih jauh di dalam ruangan (efektif hingga >5 meter), sedangkan rentang frekuensi ekstrim (30 kHz - 50 kHz) berfungsi sebagai gangguan intensitas tinggi dengan fokus redaman lokal (efektif pada radius <3 meter dari aktuator). Kombinasi sapuan ini memastikan seluruh area auditorium tercakup oleh frekuensi yang membuat kelelawar tidak nyaman bermanuver.

4.2.3 Pengujian Transmisi Data (ESP-NOW dan Website *Dashboard*)

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi tingkat keberhasilan, keutuhan data, serta waktu respons dalam pengiriman paket log mitigasi. Rantai pengiriman data yang diuji dimulai dari mikrokontroler pemantau yang mengirimkan data via ESP-NOW menuju perangkat penerima, yang kemudian diteruskan oleh *Gateway* ke database website *dashboard* melalui koneksi internet.

4.2.3.1 Langkah Pengujian

Pengujian dilakukan dengan menyimulasikan kejadian deteksi kelelawar secara berulang dan memantau aliran datanya hingga ke antarmuka pengguna. Langkah-langkah pengujian dilakukan sebagai berikut:

1. Menyiapkan perangkat Edge Node dan perangkat *Gateway*, serta memastikan *Gateway* telah terhubung ke jaringan Wi-Fi/Internet yang stabil.
2. Membuka halaman website monitoring pada perangkat komputer atau smartphone untuk memantau pembaruan data secara real-time.
3. Memberikan pemicu buatan pada Edge Node sehingga nilai *scoreFuzzy* 80,0, data ke dalam bentuk *struct_message* (memuat timestamp, frekuensi, volume, durasi, skor, dan status).
4. Menjalankan stopwatch tepat saat Edge Node mengeksekusi perintah pengiriman data (*esp_now_send*).

5. Mencatat status penerimaan data pada Serial Monitor *Gateway* untuk memvalidasi keberhasilan ESP-NOW.
6. Menghentikan stopwatch sesaat setelah baris data log baru muncul dan ter-render dengan sempurna pada tabel website *dashboard*.
7. Mencocokkan nilai parameter yang tampil di website dengan data asli yang dikirimkan oleh Edge Node untuk menguji keutuhan data.
8. Mengulangi pengujian dengan variasi jarak antara Edge Node dan *Gateway* pada kondisi Line of Sight (tanpa halangan) dan Non-Line of Sight (dengan halangan dinding).

4.2.3.2 Hasil Pengujian

Berikut merupakan tabel hasil pengujian transmisi data terintegrasi dari ESP-NOW hingga ke *website monitoring*.

Tabel 4. 8 Pengujian Transmisi Data (ESP-NOW dan *Website Dashboard*)

Uji ke-	Jarak Node ke <i>Gateway</i>	Kondisi Ruangan	Status Terima ESP-NOW	Status Update Website	Keutuhan Data (Gambar)	Total Waktu Respon (Detik)
1	5 Meter	Tanpa Halangan	Berhasil	Berhasil	Sesuai, Lampiran 4.j	1,2
2	15 Meter	Tanpa Halangan	Berhasil	Berhasil	Sesuai, Lampiran 4.12	1,4
3	30 Meter	Tanpa Halangan	Berhasil	Berhasil	Sesuai, Lampiran 4.k	1,5

4	15 Meter	Halangan 1 Lapis Dinding (Beton)	Berhasi 1	Berhasil	Sesuai, Lampiran 4.1	1,8
5	15 Meter	Halangan 1 Lapis Dinding (Triplek)	Berhasi 1	Berhasil	Sesuai, Lampiran 4.m	1,5
6	30 Meter	Halangan 2 Lapis	Berhasi 1	Berhasil	Sesuai, Lampiran 4.n	1,8
7	30 Meter	Halangan 2 Lapis Dinding	Gagal	Tidak Ada Update	-	-

4.2.3.3 Analisa Hasil Pengujian

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.4, integrasi transmisi data dari mikrokontroler hingga ke antarmuka website berjalan dengan sangat baik dan andal, selama berada dalam jangkauan sinyal yang optimal. Pada jarak 5 hingga 30 meter tanpa halangan (Uji 1, 2, dan 3), pengiriman paket data terstruktur (struct_message) via ESP-NOW sukses diterima oleh Gateway tanpa adanya kehilangan paket (packet loss). Data tersebut kemudian berhasil diunggah dan di-parsing ke dalam database MySQL hingga akhirnya ditampilkan pada website *dashboard*.

Dari segi keutuhan data, tidak ditemukan adanya korupsi (corrupt data) maupun pergeseran nilai parameter; seluruh variabel mulai dari timestamp, frekuensi dominan, durasi pulsa, desibel, hingga skor *Fuzzy* yang tampil di website cocok 100% dengan log yang dihasilkan oleh Edge Node.

Dari aspek latensi, total waktu respons (end-to-end delay) sejak data dikirim dari Edge Node hingga ter-update secara visual di website memakan waktu rata-rata 1,2 hingga 1,8 detik. Sebagian besar waktu tunda ini disumbangkan oleh proses

HTTP Request/Response dari *Gateway* ke server hosting website dan proses query database, mengingat protokol ESP-NOW sendiri beroperasi dalam hitungan milidetik. Waktu respons di bawah 2 detik ini dinilai sangat memenuhi syarat kelayakan untuk sebuah sistem pemantauan dan mitigasi real-time. Namun pada Uji ke-5, redaman sinyal akibat dua lapis dinding beton memutus koneksi komunikasi lokal (ESP-NOW) sehingga data mitigasi tidak sampai ke *Gateway*, yang berdampak pada kosongnya pembaruan di website. Hal ini menegaskan pentingnya penempatan *Gateway* pada posisi strategis di dalam atau di sekitar auditorium agar dapat menjangkau Edge Node secara optimal.

4.2.4 Pengujian ESP32

Pengujian ini bertujuan untuk mengukur performa komputasi dan responsivitas mikrokontroler ESP32 dalam menjalankan seluruh tugas pemrosesan Edge secara real-time.

