



## Sistem Karakterisasi Material Terkomputerisasi Untuk Material Berpori

Sri Maiyena<sup>1,2</sup>, Anis Nazihah Mat Daud<sup>1\*</sup>, Shahrul Kadri Ayop<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Department of Physics, Faculty of Science and Mathematics, Universiti Pendidikan Sultan Idris, 35900 Tanjung Malim, Perak, Malaysia*

<sup>2</sup> *Tadris Fisika, Fakultas Pendidikan dan Ilmu Keguruan, Universitas Islam Negeri Mahmud Yunus, Batusangkar, Indonesia*

\* Corresponding author. E-mail: [anisnmd@yahoo.co.uk](mailto:anisnmd@yahoo.co.uk)

### ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem karakterisasi material terkomputerisasi untuk mengukur sifat material pada material berpori menggunakan teknik perendaman pulsa-gema. Sistem antar muka grafis yang dikembangkan menyediakan platform yang mudah digunakan yang terdiri atas akuisisi sinyal, grafik sinyal, parameter input dan sifat material. Sistem ini digunakan untuk menentukan sifat akustik (kecepatan longitudinal dan impedansi akustik) dan sifat elastis (modulus Young, modulus geser, modulus bulk, modulus longitudinal dan konstanta Lamé). Sampel yang digunakan berupa PMMA yang terdiri atas sampel tidak berpori dan sampel berpori. Sistem ini divalidasi menggunakan sampel yang tidak berpori. Persentase kesalahan pengukuran sistem adalah 8,36% dibandingkan dengan nilai referensi, yang menunjukkan tingkat akurasi yang wajar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sampel yang tidak berpori secara umum menunjukkan sifat akustik dan sifat elastis yang lebih tinggi daripada sampel yang berpori. Kemampuan sistem untuk menentukan sifat material secara akurat dengan persentase kesalahan yang dapat diterima menunjukkan bahwa sistem

### INFO ARTIKEL

**Sejarah Artikel:**

*Diserahkan Mei 2024*

*Diterima Desember 2024*

*Tersedia online Desember 2024*

**Kata Kunci:**

*porositas, sifat material, program labview, teknik perendaman pulsa-gema*

---

ini dapat menjadi alat yang berharga dalam pengujian material dan aplikasi kontrol kualitas.

---

---

## ABSTRACT

*This study aims to develop a computerized material characterization system to measure the material properties of porous materials using the pulse echo immersion technique. The developed graphical interface system provides an easy-to-use platform for signal acquisition, signal graphing, input parameters and material properties. The system is used to determine acoustic properties (longitudinal velocity and acoustic impedance) and elastic properties (Young's modulus, shear modulus, bulk modulus, longitudinal modulus and Lamé constant). The samples used are PMMA consisting of non-porous and porous samples. The system was validated using non-porous samples. The percentage error of the system measurement is 8.36% when compared to the reference value, indicating a reasonable level of accuracy. The results show that non-porous samples generally show higher acoustic and elastic properties than porous samples. The ability of the system to determine material properties accurately with an acceptable percentage of error indicates that this system can be a valuable tool in material testing and quality control applications.*

---

---

## ARTICLE INFO

**Article History:**

Submitted May 2024

Accepted December 2024

Available online December 2024

---

**Keyword:**

porosity; material properties, labview program, pulse echo immersion technique

## 1. Pendahuluan

Pori-pori pada suatu material merupakan lubang kecil yang terdapat dalam struktur material tersebut. Keberadaan pori-pori pada suatu material mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap pengaplikasian material tersebut pada bidang tertentu [1]. Namun adanya pori-pori abnormal pada suatu material mempengaruhi kekuatan material tersebut dan menjadikan material tersebut tidak cocok untuk penggunaan komersial. Hal ini karena sifat material seperti kekuatan dan kepadatan bergantung pada rasio pori-pori terhadap volume [2].

Berbagai teknik telah digunakan untuk mengetahui material pada bahan berpori seperti porosimetri merkuri [3], pemindaian mikroskop electron [4], difraksi sinar-x dan hamburan neutron. Akan tetapi teknik ini memiliki beberapa kelemahan seperti perlunya penggunaan prosedur keselamatan, prosedur persiapan sampel harus cermat, perlunya penghancuran sampel terlebih dahulu sebelum dilakukan pengujian [5]. Oleh karena itu beberapa penelitian terdahulu menggunakan metode pengujian non-destruktif, seperti metode ultrasonik, untuk karakterisasi sifat material seperti tulang [6–8], komposit [9, 10], otot [11, 12] dan keramik [13, 14] dalam rangka menghindari rusaknya sampel selama

pengujian [15, 16], menghemat biaya serta tidak memerlukan waktu dan proses yang lama dalam penyiapan sampel [17].

