

Nyamankah Ruangan di Universitas XYZ?

Imelda Averina¹ dan Eddy Yusuf^{1,*}

¹Program Studi Teknik Sipil dan Center for Urban Studies, Universitas Pembangunan Jaya
Tangerang Selatan, Banten 15413, Indonesia

*Email korespondensi penulis: eddy.yusuf@upj.ac.id

Received 24 August 2022, Revised 29 September 2022, Accepted 30 September 2022

Abstract — *This work analyzes the acoustic quality of five rooms clustered into three different functions (studio, meeting room, and classroom) at University XYZ. Sound of exploding balloon was used to simulate an impulsive sound source. The recorded sound was analyzed using REW software to produce the reverberation time RT60 and speech clarity C50 as well as to rank the acoustic quality of those rooms. We show that the acoustic quality of a room strongly correlate with the volume of the room, the materials that made up the room, and what are included in the room.*

Keywords: reverberation time, RT60, clarity, acoustics, REW

Abstrak — *Tulisan ini mengkaji kualitas parameter akustik, dari lima ruangan di Universitas XYZ, yang terbagi ke dalam tiga kluster fungsi (studio, ruang rapat, dan kelas). Rekaman suara dari sumber suara impulsif dianalisis dengan menggunakan perangkat lunak REW untuk menghasilkan reverberation time RT60 dan speech clarity C50 yang dapat digunakan untuk memeringkat kelima ruangan tersebut. Analisis menunjukkan adanya korelasi yang erat antara volume ruangan, material penyusun ruangan, dan isi ruangan terhadap kualitas akustik ruangan.*

Kata Kunci: gema, RT60, kejernihan suara, akustik, REW

PENDAHULUAN

Akustik ruangan adalah bagian penting dalam rancang bangun ruangan di dalam sebuah gedung untuk menjamin kenyamanan pengguna sesuai fungsi ruangan. Berbagai parameter akustik digunakan untuk mengukur kualitas akustik sebuah ruangan. Ada dua parameter akustik utama yang menjadi fokus dalam tulisan ini. Yang pertama adalah RT60, sebuah parameter akustik yang menggambarkan skala waktu bagi sebuah sumber suara untuk kehilangan tingkat intensitas suara sebesar 60 dB. Secara empiris, RT60 dapat dihitung melalui Persamaan Sabine (Abdullah et al., 2020)

$$RT60 = 0.16V / (\sum \alpha_i S_i) \quad (1)$$

di mana V adalah volume ruangan, α_i dan S_i adalah koefisien absorpsi dan luas permukaan pemantul suara (misalnya dinding, lantai, plafon, furnitur, maupun penghuni) di dalam ruangan tersebut. Dalam praktik umumnya sangat sulit untuk mendapatkan nilai RT60 karena perubahan tingkat intensitas suara sebesar 60 dB setara dengan penurunan intensitas suara sebesar 10^{-6} intensitas awal. Tulisan ini menggunakan alternatif perhitungan ekstrapolasi RT60 berdasarkan T30, waktu yang diperlukan oleh sumber suara kehilangan tingkat intensitas suara sebesar 30 dB. Nilai ideal RT60 akan bergantung pada fungsi ruangan (Abdullah et al., 2020; Kang, 2005; Sarlati et al., 2014); kondisi ruangan yang tidak optimum tentu akan mempengaruhi kenyamanan

pengguna ruangan dan menghambat kegiatan yang direncanakan di ruangan tersebut (Mogas-Recalde et al., 2021).

Parameter kedua adalah *speech clarity* C50 (dalam dB) yang didefinisikan sebagai logaritma rasio energi suara pada pantulan awal (< 50 ms) terhadap energi suara pada pantulan yang muncul kemudian (> 50 ms) (Bradley et al., 1999). Asumsi yang digunakan adalah pantulan awal (< 50 ms) merupakan bagian suara yang dapat ditangkap secara jernih oleh pendengar sedangkan pantulan yang terjadi di atas 50 ms memudahkan kejernihan suara dan mengaburkan pemahaman kalimat oleh pendengar.

