

**PENGEMBANGAN *NODE EDGE* BERBASIS ESP32 UNTUK
PENGUKURAN *SOUND PRESSURE LEVEL* DAN
TELEMETRI *REAL TIME* PADA SISTEM AUDIO MASJID**

SKRIPSI

**Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan mendapatkan gelar Strata
Satu Program Studi Informatika**



**LINTANG KESIT HANIKO
22EO10041**

**PROGRAM STUDI INFORMATIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU KOMPUTER
UNIVERSITAS NAHDLATUL ULAMA AL GHAZALI
CILACAP
2026**

**PENGEMBANGAN *NODE EDGE* BERBASIS ESP32 UNTUK
PENGUKURAN *SOUND PRESSURE LEVEL* DAN
TELEMETRI *REAL TIME* PADA SISTEM AUDIO MASJID**

SKRIPSI

**Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan mendapatkan gelar Strata
Satu Program Studi Informatika**



**LINTANG KESIT HANIKO
22EO10041**

**PROGRAM STUDI INFORMATIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU KOMPUTER
UNIVERSITAS NAHDLATUL ULAMA AL GHAZALI
CILACAP
2026**

HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Dengan ini saya menyatakan bahwa penulisan skripsi dengan judul “Pengembangan *Node Edge* Berbasis ESP32 untuk Pengukuran *Sound Pressure Level* dan *Telemetri Real Time* pada Sistem Audio Masjid” adalah hasil karya saya dengan arahan dari pembimbing dan belum diajukan kepada pihak manapun. Sumber informasi yang dikutip dalam skripsi ini telah dicantumkan dalam Daftar Pustaka.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan sebenarnya. Apabila di kemudian hari terdapat ketidaksesuaian dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan peraturan yang berlaku.

Cilacap, 23 Juli 2026



LINTANG KESIT HANIKO
22EO10041

LEMBAR PENGESAHAN

Skripsi Saudara

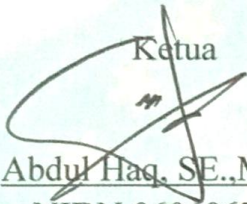
Nama : Lintang Kesit Haniko
NIM : 22EO10041
Fakultas/Prodi : Fakultas Matematika dan Ilmu Komputer (FMIKOM) /
Informatika
Judul : Pengembangan *Node Edge* Berbasis ESP32 Untuk
Pengukuran *Sound Pressure Level* dan *Telemetry Real-Time* Pada Sistem Audio Masjid.

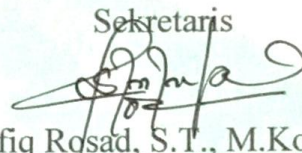
Telah disidangkan oleh Dewan Penguji Fakultas Matematika dan Ilmu Komputer
Universitas Nahdlatul Ulama Al Ghazali (UNUGHA) Cilacap pada hari / tanggal :
Jum'at, 3 Juli 2026

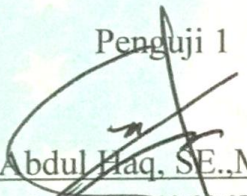
Dan dapat diterima sebagai pemenuhan tugas akhir mahasiswa Program Strata Satu
(S.1) Program Studi Informatika (S.Kom), Fakultas Matematika dan Ilmu
Komputer (FMIKOM) pada Universitas Nahdlatul Ulama Al Ghazali (UNUGHA)
Cilacap.

Cilacap, 23 Juli 2026

Dewan Sidang

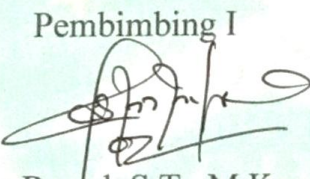
Ketua

Abdul Haq, SE., M.Cs.
NIDN 0606067701

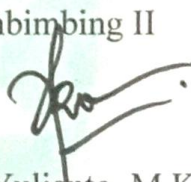
Sekretaris

Safiq Rosad, S.T., M.Kom.
NIDN 0609018101

Penguji 1

Abdul Haq, SE., M.Cs.
NIDN 0606067701

Penguji 2

Mizan Ahmad, M.Sc.
NIDN 0601099402

Pembimbing I

Safiq Rosad, S.T., M.Kom.
NIDN 0609018101

Pembimbing II

Koko Edy Yulianto, M.Kom.
NIP 230714144

Mengetahui,
Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Komputer


Mochammad Taufiqurrahman Abdul Aziz Zein, S.Si., M.Kom.
NIDN. 2125098601

HALAMAN NOTA KONSULTAN

Abdul Haq, SE.,M.Cs

Dosen Fakultas Matematika dan Ilmu Komputer
Universitas Nahdlatul Ulama Al Ghazali Cilacap

