

Pengujian Material Absorpsi Bunyi dari Serbuk Kayu Menggunakan Tabung Impedansi Dua Mikrofon

Felix Marcellino Henrikus^(1,a), Adita Sutresno^{(1,b)*}
dan Ferdy Samuel Rondonuwu^(1,c)

⁽¹⁾Program Studi Fisika, Universitas Kristen Satya Wacana, Salatiga, Indonesia, 50711

Email : ^(a)felixmarcellinohenrikus@gmail.com, ^(b*)adita.sutresno@uksw.edu,

^(c)ferdy.rondonuwu@uksw.edu

Diterima (08 November 2024), Direvisi (10 Desember 2024)

Abstract. A study was conducted to test sound-absorbing materials made from teak wood waste by comparing the effect of the number of holes in the material on its absorption coefficient. This research utilized a two-microphone impedance tube with a length of 1.82 m and a diameter of 0.07 m, where the sound propagation speed was determined by measuring the fundamental frequency based on the open organ pipe principle. By determining this propagation speed, the resonance frequency of the tube was used as the basis for measuring the absorption coefficient, and the microphones were positioned at the nodes and antinodes of the standing wave at each frequency to obtain the standing wave ratio. The results indicated that non-perforated and perforated materials exhibited different absorption patterns, with non-perforated material being more effective in absorbing sound at low frequencies, while perforated material showed a broader absorption effectiveness at medium to high frequencies. Thus, the design of sound-absorbing materials with holes offers a more flexible and adaptive solution for noise control in various environmental conditions, making it a potential innovation in acoustic technology and the development of environmentally friendly materials.

Keywords: sound absorption coefficient, acoustic panels, impedance tube, standing waves.

Abstrak. Telah dilakukan penelitian untuk menguji material absorpsi bunyi yang dibuat dari limbah serbuk kayu jati dengan membandingkan pengaruh jumlah lubang pada material terhadap koefisien absorpsinya. Penelitian ini menggunakan tabung impedansi dua mikrofon dengan panjang 1,82 m dan diameter 0,07 m, di mana kecepatan rambat bunyi ditentukan melalui pengukuran frekuensi dasar berdasarkan prinsip pipa organa terbuka. Dengan mengetahui kecepatan rambat ini, frekuensi resonansi yang sesuai dengan tabung digunakan sebagai dasar pengukuran koefisien absorpsi, dan mikrofon dikondisikan pada simpul dan perut gelombang di setiap frekuensi untuk memperoleh rasio gelombang berdiri. Hasil penelitian menunjukkan bahwa material tak lubang dan material berlubang memiliki pola absorpsi yang berbeda, material tak berlubang efektif pada mengabsorpsi pada frekuensi rendah dan material berlubang memiliki efektivitas absorpsi yang lebih luas pada frekuensi menengah dan tinggi. Dengan demikian, desain material absorpsi dengan lubang menawarkan solusi yang lebih fleksibel dan adaptif untuk pengendalian kebisingan pada berbagai kondisi lingkungan, menjadikannya inovasi potensial dalam teknologi akustik dan pengembangan material ramah lingkungan.

Kata kunci: koefisien absorpsi bunyi, panel akustik, tabung impedansi, gelombang berdiri

PENDAHULUAN

Pada masa kini, perkembangan industri dan urbanisasi berlangsung sangat cepat, menyebabkan peningkatan kepadatan penduduk di beberapa wilayah. Masalah kebisingan lingkungan menjadi masalah yang familiar, terutama pada kegiatan industri konstruksi infrastruktur, *production house* dan studio musik yang menyebabkan adanya polusi suara [1, 2, 3, 4]. Kebisingan yang tak terkendali tidak hanya sekedar mengganggu kenyamanan, tetapi juga memberikan dampak negatif pada kesehatan manusia. Dampak ini dapat berupa gangguan tidur, penurunan produktivitas, dan peningkatan stres [5]. Oleh karena itu, pentingnya dikembangkan solusi teknologi yang dapat mengurangi dampak ini terutama di lingkungan industri dan perkotaan. Terkhusus bagi pelaku *production house* dan studio musik, kualitas akustik yang optimal sangat diperlukan untuk memastikan rekaman suara yang jernih. Salah satu faktor penting yang mempengaruhi kualitas ini adalah ruangan rekaman yang digunakan harus menerapkan standar arsitektur akustik yang baik [6]. Standar ini berguna tidak hanya untuk mengontrol suara asli, tetapi juga untuk mengurangi gangguan gaung dan gema yang dapat mengganggu hasil produksi audio. Dengan demikian, standar arsitektur akustik yang tepat harus diterapkan untuk menghasilkan kualitas suara yang lebih baik untuk didengar.

