

**PENGEMBANGAN *DIGITAL TWIN* AKUSTIK BERBASIS
SIMULASI *RAY TRACING* UNTUK ANALISIS DISTRIBUSI
SOUND PRESSURE LEVEL PADA MASJID**

SKRIPSI

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



**USWATUN HASANAH
22EO10003**

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

**PENGEMBANGAN *DIGITAL TWIN* AKUSTIK BERBASIS
SIMULASI *RAY TRACING* UNTUK ANALISIS DISTRIBUSI
SOUND PRESSURE LEVEL PADA MASJID**

SKRIPSI

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



**USWATUN HASANAH
22EO10003**

**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 *Digital Twin* Akustik Berbasis Simulasi *Ray Tracing* untuk Analisis Distribusi *Sound Pressure Level* pada 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, 16 Juli 2026



Uswatun Hasanah
22EO10003

LEMBAR PENGESAHAN

Skripsi Saudara

Nama : Uswatun Hasanah
NIM : 22EO10003
Fakultas/Prodi : Fakultas MIKOM / Informatika
Judul : Pengembangan *Digital twin* Akustik Berbasis Simulasi
Ray tracing untuk Analisis Distribusi *Sound Pressure Level* pada Masjid

Telah disidangkan oleh Dewan Penguji Fakultas Matematika dan Ilmu Komputer Universitas Nahdlatul Ulama Al Ghazali (UNUGHA) Cilacap pada hari / tanggal :

Rabu, 01 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.

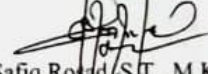
Cilacap, 15 Juli 2026

Dewan Sidang

Ketua


M. T. A. Aziz Zein, S.Si., M.Kom.
NIDN. 2125098601

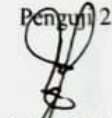
Sekretaris


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

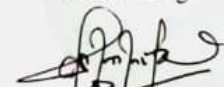
Penguji I


M. T. A. Aziz Zein, S.Si., M.Kom.
NIDN. 2125098601

Penguji 2


Lasimih, M.Kom.
NIDN. 0605048602

Pembimbing I


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

Pembimbing II


Koko Edy Yulianto, M.Kom.
NIP. 230714144

Mengetahui,
Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Komputer


M. T. A. Aziz Zein, S.Si., M.Kom.
NIDN. 2125098601

HALAMAN NOTA KONSULTAN

M. T. A. Aziz Zein, S.Si., M.Kom.

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

NOTA KONSULTAN

Hal : Skripsi Saudara/i Uswatun Hasanah
Lampiran : -

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

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

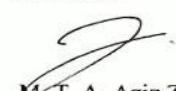
Setelah membaca, memeriksa dan melakukan perbaikan seperlunya maka skripsi saudara/i:

Nama : Uswatun Hasanah
NIM : 22EO10003
Prodi : Informatika
Judul : Pengembangan *Digital Twin* Akustik Berbasis Simulasi *Ray Tracing* untuk Analisis Distribusi *Sound Pressure Level* pada 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, 15 Juli 2026
Konsultan


M. T. A. Aziz Zein, S.Si., M.Kom.
NIDN. 2125098601

HALAMAN 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 : Uswatun Hasanah
NIM : 22EO10003
Fakultas : Matematika dan Ilmu Komputer
Prodi : Informatika
Judul : Pengembangan *Digital twin* Akustik Berbasis Simulasi *Ray tracing* untuk Analisis Distribusi *Sound Pressure Level* pada 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

Pembimbing II



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



Koko Edy Yulianto, M.Kom.
NIP. 230714144

HALAMAN MOTO

“Lelah boleh singgah, tapi menyerah bukan pilihan bagi jiwa yang telah berjuang sejauh ini.”

(Awit Silan Lestari)

“Mulailah dari mana kau berada. Gunakan apa yang kau punya. Lakukan apa yang kau bisa”

(Arthur ashe)

“Tidak ada jabatan di dunia ini yang perlu dipertahankan mati-matian”

(Gus Dur)

HALAMAN PERSEMBAHAN

Segala puji bagi Allah SWT, Rabb semesta alam yang senantiasa memberikan karunia sehingga penulis mampu menyelesaikan penulisan skripsi ini. Karya ini saya persembahkan kepada :

1. Orang tua Bapak Sutarto dan Ibu Admini yang selalu mendidik saya, memberikan do'a, dukungan, nasihat dan semangat yang tiada henti.
2. Kakak tercinta Apriyani Nurohmah yang selalu memberikan do'a dan semangat tiada henti di setiap detik langkahku.
3. Diri saya sendiri, yang telah berusaha, bertahan, dan tidak menyerah dalam menghadapi setiap proses serta tantangan selama penyusunan skripsi ini. Terima kasih telah terus melangkah dan berjuang hingga dapat menyelesaikan skripsi ini dengan sebaik-baiknya.
4. Sahabat saya, Awit Silan Lestari dan Hellen Tiffani yang selalu memberikan dukungan, menemani setiap proses penyusunan skripsi ini. Terima kasih atas doa, dan semangatnya.
5. Teman-teman PKL seperjuangan yang selama ini selalu bersama dalam menjalani proses penyusunan skripsi. Terima kasih atas kebersamaan, dukungan, semangat, serta perjuangan yang telah dilalui bersama hingga tahap ini.
6. Keluarga FMIKOM Angkatan 2022 yang selalu memberikan keceriaan, kebersamaan dan motivasi.
7. Keluarga Besar Program Studi Informatika, yang telah menjadi tempat penulis belajar, berkembang, dan memperoleh banyak pengalaman berharga.
8. Seluruh teman UNUGHA yang telah memberikan do'a, dukungan, dan semangat.

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 Mochamad Taufiqurohman 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. Ibu Riski Aspriyani, M.Pd., sebagai Pembimbing Akademis
5. Pihak instansi 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

Uswatun Hasanah

ABSTRAK

USWATUN HASANAH. Pengembangan *Digital Twin* Akustik Berbasis Simulasi *Ray Tracing* untuk Analisis Distribusi *Sound Pressure Level* pada Masjid. Dibimbing oleh Safiq Rosad, S.T., M.Kom. dan Koko Edy Yulianto, M.Kom.

Masjid sebagai ruang ibadah publik memiliki karakteristik akustik yang kompleks akibat volume ruangan yang besar, penggunaan material reflektif, serta geometri bangunan yang khas. Kondisi tersebut sering menimbulkan distribusi *Sound Pressure Level* (SPL) yang tidak merata. Permasalahan ini menunjukkan perlunya pendekatan berbasis simulasi yang mampu merepresentasikan kondisi akustik ruang secara komprehensif sebagai media analisis terhadap sistem tata suara yang digunakan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model *digital twin* berbasis simulasi akustik sebagai alat bantu analisis distribusi SPL pada sistem audio masjid multi-zona. Studi kasus dilakukan di ruang utama Masjid Al-Muhajirin Sedayu, Bantul, melalui tahapan karakterisasi geometri dan material ruang, pemodelan *Shoobox* serta penyusunan basis data parameter akustik. Simulasi dilakukan menggunakan pendekatan geometris *ray tracing* untuk memprediksi distribusi SPL pada berbagai titik penerima, kemudian hasil simulasi divalidasi dengan pengukuran lapangan untuk mengetahui tingkat kesesuaian model dengan kondisi nyata.

Hasil yang diharapkan dari penelitian ini berupa model *digital twin* terverifikasi yang mampu merepresentasikan kondisi akustik ruang serta memberikan gambaran distribusi SPL pada ruang utama masjid. Model tersebut diharapkan dapat menjadi media analisis dan evaluasi sistem audio yang digunakan serta menjadi dasar bagi pengembangan penelitian selanjutnya terkait optimasi tata letak speaker. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi awal dalam pengembangan sistem audio masjid berbasis pendekatan digital dan mendukung implementasi konsep smart mosque yang terintegrasi.

Kata kunci: *Digital twin*, *Simulasi Akustik*, *Ray tracing*, *SPL*, *Sistem Audio Masjid Multi-Zona*.

ABSTRACT

USWATUN HASANAH. Development of an Acoustic Digital Twin Based on Ray Tracing Simulation for Sound Pressure Level Distribution Analysis in Mosques. Supervised by Safiq Rosad, S.T., M.Kom. and Koko Edy Yulianto, M.Kom.

As public places of worship, mosques possess complex acoustic characteristics due to their large room volumes, the use of reflective materials, and distinctive architectural geometries. These conditions often result in an uneven distribution of Sound Pressure Level (SPL). This issue highlights the need for a simulation-based approach capable of comprehensively representing the room's acoustic conditions to serve as a basis for analyzing the installed sound system.

This research aims to develop an acoustic simulation-based digital twin model to assist in analyzing SPL distribution within multi-zone mosque audio systems. A case study was conducted in the main prayer hall of Al-Muhajirin Mosque in Sedayu, Bantul, involving stages such as characterizing the room's geometry and materials, creating a "shoebox" model, and compiling a database of acoustic parameters. Simulations were performed using a geometric ray tracing approach to predict SPL distribution at various receiver points; the results were then validated against field measurements to assess the model's accuracy relative to actual conditions.

The expected outcome of this research is a verified digital twin model capable of representing the room's acoustic conditions and visualizing SPL distribution within the main prayer hall. The model is intended to serve as a tool for analyzing and evaluating the audio system and to provide a foundation for future research on optimizing speaker placement. This study is expected to make an initial contribution to the development of digital-based mosque audio systems and support the implementation of integrated "smart mosque" concepts.

Keywords: Digital twin, Acoustic Simulation, Ray tracing, SPL, Multi-Zone Mosque Audio System.

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	Error! Bookmark not defined.
LEMBAR PENGESAHAN	Error! Bookmark not defined.
HALAMAN NOTA KONSULTAN.....	iv
HALAMAN NOTA PEMBIMBING.....	Error! Bookmark not defined.
HALAMAN MOTO	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN	viii
KATA PENGANTAR	ix
ABSTRAK	x
<i>ABSTRACT</i>	xi
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah.....	2
C. Batasan Masalah	2
D. Tujuan Penelitian	3
E. Manfaat Penelitian	3
F. Keaslian Penelitian.....	4
G. Kontribusi Penelitian	4
H. Keterbaruan Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
A. Penelitian Terkait	6
B. Landasan Teori.....	16
1. Akustik Ruangan Masjid	16
2. Persamaan Gelombang Akustik dan Metode Numerik	18
3. <i>Digital Twin</i> untuk Akustik Ruangan.....	18
4. <i>Ray tracing</i> Method untuk Simulasi Akustik	19
BAB III METODOLOGI.....	21

A. Jenis Penelitian.....	21
B. Waktu dan Tempat Penelitian.....	21
C. Alat dan Bahan.....	21
D. Subjek dan Objek Penelitian.....	22
1. Subjek Penelitian.....	22
2. Objek Penelitian.....	22
E. Prosedur Penelitian.....	24
1. Studi Literatur dan Identifikasi Masalah.....	24
2. Karakterisasi Akustik dan Geometri Ruangan.....	26
3. Pembuatan Model 3D dan Konfigurasi Simulasi.....	29
4. Pelaksanaan Simulasi Akustik.....	31
5. Validasi Model <i>Digital Twin</i>	34
F. Jadwal Penelitian.....	35
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	37
A. Hasil Karakterisasi Akustik dan Geometri Masjid.....	37
1. Dimensi dan Volume Ruang Utama.....	37
2. Identifikasi Material Interior.....	37
3. Pengukuran SPL Awal pada Titik Penerima.....	38
B. Hasil Pembuatan Model <i>Digital Twin</i>	40
1. Model Geometri 3D.....	40
2. Konfigurasi Material Akustik.....	41
3. Kalibrasi Koefisien Absorpsi Material.....	42
4. Posisi Sumber dan Penerima dalam Model.....	44
C. Hasil Simulasi Akustik Konfigurasi Baseline.....	44
1. Distribusi SPL Hasil Simulasi.....	44
2. Validasi Model <i>Digital Twin</i>	45
D. Pembahasan Hasil Penelitian.....	48
1. Kinerja Model <i>Digital Twin</i>	48
2. Analisis Distribusi SPL.....	48
3. Implikasi Penelitian.....	48
4. Ringkasan Hasil Utama.....	49
BAB V KESIMPULAN.....	50
A. Kesimpulan.....	50
B. Saran.....	50

DAFTAR PUSTAKA	52
LAMPIRAN 1 Data Noise Floor Ruangan	55
LAMPIRAN 2 Pemetaan 17 Titik penerima suara	57
LAMPIRAN 3 Geometri 3D (SketchUp)	58
LAMPIRAN 4 Hasil Simulasi Akustik.....	59
LAMPIRAN 5 Data SLM	60
LAMPIRAN 6 Karakteristik Ruangan.....	61
LAMPIRAN 7 Data Koordinat Titik Pengukuran Sound Pressure Level (SPL)..	63
LAMPIRAN 8 Data Konfigurasi Speaker pada Model <i>Digital Twin</i>	66
LAMPIRAN 9 Pengukuran di Setiap Titik.....	69
LAMPIRAN 10 Data Kondisi Lingkungan Saat Pengukuran SPL	71
LAMPIRAN 11 Data Konfigurasi Lingkungan Simulasi <i>Digital Twin</i>	73
LAMPIRAN 12 Parameter Konfigurasi Simulasi Akustik.....	75
LAMPIRAN 13 Koefisien Absorpsi Material Masjid Al-Muhajirin.....	77
LAMPIRAN 14 Data Eksekusi Simulasi <i>Digital Twin</i> Akustik.....	78
LAMPIRAN 15 Hasil Validasi Model <i>Digital Twin</i> Akustik.....	81
LAMPIRAN 16 Tabel Perbandingan SPL Simulasi vs Pengukuran	83
LAMPIRAN 17 Visualisasi Validasi	85
LAMPIRAN 18 Script Python Untuk Simulasi.....	86

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Mind Map Penelitian	14
Gambar 2. 2 Taksonomi Penelitian Akustik Masjid	15
Gambar 2. 3 Ilustrasi <i>Ray tracing</i> dalam Ruangan Masjid	20
Gambar 3. 1 Prosedur Penelitian.....	24
Gambar 3. 2 Gambaran Konseptual Distribusi Suara Ruang Utama Sholat.....	25
Gambar 3. 3 Skema geometri ruang utama masjid untuk pemodelan akustik.	27
Gambar 3. 4 Denah Titik Pengukuran SPL di Ruang Utama Masjid	27
Gambar 3. 5 Diagram Konfigurasi Simulasi.....	31
Gambar 3. 6 Ilustrasi Visualisasi Distribusi SPL Simulasi baseline.....	33
Gambar 4. 1 Visualisasi sebaran titik pengukuran.....	40
Gambar 4. 2 Model Ruang 3D <i>Shoebox</i>	41
Gambar 4. 3 Grafik Hubungan Koefisien Absorpsi Lantai terhadap Nilai MAE. 43	
Gambar 4. 4 Heatmap Hasil Simulasi	45
Gambar 4. 5 Hasil Pengukuran Simulasi dengan Data Lapangan	46
Gambar 4. 6 Boxplot Distribusi Error SPL Hasil Validasi	47

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Ringkasan Peneltian Terdahulu	6
Tabel 2. 2 Rangkuman Gap dan <i>Novelty</i> Penelitian.....	10
Tabel 2. 3 Koefisien Serapan Bunyi Material	16
Tabel 3. 1 Alat dan Bahan Penelitian.....	22
Tabel 3. 2 Checklist observasi awal sistem audio Masjid Al-Muhajirin	25
Tabel 3. 3 Data dimensi dan material utama ruang salat Masjid Al-Muhajirin....	28
Tabel 3. 4 Data awal pengukuran SPL di ruang utama.....	28
Tabel 3. 5 Parameter utama simulasi akustik.....	31
Tabel 3. 6 Hasil validasi SPL simulasi vs pengukuran	35
Tabel 3. 7 Jadwal Penelitian Skripsi	36
Tabel 4. 1 Dimensi dan volume ruang utama Masjid Al-Muhajirin.....	37
Tabel 4. 2 Jenis material interior ruang utama dan koefisien absorpsi	38
Tabel 4. 3 Hasil pengukuran SPL awal di ruang utama	39
Tabel 4. 4 Konfigurasi material akustik dalam simulasi.....	41
Tabel 4. 5 Hasil Kalibrasi Koefisien Absorpsi Material	42
Tabel 4. 6 Ringkasan hasil utama penelitian.....	49

BAB I PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Masjid sebagai tempat ibadah memiliki peran penting dalam kehidupan spiritual dan sosial masyarakat Indonesia. Selain fungsi spiritual, masjid juga berfungsi sebagai pusat pendidikan, perkumpulan, dan kegiatan sosial kemasyarakatan. Untuk mendukung fungsi-fungsi tersebut, kualitas sistem audio masjid menjadi komponen yang sangat penting agar pesan ceramah, khutbah, dan pengajian dapat didengar dengan jelas oleh seluruh jamaah[1].

Karakteristik akustik masjid memiliki keunikan tersendiri. Ruangan masjid umumnya memiliki volume besar (sering melebihi 500 m³), dengan material interior yang beragam seperti marmer, keramik, plester, dan kaca. Kombinasi ini menghasilkan kondisi akustik yang kompleks, distribusi SPL yang tidak merata, dan sering terjadi zona mati akustik (*dead zone*) di beberapa area[2].

Beberapa penelitian sebelumnya telah membahas bahwa 93,1% masjid di Indonesia masih menggunakan sistem pengeras suara (*public address / PA*) analog konvensional dari merek yang sama, namun tingkat kepuasan jamaah dan pengurus hanya mencapai 47,2%. Keluhan utama meliputi suara yang tidak jelas (65% responden), distribusi suara yang tidak merata (58% responden), adanya feedback dan distorsi (50% responden), serta kesulitan dalam pengoperasian sistem (38% responden memerlukan teknisi dari luar)[1]. Hal ini menunjukkan bahwa sistem PA konvensional yang terpusat memiliki keterbatasan signifikan dalam menghadapi tantangan akustik masjid modern.

Keterbatasan sistem PA terpusat konvensional antara lain: (1) distribusi suara yang tidak merata karena hanya menggunakan satu amplifier pusat, (2) topologi bintang (*star topology*) yang membatasi fleksibilitas penempatan speaker, (3) tidak adanya umpan balik *real-time* tentang kondisi akustik ruangan, (4) sulit untuk menyesuaikan dengan perubahan kondisi lingkungan seperti kehadiran jamaah yang berubah-ubah, dan (5) Rentan terhadap perubahan tingkat suara akibat pantulan dari permukaan ruangan, sehingga pemerataan suara di seluruh area jamaah sulit tercapai[3].

Teknologi digital telah berkembang pesat dalam berbagai bidang, namun pemanfaatannya dalam sistem audio masjid masih sangat terbatas. Konsep *digital twin* (kembar digital) adalah representasi virtual dari sistem fisik yang dapat disimulasikan untuk memprediksi perilaku dan performa tanpa perlu melakukan eksperimen fisik yang mahal dan memakan waktu[4]. Dengan memanfaatkan *digital twin* berbasis simulasi akustik, para desainer dan pengelola masjid dapat melakukan eksperimen virtual terhadap berbagai skenario penempatan speaker,

konfigurasi amplifier, dan penyesuaian akustik sebelum implementasi nyata di lapangan[5].

Simulasi akustik menggunakan metode *ray tracing* dapat digunakan untuk memperkirakan bagaimana suara tersebar di seluruh ruangan. Alat simulasi profesional seperti ODEON dan EASE Focus telah terbukti efektif untuk memprediksi perilaku akustik ruangan kompleks[6]. Namun, penggunaan alat-alat ini masih terbatas pada tahap desain (*design-time*) dan jarang diintegrasikan dengan sistem kontrol *real-time* berbasis IoT dan *Cyber-Physical System* (CPS) yang memungkinkan adaptasi dinamis.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan *digital twin* berbasis simulasi akustik yang dapat digunakan untuk merepresentasikan karakteristik akustik ruang utama masjid serta distribusi SPL pada sistem audio multi-zona. Model yang dihasilkan diharapkan dapat digunakan sebagai media analisis dan evaluasi terhadap kondisi akustik ruang berdasarkan hasil simulasi yang telah divalidasi dengan data pengukuran lapangan. Dengan pendekatan ini, diharapkan dapat mengatasi masalah-masalah akustik yang selama ini dialami oleh mayoritas masjid di Indonesia, sekaligus memberikan fondasi ilmiah untuk pengembangan teknologi masjid pintar (*smart mosque*) yang lebih lanjut.

B. Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana cara mengkarakterisasi akustik ruang masjid secara menyeluruh dan sistematis?
2. Bagaimana membangun model *digital twin* akustik yang akurat dan efisien untuk masjid?
3. Bagaimana memvalidasi model simulasi akustik terhadap pengukuran real-world di lapangan?

C. Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Penelitian hanya dilakukan pada ruang utama Masjid Al-Muhajirin Sedayu, Bantul, dengan fokus pada distribusi SPL. Ruang lain seperti teras dan serambi serta aspek persepsi subjektif jamaah tidak dianalisis.
2. Simulasi menggunakan model *Shoebox Room* yang merepresentasikan dimensi utama ruang dan karakteristik material dominan, sehingga elemen arsitektur yang sangat kompleks tidak dimodelkan secara rinci.
3. *Digital twin* dibuat menggunakan simulasi geometris *ray tracing* dengan library pyroomacoustics dan model 3D dari SketchUp. Metode numerik tingkat lanjut seperti FEM atau BEM tidak digunakan.

4. Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dan hasil pengukuran SPL pada 17 titik penerima menggunakan indikator Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE), dan koefisien korelasi *Pearson*.
5. Penelitian difokuskan pada pengembangan dan validasi model *digital twin* sebagai media analisis distribusi SPL pada sistem audio masjid, tanpa melakukan optimasi penempatan speaker maupun implementasi perubahan konfigurasi sistem audio secara fisik.
6. Hasil penelitian berupa model *digital twin* yang dapat digunakan sebagai media analisis kondisi akustik ruang dan sebagai dasar pengembangan penelitian selanjutnya terkait evaluasi maupun optimasi sistem audio masjid.

D. Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki tujuan sebagai berikut:

1. Mengembangkan metode karakterisasi akustik ruang masjid yang sistematis dan komprehensif melalui pengukuran parameter fisik dan akustik, sehingga mampu merepresentasikan kondisi akustik ruang secara akurat.
2. Merancang dan membangun model *digital twin* akustik masjid berbasis pemodelan geometri tiga dimensi (3D) dan basis data material akustik yang terintegrasi dalam perangkat lunak simulasi.
3. Melakukan validasi model simulasi akustik dengan membandingkan hasil simulasi terhadap data pengukuran lapangan, serta mengevaluasi tingkat akurasi model melalui analisis galat.

E. Manfaat Penelitian

Penelitian yang dilakukan diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Bagi akademis, penelitian ini bermanfaat untuk memperkaya kajian di bidang informatika terapan melalui penerapan konsep *digital twin*, simulasi akustik, dan zonasi speaker pada lingkungan masjid sebagai studi kasus nyata.
2. Penelitian ini memberikan manfaat berupa tersedianya data dan dokumentasi karakteristik akustik masjid (dimensi, material, distribusi SPL, dan permasalahan umum) yang dapat digunakan sebagai referensi bagi penelitian lanjutan maupun perancang sistem audio.
3. Bagi praktisi dan pengelola masjid, penelitian ini menghasilkan panduan teknis dan rekomendasi penempatan speaker yang lebih optimal sehingga dapat mengurangi zona mati serta mengatasi ketidakmerataan SPL di ruang ibadah.

4. Penelitian ini bermanfaat secara teknologis dengan menunjukkan bahwa simulasi akustik dan pemodelan *digital twin* dapat digunakan untuk menguji berbagai skenario konfigurasi audio secara virtual sehingga menghemat waktu dan biaya dibanding metode *trial-and-error* langsung di lapangan.
5. Bagi pengembangan konsep *smart mosque*, penelitian ini memberikan manfaat berupa fondasi awal integrasi *digital twin* akustik dengan sistem kontrol berbasis IoT atau CPS di masa depan, yang diproyeksikan untuk secara otomatis meningkatkan kualitas kejelasan suara (STI) secara presisi.
6. Secara sosial dan spiritual, penelitian ini diharapkan meningkatkan kenyamanan jamaah melalui distribusi tekanan suara yang lebih merata, sehingga pesan khutbah dan ceramah dapat tersampaikan dengan tingkat intensitas yang stabil di seluruh area ruangan.