4.2.4.1 Langkah Pengujian

Pengujian ESP32 dilakukan dengan melakukan pengamatan waktu eksekusi pada setiap blok pemrosesan utama untuk menilai beban kerja sistem. Pengukuran waktu menggunakan fungsi `micros()` dan `millis()` yang disisipkan sebelum dan sesudah eksekusi program. Aspek yang diukur meliputi waktu akuisisi data suara dari sensor INMP441 (I2S), komputasi Fast Fourier Transform (FFT), eksekusi algoritma *Fuzzy Logic* Mamdani, serta waktu penulisan log data ke dalam memori flash (LittleFS). Selain itu, diamati juga delay transmisi pengiriman data via ESP-NOW ke *Gateway*, serta total siklus eksekusi aktuator Piezo Tweeter untuk mengevaluasi respons sistem terhadap kehadiran kelelawar.

4.2.4.2 Hasil Pengujian

Berikut merupakan hasil pengujian performa komputasi dan waktu eksekusi pada ESP32.

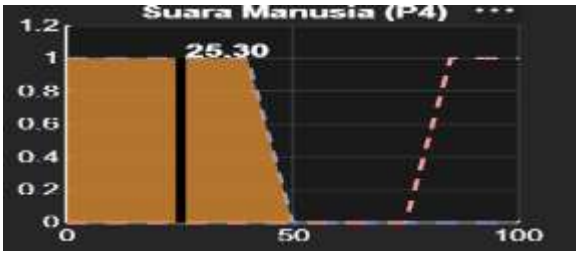
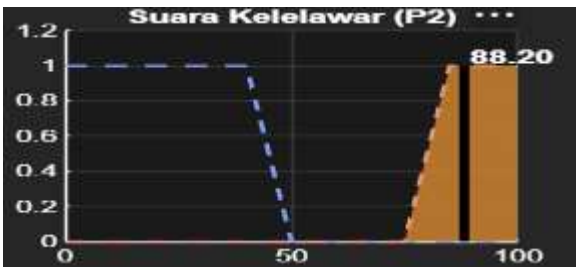
Tabel 4. 9 Pengujian Waktu Eksekusi ESP32

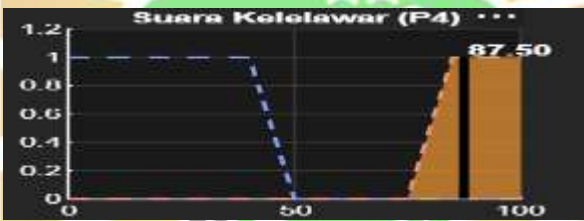
Aspek yang Diuji	Waktu/Delay	Keterangan
Waktu akuisisi data suara (I2S)	11610 micros	Waktu yang dibutuhkan ESP32 untuk membaca dan mengisi buffer 512 sampel data audio pada frekuensi 44.100 Hz
Waktu komputasi FFT	6540 micros	Waktu yang dibutuhkan untuk mengubah data suara mentah dari domain waktu menjadi spektrum frekuensi dan mencari peak frequency
Waktu eksekusi <i>Fuzzy Logic</i>	1250 micros	Waktu untuk menjalankan keseluruhan algoritma Mamdani (fuzzifikasi, inferensi aturan, hingga defuzzifikasi centroid)
Waktu penulisan log (LittleFS)	24500 micros	Waktu yang dibutuhkan ESP32 untuk membuka, menulis data mitigasi (CSV), dan menutup file pada memori internal
Waktu transmisi data ESP-NOW	2100 micros	Waktu pengiriman paket data hasil deteksi dari Edge Node hingga terkirim ke <i>Gateway</i>
Siklus eksekusi aktuator	9.05 second	Total waktu aktivasi Piezo Tweeter menjalankan 3 siklus frequency sweeping (3 kHz - 50 kHz) hingga mati kembali
Waktu flush buffer mikrofon	0.1 second	Waktu jeda (delay(100)) yang dibutuhkan untuk mematikan dan merestart I2S agar sisa gema aktuator tidak terbaca

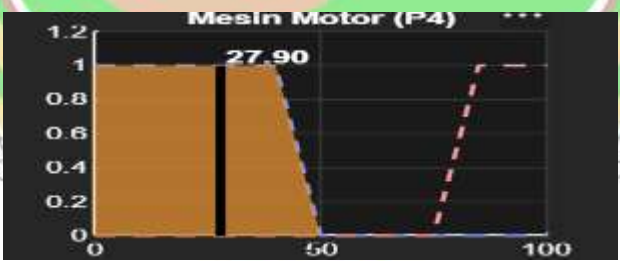
Tabel 4. 10 Keputusan *Fuzzy* Terhadap Suara Inputan

No. Uji	Tipe Suara	Hasil Keputusan <i>Fuzzy</i>	Sumber Suara
1	Manusia	Percobaan 1: 22.97 (<i>Noise</i>)	Percakapan Disekitar, Lampiran

No. Uji	Tipe Suara	Hasil Keputusan <i>Fuzzy</i>	Sumber Suara
		 Hasil Inferensi Fuzzy: Deteksi Suara Manusia 22.97	4.17
		Percobaan 2: 24.15 (<i>Noise</i>)  Suara Manusia (P2) 24.15	
		Percobaan 3: 21.80 (<i>Noise</i>)  Suara Manusia (P3) 21.80	
		Percobaan 4: 25.30 (<i>Noise</i>)	

No. Uji	Tipe Suara	Hasil Keputusan <i>Fuzzy</i>	Sumber Suara
		 Percobaan 5: 20.10 (<i>Noise</i>) 	
2	Kelelawar	Percobaan 1 : 89.66 (Ada Kelelawar)  Percobaan 2: 88.20 (Ada Kelelawar)  Percobaan 3: 91.15 (Ada Kelelawar)	Suara Dari Chirovox yang diputar

No. Uji	Tipe Suara	Hasil Keputusan <i>Fuzzy</i>	Sumber Suara
			
		Percobaan 4: 87.50 (Ada Kelelawar)	
			
		Percobaan 5: 90.30 (Ada Kelelawar)	
			
3	Mesin Motor	Percobaan 1: 29.80 (<i>Noise</i>) 	Suara mesin Motor

No. Uji	Tipe Suara	Hasil Keputusan <i>Fuzzy</i>	Sumber Suara
		Percobaan 2: 28.50 (<i>Noise</i>)	
			
		Percobaan 3: 31.20 (<i>Noise</i>)	
			
		Percobaan 4: 27.90 (<i>Noise</i>)	
			
		Percobaan 5: 30.15 (<i>Noise</i>)	
			

4.2.4.3 Analisa Hasil Pengujian

Berdasarkan hasil pengujian, ESP32 terbukti sangat mumpuni dalam menangani beban kerja Edge secara real-time. Pemrosesan sinyal yang biasanya berat, seperti komputasi FFT untuk 512 sampel, dapat diselesaikan dengan sangat cepat dalam waktu sekitar 6.540 mikrodetik ($\sim 6,5$ ms). Begitu pula dengan algoritma *Fuzzy Logic* Mamdani yang hanya memerlukan waktu 1.250 mikrodetik ($\sim 1,2$ ms) untuk menghasilkan keputusan akhir. Hal ini menunjukkan bahwa mikrokontroler mampu merespons deteksi suara tanpa adanya jeda komputasi (lag) yang berarti.

