

BAB I PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Sistem distribusi audio di masjid merupakan komponen penting dalam mendukung kejelasan dan ketercapaian suara selama kegiatan ibadah, seperti adzan, shalat berjamaah, khutbah, dan kajian keagamaan. Kualitas penyampaian suara sangat memengaruhi kenyamanan jamaah serta efektivitas komunikasi pesan yang disampaikan. Kajian mengenai distribusi audio terzonasi di masjid menunjukkan bahwa pengaturan tata letak pengeras suara dan pendekatan optimalisasi berbasis kerangka sistematis berpengaruh signifikan terhadap peningkatan kejelasan ujaran (*speech intelligibility*) [1]. Temuan tersebut menegaskan bahwa aspek teknis sistem audio masjid tidak hanya berkaitan dengan perangkat pengeras suara, tetapi juga dengan parameter akustik yang dapat diukur secara kuantitatif.

Pada praktiknya, banyak masjid di Indonesia masih menggunakan sistem pengeras suara analog terpusat (*Public Address/PA*) yang dikonfigurasi secara manual dan bersifat statis. Kondisi ini sering menimbulkan distribusi suara yang tidak merata, seperti area dengan tingkat suara berlebih (*echo zone*) maupun area dengan suara yang terlalu lemah (*dead zone*). Selain itu, pengaturan volume umumnya dilakukan secara subjektif tanpa didukung data kuantitatif mengenai tingkat tekanan suara atau Sound Pressure Level (SPL) di berbagai titik ruang ibadah. Berdasarkan pedoman penggunaan pengeras suara masjid dalam Surat Edaran Menteri Agama No. SE.05 Tahun 2022, volume pengeras suara diatur sesuai dengan kebutuhan dan dibatasi maksimal 100 dB, sehingga diperlukan alat ukur untuk memastikan kepatuhan terhadap batas tersebut [2].

Pengukuran SPL di masjid umumnya masih dilakukan secara manual menggunakan *sound level meter* (SLM) pada waktu tertentu [2]. Pendekatan ini belum memberikan gambaran kondisi akustik secara kontinu dan terdistribusi. Dalam konteks pemantauan tingkat kebisingan lingkungan, [3] menunjukkan bahwa alat ukur berbasis *mikrokontroler* mampu menghasilkan pengukuran tingkat kebisingan dengan tingkat akurasi yang mendekati SLM referensi (Benetch GM1352), dengan nilai rata-rata error sekitar 3,24% pada jarak pengujian tertentu. Namun, penelitian tersebut difokuskan pada mesin press industri otomotif dan belum diterapkan pada sistem tata suara masjid.

Perkembangan *Internet of Things* (IoT) dan *edge computing* membuka peluang untuk membangun sistem pemantauan akustik yang lebih adaptif dan terdistribusi. Arsitektur *edge* terbukti mampu meningkatkan performa *endpoint* IoT, khususnya dalam sistem yang memerlukan latensi rendah dan ketersediaan layanan tinggi, sebagaimana ditunjukkan dalam penelitian optimasi *endpoint Smart Mosque* berbasis *edge* [4]. Penelitian tersebut melaporkan peningkatan service availability

hingga mendekati 99% serta penurunan latensi rata-rata (*average*) dan latensi ekor (*tail latency*) secara signifikan, sehingga pendekatan edge dinilai sangat relevan untuk mendukung sistem IoT kritis waktu nyata (*time-critical*).

ESP32 merupakan salah satu platform mikrokontroler yang ideal digunakan dalam sistem IoT karena memiliki modul Wi-Fi terintegrasi serta kemampuan pengolahan data yang handal. Penelitian mengenai perbandingan performa mikrokontroler menunjukkan bahwa implementasi ESP32 dalam pemrosesan data mampu menghasilkan rata-rata nilai error pembacaan parameter analog yang jauh lebih rendah dan presisi dibandingkan dengan platform mikrokontroler standar lainnya [5]. Selain itu, pengujian fungsionalitas sistem IoT berbasis ESP32 untuk pemantauan parameter lingkungan secara real-time juga terbukti memberikan stabilitas kinerja pengiriman data yang baik [6].