F. Kontribusi Penelitian

Kontribusi utama penelitian tugas akhir ini dapat dirangkum sebagai berikut:

1. Penelitian ini berkontribusi dengan menghadirkan penerapan konkret konsep *digital twin* akustik pada lingkungan masjid, sehingga menambah contoh kasus nyata pemanfaatan simulasi numerik dalam informatika terapan.
2. Penelitian ini memberikan kontribusi berupa model kerja alur lengkap mulai dari karakterisasi akustik, pemodelan 3D, simulasi SPL, hingga validasi sederhana dengan pengukuran lapangan sebagai pola yang bisa direplikasi di masjid lain.
3. Penelitian ini menghasilkan model *digital twin* yang tervalidasi dan mampu merepresentasikan kondisi akustik ruang utama masjid sehingga dapat digunakan sebagai media analisis dan evaluasi distribusi SPL pada sistem audio.
4. Penelitian ini memperkaya *body of knowledge* mengenai sistem audio masjid melalui penerapan *digital twin* dan simulasi akustik untuk analisis distribusi SPL, serta menjadi dasar bagi penelitian lanjutan terkait optimasi sistem audio berbasis *smart mosque*.

G. Keaslian Penelitian

Keaslian penelitian ini didasarkan pada analisis kesenjangan (*research gap*) terhadap penelitian-penelitian terdahulu sebagaimana dirangkum pada Tabel 2.2. Penelitian sebelumnya umumnya masih berfokus pada evaluasi kondisi akustik eksisting atau simulasi distribusi SPL secara statis, sedangkan implementasi *digital twin* akustik lebih banyak diterapkan pada auditorium, gedung serbaguna, maupun lingkungan industri[3], [7], [8], [9]. Selain itu, optimasi sistem audio pada masjid masih banyak dilakukan melalui pendekatan *trial-and-error* di lapangan[10].

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini mengembangkan *digital twin* akustik pada ruang utama Masjid Al-Muhajirin dengan mengintegrasikan karakterisasi geometri dan material ruang, simulasi distribusi SPL berbasis *ray tracing*, serta validasi menggunakan data pengukuran lapangan. Dengan demikian, keaslian penelitian ini terletak pada penerapan model *digital twin* yang tervalidasi sebagai media analisis distribusi SPL pada ruang utama masjid, sehingga dapat menjadi dasar pengembangan dan optimasi sistem audio masjid secara lebih efektif.

H. Keterbaruan Penelitian

Keterbaruan (*novelty*) penelitian ini dapat dilihat dari beberapa aspek berikut:

1. Penerapan *digital twin* akustik pada masjid Al Muhajirin. Penelitian ini menerapkan konsep *digital twin* berbasis simulasi numerik secara khusus pada lingkungan masjid, yang masih jarang diteliti. *digital twin* digunakan untuk memodelkan perilaku suara, distribusi SPL secara virtual, sehingga prediksi performa sistem audio multi-zona dapat dilakukan sebelum implementasi fisik.
2. Validasi model *digital twin* menggunakan data pengukuran lapangan. Penelitian ini melakukan validasi hasil simulasi dengan membandingkannya terhadap hasil pengukuran SPL di lapangan sehingga diperoleh model *digital twin* yang mampu merepresentasikan kondisi akustik ruang secara memadai.
3. Landasan bagi pengembangan simulasi konfigurasi sistem audio. Model *digital twin* yang telah tervalidasi dapat dimanfaatkan sebagai dasar untuk penelitian selanjutnya dalam mengevaluasi berbagai skenario konfigurasi sistem audio maupun optimasi penempatan speaker secara virtual sebelum implementasi fisik.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

A. Penelitian Terkait

Terdapat beberapa penelitian terkait *digital twin*, Simulasi Akustik, *Ray tracing*, SPL dan Pemerataan Suara. Tabel 2.1 menunjukkan rangkuman penelitian terdahulu yang digunakan dalam penelitian.

Tabel 2. 1 Ringkasan Penelitian Terdahulu

No	Penulis (Tahun)	Judul
(1)	(2)	(3)
1	Rosad, S., et al. (2025)	Judul : <i>Zoned Audio Distribution: Systematic Review and Optimization Framework in Mosque</i> Metode : SLR dan survei 77 masjid Tools : ODEON dan EASE Focus Hasil : Kerangka optimasi zonasi audio untuk mengatasi zona mati.
2	Supriyadi et al. (2025)	Judul : Perancangan dan Implementasi Sistem Tata Suara Masjid dengan Dua Posisi Mimbar Metode : Identifikasi masalah, perancangan zonasi mikrofon-speaker, dan uji persepsi Tools : CISSCA v3.0 (Yamaha) Hasil : SPL rata-rata 82,2 dB dan kepuasan kejelasan suara 89%.
3	Anindita et al.. (2025)	Judul : Analisis Karakteristik “Akustik Ruang” Metode Sabine dan Simulasi <i>Golden Surfer</i> Metode : Pengukuran TTB Tools : SLM Dekko FT7933 dan Golden Surfer 11 Hasil : Heatmap 2D menunjukkan sebaran bunyi dan zona mati akustik.
4	Saputra (2025)	Judul : Evaluasi Akustik Ruang Salat Masjid Raya Pinrang Metode : Kuantitatif deskriptif Tools : Sound Level Meter 25 TK dan NLCT Hasil : SPL rata-rata ± 100 dB.

5	Abdullah et al. (2026)	Judul : <i>Acoustical Quality for Media Auditorium: Analysis of the Current Situation and A Proposal for Improvement</i> Metode : Kombinasi pengukuran <i>in-situ</i> dan simulasi model digital 3D parametrik untuk menilai performa akustik Tools : Revit, Grasshopper, Pachyderm, dan Fluffy Fish Hasil : Pemetaan distribusi SPL secara spasial melalui model yang terkalibrasi untuk mengidentifikasi area dengan intensitas suara rendah dan mencapai distribusi suara yang lebih merata
6	Leksono et al. (2026)	Judul : <i>The effect of geometric variable design configuration on the acoustic quality of the auditorium (systematic literature review)</i> Metode : <i>Systematic Literature Review</i> (SLR) terhadap 25 studi eksperimental dan simulasi,. Tools : Protokol PRISMA dan meta-analisis data simulasi Hasil : Mengidentifikasi teknologi <i>digital twin</i> sebagai metode masa depan untuk mendukung pengambilan keputusan desain secara <i>real-time</i> guna mencapai pemerataan suara.
7	Salom et al. (2023)	Judul : <i>An Acoustic Camera for Use on UAVs</i> Metode : Pemetaan suara berbasis algoritma <i>delay-and-sum beamforming</i>, Tools : FPGA SoC, DAS Algorithm, dan AC SQLite Database. Hasil : Menghasilkan heatmap distribusi suara yang akurat dan menyimpan data pemetaan secara digital untuk analisis numerik lebih lanjut.
8	Liang (2025)	Judul : <i>Optimization strategy for sound environment of college basketball stadium.</i> Metode : Pembangunan sistem evaluasi komprehensif menggunakan AHP dan optimasi <i>software</i>, Tools : Sketchup, ODEON, dan Analytic Hierarchy Process (AHP). Hasil : Mengintegrasikan parameter SPL ke dalam struktur hierarki untuk optimasi sistem suara di ruangan besar yang memiliki banyak permukaan reflektif,

9	Kamil, M. et al. (2025)	Judul: <i>Investigating the Impact of Environmental Noise, Humidity and Surface Treatment on Mosque Acoustic Performance.</i> Metode: Simulasi akustik dan analisis pengaruh material serta kondisi lingkungan terhadap kualitas suara dalam masjid. Tools: ODEON <i>Acoustic Simulation.</i> Hasil: Material penyerap suara pada dinding dan plafon dapat menurunkan reverberasi serta meningkatkan distribusi suara dalam ruang ibadah.
10	Cairolì & Tagliabue (2023)	Judul : <i>digital twin for Acoustics and Stage Craft Facility Management in a Multipurpose Hall</i> Metode : Integrasi BIM dan IoT dalam sistem <i>digital twin</i> Tools : Revit, Dynamo, sensor IoT Hasil : Visualisasi dan pemantauan kondisi ruang secara <i>real-time</i>
11	Garcia (2025)	Judul : <i>Parameters and Software in Room Acoustics Simulations.</i> Metode : Systematic Literature Review (37 studi). Tools : StArt. Hasil : ODEON dan CATT paling banyak digunakan; parameter utama RT, STI, C50/C80.
12	Götz, Georg (2025)	Judul : <i>Room-acoustic simulations as an alternative to measurements for audio-algorithm evaluation.</i> Metode : Menguji tiga algoritma audio menggunakan 72 data pengukuran nyata (<i>Room Impulse Responses</i>) dan membandingkannya dengan hasil dari dua paradigma simulasi: berbasis gelombang (<i>wave-based DG-FEM</i>) dan akustik geometris (<i>geometrical acoustics</i>). Tools : Treble SDK (untuk metode <i>wave-based DG-FEM</i> dan <i>ray radiosity</i>) serta Pyroomacoustics (untuk metode <i>ray tracing</i>) Hasil : Simulasi berbasis gelombang (DG-FEM) menghasilkan evaluasi yang sangat akurat dan berkorelasi tinggi dengan pengukuran nyata, sedangkan simulasi akustik geometris (<i>ray tracing</i>) menunjukkan deviasi yang lebih besar dan kurang andal dalam

		mereplikasi hasil pengukuran untuk evaluasi algoritma audio.
13	Runtulalo et al. (2018)	Judul : <i>Reverberation Time</i> dan Distribusi Bunyi dalam Ruang. Metode : Pengukuran SPL serta simulasi <i>ray tracing</i>. Tools : SLM, Audacity, Ecotect. Hasil : RT belum sesuai standar; ditemukan gema.
14	Kalisalvan, P. et al. (2025)	Judul : <i>Design and Evaluation of Noise Simulation Algorithm Using Matlab Ray tracing Engine for Noise Assessment and Prediction</i> Metode : Model perambatan <i>ray tracing</i> untuk menghitung SPL Tools : Mesin <i>ray tracing</i> MATLAB Hasil : Studi ini menunjukkan bahwa model tersebut memiliki presisi yang tinggi dengan rata-rata deviasi hanya sebesar 3,06 dB dibandingkan dengan perhitungan manual.
15	Supriyadi et al. (2022)	Judul : Optimalisasi Kualitas Akustik di Masjid Baitul Manshurin Cinunuk-Cileunyi Metode : Pengaturan ulang ketinggian dan arah speaker + uji persepsi Tools : Pengukuran SPL & evaluasi subjektif Hasil : SPL rata-rata 75 dB; kepuasan 89%; gema berkurang.
16	Khatib Sulaiman et al. n.d. (2023)	Judul : Tren Global Penelitian tentang Kembaran Digital: Analisis Bibliometrik Metode : Kajian bibliometrik (Scopus 2014–2023) Tools : VOSviewer Hasil : Peningkatan signifikan publikasi <i>DIGITAL TWIN</i>; dominan bidang teknik & komputasi.
17	Habibi (2025)	Judul : <i>Optimizing acoustic design for dual-function concert and speech halls</i> Metode : Integrasi optimasi permukaan parametrik dengan modifikasi arsitektural,. Tools : Perhitungan manual dan optimasi permukaan parametrik.

		Hasil : pentingnya pemerataan area refleksi untuk memastikan distribusi suara yang jelas pada sistem yang menggunakan penguat suara
18	Foteinou et al. (2025)	Judul : <i>Revisiting the Acoustics of St Paul's Cathedral, London</i> Metode : <i>teknik impulse response dan analisis kopling.</i> Tools : <i>Exponential sine sweep, MATLAB, dan ODEON.</i> Hasil : Memberikan perspektif baru tentang pemetaan suara spasial dan interaksi suara pada geometri bangunan ibadah yang sangat besar.
19	Yoshida et al. (2023)	Judul : <i>Binaural Auralization of Room Acoustics with a Highly Scalable Wave-Based Acoustics Simulation</i> Metode : <i>Simulasi akustik berbasis wave-based solver dan binaural auralization.</i> Tools : <i>Wave-based numerical simulation & binaural rendering.</i> Hasil : Mampu merepresentasikan medan suara secara realistis dan mengevaluasi kualitas akustik sebelum implementasi desain ruang.
20	Wittebol et al. (2024)	Judul : <i>A Hybrid Wave-Based and Geometrical Acoustics Approach for Room Acoustic Simulation</i> Tools : <i>Software simulasi akustik berbasis hybrid modelling</i> Hasil : Metode <i>hybrid</i> meningkatkan akurasi distribusi medan suara, terutama pada frekuensi rendah dibanding metode geometris murni.

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

Tabel 2. 2 Rangkuman Gap dan *Novelty* Penelitian

No	Penulis (Tahun)	Gap Penelitian	<i>Novelty</i>
(1)	(2)	(3)	(4)
1	Rosad, S., et al. (2025)	Berfokus pada kerangka kerja zonasi audio secara umum, namun belum mengembangkan sistem	Mengintegrasikan simulasi <i>ray tracing</i> dengan model virtual yang mampu merepresentasikan

		<i>digital twin</i> yang terintegrasi	kondisi aktual secara berkelanjutan.
2	Supriyadi et al. (2025)	Berfokus pada kerangka kerja zonasi audio secara umum, namun belum mengembangkan sistem <i>digital twin</i> yang terintegrasi	Mengintegrasikan <i>simulasi ray tracing</i> dengan model virtual yang mampu merepresentasikan kondisi aktual secara berkelanjutan
3	Anindita et al. (2025)	Analisis distribusi suara hanya menghasilkan visualisasi heatmap dua dimensi berdasarkan metode Sabine yang bersifat statis.	Menggunakan simulasi akustik tiga dimensi berbasis <i>ray tracing</i> untuk memodelkan distribusi SPL secara lebih realistis pada geometri ruang kompleks.
4	Saputra (2025)	Sebatas evaluasi deskriptif pada kondisi eksisting tanpa menawarkan model prediktif untuk perbaikan.	Mengembangkan model simulasi akustik yang dapat digunakan untuk memprediksi dan merepresentasikan distribusi SPL sebagai media analisis kondisi akustik ruang.
5	Abdullah et al. (2026)	Berfokus pada auditorium media di Irak untuk penggunaan musik dan pidato, dengan alur kerja simulasi parametrik umum	Mengadaptasi pendekatan simulasi parametrik untuk membangun dan memvalidasi model <i>digital twin</i> pada ruang utama masjid.
6	Leksono et al. (2026)	Tinjauan literatur teoretis dan umum untuk berbagai tipe auditorium, tanpa implementasi pada objek nyata.	Mengimplementasikan konsep <i>digital twin</i> secara praktis untuk mendukung analisis kondisi akustik ruang masjid melalui model <i>digital twin</i> yang tervalidasi.
7	Salom et al. (2023)	Penelitian difokuskan pada pemetaan suara menggunakan kamera akustik pada UAV untuk lingkungan luar ruang.	Mengadaptasi konsep pemetaan suara untuk memvisualisasikan distribusi SPL dalam ruang masjid sebagai dasar analisis distribusi SPL pada ruang utama masjid.
8	Liang (2025)	Optimasi stadion olahraga yang luas dengan fokus pada pengurangan	Menerapkan konsep <i>digital twin</i> berbasis simulasi akustik pada ruang utama masjid sebagai media analisis distribusi <i>SPL</i>

		kebisingan latar belakang yang ekstrem.	yang tervalidasi terhadap kondisi lapangan.
9	Kamil, M. et al. (2025)	Penelitian menitikberatkan pada pengaruh material dan kondisi lingkungan terhadap akustik masjid tanpa membahas optimasi sistem pengeras suara.	Mengintegrasikan analisis simulasi akustik validasi model <i>digital twin</i> terhadap pengukuran lapangan.
10	Cairolì & Tagliabue (2023)	Menerapkan <i>digital twin</i> pada gedung serbaguna (multipurpose hall), bukan masjid	Menerapkan konsep <i>digital twin</i> untuk simulasi dan validasi distribusi Sound Pressure Level (SPL) pada ruang utama masjid.
11	Garcia (2025)	Penelitian berupa tinjauan sistematis mengenai parameter dan perangkat lunak simulasi akustik tanpa implementasi pada studi kasus nyata.	Mengimplementasikan perangkat lunak simulasi akustik pada model ruang masjid untuk mengevaluasi distribusi SPL secara langsung.
12	Götz, Georg (2025)	Membandingkan akurasi algoritma audio, bukan untuk optimasi tata suara ruangan.	Menggunakan hasil simulasi divalidasi sebagai dasar rekomendasi teknis penempatan speaker.
13	Runtulalo et al. (2018)	Penelitian hanya melakukan pengukuran SPL dan simulasi sederhana untuk mengidentifikasi reverberasi tanpa pendekatan optimasi sistem audio.	Mengembangkan model simulasi yang dapat digunakan untuk mengevaluasi dan meningkatkan distribusi suara dalam ruang masjid.
14	Kalisalvan, P. et al. (2025)	Model <i>ray tracing</i> digunakan untuk simulasi kebisingan pada lingkungan industri, bukan untuk analisis kualitas akustik ruang ibadah.	Mengadaptasi metode <i>ray tracing</i> untuk memodelkan distribusi SPL pada ruang masjid sebagai bagian dari pembangunan model <i>digital twin</i> akustik.
15	Supriyadi et al. (2022)	Optimasi sistem audio dilakukan secara manual melalui pengaturan ulang posisi speaker secara <i>trial-and-error</i> di lapangan..	Menggunakan simulasi akustik digital untuk memodelkan dan memvalidasi distribusi SPL pada ruang masjid secara virtual.

16	Khatib Sulaiman et al. n.d. (2023)	Analisis bibliometrik tren global, tidak memberikan solusi teknis spesifik.	Menghasilkan produk teknis implementatif berupa model <i>digital twin</i> terverifikasi.
17	Habibi (2025)	Penelitian berfokus pada desain akustik ruang konser dengan optimasi permukaan reflektif.	Mengadaptasi prinsip distribusi refleksi suara untuk memodelkan kondisi akustik ruang masjid dalam lingkungan <i>digital twin</i> .
18	Foteinou et al. (2025)	Studi menganalisis karakteristik akustik katedral besar dengan pendekatan pengukuran impulse response tanpa fokus pada optimasi sistem audio modern.	Menggunakan analisis distribusi suara untuk memvalidasi representasi kondisi akustik ruang masjid pada model <i>digital twin</i> .
19	Yoshida et al. (2023)	Penelitian berfokus pada auralisasi binaural untuk evaluasi persepsi pendengaran dalam simulasi akustik ruang.	Penelitian ini lebih menitikberatkan pada analisis parameter kuantitatif seperti distribusi SPL untuk validasi model <i>digital twin</i> akustik.
20	Wittebol et al. (2024)	Penelitian membahas metode hybrid wave-based dan geometrical acoustics untuk simulasi akustik secara umum tanpa fokus pada implementasi ruang ibadah.	Menggunakan pendekatan simulasi <i>ray tracing</i> yang lebih sederhana dan efisien untuk analisis distribusi suara pada ruang masjid.

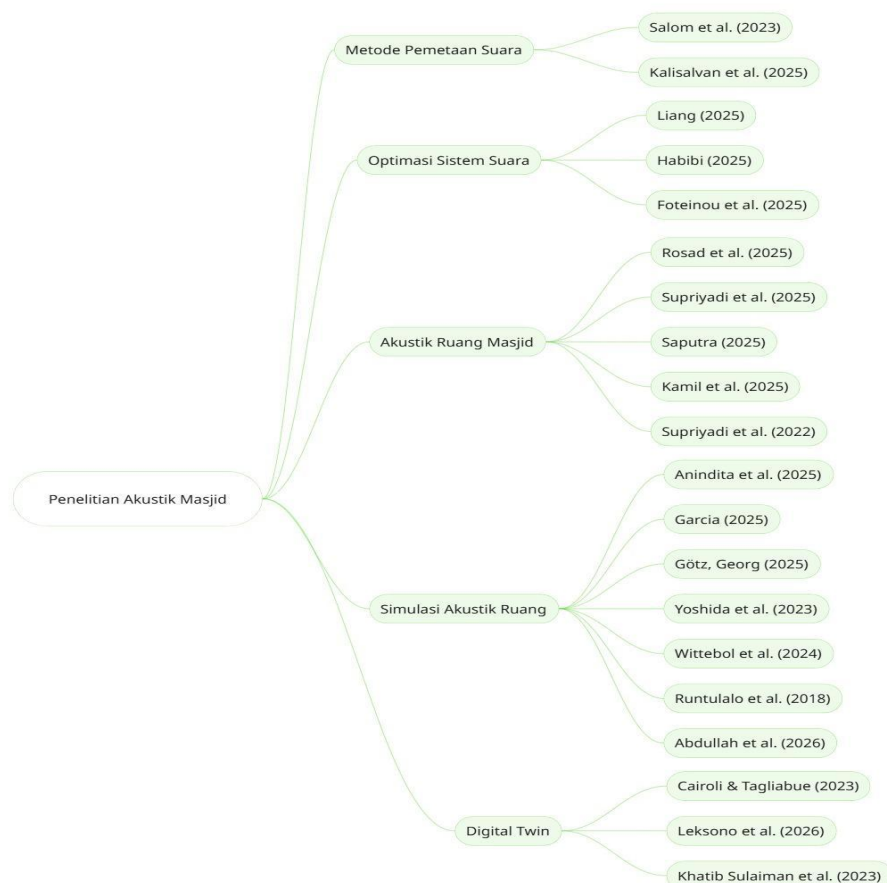
Berdasarkan Tabel 2.2 mengenai gap penelitian, dapat disimpulkan bahwa sebagian besar penelitian mengenai akustik ruang ibadah dan sistem tata suara masih berfokus pada evaluasi kondisi eksisting melalui pengukuran langsung maupun pendekatan deskriptif. Beberapa penelitian telah memanfaatkan simulasi akustik untuk menganalisis distribusi suara dalam ruangan, namun penerapannya umumnya dilakukan pada auditorium, ruang konser, atau lingkungan industri sehingga belum secara khusus mempertimbangkan karakteristik arsitektur dan kebutuhan akustik pada ruang masjid. Selain itu, implementasi konsep *digital twin* pada bidang akustik ruang ibadah masih terbatas, terutama yang mengintegrasikan model virtual dengan hasil pengukuran lapangan untuk memvalidasi representasi kondisi akustik ruang.

