

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

A. Penelitian Terkait

Terdapat beberapa penelitian terkait sistem audio masjid, pengukuran SPL, IoT, serta pemrosesan audio berbasis *edge device*. Tabel 2.1 menunjukkan rangkuman penelitian terdahulu yang digunakan sebagai acuan dalam penelitian ini.

Tabel 2. 1 Rangkuman Penelitian Terdahulu

No	Penulis (Tahun)	Deskripsi Penelitian
(1)	(2)	(3)
1	Rosad, Lasimin, et al. (2025)	Judul: <i>Edge-Based IoT EndPoint Performance Optimization for Smart Mosques.</i> Metode: Eksperimen dan pengujian performa sistem. Tools: ESP32, Edge Server, SSE, WebSocket. Hasil: Arsitektur edge computing menurunkan latency, meningkatkan availability hingga $\pm 99\%$, serta menjaga sistem tetap berjalan saat koneksi internet tidak stabil.
2	Rosad, Yudhana, et al. (2025)	Judul: <i>Zoned Audio Distribution: Optimization Framework in Mosque.</i> Metode: <i>Systematic literature review.</i> Tools: DSP, sistem zonasi audio. Hasil: Zonasi audio meningkatkan pemerataan SPL dan speech intelligibility pada area masjid.
3	Prabowo et al. (2023)	Judul: Sistem Monitoring Hidroponik Berbasis IoT. Metode: SDLC dan pengujian fungsional. Tools: NodeMCU ESP8266, sensor pH, sensor suhu, water level. Hasil: Sistem mampu memonitor suhu, pH, dan ketinggian air secara real-time melalui website.

4	Ramadhan & Triono (2021)	Judul: Monitoring Ketinggian Air dan Pengendalian Pintu Air. Metode: Perancangan prototype. Tools: ESP8266, sensor water level, web interface. Hasil: Sistem dapat memantau tinggi air dan mengontrol pintu air secara responsif melalui web.
5	Azhar et al. (2024)	Judul: Monitoring Kapasitas Air Berbasis ESP8266. Metode: Eksperimen dan validasi. Tools: ESP8266, HC-SR04, relay. Hasil: Pengukuran volume air akurat dan pompa otomatis aktif sesuai batas ketinggian.
6	Kusumah et al. (2023b)	Judul: Monitoring Suhu dan Kelembaban Data Center. Metode: Eksperimen komparatif. Tools: ESP8266, DHT11, HTC-2. Hasil: Error suhu 1,7% dan kelembaban 2,1%; sistem layak untuk monitoring real-time.
7	Murdiyantoro et al. (2021)	Judul: Pemantauan Kondisi Air Hidroponik. Metode: Prototype dan pengujian sensor. Tools: ESP8266, sensor pH, suhu, ultrasonik. Hasil: Data kondisi air dapat dipantau real-time melalui website.
8	Hasbullah et al. (2023)	Judul: Evaluasi Model Rekognisi Suara Burung Hama. Metode: Eksperimen machine learning. Tools: CNN, Edge Impulse, MobileNet. Hasil: Model berhasil berjalan pada perangkat edge dengan akurasi tinggi dan efisiensi memori.
9	Purbakawaca & Fauzan (2022)	Judul: Monitoring Kualitas Udara Dalam Ruangan. Metode: Eksperimen dan analisis QoS. Tools: ESP8266, MQ-7, DHT22, Grafana. Hasil: CO rata-rata 11 ppm dengan packet loss 0,83% dan kondisi termal nyaman.

