

LAMPIRAN 1 Data Noise Floor Ruangan

Langkah Persiapan:

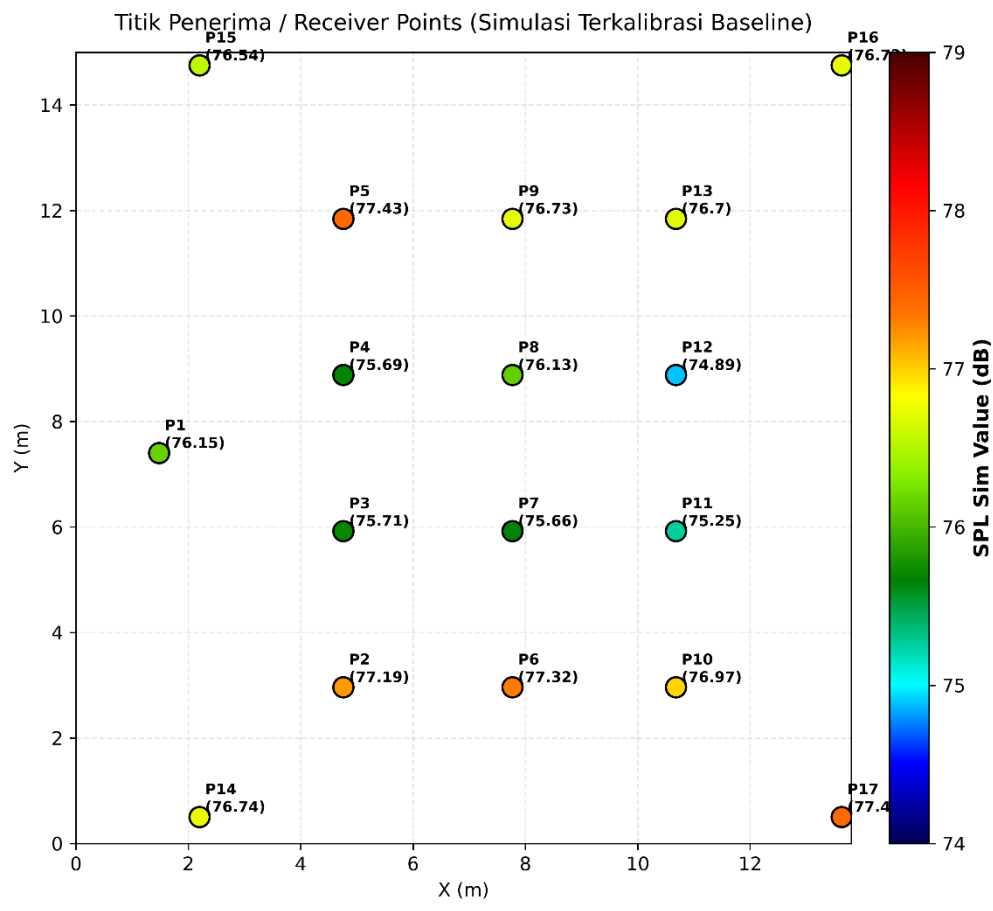
1. Pastikan ruang utama masjid dalam keadaan kosong, tidak ada jamaah atau aktivitas lain di area pengukuran.
2. Tutup semua pintu dan jendela yang terhubung ke luar ruangan untuk mengurangi kebisingan eksternal.
3. Matikan seluruh peralatan yang berpotensi menghasilkan noise: AC, kipas angin, exhaust fan, TV, komputer, dan perangkat elektronik lain.
4. Ukur noise floor (ambient noise) ruangan:
 - Pastikan sistem PA dan sumber suara lain dalam keadaan mati.
 - Pilih 13 titik representatif (depan, tengah, belakang).
 - Ukur SPL di tiap titik, tunggu bacaan stabil, catat nilai masing-masing titik.
 - 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

