

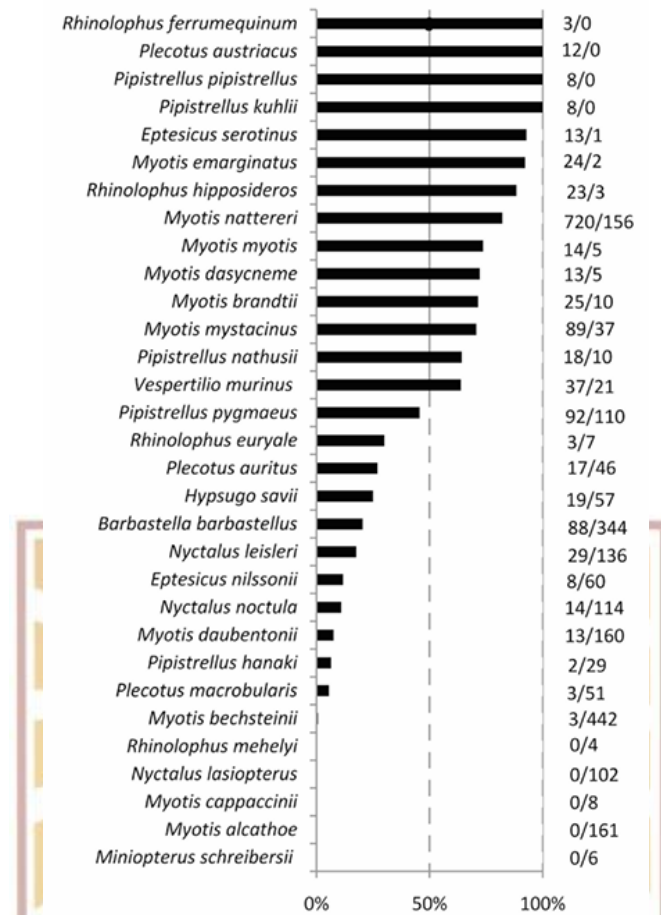
BAB I

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 aktuator 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

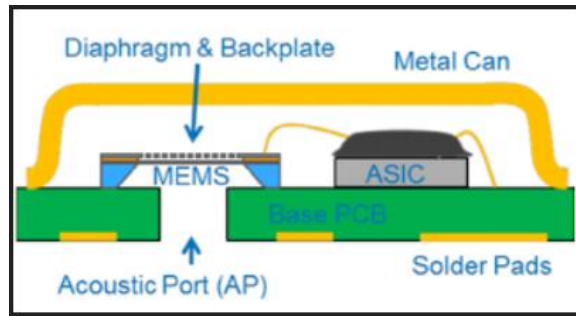
Solusi 1 memanfaatkan pendeteksian berbasis akustik ultrasonik yang meniru prinsip ekolokasi alami kelelawar. Sistem ini menggunakan mikrofon ultrasonik untuk menangkap sinyal suara berfrekuensi tinggi (20–120 kHz), kemudian menganalisis karakteristiknya menggunakan metode komputasi berbasis Logika Fuzzy. 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-lethal, 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:

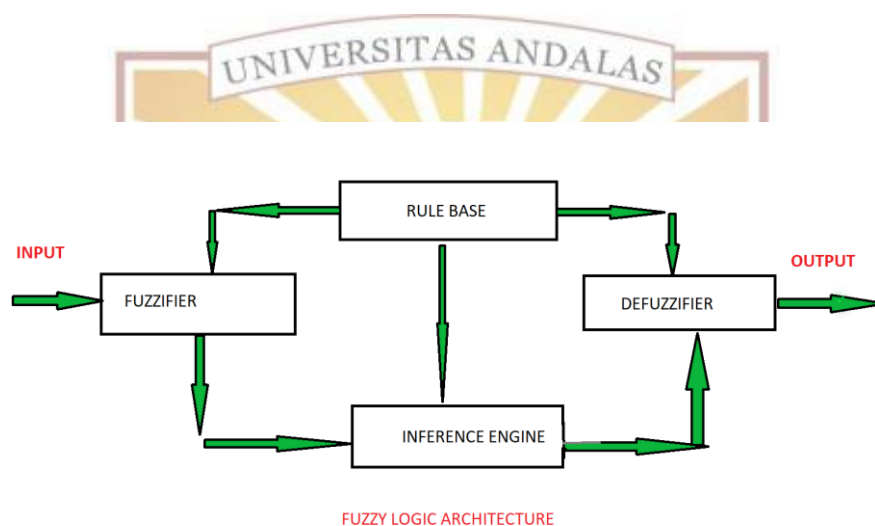
$$P_{in} = \rho c v \quad (1.3)$$

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:

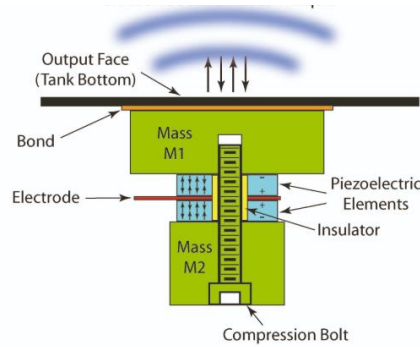
1. IF intensitas *tinggi* AND frekuensi *tinggi* AND durasi *pendek* → THEN “kemungkinan kelelawar sangat tinggi”.
2. IF intensitas *rendah* AND frekuensi *rendah* → THEN “kemungkinan *noise* lingkungan”.
3. IF frekuensi *sedang* AND durasi *panjang* → THEN “kemungkinan non-bat suara elektronik”.

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.

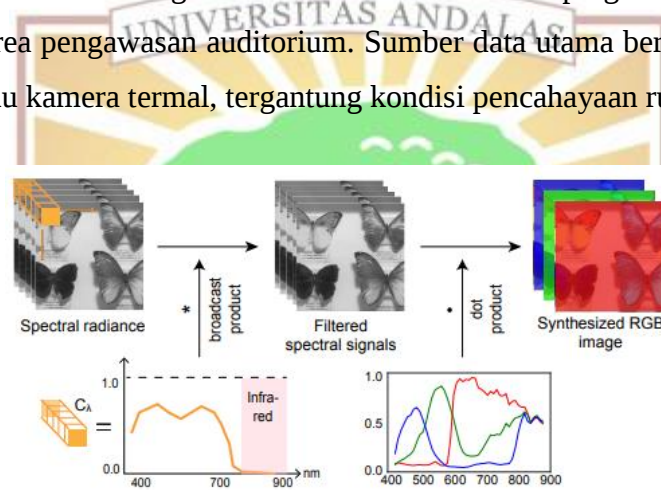
Setiap node sensor-aktuator dikendalikan oleh mikrokontroler yang memiliki kemampuan komputasi sinyal dasar (*FFT*, *fuzzy inference*, dan kontrol aktuator). Data antar node dapat dikirim menggunakan jaringan sensor nirkabel untuk sinkronisasi atau logging terpusat. Pendekatan ini memastikan sistem bekerja 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:

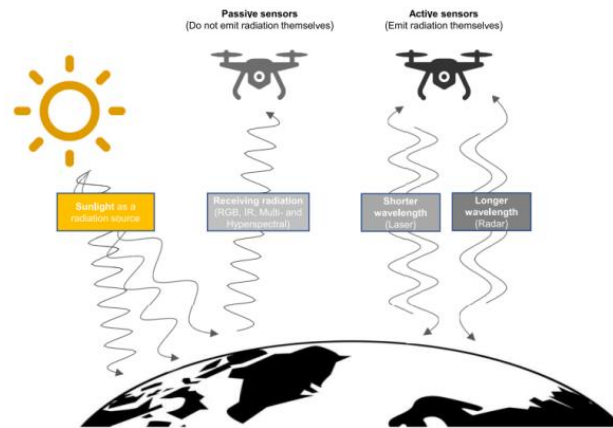
1. Analisis perilaku dan pola pergerakan kelelawar
2. Penentuan zona rawan untuk pemasangan alat tambahan
3. Evaluasi efektivitas sistem pengusiran

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:

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

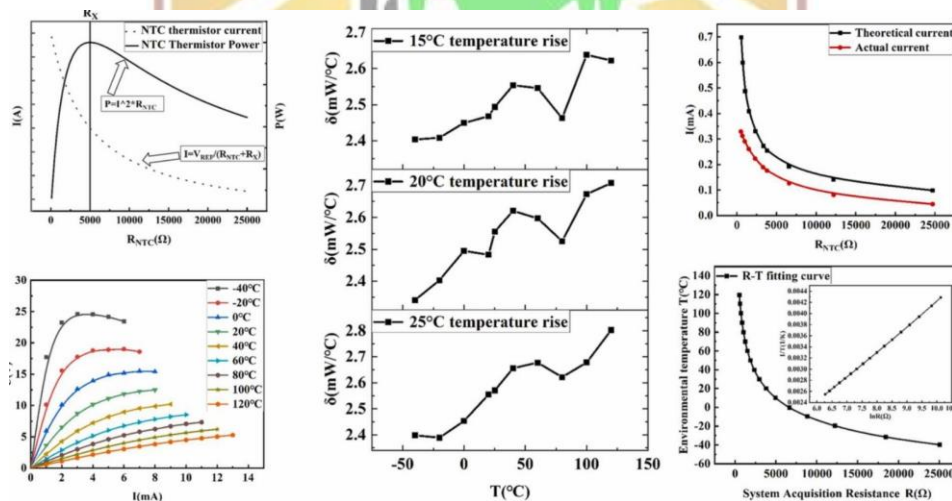
di mana V_{out} adalah tegangan keluaran, k adalah konstanta sensitivitas sensor, dan dT/dt adalah laju perubahan suhu. Dengan demikian, semakin sering gerakan terdeteksi, semakin tinggi nilai aktivitas yang tercatat oleh sistem. Sensor PIR ini sangat hemat daya dan cocok untuk sistem yang beroperasi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

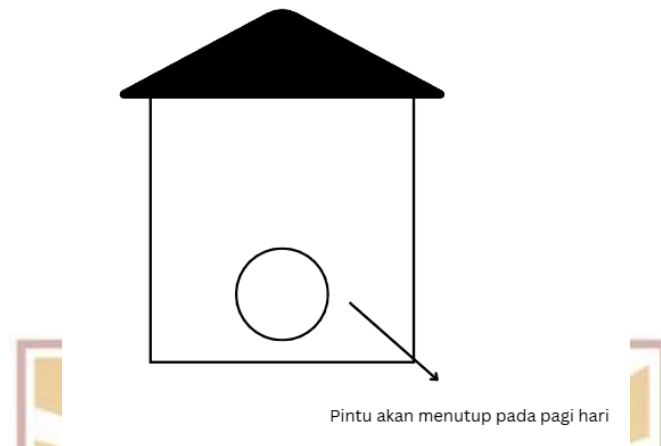
Agar setiap *roost box* dapat dipantau tanpa kabel dan dengan konsumsi daya rendah, sistem menggunakan komunikasi nirkabel. Teknologi yang memungkinkan pengiriman data secara nirkabel dengan daya rendah dan ketahanan tinggi terhadap interferensi. Setiap node *roost box* dilengkapi dengan modul *bluetooth* 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

			▲	▼	▲	▲	▲	▲
			Sensing Capability	Computing Methode	Networking Capability	Data Logging & Analytics Capability	Self-Diagnosis & Notification Capability	Actuation Capability
Konstrain Jangka Pengoperasian sistem	5	33,33%	●	●	△	●	●	●
Konstrain Keterjangkauan Harga Sistem	3	20%	●	●	●	△	△	●
Konstrain Lingkungan Penggunaan	3	20%	○	△	●	●	△	●
Konstrain Produksi Sistem	3	20%	●	●	●	△	△	●
Konstrain Privasi Pengguna	1	6,7%	△	△	△	●	●	△
Importance Rating			62	59	46	51	39	71
Percentage Rating			18,9%	17,98%	14,02%	15,54%	11,89%	21,64%
Solusi 1 (Fuzzy Audio + Ultrasonik)			●	●	●	●	●	○
Solusi 2 (ComVis + Cahaya Terarah)			○	○	○	●	●	○
Solusi 3 (Roosting Box + Fuzzy)			△	●	○	○	○	●