Untuk mengontrolnya, diperlukan teknologi yang disebut material absorpsi bunyi [7]. Dalam konteks *green technology* dan pengelolaan lingkungan, material absorpsi bunyi dapat diproduksi dari limbah organik seperti limbah serbuk kayu [8]. Pemanfaatan limbah serbuk kayu sebagai bahan dasar pembuatan material absorpsi bunyi memiliki potensi besar untuk dikembangkan menjadi bahan komposit akustik [9]. Karena, dengan menggunakan limbah serbuk kayu, tidak hanya mendukung

green technology tetapi juga memberikan nilai tambah dalam pengelolaan limbah dan mengurangi ketergantungan pada material konvensional yang kurang ramah lingkungan. Limbah serbuk kayu menjadi bahan yang ramah lingkungan dan ekonomis, serta belum banyak penelitian mengenai bahan dasar ini sehingga dapat menjadi inovasi dalam akustik bangunan.

Gelombang berdiri/*standing waves* merupakan prinsip fisis yang mendasari penelitian ini. Gelombang berdiri terjadi ketika dua gelombang bunyi dengan frekuensi, amplitudo, dan fase yang sama di setiap waktu bergerak pada pipa organa dengan arah yang saling berlawanan. Karakterisasi dari gelombang ini adalah memiliki simpul (*nodes*) dan perut (*antinodes*) yang mampu bersuperposisi antara gelombang datang dan gelombang pantulnya [10]. Pemahaman mengenai gelombang berdiri menjadi sangat penting dalam penelitian ini karena distribusi simpul dan perut gelombang akan mempengaruhi efektivitas absorpsi material.

Dalam perambatannya, gelombang bunyi yang merambat di dalam pipa dapat memiliki amplitudo dan fase yang tetap sepanjang waktu, tetapi juga dapat berlaku lain jika di dalam pipa memiliki karakteristik tertentu yang menyebabkan distorsi pada gelombang bunyi. Distorsi ini dapat tercipta yang salah satunya karena pemberian material absorpsi bunyi di ujung pipa. Material absorpsi bunyi merupakan material yang berperan untuk mengendalikan kebisingan lingkungan [11]. Peletakan material ini akan menciptakan distorsi gelombang yang mempengaruhi nilai amplitudo gelombang datang dan gelombang pantul yang menjadi tinjauan pengukuran dalam penelitian ini seperti ditunjukkan pada **Gambar 1** [12, 13, 14]. Karena adanya fungsi absorpsi dan refleksi gelombang dari material, menyebabkan nilai amplitudo gelombang pantul menjadi lebih kecil atau sama dengan gelombang datang

yang bergantung karakteristik absorpsi dari material.

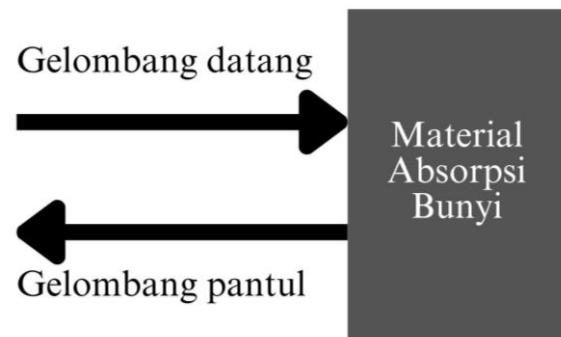
Setiap material absorpsi bunyi memiliki kemampuan absorpsi dan refleksi yang bersifat diskrit terhadap frekuensi [15, 16]. Kemampuan absorpsi material atau yang dapat disebut koefisien absorpsi bunyi memiliki rentang nilai dari 0 hingga 1. Nilai 0 menunjukkan jika tidak ada bunyi yang diserap dan nilai 1 menunjukkan jika seluruh bunyi yang datang diserap oleh material [17, 18, 19, 20]. Namun, studi tentang pemberian variasi pada material absorpsi bunyi seperti jumlah dan distribusi lubang masih sangat terbatas, terkhususnya pada penggunaan bahan dasar limbah serbuk kayu jati. Penelitian ini berupaya untuk mengisi gap tersebut dengan memberikan pemahaman baru mengenai jumlah dan distribusi lubang terhadap efektivitas absorpsi material.