NOTA KONSULTAN

Hal : Skripsi Saudara Lintang Kesit Haniko
Lampiran : -

Kepada
Yth. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Komputer
Universitas Nahdlatul Ulama Al Ghazali Cilacap
di Cilacap

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Setelah membaca, memeriksa dan melakukan perbaikan seperlunya maka skripsi saudara:

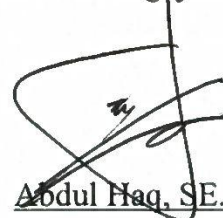
Nama : Lintang Kesit Haniko
NIM : 22EO10041
Prodi : Informatika
Judul : Pengembangan *Node Edge* Berbasis ESP32 Untuk Pengukuran
Sound Pressure Level dan *Telemetry Real-Time* Pada Sistem Audio
Masjid

Dapat diajukan ke Fakultas Matematika dan Ilmu Komputer, Universitas Nahdlatul Ulama Al Ghazali Cilacap untuk memenuhi syarat memperoleh gelar Strata Satu (S1).

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Cilacap, 23 Juli 2026

Penguji I



Abdul Haq, SE.,M.Cs.

NIDN 0606067701

NOTA PEMBIMBING

Cilacap, 25 Juni 2026

Kepada Yth :
Fakultas Matematika dan Komputer (FMIKOM)
UNUGHA Cilacap
di Cilacap

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Setelah melakukan bimbingan, telaah, arahan dan koreksi tahap penulisan skripsi saudara:

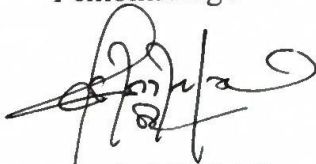
Nama : Lintang Kesit Haniko
NIM : 22EO10041
Fakultas : Matematika dan Ilmu Komputer
Prodi : Informatika
Judul : Pengembangan *Node Edge* Berbasis ESP32 Untuk Pengukuran *Sound Pressure Level* dan *Telemetry Real Time* Pada Sistem Audio Masjid

Kami berpendapat bahwa skripsi tersebut sudah dapat diajukan ke sidang skripsi. Bersamaan ini kami kirimkan skripsi tersebut, semoga dapat segera disidangkan.

Atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.
Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Mengetahui,

Pembimbing I



Safiq Rosad, S.T., M.Kom.
NIDN 0609018101

Pembimbing II



Koko Edy Yulianto, M.Kom.
NIP 230714144

HALAMAN MOTO

"Wahai orang-orang yang beriman! Mohonlah pertolongan (kepada Allah) dengan sabar dan salat. Sungguh, Allah beserta orang-orang yang sabar."

(QS. Al-Baqarah : 153)

*"Kehidupan manusia itu laksana butiran tasbih yang terus berputar dan saling terhubung. Dalam putaran kehidupan tersebut, hal terpenting bagi seorang manusia adalah kegunaannya bagi sesama, sejalan dengan prinsip **khairunnas anfa'uhum linnas** (sebaik-baik manusia adalah yang paling bermanfaat bagi orang lain)."*

KH. Achmad Yunani NH

"Jangan hanya mengeluh dan menyalahkan keadaan. Kita harus bisa beradaptasi dan mencari solusi. Karena hidup ini adalah tentang bagaimana kita menyikapi masalah, bukan bagaimana masalah menyikapi kita."

Gus Iqdam

"Biarkan yang patah menjadi tanah, yang luruh menjadi pupuk. Karena setelah malam yang paling dingin, dirimu akan kembali Trubus dan mekar menjadi sesuatu yang indah dari sekedar bertahan."