Konstrain Jangka Pengoperasian Sistem, sebagai prioritas utama pengguna, memiliki hubungan yang kuat dengan hampir seluruh kapabilitas teknis: *Sensing*, *Computing*, *Data Logging*, *Self-Diagnosis*, dan *Actuation*. Keandalan operasional jangka panjang sangat bergantung pada ketahanan sensor, efisiensi pemrosesan, serta kemampuan sistem memantau kerusakannya sendiri. Hubungannya dinilai lemah hanya dengan *Networking Capability*, karena jaringan lebih berfungsi sebagai jalur penyampaian informasi, bukan penentu ketahanan komponen secara fisik.

Konstrain Keterjangkauan Harga Sistem berhubungan kuat dengan *Sensing*, *Computing*, *Networking*, dan *Actuation*. *Hardware* penyusun kapabilitas inilah yang memakan porsi biaya terbesar dalam perakitan. Hubungannya dinilai lemah dengan *Data Logging* dan *Self-Diagnosis*, sebab hal tersebut lebih banyak diselesaikan melalui pemrograman perangkat lunak sehingga tidak secara signifikan menambah pengeluaran biaya material.

Konstrain Lingkungan Penggunaan berhubungan kuat dengan *Networking*, *Data Logging*, dan *Actuation*. Kondisi tata ruang fisik menuntut kestabilan transmisi jaringan, keakuratan perekaman data di lokasi, serta penempatan aktuator yang strategis. Hubungannya dinilai normal/sedang dengan *Sensing Capability*, karena

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

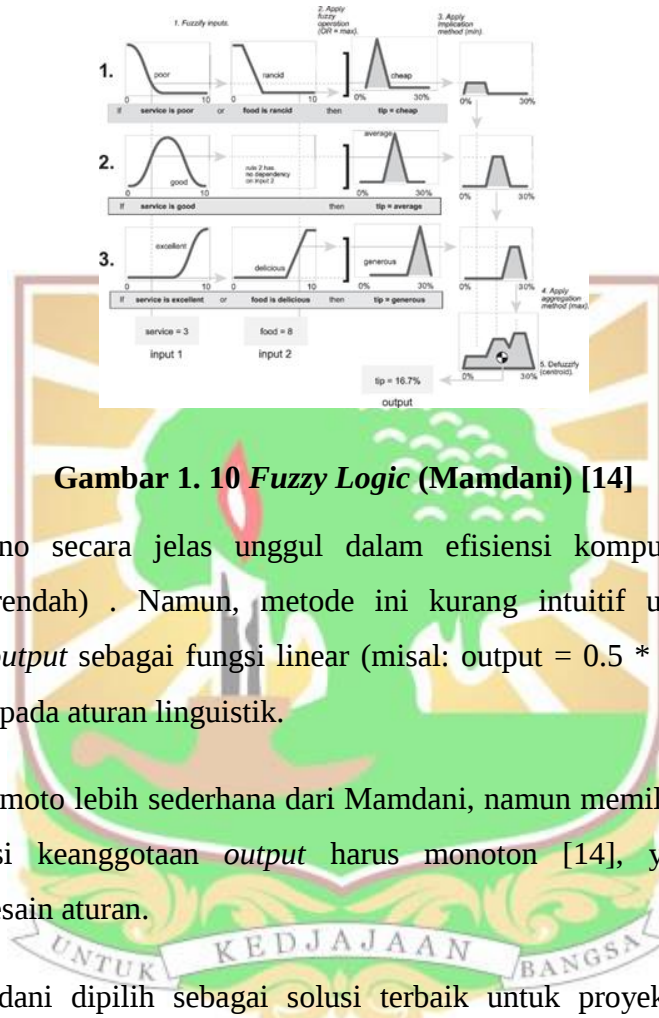
Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan menggunakan *House of Quality* (HoQ) dengan menganalisa hubungan seluruh usulan solusi terhadap fitur-fitur yang dibutuhkan, diperoleh Solusi 1 yaitu Sistem Mitigasi Kelelawar Berbasis Audio dan Ultrasonik merupakan solusi terbaik untuk menyelesaikan masalah. 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.