Untuk mengukur kemampuan absorpsi dari material, digunakan tabung impedansi dua mikrofon sebagai alat ukur dengan desain alat ditunjukkan pada **Gambar 2** dan pada **Gambar 3** adalah alat ukur yang digunakan [21, 22, 23]. Metode tabung impedansi memungkinkan pengukuran koefisien absorpsi bunyi menggunakan dua mikrofon untuk mengetahui perbandingan rasio gelombang berdiri (*Standing Wave Ratio/SWR*) dari amplitudo gelombang datang (A) dan gelombang pantul (B) yang diolah untuk mengetahui koefisien refleksi (R) dan absorpsi (α) menggunakan **Persamaan (1)** hingga **Persamaan (4)** [6, 24].

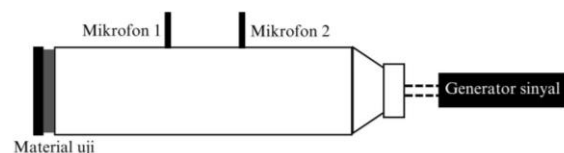
Persamaan (1) dan **(2)** digunakan untuk mengkonversi nilai tegangan dari mikrofon 1 dan 2 menjadi persamaan gelombang dengan x_1 dan x_2 bergantung dengan frekuensi yang diatur. Nilai x_1 dan x_2 sangat bergantung pada nilai frekuensi yang dikeluarkan oleh *speaker* karena x_1 akan berada pada simpul gelombang, sedangkan x_2 akan berada pada perut gelombang. Posisi perut dan simpul gelombang akan bergeser sebanding dengan kenaikan nilai frekuensi

dengan demikian akan tercipta perbandingan rasio gelombang berdiri. Setelah diketahui persamaan gelombang dari setiap mikrofon, kemudian dilakukan eliminasi untuk memperoleh nilai amplitudo gelombang datang (A) dan gelombang pantul (B) agar untuk mengetahui besar koefisien refleksi material (R) oleh **Persamaan 3**. Dan pada **Persamaan 4** diperoleh besarnya nilai absorpsi dari material yang diukur.

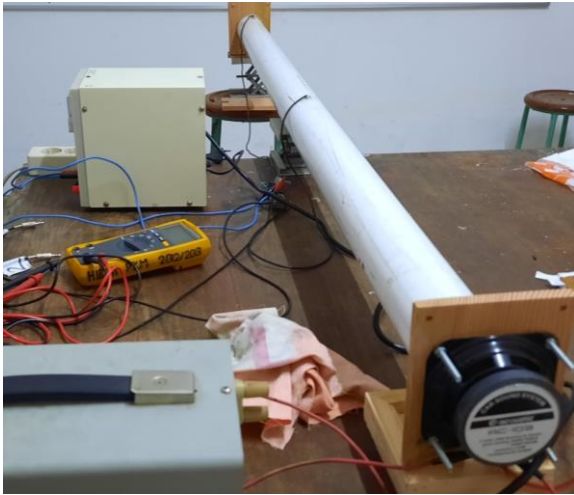
Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan pengaruh jumlah lubang pada material absorpsi bunyi terhadap koefisien absorpsinya dengan bahan dasar komposit yang belum banyak diteliti sebelumnya yaitu serbuk kayu jati. Selain itu, melalui penelitian juga ingin diketahui pada area frekuensi apa material absorpsi bunyi memiliki efektivitas absorpsi bunyi yang paling baik. Diasumsikan tidak ada energi yang hilang selama perambatan bunyi, dan kecepatan rambat bunyi yang berlaku pada pipa adalah 342,37 m/s.



Gambar 1. Tinjauan pengukuran.



Gambar 2. Desain tabung impedansi dua mikrofon.



Gambar 3. Tabung impedansi dua mikrofon.

$$V_1 = Ae^{i(\omega t - kx_1)} + Be^{i(\omega t + kx_1)} \quad (1)$$

$$V_2 = Ae^{i(\omega t - kx_2)} + Be^{i(\omega t + kx_2)} \quad (2)$$

$$R = \frac{B}{A} \quad (3)$$

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (4)$$

METODE PENELITIAN

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain limbah serbuk kayu jati, lem kayu, neraca, pipa PVC, *speaker*, generator sinyal, *power supply*, mikrofon, penguat, dan multimeter. Pada **Gambar 4** merupakan langkah kerja yang dilakukan dalam penelitian ini yang memvisualisasikan langkah kerja secara sistematis dan terstruktur. Dimulai dari persiapan material uji, perancangan sistem instrumentasi, pengukuran dan pengambilan data.