Penelitian ini menawarkan kebaruan melalui pengembangan model *digital twin* akustik ruang utama masjid yang memanfaatkan simulasi akustik tiga dimensi berbasis *ray tracing* untuk memodelkan distribusi SPL. Model yang dibangun mengintegrasikan geometri ruang, karakteristik material, posisi sumber suara, dan

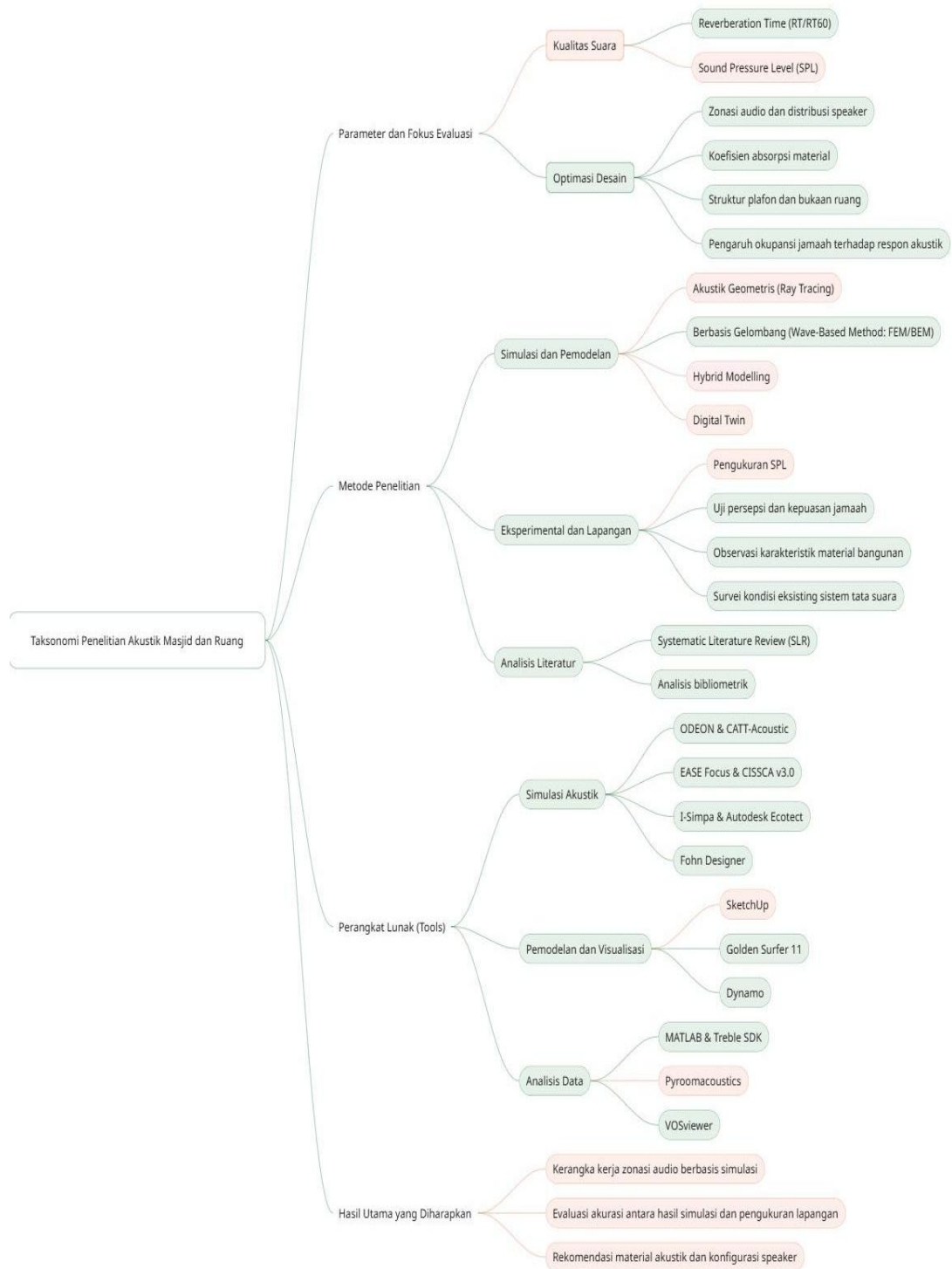
data pengukuran lapangan sehingga mampu merepresentasikan kondisi akustik ruang secara lebih realistis. Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi terhadap data pengukuran SPL pada titik penerima yang sama untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian model terhadap kondisi nyata.

Dengan demikian, penelitian ini menghasilkan model *digital twin* akustik yang tervalidasi dan dapat digunakan sebagai media analisis distribusi SPL pada ruang utama masjid. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar bagi pengembangan penelitian lanjutan terkait evaluasi maupun optimasi sistem tata suara masjid menggunakan pendekatan simulasi akustik.

Kerangka konseptual penelitian ini diperjelas melalui mind map dan pemetaan taksonomi penelitian. Mind map digunakan untuk menggambarkan hubungan antar konsep utama yang terlibat dalam penelitian secara visual, sedangkan pemetaan taksonomi digunakan untuk mengelompokkan aspek penelitian berdasarkan parameter akustik, metode simulasi, perangkat lunak yang digunakan, serta luaran yang diharapkan. Melalui kedua pendekatan tersebut, kerangka penelitian dapat disusun secara lebih sistematis.



Gambar 2. 1 Mind Map Penelitian



Gambar 2. 2 Taksonomi Penelitian Akustik Masjid

B. Landasan Teori

1. Akustik Ruangan Masjid

a. Karakteristik Umum Akustik Masjid

Masjid memiliki karakteristik akustik yang unik dibandingkan ruangan publik lainnya. Ciri-ciri utamanya adalah:

- 1) Volume Besar: Ruang salat utama masjid biasanya memiliki volume 500–2000 m³, menciptakan kondisi akustik yang kompleks dengan *multiple reflection paths*[11].
- 2) Material Permukaan Beragam: Lantai biasanya marmer atau keramik (reflektif tinggi), dinding kombinasi plester dan panel kayu, langit-langit gypsum board atau beton, menciptakan koefisien absorpsi yang bervariasi antar permukaan[12].
- 3) Geometri Kompleks: Adanya kubah, mihrab, kolom-kolom, dan arsitektur khas masjid menciptakan pola refleksi yang kompleks dan tidak mudah diprediksi dengan model sederhana[13].

b. Koefisien Absorpsi Material

Kualitas akustik di dalam sebuah masjid sangat dipengaruhi oleh karakteristik fisik material permukaannya. Setiap material memiliki kemampuan yang berbeda dalam merespons gelombang suara, yang dinyatakan melalui koefisien serapan bunyi (α). Nilai koefisien ini menentukan proporsi energi suara yang diserap oleh permukaan dibandingkan dengan energi yang dipantulkan kembali ke dalam ruangan.

Nilai koefisien serapan bunyi juga dipengaruhi oleh frekuensi suara, sehingga satu material dapat memiliki nilai serapan yang berbeda pada frekuensi tertentu. Data koefisien serapan berbagai material bangunan yang umum digunakan dalam ruangan ditunjukkan pada Tabel 2.3, yang digunakan sebagai parameter dalam simulasi akustik untuk merepresentasikan interaksi antara gelombang suara dan permukaan material.

Tabel 2. 3 Koefisien Serapan Bunyi Material

Material	Koefisien Serapan Bunyi				
	125	250	500	1000	2000
Dinding					
Kaca, berat,(lebar)	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02
Batu bata, tak diglasir, dicat	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Marmer atau keping berglasir	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
kayu	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06
Lantai					

Marmer atau keping berglasir	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
Karpet berat di atas beton	0.02	0.06	0.14	0.37	0.60
Langit-langit					
Beton	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Papan gypsum, tebal ½ , di gantung	0.15	0.10	0.05	0.04	0.07

Sumber: Satwiko (2019) dalam Saputra (2025). [7]

c. Konsep Propogasi Suara dalam Ruangan

Suara dari sumber (speaker) mencapai pendengar melalui jalur propagasi yang berbeda:

- 1) *Direct Sound*: Suara langsung dari speaker ke pendengar tanpa refleksi, dengan atenuasi mengikuti hukum *inverse-square law*[14]:

$$L_{direct} = L_0 - 20\log_{10} (r/r_0)$$

- 2) *Early Reflections*: Pantulan pertama dari dinding, langit-langit, dan objek besar dalam beberapa puluh milidetik pertama. Refleksi ini berkontribusi pada kejelasan (*clarity*) dan persepsi arah suara[9].
- 3) *Diffraction*: Kelok suara di sekitar obstacle seperti kolom atau dinding, penting pada frekuensi rendah (panjang gelombang panjang)[15].

d. *Sound Pressure Level* (SPL) dan Uniformitas

SPL adalah ukuran intensitas suara dalam desibel (dB):

$$L_{SPL} = 20\log_{10} \left(\frac{p}{p_{ref}} \right)$$

dengan p adalah tekanan akustik terukur dan $p_{ref} = 20 \mu\text{Pa}$ (ambang dengar manusia pada 1 kHz)[16]. Untuk sistem audio masjid, target SPL di area salat utama adalah 75–85 dB pada frekuensi 1 kHz, dengan variasi maksimal ± 3 dB antar zona untuk memastikan uniformitas (pemerataan distribusi)[1], [17].

2. Persamaan Gelombang Akustik dan Metode Numerik

a. Persamaan Gelombang Akustik

Propagasi suara dalam fluida (udara) dideskripsikan oleh persamaan gelombang akustik:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 p$$

dengan p adalah tekanan akustik, c adalah kecepatan suara (343 m/s pada 20°C), dan ∇^2 adalah operator *Laplacian*[18]. Persamaan ini adalah hasil dari konservasi *massa* (kontinuitas) dan hukum *Newton* (momentum), dan mendeskripsikan propagasi gelombang akustik dalam 3D space[19].

b. Metode Numerik untuk Solusi Persamaan Gelombang

Karena kompleksitas geometri ruangan nyata, persamaan gelombang akustik jarang diselesaikan secara analitik. Berbagai metode numerik dikembangkan:

Perbandingan Metode Numerik untuk Simulasi Akustik Ruangan

Metode	Kelebihan	Keterbatasan	Cocok untuk
Ray tracing	Cepat, intuitif	Hanya <i>high freq</i>	Desain awal sistem[20]
Beam Acoustics	Moderate akurasi	<i>Compute moderate</i>	<i>Medium freq</i> (250–4k Hz)[21]
FEM/BEM	Akurat penuh	Sangat lambat	Analisis detail, <i>low freq</i> [22]
Room Impulse Response	<i>Real measurement</i>	<i>Single config</i>	Validasi, referensi[23]

Untuk penelitian ini, *ray tracing method* dipilih karena:

- 1) Kecepatan komputasi yang memungkinkan simulasi banyak skenario
- 2) Akurasi yang cukup untuk prediksi SPL di range frekuensi menengah–tinggi (250 Hz – 20 kHz)
- 3) Hasil yang dapat divalidasi terhadap pengukuran real-world
- 4) Kemudahan implementasi dan visualisasi

3. Digital Twin untuk Akustik Ruangan

a. Definisi Digital Twin

Digital twin adalah representasi virtual yang akurat dari sistem fisik yang dapat disimulasikan untuk memprediksi perilaku, mempercepat

inovasi, dan mengoptimalkan operasi tanpa melakukan eksperimen fisik yang mahal dan memakan waktu[24]. Dalam konteks akustik ruangan, *digital twin* mencakup:

- 1) *Geometric Model*: Model 3D akurat dari ruangan, termasuk dimensi, bentuk, dan posisi objek besar (kolom, dinding, kubah.)
 - 2) *Material Database*: Database properti akustik material (koefisien absorpsi per frekuensi, impedansi akustik, densitas).
 - 3) *Source Model*: Karakterisasi sumber suara (speaker) termasuk posisi, directivity pattern, dan spektrum output.
 - 4) *Receiver Points*: Titik-titik di mana prediksi SPL, biasanya mewakili lokasi pendengar (tinggi telinga 1.2–1.5 m).
 - 5) *Acoustic Solver*: Engine simulasi yang menghitung propagasi suara dari source melalui refleksi dan absorpsi hingga receiver.
 - 6) *Output Prediction*: Hasil simulasi berupa SPL map.
- b. Keuntungan *digital twin* untuk Sistem Audio Masjid
- 1) Optimasi Virtual: Dapat menguji puluhan skenario penempatan speaker tanpa instalasi fisik[25].
 - 2) Prediksi Akurat: Dengan validasi yang ketat, model dapat memprediksi performa sistem dengan error ± 2.5 dB[26].
 - 3) Efisiensi Biaya: Mengurangi trial-and-error di lapangan, menghemat waktu dan biaya instalasi[27].
 - 4) Dokumentasi Lengkap: Model digital menjadi dokumentasi permanent dari karakteristik akustik masjid untuk reference masa depan[28].
 - 5) Integrasi dengan CPS: *digital twin* dapat menjadi lapisan prediktif dalam sistem kontrol adaptif *real-time*[8].

4. *Ray tracing* Method untuk Simulasi Akustik

a. Prinsip *Ray tracing*

Ray tracing adalah metode geometri yang menganggap suara sebagai "sinar" yang merambat dari sumber dalam berbagai arah dengan atenuasi mengikuti *inverse-square law* dan kehilangan energi pada refleksi sesuai koefisien absorpsi material[29]. Algoritma dasar:

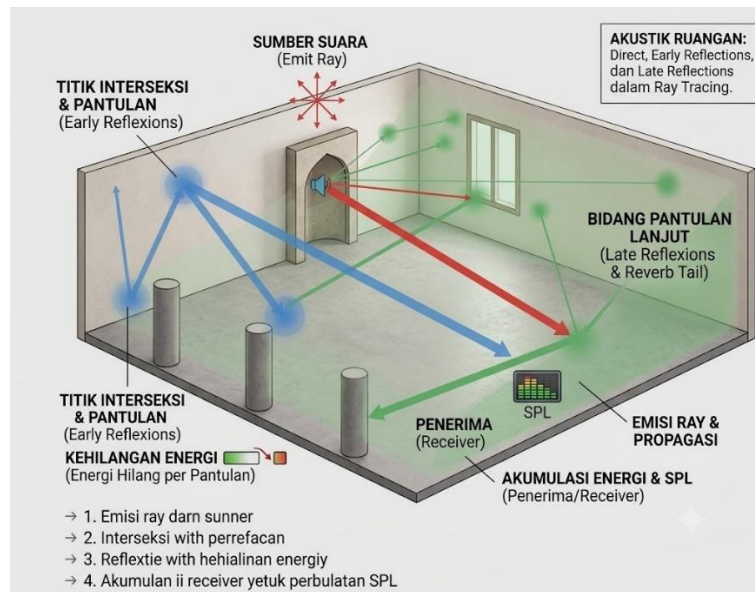
- 1) *Emit Rays*: Dari sumber (speaker), emit banyak rays (ratusan hingga ribuan) dalam arah random yang merata di semua *azimuth* dan *elevation*[29].

- 2) *Ray tracing*: Untuk setiap ray, lakukan iterasi refleksi:
 - a) Cek *intersection* dengan permukaan ruangan
 - b) Jika ada *intersection*: hitung sudut refleksi (*Snell's law*), *apply absorption loss*, *create reflected ray*, lanjutkan iterasi
 - c) Jika *ray* keluar atau sudah maksimal refleksi: stop *ergy Accumulation*: Ketika *ray* mencapai receiver point, accumulate energi ray tersebut ke *receiver* dengan decay sesuai jarak tempuh [30].
- 3) *SPL Calculation*: Agregasikan energi dari semua rays ke total pressure level di receiver, konversi ke dB:

$$L_{SPL} = 20 \log_{10} \left(\frac{\sqrt{\sum p_i^2}}{p_{ref}} \right) [30]$$

b. Implementasi *Ray tracing*

Gambar 2.3 mengilustrasikan proses *ray tracing* dalam ruangan masjid.



Gambar 2. 3 Ilustrasi *Ray tracing* dalam Ruang Masjid

Rays diemit dari speaker (source) ke berbagai arah. Ray 1 mencapai receiver secara direct, Ray 2 dan Ray 3 mengalami refleksi pada dinding sebelum mencapai *receiver*. Setiap refleksi menyebabkan atenuasi energi sesuai koefisien absorpsi material. Agregasi dari semua *rays* menghasilkan total SPL di *receiver point*[29], [30].

BAB III METODOLOGI

A. Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan pemodelan dan simulasi (*modeling and simulation research*). Pendekatan ini digunakan untuk membangun model *digital twin* Akustik yang merepresentasikan kondisi akustik ruang utama Masjid Al-Muhajirin berdasarkan data geometri ruangan, karakteristik material, konfigurasi sumber suara, dan hasil pengukuran lapangan. Model yang dikembangkan kemudian digunakan untuk mensimulasikan distribusi SPL menggunakan perangkat lunak Pyroomacoustics.

Selanjutnya, model divalidasi dengan membandingkan hasil simulasi terhadap hasil pengukuran lapangan menggunakan parameter *Mean Absolute Error* (MAE), *Root Mean Square Error* (RMSE), dan koefisien korelasi *Pearson* untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian model dengan kondisi nyata. Oleh karena itu, penelitian ini tidak berfokus pada pengujian hipotesis, melainkan pada pembangunan, simulasi, dan validasi model digital sebagai representasi kondisi akustik ruang.

B. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini direncanakan berlangsung selama satu semester, yaitu kurang lebih enam bulan, yang mencakup kegiatan persiapan, pengumpulan data, pemodelan, simulasi, validasi, analisis, dan penyusunan laporan akhir. Secara garis besar, kegiatan penelitian dimulai dari studi literatur dan penyusunan proposal, dilanjutkan dengan pengukuran di lapangan, kemudian pemodelan dan simulasi, hingga tahap akhir berupa analisis hasil dan penulisan skripsi.

Tempat penelitian dibagi menjadi dua lokasi utama. Pertama, Masjid Al Muhajirin yang terletak di Jalan Wates KM.11, PERUM Griya Kencana Permai, Sedayu, Bantul, Yogyakarta, digunakan sebagai lokasi studi kasus untuk pengukuran dimensi ruangan, identifikasi material, dan pengukuran SPL pada beberapa titik penerima. Kedua, SHATOMEDIA digunakan untuk kegiatan pemodelan geometri 3D, konfigurasi material, pelaksanaan simulasi akustik menggunakan perangkat lunak, serta pengolahan dan analisis data.

C. Alat dan Bahan

Pelaksanaan penelitian ini memerlukan kombinasi alat ukur lapangan, perangkat lunak pendukung, dan bahan berupa data fisik bangunan dan material akustik. Rincian alat dan bahan yang digunakan disajikan pada Tabel 3.1

Tabel 3. 1 Alat dan Bahan Penelitian

Kategori	Alat/Bahan	Fungsi
Alat ukur	Meteran	Mengukur dimensi panjang, lebar, dan tinggi ruang masjid.
Alat ukur	Sound level meter (SLM)	Mengukur SPL pada titik-titik penerima di ruang masjid.
Perangkat keras	Laptop	Menjalankan perangkat lunak CAD dan simulasi akustik.
Perangkat lunak	SketchUp	Membuat model geometri 3D ruang masjid.
Perangkat lunak	Python + library pyroomacoustics	Melakukan simulasi distribusi SPL dan respons akustik ruangan.
Perangkat lunak	Excel	Mengolah data pengukuran, menghitung error, dan membuat grafik.
Bahan	Data dimensi ruangan	Menjadi input model geometri dalam simulasi akustik.
Bahan	Data jenis dan sebaran material interior	Menentukan parameter absorpsi permukaan dalam model.
Bahan	Koefisien absorpsi material dari literatur	Mengisi database material akustik untuk simulasi.

Penggunaan *pyroomacoustics* dipilih karena merupakan library open-source yang telah digunakan luas untuk simulasi akustik ruangan dan menyediakan antarmuka yang cukup sederhana untuk model *Shoebox* room. Sementara itu, penggunaan SLM atau aplikasi pengukur SPL yang terkalibrasi memungkinkan pengambilan data lapangan yang cukup akurat untuk keperluan validasi model di tingkat skripsi.

D. Subjek dan Objek Penelitian

1. Subjek Penelitian

Objek utama penelitian ini adalah ruang utama salat Masjid Al-Muhajirin Sedayu, Subjek penelitian ini adalah ruang utama Masjid Al-Muhajirin Sedayu, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta, yang digunakan sebagai studi kasus dalam pengembangan dan validasi model *digital twin* akustik. Ruang utama masjid dipilih karena memiliki karakteristik akustik yang dipengaruhi oleh dimensi ruangan, jenis material interior, serta konfigurasi sistem tata suara yang digunakan untuk kegiatan ibadah dan penyampaian informasi kepada jamaah.

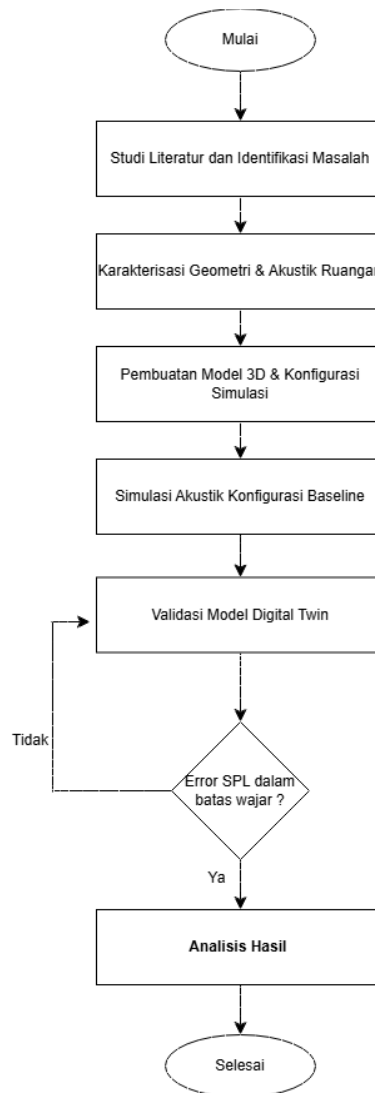
2. Objek Penelitian

Objek penelitian ini adalah model *digital twin* akustik yang dikembangkan untuk merepresentasikan kondisi akustik ruang utama Masjid Al-Muhajirin dan digunakan untuk menganalisis distribusi SPL. Secara lebih spesifik, objek penelitian mencakup:

- a. Geometri ruang utama masjid
Model geometri tiga dimensi yang merepresentasikan dimensi fisik ruang utama masjid, meliputi panjang, lebar, tinggi ruangan, serta elemen utama yang memengaruhi propagasi suara.
- b. Karakteristik material akustik
Data material interior yang digunakan pada lantai, dinding, dan plafon beserta nilai koefisien absorpsi bunyinya yang digunakan sebagai parameter dalam simulasi akustik.
- c. Konfigurasi sumber suara dan titik penerima
Posisi speaker sebagai sumber suara serta titik-titik penerima (*receiver*) yang digunakan untuk pengukuran dan analisis distribusi SPL di dalam ruangan.
- d. Model *digital twin* berbasis simulasi akustik
Model virtual yang dibangun menggunakan pendekatan simulasi akustik berbasis *ray tracing* dan image source untuk merepresentasikan perilaku propagasi suara di dalam ruang utama masjid.
- e. Data distribusi Sound Pressure Level (SPL)
Data SPL hasil simulasi dan hasil pengukuran lapangan yang digunakan dalam proses validasi model *digital twin* serta analisis tingkat pemerataan distribusi suara pada ruang utama masjid.

E. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian disusun dalam beberapa tahapan terstruktur, mulai dari studi pendahuluan hingga analisis hasil dan penyusunan laporan. Diagram alir Kerangka penelitian dapat digambarkan dalam Gambar 3.1 yang memperlihatkan alur mulai dari pengumpulan data hingga rekomendasi konfigurasi speaker.

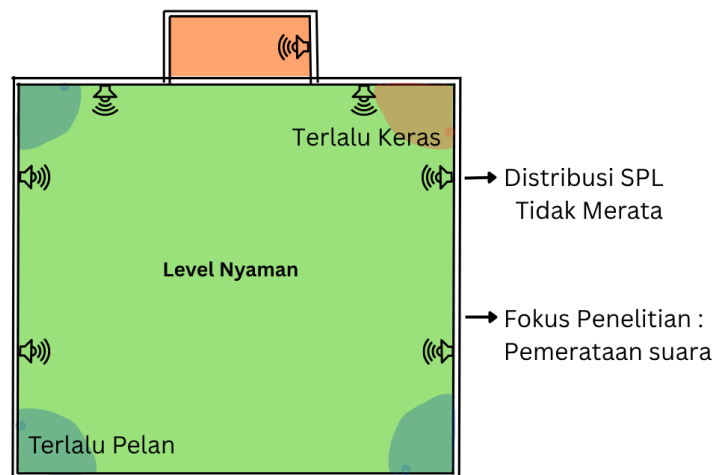


Gambar 3. 1 Prosedur Penelitian

1. Studi Literatur dan Identifikasi Masalah

Tahap awal penelitian dimulai dengan studi literatur mengenai akustik ruang masjid, parameter SPL, distribusi suara, simulasi akustik ruangan, *digital twin*, serta metode validasi model akustik yang telah dibahas pada penelitian

terdahulu. Studi literatur dilakukan untuk memperoleh landasan teori, memahami metode yang digunakan pada penelitian sebelumnya, serta menyusun dasar ilmiah dalam pembangunan dan validasi model *digital twin* Akustik. Berdasarkan hasil studi literatur tersebut, dilakukan identifikasi masalah terkait distribusi suara pada ruang utama masjid yang menjadi dasar pelaksanaan penelitian.



Gambar 3. 2 Gambaran Konseptual Distribusi Suara Ruang Utama Sholat

Pada tahap ini juga dilakukan observasi awal di Masjid Al-Muhajirin untuk mengidentifikasi konfigurasi sistem pengeras suara yang digunakan, posisi speaker utama, dan kendala praktis yang sering muncul menurut pengurus masjid. Informasi ini digunakan untuk memastikan bahwa fokus penelitian sesuai dengan kebutuhan nyata di lapangan.

