

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 : teknik impulse response dan analisis kopling. Tools : Exponential sine sweep, MATLAB, dan ODEON. 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 : Simulasi akustik berbasis wave-based solver dan binaural auralization. Tools : Wave-based numerical simulation & binaural rendering. 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 : Software simulasi akustik berbasis hybrid modelling Hasil : Metode hybrid 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 ray tracing 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.

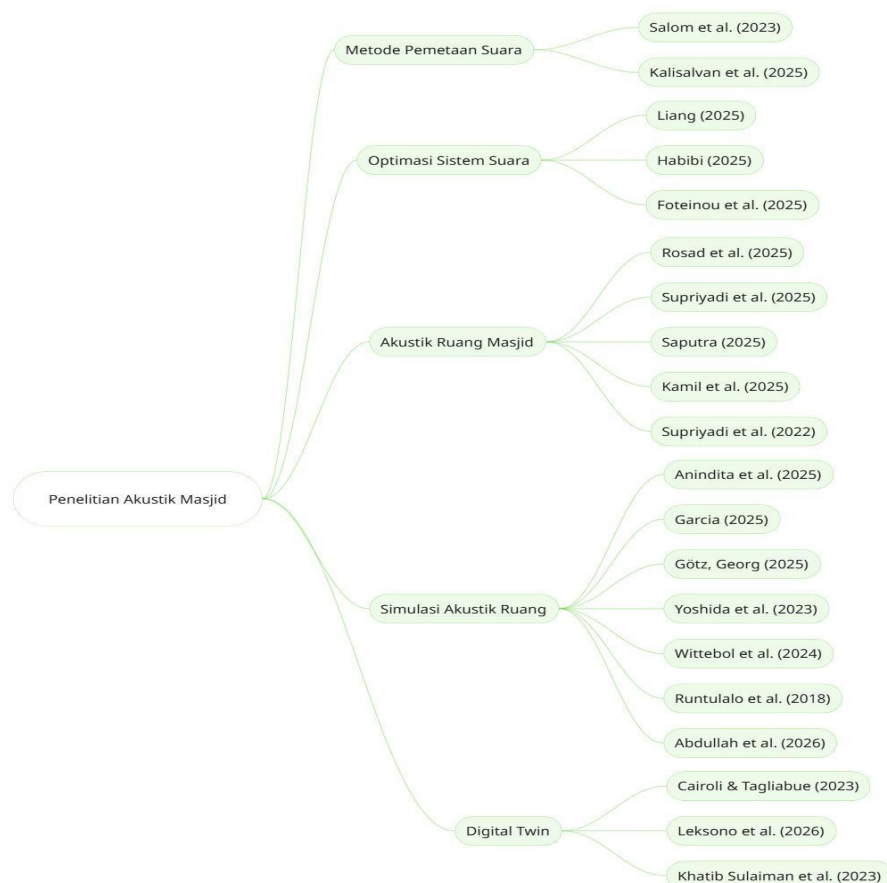
Berdasarkan Tabel 2.2 mengenai gap penelitian, dapat disimpulkan bahwa sebagian besar penelitian mengenai akustik ruang ibadah dan sistem tata suara masih berfokus pada evaluasi kondisi eksisting melalui pengukuran langsung maupun pendekatan deskriptif. Beberapa penelitian telah memanfaatkan simulasi 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