Tabung impedansi pada penelitian ini menggunakan tabung PVC dengan panjang 1,82 m dan berdiameter 0,07 m seperti desain pada **Gambar 2**. Sistem ini dilengkapi dengan dua mikrofon dan penguat sinyal yang diposisikan pada jarak tertentu untuk mendeteksi gelombang

datang dan gelombang pantul di dalam tabung. *Speaker* dipasang pada salah satu ujung tabung sebagai sumber bunyi yang frekuensinya dikendalikan oleh generator sinyal. Daya untuk mikrofon didukung dengan *power supply* DC.

Material uji yang digunakan pada penelitian ini terbuat dari limbah serbuk kayu jati sebagai bahan dasar. Serbuk kayu jati dan lem terlebih dahulu ditimbang dengan neraca untuk memastikan konsistensi berat material yang akan diuji sesuai dengan spesifikasi material yang diinginkan. Setelah serbuk kayu dicampur dengan lem sesuai perbandingan, lalu hasil campuran ini dicetak dalam bentuk lembaran panel pada cetakan yang tebalnya sudah disesuaikan dan dikeringkan pada suhu ruang dengan diberi tekanan 100 N selama 24 jam untuk menjadi material padat yang optimal. Spesifikasi dari material uji yang dibuat disajikan pada **Tabel 1**.

Setelah tabung impedansi dan material uji siap, tahap pengukuran dilakukan dengan meletakkan material uji di ujung lain tabung impedansi dan gelombang bunyi dikeluarkan melalui *speaker*. Frekuensi bunyi divariasikan pada generator sinyal dan respon gelombang yang diterima oleh mikrofon dicatat sesuai nilai tegangan yang ditampilkan oleh multimeter. Setiap pengukuran dilakukan dalam beberapa variasi frekuensi untuk menentukan efektivitas material uji dalam menyerap bunyi pada rentang frekuensi yang berbeda. Data tegangan yang diperoleh diolah menggunakan persamaan yang sudah ada untuk menghitung koefisien refleksi (R) dan absorpsi (α) dari material. Kemudian dilakukan analisa melalui *plotting* kurva dengan membandingkan pola absorpsi dari setiap material pada rentang frekuensi yang diberikan dengan perbedaan jumlah dan distribusi lubang.

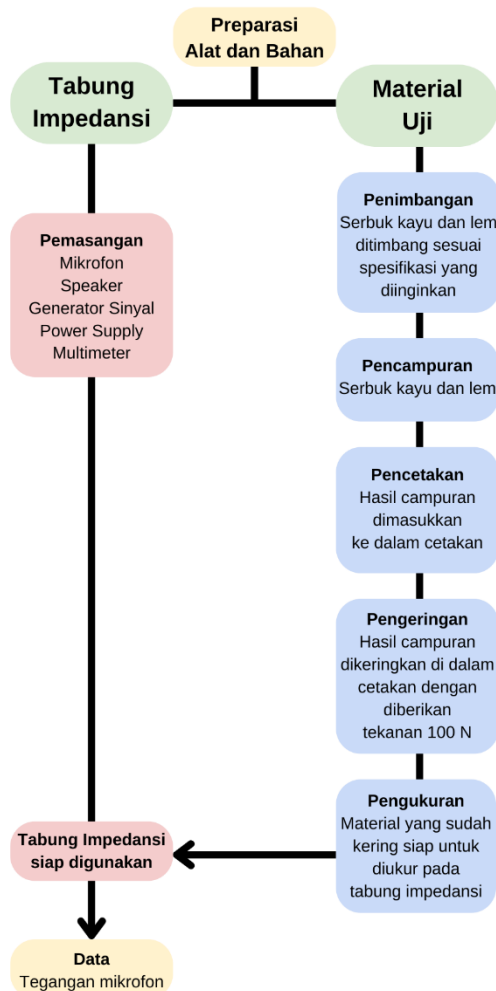
Tabel 1. Spesifikasi material uji

Kayu (gram)	Lem (gram)	Ketebalan (cm)	Jumlah Lubang (buah)
100	100	1	1
100	100	1	4
100	100	1	9
100	100	1	0

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini, dibuat empat material uji dengan tiga material diberi lubang dengan jumlah berturut-turut 1, 4, dan 9 lubang, serta satu material tidak diberikan lubang. Material uji memiliki dimensi 120x120 mm dengan lubang yang dibuat memiliki diameter $(1,6 \pm 0,05)$ mm dan terdistribusi pada material seperti ditunjukkan pada **Gambar 5**. Kecepatan rambat bunyi di dalam tabung ditentukan terlebih dahulu melalui pengukuran frekuensi dasar tabung impedansi berdasarkan prinsip pipa organa terbuka.

