

# 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 m<sup>3</sup>), 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.