Tabel 3. 2 Checklist observasi awal sistem audio Masjid Al-Muhajirin

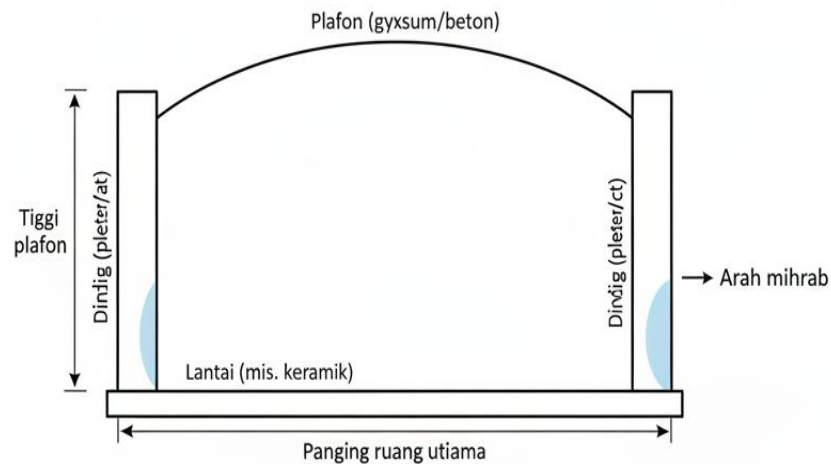
No	Aspek yang Diamati	Item / Pertanyaan Observasi	Hasil / Catatan Lapangan
1	Jenis sistem PA	Apakah sistem menggunakan PA analog terpusat atau sudah menggunakan sistem digital / DSP?	
2	Merek dan tipe utama	Merek dan tipe amplifier/mixer utama yang digunakan di masjid.	
3	Jumlah speaker	Berapa jumlah total speaker yang terpasang di ruang utama salat?	
4	Tipe speaker	Jenis speaker (horn, column, ceiling, wall-mount, lainnya).	
5	Posisi mimbar/mihrab	Lokasi mimbar/mihrab terhadap arah sebaran speaker (depan, samping, tengah).	

6	Pola penempatan speaker	Apakah penempatan speaker mengikuti arah jamaah, sejajar dinding, atau acak?	
7	Pengaturan level volume	Apakah pengaturan volume per zona tersedia atau hanya satu kontrol utama?	
8	Kondisi kabel dan instalasi	Kondisi umum kabel (rapi/tidak, sambungan banyak/sedikit, potensi noise).	
9	Sebaran suara (takmir/jamaah)	Keluhan terkait area terlalu keras atau terlalu pelan/zona mati.	
10	Masalah teknis sering terjadi	Feedback, dengung, noise, gangguan listrik, dsb.	
11	Frekuensi perawatan / pengecekan	Seberapa sering sistem dicek/dirawat (rutin, insidental, hampir tidak pernah).	
12	Dokumentasi konfigurasi sistem	Apakah ada gambar/skema instalasi dan pengaturan standar (preset) sistem audio?	
13	Harapan takmir terhadap sistem baru	Harapan utama: suara merata, lebih jelas, mudah dioperasikan, minim perawatan, dsb.	

2. Karakterisasi Akustik dan Geometri Ruangan

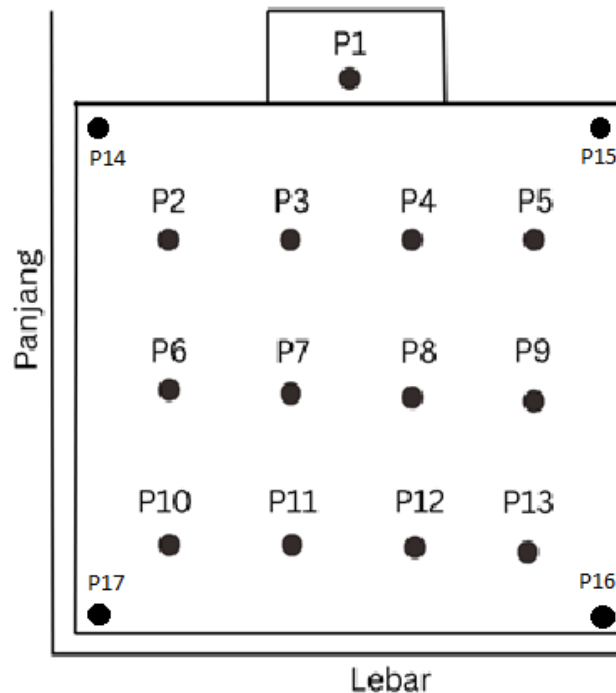
Tahap karakterisasi fisik dan akustik ruang utama masjid merupakan langkah awal dalam pembangunan model *digital twin* sistem audio. Karakterisasi ini bertujuan untuk memperoleh representasi fisik ruangan dan perilaku suara yang akurat, yang menjadi dasar simulasi akustik. Kegiatan ini mencakup pengukuran dimensi geometris ruangan, identifikasi jenis dan distribusi material interior, serta pengukuran parameter akustik dasar, khususnya SPL pada beberapa titik penerima.

Pengukuran dimensi dilakukan menggunakan meteran atau laser distance meter untuk memperoleh panjang, lebar, dan tinggi ruang utama salat, termasuk posisi mihrab dan batas area jamaah. Data dimensi ini selanjutnya digunakan untuk menyusun model ruang 3d dalam perangkat lunak Sketchup atau langsung di lingkungan simulasi akustik.



Gambar 3. 3 Skema geometri ruang utama masjid untuk pemodelan akustik.

Selain dimensi, karakterisasi material dilakukan melalui observasi visual terhadap lantai, dinding, dan plafon untuk mengidentifikasi jenis material dominan seperti keramik, marmer, karpet, plester, dan gypsum. Setiap material kemudian dipasangkan dengan nilai koefisien absorpsi akustik dari literatur guna membentuk database material yang akan digunakan sebagai input simulasi.



Gambar 3. 4 Denah Titik Pengukuran SPL di Ruang Utama Masjid

Untuk mendapatkan gambaran awal distribusi suara, dilakukan pengukuran SPL di beberapa titik penerima yang tersebar di ruang utama salat menggunakan sound level meter. Pengukuran dilakukan saat diputar sinyal uji melalui sistem speaker eksisting, misalnya berupa *pink noise* atau rekaman suara khutbah

dengan level konstan. Nilai SPL yang diperoleh pada tiap titik penerima digunakan sebagai data pembanding dalam proses validasi model simulasi pada tahap berikutnya.

a. Tabel pengukuran dimensi dan material :

Tabel 3. 3 Data dimensi dan material utama ruang salat Masjid Al-Muhajirin

No	Parameter	Nilai	Satuan	Keterangan
1	Panjang ruang utama		m	Diukur dari dinding belakang hingga dinding mihrab.
2	Lebar ruang utama		m	Diukur dari dinding kiri ke dinding kanan.
3	Tinggi plafon		m	Diukur dari lantai ke plafon rata.
4	Luas area jamaah		m ²	Area efektif yang digunakan untuk salat.
5	Volume ruang		m ³	Hasil perkalian panjang, lebar, dan tinggi.
6	Material lantai dominan		-	Keramik, karpet.
7	Material dinding dominan		—	plester cat, panel kayu.
8	Material plafon dominan		—	gypsum, beton.
9	Elemen penyerap tambahan		—	karpet tebal, tirai, rak buku,

Nilai numerik pada tabel diisi berdasarkan hasil pengukuran lapangan, sedangkan jenis material dicatat sesuai pengamatan dan konfirmasi dari pengurus masjid.

b. Tabel pengukuran SPL di titik penerima:

Tabel 3. 4 Data awal pengukuran SPL di ruang utama

No	Kode titik	Lokasi (deskripsi)	Koordinat Titik	SPL terukur (dB)	Catatan singkat
1	P1	Depan tengah (dekat mihrab)			
2	P2	Tengah kiri			
3	P3	Tengah kanan			
4	P4	Belakang tengah			
...	...	...			

Jumlah titik dapat menyesuaikan kebutuhan (misalnya 10–17 titik), dengan penyebaran merata di area jamaah. Data ini kemudian dipakai saat membandingkan hasil simulasi dan pengukuran pada tahap validasi.

3. Pembuatan Model 3D dan Konfigurasi Simulasi

Tahap karakterisasi fisik dan akustik ruang utama masjid merupakan langkah awal dalam pembangunan model *digital twin* sistem audio. Karakterisasi ini bertujuan untuk memperoleh representasi fisik ruangan dan perilaku suara yang akurat, yang menjadi dasar simulasi akustik. Kegiatan ini mencakup pengukuran dimensi geometris ruangan, identifikasi jenis dan distribusi material interior, serta pengukuran parameter akustik dasar, khususnya SPL pada beberapa titik penerima.

a. Tahap 1: Pembuatan Model Geometri 3D

Membangun model 3D dari ruang utama masjid yang mewakili secara visual dan geometris elemen-elemen penting ruangan, seperti dimensi ruang dan posisi elemen struktural utama. Model ini menjadi dasar bagi simulasi akustik yang lebih lanjut.

Langkah-langkah:

1) Pengumpulan Data Dimensi Ruangan:

Data dimensi ruang utama masjid (panjang, lebar, dan tinggi) yang telah diperoleh melalui pengukuran lapangan digunakan untuk menyusun model geometri. Dimensi ini mencakup area salat utama, mihrab, serta area jamaah.

2) Pembuatan Model Geometri:

Menggunakan perangkat lunak SketchUp, model geometris masjid dibuat dalam bentuk Ruangan yang sederhana. Model ini hanya mencakup elemen-elemen utama seperti dinding, lantai, plafon, serta posisi mihrab dan area jamaah, namun tanpa detail arsitektural yang kompleks. Fokus utama pada tahap ini adalah untuk menggambarkan secara global perilaku akustik ruangan, bukan visualisasi detail struktural.

3) Visualisasi Model Geometri Ruang Utama Masjid:

Gambar model geometri 3D ruang utama masjid menggunakan SketchUp yang menunjukkan dimensi dasar, seperti panjang, lebar, dan tinggi ruangan.

b. Tahap 2: Penentuan Atribut Material Akustik

Menentukan koefisien absorpsi akustik untuk setiap permukaan di dalam ruang masjid agar dapat memperhitungkan dampak material terhadap distribusi SPL.

Langkah-langkah:

1) Identifikasi Material Interior: Berdasarkan pengamatan lapangan, material interior yang digunakan pada dinding, lantai, dan plafon

dicatat. Misalnya, lantai menggunakan keramik dan karpet, dinding terbuat dari plester dan panel kayu, sementara plafon menggunakan gypsum.

- 2) Penetapan Koefisien Absorpsi: Setiap material diberikan nilai koefisien absorpsi akustik yang diambil dari literatur atau basis data material yang relevan. Koefisien ini menentukan seberapa baik material tersebut dalam menyerap gelombang suara pada frekuensi tertentu. Misalnya, keramik memiliki koefisien absorpsi rendah, sementara karpet memiliki koefisien absorpsi yang lebih tinggi.

c. Tahap 3: Konfigurasi Sumber dan Penerima dalam Simulasi

Menyusun konfigurasi sumber suara (speaker) dan penerima suara (receiver) dalam model untuk menggambarkan posisi speaker dan titik pengukuran SPL di ruangan.

Langkah-langkah:

- 1) Penempatan Sumber Suara (Speaker): Posisi sumber suara (misalnya speaker utama) diletakkan dalam model sesuai dengan pengamatan lapangan.
- 2) Penempatan Titik Penerima (Receiver): Titik penerima suara didefinisikan di beberapa lokasi di ruang jamaah, berdasarkan titik pengukuran SPL yang telah ditentukan (P_1 , P_2 , ..., P_n). Titik penerima ini mewakili posisi telinga jamaah di area salat utama.

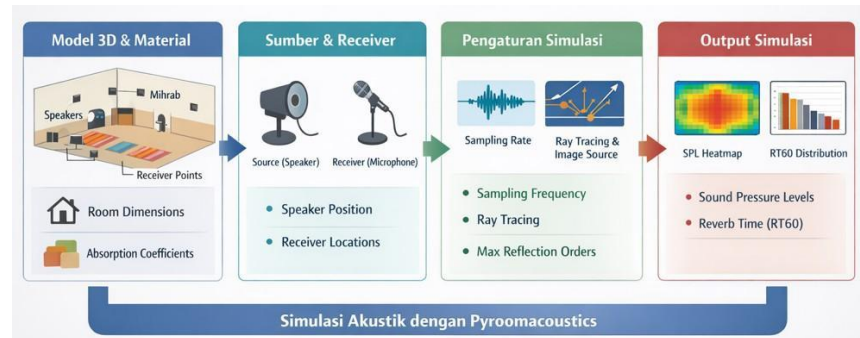
d. Tahap 4: Konfigurasi Simulasi Akustik dengan pyroomacoustics

Melakukan konfigurasi simulasi untuk memprediksi distribusi SPL di dalam ruang masjid dan melakukan simulasi distribusi SPL berdasarkan konfigurasi speaker eksisting sebagai bagian dari proses validasi model *digital twin*.

Langkah-langkah:

- 1) Pengaturan Parameter Simulasi: Parameter penting dalam simulasi meliputi frekuensi sampling, metode simulasi (*ray tracing* atau *image source*), dan jumlah pantulan maksimum yang akan disimulasikan.
- 2) Pengaktifan Metode *Ray tracing* dan Image Source: Metode *ray tracing* digunakan untuk mensimulasikan jalur suara yang bergerak dari sumber (speaker) ke penerima, melalui refleksi pada permukaan ruangan. Metode *image source* digunakan untuk memodelkan pantulan suara pada dinding dan langit-langit.
- 3) Penyederhanaan Model untuk Simulasi: Konfigurasi simulasi dibuat dengan kompleksitas moderat, dimana jumlah ray dan pantulan dibatasi agar simulasi tetap berjalan cepat namun akurat dalam menggambarkan pola distribusi SPL secara keseluruhan.

Diagram Konfigurasi Simulasi:



Gambar 3. 5 Diagram Konfigurasi Simulasi

e. Langkah 5: Visualisasi Hasil Simulasi

Setelah konfigurasi simulasi selesai, langkah terakhir adalah melakukan visualisasi dari hasil distribusi SPL. Visualisasi ini akan memberikan gambaran mengenai penyebaran tekanan suara di dalam ruang masjid, termasuk zona dengan tingkat suara yang terlalu tinggi atau terlalu rendah, serta area dengan refleksi suara yang berlebihan.

4. Pelaksanaan Simulasi Akustik

Tahap pelaksanaan simulasi akustik dilakukan setelah model 3D ruang utama masjid beserta konfigurasi sumber, penerima, dan material selesai disusun. Tujuan tahap ini adalah memperoleh distribusi SPL pada titik-titik penerima yang merepresentasikan area jamaah, sehingga dapat dianalisis pemerataan suara pada konfigurasi speaker eksisting dan digunakan sebagai dasar validasi model.

Simulasi akustik dilaksanakan menggunakan library pyroomacoustics atau perangkat lunak sejenis yang mendukung pemodelan ruangan berbasis dimensi, material, dan posisi sumber-penerima. Parameter simulasi yang dikonfigurasi meliputi ukuran ruangan (panjang, lebar, tinggi), nilai koefisien absorpsi permukaan, posisi sumber suara (speaker utama), posisi mikrofon virtual (*receiver*), serta opsi metode simulasi seperti *image source* atau *ray tracing* sesuai kemampuan perangkat lunak.

Tabel 3. 5 Parameter utama simulasi akustik

No	Parameter	Nilai / Pengaturan (contoh)	Keterangan
1	Dimensi ruangan	Panjang: ... m, Lebar: ... m, Tinggi: ... m	Diambil dari hasil pengukuran geometri ruang utama masjid.
2	Model ruangan	Model 3D	Representasi geometri sederhana ruang utama.

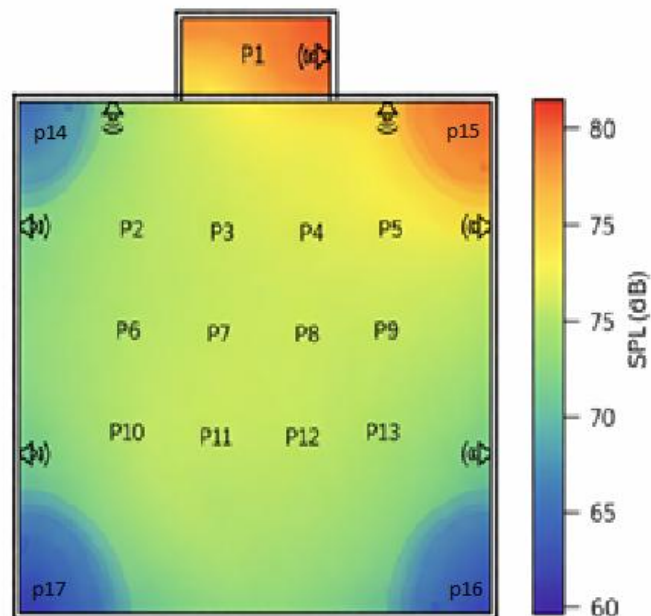
3	Metode simulasi	Image source + <i>ray tracing</i> (aktif)	Untuk memodelkan pantulan dan propagasi energi suara.
4	Frekuensi sampling (fs)	48 kHz	Digunakan pada simulasi respon impuls.
5	Durasi respon impuls	1,0–1,5 detik	Cukup untuk menangkap pantulan utama ruangan.
6	Koefisien absorpsi material	Sesuai basis data material terpilih	Diambil dari literatur untuk lantai, dinding, plafon.
7	Jumlah sumber suara	7 Speaker utama	Mewakili konfigurasi baseline sistem eksisting.
8	Posisi sumber (x, y, z)	(x_s, y_s, z_s)	Koordinat sesuai posisi fisik speaker utama.
9	Jumlah titik penerima (receiver)	17 titik	Sesuai jumlah titik pengukuran SPL di lapangan.
10	Posisi titik penerima (x, y, z)	(x_{pi}, y_{pi}, z_{pi}), $i = 1 \dots n$	Disesuaikan dengan titik P1–Pn pada denah pengukuran.
11	Tinggi titik penerima	1,2 m	Perkiraan tinggi telinga jamaah berdiri.
12	Jumlah ray (jika <i>ray tracing</i> aktif)	Mis. 1000–5000 ray	Disesuaikan untuk kompromi akurasi vs waktu komputasi.
13	Maksimum orde pantulan	6 pantulan	Batas pantulan yang disimulasikan.
14	Tipe sinyal uji	pink noise	Digunakan untuk perhitungan SPL di titik penerima.

Berdasarkan parameter pada Tabel 3.5, konfigurasi simulasi disusun mengacu pada kondisi aktual ruang utama Masjid Al-Muhajirin serta kebutuhan proses validasi model. Dimensi ruangan, posisi sumber suara, dan titik penerima diperoleh dari hasil pengukuran lapangan sehingga model simulasi memiliki kesesuaian dengan kondisi sebenarnya. Frekuensi sampling ditetapkan sebesar 48 kHz karena merupakan standar yang umum digunakan pada sistem audio digital dan mampu menghasilkan *Room Impulse Response* (RIR) dengan resolusi yang baik. Koefisien absorpsi setiap material ditentukan berdasarkan hasil identifikasi material pada lantai, dinding, dan plafon, kemudian disesuaikan

dengan nilai koefisien absorpsi dari literatur. Jumlah ray dan *maximum reflection order* dipilih sebagai kompromi antara tingkat akurasi simulasi dan efisiensi waktu komputasi. Sementara itu, jumlah titik penerima ditetapkan sebanyak 17 titik mengikuti titik pengukuran SPL di lapangan, dengan tinggi titik penerima sebesar 1,2 m untuk merepresentasikan posisi telinga jamaah saat berdiri. Adapun sinyal uji menggunakan pink noise karena memiliki distribusi energi yang merata pada setiap pita oktaf dan umum digunakan dalam pengujian sistem audio ruangan.

Setelah seluruh parameter simulasi ditetapkan, model digital twin dijalankan menggunakan konfigurasi sistem audio yang merepresentasikan kondisi aktual ruang utama Masjid Al-Muhajirin. Simulasi dilakukan menggunakan metode *Image Source Method* dan *Ray Tracing* pada Pyroomacoustics untuk memperoleh RIR. Selanjutnya, respons impuls tersebut diolah menjadi nilai SPL melalui perhitungan *Root Mean Square* (RMS) yang kemudian dikonversi ke satuan dB SPL.

Nilai SPL hasil simulasi pada setiap titik penerima diekspor ke dalam bentuk tabel dan dibandingkan dengan hasil pengukuran lapangan pada tahap validasi model. Selain itu, hasil simulasi divisualisasikan dalam bentuk distribusi SPL untuk memberikan gambaran mengenai tingkat pemerataan tekanan suara pada ruang utama masjid. Visualisasi distribusi SPL hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 3.6 dan digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi kesesuaian model digital twin terhadap kondisi akustik ruang sebenarnya.



Gambar 3. 6 Ilustrasi Visualisasi Distribusi SPL Simulasi baseline

5. Validasi Model *Digital Twin*

Validasi model dilakukan dengan membandingkan nilai SPL hasil simulasi dengan nilai SPL hasil pengukuran lapangan pada titik-titik yang sama. Selisih antara hasil simulasi dan pengukuran dihitung, menggunakan *MAE*, untuk mengukur tingkat kedekatan model dengan kondisi nyata.

Apabila error yang diperoleh masih terlalu besar, dilakukan penyesuaian sederhana pada parameter material koefisien material atau pengaturan lain dalam batas wajar, kemudian simulasi diulang sampai diperoleh tingkat error yang dapat diterima di taraf skripsi. Proses ini memastikan bahwa *digital twin* yang digunakan cukup representatif.

Validasi model *digital twin* dilakukan untuk memastikan bahwa simulasi akustik yang dibangun cukup merepresentasikan kondisi nyata distribusi suara di ruang utama Masjid Al-Muhajirin. Proses validasi ini penting karena hasil simulasi hanya dapat dijadikan dasar pengambilan keputusan teknis apabila penyimpangannya terhadap data lapangan masih berada dalam batas yang dapat diterima.

Validasi dilakukan dengan cara membandingkan nilai SPL hasil simulasi dengan nilai SPL hasil pengukuran lapangan pada titik-titik penerima yang sama. Pada tahap sebelumnya, telah didefinisikan koordinat titik P1, P2, ..., Pn di dalam model simulasi yang bersesuaian dengan posisi titik pengukuran SPL di ruang utama masjid. Untuk setiap titik tersebut dihitung SPL simulasi, kemudian dibandingkan dengan SPL hasil pengukuran sehingga diperoleh selisih (*error*) pada tiap titik.

Nilai error keseluruhan kemudian diringkas menggunakan metrik Mean Absolute Error (MAE) atau Root Mean Square Error (RMSE) untuk mengetahui tingkat kedekatan antara hasil simulasi dan hasil pengukuran lapangan. Sebagai perbandingan, penelitian yang dilakukan oleh Zobell et al [31]. melaporkan nilai MAE pada kisaran 3–4 dB antara hasil simulasi dan pengukuran. Apabila error yang diperoleh masih terlalu besar, dilakukan penyesuaian terhadap parameter model, seperti koefisien absorpsi material atau asumsi posisi sumber suara, kemudian simulasi diulang hingga diperoleh tingkat kesesuaian yang lebih baik.

Hasil validasi disajikan dalam bentuk tabel yang memuat SPL simulasi, SPL pengukuran, dan error untuk setiap titik penerima. Selain itu, dapat dibuat grafik *scatter* yang menampilkan hubungan antara SPL simulasi dan SPL pengukuran, sehingga secara visual dapat dilihat apakah titik-titik data cenderung berada dekat garis ideal ($y = x$). Visualisasi ini membantu menjelaskan bahwa meskipun terdapat variasi lokal, secara umum model *digital twin* mampu mengikuti pola distribusi SPL di ruang utama masjid dengan tingkat akurasi yang memadai untuk keperluan penelitian.

Sebagai contoh, format hasil validasi dapat dirangkum dalam Tabel 3.6 Hasil validasi SPL simulasi vs pengukuran, seperti berikut.

Tabel 3. 6 Hasil validasi SPL simulasi vs pengukuran

No	Titik	SPL (dB)	simulasi	SPL (dB)	terukur	Error (Sim – Ukur) (dB)
1	P1					
2	P2					
...	...					
n	Pn					
	MAE					(diisi hasil perhitungan)

Nilai numerik pada tabel diisi setelah simulasi dan pengukuran selesai dilakukan.