Dengan mengetahui nilai kecepatan rambat bunyi di dalam tabung, maka dapat ditentukan frekuensi resonansi pertama, kedua, ketiga, dan seterusnya yang digunakan sebagai dasar pengukuran koefisien absorpsi, serta penempatan mikrofon yang dikondisikan berada pada simpul dan perut gelombang di setiap frekuensi untuk memperoleh *standing wave ratio* (SWR). Diketahui frekuensi yang digunakan adalah 140,70 Hz; 328,30 Hz; 515,90 Hz; 703,50 Hz; 891,10 Hz; 1078,70 Hz; 1266,30 Hz; 1453,90 Hz; 1641,50 Hz; 1829,10 Hz; dan 2016,70 Hz. Nilai-nilai frekuensi ini adalah nilai frekuensi resonansi kedua hingga resonansi kedua belas yang diperoleh melalui pengukuran resonansi dasar sebelumnya dan kecepatan rambat bunyi di dalam tabung. Pada nilai frekuensi yang sudah ditentukan, diklasifikasi ke dalam tiga kelompok yaitu frekuensi di bawah 700,00 Hz sebagai frekuensi rendah, frekuensi di antara 700,00 Hz hingga 1200,00 Hz sebagai frekuensi menengah, dan frekuensi di atas 1200,00 Hz sebagai frekuensi tinggi. Pemilihan dan klasifikasi frekuensi ini menjadi penting karena memungkinkan identifikasi dan interpretasi pola absorpsi dari material pada berbagai kelompok frekuensi.

**Gambar 4.** Langkah kerja.

Pemanfaatan limbah serbuk kayu jati sebagai material absorpsi bunyi dalam penelitian ini didasarkan pada potensi bahan alami untuk meningkatkan performa akustik yang telah dibuktikan pada beberapa bahan serupa. Beberapa penelitian terdahulu seperti yang dilakukan oleh Nabila dkk., menunjukkan bahwa material berbahan dasar organik, seperti pelepah pisang memiliki kemampuan absorpsi yang efektif pada frekuensi menengah, memperkuat pandangan bahwa bahan alami dapat berperan signifikan dalam aplikasi akustik [3]. Demikian pula, penelitian oleh Arunkumar dkk. menunjukkan bahwa komposisi dan struktur material alami berpotensi mempengaruhi spektrum absorpsi suara dan menawarkan alternatif yang ramah lingkungan dibandingkan bahan sintetis [14].

Pada **Gambar 6** disajikan grafik yang membandingkan material berlubang dan tidak berlubang menunjukkan bahwa material tanpa lubang lebih efektif menyerap bunyi pada frekuensi rendah, sementara material berlubang cenderung memiliki nilai absorpsi yang lebih tinggi pada frekuensi menengah dan tinggi. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Yuliantika dkk., yang menyatakan bahwa panel berlubang memperkuat efek resonansi lokal dan meningkatkan disipasi energi bunyi pada rentang frekuensi yang lebih tinggi [6]. Resonansi ini memungkinkan energi akustik terdisipasi lebih efektif melalui konversi energi bunyi menjadi energi panas, sehingga lubang berfungsi sebagai elemen kunci dalam meningkatkan performa material absorpsi pada rentang frekuensi tersebut. Selain itu, material berlubang memperlihatkan pola absorpsi yang lebih konsisten pada frekuensi menengah dan tinggi, menunjukkan adanya peningkatan kemampuan dalam mengabsorpsi dan merefleksikan gelombang bunyi pada rentang frekuensi tersebut. Hasil ini juga konsisten dengan penelitian Risma dkk. dan

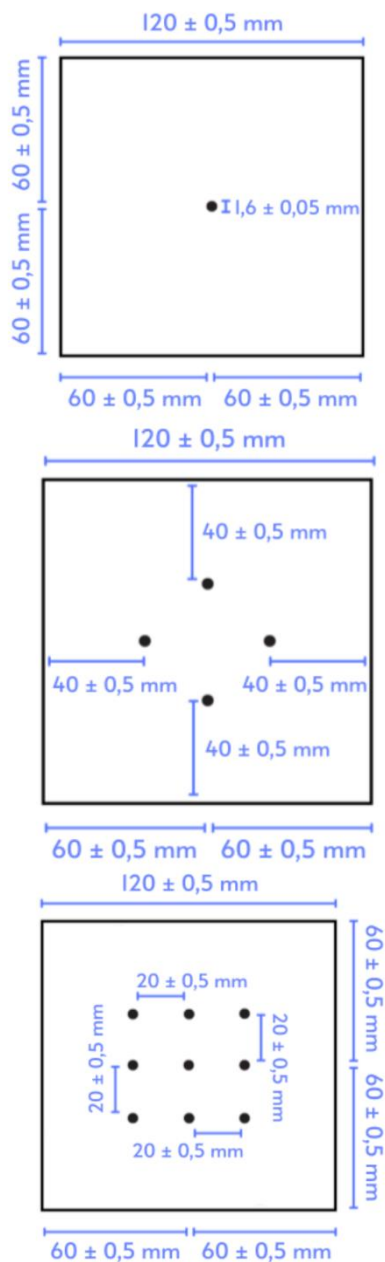
Andari yang menunjukkan bahwa material berbahan organik memiliki nilai absorpsi tinggi pada 1.000 Hz [1, 9] .