Dari sisi pemrosesan sinyal dan implementasi pada perangkat *edge node*, [7] membuktikan bahwa perangkat mikrokontroler berdaya rendah mampu menjalankan algoritma pemrosesan audio lokal dan inferensi berbasis data suara secara berkala dengan penggunaan RAM dan kecepatan yang efisien dan terukur. Temuan tersebut mengonfirmasi bahwa pemrosesan audio langsung pada *edge node* sangat memungkinkan untuk direalisasikan, termasuk ekstraksi fitur sinyal berbasis komputasi lokal untuk estimasi nilai SPL secara berkala.

Meskipun berbagai penelitian telah membahas optimasi sistem Smart Mosque berbasis edge [4], kerangka sistematis sistem distribusi audio masjid [1], pemanfaatan *sound level meter* untuk regulasi suara masjid [2], alat ukur kebisingan berbasis mikrokontroler [3], komparasi efisiensi pengolahan data ESP32 [5], serta analisis memori pemrosesan audio lokal pada *mikrokontroler* [7], belum ditemukan penelitian yang secara spesifik mengintegrasikan pengukuran SPL terkalibrasi berbasis ESP32 dengan telemetri *real-time* menggunakan MQTT dalam konteks sistem audio masjid, disertai evaluasi kuantitatif terhadap akurasi pengukuran dan latensi komunikasi *end-to-end* dalam satu arsitektur sistem terpadu.

Secara praktis, ketiadaan sistem pemantauan yang terintegrasi dan objektif ini berdampak langsung pada sulitnya proses pengaturan suara di lapangan. Selama ini, operator atau *helper* di masjid melakukan pengaturan (*tuning*) volume dan kualitas pengeras suara hanya berdasarkan perkiraan subjektif pendengaran masing-masing. Akibatnya, proses *tuning* menjadi tidak akurat, memakan waktu lama, dan sering kali menghasilkan suara yang terlalu keras atau justru tidak terdengar di area tertentu. Oleh karena itu, diperlukan sebuah sistem pemantauan otomatis yang dapat menyajikan data numerik tingkat tekanan suara secara *real-time*. Data objektif inilah yang akan mempermudah tugas operator dalam memonitor dan melakukan *tuning* audio masjid secara presisi, tanpa harus mempersulit teknisi di lapangan.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan mengevaluasi *node edge* berbasis ESP32 sebagai solusi pemantauan SPL yang

terjangkau dan fungsional dalam mendukung sistem audio masjid yang lebih adaptif, terukur, dan sesuai dengan regulasi yang berlaku.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut.

1. Bagaimana merancang perangkat keras *node edge* berbasis ESP32 yang mampu melakukan pengukuran SPL di lingkungan masjid dengan memanfaatkan sensor mikrofon digital?
2. Bagaimana merancang dan mengimplementasikan arsitektur firmware berbasis lima modul utama untuk perhitungan RMS dan SPL dengan pembobotan A-weighting yang efisien pada ESP32?
3. Bagaimana tingkat presisi dan galat (*error*) pembacaan nilai SPL pada *node edge* ESP32 setelah dilakukan kalibrasi *offset* terhadap Sound Level Meter (SLM) Benetech GT1355A sebagai instrumen referensi?
4. Bagaimana kinerja komunikasi telemetri protokol MQTT dalam pengiriman data SPL dari *node edge* ke *server* secara *real-time* pada jaringan Wi-Fi lokal?
5. Bagaimana tingkat stabilitas operasi berkelanjutan dari *node edge* berbasis ESP32 ditinjau dari aspek uptime, konsumsi memori (RAM), dan temperatur kerja perangkat?

C. Batasan Masalah

Agar penelitian lebih terarah dan dapat diselesaikan dalam lingkup waktu serta sumber daya skripsi S1, maka batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Platform perangkat keras yang digunakan adalah papan pengembangan ESP32 dengan modul Wi-Fi terintegrasi sebagai inti *node edge*.
2. Sensor akustik yang digunakan berupa mikrofon digital (misalnya mikrofon I2S/MEMS) yang mampu mengukur sinyal audio pada rentang frekuensi suara manusia dan dikonfigurasi untuk *sampling rate* sesuai kebutuhan perhitungan SPL.
3. Target akurasi pengukuran SPL yang diupayakan berada pada rentang sekitar < 2 dB dibandingkan *alat sound level meter referensi* pada rentang level suara yang umum di masjid.
4. Komunikasi *telemetri* menggunakan protokol MQTT pada jaringan Wi-Fi lokal dengan target latensi ujung-ke-ujung kurang dari 150 ms dari *node edge* ke server penerima data.
5. Pengujian dan kalibrasi pembacaan SPL dilakukan pada posisi titik ukur konstan dengan jarak 2 meter di dalam ruang uji terkontrol, dengan fokus pada evaluasi presisi komputasi *node edge* terhadap SLM Benetech

GT1355A, bukan pada pengendalian otomatis sistem audio maupun analisis pemetaan akustik ruang.