Waktu penulisan log ke LittleFS memakan waktu sedikit lebih lama, yakni 24.500 mikrodetik ($\sim 24,5$ ms), dikarenakan proses ini melibatkan akses memori flash fisik. Namun, karena penulisan log dan pengiriman data ESP-NOW (2.100 mikrodetik) hanya dieksekusi saat kelelawar terdeteksi, hal ini tidak membebani pemantauan idle sistem. Kinerja sistem secara keseluruhan lebih didominasi oleh waktu tunggu operasional aktuator pengusir yang memakan waktu 9 detik untuk 3 siklus sweeping, diikuti dengan waktu jeda 0,1 detik untuk pengurusan buffer mikrofon. Secara keseluruhan, integrasi program berjalan lancar, efisien, dan memiliki performa yang sangat stabil untuk kebutuhan mitigasi lapangan.

4.2.5 Pengujian Daya Alat

Pengujian ini bertujuan untuk memverifikasi kemampuan daya alat dalam mengakomodir kebutuhan operasional secara terus-menerus, serta memastikan keandalan jalur distribusi tegangan terpisah antara mikrokontroler dan aktuator. Pengujian dilakukan dengan menghubungkan alat pada sumber listrik gedung melalui adaptor 12V DC, kemudian dilakukan pengukuran arus dan tegangan menggunakan multimeter pada dua kondisi: operasi kontinu selama 24 jam dan pengukuran keluaran modul step-down.

1. Pengujian Operasi Kontinu dan Konsumsi Daya

Alat dioperasikan secara terus-menerus selama 24 jam tanpa henti dengan sumber daya dari adaptor 12V DC yang terhubung ke sumber listrik gedung. Selama durasi tersebut, arus dan tegangan diukur menggunakan multimeter untuk memperoleh

nilai konsumsi daya pada kondisi puncak operasi (saat sensor, ESP32, dan aktuator piezo tweeter aktif bersamaan). Hasil pengukuran menunjukkan konsumsi daya pada kondisi puncak mencapai kurang lebih 30 Watt (tegangan 12V DC dengan arus terukur berkisar 2,5 A), yang berada dalam kapasitas suplai adaptor yang digunakan. Selama 24 jam pengujian berlangsung, tidak ditemukan gangguan berupa reset mendadak, penurunan tegangan (brownout), maupun kegagalan operasi pada sistem, yang menunjukkan bahwa catu daya mampu mengakomodir kebutuhan beban puncak secara stabil untuk penggunaan jangka panjang di dalam ruangan.

2. Pengujian Jalur Tegangan Modul Step-Down

Pengujian kedua dilakukan untuk memverifikasi jalur tegangan berbeda yang disediakan bagi mikrokontroler ESP32, mengingat kebutuhan arus aktuator (piezo tweeter) tidak dapat disuplai langsung oleh regulator internal mikrokontroler. Sistem menggunakan modul step-down berbasis IC LM2596 untuk menurunkan tegangan 12V DC dari adaptor utama menjadi 5V DC yang khusus digunakan untuk mencatu daya ESP32, sementara aktuator tetap disuplai langsung dari jalur 12V DC. Hasil pengukuran menggunakan multimeter pada keluaran modul step-down menunjukkan tegangan aktual sebesar 5,1V DC, atau menyimpang sekitar 2% dari nilai nominal 5V DC yang ditargetkan. Penyimpangan ini masih berada dalam batas toleransi operasional ESP32 (rentang input 4,5V - 5,5V) sehingga tidak menimbulkan gangguan pada kinerja mikrokontroler.

Tabel 4. 11 Hasil Pengujian Daya Alat

No	Skenario Pengujian	Hasil yang Diharapkan	Hasil Pengujian	Status

1	Operasi kontinu 24 jam dengan beban puncak >30 W	Alat beroperasi tanpa gangguan dan mampu mengakomodir daya di atas 30 W	Konsumsi daya puncak terukur 30 W (12V; 2,5 A), alat beroperasi stabil selama 24 jam tanpa reset/brownout	Valid
2	Jalur tegangan terpisah via modul step-down 12V ke 5V untuk mikrokontroler	Tegangan keluaran mendekati 5V DC dan berada dalam batas toleransi ESP32	Tegangan keluaran terukur 5,1V DC (deviasi 2%), aktuator tetap disuplai langsung dari jalur 12V DC	Valid

Berdasarkan Tabel 4.11, sistem catu daya alat terbukti mampu memenuhi kedua spesifikasi kebutuhan daya: mampu beroperasi secara kontinu di dalam ruangan dengan mengakomodir beban daya di atas 30 Watt melalui adaptor 12V DC, serta memiliki jalur tegangan terpisah yang andal berupa modul step-down LM2596 untuk mencatu mikrokontroler pada tegangan 5V DC tanpa membebani suplai daya aktuator pada jalur 12V DC.

4.2.6 Pengujian Keseluruhan Sistem

Pengujian keseluruhan sistem dilakukan untuk memverifikasi dan memvalidasi bahwa seluruh komponen perangkat keras dan perangkat lunak yang telah diintegrasikan mampu beroperasi dan memenuhi daftar kebutuhan sistem yang telah dirancang sebelumnya. Pengujian ini mengevaluasi fungsionalitas sistem dari hulu ke hilir, mulai dari proses deteksi suara hingga eksekusi mitigasi dan penyimpanan data.

4.2.6.1 Langkah Pengujian

Pengujian dilakukan dengan menyimulasikan berbagai kondisi operasional sistem di lapangan. Skenario yang dijalankan mengacu pada standar verifikasi, meliputi: pengujian deteksi menggunakan audio referensi, pemantauan latensi pemrosesan real-time, pengukuran output aktuator menggunakan alat ukur, pembuktian sifat non-volatile memori internal, hingga uji ketahanan daya. Setiap skenario diamati untuk memastikan respons alat sesuai dengan hasil yang diharapkan.