Dengan adanya lubang pada material, tercipta variasi tekanan udara di sekitar area lubang, yang menghasilkan efek resonansi lokal. Efek ini memungkinkan gelombang bunyi pada frekuensi menengah dan tinggi terperangkap dan diabsorpsi lebih efektif, sehingga meningkatkan kinerja material dalam disipasi energi akustik. Efek resonansi lokal memungkinkan energi akustik diserap lebih efektif, khususnya pada frekuensi menengah hingga tinggi. Selain itu, struktur lubang pada permukaan material meningkatkan difusi suara, menjadikan permukaan lebih kompleks secara akustik, yang berperan penting dalam memengaruhi interaksi dan perambatan gelombang bunyi. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian ini bahwa penambahan lubang pada material menghasilkan absorpsi yang lebih luas pada frekuensi menengah hingga tinggi.

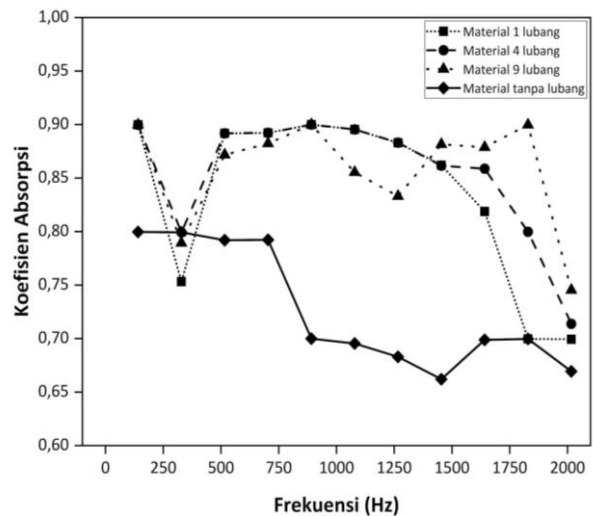
Pada material berlubang menunjukkan adanya frekuensi kritis di mana efisiensi absorpsi menurun tajam yang mengindikasikan bahwa frekuensi tersebut menjadi batas efektif penggunaan material dalam menyerap bunyi. Penurunan efisiensi absorpsi pada frekuensi rendah atau frekuensi kritis ini juga diamati pada penelitian Defrizal dkk. pada material sekam padi, di mana keterbatasan struktur material mengurangi efektivitasnya pada frekuensi tertentu [16]. Hal ini menunjukkan bahwa frekuensi kritis dapat menjadi batas penting dalam penggunaan material berlubang untuk aplikasi yang memerlukan jangkauan frekuensi absorpsi yang luas, terutama dalam konteks desain akustik yang menuntut kemampuan absorpsi di berbagai frekuensi

Selain itu, material berlubang memiliki efektivitas absorpsi yang lebih luas pada frekuensi menengah dan tinggi, sehingga menunjukkan area frekuensi penyerapan yang cukup luas. Hal ini sangat menarik dalam aplikasi praktis, terutama karena

gelombang bunyi yang dihadapi biasanya bersifat *multi-frequency*. Material yang mampu mengabsorpsi bunyi pada rentang frekuensi yang luas akan lebih efisien digunakan untuk pengendalian kebisingan dibandingkan material yang hanya efektif pada rentang frekuensi terbatas. Dengan demikian, desain material berlubang menawarkan solusi yang lebih fleksibel dan efisien dalam mengatasi kebisingan pada berbagai kondisi lingkungan.