6. Analisis hasil dan penyusunan laporan

Tahap terakhir dalam penelitian ini adalah analisis hasil simulasi dan validasi model *digital twin*, kemudian penyusunan laporan skripsi secara sistematis. Analisis dilakukan untuk mengevaluasi sejauh mana model *digital twin* yang dikembangkan mampu merepresentasikan kondisi akustik ruang utama Masjid Al-Muhajirin berdasarkan distribusi SPL.

Analisis diawali dengan membandingkan nilai SPL hasil simulasi dengan hasil pengukuran lapangan pada titik-titik penerima yang sama. Tingkat kesesuaian model dievaluasi menggunakan nilai MAE serta analisis korelasi antara data simulasi dan data pengukuran. Apabila nilai error berada dalam batas yang dapat diterima, maka model *digital twin* dinyatakan valid dan mampu merepresentasikan kondisi akustik ruang secara memadai.

Selanjutnya dilakukan analisis distribusi SPL berdasarkan hasil simulasi untuk mengidentifikasi pola penyebaran suara pada ruang utama masjid. Distribusi SPL diamati melalui tabel hasil simulasi dan visualisasi heatmap guna mengetahui tingkat pemerataan suara pada area jamaah.

Seluruh hasil analisis kemudian disusun ke dalam Bab IV Hasil dan Pembahasan yang memuat hasil karakterisasi ruang, pembangunan model *digital twin*, hasil simulasi akustik, serta validasi model. Kesimpulan dan rekomendasi penelitian selanjutnya dirangkum dalam Bab V Kesimpulan dan Saran sebagai bentuk kontribusi penelitian terhadap pengembangan *digital twin* akustik dan analisis distribusi suara pada ruang masjid.

F. Jadwal Penelitian

Jadwal penelitian disusun untuk mengalokasikan waktu ke setiap tahapan penelitian selama 7 bulan (Desember–Juni 2026).

Tabel 3. 7 Jadwal Penelitian Skripsi

No	Tahap Kegiatan	Bulan 1	Bulan 2	Bulan 3	Bulan 4	Bulan 5	Bulan 6	Bulan 7
1	Studi Literatur	✓						
2	Identifikasi Masalah dan Observasi Awal		✓					
3	Pembuatan Model <i>Digital Twin</i>			✓				
4	Simulasi dan Validasi Model			✓	✓	✓		
5	Analisis Hasil Penelitian					✓	✓	✓
6	Penyusunan Laporan Skripsi						✓	✓

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Karakterisasi Akustik dan Geometri Masjid

1. Dimensi dan Volume Ruang Utama

Pengukuran dimensi dilakukan menggunakan meteran laser pada ruang utama salat Masjid Al-Muhajirin. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa ruang utama memiliki bentuk persegi panjang sederhana dengan dimensi yang disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Dimensi dan volume ruang utama Masjid Al-Muhajirin

No	Parameter	Nilai	Satuan	Keterangan
1	Panjang ruang utama	13.64	m	Diukur dari dinding belakang hingga dinding mihrab.
2	Lebar ruang utama	14.80	m	Diukur dari dinding kiri ke dinding kanan.
3	Tinggi plafon rata-rata	4.5	m	Diukur dari lantai ke plafon.
4	Luas area jamaah	201.87	m ²	Panjang $\times$ lebar.
5	Volume ruang	908.42	m ³	Panjang $\times$ lebar $\times$ tinggi.

Berdasarkan hasil pengukuran, ruang utama Masjid Al-Muhajirin memiliki panjang 13,64 m, lebar 14,80 m, dan tinggi plafon rata-rata 4,50 m, sehingga diperoleh luas area jamaah sebesar 201,87 m² dan volume ruang sebesar 908,42 m³. Data dimensi dan volume tersebut selanjutnya digunakan sebagai parameter geometri dalam pembangunan model digital twin dan simulasi distribusi SPL.

2. Identifikasi Material Interior

Material interior ruang utama diidentifikasi melalui observasi lapangan dan disesuaikan dengan material yang digunakan pada model *digital twin*. Material-material yang memiliki karakteristik serupa kemudian dikelompokkan menjadi tiga kategori utama, yaitu lantai, dinding, dan plafon. Setiap kategori diberikan nilai koefisien absorpsi ekuivalen pada frekuensi 1 kHz berdasarkan referensi literatur dan parameter yang digunakan dalam simulasi. Hasil identifikasi material disajikan pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Jenis material interior ruang utama dan koefisien absorpsi

Permukaan	Material dominan	Koefisien absorpsi 1 kHz
Lantai	Karpet berat di atas beton	0,45
Dinding	Campuran bata, kaca, kayu, granit	0,02
Plafon	Campuran gypsum dan beton	0,03

Nilai koefisien absorpsi pada Tabel 4.2 menunjukkan bahwa sebagian besar permukaan ruang utama memiliki kemampuan serap bunyi yang relatif rendah. Dinding yang direpresentasikan sebagai campuran material bata, kaca, kayu, dan granit memiliki koefisien absorpsi ekuivalen sebesar 0,02, sedangkan plafon yang dimodelkan sebagai campuran gypsum dan beton memiliki koefisien absorpsi sebesar 0,03. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar energi bunyi yang mengenai permukaan dinding dan plafon cenderung dipantulkan kembali ke dalam ruangan. Sebaliknya, lantai yang didominasi karpet berat di atas beton memiliki koefisien absorpsi tertinggi, yaitu sebesar 0,45, sehingga memberikan kontribusi terbesar dalam menyerap energi bunyi pada area jamaah.

Nilai absorpsi yang digunakan pada simulasi merupakan nilai absorpsi ekuivalen yang merepresentasikan karakteristik gabungan material dominan pada setiap permukaan ruangan. Pendekatan ini digunakan untuk menyederhanakan pemodelan material pada *digital twin* sekaligus mempertahankan karakteristik akustik utama yang memengaruhi propagasi suara di dalam ruangan.

Secara keseluruhan, dominasi permukaan dengan koefisien absorpsi rendah menunjukkan bahwa ruang utama masjid cenderung bersifat reflektif terhadap gelombang suara. Oleh karena itu, parameter material tersebut dimasukkan ke dalam model *digital twin* sebagai salah satu faktor utama yang memengaruhi distribusi SPL, sehingga hasil simulasi dapat merepresentasikan kondisi akustik ruang aktual dengan lebih baik.

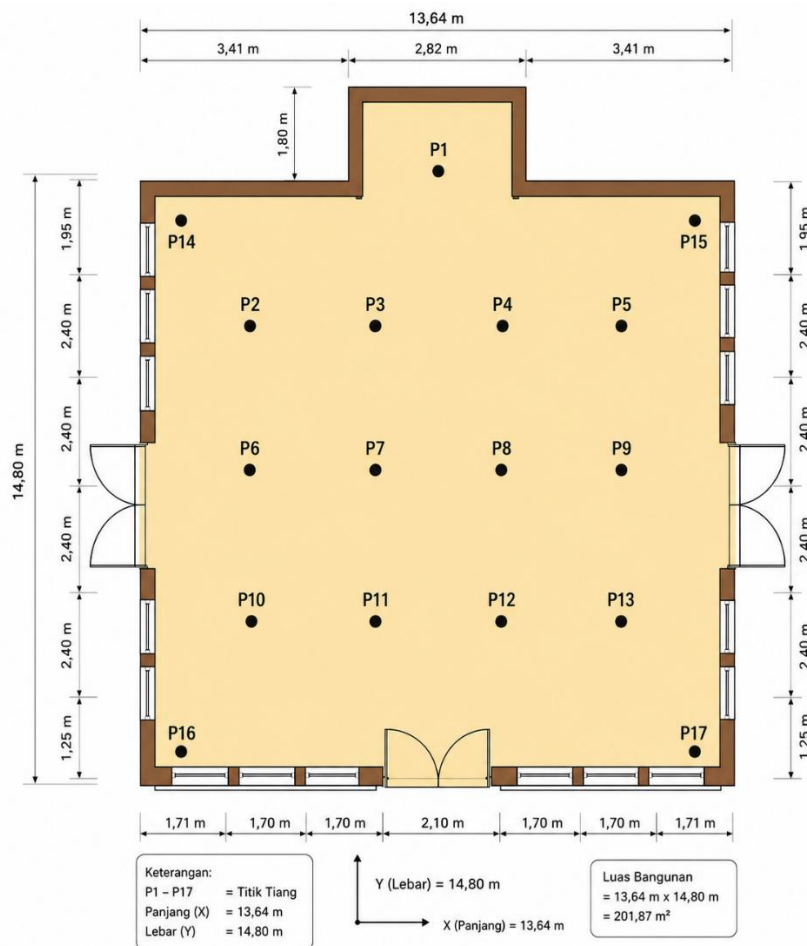
3. Pengukuran SPL Awal pada Titik Penerima

Pengukuran SPL dilakukan pada 17 titik penerima (P1–P17) yang tersebar pada area depan, tengah, belakang, dan sudut ruang utama masjid. Pengukuran menggunakan Sound Level Meter (SLM), Sinyal uji berupa *pink noise* diperdengarkan melalui sistem tata suara eksisting dengan level keluaran yang dijaga konstan selama proses pengukuran. Pada setiap titik dilakukan tiga kali pengukuran, kemudian dihitung nilai rata-ratanya untuk memperoleh hasil yang lebih representatif. Hasil pengukuran SPL awal disajikan pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Hasil pengukuran SPL awal di ruang utama

No	Titik	Lokasi (deskripsi)	Koordinat			SPL terukur (dB)	Catatan
			X	Y	Z		
1	P1	Mihrab	1.48	7.44	1.2	75,70	Merata
2	P2	Depan	4,76	2.96	1.2	77,47	SPL relatif tinggi
3	P3	Depan	4,76	5.92	1.2	75,67	Distribusi Merata
4	P4	Depan	4,76	8.88	1.2	75,67	Distribusi Merata
5	P5	Depan	4,76	11.84	1.2	78,07	SPL tertinggi
6	P6	Tengah	7,77	2.96	1.2	77,17	SPL relatif tinggi
7	P7	Tengah	7,77	5.9	1.2	75,83	Distribusi Merata
8	P8	Tengah	7,77	8,88	1.2	76,53	Distribusi Merata
9	P9	Tengah	7,77	11,84	1.2	77,23	SPL relatif tinggi
10	P10	Belakang	10,68	2.96	1.2	77,07	Distribusi Merata
11	P11	Belakang	10,68	5.92	1.2	74,80	Distribusi Merata
12	P12	Belakang	10,68	8.88	1.2	74,53	SPL terendah
13	P13	Belakang	10,68	11.84	1.2	77,13	Distribusi Merata
14	P14	Sudut Depan Kiri	1,80	0.50	1.2	76,63	Distribusi Merata
15	P15	Sudut Depan Kanan	1.80	14.47	1.2	76,27	Distribusi Merata
16	P16	Sudut Belakang Kanan	13.63	14.75	1.2	75,97	Distribusi Merata
17	P17	Sudut Belakang Kiri	13.63	0.50	1.2	76,90	Distribusi Merata
Rata-rata						76,39	Distribusi cukup seragam
Std. deviasi						0,96	Variasi rendah

Data menunjukkan bahwa distribusi SPL pada ruang utama relatif merata, dengan selisih maksimum sebesar 3,54 dB antara titik dengan nilai SPL tertinggi (P5 = 78,07 dB) dan titik dengan nilai SPL terendah (P12 = 74,53 dB). Standar deviasi sebesar 0,96 dB mengindikasikan bahwa variasi tingkat tekanan suara antar titik pengukuran tergolong rendah, sehingga distribusi suara dapat dikatakan cukup seragam pada seluruh area ruang utama masjid. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem tata suara eksisting mampu menjangkau area depan, tengah, belakang, maupun sudut ruangan dengan perbedaan tingkat tekanan suara yang tidak signifikan. Berdasarkan hasil tersebut, distribusi suara pada ruang utama telah memenuhi kebutuhan penyebaran suara yang relatif merata untuk aktivitas ibadah dan penyampaian informasi. Visualisasi sebaran titik pengukuran disajikan pada Gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Visualisasi sebaran titik pengukuran

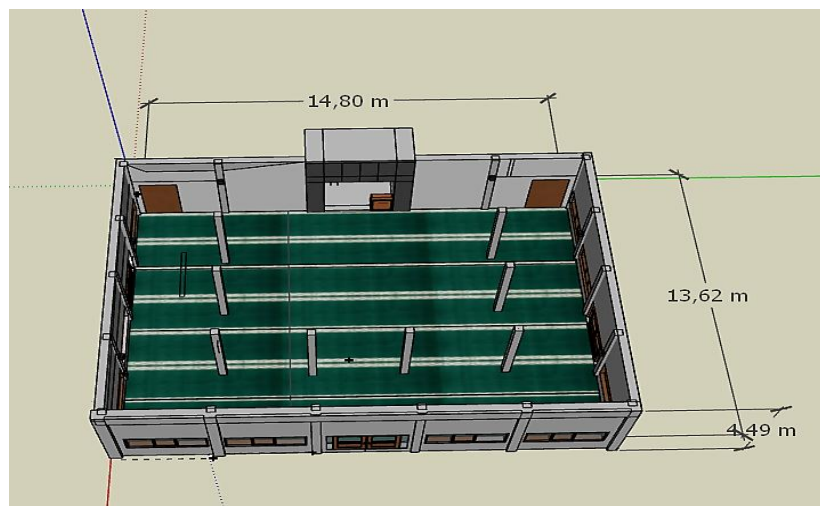
B. Hasil Pembuatan Model *Digital Twin*

1. Model Geometri 3D

Model geometri ruang utama Masjid Al-Muhajirin dikembangkan menggunakan SketchUp berdasarkan hasil pengukuran dimensi aktual

bangunan. Model ini mencakup elemen utama ruang, seperti dinding, lantai, plafon, bukaan, dan mihrab, kemudian diekspor ke format STL sebagai representasi visual digital twin akustik. Pada penelitian ini, model STL hanya berfungsi sebagai media visualisasi geometri ruang, sedangkan proses simulasi akustik dilakukan menggunakan model *shoebox room* pada Pyroomacoustics. Model *shoebox* dibangun berdasarkan dimensi ruang hasil pengukuran dan parameter koefisien absorpsi material sehingga mampu merepresentasikan karakteristik akustik ruang dengan kompleksitas komputasi yang lebih rendah..

Meskipun model STL merepresentasikan bentuk ruang aktual, proses simulasi akustik dilakukan menggunakan pendekatan *Shoebox Room* pada Pyroomacoustics dengan dimensi ruang 13,64 m × 14,80 m × 4,50 m. Pendekatan ini dipilih untuk mengurangi kompleksitas komputasi dan menyesuaikan keterbatasan sumber daya perangkat yang digunakan. Dengan demikian, model STL digunakan untuk visualisasi *digital twin*, sedangkan model *Shoebox* digunakan untuk menghitung distribusi SPL pada ruang utama



Gambar 4. 2 Model Ruang 3D *Shoebox*

masjid.

2. Konfigurasi Material Akustik

Konfigurasi material akustik pada model digital twin disusun berdasarkan hasil identifikasi material interior yang telah dijelaskan pada Tabel 4.2. Setiap permukaan diberi nilai koefisien absorpsi sesuai material dominan sehingga karakteristik penyerapan bunyi pada model mendekati kondisi aktual ruang. Konfigurasi material yang digunakan dalam simulasi disajikan pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Konfigurasi material akustik dalam simulasi

Permukaan	Material dominan	Koefisien absorpsi 1 kHz	Catatan
-----------	------------------	--------------------------	---------

Lantai	Karpet berat di atas beton	0,45	Weighted average lantai
Dinding	Campuran bata, kaca, kayu, granit	0,02	Referensi literatur
Plafon	Campuran gypsum dan beton	0,02	Referensi literatur

Nilai rata-rata tertimbang (weighted average) digunakan untuk menyederhanakan konfigurasi tanpa kehilangan makna fisik utama.

3. Kalibrasi Koefisien Absorpsi Material

Sebelum proses validasi dilakukan, koefisien absorpsi material pada model digital twin dikalibrasi untuk memperoleh kesesuaian yang lebih baik antara hasil simulasi dan hasil pengukuran lapangan. Kalibrasi dilakukan dengan membandingkan nilai Sound Pressure Level (SPL) hasil simulasi dan pengukuran pada 17 titik penerima menggunakan indikator Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE), dan koefisien korelasi *Pearson*.

Kalibrasi difokuskan pada koefisien absorpsi lantai, sedangkan koefisien absorpsi dinding dan plafon dipertahankan tetap. Hal ini karena material dinding dan plafon memiliki nilai absorpsi yang relatif konsisten berdasarkan referensi literatur, sedangkan nilai absorpsi karpet pada lantai memiliki variasi yang lebih besar akibat perbedaan jenis, ketebalan, dan kondisi pemasangan. Oleh karena itu, lantai dipilih sebagai parameter yang dikalibrasi.

Proses kalibrasi dilakukan dengan pendekatan single-parameter calibration, yaitu mengubah koefisien absorpsi lantai secara bertahap dari 0,37, 0,40, 0,42, hingga 0,45, sementara parameter lainnya dipertahankan tetap. Pada setiap iterasi dilakukan simulasi ulang dan hasilnya dibandingkan dengan data pengukuran lapangan. Hasil kalibrasi disajikan pada Tabel 4.5.

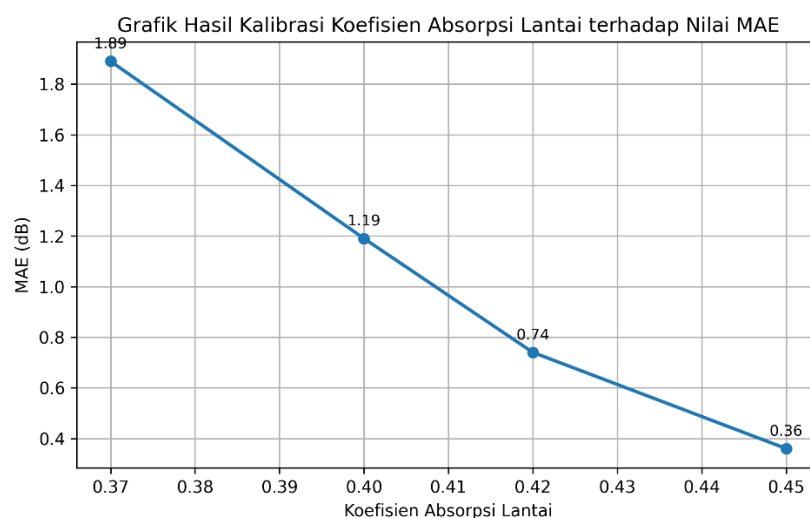
Tabel 4. 5 Hasil Kalibrasi Koefisien Absorpsi Material

Percobaan	Koefisien Lantai	Koefisien Dinding	Koefisien Plafon	MAE (dB)	RMSE (dB)	<i>Pearson</i> (r)
1	0,37	0,02	0,02	1,89	1,96	0,8470
2	0,40	0,02	0,02	1,19	1,28	0,8840
3	0,42	0,02	0,02	0,74	0,87	0,8896

4	0,45	0,02	0,02	0,36	0,43	0,9131
---	------	------	------	------	------	--------

Berdasarkan hasil pada Tabel 4.5, peningkatan koefisien absorpsi lantai memberikan peningkatan tingkat kesesuaian antara hasil simulasi dan hasil pengukuran lapangan. Nilai MAE mengalami penurunan dari 1,89 dB menjadi 0,36 dB, sedangkan nilai RMSE menurun dari 1,96 dB menjadi 0,43 dB. Pada saat yang sama, nilai koefisien korelasi *Pearson* meningkat dari 0,8470 menjadi 0,9131, yang menunjukkan bahwa pola distribusi SPL hasil simulasi semakin mendekati kondisi aktual.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa perubahan koefisien absorpsi lantai memberikan pengaruh yang signifikan terhadap akurasi model digital twin. Nilai koefisien absorpsi lantai sebesar 0,45 menghasilkan tingkat kesesuaian terbaik terhadap data pengukuran lapangan, sehingga nilai tersebut digunakan sebagai parameter akhir pada proses simulasi dan validasi model digital twin. Untuk memperjelas pengaruh perubahan koefisien absorpsi lantai terhadap tingkat akurasi model, hasil kalibrasi divisualisasikan dalam bentuk grafik sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4. 3 Grafik Hubungan Koefisien Absorpsi Lantai terhadap Nilai MAE

Berdasarkan Tabel 4.5 dan Gambar 4.3, peningkatan koefisien absorpsi lantai diikuti dengan penurunan nilai MAE secara bertahap. Nilai MAE berkurang dari 1,89 dB pada koefisien absorpsi 0,37 menjadi 0,36 dB pada koefisien absorpsi 0,45. Tren tersebut menunjukkan bahwa penyesuaian koefisien absorpsi lantai meningkatkan tingkat kesesuaian antara hasil simulasi dan hasil pengukuran lapangan.

Selain itu, nilai RMSE juga mengalami penurunan dari 1,96 dB menjadi 0,43 dB, sedangkan koefisien korelasi *Pearson* meningkat dari 0,8470 menjadi 0,9131. Hasil ini menunjukkan bahwa proses kalibrasi tidak hanya mengurangi tingkat kesalahan simulasi, tetapi juga meningkatkan kesesuaian pola distribusi SPL terhadap kondisi aktual ruang.

Berdasarkan hasil tersebut, koefisien absorpsi lantai sebesar 0,45 dipilih sebagai parameter akhir karena memberikan tingkat akurasi terbaik. Nilai ini kemudian digunakan pada seluruh proses simulasi dan validasi model digital twin pada penelitian ini.

4. Posisi Sumber dan Penerima dalam Model

Posisi sumber suara pada model *digital twin* ditentukan berdasarkan konfigurasi sistem tata suara yang digunakan di ruang utama Masjid Al-Muhajirin. Sebanyak tujuh sumber suara (S1–S7) didefinisikan sesuai posisi speaker eksisting yang terpasang pada ruangan. Selain itu, model menggunakan 17 titik penerima (P1–P17) yang ditempatkan pada area depan, tengah, belakang, dan sudut ruangan sesuai dengan posisi pengukuran lapangan. Seluruh titik penerima didefinisikan pada ketinggian 1,2 m dari lantai untuk merepresentasikan posisi telinga jamaah saat berdiri. Koordinat lengkap sumber suara dan titik penerima disajikan pada Lampiran 4 .

C. Hasil Simulasi Akustik Konfigurasi Baseline

1. Distribusi SPL Hasil Simulasi

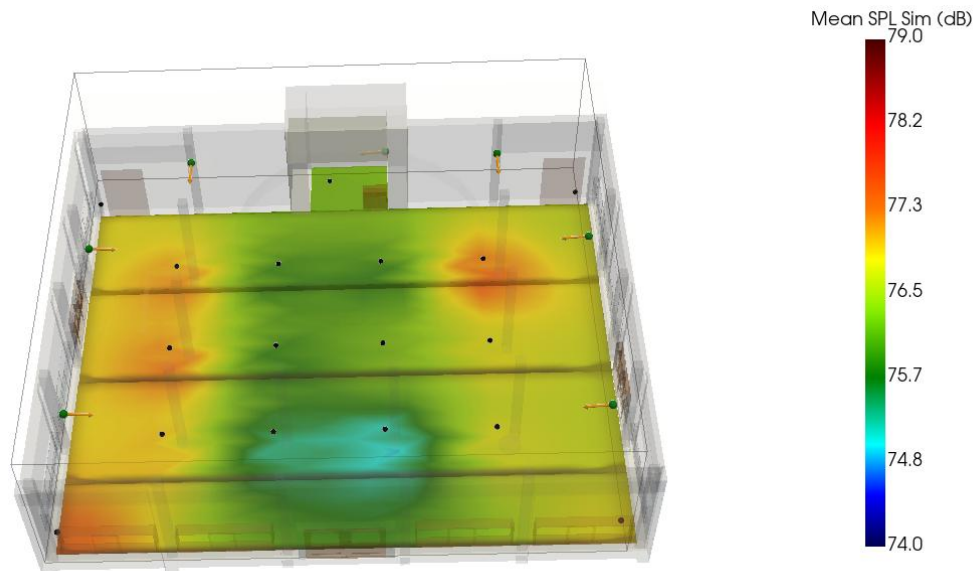
Simulasi akustik dilakukan menggunakan Pyroomacoustics dengan konfigurasi parameter sebagaimana dijelaskan pada Bab III. Simulasi menghasilkan nilai *Sound Pressure Level* (SPL) pada 17 titik penerima yang selanjutnya dibandingkan dengan hasil pengukuran lapangan. Hasil simulasi ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Hasil simulasi SPL konfigurasi baseline

No	Titik	SPL (dB)	simulasi	SPL terukur (dB)	Error (Sim – Ukur) (dB)
1	P1	75.70		76.13	0.43
2	P2	77.47		77.20	-0.27
3	P3	75.67		75.77	0.10
4	P4	75.67		75.33	0.02
5	P5	78.07		77.50	-0.57
6	P6	77.94		77.35	-0.59
7	P7	75.77		75.75	-0.02
8	P8	76.53		76.06	--0.47
9	P9	77.16		76.73	-0.43
10	P10	77.13		76.97	-0.16

11	P11	74.80	75.23	0.43
12	P12	74.43	74.87	0.44
13	P13	77.13	76.70	0.10
14	P14	76.63	76.73	0.25
15	P15	76.27	76.68	0.71
16	P16	75.97	75.68	0.71
17	P17	76.90	77.39	0.49
MAE				0.35 dB

Berdasarkan Tabel 4.5, nilai SPL hasil simulasi berada pada rentang 74,43 dB hingga 78,07 dB. Nilai SPL tertinggi diperoleh pada titik P5 sebesar 78,07 dB, sedangkan nilai terendah berada pada titik P12 sebesar 74,43 dB. Perbandingan antara hasil simulasi dan hasil pengukuran menunjukkan nilai Mean Absolute Error (MAE) sebesar 0,35 dB, dengan seluruh nilai error berada pada rentang kurang dari 1 dB. Hasil tersebut menunjukkan bahwa distribusi SPL hasil simulasi memiliki tingkat kesesuaian yang tinggi terhadap kondisi aktual ruang.