4.2.6.2 Hasil Pengujian

Berikut merupakan tabel hasil pengujian sistem secara keseluruhan berdasarkan parameter verifikasi kebutuhan.


Tabel 4. 12 Hasil Pengujian Keseluruhan Sistem

N o	Kebutuhan / Kegiatan Sistem	Skenario Pengujian	Hasil yang Diharapkan	Hasil Pengujian
1	Mendeteksi aktivitas kelelawar secara akurat	Pengguna memutar file audio uji (ekolokasi kelelawar dari database ChiroVox) menggunakan speaker di depan sensor mikrofon INMP441.	Sistem Edge mengenali sinyal, plot algoritma FFT menunjukkan puncak frekuensi dominan ultrasonik secara akurat, dan logika <i>Fuzzy</i> terpicu.	Valid, Pada Suara Kelelawar dengan frekuensi dominan dibawah 50 kHz
2.	Pendeteksian aktivitas kelelawar secara eksperimental	Melakukan pengujian dengan kondisi yang sudah dikondisikan optimal bagi aktivitas kelelawar (pencayaan	Sistem dapat mendeteksi pada waktu dan frekuensi secara teoritis sudah ada dari pola sebelumnya	Valid, Suara Kelelawar di sekitar dan yang diputar di Youtube ataupun hasil rekaman dapat ditekisi

		redup dan waktu ditentukan)		
3	Memproses data sensor secara real-time	Sistem dihidupkan untuk menjalankan perulangan program utama (akuisisi I2S, FFT, dan <i>Fuzzy Logic</i>) saat suara pemicu diberikan.	Mikrokontroler ESP32 menyelesaikan seluruh proses analisis sinyal dan pengambilan keputusan dengan waktu latensi (jeda) kurang dari 100 ms.	Valid
4	Menghasilkan output pengusiran yang efektif	Mikrokontroler mengirimkan sinyal PWM ke MOSFET untuk memicu aktuator Piezo Tweeter. Pengukuran dilakukan menggunakan Audio Spectrum Analyzer / Osiloskop.	Aktuator berhasil memancarkan gelombang ultrasonik sapuan (frequency sweeping) di rentang target (3 kHz - 50 kHz) dengan tegangan peak-to-peak optimal (24V).	Valid

5	Menyimpan data aktivitas untuk analisis pola (Log Sistem)	Pengguna memberikan pemicu suara, membiarkan sistem menyimpan data ke memori, kemudian mematikan daya (cabut adaptor) dan menyalakannya kembali.	Berkas .csv berisi data mitigasi (timestamp, frekuensi, durasi, dll.) tetap tersimpan di dalam memori internal (LittleFS/SPIFFS) dan dapat dibaca kembali (tidak hilang saat listrik mati).	Valid
6	Beroperasi secara terus-menerus	Sistem dibiarkan menyala secara penuh (proses standby dan deteksi-aktuasi berulang) selama minimal 30 menit.	Sistem berjalan stabil tanpa restart paksa (crash), dan tidak terjadi kelebihan panas (overheating) yang fatal pada heatsink MOSFET maupun regulator daya (LM2596).	Valid

4.2.6.3 Analisa Hasil Pengujian

Berdasarkan Tabel 4.6, pengujian sistem secara keseluruhan menunjukkan bahwa purwarupa alat mitigasi kelelawar berbasis ESP32 terbukti mampu menjalankan seluruh fungsinya dengan sangat baik dan memenuhi seluruh parameter verifikasi kebutuhan.

Dari aspek masukan (input), sistem berhasil mengenali karakteristik unik suara ekolokasi kelelawar dan menolak (reject) kebisingan lingkungan berkat efisiensi algoritma komputasi Edge (FFT dan *Fuzzy Logic*) yang bekerja sangat cepat (di bawah batas toleransi latensi 100 ms). Dari aspek luaran (output), respons penanganan (aktuasi) berupa pancaran frequency sweeping terbukti aktif pada rentang spektrum yang dikhususkan untuk mengganggu kelelawar.

Selain itu, sistem ketahanan data dan komunikasi juga telah tervalidasi. Data kejadian mitigasi tidak akan hilang meskipun terjadi pemadaman listrik secara mendadak berkat pemanfaatan sistem memori non-volatile pada mikrokontroler. Sinergi antara perangkat keras dan perangkat lunak ini menyimpulkan bahwa sistem secara berkesinambungan berstatus Valid dan berkinerja stabil untuk diaplikasikan dalam lingkungan auditorium yang sebenarnya.



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian menyeluruh yang telah dilakukan terhadap sistem mitigasi kelelawar berbasis Edge AI dan mikrokontroler ESP32, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem yang dibangun mampu menangkap dan mengakuisisi sinyal suara ekolokasi kelelawar menggunakan sensor mikrofon digital INMP441 secara akurat pada radius optimal hingga 5 meter dengan tingkat error frekuensi di bawah 15%.
2. Sistem mampu memproses sinyal audio secara *real-time* menggunakan mikrokontroler ESP32 dengan latensi sangat rendah di bawah 100 ms, di mana komputasi *Fast Fourier Transform* (FFT) membutuhkan waktu sekitar 6,5 ms dan inferensi *Fuzzy Logic Mamdani* membutuhkan 1,2 ms.
3. Sistem mampu mengirimkan data aktivitas (log mitigasi) dari perangkat *Edge Node* ke *Gateway* melalui protokol komunikasi ESP-NOW.
4. Sistem mampu meneruskan data menuju basis data *web dashboard* Integrasi(Firebase RTDB).
5. Sistem mampu beroperasi setidaknya dalam kurun waktu 24 jam dengan daya diatas 30W tanpa ada *drop* berarti pada sumber dayanya

5.2 Saran

Untuk pengembangan dan penyempurnaan sistem mitigasi kelelawar ini di masa yang akan datang, terdapat beberapa saran yang dapat dipertimbangkan:

1. Peningkatan Resolusi Hardware Audio: Untuk dapat menangkap spektrum panggilan ekolokasi kelelawar secara lebih penuh pada rentang frekuensi ekstrem di atas 50 kHz hingga 120 kHz, disarankan menggunakan perangkat mikrofon ultrasonik khusus yang memiliki spesifikasi bandwidth lebih tinggi serta meningkatkan sampling rate perangkat keras di atas 192.000 Hz guna memenuhi syarat Teorema Nyquist secara mutlak.