WL.Niko7

"Aku tidak tahu apakah manusia itu dimanipulasi oleh semacam benang takdir atau tidak... Tapi, bahkan jika takdir itu sudah ditentukan, aku akan menentangnya! Aku akan membuktikan bahwa burung yang terkurung dalam sangkar pun, jika mereka cukup pintar, mereka akan mencoba membuka sangkarnya dengan paruh mereka sendiri... agar bisa terbang bebas di angkasa lagi."

Naruto Uzumaki

"Hadapilah kenyataan! Di dunia ini, tidak semua keinginanmu bisa terwujud. Semakin lama kau hidup, kau akan menyadari bahwa realitas ini hanya berisi rasa sakit, penderitaan, dan kekosongan."

Madara Uchiha

HALAMAN PERSEMBAHAN

Segala puji bagi Allah SWT, Rabb semesta alam yang senantiasa melimpahkan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi ini dengan baik. Karya sederhana ini penulis persembahkan dengan ketulusan hati kepada:

1. Kedua orang tua tercinta, Bapak Handoko dan Ibu Supriatiningsih, yang tiada henti mendidik, memberikan untaian doa, dukungan materi maupun moral, serta nasihat dan semangat yang menjadi kekuatan terbesar bagi penulis.
2. Serta segenap keluarga besar yang selalu memberikan doa, kasih sayang, dan motivasi di setiap detik langkah perjuangan penulis.
3. Guru mulia, Romo K.H. Akhmad Yunani NH dan Ibu Nyai Hj. Ni'matus Sholihah, selaku pengasuh, yang telah memberikan bimbingan, ilmu yang berkah, keteladanan, serta doa yang tulus demi kelancaran dan keberhasilan studi penulis.
4. Keluarga Besar Pondok Pesantren Nuururrohman, atas kebersamaan, lingkungan yang penuh berkah, dukungan, serta persaudaraan yang senantiasa mengiringi perjalanan hidup penulis.
5. Keluarga besar Shatomedia, khususnya Bapak Syafiq Rozak dan Ibu Linda Susi Susanti selaku pemilik bisnis sekaligus pembimbing PKL, terima kasih tulus atas ruang belajar, ilmu, bimbingan, pengalaman berharga, serta arahan yang telah diberikan sejak masa PKL hingga penyusunan skripsi ini.
6. Keluarga besar FMIKOM Angkatan 2022, terima kasih atas segala keceriaan, kebersamaan, cerita suka duka, dan motivasi yang telah kita lalui bersama.
7. Keluarga besar Program Studi Teknik Informatika, Sistem Informasi, dan Matematika yang selalu menjadi kebanggaan penulis.
8. Seluruh rekan-rekan mahasiswa UNUGHA yang telah memberikan doa, dukungan, kebersamaan, dan semangat persaudaraan selama masa perkuliahan.

KATA PENGANTAR

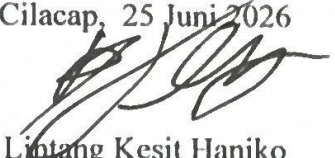
Puji syukur kepada Allah SWT atas segala limpahan nikmat dan karuniaNya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi. Sholawat dan salam senantiasa penulis haturkan kepada Nabi Muhammad SAW sebagai pembimbing seluruh umat manusia.

Skripsi ini tidak akan selesai tanpa adanya bantuan dari banyak pihak, karena itu penulis menyampaikan terima kasih kepada :

1. Bapak Muhammad Taufiqurrahman Abdul Aziz Zein, S.Si., M.Kom, Dekan FMIKOM UNUGHA
2. Bapak Safiq Rosad, S.T., M.Kom. pembimbing I yang telah dengan sabar memberikan bimbingan dan petunjuk dalam menyelesaikan skripsi ini.
3. Bapak Koko Edy Yulianto, M.Kom. pembimbing II yang telah dengan sabar memberikan bimbingan dan petunjuk dalam menyelesaikan skripsi ini.
4. Bapak Verry, S.T., M.Kom., sebagai Pembimbing Akademis
5. Teman-teman dari SHATOMEDIA
6. Bapak-Ibu dosen Program Studi Informatika FMIKOM UNUGHA
7. Semua pihak yang tidak dapat kami sebutkan satu persatu

Semoga Allah SWT membalas jerih payah dan pengorbanan yang telah diberikan dengan balasan yang lebih baik. Amiin. Penulis berharap semoga karya kecil ini bermanfaat bagi pembaca.

