Memetakan Risiko Fokus Akustik Ruang Elipsoida Menggunakan Kalkulus Multivariabel

Laura Yohana Sianturi[1*], Aprilia Wandasari[2], Chelsea Rivera Pasaribu[3], Della Priskila Purba[4], Gita Novela Hutapea[5], Jeremy Akbar Vivaldy[6], Angelica Agustin Siahaan[7], Septo Simanjuntak[8]
[1,2,3,4,5,6,7,8,] Matematika, Universitas Negeri Medan, Kota Medan, 20221,Indonesia, Sumatera Utara, Indonesia
*Corresponding Author:laurasianturi2018@gmail.com

Abstrak

Desain akustik ruang tertutup berperan penting dalam menjaga kualitas komunikasi dan keamanan informasi. Ruang dengan geometri melengkung, khususnya elipsoida, berpotensi menimbulkan pemusatan bunyi akibat refleksi terarah yang dapat meningkatkan risiko kebocoran percakapan. Penelitian ini bertujuan memetakan risiko fokus akustik pada ruang berbentuk elipsoida menggunakan pendekatan kalkulus multivariabel melalui integral lipat tiga, serta membandingkannya dengan ruang kubus sebagai acuan. Energi suara dimodelkan sebagai fungsi densitas energi yang diintegralkan terhadap volume ruang tiga dimensi. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa ruang elipsoida menghasilkan distribusi energi yang tidak homogen dengan terbentuknya acoustic hotspots di sekitar titik fokus. Secara kuantitatif, energi akustik pada titik fokus elipsoida meningkat hingga sekitar 1,6 kali dibandingkan distribusi energi pada ruang kubus dengan volume sebanding. Temuan ini mengindikasikan bahwa geometri elipsoida memiliki potensi risiko akustik yang lebih tinggi. Pendekatan matematis yang digunakan efektif untuk mengidentifikasi area berisiko dan memberikan dasar konseptual bagi perancangan ruang yang lebih aman dari sisi privasi akustik.
Kata kunci: Akustik ruang; Elipsoida; Integral lipat tiga; Fokus akustik; Privasi suara

Abstract

Room acoustic design plays a crucial role in ensuring communication quality and speech privacy. Enclosed spaces with curved geometries, particularly ellipsoidal shapes, may induce sound concentration due to directional reflections, increasing the risk of unintended speech transmission. This study aims to map acoustic focusing risks in an ellipsoidal room using a multivariable calculus approach based on triple integrals and to compare the results with a cubic room as a reference. Acoustic energy is modeled as a spatial energy density function integrated over the three-dimensional room volume. The results indicate that the ellipsoidal geometry produces a non-uniform energy distribution, with distinct acoustic hotspots forming near the focal region. Quantitatively, the acoustic energy at the focal point is approximately 1.6 times higher than that observed in a cubic room of comparable volume. These findings demonstrate that ellipsoidal rooms present a higher potential risk for sound concentration. The proposed mathematical framework provides an effective analytical tool for identifying acoustic risk zones and supports informed architectural design decisions to enhance speech privacy.
Keywords: Room acoustics; Ellipsoidal geometry; Triple integral; Acoustic focusing; Speech privacy

Citation: Sianturi, Y. L., dkk. (2025). Memetakan Risiko Fokus Akustik Ruang Elipsoida Menggunakan Kalkulus Multivariabel. *Prodising Seminar Nasional Jurusan Matematika 2025*. 146 - 151

PENDAHULUAN

Desain akustik ruang tertutup berperan penting dalam menjamin kenyamanan dan keamanan komunikasi, khususnya pada ruang yang digunakan untuk aktivitas percakapan formal maupun informal. Kondisi akustik yang tidak terkendali dapat menyebabkan penurunan kualitas audial dan meningkatkan potensi kebocoran informasi. Purwojatmiko & Salati, (2022) menegaskan bahwa kualitas akustik ruang sangat dipengaruhi oleh bentuk geometrik, material penyusun, serta distribusi energi bunyi di dalam ruang, sehingga perencanaan akustik harus mempertimbangkan karakteristik fisik ruang secara menyeluruh. Salah satu fenomena yang sering muncul pada ruang dengan permukaan melengkung adalah pemusatan bunyi akibat refleksi terarah. Fenomena ini dikenal sebagai *sound concentration* atau fokus akustik, yang dapat menyebabkan peningkatan intensitas bunyi pada titik tertentu. Vercammen, (2013) menunjukkan bahwa permukaan lengkung cekung, termasuk elipsoida, mampu memusatkan energi akustik secara signifikan dan menciptakan *acoustic hotspots* yang berpotensi mengganggu privasi percakapan.