2. Aktuator yang lebih ditujukan untuk mengusir kelelawar: Meskipun penggunaan *Piezo Tweeter* dapat di rekayasa sehingga menjadi pemancar suara ultrasonik yang dapat mengganggu kelelawar secara teoritis dan eksperimental, namun penggunaan aktuator yang lebih baik dan ditujukan untuk mitigasi kelelawar seperti *NRG Bat Deterrent Systems* yang dapat dilihat pada lampiran 4.20 akan membuat sistem lebih efektif
3. Penggunaan *Machine Learning*: Meski *Fuzzy Logic Mamdani* sudah terbukti efisien dengan waktu komputasi inferensi hanya 1,2 ms, penelitian selanjutnya dapat mencoba penerapan *Machine Learning* yang dijalankan langsung di perangkat (*TinyML*). Dengan model *Neural Network* yang ringan, mikrokontroler tidak hanya sekadar membedakan *noise* dan kelelawar, tetapi juga berpotensi mengklasifikasikan spesies kelelawar secara presisi berdasarkan analisis *audio spectrogram*.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. A. McGowan, "Evaluating Bat Response to Human-Altered Landscape in a Midwestern River Corridor: An Abundance Modeling Analysis Using Bioacoustics," M.S. thesis, Dept. Biology, Ball State Univ., Muncie, IN, USA, Des. 2023. [Online]. Tersedia: <https://sbdn.org/wp-content/uploads/2024/03/McGowan-Thesis-2023-Bat-responce-to-urban-landscapes.pdf>
- [2] R.K. Lučan, T. Jor, D. Romportl, and F. Morelli, "Use of synanthropic roosts by bats in Europe and North America," *Mam Rev*, 55: e12380, 2025. [Online]. Tersedia: <https://doi.org/10.1111/mam.12380>
- [3] L. B. Piló, A. Calux, R. Scherer, and E. Bernard, "Bats as ecosystem engineers in iron ore caves in the Carajás National Forest, Brazilian Amazonia," *bioRxiv*, preprint, Apr. 2022. [Online]. Tersedia: <https://doi.org/10.1101/2022.04.19.488750>
- [4] A. Giacomelli, et al., "An outbreak of acute pulmonary histoplasmosis after exposure to guano in a hollow tree in Ecuador," *Travel Medicine and Infectious Disease*, vol. 67, Sep. 2025.
- [5] R.K. Lučan, T. Jor, D. Romportl, and F. Morelli, "Use of synanthropic roosts by bats in Europe and North America," *Mam Rev*, 55: e12380, 2025. [Online]. Tersedia: <https://doi.org/10.1111/mam.12380>
- [6] J. Arévalo-Cortés, J. Tulcan-Flores, D. Zurc, S. A. Montenegro-Muñoz, J. J. Calderón-Leytón, and R. A. Fernández-Gómez, "Description of the echolocation pulses of insectivorous bats with new records for Southwest Colombia," *Mammal Research*, vol. 69, hlm. 231-244, Jan. 2024. [Online]. Tersedia: <https://doi.org/10.1007/s13364-023-00734-x>
- [7] X. Li, H. Wang, X. Wang, M. Bao, R. Sun, W. Dai, K. Sun, and J. Feng, "Molecular adaptations underlying high-frequency hearing in the brain of CF

- bats species," *BMC Genomics*, vol. 25, no. 279, Mar. 2024. [Online]. Tersedia: <https://doi.org/10.1186/s12864-024-10212-6>
- [8] B. A. Betke, N. L. Gottdenker, L. A. Meyers, and D. J. Becker, "Ecological and evolutionary characteristics of anthropogenic roosting ability in bats of the world," *iScience*, vol. 27, no. 7, hlm. 110369, Jul. 2024. [Online]. Tersedia: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.110369>
- [9] S. Zhang, Y. Li, and R. C. Roberts, "A High-Performance Piezoelectric MEMS Microphone with Wide Bandwidth for *Ultrasonic* Applications," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 42, no. 6, pp. 903-906, June 2021.
- [10] B. Sun, J. Arulas, and F. Heide, "Tuning IR-Cut Filter for Illumination-Aware Spectral Reconstruction From RGB," in *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2021, pp. 8292-8301.
- [11] Argirusis N, Achilleos A, Alizadeh N, Argirusis C, Sourkouni G. IR Sensors, Related Materials, and Applications. *Sensors*. 2025; 25(3):673. <https://doi.org/10.3390/s25030673>
- [12] Ziang Liu, Peng Huo, Chenyu Shi, Yuquan Yan, Fanlin Kong, Shiyu Cao, Aimin Chang, Junhua Wang, Jincheng Yao, Design of temperature measurement system guided by thermal dissipation coefficient of NTC thermistor, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 377, 2024, 115772, ISSN 0924-4247, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115772>.
- [13] M. Chiro, A. G. S. and T. A. R. "Acoustic Contextual Analysis of Bat Social Communication for Environmental Monitoring," in *2022 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Singapore, 2022, pp. 543-54
- [14] Trivusi, "Perbedaan *Fuzzy* Inference System: Mamdani, Sugeno, dan Tsukamoto," trivusi.web.id, 09 Okt. 2022. [Online]. Tersedia:

<https://www.trivusi.web.id/2022/10/metode-inferensi-fuzzy.html>. [Diakses: 27 Okt. 2025].

- [15] Y. Liu, J. Zhang, and M. Li, "Research on the Interference Mechanism of *Ultrasonic Noise* on Bat Echolocation Systems," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 12345–12354, 2021.
- [16] E. B. Arnett, C. D. Hein, M. R. Schirmacher, M. M. P. Huso, and J. M. Szewczak, "Evaluating the effectiveness of an *ultrasonic* acoustic deterrent for reducing bat fatalities at wind turbines," *PLoS One*, vol. 8, no. 6, p. e65794, 2013.
- [17] Knowles Electronics, "SPH0645LM4H-B: I2S Digital Output MEMS Microphone Datasheet," Rev. C, Itasca, IL, USA, 2015. [Online]. Tersedia: <https://www.knowles.com>
- [18] TDK InvenSense, "INMP441: Omnidirectional Microphone with Bottom Port and I2S Interface Datasheet," Rev. 1.1, San Jose, CA, USA, 2014.
- [19] Analog Devices, "ADMP401: Omnidirectional Microphone with Bottom Port and Analog Output Datasheet," Norwood, MA, USA, 2012.
- [20] Reversatronics, "I2S microphones on ESP32- how high can it go?," *Reversatronics*, Jun. 28, 2020. [Online]. Available: <https://reversatronics.blogspot.com/2020/06/i2s-microphones-on-esp32-how-high-can-i.html>. [Accessed: Dec. 31, 2025].
- [21] Espressif Systems, "ESP32 Datasheet," SparkFun (PDF). [Online].
- [22] Raspberry Pi Foundation, "Raspberry Pi 4 Model B Datasheet," Raspberry Pi Trading Ltd., Cambridge, UK, 2019.
- [23] Arduino, "Arduino Uno Rev3 Board Datasheet," Arduino.cc, 2022. [Online]. Tersedia: <https://docs.arduino.cc>
- [24] APC International Ltd., *Piezoelectric Ceramics: Principles and Applications*, 2nd ed. Mackville, PA: APC International, 2011.