Cilacap, 25 Juni 2026



Lintang Kesit Haniko

ABSTRAK

LINTANG KESIT HANIKO. *Pengembangan Node Edge Berbasis ESP32 untuk Pengukuran Sound Pressure Level dan Telemetry Real-Time pada Sistem Audio Masjid*. Dibimbing oleh Safiq Rosad, S.T., M.Kom. dan Koko Edy Yulianto, M.Kom.

Sistem distribusi audio di masjid memerlukan pengukuran *Sound Pressure Level* (SPL) secara waktu nyata yang cukup akurat di setiap area untuk mendukung pengaturan tingkat suara yang nyaman bagi jamaah. Penelitian ini mengembangkan *node edge* berbasis ESP32 yang dilengkapi dengan sensor mikrofon digital untuk mengukur SPL dengan target akurasi 2 dB dan mengirimkan data telemetry ke server melalui protokol MQTT dengan latensi ujung-ke-ujung kurang dari 150 ms. Node ini dirancang sebagai simpul IoT berbiaya rendah dan hemat daya yang dapat dipasang dekat dengan zona *loudspeaker* masjid sebagai bagian dari sistem audio cerdas. Metodologi penelitian menggunakan pendekatan *Research and Development* (R&D) dengan beberapa tahapan utama, yaitu: (1) perancangan perangkat keras *node edge* yang meliputi pemilihan papan ESP32, mikrofon digital, dan catu daya; (2) perancangan algoritma pengukuran SPL berbasis perhitungan nilai akar rata-rata kuadrat (RMS) dan *Fast Fourier Transform* (FFT) dengan pembobotan *A-weighting*; (3) implementasi perangkat lunak pada ESP32 untuk akuisisi sinyal audio, perhitungan SPL, dan pengiriman data melalui MQTT; (4) pengujian akurasi hasil pengukuran SPL terhadap *sound level meter* sebagai alat referensi; dan (5) pengujian kinerja yang meliputi latensi pengiriman data, penggunaan sumber daya, serta kestabilan operasi dalam periode tertentu.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa *node edge* berbasis ESP32 mampu mengukur SPL dengan rata-rata selisih pengukuran berada dalam rentang 2 dB dibandingkan SLM referensi pada rentang level suara yang umum di masjid. Latensi ujung-ke-ujung dari proses pengukuran sampai data diterima di sisi server berada di bawah 150 ms pada jaringan Wi-Fi lokal, sehingga masih memadai untuk pemantauan hampir waktu nyata. Pengujian kestabilan menunjukkan bahwa sistem dapat beroperasi secara kontinu dalam periode uji tanpa gangguan yang berarti. *Node edge* juga berhasil terhubung dan bertukar data dengan broker MQTT secara konsisten selama pengujian.

Kontribusi utama penelitian ini adalah tersusunnya rancangan dan implementasi *node edge* akustik berbasis ESP32 yang bersifat terjangkau dan hemat daya untuk konteks masjid, beserta evaluasi awal akurasi pengukuran SPL dan kinerja telemetry real-time. Hasil penelitian dapat menjadi dasar pengembangan lebih lanjut menuju sistem audio masjid multi-zona yang adaptif dan terintegrasi dalam ekosistem masjid pintar.

Kata kunci: ESP32, *Sound Pressure Level*, *Edge Computing*, *Internet of Things*, MQTT, Masjid Pintar, Pemantauan Suara *Real-Time*.

ABSTRACT

LINTANG KESIT HANIKO. *Development of ESP32-Based Edge Nodes for Sound Pressure Level Measurement and Real-Time Telemetry in Mosque Audio Systems*. Supervised by Safiq Rosad, S.T., M.Kom. and Koko Edy Yulianto, M.Kom.