6. Pengujian kestabilan sistem dilakukan dalam periode operasi terbatas (misalnya beberapa jam hingga satu hari pengujian *kontinu*), disesuaikan dengan ketersediaan waktu dan fasilitas laboratorium.

D. Tujuan Penelitian

Tujuan umum penelitian ini adalah mengembangkan dan mengevaluasi *node edge* berbasis ESP32 untuk pengukuran SPL dan telemetri real-time pada sistem audio masjid. Tujuan khusus penelitian ini adalah:

1. Merancang perangkat keras *node edge* berbasis ESP32 yang terintegrasi dengan sensor mikrofon digital INMP441 untuk akuisisi sinyal audio.
2. Mengimplementasikan algoritma pengukuran SPL berbasis perhitungan RMS dengan pembobotan *A-weighting* pada ESP32, serta melakukan kalibrasi *offset* terhadap SLM Benetech GT1355A guna menghasilkan pembacaan SPL yang presisi.
3. Mengimplementasikan komunikasi telemetri menggunakan protokol MQTT untuk pengiriman data SPL dari *node edge* berbasis ESP32 ke server serta mengevaluasi kinerja latensi komunikasi pada jaringan Wi-Fi lokal.
4. Mengevaluasi tingkat akurasi pengukuran SPL pada *node edge* berbasis ESP32 melalui proses kalibrasi terhadap SLM Benetech GT1355A sebagai instrumen referensi.
5. Menguji stabilitas operasi berkelanjutan dari perangkat *node edge* berbasis ESP32 ditinjau dari aspek *uptime*, konsumsi memori (RAM), dan temperatur kerja perangkat selama periode pengujian kontinu.

E. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Manfaat akademik
Menambah referensi mengenai penerapan teknologi *edge computing* dan IoT berbasis ESP32 untuk pemantauan akustik di lingkungan masjid. Menjadi contoh implementasi sistem pengukuran SPL sederhana berbasis mikrokontroler yang dapat dijadikan rujukan bagi penelitian lanjutan di bidang informatika dan sistem tertanam.
2. Manfaat praktis
Menyediakan rancangan node sensor SPL yang terjangkau dan hemat daya yang dapat digunakan sebagai bagian dari sistem pemantauan kualitas suara di masjid. Membantu pengelola masjid memperoleh informasi *kuantitatif* mengenai tingkat tekanan suara di ruang ibadah sehingga pengaturan

volume pengeras suara dapat dilakukan dengan lebih terukur dan nyaman bagi jamaah.

F. Kontribusi Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan beberapa kontribusi sebagai berikut:

1. Menyajikan rancangan dan implementasi *node edge* akustik berbasis ESP32 yang terintegrasi dengan sensor mikrofon digital untuk SPL di lingkungan masjid dengan biaya perangkat yang relatif rendah.
2. Menghasilkan implementasi algoritma pengukuran SPL sederhana berbasis RMS dan/atau FFT dengan pembobotan *A-weighting* pada platform ESP32, beserta evaluasi awal akurasi pengukurannya terhadap *sound level meter* referensi.
3. Mengimplementasikan dan menguji komunikasi telemetri menggunakan protokol MQTT antara *node edge* ESP32 dan server, termasuk pengukuran *latensi* ujung-ke-ujung pada jaringan Wi-Fi lokal dalam konteks sistem audio masjid.
4. Menyediakan data awal dan dokumentasi teknis yang dapat dimanfaatkan sebagai dasar pengembangan lebih lanjut menuju sistem pemantauan dan pengendalian tingkat suara audio masjid yang lebih cerdas dan terdistribusi.

