

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*.