10	Subagiyo et al. (2021)	Judul: Sensor Node Pemantauan Kualitas Udara. Metode: Eksperimen lapangan. Tools: Arduino, sensor MQ series. Hasil: Sistem mampu mengirim data ISPU dari dua lokasi ke server pusat.
11	Mariza Wijayanti (2022)	Judul: Prototype <i>Smart Home</i> Berbasis IoT. Metode: Prototype dan uji integrasi. Tools: ESP8266, PIR, DHT11, Blynk. Hasil: Monitoring dan kontrol perangkat berjalan baik melalui aplikasi mobile.
12	Manfaluthy et al. (2024)	Judul: Deteksi Kebisingan Mesin Press. Metode: Eksperimen komparatif. Tools: ESP8266, sound sensor, GM1352. Hasil: Error 3,24% dan akurasi 96,76% dibanding alat standar.
13	Helena Manurung et al. (2022)	Judul: Monitoring Kualitas Air Minum Berbasis ESP32. Metode: Eksperimen dan QoS. Tools: ESP32, pH sensor, turbidity sensor. Hasil: Error sensor <1,5% dan delay jaringan 20,36 ms.
14	Rizki Aulia Nanda et al. (2022)	Judul: Monitoring Sistem HVAC Berbasis IoT. Metode: Eksperimen teknis. Tools: ESP32, sensor tekanan. Hasil: Sistem mampu memonitor tekanan dan suhu HVAC secara stabil.
15	Salsabila Estu et al. (2023)	Judul: Monitoring Ketinggian Air Laut. Metode: Prototype dan uji lapangan. Tools: ESP32, HC-SR04. Hasil: Data ketinggian air dapat dimonitor real-time melalui platform IoT.
16	Putra et al. (2024)	Judul: Validasi Sensor Ultrasonik. Metode: Eksperimen validasi. Tools: ESP8266, HC-SR04. Hasil: Sensor menunjukkan tingkat akurasi tinggi dengan selisih kecil.
17	Darso et al. (2023)	Judul: Monitoring Ketinggian Air Berbasis IoT. Metode: Prototype dan uji sistem.

		Tools: ESP8266, Blynk. Hasil: Sistem mengklasifikasikan status aman, waspada, dan bahaya secara otomatis.
18	Artiyasa et al. (2021)	Judul: <i>Smart Home</i> Berbasis NodeMCU. Metode: Eksperimen. Tools: ESP8266, PIR, MQ2. Hasil: Sensor bekerja stabil sesuai spesifikasi jarak deteksi.
19	Bayu et al. (2021)	Judul: <i>Smart Home</i> Berbasis QR Code ESP32. Metode: Eksperimen. Tools: ESP32, Android App. Hasil: Sistem keamanan berjalan baik dengan biaya implementasi rendah.
20	Janeananto Sanjaya et al. (2021)	Judul: Monitoring Jemaah Masjid. Metode: <i>Prototype</i> dan pengujian akurasi. Tools: Arduino, sensor suhu dan jarak. Hasil: Akurasi suhu 98,82% dan jarak 93,33%.
21	Widyatmika, I.P.A.W., dkk. (2021)	Judul: Perbandingan Arduino Uno dan ESP32. Metode: Eksperimen komparatif. Tools: Arduino Uno, ESP32. Hasil: ESP32 menunjukkan error pengukuran lebih kecil.
22	Sumardi Sadi et al. (2023)	Judul: Smart Home Berbasis ESP32. Metode: Eksperimen sistem. Tools: ESP32, Blynk. Hasil: Sistem berjalan stabil dengan delay respon kecil.
23	Nizam et al. (2022b)	Judul: Monitoring Pintu Berbasis ESP32. Metode: Uji sistem dan notifikasi. Tools: ESP32, Telegram Bot. Hasil: Notifikasi real-time berhasil dikirim saat pintu terbuka.
24	Sa'adah et al. (2023)	Judul: Pengukuran Level Suara Masjid. Metode: Pengukuran lapangan. Tools: Sound Level Meter. Hasil: Ditemukan beberapa lokasi melebihi 100 dB sehingga perlu pengaturan ulang audio.