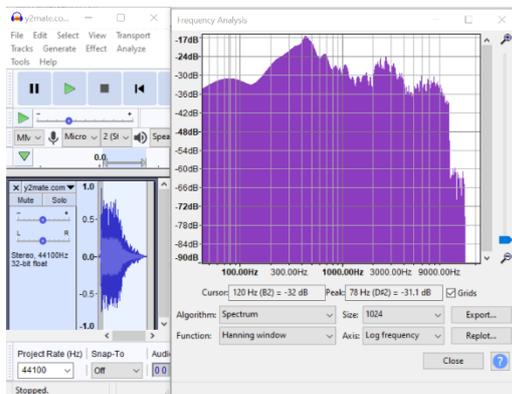
Tujuan tulisan ini adalah melaporkan pengukuran dan analisis RT60 dan C50 untuk lima ruangan di Universitas XYZ yang dibagi ke dalam tiga kluster fungsi. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran dan pemetaan kualitas akustik kelima ruangan tersebut serta usulan upaya peningkatan yang perlu dilakukan. Dalam kerangka kerja jangka panjang, penelitian ini dapat menjadi masukan dalam rancang bangun ruangan di masa depan.

METODE PENELITIAN

Penulis memilih lima ruangan yang mewakili tiga kluster fungsi ruangan di Universitas XYZ: studio untuk kegiatan pembelajaran program studi, 2 ruangan rapat (besar dan kecil), dan dua kelas (Kelas

1 dan 2). Data suara diambil dengan menggunakan REW, sebuah perangkat lunak pengukuran akustik basis *open source* (<https://www.roomeqwizard.com/>). Sumber suara impulsif diperoleh dari suara letusan balon yang diunduh dari Youtube (<https://youtu.be/8N03q06ji74>). Sebaran tingkat intensitas suara letusan balon sebagai fungsi frekwensi diperoleh dari perangkat lunak Audacity (<https://www.audacityteam.org/>); rentang frekwensi suara letusan balon ditampilkan pada Gambar 1.

Proses pengambilan data digambarkan sebagai berikut. Perangkat keras ditempatkan pada bagian tengah ruangan yang akan diteliti. Pengambilan data suara dilakukan tanpa kehadiran orang di ruangan tersebut kecuali untuk Kelas 1. Untuk Kelas 1, penulis mengambil data suara dengan dan tanpa orang untuk melihat pengaruh kehadiran orang parameter akustik ruangan tersebut. Sumber suara impulsif dinyalakan pada *smartphone* dengan pengaturan tingkat kekerasan suara 100%. Letak *smartphone* diatur pada jarak 1 meter dari laptop tersebut. Suara direkam dengan laptop yang sudah terpasang REW untuk memberikan grafik *impulse response* yang merupakan rekaman laju peluruhan tingkat intensitas suara sampai menyentuh *noise floor*. Nilai RT60 diperoleh melalui ekstrapolasi integral Schroeder dari grafik *impulse response*.



Gambar 1. Tingkat intensitas suara sebagai fungsi frekwensi dari suara letusan balon. Di sini terlihat bahwa sumber suara memiliki rentang frekwensi yang lebar.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Secara umum parameter akustik RT60 dan C50 bergantung pada ukuran/volume ruangan serta karakteristik ruangan tersebut. Ketergantungan RT60 dan C50 terhadap frekuensi muncul secara tidak langsung karena koefisien absorpsi material memiliki ketergantungan terhadap frekwensi (Dunne et al., 2017; Fediuk et al., 2021; Rastegar et al., 2022).