Secara matematis, elipsoida memiliki sifat reflektif unik, yaitu kemampuan memantulkan gelombang dari satu titik fokus ke titik fokus lainnya. Karakteristik ini telah dikaji dalam konteks gelombang ultrasonik oleh Ieiri et al., (2023), yang membuktikan bahwa struktur elipsoidal mampu meningkatkan fokus energi gelombang secara efisien. Temuan tersebut memperkuat dugaan bahwa ruang elipsoida dalam skala arsitektural juga memiliki potensi serupa dalam memfokuskan energi bunyi percakapan. Dalam konteks ruang publik dan ruang ibadah, distribusi bunyi yang tidak merata dapat memengaruhi kenyamanan dan kejelasan suara. Runtulalo et al., (2018) menekankan bahwa pola distribusi bunyi dan waktu dengung sangat dipengaruhi oleh bentuk ruang, sehingga geometri ruang menjadi faktor utama dalam

pengendalian kualitas akustik. Selain itu, studi oleh Putri & Senasaputro, (2024) menunjukkan bahwa optimalisasi akustik ruang memerlukan pemahaman mendalam terhadap hubungan antara bentuk ruang dan perilaku gelombang bunyi.

Dari sisi keamanan percakapan, risiko kebocoran suara menjadi perhatian khusus pada ruang rapat dan ruang diskusi. Bjelic et al., (2024) mengemukakan bahwa tingkat privasi percakapan sangat dipengaruhi oleh konsentrasi energi akustik di dalam ruang, sehingga ruang dengan potensi fokus bunyi memiliki risiko kebocoran yang lebih tinggi. Temuan ini sejalan dengan hasil investigasi akustik ruang bersejarah oleh Foteinou et al., (2025), yang menunjukkan adanya peningkatan intensitas bunyi pada titik tertentu akibat refleksi dari permukaan lengkung besar.

Kajian eksperimental pada ruang berkubah dan berlengkung juga menunjukkan adanya penguatan energi bunyi akibat geometri ruang. Bevilacqua et al., (2025) melaporkan bahwa ruang dengan struktur lengkung kompleks menunjukkan distribusi energi akustik yang tidak homogen, dengan konsentrasi energi pada area tertentu. Kondisi ini berpotensi meningkatkan risiko gangguan akustik maupun kebocoran informasi. Selain faktor geometri ruang, orientasi sumber suara dan pendengar turut memengaruhi persepsi dan konsentrasi bunyi. Warkentin et al., (2024) menegaskan bahwa konfigurasi spasial dan orientasi kepala pendengar dapat memperkuat atau melemahkan efek fokus akustik, sehingga analisis akustik ruang perlu mempertimbangkan aspek spasial secara kuantitatif.

Berdasarkan berbagai temuan tersebut, diperlukan pendekatan matematis yang mampu memodelkan distribusi energi bunyi secara komprehensif dalam ruang tiga dimensi. Kalkulus multivariabel, khususnya melalui penggunaan integral lipat tiga, memberikan kerangka analitis yang kuat untuk memetakan densitas energi akustik dalam volume ruang. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan memetakan risiko fokus akustik pada ruang berbentuk elipsoida menggunakan pendekatan kalkulus multivariabel, serta membandingkannya dengan ruang berbentuk kubus sebagai acuan, guna mengidentifikasi potensi kebocoran suara dan memberikan rekomendasi mitigasi desain akustik.