25	Setia et al. (2026)	Judul: IoT Multi-Sensor Berbasis ESP32. Metode: Eksperimen. Tools: ESP32 dan multi-sensor lingkungan. Hasil: Monitoring real-time berjalan stabil dengan fitur peringatan dini.
26	Herianto, H., & K. (2021)	Judul: Deteksi Pengunjung Perpustakaan. Metode: Eksperimen sistem. Tools: Sensor IoT dan web monitoring. Hasil: Sistem mampu menghitung jumlah pengunjung otomatis dan menyimpan data.
27	Pratikto et al. (2022)	Judul: Sistem Monitoring IoT. Metode: Eksperimen implementasi. Tools: Platform IoT monitoring. Hasil: Sistem berjalan sesuai rancangan dan memenuhi kebutuhan pengguna.

Berikut adalah tabel gap penelitian dan Novelty yang digunakan dalam penelitian.

Tabel 2. 2 Rangkuman Gap dan Novelty Penelitian

No	Penulis	Gap Penelitian	Keterbaruan Penelitian
(1)	(2)	(3)	(4)
1	Rosad, Lasimin, et al. (2025)	Fokus pada performa <i>endpoint edge</i> , belum membahas optimasi dan monitoring parameter audio (SPL/STI) secara terintegrasi.	Mengembangkan integrasi <i>edge computing</i> dengan sistem monitoring SPL real-time dan optimasi distribusi audio masjid.
2	Rosad, Yudhana, et al. (2025)	Hanya membahas zonasi distribusi audio, belum ada sistem monitoring digital berbasis IoT.	Menambahkan sistem monitoring SPL berbasis ESP32 yang dapat dianalisis secara real-time.

3	Prabowo et al. (2023)	Terbatas pada monitoring hidroponik, tidak membahas sistem audio atau edge processing.	Mengimplementasikan arsitektur edge untuk monitoring parameter akustik masjid.
4	Ramadhan & Triono (2021)	Fokus pada kontrol pintu air, tanpa analisis performa jaringan dan latency.	Menambahkan analisis latency dan stabilitas jaringan pada sistem monitoring audio.
5	Azhar et al. (2024)	Sistem hanya monitoring volume air tanpa optimasi distribusi data.	Mengembangkan sistem monitoring dengan efisiensi transmisi data berbasis edge computing.
6	Kusumah et al. (2023b)	Monitoring suhu data center tanpa pendekatan edge computing.	Menggunakan edge processing untuk meminimalkan delay dan meningkatkan akurasi pembacaan SPL.
7	Murdiyantoro et al. (2021)	Sistem hidroponik tanpa analisis kualitas layanan (QoS).	Mengintegrasikan pengukuran QoS pada sistem monitoring akustik.
8	Hasbullah et al. (2023)	Fokus pada rekognisi suara burung, bukan optimasi distribusi audio ruang ibadah.	Mengadaptasi pendekatan edge AI untuk analisis karakteristik suara masjid.
9	Purbakawaca & Fauzan (2022)	Monitoring kualitas udara, belum menyentuh aspek akustik ruang.	Mengembangkan monitoring kualitas suara dan kebisingan ruang masjid.
10	Subagiyo et al. (2021)	Hanya pemantauan ISPU tanpa kontrol berbasis aplikasi interaktif.	Menambahkan dashboard interaktif monitoring SPL dan kontrol sistem audio.
11	Mariza Wijayanti (2022)	Smart home tanpa analisis kestabilan sistem dalam kondisi jaringan lemah.	Mengimplementasikan sistem tetap berjalan meskipun internet terputus (edge mode).