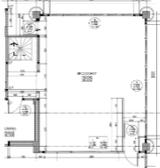
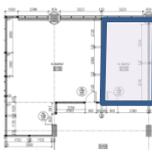
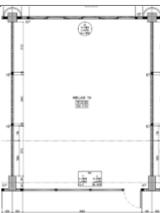
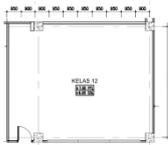
Hasil utama penelitian ini ditampilkan pada Tabel 1, Tabel 2, dan Gambar 3. Tabel 1 menampilkan informasi yang rinci untuk kelima ruangan, dalam 3 klaster fungsi, yang digunakan di dalam penelitian ini (Studio, Ruang Rapat Besar, Ruang Rapat Kecil, Kelas 1, dan Kelas 2): luasan, denah, serta karakteristik ruangan yang mencakup tinggi ruangan,

isi ruangan (meja, kursi, furnitur tambahan, dan hal-hal lain yang terdapat di ruangan), dinding, dan lantai. Data pada Tabel 1 menunjukkan Studio memiliki ukuran terbesar (luas dan tinggi) serta diperlengkapi dengan material akustik yang baik (karpet dan peredam suara pada dinding). Ruang Rapat Besar dan Kecil, dengan rasio luasan sekitar 5:2, memiliki karakteristik yang mirip dari sisi tinggi ruangan, jenis dan material furnitur yang berada di ruangan-ruangan tersebut, serta karakteristik dinding dan jendela. Dua buah ruangan kelas yang dikaji dalam penelitian ini (Kelas 1 dan 2) memiliki luasan dan tinggi yang serupa. Perbedaan utama dari dua kelas ini terletak pada material penyusun dinding dan jenis furnitur yang berada di kedua ruangan tersebut. Kelas 1 dikelilingi oleh dinding tembok pada ketiga sisinya sedangkan ketiga sisi dinding Kelas 2 terbuat dari gipsum. Kedua kelas memiliki 45 meja kursi untuk mahasiswa namun furnitur yang ada di dalam Kelas 1 terbuat dari kayu sedangkan furnitur di dalam Kelas 2 terbuat dari bahan pabrik. Pembahasan berikut akan dikelompokkan sebagai berikut

Nilai parameter akustik RT60 dan C50 yang diperoleh dari REW disajikan pada Tabel 2 untuk kelima ruangan yang diteliti. Secara keseluruhan, Studio, dengan volume ruangan terbesar dari seluruh ruangan yang dikaji, memiliki akustik ruangan terbaik dengan nilai RT60 = 0.274 s dan C50 = 32.28 dB. Hadir pada urutan kedua adalah Kelas 2 dengan nilai RT60 = 0.34 s dan C50 = 25.77 dB, lalu diikuti oleh Ruang Rapat Besar, Ruang Rapat Kecil, dan berada pada posisi terakhir adalah Kelas 1 dengan nilai RT60 = 0.793, 0.942, dan 1.196 s serta C50 = 18.83, 17.33, dan 18.30 dB secara berurutan.

Perhitungan REW ini dapat didiskusikan dalam konteks persamaan empiris Sabine yang memberikan waktu RT60 sebagai fungsi volume ruangan dan karakteristik 'pemantul' di dalam ruangan tersebut yang merupakan kombinasi dari jumlah luas permukaan dan koefisien serapan suara dari pemantul tersebut (Persamaan 1). Studio (Tabel 2A) memiliki volume ruangan terbesar, dan secara geometris luas permukaan pemantul terbesar, namun RT60 Studio berada pada posisi terbaik. Hal yang sama ditunjukkan oleh C50 yang terbaik yang menandakan percakapan normal dapat dipahami dengan baik oleh pendengar. Hal ini memberikan indikasi bahwa infrastruktur akustik Studio (lantai berlapis karpet dan dinding terpasang material peredam suara) memiliki koefisien absorpsi α_i terbesar dari semua ruangan yang dipelajari.

Tabel 1. Denah, luas, dan karakteristik 5 ruangan yang diteliti pada tulisan ini. Denah dan luas diperoleh dari rencana induk sarana prasarana Universitas XYZ, sedangkan karakteristik ruangan diperoleh melalui observasi langsung yang dilakukan oleh penulis pada setiap ruangan yang diteliti.