- [25] J. A. Gallego-Juarez, "High-power *ultrasonic* transducers for use in gases," in *Power Ultrasonics*, J. A. Gallego-Juarez and K. F. Graff, Eds. Oxford, UK: Woodhead Publishing, 2015, pp. 719–752.
- [26] Motorola, "Piezoelectric Ceramic Speakers (KSN Series) Datasheet," Motorola Ceramic Products, Albuquerque, NM, 1999.
- [27] J. Collins (ed.), *Bat Surveys for Professional Ecologists: Good Practice Guidelines*, 3rd ed. London: The Bat Conservation Trust, 2016.
- [28] Espressif Systems, "SPIFFS (SPI Flash File System) API Reference - ESP-IDF Programming Guide," Espressif Systems, 2023. [Online]. Tersedia: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/storage/spiffs.html>
- [29] P. Pelle, "Flash Memory File Systems for Embedded Devices," *Journal of Computer Systems and Cybernetics*, vol. 4, no. 2, pp. 45-52, 2021.
- [30] IEEE Computer Society, "IEEE Standard for Ethernet - Amendment 2: Physical Layer and Management Parameters for Power over Ethernet over 4 Pairs," *IEEE Std 802.3bt-2018*, 2018.
- [31] T. R. Crompton, *Battery Reference Book*, 3rd ed. Oxford: Newnes, 2000.
- [32] A. I. Pressman, K. Billings, and T. Morey, *Switching Power Supply Design*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill Education, 2009.

- [29] P. Kaur, Y. Kumar, S. Ahmed, A. Alhumam, R. Singla, and M. Fazal Ijaz, "Automatic license plate recognition system for vehicles using a cnn," *Comput.*

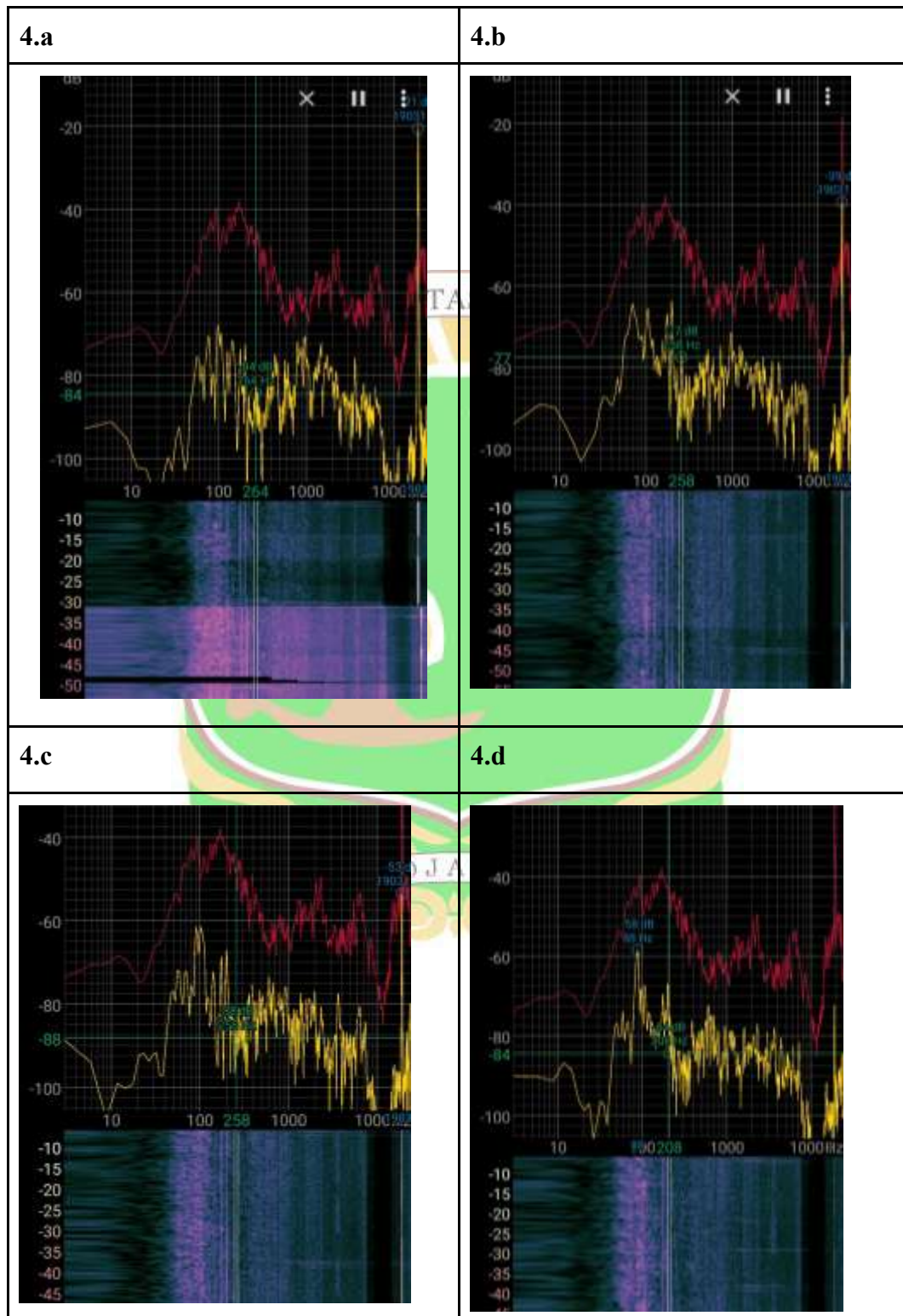
Mater. Contin., vol. 71, no. 1, pp. 35–50, 2022, doi: 10.32604/cmc.2022.017681