12	Manfaluthy et al. (2024)	Deteksi kebisingan mesin industri, bukan ruang ibadah.	Fokus pada karakteristik kebisingan dan distribusi SPL di masjid.
13	Helena Manurung et al. (2022)	Monitoring kualitas air, bukan monitoring parameter akustik.	Mengembangkan sistem monitoring akustik berbasis ESP32 dengan analisis delay.
14	Rizki Aulia Nanda et al. (2022)	Monitoring HVAC tanpa pengolahan data lokal (edge).	Menggunakan edge processing untuk filtering dan kalibrasi SPL.
15	Salsabila Estu et al. (2023)	Monitoring ketinggian air tanpa sistem optimasi distribusi sinyal.	Optimasi distribusi audio berbasis data pengukuran SPL.
16	Putra et al. (2024)	Validasi sensor tanpa integrasi sistem monitoring berbasis jaringan.	Integrasi sensor SPL dengan sistem web monitoring real-time.
17	Darso et al. (2023)	Sistem klasifikasi air, bukan sistem audio dan akustik.	Pengembangan klasifikasi level kebisingan ruang ibadah.
18	Artiyasa et al. (2021)	Smart home tanpa analisis akustik ruang.	Analisis distribusi SPL dan karakter ruang masjid.
19	Bayu et al. (2021)	Fokus keamanan QR, tidak pada monitoring parameter lingkungan.	Sistem monitoring audio berbasis IoT terintegrasi.
20	Janeananto Sanjaya et al. (2021)	Monitoring suhu jemaah, bukan sistem audio.	Monitoring kualitas suara untuk kenyamanan jemaah.
21	Widyatmika, I.P.A.W., dkk. (2021)	Perbandingan mikrokontroler tanpa implementasi sistem akustik.	Implementasi ESP32 untuk monitoring SPL berbasis edge.
22	Sumardi Sadi et al. (2023)	Smart home umum tanpa optimasi distribusi audio ruang besar.	Sistem monitoring untuk ruang ibadah skala besar.

23	Nizam et al. (2022b)	Monitoring pintu tanpa pengolahan data real-time kompleks.	Pengolahan data SPL dan analisis respons waktu nyata.
24	Sa'adah et al. (2023)	Pengukuran manual menggunakan Sound Level Meter tanpa IoT.	Sistem monitoring SPL otomatis berbasis IoT dan dashboard web.
25	Setia et al. (2026)	Monitoring multi-sensor umum tanpa fokus akustik.	Integrasi sensor kebisingan dan edge processing untuk masjid.
26	Herianto, H., & K. (2021)	Sistem penghitung pengunjung tanpa analisis performa sistem.	Monitoring akustik dengan evaluasi latency dan stabilitas jaringan.
27	Pratikto et al. (2022)	Monitoring IoT generik tanpa spesifik ruang ibadah.	Sistem monitoring dan optimasi distribusi audio masjid berbasis edge computing.

Berdasarkan Tabel 2 *Gap* Penelitian yang telah disusun, dapat disimpulkan bahwa sebagian besar studi masih berfokus pada aspek yang bersifat sebagian dan terpisah. Penelitian di bidang sistem audio masjid umumnya menitikberatkan pada optimalisasi distribusi pengeras suara dan peningkatan kejelasan ujaran melalui pendekatan perancangan zonasi atau evaluasi tata letak. Di sisi lain, penelitian pengukuran kebisingan lebih banyak dilakukan dalam konteks lingkungan industri atau perkotaan dengan pendekatan *monitoring* kebisingan umum, bukan secara spesifik pada sistem audio masjid. Sementara itu, studi mengenai penerapan *mikrokontroler* untuk pengolahan sinyal suara cenderung berdiri sendiri pada aspek deteksi atau klasifikasi suara, tanpa diarahkan pada kuantifikasi tekanan suara dalam satuan *desibel* yang terkalibrasi untuk kebutuhan ruang ibadah.