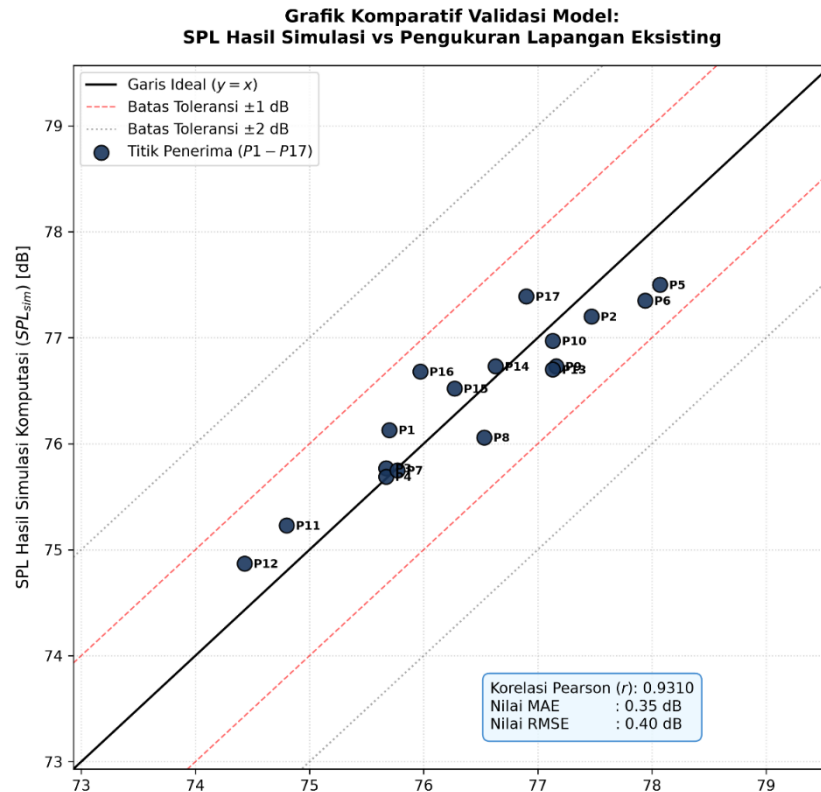
Gambar 4. 4 Heatmap Hasil Simulasi

Berdasarkan Gambar 4.3, sebagian besar area ruang utama berada pada rentang 75–77 dB, yang menunjukkan distribusi tekanan suara relatif merata pada area jamaah. Nilai SPL yang lebih tinggi berada di sekitar posisi sumber suara, sedangkan area tengah hingga belakang ruangan mengalami sedikit penurunan tingkat tekanan suara. Namun demikian, perbedaan tersebut masih berada dalam rentang yang relatif kecil sehingga distribusi suara pada ruang utama dapat dikatakan cukup merata.

2. Validasi Model *Digital Twin*

a. Analisis Error dan Grafik Hubungan SPL

Validasi model *digital twin* dilakukan dengan membandingkan nilai Sound Pressure Level (SPL) hasil simulasi dan hasil pengukuran lapangan pada 17 titik penerima (P1–P17). Selain menggunakan MAE, validasi juga dilakukan melalui analisis korelasi untuk mengetahui tingkat kesesuaian antara data simulasi dan data pengukuran.



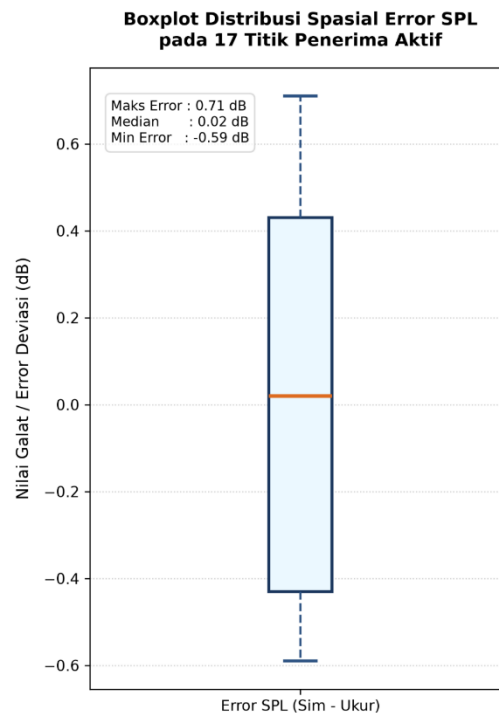
Gambar 4. 5 Hasil Pengukuran Simulasi dengan Data Lapangan

Gambar 4.4 menunjukkan hubungan antara SPL hasil simulasi dan SPL hasil pengukuran. Sebagian besar titik data berada di sekitar garis referensi $y = x$ yang menunjukkan bahwa nilai simulasi memiliki kedekatan yang tinggi dengan nilai pengukuran lapangan. Hasil perhitungan menunjukkan nilai MAE sebesar 0,35 dB dan koefisien korelasi *Pearson* sebesar 0,9310. Nilai tersebut menunjukkan bahwa model mampu merepresentasikan distribusi SPL aktual dengan tingkat kesalahan yang rendah serta hubungan yang sangat kuat antara hasil simulasi dan hasil pengukuran.

b. Analisis Distribusi Error Menggunakan Boxplot

Selain menggunakan nilai MAE dan koefisien korelasi *Pearson*, distribusi error hasil validasi juga dianalisis menggunakan boxplot. Visualisasi ini digunakan untuk menggambarkan penyebaran nilai error antara hasil simulasi dan hasil pengukuran pada 17 titik penerima. Analisis boxplot memberikan informasi mengenai nilai median, rentang interkuartil (*interquartile range*),

serta keberadaan nilai pencilan (*outlier*) sehingga dapat digunakan untuk mengevaluasi konsistensi hasil validasi model *digital twin*.



Gambar 4. 6 Boxplot Distribusi Error SPL Hasil Validasi

Berdasarkan Gambar 4.5, distribusi error hasil validasi berada pada rentang $-0,59$ dB hingga $0,71$ dB dengan nilai median sebesar $0,02$ dB yang mendekati nol. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi memiliki tingkat kesalahan yang relatif kecil terhadap hasil pengukuran lapangan. Selain itu, tidak terdapat nilai pencilan (*outlier*), sehingga menunjukkan bahwa model *digital twin* menghasilkan tingkat kesalahan yang konsisten pada seluruh titik penerima. Hasil analisis boxplot ini mendukung nilai MAE sebesar $0,35$ dB dan koefisien korelasi *Pearson* sebesar $0,9310$, sehingga model *digital twin* dapat dinyatakan memiliki tingkat akurasi yang baik dalam merepresentasikan distribusi SPL pada ruang utama Masjid Al-Muhajirin.

c. Pembahasan Validasi

Hasil validasi menunjukkan bahwa model *digital twin* yang dikembangkan mampu merepresentasikan kondisi akustik ruang utama Masjid Al-Muhajirin dengan baik. Meskipun menggunakan pendekatan *Shoebox Room*, model yang dibangun berdasarkan dimensi ruang, konfigurasi sumber suara, posisi titik penerima, dan karakteristik material menghasilkan tingkat kesesuaian yang tinggi terhadap hasil pengukuran lapangan.

Hal tersebut ditunjukkan oleh nilai *MAE* sebesar $0,35$ dB, *RMSE* sebesar $0,40$ dB, dan koefisien korelasi *Pearson* sebesar $0,9310$. Selain itu, hasil analisis scatter plot dan boxplot menunjukkan bahwa distribusi error relatif

kecil, tidak terdapat *outlier* yang signifikan, serta hubungan antara hasil simulasi dan hasil pengukuran bersifat kuat dan konsisten. Dengan demikian, model *digital twin* yang dikembangkan dapat dinyatakan valid dan mampu merepresentasikan distribusi SPL pada ruang utama Masjid Al-Muhajirin.

D. Pembahasan Hasil Penelitian

1. Kinerja Model *Digital Twin*

Hasil validasi menunjukkan bahwa model *digital twin* akustik yang dikembangkan mampu merepresentasikan kondisi akustik ruang utama Masjid Al-Muhajirin dengan tingkat akurasi yang baik. Perbandingan antara hasil simulasi dan hasil pengukuran lapangan pada 17 titik penerima menghasilkan nilai Mean Absolute Error (MAE) sebesar 0,35 dB dan koefisien korelasi *Pearson* sebesar 0,9310. Nilai tersebut menunjukkan bahwa model memiliki tingkat kesesuaian yang tinggi terhadap kondisi aktual ruang.

Keberhasilan model dalam merepresentasikan distribusi SPL menunjukkan bahwa parameter geometri ruang, karakteristik material, konfigurasi sumber suara, dan posisi titik penerima yang digunakan dalam simulasi telah mampu menggambarkan perilaku propagasi suara di dalam ruangan secara memadai. Hasil ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa akurasi simulasi akustik sangat dipengaruhi oleh ketepatan representasi geometri ruang dan parameter material yang digunakan.

2. Analisis Distribusi SPL

Hasil simulasi menunjukkan bahwa distribusi SPL pada ruang utama Masjid Al-Muhajirin berada pada rentang 74,43 dB hingga 78,07 dB. Rentang tersebut menunjukkan bahwa variasi tingkat tekanan suara antar titik penerima relatif kecil sehingga distribusi suara pada ruang utama masjid dapat dikatakan cukup merata.

Visualisasi heatmap hasil simulasi juga menunjukkan bahwa sebagian besar area ruang utama berada pada rentang SPL 75–77 dB. Pola distribusi yang dihasilkan simulasi memiliki kecenderungan yang serupa dengan hasil pengukuran lapangan sehingga memperkuat validitas model *digital twin* yang dikembangkan.

3. Implikasi Penelitian

Model *digital twin* yang berhasil dikembangkan dalam penelitian ini dapat digunakan sebagai media analisis kondisi akustik ruang utama masjid secara virtual. Model yang telah tervalidasi memungkinkan proses evaluasi distribusi suara dilakukan tanpa harus melakukan pengukuran lapangan secara berulang. Selain itu, model ini dapat menjadi dasar bagi penelitian lanjutan yang

berkaitan dengan evaluasi sistem audio maupun pengembangan simulasi akustik pada ruang ibadah.

4. Ringkasan Hasil Utama

Tabel 4.5 merangkum hasil utama yang diperoleh selama penelitian, mulai dari karakterisasi akustik ruang, pembangunan model *digital twin*, pelaksanaan simulasi, hingga proses validasi model terhadap data pengukuran lapangan.

Tabel 4. 6 Ringkasan hasil utama penelitian

Aspek	Hasil
Objek penelitian	Ruang utama Masjid Al-Muhajirin Sedayu
Dimensi ruang	13,64 m × 14,80 m × 4,50 m
Volume ruang	908,42 m ³
Material dominan	Karpet berat di atas beton, campuran bata, kaca, kayu, granit, gypsum, dan beton
Jumlah titik pengukuran SPL	17 titik penerima
Standar deviasi SPL	0,96 dB
Model <i>Digital Twin</i>	<i>Shoebox</i> Room berbasis Pyroomacoustics
Metode simulasi	<i>Ray tracing</i> dan <i>Image Source Model</i>
Rentang SPL simulasi	74,43–78,07 dB
Nilai MAE validasi	0,35 dB
Korelasi <i>Pearson</i>	0,9310
Hasil validasi	Model dinyatakan valid
Luaran penelitian	<i>Digital Twin</i> akustik tervalidasi untuk analisis distribusi SPL pada ruang utama masjid

Berdasarkan Tabel 4.5, model *digital twin* akustik yang dikembangkan mampu merepresentasikan kondisi akustik ruang utama Masjid Al-Muhajirin Sedayu dengan baik. Hasil simulasi menunjukkan distribusi SPL sebesar 74,43–78,07 dB. Validasi menghasilkan nilai MAE 0,35 dB dan koefisien korelasi Pearson 0,9310, yang menunjukkan tingkat kesesuaian yang tinggi antara hasil simulasi dan pengukuran lapangan. Dengan demikian, model dinyatakan valid untuk analisis distribusi SPL pada ruang utama masjid

BAB V KESIMPULAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Karakterisasi akustik ruang utama Masjid Al-Muhajirin berhasil dilakukan melalui pengukuran dimensi ruang, identifikasi material interior, dan pengukuran Sound Pressure Level (SPL) pada 17 titik penerima. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa ruang utama memiliki dimensi 13,64 m × 14,80 m × 4,50 m dengan volume sebesar 908,42 m³ serta didominasi oleh material yang cenderung bersifat reflektif terhadap gelombang suara.
2. Model *Digital Twin* akustik berhasil dibangun menggunakan pendekatan simulasi *ray tracing* dan image source pada Pyroomacoustics berdasarkan data geometri ruang, karakteristik material, konfigurasi sumber suara, dan posisi titik penerima. Model yang dikembangkan mampu merepresentasikan kondisi akustik ruang utama Masjid Al-Muhajirin dalam bentuk simulasi distribusi Sound Pressure Level (SPL).
3. Hasil validasi menunjukkan bahwa model simulasi memiliki tingkat kesesuaian yang tinggi terhadap kondisi aktual. Perbandingan antara hasil simulasi dan hasil pengukuran lapangan pada 17 titik penerima menghasilkan nilai Mean Absolute Error (MAE) sebesar 0,35 dB dan koefisien korelasi *Pearson* sebesar 0,9310. Hasil tersebut menunjukkan bahwa model *Digital Twin* yang dikembangkan valid dan dapat digunakan sebagai media analisis distribusi Sound Pressure Level (SPL) pada ruang utama masjid.

B. Saran

Berdasarkan kesimpulan di atas, beberapa saran yang dapat diajukan adalah sebagai berikut.

1. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan model *digital twin* dengan geometri ruang yang lebih rinci, sehingga elemen-elemen arsitektural seperti kolom, kubah, bukaan, dan ornamen interior dapat direpresentasikan secara lebih akurat untuk meningkatkan tingkat kesesuaian simulasi terhadap kondisi nyata.

2. Analisis akustik pada penelitian berikutnya dapat diperluas dengan menambahkan parameter akustik lain, seperti Reverberation Time (RT60), Speech Transmission Index (STI), dan Clarity (C50/C80), sehingga evaluasi kualitas akustik ruang masjid dapat dilakukan secara lebih komprehensif.
3. Model *Digital Twin* yang telah dikembangkan dalam penelitian ini dapat dimanfaatkan sebagai dasar untuk melakukan simulasi berbagai skenario konfigurasi sistem audio masjid, seperti perubahan posisi sumber suara, jumlah speaker, maupun karakteristik material ruang, tanpa perlu melakukan pengujian langsung di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Rosad, A. Yudhana, and T. Sutikno, “Zoned Audio Distribution: Systematic Review and Optimization Framework in Mosque,” *ELKHA*, vol. 17, no. 2, pp. 148–154, Oct. 2025, doi: 10.26418/elkha.v17i2.96757.
- [2] Y. Yani, “Penilaian kualitas akustik masjid Raudhaturrahmah Padang Tiji dengan menggunakan simulasi Ecotect,” *Jurnal Arsitektur Pendapa*, vol. 4, no. 1, pp. 19–27, Mar. 2021, doi: 10.37631/pendapa.v4i1.234.
- [3] G. Anindita, E. Setiawan, U. Hanif, and A. R. Ardiansyah, “Analisis Karakteristik ‘Akustik Ruang’ pada Tempat Peribadatan Informasi Akustik Ruang,” *Jurnal Teknologi Maritim*, vol. 8, no. 1, pp. 1–13, Oct. 2024, doi: 10.35991/jtm.v8i1.46.
- [4] A. Adawiyah, A. Rahman, S. Almaniar, and T. Rahmadiyah, “Implementasi Digital Twin dalam Manajemen Peralatan Laboratorium dengan Studi Kasus pada Laboratorium Teknik Industri,” *Laboratium Sains dan teknologi*, vol. 4, no. 2, pp. 51–55, Nov. 2024, doi: 10.33369/pelastek.v4i2.41672.
- [5] B. P. Jati, D. Nugroho, and I. Widiastuti, “Literasi Sistem Audio melalui Revitalisasi, Pembenahan dan Optimisasi Audio di Masjid At-Taqwa Sronol Bumi Indah,” *Indonesian Journal of Community Services*, vol. 6, no. 2, p. 108, Nov. 2024, doi: 10.30659/ijocs.6.2.108-118.
- [6] A. Nowoświat and M. Olechowska, “Experimental Validation of the Model of Reverberation Time Prediction in a Room,” *Buildings*, vol. 12, no. 3, Mar. 2022, doi: 10.3390/buildings12030347.
- [7] W. Saputra, “Evaluasi Akustik Ruang Salat Masjid Raya Pinrang,” 2025.
- [8] M. Cairoli and L. C. Tagliabue, “Digital Twin for Acoustics and Stage Craft Facility Management in a Multipurpose Hall,” *Acoustics*, vol. 5, no. 4, pp. 909–927, Dec. 2023, doi: 10.3390/acoustics5040053.
- [9] P. Kalisalvan, M. S. Ab Karim, and S. N. Musa, “Design and Evaluation of Noise Simulation Algorithm Using MATLAB Ray Tracing Engine for Noise Assessment and Prediction,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 15, no. 3, Feb. 2025, doi: 10.3390/app15031009.
- [10] T. Supriyadi, A. Ashari, S. Slameta, T. Utomo, and R. Solihin, “Perancangan dan Implementasi Sistem Tata Suara Masjid dengan Dua Posisi Mimbar yang berbeda,” *Jurnal Pengabdian Masyarakat Sultan Indonesia*, vol. 2, no. 1, pp. 35–44, Mar. 2025, doi: 10.58291/abdisultan.v2i1.346.
- [11] G. Anindita, E. Setiawan, U. Hanif, and A. R. Ardiansyah, “Analisis Karakteristik ‘Akustik Ruang’ pada Tempat Peribadatan Informasi Akustik

- Ruang,” *Jurnal Teknologi Maritim*, vol. 8, no. 1, pp. 1–13, Oct. 2024, doi: 10.35991/jtm.v8i1.46.
- [12] D. A. A. Masih, N. K. Jalal, M. N. A. Mohammed, and S. A. Mustafa, “Assessment of Acoustical Characteristics for Recent Mosque Buildings in Erbil City of Iraq,” *ARO-The Scientific Journal of Koya University*, vol. 9, no. 1, pp. 51–66, Jun. 2021, doi: 10.14500/aro.10784.
 - [13] D. H. Kassim, A. Putra, M. J. M. Nor, and N. S. Muhammad, “Effect of pyramidal dome geometry on the acoustical characteristics in a mosque,” *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, vol. 7, no. 1, pp. 1127–1133, Dec. 2014, doi: 10.15282/jmes.7.2014.11.0109.
 - [14] P. Kalisalvan, M. S. Ab Karim, and S. N. Musa, “Design and Evaluation of Noise Simulation Algorithm Using Matlab Ray Tracing Engine for Noise Assessment and Prediction,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 15, no. 3, Feb. 2025, doi: 10.3390/app15031009.
 - [15] A. D. Pierce, “Diffraction of sound around corners and over wide barriers*.” [Online]. Available: <http://acousticalsociety.org/content/terms>.
 - [16] P. Kavipriya, C. Dhanalakshmi, L. Nagarajan, C. Kayalvizhi, S. Year Student, and A. Professor, “Kapok and Cotton Blend non -Moven Fabric,” *International Journal Of Novel Research And Development*, Jul. 2024, [Online]. Available: www.ijnrd.org
 - [17] M. H. Heruputra, W. Widyarko, and D. Susanto, “Uncovering the Influence of Mosque Openness on Speech Intelligibility: A Simulation Study,” *Journal of Islamic Architecture*, vol. 8, no. 4, pp. 998–1011, Dec. 2025, doi: 10.18860/jia.v8i4.23828.
 - [18] R. Haasjes, “Towards an active acoustic anechoic chamber,” University of Twente, Enschede, The Netherlands, 2025. doi: 10.3990/1.9789036562836.
 - [19] M. Versaci, M. Cacciola, F. Laganà, and G. Angiulli, “Analysis of Acoustic Wave Propagation in Defective Concrete: Evolutionary Modeling, Energetic Coercivity, and Defect Classification,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 15, no. 21, Nov. 2025, doi: 10.3390/app152111378.
 - [20] Autio and Hanna, “Room Acoustic Ray-Tracing Understanding, evaluating and expanding the toolset- Tracing,” Mar. 2024.
 - [21] A. G. Prinn, “A Review of Finite Element Methods for Room Acoustics,” Jun. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/acoustics5020022.
 - [22] T. Okuzono, “Computational Accuracy and Efficiency of Room Acoustics Simulation Using a Frequency Domain FEM with Air Absorption: 2D Study,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.3390/app14010194.