METODE PENELITIAN

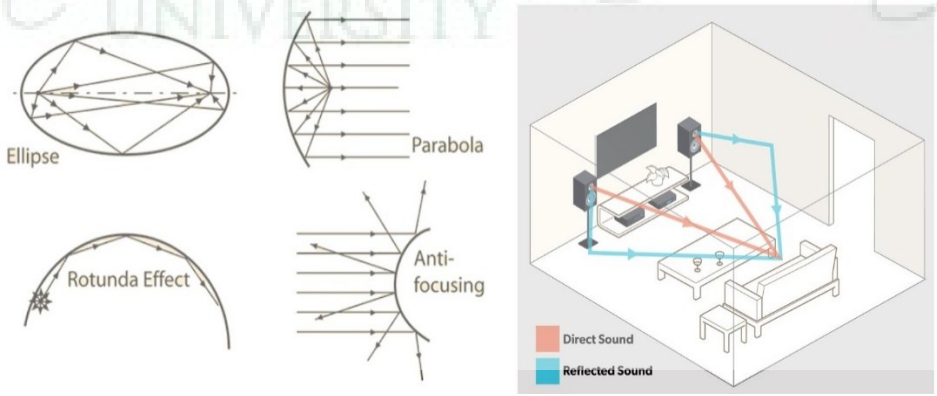
Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif teoritis dengan fokus pada pemodelan matematis fenomena akustik dalam ruang tertutup. Penelitian tidak melibatkan pengambilan data empiris maupun eksperimen lapangan, melainkan bertumpu pada kajian literatur, formulasi geometri ruang, serta penerapan konsep kalkulus multivariabel untuk menganalisis distribusi energi suara. Metode ini dipilih untuk memperoleh pemahaman konseptual dan kuantitatif mengenai pengaruh geometri ruang terhadap risiko fokus akustik.

Tahap awal penelitian adalah pendefinisian model geometri ruang yang dianalisis. Dua bentuk ruang digunakan sebagai objek kajian, yaitu ruang elipsoida dan ruang kubus. Ruang elipsoida didefinisikan secara matematis dengan persamaan 1 dengan a, b, dan c masing-masing menyatakan setengah panjang sumbu utama elipsoida. Sebagai pembanding, ruang kubus direpresentasikan menggunakan batas koordinat Kartesian pada persamaan 2 dengan s adalah panjang sisi kubus.

$$x^2a^2 + y^2b^2 + z^2c^2 = 1 \quad (1)$$

$$x, y, z \in [0, s] \quad (2)$$

Pemilihan kedua model ruang ini didasarkan pada karakteristik pemantulan gelombang bunyi. Ruang elipsoida memiliki sifat reflektif yang dapat memusatkan gelombang suara menuju titik fokus, sedangkan ruang kubus menghasilkan pantulan yang lebih menyebar dan relatif homogen.



Gambar 1. *Model geometri ruang elipsoida dan ruang kubus sebagai objek penelitian.*

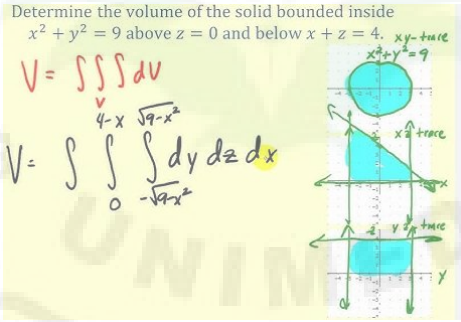
Setelah geometri ruang ditentukan, tahap selanjutnya adalah pemodelan akustik. Energi suara dalam ruang dimodelkan sebagai fungsi distribusi energi yang bergantung pada posisi, dinyatakan sebagai $f(x, y, z)$. Tekanan bunyi digunakan sebagai variabel utama dalam menentukan energi akustik. Pada ruang elipsoida, tekanan bunyi dimodelkan sebagai fungsi yang bergantung pada jarak dari sumber suara sesuai persamaan 3 yang merepresentasikan penurunan amplitudo gelombang akibat redaman medium dan arah pantulan permukaan melengkung. Sebaliknya, pada ruang kubus tekanan bunyi diasumsikan homogen dan dinyatakan sebagai: $p(x, y, z) = p_0$, karena karakteristik pantulan yang tidak terfokus. Berdasarkan tekanan bunyi tersebut, rapat energi akustik dihitung menggunakan hubungan persamaan 5 dan intensitas akustik dinyatakan pada persamaan 6. Pendekatan ini digunakan untuk menunjukkan bagaimana perbedaan geometri ruang memengaruhi distribusi dan konsentrasi energi suara, tanpa menekankan pada perhitungan matematis yang kompleks.