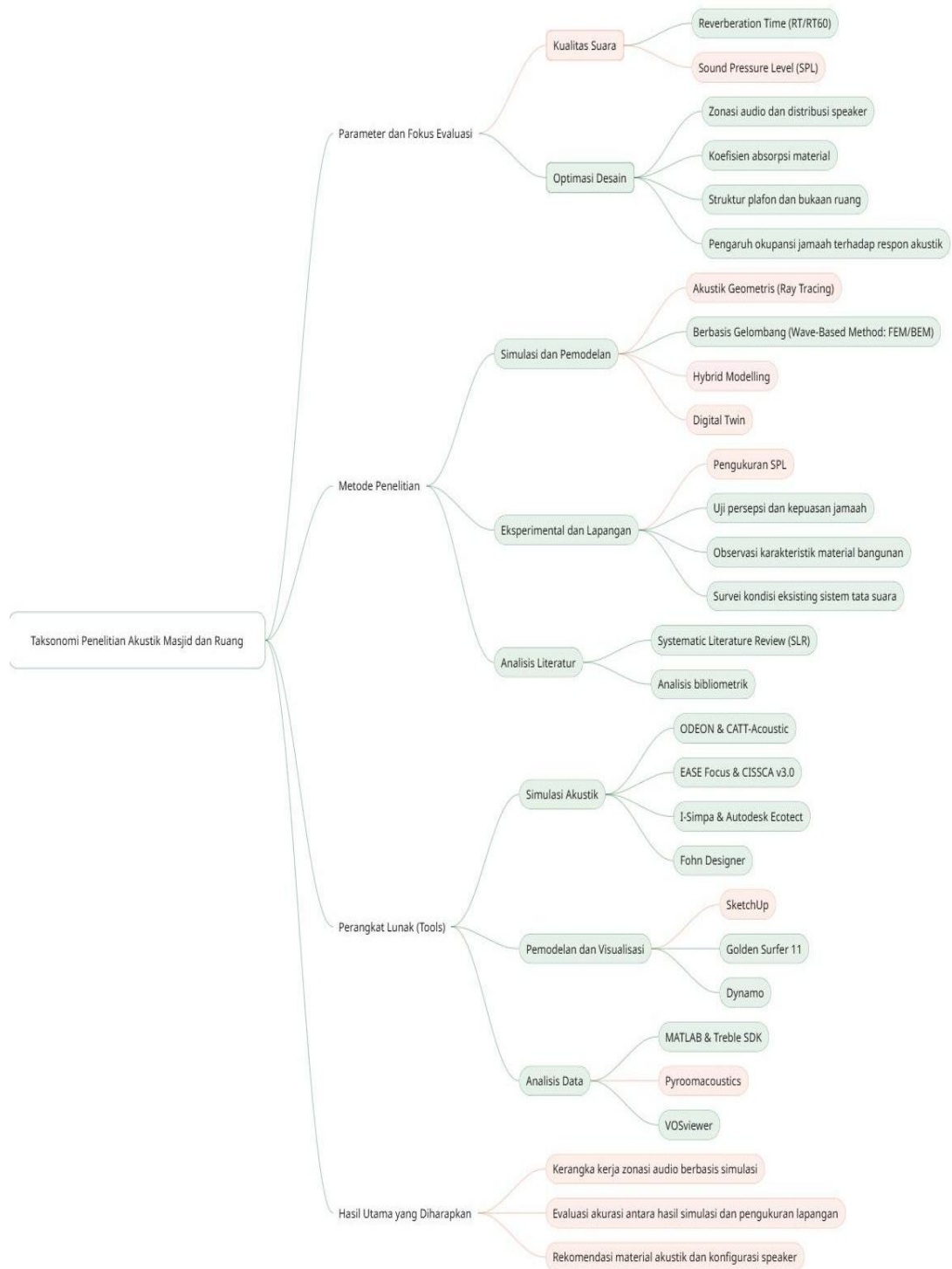
data pengukuran lapangan sehingga mampu merepresentasikan kondisi akustik ruang secara lebih realistis. Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi terhadap data pengukuran SPL pada titik penerima yang sama untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian model terhadap kondisi nyata.

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:

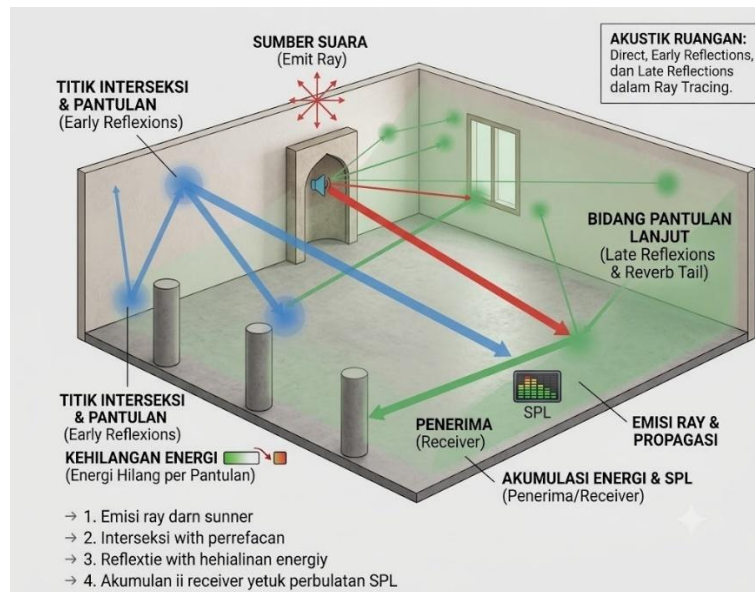
- 1) *Emit Rays*: Dari sumber (speaker), emit banyak rays (ratusan hingga ribuan) dalam arah random yang merata di semua *azimuth* dan *elevation*[29].

- 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 Ruangan 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].