Ruangan	Ukuran (m ²)	Denah	Karakteristik
Studio	78.20		<ul style="list-style-type: none"> • Tinggi ruangan 7m; • Semua sisi ruangan dilapisi peredam suara; • Lantai dilapisi karpet; • Terdapat <i>green screen</i>, tangga, 1 lemari besi, dan 2 panggung yang terbuat dari gipsium dan multiplex dilapisi peredam suara.
Ruang rapat besar	59.72		<ul style="list-style-type: none"> • Tinggi ruangan 2.5m; • 5 sisi dinding dari tembok; 1 sisi dari gipsium dan terdapat jendela yang ditutupi <i>roller blind</i>; • Lantai keramik; • Terdapat 16 kursi pabrik dan 10 meja kayu.
Ruang rapat kecil	24.15		<ul style="list-style-type: none"> • Tinggi ruangan 2.5m; • 3 sisi dinding terbuat dari tembok dan 1 sisi dari gipsium; • Terdapat jendela yang ditutupi <i>roller blind</i>; • Lantai keramik; • Terdapat 10 kursi pabrik dan 4 meja kayu.
Kelas 1	69.03		<ul style="list-style-type: none"> • Tinggi ruangan 3.5m; • Semua sisi dinding terbuat dari tembok, terdapat jendela yang ditutupi gordena di salah satu sisinya; • Lantai keramik; • Terdapat 45 kursi kuliah kayu, 1 kursi kayu, dan 1 meja kayu dosen.
Kelas 2	70.13		<ul style="list-style-type: none"> • Tinggi ruangan 3m; • Semua sisi dinding dari gipsium, terdapat jendela di salah satu sisinya; • Lantai keramik; • Terdapat 45 kursi kuliah pabrik, 1 kursi pabrik, dan 1 meja kayu dosen.

Kajian kluster ruangan rapat (Ruang Rapat Besar (Tabel 2B) dan Kecil (Tabel 2C)) memberikan hasil RT60 dan C50 yang serupa, walaupun Ruang Rapat Besar sedikit lebih baik daripada Ruang Rapat Kecil. Secara geometris Ruang Rapat Besar memiliki luar ruangan sekitar 2.5x lebih besar daripada Ruang Rapat Kecil, namun RT60 Ruang Rapat Besar lebih rendah hampir 20% dibandingkan dengan RT60 Ruang Rapat Kecil. Dalam konteks Persamaan Sabine, maka $\sum \alpha_i S_i$ untuk Ruang Rapat Besar minimal 3x lebih besar daripada $\sum \alpha_i S_i$ Ruang Rapat Kecil. Tabel 1 menunjukkan karakteristik interior kedua ruangan rapat tersebut serupa sehingga kita dapat berasumsi koefisien absorpsi α_i untuk permukaan pemantul juga memiliki nilai yang serupa. Oleh karena itu kontribusi terbesar dalam nilai RT60 disumbangkan oleh luas permukaan pemantul dalam kedua ruangan tersebut. *Speech clarity* untuk kedua rapat tersebut kurang baik, yang terlihat dari nilai C50 yang berada pada kisaran 17 – 18 dB. Hal ini pun

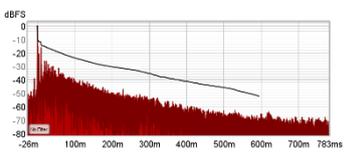
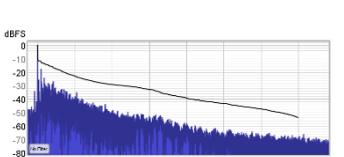
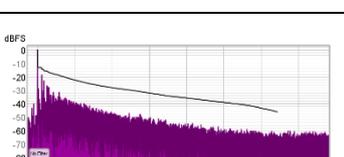
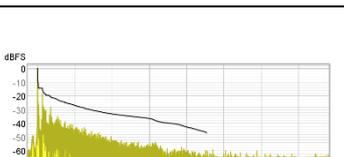
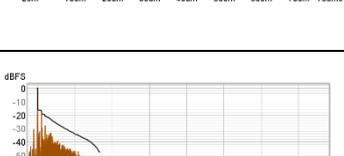
dapat dikonfirmasi dari pengalaman pengguna ruangan rapat di mana pengguna merasakan gema yang cukup dominan sehingga pengguna sulit untuk memahami lawan bicara.