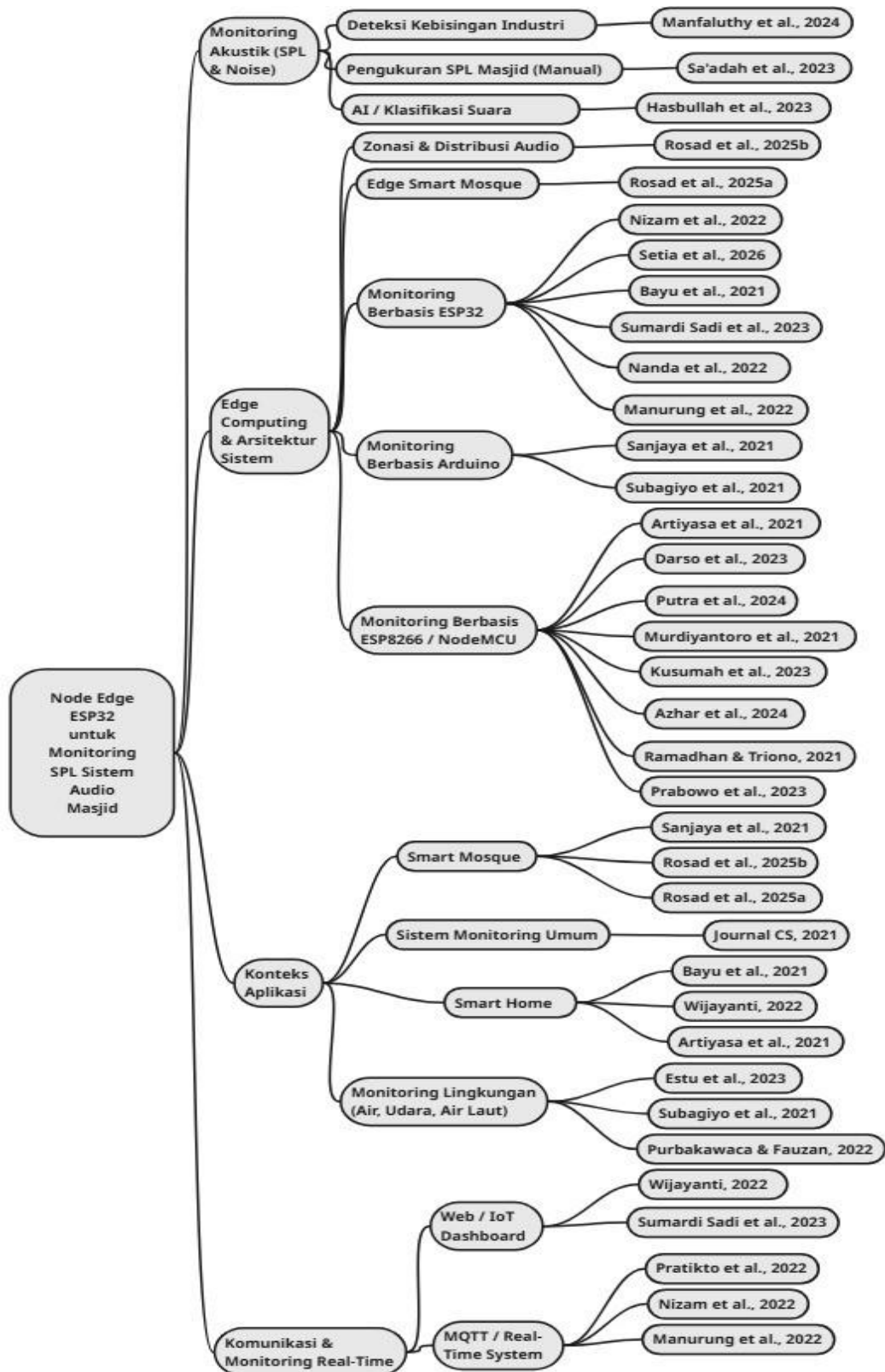
Dari sisi arsitektur sistem, penelitian mengenai IOT dan edge computing telah menunjukkan peningkatan performa komunikasi, ketersediaan layanan, serta penurunan latensi pada berbagai aplikasi. Namun, implementasinya belum secara khusus mengintegrasikan pengukuran parameter akustik fisik seperti SPL dalam satu sistem monitoring terdistribusi yang tervalidasi. Sebagian penelitian membahas performa komunikasi dan keandalan jaringan, sedangkan penelitian lain membahas akurasi pengukuran suara, tetapi keduanya belum dikaji secara terpadu dalam satu arsitektur sistem yang sama. Selain itu, metode pengukuran SPL di masjid masih dominan dilakukan secara manual dan bersifat seketika,

sehingga belum mampu merepresentasikan kondisi akustik ruang secara kontinu dan berbasis data real-time.