Gambar 5. Desain material uji



Gambar 6. Grafik koefisien absorpsi

KESIMPULAN

Penelitian ini menguji material absorpsi bunyi berbahan dasar limbah serbuk kayu jati, dengan fokus pada pengaruh jumlah lubang terhadap koefisien absorpsi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa material tanpa lubang lebih efektif menyerap bunyi pada frekuensi rendah, sedangkan material berlubang memiliki efektivitas absorpsi yang lebih luas pada frekuensi menengah hingga tinggi. Efek resonansi lokal di sekitar lubang berperan dalam meningkatkan konversi energi bunyi menjadi energi panas, sehingga memperkuat kemampuan disipasi akustik. Dengan demikian, material berlubang menawarkan solusi yang fleksibel dan ramah lingkungan untuk pengendalian kebisingan di berbagai kondisi lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Risma dan E. Elvaswer, "Optimasi Koefisien Absorpsi dan Impedansi Akustik Komposit Berbahan Dasar Serat Lumut (Moss) dengan Metode Tabung," *J. Fis. Unand*, vol. 9, no. 2,

- Art. no. 2, 2020, doi: 10.25077/jfu.9.2.196-201.2020.
- [2] T. P. Sari dan E. Elvaswer, "Pengaruh Densitas Panel Serat Ampas Tebu terhadap Koefisien Absorpsi Bunyi dan Impedansi Akustik," *J. Fis. Unand*, vol. 9, no. 3, Art. no. 3, Agu 2020, doi: 10.25077/jfu.9.3.304-310.2020.
- [3] N. Nabila dan A. Mahyudin, "Pengaruh Ketebalan Pelepah Pisang terhadap Koefisien Absorpsi Material Akustik," *J. Fis. Unand*, vol. 9, no. 2, Art. no. 2, Nov 2020, doi: 10.25077/jfu.9.2.244-249.2020.
- [4] A. M. Rohim, F. Fianti, dan U. Nurbaiti, "Potensi Sekam Padi dan Jerami sebagai Alternatif Material Akustik," *Phys. Educ. Res. J.*, vol. 2, no. 1, Art. no. 1, Feb 2020, doi: 10.21580/perj.2020.2.1.4883.
- [5] N. Fanny, "Analisis Pengaruh Kebisingan terhadap Tingkat Konsentrasi Kerja pada Tenaga Kerja di Bagian Proses PT. Iskandar Indah Printing Textile Surakarta," *Infokes J. Ilm. Rekam Medis Dan Inform. Kesehat.*, vol. 5, no. 1, Art. no. 1, Des 2015, doi: 10.47701/infokes.v5i1.85.
- [6] S. Yuliantika dan E. Elvaswer, "Penentuan Koefisien Absorpsi dan Impedansi Material Akustik Resonator Panel Kayu Lapis (Plywood) Berlubang dengan Menggunakan Metode Tabung," *J. Ilmu Fis.*, vol. 7, no. 2, Art. no. 2, Sep 2015, doi: 10.25077/jif.7.2.56-62.2015.
- [7] S. Yuliantika dan E. Elvaswer, "Karakterisasi Koefisien Absorpsi Bunyi Dan Impedansi Akustik Dari Limbah Serat Kayu Meranti Merah (Shorea Pinanga) Dengan Menggunakan Metode Tabung," *J. Ilmu Fis.*, vol. 10, no. 1, Art. no. 1, 2018, doi: 10.25077/jif.10.1.28-37.2018.
- [8] E. S. T. Manalu, I. Isranuri, M. Sabri, S. Abda, dan A. H. Siregar, "Kajian Eksperimental Koefisien Serap Bunyi pada Material ST 37 dengan Variasi Temperatur," *Dinamis*, vol. 6, no. 4, Art. no. 4, 2018, doi: 10.32734/dinamis.v6i4.7163.
- [9] R. Andari, "Pengukuran Koefisien Absorpsi Komposit Serbuk Gergaji Sebagai Material Pengendali Kebisingan," *J. Tek. Elektro*, vol. 8, no. 2, Art. no. 2, Jul 2019, doi: 10.21063/JTE.2019.3133822.
- [10] P. P. Noviadri, C. Harjani, dan A. M. K. Astuti, "Analisis Koefisien Absorpsi dari Material Berbahan Dasar Limbah Kain Perca dan Pelepah Pisang," *Atrium J. Arsit.*, vol. 6, no. 2, Art. no. 2, 2020, doi: 10.21460/atrium.v6i2.122.
- [11] D. A. Russell, "Absorption Coefficients and Impedance," *Sci. Math. Dep. GMI Eng. Manag. Inst. Flint MI*, vol. 48504, hlm. 1–6, 1999.
- [12] E. Labašová dan R. Ďuriš, "Measurement of the Acoustic Absorption Coefficient by Impedance Tube," *Res. Pap. Fac. Mater. Sci. Technol. Slovak Univ. Technol.*, vol. 27, no. 45, hlm. 94–101, Sep 2019, doi: 10.2478/rput-2019-0031.
- [13] C. N. Tiastiti, A. Sutresno, dan F. S. Rondonuwu, "Perancangan Alat Pengukur Koefisien Serapan Bunyi Bahan Menggunakan Metode Tabung Impedansi Dua Mikropon," Skripsi, Universitas Kristen Satya Wacana, Salatiga, 2012. Diakses: 1 Oktober 2023. [Daring]. Tersedia pada: <https://repository.uksw.edu/handle/123456789/598>
- [14] B. Arunkumar dan J. S, "Design and Analysis of Impedance Tube for Sound Absorption Measurement," *ARPJ. Eng. Appl. Sci.*, vol. 12, no. 5, hlm. 1400–1405, Jan 2017.
- [15] P. Mutia, - Ngatijo, dan H. D. Fahyuan, "Pengaruh Jenis Serat Alam Terhadap Koefisien Absorpsi Bunyi Sebagai