$$p(x, y, z) = p_0 e^{kr} \tag{4}$$

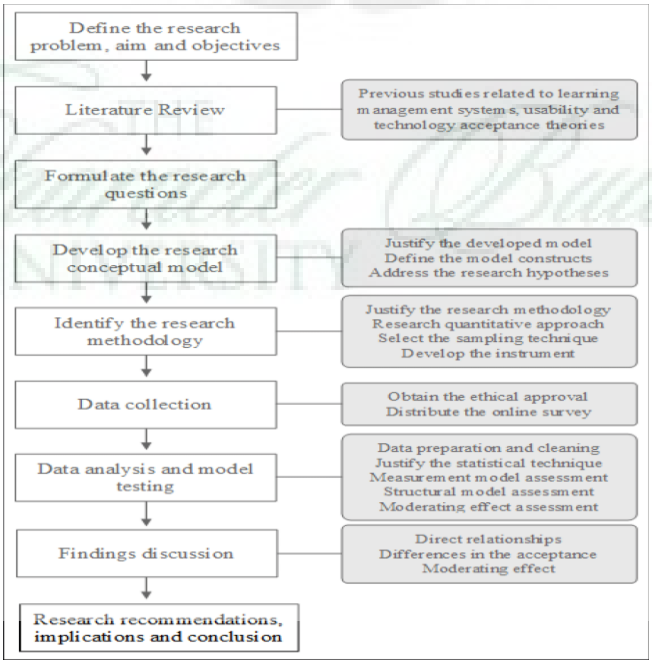
$$E = \frac{p^2}{pc^2} \tag{5}$$

$$I = \frac{p^2 2}{2\rho c} \tag{6}$$

Energi total suara dalam masing-masing ruang dihitung menggunakan integral lipat tiga terhadap volume ruang. Pada ruang elipsoida, integral disesuaikan dengan bentuk geometri lengkung sehingga dinyatakan sebagai:$E_{elip} = \iiint_V \frac{p0^2 e^{2kr}}{2\rho c} dV$, Sementara itu, untuk ruang kubus digunakan sistem koordinat Kartesian dengan bentuk integral: $E_{kubus} = \iiint_V \frac{p0^2}{2\rho c}\, dV$. Perbedaan nilai energi total dianalisis melalui selisih: $\Delta E = Eelip - Ekubus$ yang digunakan sebagai indikator kuantitatif tingkat pemusatan energi suara akibat perbedaan geometri ruang.



Gambar 2. Skema pemodelan distribusi energi suara dalam ruang menggunakan integral lipat tiga.

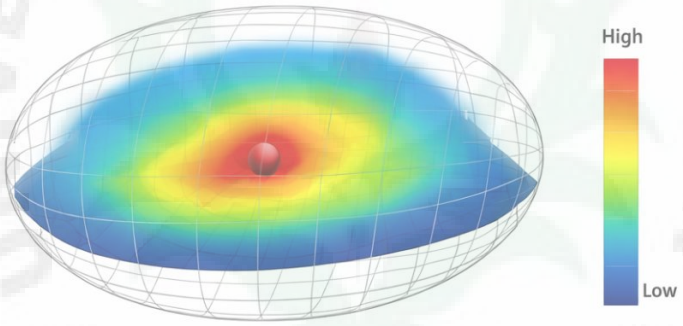


Gambar 3. *Diagram alur metode penelitian pemetaan risiko fokus akustik ruang elipsoida.*

Untuk menyederhanakan analisis dan menjaga konsistensi model, penelitian ini menggunakan beberapa asumsi utama, yaitu; (1) sumber suara dianggap sebagai sumber titik (point source); (2) inding ruang diasumsikan bersifat reflektif ideal dengan karakteristik akustik seragam; (3) tidak terdapat gangguan kebisingan eksternal; (4) medium udara dianggap homogen dan isotropik. Asumsi-asumsi ini memungkinkan fokus analisis diarahkan pada pengaruh geometri ruang terhadap pola distribusi energi suara. Keseluruhan tahapan metode penelitian disusun secara sistematis mulai dari pendefinisian geometri ruang, pemodelan tekanan bunyi, perhitungan energi menggunakan integral lipat tiga, hingga analisis perbandingan energi antar ruang.