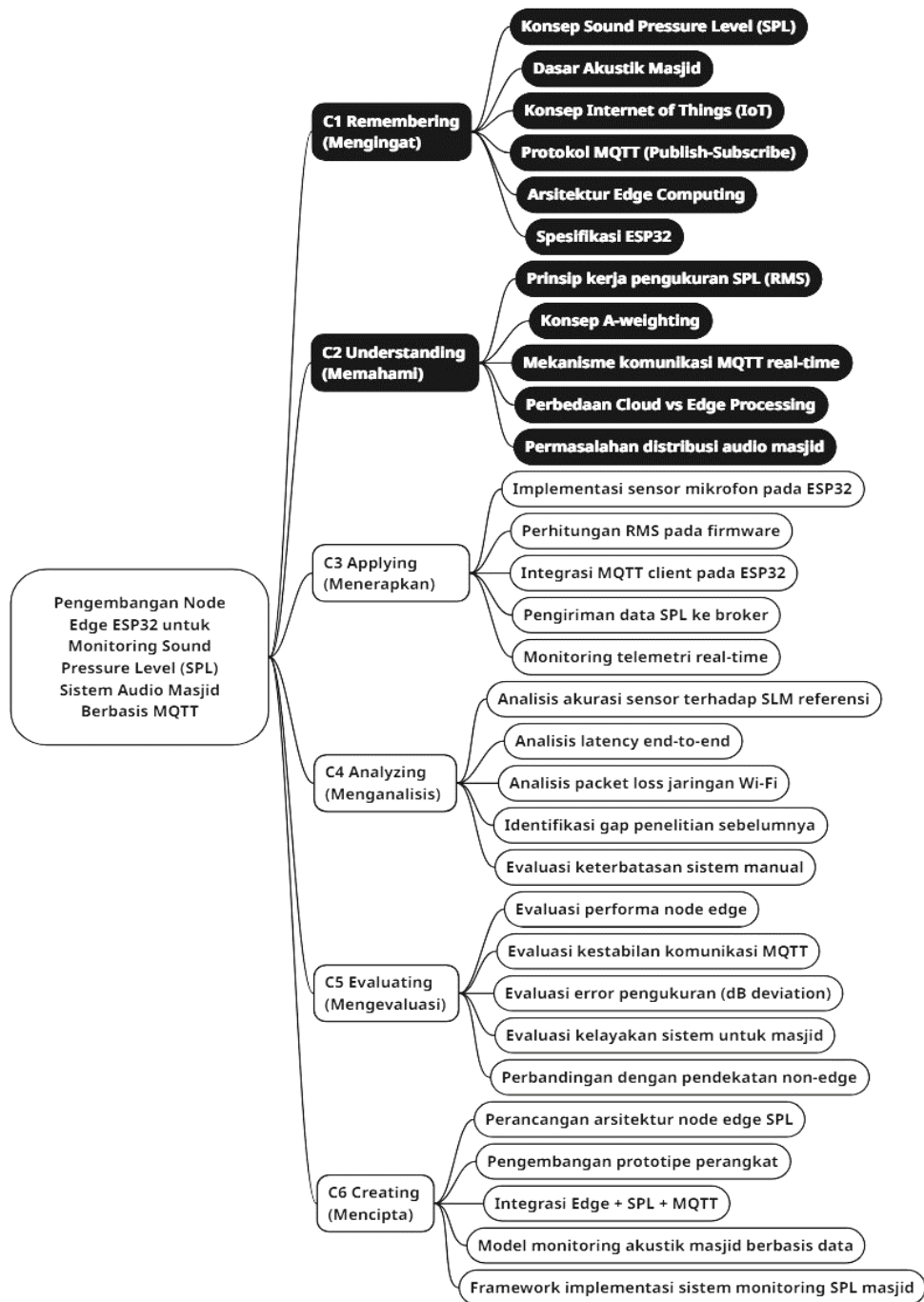
Dengan demikian, terdapat kesenjangan pada aspek integrasi sistem, yaitu belum adanya penelitian yang menggabungkan pengukuran SPL terkalibrasi berbasis *mikrokontroler*, pemrosesan sinyal langsung pada perangkat edge, serta *telemetri* data real-time dalam konteks sistem audio masjid. Evaluasi yang dilakukan pada penelitian sebelumnya juga belum secara simultan menilai akurasi pengukuran terhadap alat referensi dan kinerja komunikasi end-to-end dalam satu kerangka pengujian yang menyeluruh.