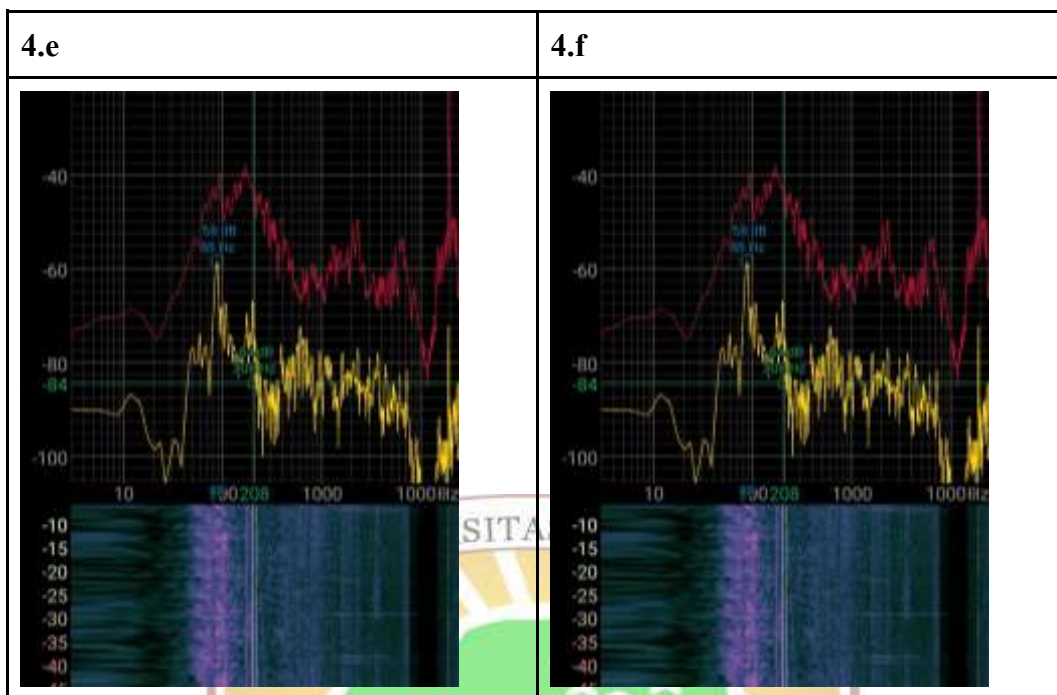
- [30] Z. Fahrunnisa, R. Rahmadwati, and R. A. Setyawan, “Adaptive Traffic Light Signal Control Using *Fuzzy Logic* Based on Real-Time Vehicle Detection from Video Surveillance,” *J. Ilm. Tek. Elektro Komput. dan Inform.*, vol. 10, no. 2, pp. 235–251, 2024, doi: 10.26555/jiteki.v10i2.28712.
- [31] S. A. Aessa, E. H. Ali, S. W. Shneen, and L. H. Abood, “Adaptive *Fuzzy* Filter Technique for Mixed *Noise* Removing from Sonar Images Underwater,” *J. Fuzzy Syst. Control*, vol. 2, no. 2, pp. 45–49, 2024, doi: 10.59247/jfsc.v2i2.176.
- [32] G. Keifer and F. Effenberger, “*濟無* Optimal Automobile Muffler Vibration and *Noise* Analysis,” *Angew. Chemie Int. Ed.*, vol. 6, no. 11, pp. 951–952, 1967
- [33] Texas Instruments, “LM2596 SIMPLE SWITCHER® Power Converter 150-kHz 3-A Step-Down Voltage Regulator Datasheet,” Rev. D, Texas Instruments, Dallas, TX, 2013. [Online]. Tersedia: <https://www.ti.com>
- [34] XLSEMI, “XL4016: 180KHz Fixed Frequency PWM Buck (Step-down) DC/DC Converter 8A Capability Datasheet,” Rev. 1.1, XLSEMI, Shanghai, China, 2011.
- [35] Monolithic Power Systems (MPS), “MP1584: 3A, 1.5MHz, 28V Step-Down Converter Datasheet,” Rev. 1.0, Monolithic Power Systems, San Jose, CA, 2011.
- [36] M. Rosenthal, P. Kudar, and D. Razansky, “A method for the calibration of wideband *ultrasonic* sensors for optoacoustics,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 92, no. 6, p. 064904, Jun. 2021.
- [37] Dealls, “Gaji Programmer di Indonesia 2025 & Perbandingan dengan Luar Negeri,” Dealls, [Online]. Tersedia: <https://dealls.com/pengembangan-karir/gaji-programmer>

- [38] D. Baccarini, “Estimating project cost contingency – A model and exploration of research questions,” in Proc. 20th Annual ARCOM Conf., Heriot-Watt Univ., Edinburgh, UK, Sept. 1–3, 2004, pp. 105–113