Pada kluster kelas, penulis mengkaji dua buah kelas, Kelas 1 (Tabel 2D) dan Kelas 2 (Tabel 2F), dengan luasan dan volume yang hampir sama. Perbedaan mendasar antara dua kelas tersebut ada pada material penyusun dinding dan isi kedua kelas tersebut. Nilai RT60 untuk Kelas 1 mendekati 1.2 s, hampir tiga kali lipat daripada RT60 untuk Kelas 2. Mengacu kepada Persamaan Sabine, perbedaan mencolok ini ditimbulkan oleh perbedaan koefisien absorpsi α_i yang besar antara kedua ruangan kelas tersebut. Keberadaan dinding yang terbuat dari gipsium dan sejumlah meja dan kursi mahasiswa yang terbuat dari bahan pabrik membuat serapan suara lebih baik sehingga pemantulan suara cukup terkontrol. Indikasi ini dapat dibaca melalui nilai RT60 dan C50 Kelas 2 yang ada pada nilai 0.34 s dan 25.77 dB. Pengalaman pengguna memberikan konfirmasi pada kenyamanan Kelas 2 dibandingkan Kelas 1: pengguna

lebih dapat memahami lawan bicara di Kelas 2 dibandingkan di Kelas 1.

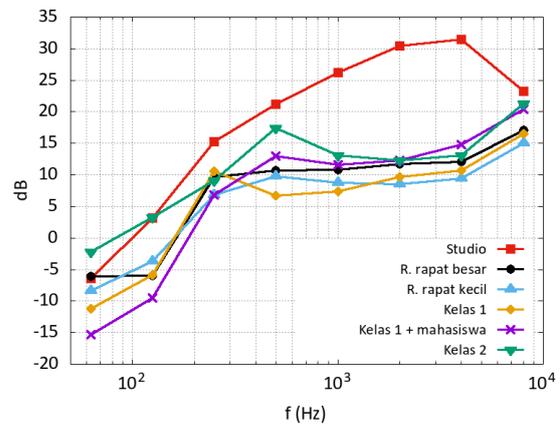
Pada titik ini, penulis mencoba memahami kondisi akustik Kelas 1 lebih jauh dengan mengikutsertakan 15 mahasiswa (Gambar 2) di dalam kelas dan mengulang langkah percobaan di atas. Tabel 2E menunjukkan hasil RT60 dan C50 untuk Kelas 1 di mana terdapat 15 mahasiswa yang tersebar di dalam kelas. Di sini terlihat keberadaan 15 mahasiswa di kelas memberikan RT60 = 0.655 s dan C50 = 22.20 dB, sebuah peningkatan yang signifikan terhadap parameter akustik Kelas 1 kosong. Peningkatan tajam ini disebabkan oleh hadirnya permukaan pemantul suara baru (mahasiswa) dengan koefisien absorpsi suara yang cukup besar, atau dengan kata lain adanya peningkatan nilai $\sum \alpha_i S_i$ dengan kehadiran mahasiswa.

Tabel 2. Impulse Response untuk lima ruangan pada Universitas XYZ

	Ruangan	Impulse Response
A	Studio RT60 (s) = 0.274 ± 0.006 C50 (dB) = 32.28 ± 0.66	
B	Ruang rapat besar RT60 (s) = 0.793 ± 0.034 C50 (dB) = 18.83 ± 0.33	
C	Ruang rapat kecil RT60 (s) = 0.942 ± 0.028 C50 (dB) = 17.33 ± 0.14	
D	Kelas 1 RT60 (s) = 1.196 ± 0.082 C50 (dB) = 18.30 ± 0.14	
E	Kelas 1 dengan 15 mahasiswa RT60 (s) = 0.655 ± 0.072 C50 (dB) = 22.20 ± 0.18	
F	Kelas 2 RT60 (s) = 0.340 ± 0.006 C50 (dB) = 25.77 ± 0.20	



Gambar 2. Sebaran mahasiswa di Kelas 2 untuk pengambilan data RT60 dan C50



Gambar 3. Speech clarity C50 sebagai fungsi frekwensi suara untuk 5 ruangan yang dikaji dalam penelitian ini.