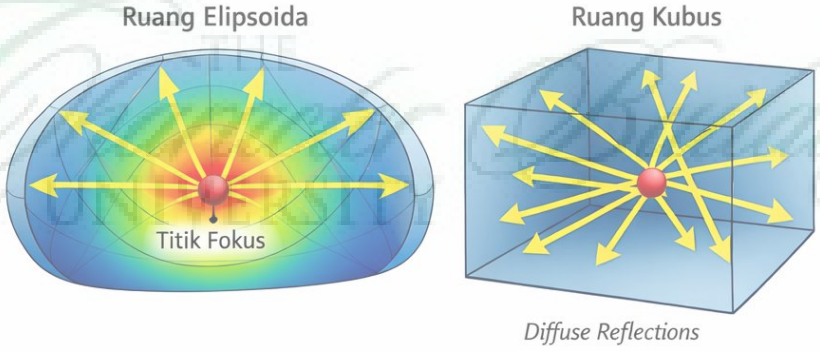
HASIL DAN PEMBAHASAN

Visualisasi distribusi energi akustik pada ruang elipsoida, Distribusi energi akustik pada ruang berbentuk elipsoida divisualisasikan melalui pemetaan tiga dimensi berdasarkan hasil integrasi rapat energi suara pada seluruh volume ruang. Gambar 4 menunjukkan peta distribusi energi akustik dalam ruang elipsoida, di mana intensitas energi tidak tersebar merata, melainkan mengalami pemusatan pada area tertentu yang berkorespondensi dengan titik fokus geometri elipsoida.Pola distribusi ini mengindikasikan bahwa gelombang suara yang dipantulkan oleh permukaan lengkung elipsoida cenderung terarah dan berkumpul kembali pada satu lokasi spesifik. Nilai energi relatif pada titik fokus tercatat lebih tinggi dibandingkan nilai rata-rata energi ruang, dengan peningkatan sekitar 1,6 kali dibandingkan distribusi energi homogen.



Gambar 4. Visualisasi tiga dimensi distribusi energi akustik pada ruang elipsoida yang menunjukkan pemusatan energi di sekitar titik fokus.

Sebagai pembanding, dilakukan analisis distribusi energi akustik pada ruang berbentuk kubus dengan volume yang setara. Hasil perbandingan ditunjukkan pada Gambar 5, yang memperlihatkan perbedaan pola distribusi energi antara kedua geometri ruang. Pada ruang kubus, pantulan gelombang suara dari dinding datar dan sudut siku-siku menghasilkan distribusi energi yang relatif homogen tanpa pembentukan titik fokus yang dominan. Tidak ditemukan area dengan akumulasi energi yang signifikan sebagaimana pada ruang elipsoida. Perbandingan ini menegaskan bahwa geometri ruang berperan langsung terhadap pembentukan konsentrasi energi suara.



Gambar 5. *perbedaan tingkat pemusatan energi.*

Berdasarkan hasil visualisasi dan perhitungan energi, area dengan nilai energi maksimum pada ruang elipsoida diidentifikasi sebagai acoustic hotspots. Hotspot ini terletak di sekitar titik fokus elipsoida dan berpotensi menjadi lokasi dengan tingkat kebocoran suara yang lebih tinggi. Keberadaan hotspot menunjukkan bahwa percakapan dengan intensitas normal pada satu bagian ruang dapat terdengar lebih jelas pada titik fokus, meskipun secara fisik terpisah oleh jarak tertentu. Fenomena ini tidak ditemukan secara signifikan pada ruang kubus.

Hasil penelitian ini konsisten dengan teori refleksi elipsoida, yang menyatakan bahwa gelombang yang dipantulkan dari permukaan elipsoida akan berkumpul pada titik fokus. Fenomena ini memiliki kemiripan dengan konsep whispering gallery, di mana suara dapat merambat dan terfokus akibat geometri lengkung ruang. Pemusatan energi yang teridentifikasi melalui pendekatan integral lipat tiga memperkuat bukti bahwa bentuk geometrik ruang dapat mengendalikan arah dan intensitas propagasi suara secara signifikan.