Penelitian ini menawarkan kebaruan melalui pengembangan *node edge* berbasis ESP32 yang dirancang untuk melakukan pengukuran SPL secara terdistribusi di dalam masjid, dengan pemrosesan sinyal berbasis perhitungan RMS dan pembobotan *A-weighting* langsung pada perangkat. Sistem kemudian diintegrasikan dengan mekanisme telemetri real-time menggunakan protokol MQTT dan dievaluasi baik dari sisi akurasi pengukuran maupun performa komunikasi. Pendekatan ini menghasilkan suatu arsitektur monitoring akustik yang tidak hanya berfungsi sebagai alat ukur, tetapi sebagai sistem pemantauan terintegrasi yang adaptif, terukur, dan relevan untuk pengembangan sistem audio masjid berbasis data di masa mendatang.

Untuk memperjelas kerangka konseptual penelitian, berikut disajikan mind map dan pemetaan berdasarkan Taksonomi Bloom. Berdasarkan pemetaan pada Gambar 1 Mind Map Penelitian tersebut, fokus utama penelitian ini terletak pada area *local edge processing* menggunakan ESP32. Melalui batasan ini, kalkulasi nilai SPL diselesaikan secara mandiri di tingkat perangkat tepi sebelum data telemetri dikirimkan, sehingga dapat meminimalkan beban komputasi pada server pusat dan mengoptimalkan efisiensi waktu respon (*latency*).



Gambar 2. 1 Mine Map Penelitian



Gambar 2. 2 Taksonomi Bloom

Melalui implementasi hierarki konsep tersebut pada Gambar 2 Taksonomi Bloom, *node edge* berbasis ESP32 dalam sistem ini difokuskan untuk beroperasi hingga tingkat analisis lokal (kalkulasi nilai RMS ke dB secara *real-time* dari mikrofon INMP441). Dengan menetapkan batasan konsep ini, perangkat tepi tidak hanya berfungsi sebagai alat perekam data mentah yang pasif, melainkan memiliki kecerdasan komputasi lokal yang terukur sebelum data diteruskan melalui protokol MQTT.

B. Sistem Audio dan Akustik Ruang Masjid

Sistem audio merupakan komponen penting dalam mendukung penyampaian suara secara jelas dan merata di dalam ruang ibadah. Dalam konteks masjid, sistem ini digunakan untuk menyampaikan adzan, khutbah, dan ceramah kepada jamaah. Distribusi Pengeras Suara (*loudspeaker*) yang tidak tepat dapat menyebabkan ketidakseimbangan tingkat tekanan suara, sehingga muncul area dengan tingkat suara terlalu rendah (*dead zone*) maupun terlalu tinggi (*overlap zone*). Penelitian mengenai distribusi audio berbasis zonasi menunjukkan bahwa pengaturan zona *loudspeaker* dapat meningkatkan pemerataan tingkat tekanan suara dan meningkatkan kejelasan ujaran pada ruang ibadah [1].

Selain itu, pengukuran tingkat kebisingan pada lingkungan masjid menunjukkan bahwa beberapa titik dapat mencapai tingkat suara di atas batas kenyamanan sehingga diperlukan sistem *monitoring* untuk mengontrol distribusi audio secara lebih optimal [2].