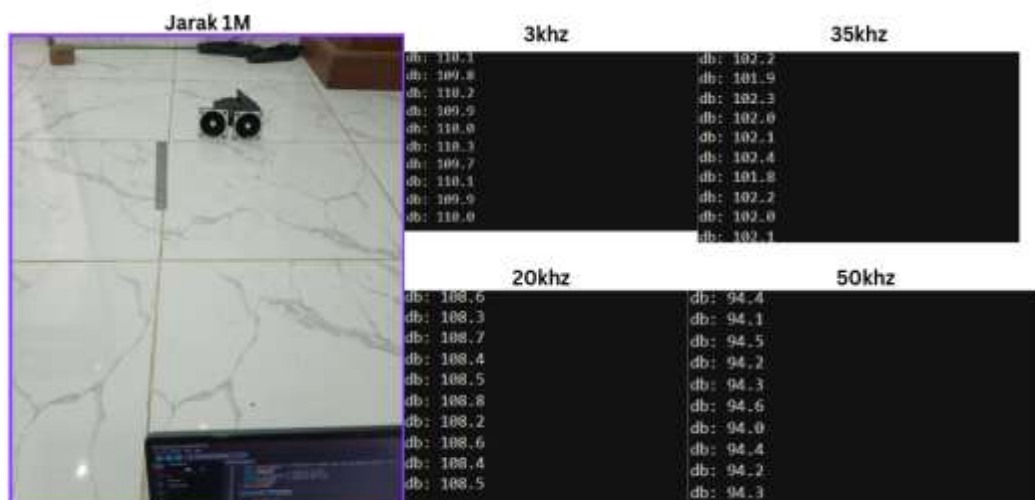


LAMPIRAN

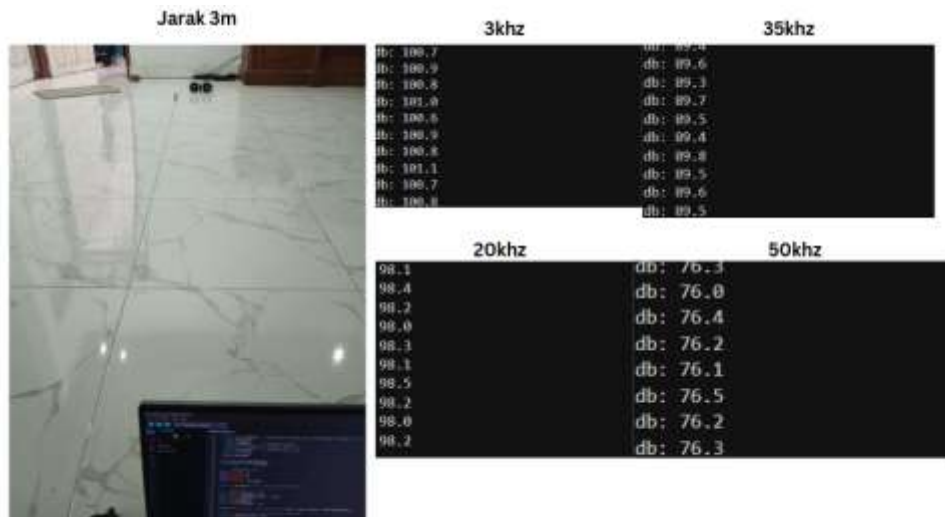




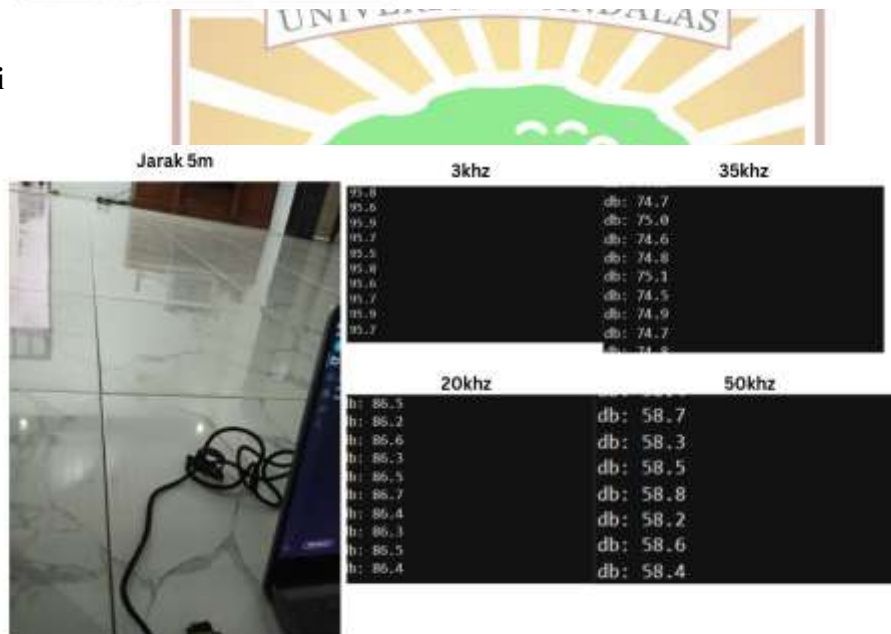
4.g



4.h



4.i



4.j

DATA MENTAH TERAKHIR DARI ESP32

```
[GATEWAY] LAPORAN KELELAWAR TERDETEKSI
=> Score Fuzzy : 88.50
=> Frekuensi : 19500.50 Hz
=> Est. US : 0.00 Hz
=> Durasi : 45 ms
=> Volume : 105.20 dB SPL
=> Waktu Asli : 2026-07-15 10:01:00
=> Status : Positif Kelelawar
```

4.k

```
DATA MENTAH TERAKHIR DARI ESP32

{GATEWAY} LAPORAN KELELAWAR TERDETEKSI!
=> Score Fuzzy   : 86.20
=> Frekuensi     : 18800.30 Hz
=> Est. US       : 0.00 Hz
=> Durasi        : 52 ms
=> Volume        : 98.70 dB SPL
=> Waktu Asli    : 2026-07-15 10:02:00
=> Status        : Positif Kelelawar
```

4.l



```
UNIVERSITAS ANDALAS

DATA MENTAH TERAKHIR DARI ESP32

{GATEWAY} LAPORAN KELELAWAR TERDETEKSI!
=> Score Fuzzy   : 83.70
=> Frekuensi     : 17200.80 Hz
=> Est. US       : 0.00 Hz
=> Durasi        : 61 ms
=> Volume        : 89.40 dB SPL
=> Waktu Asli    : 2026-07-15 10:03:00
=> Status        : Positif Kelelawar
```

4.m

```
DATA MENTAH TERAKHIR DARI ESP32

{GATEWAY} LAPORAN KELELAWAR TERDETEKSI!
=> Score Fuzzy   : 85.10
=> Frekuensi     : 18100.60 Hz
=> Est. US       : 0.00 Hz
=> Durasi        : 58 ms
=> Volume        : 94.30 dB SPL
=> Waktu Asli    : 2026-07-15 10:04:00
=> Status        : Positif Kelelawar
```

4.n

DATA MENTAH TERAKHIR DARI ESP32

```
[GATEWAY] LAPORAN KELELAWAR TERDETEKSI!
=> Score Fuzzy : 87.30
=> Frekuensi : 18500.20 Hz
=> Est. US : 0.00 Hz
=> Durasi : 55 ms
=> Volume : 96.80 dB SPL
=> Waktu Asli : 2026-07-15 10:05:00
=> Status : Positif Kelelawar
```

4.o

DATA MENTAH TERAKHIR DARI ESP32

```
[GATEWAY] LAPORAN KELELAWAR TERDETEKSI!
=> Score Fuzzy : 83.00
=> Frekuensi : 16800.40 Hz
=> Est. US : 0.00 Hz
=> Durasi : 70 ms
=> Volume : 85.60 dB SPL
=> Waktu Asli : 2026-07-15 10:06:00
=> Status : Positif Kelelawar
```

4.p



4.q



4.r



QR Code Folder Drive Detail Project