G. Keaslian Penelitian

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengkaji penggunaan perangkat IoT berbasis ESP32 dan ESP8266 untuk sistem pemantauan lingkungan secara real-time, seperti monitoring kualitas udara [8][9], monitoring suhu dan kelembaban [10], serta berbagai sistem monitoring berbasis web dan aplikasi mobile menggunakan protokol komunikasi jaringan [11], [12], [13].

Pada konteks ruang masjid, penelitian terkait sistem audio telah dilakukan oleh [4] yang berfokus pada optimasi performa endpoint berbasis *edge computing*, serta [1] yang membahas zonasi distribusi audio untuk pemerataan SPL. Namun, kedua penelitian tersebut lebih menitikberatkan pada arsitektur sistem skala besar dan optimasi distribusi audio antar-zona, bukan pada perancangan *node edge* akustik sederhana untuk satu masjid tertentu.

Penelitian lain yang secara khusus membahas pengukuran level suara di lingkungan masjid dilakukan oleh [2] namun masih menggunakan metode pengukuran manual dengan sound level meter tanpa integrasi sistem IoT dan telemetri waktu nyata. Sementara itu, [3] telah mengembangkan sistem deteksi kebisingan berbasis mikrokontroler, tetapi konteksnya adalah lingkungan industri, bukan ruang ibadah.

Berbeda dengan penelitian-penelitian tersebut, penelitian ini menitikberatkan pada perancangan dan implementasi satu *node edge* berbasis ESP32 sebagai sensor SPL lokal di lingkungan masjid yang mengirimkan data telemetri secara waktu

nyata melalui protokol MQTT. Fokus penelitian ini dibatasi pada pengembangan bukti konsep (proof of concept) sistem monitoring SPL berbasis edge computing dalam satu lingkungan masjid, tanpa mengembangkan platform cloud yang kompleks maupun sistem pengendalian multi-masjid.

Dengan demikian, meskipun mengacu pada konsep edge computing dan monitoring IoT sebagaimana dikaji dalam penelitian sebelumnya [4], [11], rancangan arsitektur sistem, implementasi perangkat keras dan perangkat lunak, serta hasil pengujian yang disajikan dalam skripsi ini merupakan karya asli peneliti dan belum pernah dipublikasikan sebelumnya dalam bentuk yang sama.

H. Keterbaruan Penelitian

Keterbaruan (novelty) penelitian ini ditinjau dari perbandingan dengan penelitian terdahulu sebagai berikut:

1. Konteks Aplikasi yang Spesifik pada Masjid

Berbeda dengan penelitian pemantauan kebisingan umum di lingkungan industri [3] atau pengukuran SPL manual di masjid [2], penelitian ini secara khusus merancang *node edge* berbasis ESP32 untuk pemantauan SPL pada sistem audio masjid. Pendekatan ini mempertimbangkan karakter ruang ibadah yang menuntut kejelasan suara, kenyamanan jemaah, dan kestabilan sistem, bukan sekadar pengukuran kebisingan lingkungan.

2. Fokus Implementasi Tingkat Sarjana (S1)

Penelitian terkait *Smart Mosque* oleh [1] dan [4] menitikberatkan pada optimasi arsitektur dan distribusi audio skala sistem. Sementara itu, penelitian ini memfokuskan pada perancangan *node edge* dan algoritma pengukuran SPL yang sederhana namun fungsional, sehingga dapat diimplementasikan secara penuh oleh mahasiswa S1 dengan tetap mengacu pada prinsip pengukuran akustik dan komunikasi IoT yang benar. Pendekatan implementatif yang terstruktur pada level tugas akhir ini belum banyak dijabarkan secara sistematis dalam konteks masjid pintar.

3. Integrasi ESP32, Pengolahan SPL, dan MQTT dalam Skenario Terarah

Meskipun ESP32 dan MQTT telah banyak digunakan dalam berbagai sistem IoT [11], penelitian ini mengintegrasikan perhitungan RMS dan *A-weighting* langsung pada perangkat *edge*, dengan pengiriman data melalui MQTT untuk pemantauan hampir waktu nyata. Selain itu, penelitian ini menetapkan spesifikasi teknis yang terukur, yaitu target akurasi $\pm 2-3$ dB terhadap alat referensi serta latensi komunikasi < 150 ms. Kombinasi parameter teknis dan skenario pengujian yang eksplisit ini memberikan kontribusi yang lebih terarah bagi pengembangan sistem *monitoring* audio masjid yang adaptif dan tervalidasi.