- [23] G. Götz, D. G. Nielsen, S. Guðjónsson, and F. Pind, “*Room-acoustic simulations as an alternative to measurements for audio-algorithm evaluation*,” Sep. 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3637534.
- [24] Y. Mousavi, Z. Gharineiat, A. A. Karimi, K. McDougall, A. Rossi, and S. Gonizzi Barsanti, “*Digital Twin Technology in Built Environment: A Review of Applications, Capabilities and Challenges*,” Oct. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/smartcities7050101.
- [25] W. Yu, G. Liu, L. Zhu, and W. Yu, “*Digital Twin: A Literature Review of Concepts, Technologies and Applications*,” vol. 11, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2024.0429000.
- [26] C. Wang and J. Kang, “*Development of acoustic computer simulation for performance spaces: A systematic review and meta-analysis*,” Oct. 01, 2022, *Tsinghua University*. doi: 10.1007/s12273-022-0901-4.
- [27] M. E. Iliuță, M. A. Moiescu, E. Pop, A. D. Ionita, S. I. Caramihai, and T. C. Mitulescu, “*Digital Twin—A Review of the Evolution from Concept to Technology and Its Analytical Perspectives on Applications in Various Fields*,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 13, Jul. 2024, doi: 10.3390/app14135454.
- [28] M. Cairolì and L. C. Tagliabue, “*Digital Twin for Acoustics and Stage Craft Facility Management in a Multipurpose Hall*,” *Acoustics*, vol. 5, no. 4, pp. 909–927, Dec. 2023, doi: 10.3390/acoustics5040053.
- [29] Z. Piao *et al.*, “*Low-Frequency Piezoelectric Hydrophone with High Sensitivity Based on a Piston Structure*,” *Acoustics*, vol. 8, no. 1, p. 15, Feb. 2026, doi: 10.3390/acoustics8010015.
- [30] Y. Zang and Q. Kong, “*GSound-SIR: A Spatial Impulse Response Ray-Tracing and High-order Ambisonic Auralization Python Toolkit*,” Mar. 2025, doi: 10.48550/arXiv.2503.17866.
- [31] V. M. S. ZoBell, “*UC San Diego UC San Diego Electronic Theses and Dissertations Title Moving Cargo, Keeping Whales: Investigating Solutions for Ocean Noise Pollution*,” 2023. [Online]. Available: <https://escholarship.org/uc/item/2508k0b1>

LAMPIRAN 1 Data Noise Floor Ruangan

Langkah Persiapan:

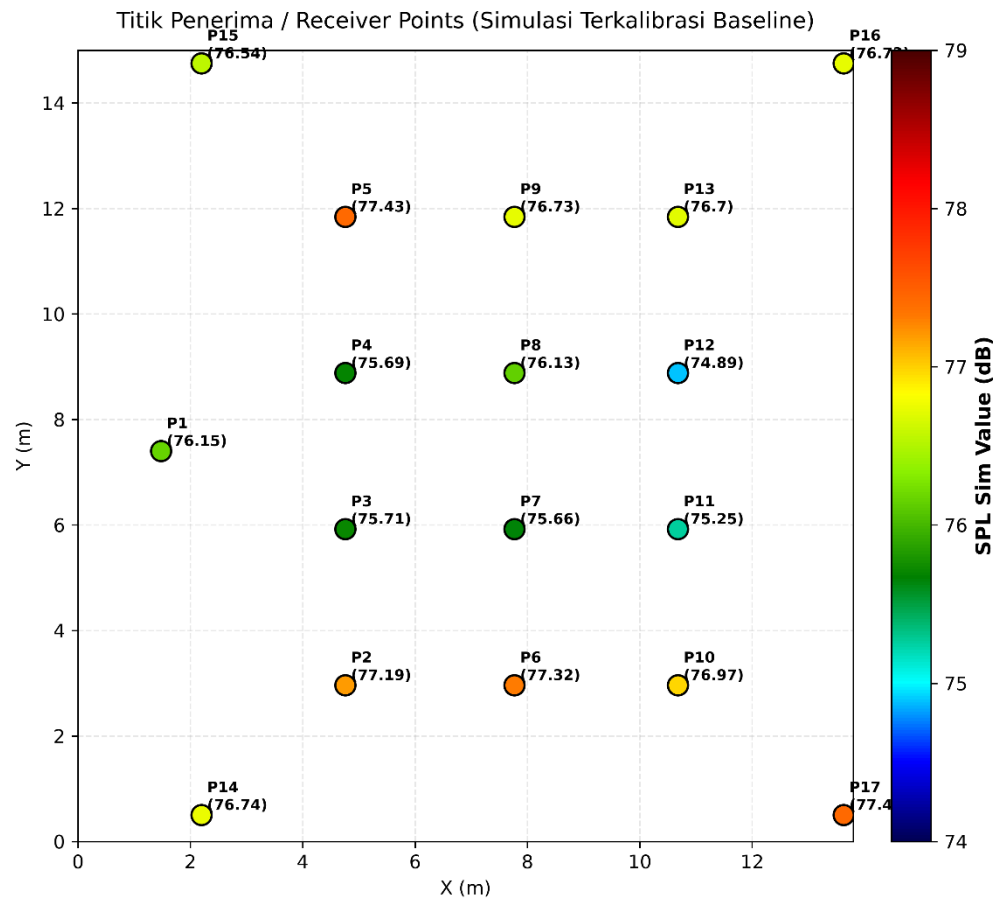
1. Pastikan ruang utama masjid dalam keadaan kosong, tidak ada jamaah atau aktivitas lain di area pengukuran.
2. Tutup semua pintu dan jendela yang terhubung ke luar ruangan untuk mengurangi kebisingan eksternal.
3. Matikan seluruh peralatan yang berpotensi menghasilkan noise: AC, kipas angin, exhaust fan, TV, komputer, dan perangkat elektronik lain.
4. Ukur noise floor (ambient noise) ruangan:
 - o Pastikan sistem PA dan sumber suara lain dalam keadaan mati.
 - o Pilih 13 titik representatif (depan, tengah, belakang).
 - o Ukur SPL di tiap titik, tunggu bacaan stabil, catat nilai masing-masing titik.
 - o Hitung rata-rata noise floor; target ≤ 40 dB.
5. Dokumentasikan kondisi ruangan dengan foto/video (tampak umum ruangan, pintu/jendela tertutup, contoh titik pengukuran).
6. Catat tanggal, jam, dan kondisi lingkungan sekitar masjid; pilih waktu relatif tenang (misalnya subuh atau malam hari, bukan jam sibuk).

Tabel Lampiran 1 Lembar Pengukuran Noise Floor

No	Hasil
Tanggal / Waktu	Selasa, 17 Februari 2026/ 08:30
Lokasi Ruangan	Ruang utama Masjid Al-Muhajirin
Kondisi Ruangan (Jamaah/Furnitur)	Ada Partisi ruang ibadah
Pintu & Jendela	Semua tertutup

Status Peralatan Pengganggu (AC, kipas, dll.)	AC, kipas, TV, komputer, perangkat lain: MATI
Titik Cek Noise Floor	13 titik penerima
Hasil Noise Floor per Titik (dB)	P1: 38,2 dB ; P2: 37,5 dB ; P3: 38,8 dB ; P4: 38,1 dB ; P5: 39,4 dB ; P6: 39,0 dB ; P7: 40,0 dB ; P8: 39,6 dB ; P9: 37,8 dB ; P10: 37,2 dB ; P11: 38,5 dB ; P12: 37,9 dB ; P13: 38,0 dB.
Rata-rata Noise Floor (dB)	38,46 dB
Status Target Noise Floor (< 40 dB)	Tidak
Catatan Waktu / Kondisi Lingkungan	Pembangunan masjid/suara

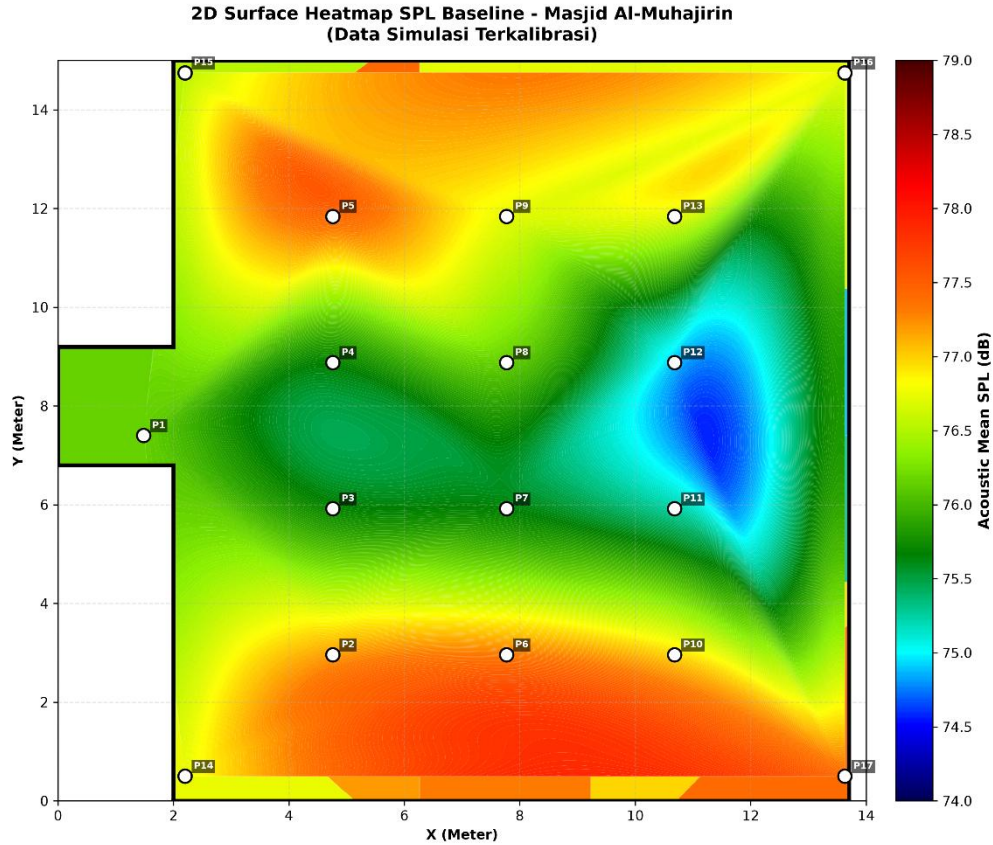
LAMPIRAN 2 Pemetaan 17 Ttitik penerima suara



LAMPIRAN 3 Geometri 3D (SketchUp)



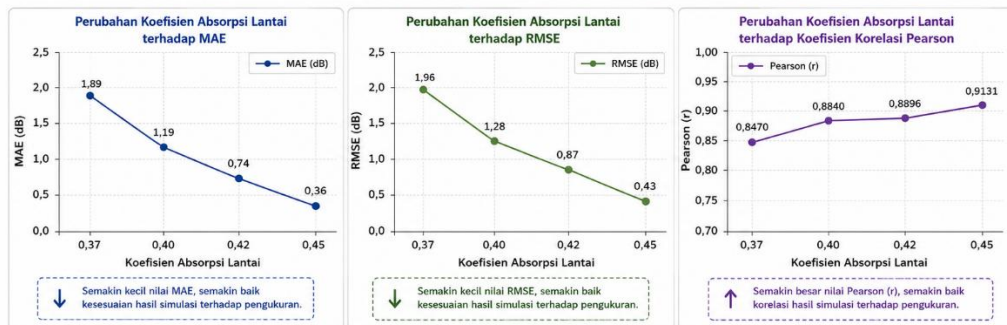
LAMPIRAN 4 Hasil Simulasi Akustik



Hasil Kalibrasi Koefisien Absorpsi Lantai

(Koefisien Dinding = 0,02 | Koefisien Plafon = 0,02)

Percobaan	Koefisien Absorpsi Lantai	Koefisien Absorpsi Dinding	Koefisien Absorpsi Plafon	MAE (dB)	RMSE (dB)	Pearson (r)
1	0,37	0,02	0,02	1,89	1,96	0,8470
2	0,40	0,02	0,02	1,19	1,28	0,8840
3	0,42	0,02	0,02	0,74	0,87	0,8896
4	0,45	0,02	0,02	0,36	0,43	0,9131



★ **KESIMPULAN** Peningkatan koefisien absorpsi lantai dari 0,37 hingga 0,45 secara konsisten menurunkan nilai MAE dan RMSE, serta meningkatkan koefisien korelasi Pearson. Koefisien absorpsi lantai sebesar 0,45 memberikan tingkat kesesuaian terbaik (MAE = 0,36 dB, RMSE = 0,43 dB, Pearson (r) = 0,9131), sehingga digunakan sebagai parameter akhir pada simulasi dan validasi model digital twin.

LAMPIRAN 5 Data SLM

No	1
Tanggal / Waktu	17 Februari 2026
Jenis Peralatan	Sound Level Meter (SLM) standar
Merek / Model	Benetech/
Nomor Seri	GT1355A
Nilai Referensi (dB)	94,0
Pembacaan SLM (dB)	94,6
Offset / Koreksi (dB)	0,6
Kondisi Lingkungan	28,4 °C, 65% RH
Catatan	Stabilisasi menit, fluktuasi bacaan < 0,2 dB
Petugas	Uswatun

LAMPIRAN 6 Karakteristik Ruangan

Prosedur:

1. Tentukan titik acuan koordinat (0,0,0)(0,0,0) di sudut depan kiri ruang utama, sedekat mungkin dengan mihrab namun tetap pada batas bidang lantai.
2. Ukur dimensi ruangan menggunakan meter roll:
 - Panjang ruang (sumbu X) sepanjang arah memanjang saf (depan–belakang).
 - Lebar ruang (sumbu Y) sepanjang arah melintang saf (kiri–kanan).
 - Tinggi plafon (sumbu Z) dari lantai ke plafon di beberapa titik, kemudian ambil nilai rata-rata.
3. Cocokkan hasil pengukuran dimensi dengan nilai yang digunakan di model simulasi *digital twin* (misalnya 13,64 m × 14,80 m × 4,5 m). Jika terdapat selisih yang signifikan antara kondisi aktual dan model simulasi, lakukan revisi parameter pada model atau catat perbedaan tersebut sebagai catatan khusus.
4. Buat sketsa layout ruangan di kertas atau software (misalnya grid sederhana) yang menampilkan: bentuk ruangan, posisi mihrab, dinding, pintu/jendela utama, posisi speaker eksisting, dan rencana posisi titik penerima P1–P17 dengan label yang jelas.
5. Pindahkan desain sketsa ke lantai ruangan dengan menandai posisi tiap titik P1–P17 menggunakan meja lipat, tulis label titik di dekat tanda, dan pastikan posisi sesuai koordinat yang nanti dipakai di simulasi.

Tabel Lampiran 2 Dokumentasi Pemetaan Grid Ruangan

Field	Isian Contoh
Tanggal / Waktu Pemetaan	02-02-2026 / 10:00
Nama Masjid	Masjid Al-Muhajirin, Sedayu, Bantul
Ruang yang Dipetakan	Ruang utama (main prayer hall)
Titik Acuan Koordinat (0,0,0)	Sudut depan kiri ruangan, sisi kiri dekat mihrab
Arah Sumbu X (Panjang)	Dari depan (mihrab) ke belakang saf
Arah Sumbu Y (Lebar)	Dari sisi kiri ke sisi kanan jamaah

Arah Sumbu Z (Tinggi)	Dari lantai ke plafon
Panjang Ruang Terukur (m)	13,64 m
Lebar Ruang Terukur (m)	14,80 m
Tinggi Plafon Rata-rata (m)	4,5 m
Alat Ukur Dimensi	HASSTON Roll Meter 3M (contoh)
Kesesuaian dengan Model Simulasi	Selisih ($< 0,9$ m) dipakai nilai model : 13,66 m x 14,81 x 4,52 m
Posisi Speaker Utama (Simbol & Deskripsi)	S1 di mihrab, kira-kira X = 1,18 m; Y = 9,10 m; Z = 2,10 m S2 di area depan kanan, kira-kira X = 2,00 m; Y = 12,36 m; Z = 2,70 m S3 di area dinding kanan, kira-kira X = 4,79 m; Y = 14,80 m; Z = 2,08 m S4 di area dinding kanan, kira-kira X = 10,69 m; Y = 14,80 m; Z = 2,08 m S5 di area dinding kiri, kira-kira X = 10,59 m; Y = 0,47 m; Z = 2,08 m S6 di area dinding kiri, kira-kira X = 4,79 m; Y = 0,54 m; Z = 2,08 m S7 di area depan sebelah kiri, kira-kira X = 2,05 m; Y = 3,38 m; Z = 2,70 m
Jumlah Titik Penerima	17 titik (P1–P17)
Cara Penandaan Fisik di Lantai	Meja Lipat

LAMPIRAN 7 Data Koordinat Titik Pengukuran Sound Pressure Level (SPL)

Prosedur Verifikasi Posisi:

1. Mulai dari titik acuan (0,0,0)(0,0,0) di sudut depan kiri ruangan (dekat mihrab) sebagai referensi semua pengukuran.
2. Untuk setiap titik penerima P1–P17:
 - Ukur jarak koordinat X dari dinding depan menggunakan Roll Meter.
 - Ukur jarak koordinat Y dari dinding kiri.
 - Tandai posisi di lantai dengan meja lipat.
 - Tulis label titik (P1, P2, ..., P17) di dekat tanda meja lipat.
 - Pasang tripod SLM, atur tinggi sehingga mikrofon tepat di ketinggian $Z = 1,2$ m dari lantai (posisi telinga jamaah duduk).
 - Ambil dokumentasi foto dari samping dan dari atas (jika memungkinkan) untuk setiap titik atau per kelompok titik.
3. Setelah semua titik ditandai, verifikasi kembali jarak antar titik (misal jarak P1–P2, P4–P5, dst.) untuk memastikan konsistensi dengan koordinat yang direncanakan di model simulasi.

Titik	X (m)	Y (m)	Z (m)	Zona	Cara Verifikasi di Lapangan
P1	1.48	7.40	1.2	Mihrab	Ukur 1.48 m dari dinding depan, 7.40 m dari dinding kiri; pasang tripod SLM setinggi 1,2 m
P2	4.76	2.96	1.2	Depan	Ukur 4.76 m dari dinding depan, 2.96 m dari dinding kiri; pasang tripod SLM setinggi 1,2 m
P3	4.76	5.92	1.2	Depan	Ukur 4.76 m dari dinding depan dan 5,92 m dari dinding kiri; pasang tripod SLM setinggi 1,2 m.
P4	4.76	8.88	1.2	Depan	Ukur 4.76 m dari dinding depan dan 8,88 m dari dinding kiri; pasang tripod SLM setinggi 1,2 m.

P5	4.76	11.84	1.2	Depan	Ukur 4.76 m dari dinding depan dan 11,84 m dari dinding kiri; pasang tripod SLM setinggi 1,2 m.
P6	7.77	2.96	1.2	Tengah	Ukur 7.77 m dari dinding depan dan 2,96 m dari dinding kiri; pasang tripod SLM setinggi 1,2 m.
P7	7.77	5.9	1.2	Tengah	Ukur 7.77 m dari dinding depan dan 5,90 m dari dinding kiri; pasang tripod SLM setinggi 1,2 m.
P8	7.77	8.88	1.2	Tengah	Ukur 7.77 m dari dinding depan dan 5,90 m dari dinding kiri; pasang tripod SLM setinggi 1,2 m.
P9	7.77	11.84	1.2	Tengah	Ukur 7.77 m dari dinding depan dan 5,90 m dari dinding kiri; pasang tripod SLM setinggi 1,2 m.
P10	10.68	2.96	1.2	Belakang	Ukur 10.68 m dari dinding depan dan 2,96 m dari dinding kiri; pasang tripod SLM setinggi 1,2 m.
P11	10.68	5.92	1.2	Belakang	Ukur 10.68 m dari dinding depan dan 5,92 m dari dinding kiri; pasang tripod SLM setinggi 1,2 m.
P12	10.68	8.88	1.2	Belakang	Ukur 10.68 m dari dinding depan dan 8,88 m dari dinding kiri; pasang tripod SLM setinggi 1,2 m.
P13	10.68	11.84	1.2	Belakang	Ukur 10.68 m dari dinding depan dan 11.84 m dari dinding kiri; pasang tripod SLM setinggi 1,2 m.
P14	1.80	0.5	1.2	Depan Pojok kiri	Ukur 1.80 m dari dinding depan dan 0.5 m dari dinding kiri; pasang tripod SLM setinggi 1,2 m.
P15	1.80	14.75	1.2	Depan Pojok kanan	Ukur 1.80 m dari dinding depan dan 14.75 m dari dinding kiri; pasang tripod SLM setinggi 1,2 m.
P16	13.60	14.75	1.2	Belakang Pojok kiri	Ukur 13.60 m dari dinding depan dan 14.75 m dari dinding kiri; pasang tripod SLM setinggi 1,2 m.

P17	13.60	0.5	1.2	Belakang PojoK Kanan	Ukur 13.60 m dari dinding depan dan 0.5 m dari dinding kiri; pasang tripod SLM setinggi 1,2 m.
Dokumentasi Pengukuran Titik : https://drive.google.com/drive/folders/1ig9JBNHZ-Fy2h0b9vqyfbVwkP-K-BAjY?usp=sharing					

LAMPIRAN 8 Data Konfigurasi Speaker pada Model *Digital Twin*

Konfigurasi Sistem PA:

1. Verifikasi terlebih dahulu posisi fisik speaker utama sistem PA eksisting di ruang utama masjid, pastikan sudah terpasang sesuai layout (dekat mihrab, menghadap area jamaah).
2. Ukur dan catat koordinat posisi speaker utama dalam sistem koordinat ruangan yang sama dengan titik penerima (titik acuan di sudut depan kiri):.
3. Sambungkan output audio dari laptop ke input amplifier PA menggunakan kabel audio yang sesuai , lalu pilih channel yang akan digunakan untuk sinyal uji.
4. Siapkan sinyal uji pada laptop:
 - Pilih sine wave 1 kHz untuk pengujian level dan referensi sederhana, atau
 - Gunakan pink noise bila ingin spektrum yang lebih mendekati sinyal ujaran dan menyebar merata di seluruh frekuensi.
 - Atur level output awal pada software pemutar/audio generator sekitar -20 dBFS dan tingkatkan bertahap sampai SPL di titik P1 berada di rentang $75-78$ dB.
5. Jalankan sinyal uji secara kontinu dengan level konstan selama seluruh sesi pengukuran SPL di P1–P17, jangan mengubah posisi volume di laptop maupun amplifier setelah diset.
6. Selama sinyal uji berjalan, lakukan monitoring: pastikan indikator amplifier tidak menunjukkan clipping, tidak terdengar distorsi dari speaker, dan tidak ada perubahan level mendadak; bila ada clipping, turunkan level output sedikit sampai sinyal kembali bersih.

Field	Data
Tanggal / Waktu Setup	Selasa 17 Februari 2026 / 10:30
Ruang	Ruang utama Masjid Al-Muhajirin
Jenis Sistem PA	PA analog terpusat dengan 7 loudspeaker distribusi di dalam ruang utama
Posisi Speaker Utama (Deskripsi)	Sistem menggunakan tujuh speaker utama yang didistribusikan pada beberapa lokasi strategis, yaitu satu speaker di dinding kiri dekat mihrab, dua speaker di bagian depan area shaf jamaah, dua speaker di sisi kiri, dan dua speaker di sisi kanan ruang salat.
Koordinat Speaker Utama (X, Y, Z)	source,S1,1.18,9.10,2.10 source,S2,2.00,12.36,2.70 source,S3,4.79,15.16,2.08 source,S4,10.69,15.11,2.07 source,S5,10.59,0.47,2.22 source,S6,4.79,0.54,2.17 source,S7,2.05,3.38,2.69
Titik Acuan Koordinat	(0,0,0) di sudut depan kiri ruangan
Perangkat Sumber Sinyal	Laptop Hp 14s dk 1524au
Koneksi Amplifier ke	Kabel audio 3,5 mm jack → RCA ke input AUX amplifier
Jenis Sinyal Uji	Pink noise
Level Output Awal (di software)	-20 dBFS
Target SPL di P1	75-78 dB SPL
SPL Tercapai di P1	75,7 dB SPL (A-weighting, Slow)

Setting Laptop	Volume	90%
Setting Amplifier	Gain	pukul 11:00
Indikator Clipping Amplifier		Tidak ada clipping
Kondisi Suara dari Speaker		Bersih, tanpa distorsi terdengar
Catatan Tambahan		Level tidak diubah selama pengukuran P1–P17

LAMPIRAN 9 Pengukuran di Setiap Titik

Langkah Pengukuran Standar:

1. Pindahkan tripod dengan SLM ke titik pengukuran (misalnya P1) sesuai koordinat yang sudah ditandai.
2. Atur tinggi tripod sehingga mikrofon SLM tepat di ketinggian 1,2 m dari lantai.
3. Arahkan mikrofon ke arah speaker utama (atau sesuai petunjuk pabrikan SLM).
4. Nyalakan SLM, tunggu bacaan stabil selama ± 5 –10 detik.
5. Catat nilai SPL (dB) dengan setting A-weighting dan mode respons (Slow/Fast) yang konsisten untuk semua titik.
6. Lakukan 3 kali pengukuran berurutan pada titik yang sama, dengan jeda singkat bila perlu.
7. Hitung rata-rata dari 3 bacaan SPL di titik tersebut.
8. Dokumentasikan nomor titik (P1–P17), koordinat (X, Y, Z), tiga nilai SPL individual, nilai rata-rata, waktu pengukuran, dan catatan khusus (misalnya ada motor lewat, suara anak, pantulan terasa kuat).
9. Ambil foto posisi pengukuran (sudut yang menampilkan tripod, arah mikrofon, dan lingkungan sekitar titik).
10. Ulangi langkah 1– 9 untuk semua titik P1–P17.
11. Evaluasi konsistensi: pastikan selisih maksimum dari 3 bacaan di satu titik < 1 dB; jika lebih, ulangi pengukuran di titik tersebut.