The audio distribution system in mosques requires accurate and real-time Sound Pressure Level (SPL) measurements in each area to support acoustic adjustments that ensure comfort for the congregation. This study develops an ESP32-based edge node equipped with a digital microphone sensor to measure SPL with a target accuracy of 2 dB and transmit telemetry data to a server via the MQTT protocol with an end-to-end latency of less than 150 ms. This node is designed as a low-cost, low-power IoT node that can be deployed close to mosque loudspeaker zones as part of a smart audio system. The research methodology employs a Research and Development (R&D) approach with several main stages, namely: (1) hardware design of the edge node, which includes the selection of the ESP32 board, digital microphone, and power supply; (2) design of the SPL measurement algorithm based on Root Mean Square (RMS) calculations and Fast Fourier Transform (FFT) with A-weighting filtering; (3) software implementation on the ESP32 for audio signal acquisition, SPL calculation, and data transmission via MQTT; (4) accuracy testing of the SPL measurement results against a Sound Level Meter (SLM) as a reference; and (5) performance testing that encompasses data transmission latency, resource utilization, and operational stability over a specific period.

The test results show that the ESP32-based edge node is capable of measuring SPL with an average measurement deviation within the 2 dB range compared to the reference sound level meter across typical sound levels in mosques. The end-to-end latency from the measurement process until the data is received at the server side is maintained under 150 ms over a local Wi-Fi network, which is sufficient for near-real-time monitoring. Stability tests demonstrate that the system can operate continuously during the test period without significant disruptions. The edge node also successfully connected and consistently exchanged data with the MQTT broker throughout the evaluation.

The primary contribution of this research is the design and implementation of an affordable and power-efficient acoustic edge node based on the ESP32 for mosque environments, along with an initial evaluation of SPL measurement accuracy and real-time telemetry performance. The findings of this study can serve as a foundation for further development toward adaptive multi-zone mosque audio systems integrated within a smart mosque ecosystem.

Keywords: ESP32, *Sound Pressure Level, Edge Computing, Internet of Things, MQTT, Smart Mosque, Real-Time Sound Monitoring.*

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	iii
LEMBAR PENGESAHAN	iv
HALAMAN NOTA KONSULTAN.....	v
NOTA PEMBIMBING	vi
HALAMAN MOTO	vii
HALAMAN PERSEMBAHAN	viii
KATA PENGANTAR	ix
ABSTRAK.....	x
ABSTRACT.....	xi
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
A. Latar Belakang	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
B. Rumusan Masalah.....	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
C. Batasan Masalah	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
D. Tujuan Penelitian	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
E. Manfaat Penelitian	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
1. Manfaat akademik	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
2. Manfaat praktis.....	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
F. Kontribusi Penelitian	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
G. Keaslian Penelitian.....	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
H. Keterbaruan Penelitian.....	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
A. Penelitian Terkait	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
B. Sistem Audio dan Akustik Ruang Masjid...	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
C. Sound Pressure Level (SPL) ..	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
D. Dasar Pemrosesan Sinyal Digital untuk SPL.....	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.

E. *Edge Computing* dalam Sistem IoT **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

F. ESP32 sebagai *Node Edge* **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

G. MQTT dan Komunikasi Telemetry **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

BAB III METODOLOGI..... **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

A. Jenis Penelitian..... **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

B. Waktu dan Tempat Penelitian **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

C. Subjek dan Objek Penelitian.. **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

1. Subjek Penelitian..... **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

2. Objek Penelitian **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

D. Alat dan Bahan..... **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

E. Prosedur Penelitian **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

1. Studi Literatur dan Perumusan Kebutuhan **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

2. Perancangan *Node Edge* **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

3. Implementasi Perangkat Lunak dan Komunikasi. **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

4. Pengujian Akurasi SPL **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

5. Pengujian Kinerja Telemetry dan Stabilitas **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

6. Analisis dan Dokumentasi..... **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

F. Jadwal Penelitian **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN..... **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