Speech clarity C50 (dalam dB) sebagai fungsi frekwensi suara untuk kelima ruangan yang diteliti ditampilkan pada Gambar 2. Kejernihan suara bagi penghuni di dalam sebuah ruangan umumnya diperoleh ketika C50 berada di atas 3 dB (Reichardt, W.; Alim, O. Abdel; Schmidt, 1975). Pengukuran C50 untuk Ruang Rapat Besar, Ruang Rapat Kecil, dan Kelas 1 berada di bawah 5 dB untuk rentang frekwensi 60 – 200. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi dominasi pantulan suara untuk durasi di atas 50 ms; mengingat rentang frekwensi fundamental suara manusia dewasa berada pada 100 – 250 Hz (Saggio & Costantini, 2020; Zeng et al., 2005), pengguna ketiga ruangan ini akan merasakan efek gema yang kuat yang berakibat pada rendahnya kejernihan suara bagi pendengar pada rentang frekwensi tersebut. Di sisi lain, Studio dan Kelas 2 memiliki C50 di atas 5 dB pada rentang frekwensi 60 – 200 Hz yang menandakan pantulan suara konstruktif dalam menghasilkan kejernihan suara bagi pendengar. Untuk frekwensi di atas 200 Hz, seluruh ruangan membukukan nilai C50 di atas 5 dB, dengan Studio tetap memimpin untuk nilai C50 terbesar dari kelima ruangan yang dikaji. Berdasarkan temuan ini, kelima ruangan yang dikaji akan menghasilkan kejernihan suara yang baik untuk frekwensi tinggi.

Penelitian ini memiliki beberapa batasan: 1) hanya dua parameter akustik yang dianalisis dalam tulisan ini yaitu RT60 dan C50; penelitian yang lebih komprehensif dapat dilakukan dengan

mengikutsertakan parameter akustik lain seperti speech transmission index dan gain, 2) suara letusan balon yang digunakan sebagai sumber suara impulsif memiliki rentang frekwensi yang lebar (Gambar 1) sehingga ketergantungan RT60 dan C50 terhadap frekwensi belum dapat dianalisis secara rinci, 3) analisis koefisien absorpsi material di dalam ruangan (sebagai contoh: dinding, lantai, dan plafon) belum dilakukan, dan 4) jumlah dan jenis ruangan yang dikaji dalam penelitian masih terbatas dan perlu diperluas cakupannya untuk mendapatkan gambaran yang lebih komprehensif.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengkaji kualitas akustik 5 ruangan yang terbagi ke dalam 3 kluster fungsi di Universitas XYZ. Parameter akustik yang dipilih untuk dikaji adalah *reverberation time* RT60, durasi waktu untuk tingkat intensitas suara berkurang sebanyak 60 dB, dan *speech clarity* C50, rasio energi suara yang terpantul di dalam ruangan dalam durasi < 50 ms dan > 50 ms. Analisis menunjukkan korelasi yang erat antara luas/volume ruang dengan isi dan materi penyusun ruangan dalam memberikan nilai RT60 dan C50.

Material lunak (dinding gipsium dan kursi yang terbuat dari bahan pabrik) memberikan dampak yang signifikan dalam mengendalikan RT60 dan C50 yang meningkatkan kualitas akustik di dalam ruangan yang dikaji. Hal ini diamati pada Studio dan Kelas 2: Studio memiliki infrastruktur yang baik (lantai karpet dan dinding terlapis material peredam suara) dibandingkan keempat ruang yang lain, sedangkan Kelas 2 memiliki dinding gipsium dan 45 buah meja kursi yang terbuat dari bahan pabrik.