C. Sound Pressure Level (SPL)

SPL merupakan besaran yang menyatakan tingkat tekanan suara relatif terhadap tekanan referensi di udara dan dinyatakan dalam satuan desibel (dB). SPL digunakan secara luas dalam sistem monitoring lingkungan maupun sistem pengukuran kebisingan industri [3]. SPL dinyatakan dalam satuan desibel (dB) dan secara umum dihitung menggunakan persamaan:

$$SPL = 20 \log_{10} \left(\frac{P_{rms}}{P_{ref}} \right)$$

dengan P_{ref} sebesar 20 μ Pa sebagai tekanan referensi standar di udara.

Dalam praktik pengukuran lapangan, sering digunakan pembobotan frekuensi seperti A-weighting (dB(A)) untuk menyesuaikan respon alat dengan sensitivitas pendengaran manusia terhadap berbagai frekuensi [9].

D. Dasar Pemrosesan Sinyal Digital untuk SPL

Untuk memperoleh nilai SPL dari sinyal digital yang dihasilkan mikrofon, digunakan teknik pemrosesan sinyal digital (DSP). Sinyal analog dikonversi menjadi sinyal digital melalui proses sampling dengan frekuensi tertentu sesuai teorema Nyquist. Nilai tekanan efektif kemudian dihitung menggunakan metode RMS.

Pendekatan pemrosesan sinyal pada perangkat IoT telah banyak digunakan dalam sistem monitoring berbasis sensor untuk memperoleh data secara real-time dan akurat [11].

Pada sistem berbasis mikrokontroler, optimasi algoritma menjadi penting karena keterbatasan memori dan kapasitas komputasi perangkat edge [7].

E. *Edge Computing* dalam Sistem IoT

Edge computing merupakan pendekatan komputasi yang menempatkan proses pengolahan data di dekat sumber data sebelum dikirim ke server pusat atau cloud. Pendekatan ini mampu mengurangi latensi komunikasi dan meningkatkan keandalan sistem IoT [4].

Pada sistem monitoring berbasis IoT, pemrosesan data di sisi edge memungkinkan analisis awal terhadap data sensor sehingga hanya data penting yang dikirim ke server [13], [14].

F. ESP32 sebagai *Node Edge*

ESP32 merupakan System on a Chip (SoC) yang banyak digunakan dalam aplikasi IOT karena memiliki prosesor yang cepat serta modul Wi-Fi terintegrasi. Perangkat ini mampu melakukan pengolahan data sensor sekaligus komunikasi jaringan dalam satu modul [13].

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa ESP32 dapat digunakan untuk sistem monitoring lingkungan secara real-time seperti monitoring suhu, tekanan, maupun parameter lingkungan lainnya [6], [15].

Selain itu, ESP32 juga banyak digunakan dalam sistem smart home dan sistem monitoring berbasis sensor karena memiliki performa yang stabil dan biaya implementasi yang relatif rendah [12], [16].

G. MQTT dan Komunikasi Telemetry

Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) merupakan protokol komunikasi ringan berbasis model publish–subscribe yang dirancang untuk sistem IoT. Protokol ini memungkinkan perangkat edge mengirimkan data sensor ke server dengan efisiensi bandwidth yang tinggi dan latensi rendah.

Penggunaan protokol komunikasi ringan sangat penting pada sistem monitoring berbasis sensor karena memungkinkan pengiriman data secara real-time dan stabil melalui jaringan internet [17], [18].

Sistem monitoring berbasis IoT yang menggunakan komunikasi jaringan juga telah diterapkan pada berbagai aplikasi seperti monitoring kualitas udara, monitoring air, dan sistem hidroponik berbasis sensor [8], [19], [20].

Berbagai penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa sistem monitoring berbasis IOT dapat diterapkan pada berbagai bidang seperti sistem smart home, monitoring lingkungan, monitoring jumlah pengunjung, hingga monitoring kualitas air dan udara [11], [21], [22], [23], [24], [25]. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa integrasi sensor, mikrokontroler, dan komunikasi jaringan mampu menghasilkan sistem monitoring yang akurat, real-time, serta efisien untuk berbagai kebutuhan aplikasi.