A. Hasil Implementasi Hardware *Node Edge*.. **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

1. Desain dan Assembli Perangkat Keras..... **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

2. Spesifikasi Hardware Akhir .. **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

3. Verifikasi Koneksi I2S Mikrofon..... **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

B. Hasil Implementasi Firmware dan Algoritma SPL..... **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

1. Struktur Firmware dan Modul Software **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

2. Validasi Algoritma RMS dan SPL **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
3. Kalibrasi Faktor SPL **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
- C. Hasil Pengujian Akurasi SPL. **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
 1. Prosedur dan Persiapan Pengujian..... **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
 2. Data Pengujian Akurasi SPL. **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
 3. Analisis Statistik Akurasi SPL **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
- D. Hasil Pengujian Kinerja Telemetry..... **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
 1. Pengujian Latensi End-to-End (E2E) **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
 2. Pengujian Keandalan Pengiriman Pesan MQTT.. **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
- E. Hasil Pengujian Stabilitas Operasi (24 Jam)..... **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
 1. Setup dan Prosedur Pengujian Stabilitas **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
 2. Hasil Pengamatan Stabilitas 24 Jam..... **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
 3. Grafik Pemantauan Stabilitas (Time Series) **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
- F. Validasi Terhadap Acceptance Criteria **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
 1. Scorecard Keberhasilan Penelitian **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
 2. Margin Keamanan terhadap Kriteria **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
- G. Pembahasan Hasil **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
 1. Analisis Akurasi Pengukuran SPL **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
 2. Analisis Kinerja Telemetry dan Latensi **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
 3. Analisis Keandalan dan Stabilitas **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
 4. Kontribusi terhadap Smart Mosque Architecture. **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

H. Batasan Penelitian dan Asumsi..... **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

1. Batasan Penelitian **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

2. Asumsi Penelitian..... **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

BAB V KESIMPULAN..... **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

A. Kesimpulan **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

B. Saran **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

DAFTAR PUSTAKA **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

LAMPIRAN..... **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

Prosedur Pengujian Validasi **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

A. Persiapan Lingkungan Pengujian **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

Langkah 1: Setup Ruang Uji **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

Langkah 2: Instalasi Perangkat Keras **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

Langkah 3: Kalibrasi Awal **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

B. Pengujian Akurasi Sound Pressure Level (Spl) **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

Langkah 4: Eksekusi Skenario Pengujian **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

C. Pengujian Latency Telemetry End-To-End .. **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

Langkah 6: Modifikasi Firmware untuk Timestamping..... **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

Langkah 7: Eksekusi Pengukuran Latency **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

Langkah 8: Analisis Statistik Latency..... **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

D. Pengujian Keandalan Komunikasi Mqtt **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

Langkah 9: Setup Monitoring Paket..... **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

Langkah 10: Stress Test 60 Menit**Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

Langkah 11: Analisis Keandalan. **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

E. Pengujian Stabilitas Operasi 24 Jam..... **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

Langkah 12: Setup Monitoring Jangka Panjang..... **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

Langkah 13: Eksekusi Pengujian 24 Jam **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

Langkah 14: Analisis Stabilitas... **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

Lampiran Dokumentasi..... **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

1. kalibrasi node menggunakan SLM..... **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

2. Bentuk fisik node..... **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

3. pengujian modul mic INMP441 **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

4. Dokumentasi Sistem Dan Transmisi Data Real-Time..... **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

DAFTAR GAMBAR

- Gambar 2. 1 Mine Map Penelitian **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
- Gambar 2. 2 Taksonomi Bloom **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
- Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian .. **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
- Gambar 3. 2 Diagram Blok Node Edge ESP32 untuk Pemantauan SPL **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
- Gambar 3. 3 Skematik Rangkaian Lengkap **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
- Gambar 3. 4 Bentuk Fisik yang Direncanakan untuk Pemantauan SPL. **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
- Gambar 3. 5 Flowchart Perhitungan Algoritma Pengukuran SPL **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
- Gambar 3. 6 Flowchart Firmware Development **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
- Gambar 3. 7 Diagram Arsitektur MQTT Publish-Subscribe **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
- Gambar 3. 8 Ilustrasi Arsitektur Publish-Subscribe MQTT untuk Node ESP32 **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
- Gambar 3. 9 Ilustrasi Penataan Ruang Pengujian Akurasi SPL **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
- Gambar 3. 10 Flowchart Prosedur Pengujian Akurasi **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
- Gambar 3. 11 Grafik Perbandingan Akurasi SLM dengan ESP32 **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
- Gambar 3. 12 Histogram Distribusi Error Pengukuran **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
- Gambar 3. 13 Timeline Analisis Latensi E2E **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
- Gambar 3. 14 Grafik Monitoring CPU Usage dan Loss Rate Node ESP32 **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
- Gambar 3. 15 Flowchart Analisis Data dan Validasi **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
- Gambar 4. 1 Perbandingan Sebaran SPL **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
- Gambar 4. 2 SPL ERROR Histogram.. **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
- Gambar 4. 3 Keandalan Komunikasi MQTT **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
- Gambar 4. 4 Pemantauan Perubahan Kapasitas Memori Bebas **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
- Gambar 4. 5 Pemantauan Suhu ESP32 Selama 24 Jam **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
- Gambar 4. 6 Pemantauan Kekuatan Sinyal Wi Fi Selama 24 Jam **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