- Peredam Kebisingan,” *J. Ilmu Fis. Dan Pembelajarannya*, vol. 3, no. 1, Art. no. 1, Jun 2021, doi: 10.19109/jifp.v3i1.3175.
- [16] M. Defrizal dan E. Elvaswer, “Karakterisasi Koefisien Absorpsi Bunyi dan Impedansi Akustik Dari Sekam Padi,” *J. Fis. Unand*, vol. 10, no. 3, Art. no. 3, Sep 2021, doi: 10.25077/jfu.10.3.351-356.2021.
- [17] C. I. P. Kusuma K dan I. K. G. Sugita, “Pengukuran Koefisien Absorpsi Komposit Limbah Kertas dengan Metode Tabung Impedansi Dua Mikrofon,” dalam *Inovasi Humaniora, Sains, dan Teknologi untuk Pembangunan Berkelanjutan*, Kuta: Universitas Udayana, 2015. Diakses: 7 September 2023. [Daring]. Tersedia pada: <https://erepo.unud.ac.id/id/eprint/24853/>
- [18] S. Bahri, T. N. Manik, dan S. Suryajaya, “Pengukuran Sifat Akustik Material Dengan Metode Tabung Impedansi Berbasis Platform Arduino,” *J. Fis. Flux*, vol. 13, no. 2, Art. no. 2, 2016, doi: 10.20527/flux.v13i2.3460.
- [19] Y. Rezita, E. Elvaswer, dan R. Rasyid, “Koefisien Absorpsi Bunyi dan Impedansi Akustik dari Ampas Singkong (Manihot Esculenta) dengan Menggunakan Metode Tabung,” *J. Fis. Unand*, vol. 8, no. 2, hlm. 146–150, Jan 2019.
- [20] E. Subianto, “Pengaplikasian Panel Akustik berbahan dasar Bulu Ayam sebagai Material penyerapan suara pada Ruang Gema,” *J. Lingkung. Binaan Indones.*, vol. 8, no. 4, Art. no. 4, Des 2019, doi: 10.32315/jlbi.v9i4.139.
- [21] T. Schultz, M. Sheplak, dan L. N. Cattafesta, “Uncertainty Analysis of the Two-Microphone Method,” *J. Sound Vib.*, vol. 304, no. 1, hlm. 91–109, 2007, doi: 10.1016/j.jsv.2007.02.015.
- [22] J. Hald, W. Song, K. Haddad, C.-H. Jeong, dan A. Richard, “In-situ Impedance and Absorption Coefficient Measurements using a Double-Layer Microphone Array,” *Appl. Acoust.*, vol. 143, hlm. 74–83, 2019, doi: 10.1016/j.apacoust.2018.08.027.
- [23] M. Nikon dan E. Elvaswer, “Karakterisasi Koefisien Absorpsi Bunyi dan Impedansi Akustik dari Panel Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit dengan Menggunakan Metode Tabung,” *J. Fis. Unand*, vol. 12, hlm. 492–498, Jul 2023, doi: 10.25077/jfu.12.3.492-498.2023.
- [24] R. Ďuriš dan E. Labašová, “The Design of an Impedance Tube and Testing of Sound Absorption Coefficient of Selected Materials,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1050, no. 1, hlm. 012003, 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1050/1/012003.

Felix, dkk : Pengujian Material Absorpsi Bunyi dari Serbuk Kayu menggunakan Tabung Impedansi Dua Mikrofon