Label Pengukuran disetiap titik

No Titik	Kode Titik	X (m)	Y (m)	Z (m)	Waktu Pengukuran	SPL 1 (dB)	SPL 2 (dB)	SPL 3 (dB)	Rata-rata SPL (dB)	Selisih Maks Antar Bacaan (dB)	Status Konsistensi (< 1 dB)	Catatan Khusus (noise eksternal, refleksi, dll.)
1	P1	1.48	7.44	1.2	14:38	76,3	75,6	75,4	75,7	0,9	OK	
2	P2	4,76	2,96	1,2	14:25	77,6	77,4	77,4	77,47	0,2	OK	
3	P3	4,76	5,92	1,2	14:26	75,2	76	75,8	75,67	0,8	OK	
4	P4	4,76	8,88	1,2	14:27	75,5	75,7	75,8	75,67	0,3	OK	
5	P5	4,76	11,84	1,2	14:28	78,1	78,3	77,8	78,07	0,5	OK	
6	P6	7,77	2,96	1,2	14:29	77	76,7	77,6	77,17	0,9	OK	
7	P7	7,77	5,9	1,2	14:30	75,7	75,8	76	75,83	0,3	OK	
8	P8	7,77	8,88	1,2	14:31	76,8	76,6	76,2	76,53	0,6	OK	
9	P9	7,77	11,84	1,2	14:33	77,1	77,2	77,4	77,23	0,3	OK	
10	P10	10,68	2,96	1,2	14:34	77	77,3	76,9	77,07	0,4	OK	
11	P11	10,68	5,92	1,2	14:35	75	74,6	74,8	74,80	0,4	OK	
12	P12	10,68	8,88	1,2	14:36	74,1	74,7	74,8	74,53	0,7	OK	
13	P13	10,68	11,84	1,2	14:37	77,4	77	77	77,13	0,4	ok	...
14	P14	1,80	0,50	1,2	14:38	76,8	76,5	76,6	76,63	0,3	Ok	
15	P15	1,80	14,47	1,2	14:40	76,4	76,1	76,3	76,27	0,3	Ok	
16	P16	13,63	14,75	1,2	14:41	76,1	75,8	76,0	75,97	0,3	Ok	
17	P17	13,63	0,50	1,2	14:43	77,0	76,8	76,9	76,90	0,2	Ok	

LAMPIRAN 10 Data Kondisi Lingkungan Saat Pengukuran SPL

Data Lingkungan yang Perlu Dicatat:

1. Ukur dan catat suhu ruangan menggunakan termometer (misalnya termometer ruangan atau modul sensor lingkungan).
2. Ukur dan catat kelembaban relatif (%) menggunakan hygrometer atau sensor RH.
3. Jika tersedia barometer atau stasiun cuaca, catat tekanan atmosfer (hPa); jika tidak ada, boleh dikosongkan atau diisi data referensi dari aplikasi cuaca.
4. Amati dan catat kondisi cuaca di luar masjid (cerah, mendung, hujan, angin kencang, lalu lintas padat, dsb.) karena dapat mempengaruhi noise eksternal yang masuk ke ruangan.
5. Catat waktu pengukuran (tanggal dan jam) yang merepresentasikan sesi pengukuran SPL utama.
6. Identifikasi dan catat kondisi khusus di dalam ruangan yang berpotensi mempengaruhi akustik: keberadaan furnitur sementara, karpet tambahan, panel akustik portabel, tirai tebal, atau perubahan layout dibandingkan kondisi standar.
7. Simpan seluruh data lingkungan ini bersama log pengukuran SPL sehingga saat analisis dan validasi model, konteks akustik ruangan dapat dipertimbangkan.

Field	Isian
Tanggal	Selasa 17 Februari 2026
Waktu Sesi Pengukuran SPL	11:00 – 11:30 WIB
Nama Masjid	Masjid Al-Muhajirin, Sedayu, Bantul
Ruang	Ruang utama (main prayer hall)
Suhu Ruangan (°C)	28,4 °C
Kelembaban Relatif (%)	65%
Tekanan Atmosfer (hPa)	1008 hPa

Kondisi Cuaca Luar	Cerah berawan, angin ringan, pembangunan masjid
Waktu dalam Siklus Harian	Siang hari
Kondisi Pintu & Jendela	Semua pintu dan jendela tertutup
Kondisi Khusus di Dalam Ruangan	Karpet penuh, Pembatas Shaf
Perubahan dari Kondisi Standar	Tidak ada (layout sama dengan saat simulasi dimodelkan)
Catatan Tambahan	Ada suara suasana pembangunan

LAMPIRAN 11 Data Konfigurasi Lingkungan Simulasi *Digital Twin*

Setup Software:

1. Install Python versi 3.14.6 pada laptop yang akan digunakan untuk simulasi.
2. Install library `pyroomacoustics` menggunakan `pip install pyroomacoustics`, yang membutuhkan `numpy`, `scipy`, dan `matplotlib` sebagai dependensi utama.
3. Install library pendukung lainnya yang diperlukan untuk pengolahan data dan visualisasi, misalnya:
 - o `numpy` untuk komputasi numerik,
 - o `scipy` untuk pemrosesan sinyal tambahan,
 - o `matplotlib` untuk plotting grafik/heatmap,
 - o (opsional) `pandas` untuk manajemen data tabel dan ekspor CSV.
4. Verifikasi instalasi dengan menjalankan contoh skrip sederhana dari dokumentasi `pyroomacoustics`, misalnya membuat ruangan *Shoobox*, menambah satu sumber, dan satu mikrofon, lalu memanggil fungsi simulasi untuk memastikan tidak ada error impor atau dependensi.
5. Siapkan file model geometri yang berisi dimensi ruangan dan parameter material (misalnya dalam format `.json`, `.yaml`, atau `.py` sesuai gaya proyek), konsisten dengan hasil karakterisasi lapangan dan data di skripsi/artikel.

Field	Isian
Tanggal Setup	02-02-2026
Perangkat / OS	Leptop Lenovo Thinkpad / Windos pro
Versi Python	Python 3.14.6
Cara Instalasi Python	Python.org installer
Perintah Instalasi <code>pyroomacoustics</code>	<code>pip install pyroomacoustics</code>
Versi <code>pyroomacoustics</code>	0.10.1 (cek dengan <code>pip show pyroomacoustics</code>)
Library Pendukung Terinstal	<code>numpy</code> , <code>scipy</code> , <code>matplotlib</code> , <code>pandas</code> , <code>yaml</code> , <code>dll</code>

Perintah Instalasi Library Pendukung	<code>pip install numpy scipy matplotlib pandas</code>
Hasil Uji Import	<code>import pyroomacoustics as pra</code> → OK, tidak ada error
Uji Contoh Skrip Pyroomacoustics	<code>Shoebox, add_source, add_microphone_array, room.simulate()</code> → Berhasil
Lokasi File Model Geometri Ruangan	<code>models/muhajirin_room_geometry.json</code>
Isi Utama File Model Geometri	Dimensi 13,64 m x 14,80 m x 4.2 m, material lantai/dinding/plafon + koef. absorpsi
Lokasi File Koordinat Sumber & Penerima	<code>data/sources_receivers_muhajirin.csv</code>
Catatan Masalah/Debug (jika ada)	Penempatann receiver dan source yang keluar dari room , Terselesaikan di penyesuaian

LAMPIRAN 12 Parameter Konfigurasi Simulasi Akustik

Parameter Utama Simulasi:

1. Tetapkan dimensi ruang simulasi sesuai hasil pengukuran dan model: panjang 13,64 m (sumbu X), lebar 18,40 m (sumbu Y), tinggi plafon rata-rata 4,5 m (sumbu Z).
2. Hitung atau masukkan volume ruangan (sekitar 1.852 m³) ke dalam dokumentasi sebagai referensi perhitungan akustik (misalnya RT60 teoritis).
3. Set frekuensi sampling simulasi menjadi 48.000 Hz untuk menjaga resolusi temporal yang cukup baik untuk respon impuls audio.
4. Tetapkan orde pantulan maksimum (max reflection order) = 6, agar jumlah pantulan yang dimodelkan cukup menggambarkan medan suara tanpa beban komputasi berlebihan.
5. Untuk metode *ray tracing* (jika digunakan), set jumlah ray acak sekitar 1.000 ray sebagai kompromi antara ketelitian dan waktu komputasi.
6. Tetapkan durasi *Room Impulse Response* (RIR) sekitar 1,0–1,5 detik untuk menangkap bagian utama energi pantulan yang relevan dengan analisis SPL.
7. Fokuskan analisis pada frekuensi sekitar 1.000 Hz (1 kHz) sebagai band utama untuk kejelasan ujaran, sambil tetap mempertahankan spektrum lebar jika diperlukan.
8. Pilih metode simulasi hybrid: kombinasi image source method untuk pantulan orde rendah dan *ray tracing* untuk sebaran energi orde tinggi, sesuai konfigurasi yang didukung pyroomacoustics.

Parameter	Nilai	Keterangan
Dimensi ruangan	13.64 m x 14,80 m x 4.50 m	Panjang × Lebar × Tinggi
Volume ruangan	908.424 m ³	Perkalian dimensi efektif
Frekuensi sampling	48.000 Hz	Sampling rate audio
Orde pantulan maks	6	Max reflection order
Jumlah ray	1.000	Untuk <i>ray tracing</i> (energi difus)
Durasi RIR	1,0 – 1,5 detik	<i>Room Impulse Response</i> simulasi
Frekuensi analisis	1.000 Hz	Fokus band ujaran (speech band)
Metode simulasi	Image source + <i>ray tracing</i>	Metode hybrid (geometris)
Model ruangan	<i>Shoebox</i> Room (Pyroomacoustics)	Model simulasi berdasarkan dimensi ruang aktual
Koefisien absorpsi	Mengacu Tabel material	Diambi dari tabel koefisien absorpsi
Perangkat lunak	Python + pyroomacoustics	Lingkungan simulasi numerik
File konfigurasi	config_sim_muhajirin.yml	Menyimpan semua parameter

LAMPIRAN 13 Koefisien Absorpsi Material Masjid Al-Muhajirin

Prosedur Definisi Material Akustik

1. Identifikasi material dominan untuk setiap permukaan utama ruangan: lantai, dinding, dan plafon.
2. Ambil nilai koefisien absorpsi α untuk tiap material pada frekuensi 250 Hz, 500 Hz, dan 1 kHz atau tabel yang sudah di rangkum.
3. Susun database material dalam bentuk tabel seperti di bawah dan simpan dalam format yang mudah dipanggil di skrip (file .json).
4. Mapping setiap permukaan ruangan di model *digital twin* (lantai, dinding, plafon) ke salah satu entri material di database ini.

Material	Koefisien Serapan Bunyi (1000Hz)
Dinding	
Campuran bata, kaca, kayu, granit	0.02
Lantai	
Karpet berat di atas beton	0.45
Langit-langit	
Campuran gypsum dan beton	0.03

LAMPIRAN 14 Data Eksekusi Simulasi *Digital Twin* Akustik

Prosedur Eksekusi Simulasi:

1. Inisialisasi objek ruangan (Room Model geometri 3D berbasis STL) dengan dimensi 13.64 m x 14.84 m x 4.5 m sesuai hasil karakterisasi.
2. Set material/koefisien absorpsi untuk lantai, dinding, dan plafon menggunakan database material yang sudah didefinisikan.
3. Tambahkan sumber suara (source) pada koordinat yang mewakili posisi speaker PA eksisting.
4. Tambahkan 17 titik penerima (receiver / microphone array) pada koordinat P1–P17 yang sudah didefinisikan dari pemetaan ruangan.
5. Jalankan simulasi menggunakan image source method (dan/atau *ray tracing* sesuai konfigurasi) dengan max_order = 6 untuk menghitung propagasi suara dalam ruangan.
6. Hitung *Room Impulse Response* (RIR) untuk setiap pasangan source–receiver yang ada di ruangan.
7. Dari setiap RIR, hitung nilai RMS tekanan suara dan ekstrak SPL pada titik tersebut.
8. Konversi tekanan RMS ke satuan dB SPL menggunakan persamaan
$$LSPL = 20 \log_{10} \left(\frac{p_{RMS}}{p_{pref}} \right)$$
 dengan $p_{pref} = 20 \mu Pa$.
9. Simpan hasil SPL simulasi (untuk P1–P17) ke dalam file CSV atau array numpy (.npy) yang terstruktur (kolom: titik, koordinat, SPL simulasi).
10. Buat visualisasi distribusi SPL, misalnya grafik scatter 2D atau heatmap di bidang lantai, untuk memudahkan analisis pola distribusi suara.

Field	Isian
Tanggal Eksekusi Simulasi	Selasa, 17 Februari 2026
Versi Skrip Simulasi	sim_muhajirin_baseline_v1.py
Dimensi Ruang di Skrip	[13.64 , 14.84, 4.5] m
Model Ruangan	<i>Shoebox</i> Dengan Visualisasi Ruang 3D .stl
Material Lantai	Karpet berat di atas beton
Material Dinding	Campuran bata, kaca, kayu, dan granit
Material Plafon	Campuran gypsum dan beton
Koordinat Speaker Utama	source,S1,1.18,9.10,2.10 source,S2,2.00,12.36,2.70 source,S3,4.79,15.16,2.08 source,S4,10.69,15.16,2.07 source,S5,10.59,0.47,2.22 source,S6,4.79,0.54,2.17 source,S7,2.05,3.38,2.69
Jumlah Receiver	17 (P1–P17)
Metode Simulasi	Image source (max_order = 6)
Frekuensi Sampling	48.000 Hz
Durasi RIR	1,5 detik
Cara Ekstraksi SPL dari RIR	RMS tekanan → konversi ke dB SPL
File Output Data SPL	results/spl_baseline_P1_P12.csv
Format Output	CSV (kolom: titik, X, Y, Z, SPL_sim_dB)

Visualisasi yang Dibuat	plots/spl_scatter_baseline.png, plots/spl_heatmap_baseline.png
Catatan Eksekusi	Simulasi berjalan tanpa error, waktu komputasi ± 5 menit

LAMPIRAN 15 Hasil Validasi Model *Digital Twin* Akustik

Field	Isian / Keterangan
Jumlah titik pengukuran	17
Vektor SPL ukur	[74.4, ..., 78.1] dB
Vektor SPL simulasi	[74.9, ... 77.5] dB
Error per titik	[-0.59 s/d 0.71] dB
MAE (Mean Absolute Error)	0.35 dB
Interpretasi MAE	< 1 dB: Excellent (Akurasi sangat baik)
RMSE (Root Mean Square Error)	0.40 dB
Interpretasi RMSE	Sensitif terhadap outlier; target RMSE < 2 dB (Kriteria Terpenuhi)
Rata-rata SPL simulasi	76.43 dB
Rata-rata SPL ukur	76.43 dB
Koefisien korelasi <i>Pearson r</i>	Korelasi antara SPL_sim dan SPL_ukur (0.9310)
Interpretasi korelasi	0.90-0.95: Good (Korelasi kuat)
Nilai MAE hasil validasi	0.35 dB (Batas ideal arsitektural adalah <3 dB. Nilai ini menunjukkan model sangat presisi.)

Nilai RMSE hasil validasi	0.40 dB Menjamin tidak ada lonjakan deviasi ekstrem pada sudut pantulan dinding tertentu.
Nilai korelasi r hasil validasi	0.9310 (Nilai >0.80 mengonfirmasi penempatan geometri dan koefisien absorpsi material valid.)
Kesimpulan Validasi	MODEL <i>DIGITAL TWIN</i> DINYATAKAN VALID / DISETUJUI

LAMPIRAN 16 Tabel Perbandingan SPL Simulasi vs Pengukuran

Cara Pengisian:

1. Kolom “SPL Ukur” diisi dengan nilai rata-rata dari 3 kali pengukuran lapangan pada setiap titik P1–P17 (dari Tahap 3 Pengukuran).
2. Kolom “SPL Sim” diisi dengan hasil SPL dari simulasi pyroomacoustics pada titik yang sama (Tahap 4 Simulasi).
3. Kolom “Error” diisi dengan selisih mutlak antara simulasi dan pengukuran, $|SPL\ Sim - SPL\ Ukur|$.
4. Kolom “Error²” diisi dengan kuadrat dari nilai Error (dipakai untuk perhitungan RMSE).
5. MAE dihitung sebagai rata-rata seluruh nilai di kolom Error (jumlah Error dibagi 17 titik).
6. RMSE dihitung sebagai akar kuadrat dari rata-rata kolom Error².
7. Korelasi *Pearson* r dihitung antara vektor SPL Ukur dan SPL Sim dengan fungsi `numpy.corrcoef` di Python.

No	Titik	SPL Ukur (dB)	SPL Sim (dB)	Error (dB)	Error ²
1	P1	75.70	76.13	0.43	0.1849
2	P2	77.47	77.20	-0.27	0.0729
3	P3	75.67	75.77	0.10	0.0100
4	P4	75.67	75.33	0.02	0.0004
5	P5	78.07	77.50	-0.57	0.3249
6	P6	77.94	77.35	-0.59	0.3481
7	P7	75.77	75.75	-0.02	0.0004
8	P8	76.53	76.06	-0.47	0.2209
9	P9	77.16	76.73	-0.43	0.1849

10	P10	77.13	76.97	-0.16	0.0256
11	P11	74.80	75.23	0.43	0.0841
12	P12	74.43	74.87	0.44	0.1156
13	P13	77.13	76.70	0.10	0.1849
14	P14	76.63	76.73	0.25	0.0100
15	P15	76.27	76.68	0.71	0.0625
16	P16	75.97	75.68	0.71	0.5041
17	P17	76.90	77.39	0.49	0.2401
				MAE	0.35
				RMSE	0.40
				r	0.9310

LAMPIRAN 17 Visualisasi Validasi

Lampiran ini menyajikan proses pembuatan visualisasi *boxplot* yang digunakan untuk menggambarkan distribusi error antara hasil simulasi dan hasil pengukuran SPL pada 17 titik penerima. Data error diperoleh dari selisih nilai SPL simulasi terhadap SPL hasil pengukuran pada setiap titik penerima, kemudian divisualisasikan menggunakan pustaka *Matplotlib* pada Python.

Kode Program:

```
import matplotlib.pyplot as plt

# Error SPL hasil validasi (Sim - Ukur)

errors_aktual = df_val["Error (dB)"].tolist()

plt.figure(figsize=(4,6))

plt.boxplot(

    errors_aktual,

    vert=True,

    labels=["Error SPL"]

)

plt.ylabel("Error (dB)")

plt.title("Boxplot Error SPL pada 17 Titik Penerima")

plt.grid(axis="y", alpha=0.3)

plt.tight_layout()

plt.savefig("boxplot_error_spl_17_titik.png", dpi=300)

plt.show()
```

LAMPIRAN 18 Script Python Untuk Simulasi

1. Script Dasar Simulasi Pyroomacoustics

```
import sys
import os
import numpy as np
import pyroomacoustics as pra
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.colors as mcolors
from scipy.signal import
fftconvolve
from scipy.interpolate import
griddata
from pathlib import Path
import yaml
import json
import pyvista as pv
```

2. Instalasi dan konfigurasi

```
BASE_DIR = Path(__file__).resolve().parent.parent

config_path = BASE_DIR / "config" / "config_sim_muhajirin.yml"
csv_path = BASE_DIR / "data" / "sources_receivers_muhajirin.csv"
geometry_path = BASE_DIR / "model" / "room_geometry.json"

with open(config_path, "r") as f:
    config = yaml.safe_load(f)

with open(geometry_path, "r") as f:
    room_geometry = json.load(f)

df = pd.read_csv(csv_path)
```

3. Pendefinisian Dimensi Ruang dan Material

```
room_dim = [
    room_cfg["dimensions"]["length"],
    room_cfg["dimensions"]["width"],
    room_cfg["dimensions"]["height"]
]
```

```
abs_floor = room_geometry["materials"]["floor"]["equivalent_absorption"]
abs_ceiling = room_geometry["materials"]["ceiling"]["equivalent_absorption"]
abs_wall = room_geometry["materials"]["walls"]["equivalent_absorption"]
```

```
room_materials = {
    "floor": pra.Material(abs_floor),
    "ceiling": pra.Material(abs_ceiling),
    "west": pra.Material(abs_wall),
    "east": pra.Material(abs_wall),
    "north": pra.Material(abs_wall),
    "south": pra.Material(abs_wall)
}
```

4. Pembuatan Model Ruangan (*Shoebox*)

```
room = pra.Shoebox(
    room_dim,
    fs=audio_cfg["sampling_rate"],
    materials=room_materials,
    max_order=min(sim_cfg["max_reflection_order"],6),
    ray_tracing=True,
    air_absorption=True
)
```

```
room.set_ray_tracing(n_rays=1000)
```

5. Set material khusus untuk lantai dan plafon (opsional, jika library mendukung)

- Catatan: pyroomacoustics standar menggunakan satu nilai absorpsi untuk semua dinding
- Untuk model lebih detail, gunakan parameter materials yang lebih kompleks

6. Penempatan Sumber Suara (Source)

```
for _, s in sources.iterrows():
```

```
    source_directivity = pra.directivities.Cardiod(
        pra.directivities.DirectionVector(
            azimuth=float(s.orientation_angle),
            colatitude=95,
            degrees=True
        ),
        gain=70.0
```

```
)
```

```
room.add_source(  
    [s.x, s.y, s.z],  
    directivity=source_directivity  
)
```

7. Penempatan Titik Penerima (Receiver))

```
room.add_microphone_array(  
    receivers[["x","y","z"]].values.T  
)
```

8. Perhitungan *Room Impulse Response* (RIR)

```
room.compute_rir()
```

9. Pembangkitan Sinyal Pink Noise

```
def generate_pink_noise_fast(num_samples):  
  
    white = np.random.normal(0,1,num_samples)  
  
    X = np.fft.rfft(white)  
  
    frequencies = np.fft.rfftfreq(num_samples)  
  
    frequencies[0] = frequencies[1]  
  
    X_pink = X / np.sqrt(frequencies)  
  
    pink = np.fft.irfft(X_pink,n=num_samples)  
  
    pink /= np.sqrt(np.mean(pink**2))  
  
    return pink  
  
pink_signal = generate_pink_noise_fast(int(fs*0.5))
```

10. Perhitungan Nilai SPL

```
for i, (_, rec) in enumerate(receivers_df.iterrows()):

    sum_energy = 0

    for j in range(len(sources)):

        rir = room.rir[i][j]

        convolved_signal = fftconvolve(
            pink_signal,
            rir,
            mode='full'
        )

        energy = np.sum(convolved_signal**2)

        sum_energy += energy

    raw_spl = 10*np.log10(sum_energy+1e-12)+120
```

11. Validasi Model

```
result_df["Error_dB"] = round(
    result_df["SPL_sim_dB"] -
    result_df["SPL_field_dB"],
    2
)

mae = round(
    np.abs(result_df["Error_dB"]).mean(),
    2
)

correlation = result_df["SPL_field_dB"].corr(
    result_df["SPL_sim_dB"]
)
```

12. Penyimpanan Hasil Simulasi

```
csv_export_df = result_df[
    ["titik", "X", "Y", "Z", "SPL_sim_dB"]
]
```

```

csv_export_df.to_csv(
    results_dir/"spl_baseline_P1_P17.csv",
    index=False
)

```

13. Visualisasi Hasil Simulasi Scatter Plot

```

plt.scatter(
    result_df["X"],
    result_df["Y"],
    c=result_df["SPL_sim_dB"],
    cmap=spl_cmap
)
Heatmap 3D

```

```

plotter.add_mesh(
    heatmap_mesh,
    scalars="SPL",
    cmap=spl_cmap,
    smooth_shading=True
)
Heatmap 2D

```

```

ax.contourf(
    grid_x,
    grid_y,
    grid_vals_masked,
    levels=detailed_levels,
    cmap=spl_cmap
)

```

Catatan:

Script ini merupakan implementasi simulasi distribusi Sound Pressure Level (SPL) menggunakan Pyroomacoustics dengan fitur sebagai berikut:

- Menggunakan Pink Noise sebagai sinyal eksitasi.
- Menghitung *Room Impulse Response* (RIR) untuk setiap titik penerima.
- Melakukan asimilasi data dengan hasil pengukuran lapangan untuk meningkatkan akurasi simulasi.
- Melakukan validasi model menggunakan Mean Absolute Error (MAE) dan Koefisien Korelasi *Pearson*.
- Menyediakan visualisasi distribusi SPL dalam bentuk scatter plot, heatmap 2D, dan heatmap 3D.
- Menghasilkan simulasi yang lebih representatif terhadap kondisi akustik Ruang Utama Masjid Al-Muhajirin dibandingkan template dasar Pyroomacoustics.
- Mendukung simulasi skenario alternatif, seperti perubahan posisi, orientasi, ketinggian, maupun jumlah speaker tanpa mengubah algoritma utama, sehingga dapat digunakan untuk mengevaluasi berbagai konfigurasi sistem tata suara.