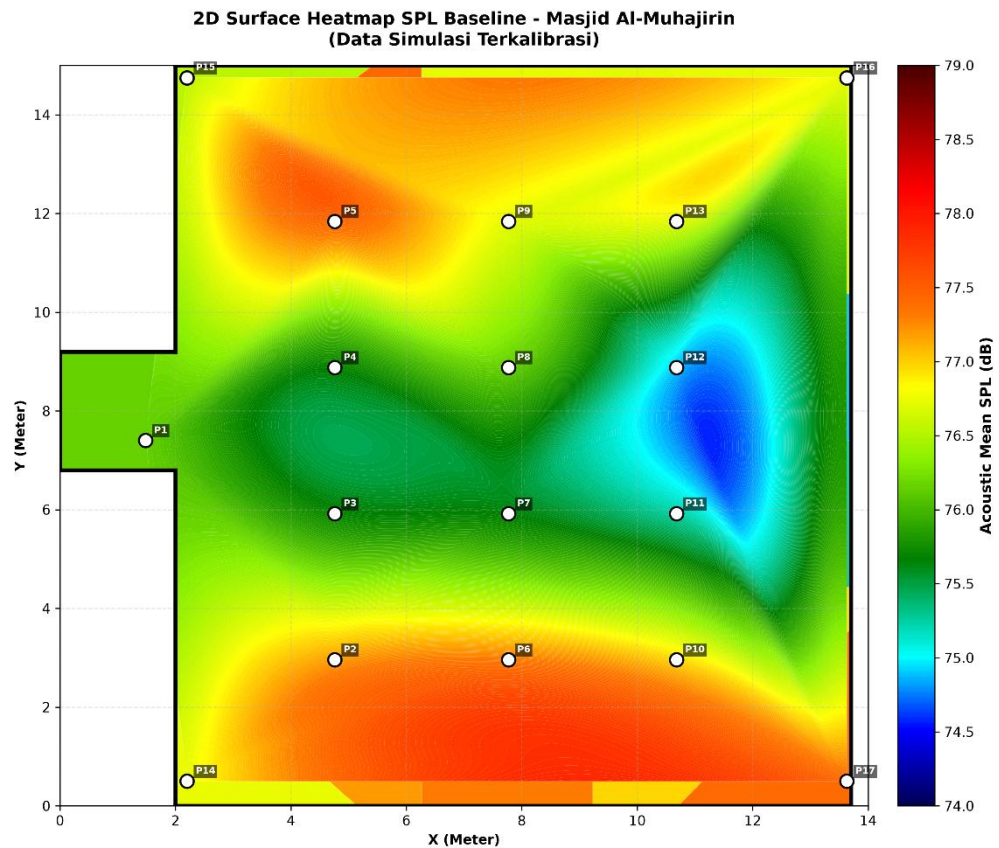
LAMPIRAN 2 Pemetaan 17 Ttitik penerima suara



LAMPIRAN 3 Geometri 3D (SketchUp)



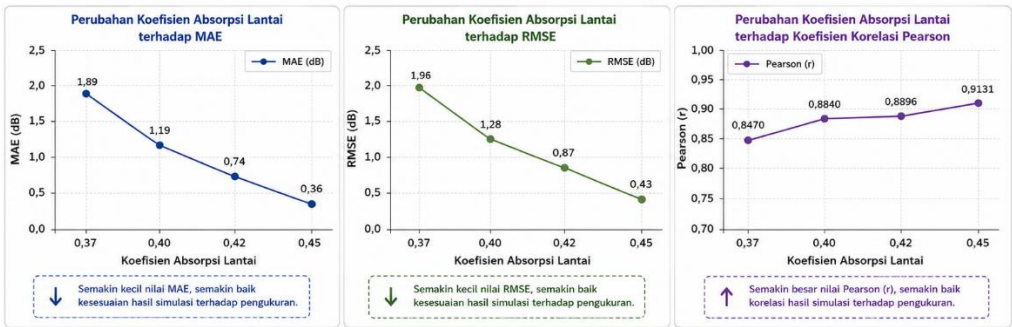
LAMPIRAN 4 Hasil Simulasi Akustik



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:
 - o Panjang ruang (sumbu X) sepanjang arah memanjang saf (depan–belakang).
 - o Lebar ruang (sumbu Y) sepanjang arah melintang saf (kiri–kanan).
 - o 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 ke Amplifier	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 Ruang	<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 dirangkum.
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 $LSPL = 20 \log_{10} \left(\frac{p_{RMS}}{p_{ref}} \right)$ dengan $p_{ref} = 20 \mu Pa$.
9. Simpan hasil SPL simulasi (untuk P1–P17) ke dalam file CSV atau array numpy (.npz) 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, $|\text{SPL Sim} - \text{SPL Ukur}|$.
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* rr 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.