Ruangan dengan permukaan keras (dinding tembok dan/atau terisi oleh meja kursi kayu) mengalami degradasi akustik yang cukup signifikan. Hal ini diamati pada Ruang Rapat Besar, Ruang Rapat kecil, dan Kelas 1. Hal yang menarik adalah luas /volume ruangan tidak menjadi faktor penentu dalam penentuan RT60 dan C50 (lihat Tabel 1 dan Tabel 2B dan 2C). Hal menarik lain yang perlu diangkat dalam kesimpulan adalah keberadaan penghuni di dalam Kelas 1 menurunkan nilai RT60 hampir 2x nilai RT tanpa penghuni dan meningkatkan nilai C50. Kehadiran penghuni di Kelas 1 ini menambah luas permukaan pemantul yang meningkatkan kualitas akustik di dalam ruang tersebut. Analisis yang dilakukan dalam penelitian ini memberikan indikasi bahwa penambahan material berbahan lunak di sekeliling dan di dalam ruangan seperti peredam suara, kursi berbahan pabrik, dan lantai yang dilapisi karpet, dapat meningkatkan kualitas akustik ruangan. Penelitian ini dapat menjadi titik awal untuk rancang bangun ruang yang komprehensif untuk mendapatkan kualitas akustik ruangan yang baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, R., Ismail, S. I., & Nik Dzulkefli, N. N. S. (2020). Potential acoustic treatment analysis using sabine formula in unoccupied classroom. *Journal of Physics: Conference Series*, 1529(2). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1529/2/022031>
- Bradley, J. S., Reich, R., & Norcross, S. G. (1999). A just noticeable difference in C50 for speech. *Applied Acoustics*, 58(2), 99–108. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(98\)00075-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0003-682X(98)00075-9)
- Dunne, R., Desai, D., & Sadiku, R. (2017). A Review of the Factors that Influence Sound Absorption and the Available Empirical Models for Fibrous Materials. *Acoustics Australia*, 45(2), 453–469. <https://doi.org/10.1007/s40857-017-0097-4>
- Fediuk, R., Amran, M., Vatin, N., Vasilev, Y., Lesovik, V., & Ozbakkaloglu, T. (2021). Acoustic properties of innovative concretes: A review. *Materials*, 14(2), 1–28. <https://doi.org/10.3390/ma14020398>
- Kang, J. (2005). Urban Acoustics. *Applied Acoustics*, 66(2), 121–122. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2004.07.006>
- Mogas-Recalde, J., Palau, R., & Márquez, M. (2021). How Classroom Acoustics Influence Students and Teachers: A systematic Literature Review. *Journal of Technology and Science Education*, 11(2), 245–259.
- Rastegar, N., Ershad-Langroudi, A., Parsimehr, H., & Moradi, G. (2022). Sound-absorbing porous materials: a review on polyurethane-based foams. *Iranian Polymer Journal*, 31(1), 83–105. <https://doi.org/10.1007/s13726-021-01006-8>
- Reichardt, W.; Alim, O. Abdel; Schmidt, W. (1975). Definition and Basis of Making an Objective Evaluation to Distinguish Between Useful and Useless Clarity Defining Musical Performances. *Acta Acust United Ac*, 32(3), 126–137.
- Saggio, G., & Costantini, G. (2020). Worldwide Healthy Adult Voice Baseline Parameters: A Comprehensive Review. *Journal of Voice*. <https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2020.08.028>
- Sarlati, S., Haron, Z., Yahya, K., Darus, N., Dimon, N., & Athari, P. (2014). The importance of acoustic quality in classroom. *Jurnal Teknologi*, 70(7), 71–76. <https://doi.org/10.11113/jt.v70.3581>
- Zeng, F. G., Nie, K., Stickney, G. S., Kong, Y. Y., Vongphoe, M., Bhargave, A., Wei, C., & Cao, K. (2005). Speech recognition with amplitude and frequency modulations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(7), 2293–2298. <https://doi.org/10.1073/pnas.0406460102>.