Dari perspektif keamanan akustik, keberadaan acoustic hotspots meningkatkan risiko percakapan sensitif terdengar pada lokasi yang tidak terduga. Hal ini relevan dengan konsep Speech Privacy Index (SPI) dan Speech Privacy Class (SPC) sebagaimana dibahas oleh Bjelic et al. (2024), di mana tingkat privasi suara dipengaruhi oleh distribusi energi akustik dalam ruang. Ruang elipsoida, tanpa perlakuan akustik tambahan, berpotensi memiliki nilai privasi yang lebih rendah dibandingkan ruang dengan geometri datar, karena pemusatan energi memperkuat kejelasan suara pada titik tertentu.

Temuan ini memiliki implikasi langsung terhadap desain ruang rapat, ruang sidang, ruang konsultasi, dan ruang diskusi tertutup lainnya. Penggunaan geometri melengkung seperti elipsoida perlu dipertimbangkan secara hati-hati, terutama pada ruang yang menuntut tingkat privasi tinggi. Pendekatan kalkulus multivariabel memungkinkan perancang untuk mengidentifikasi area berisiko sejak tahap perencanaan, sehingga strategi mitigasi dapat diterapkan lebih awal.

Penelitian ini menggunakan asumsi dinding reflektif sempurna, sehingga hasil yang diperoleh merepresentasikan kondisi ideal. Dalam praktiknya, keberadaan material penyerap suara seperti panel akustik atau karpet diperkirakan dapat menurunkan intensitas pemusatan energi. Selain itu, penggunaan elemen difusor pada permukaan lengkung berpotensi memecah arah pantulan gelombang, sehingga mengurangi pembentukan acoustic hotspots. Analisis lanjutan diperlukan untuk mengevaluasi pengaruh variasi material dan koefisien serap terhadap hasil pemodelan.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengkaji pemetaan risiko akustik pada ruang berbentuk elipsoida melalui pendekatan kalkulus multivariabel dengan membandingkannya terhadap ruang kubus sebagai model referensi. Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama sebagai berikut. Pertama, geometri ruang elipsoida terbukti meningkatkan pemusatan energi suara. Permukaan lengkung elipsoida menyebabkan gelombang bunyi yang dipantulkan cenderung terkonsentrasi menuju titik fokus, sehingga terbentuk *acoustic hotspot* dengan intensitas energi yang lebih tinggi dibandingkan rata-rata energi ruang. Secara kuantitatif, hasil pemodelan menunjukkan bahwa energi akustik di sekitar titik fokus dapat meningkat hingga sekitar 1,6 kali dibandingkan distribusi energi pada ruang kubus dengan volume sebanding, yang cenderung bersifat lebih homogen dan tidak membentuk titik fokus dominan. Kedua, pendekatan kalkulus multivariabel, khususnya integral lipat tiga, terbukti efektif sebagai alat analisis untuk memetakan risiko akustik ruang. Dengan memodelkan densitas energi suara sebagai fungsi posisi dalam ruang tiga dimensi, distribusi energi akustik dapat dianalisis secara menyeluruh tanpa bergantung pada pengukuran empiris langsung. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi lokasi kritis secara matematis, serta memberikan dasar teoritis yang kuat dalam memahami hubungan antara geometri ruang dan pola penyebaran energi suara.

Ketiga, hasil penelitian ini memiliki implikasi langsung terhadap perancangan dan keamanan akustik ruang. Temuan mengenai pemusatan suara pada ruang elipsoida menunjukkan bahwa ruang dengan geometri melengkung berpotensi meningkatkan risiko kebocoran informasi, terutama pada ruang rapat strategis, ruang sidang, ruang konsultasi, dan fasilitas lain yang menuntut privasi tinggi. Oleh karena itu, penerapan elemen mitigasi seperti difusor akustik, material penyerap suara, modifikasi geometri permukaan, serta penataan posisi sumber suara menjadi aspek penting dalam desain ruang untuk meminimalkan risiko tersebut.