Gambar 4. 7 Konsistensi Pengukuran SPL Selama 24 Jam **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

Gambar 4. 8 Kartu Penilaian Kelayakan..... **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Rangkuman Penelitian Terdahulu	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 2. 2	Rangkuman Gap dan Novelty Penelitian .	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 3. 1	Alat dan Bahan Penelitian...	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 3. 2	Ringkasan Kebutuhan Fungsional Node Edge...	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 3. 3	Pin GPIO Microfon Digital I2S (INMP441)	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 3. 4	Parameter Utama Algoritma SPL	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 3. 5	Lembar Pencatatan Data Akurasi SPL.....	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 3. 6	Hasil Pengukuran latensi....	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 3. 7	Ringkasan Statistik Latensi	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 3. 8	Jadwal Pelaksanaan Penelitian.....	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 4. 1	Tahapan Implementasi dan Verifikasi Hardware.....	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 4. 2	Spesifikasi Teknis Hardware Node Edge Final .	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 4. 3	Hasil Verifikasi Sinyal I2S .	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 4. 4	Statistik Implementasi Firmware	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 4. 5	Validasi Algoritma RMS pada Berbagai Frekuensi.....	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 4. 6	Hasil Kalibrasi Faktor SPL	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 4. 7	Kondisi Lingkungan Pengujian Akurasi SPL	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 4. 8	Hasil Pengujian Akurasi SPL - Lengkap .	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 4. 9	Statistik Akurasi Pengukuran SPL	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 4. 10	Hasil Pengukuran Latensi End to End ...	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 4. 11	Ringkasan Hasil Pengukuran Latensi E2E.....	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 4. 12	Hasil Pengujian Keandalan Pengiriman MQTT	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 4.13	Monitoring Stabilitas Operasi 24 Jam.....	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 4. 14	Validasi Hasil vs Acceptance Criteria ...	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.

Tabel 4. 15 Safety Margin Analysis.....	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 4. 16 Latensi Breakdown Analysis	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 1 lokasi pengujian.....	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 2 kondisi lingkungan.....	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 3 kebisingan latar	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 4 Spesifikasi Node Edge	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 5 Spesifikasi Sound Level Meter (SLM)	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 6 Sumber Suara	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 7 Setup Jaringan dan Broker MQTT	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 8 Kalibrasi ESP32 Node	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 9 Verifikasi Koneksi MQTT	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 10 Hasil Skenario S1 Kalibrasi & Verifikasi ..	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 11 Skenario S2 1 kHz 70 dB	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 12 Skenario S3 1 kHz 85 dB	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 13 Modifikasi Firmware untuk Timestamping	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 14 Pengukuran Latency sampel 100 data.....	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 15 Analisis Statistik Latency.....	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 16 Konfigurasi Subscriber MQTT	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 17 Konfigurasi Stress Test 60 Menit.....	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 18 Perhitungan Packet Loss	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 19 Perhitungan Packet Loss	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 20 Distribusi Packet Loss per 10 Menit	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 21 Konfigurasi Logging Monitoring 24 Jam ..	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 22 Monitoring Memory & Temperature (Sampling Setiap 10 Menit)	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 23 Ringkasan Drift Memory, Suhu, dan RSSI	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 24 Log Disconnect Events	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 25 Konfigurasi Logging di Broker & Server ..	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 26 Konfigurasi Script Monitoring Event	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 27 Ringkasan Interval Publish MQTT per Jam.....	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
Tabel 28 Rekap Uptime	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.

Tabel 29 Ringkasan Memory Drift **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
Tabel 30 Ringkasan Suhu..... **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
Tabel 31 Ringkasan Konektivitas **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**