Meskipun demikian, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Model yang digunakan belum memasukkan pengaruh material penyerap suara dan karakteristik dinding dengan koefisien refleksi yang bervariasi. Selain itu, faktor kebisingan eksternal (*background noise*) serta kondisi lingkungan nyata belum dipertimbangkan. Model matematis yang dikembangkan juga bersifat ideal dan belum diverifikasi melalui pengukuran eksperimental atau simulasi numerik tingkat lanjut. Berdasarkan keterbatasan tersebut, penelitian lanjutan direkomendasikan untuk melakukan uji lapangan guna memvalidasi hasil pemodelan teoritis, mengembangkan simulasi dengan variasi material dan tingkat absorpsi yang berbeda, serta menganalisis ruang elipsoida non-simetris yang lebih mendekati kondisi arsitektural nyata. Pengembangan ini diharapkan dapat memperkuat penerapan pendekatan matematis dalam perancangan ruang yang aman, nyaman, dan memiliki tingkat privasi akustik yang optimal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Dr. Hamidah Nasution, M.Si., selaku dosen pengampu yang telah memberikan arahan, bimbingan, serta masukan konstruktif selama proses penyusunan artikel ini. Dukungan beliau sangat membantu dalam memperjelas struktur penulisan, memperbaiki substansi pembahasan, serta memastikan kesesuaian format dengan standar akademik yang berlaku. Melalui panduan yang diberikan, proses penulisan dapat berjalan lebih terarah hingga artikel ini dapat dipersiapkan dengan layak untuk Seminar Nasional Matematika 2025. Kontribusi tersebut menjadi bagian penting dalam penyelesaian karya ini, dan penulis menghargainya dengan penuh hormat.

DAFTAR PUSTAKA

Bevilacqua, A., Farina, A., Iannace, G., & Ferrari, J. (2025). Acoustic Investigations of Two Barrel-Vaulted Halls : Sisto V in Naples and Aula Magna at the University of Parma. *Applied Sciences*, *15*(9), 1–17. https://doi.org/10.3390/app15095127

Bjelic, M., Miljkovic, T., Mijic, M., & Pavlovic, D. S. (2024). An Estimation of Speech Privacy Class Based on ISO Parameter. *Applied Sciences*, *14*(3). doi.org/ 10.3390/app14030967

Foteinou, A., Stevens, F., & Murphy, D. (2025). Revisiting the Acoustics of St Paul's Cathedral, London. *Proceedings of the Acoustical Society of Japan Meeting 2023*, *7*(3). https://doi.org/10.3390/acoustics7030049

Ieiri, S., Yamada, K., Sasamura, T., Itoh, S., Kasashima, T., & Morita, T. (2023). Double ellipsoidal reflective surface for ultrasonic waves focusing into a thin waveguide. *3J1-4*, *44*, 167–168. https://doi.org/10.24492/use.44.0_3J1-4

Purwojatmiko, B. H., & Salati, D. (2022). Unjuk Kerja Kondisi Akustik Ruang Kelas Pembelajaran: Desain Faktorial Umum. *Jurnal Teknologi Dan Manajemen*, *20*(2), 157–164. https://doi.org/10.52330/jtm.v20i2.70

Putri, F. H., & Senasaputro, B. B. (2024). Optimalisasi Kenyamanan Audial dalam Akustik Gereja: Studi Kasus Gereja Mater Dei Lampersari Semarang. *Jurnal Lingkungan Binaan Indonesia*, *13*(1), 158–167. http://dx.doi.org/10.32315/jlbi.v13i3.393

Runtulalo, A. P., Rahim, M. R., & Kusno, A. (2018). Reverberation Time dan Distribusi Bunyi dalam Ruang. *Jurnal Penelitian Enjiniring*, *22*(2), 143–154. https://doi.org/10.25042/jpe.112018.07

Vercammen, M. L. (2013). Sound concentration caused by curved surfaces. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, *19*. https://doi.org/10.1121/1.4800250

Warkentin, L., Denk, F., Winkler, A., Sankowsky-Rothe, T., Blau, M., Holube, I., & Husstedt, H. (2024). Effect of room acoustic properties and head orientation on practical speech-in-noise measurements for various spatial con fi gurations. *Acta Acustica*. https://doi.org/10.1051/aacus/2024018