Ada dua metode ultrasonik utama yang digunakan untuk mengetahui sifat akustik suatu material, yaitu teknik transmisi langsung dan teknik pulsa-gema. Teknik transmisi langsung melibatkan perambatan gelombang ultrasonik melalui penggunaan dua transduser identik yang ditempatkan saling berhadapan pada kedua permukaan sampel. Teknik pulsa-gema melibatkan penggunaan transduser yang ditempatkan pada salah satu permukaan material yang diuji. Kedua teknik tersebut melibatkan penggunaan bahan penghubung antara transduser dan bahan yang sedang dipelajari untuk meningkatkan efisiensi transmisi pulsa ultrasonik ke dalam bahan.

Dalam pengujian ini diperlukan kopleng yang digunakan untuk memfasilitasi transmisi gelombang suara antara transduser dan material uji. Kopleng cair seperti air dapat digunakan pada teknik perendaman pulsa-gema [20–22] untuk mengukur sifat akustik material [23, 24].

Pada material berpori, beberapa peneliti juga telah melakukan penelitian menggunakan metode ultrasound, akan tetapi peneliti sebelumnya hanya

menentukan dua jenis sifat akustik material berpori, yaitu kecepatan longitudinal akustik [13, 25] dan koefisien atenuasi [24]. Namun pengukuran sifat elastis juga merupakan aspek penting dalam memahami dan memperkirakan perilaku material teknik.

Oleh karena itu, kami mengembangkan sistem komputerisasi untuk mengkarakterisasi sifat material untuk material berpori menggunakan teknik perendaman pulsa-gema. Sistem komputerisasi digunakan untuk memaksimalkan akurasi pengukuran sifat material pada material berpori dan tidak berpori. Teknik perendaman pulsa-gema ultrasonik menggunakan air sebagai media perambatannya [32]. Teknik perendaman pulsa-gema digunakan dalam penelitian ini karena hanya memerlukan aksesibilitas satu sisi material dan satu transduser untuk mengukur sifat materialnya dibandingkan dengan teknik transmisi. Sifat material yang ditentukan dari sistem yang dikembangkan yaitu sifat akustik (kecepatan longitudinal dan impedansi akustik) dan modulus elastis (Modulus Young, modulus geser, dan modulus bulk, longitudinal modulus dan konstanta lame). Akurasi sistem yang dikembangkan dievaluasi dengan membandingkan hasil yang diperoleh

dari sampel tidak berpori dengan nilai referensi sampel poli(metil metakrilat) (PMMA).

## 2. Metode Penelitian

### 2.1. Sampel

Sampel yang digunakan berupa Polimetil metakrilat (PMMA) yaitu PMMA tanpa lubang (Gambar 1) dan PMMA dengan ada lubang (Gambar 2). Dimensi sampel adalah  $16,00 \times 8,00 \times 0,3 \text{ cm}^3$ . Kedua sampel menggunakan ketebalan  $d = 0,3 \text{ cm}$ . Pada sampel yang berlubang, lubang dibuat dengan bentuk silinder pada bagian bawahnya, dengan kedalaman lubang  $h = 1,02 \text{ mm}$  dari bagian bawah sampel.



Gambar 1. Sampel untuk material tidak berpori

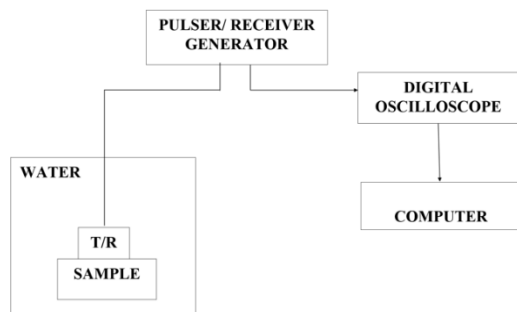


Gambar 2. Sampel untuk material berpori

### 2.2. Sistem Karakterisasi Material

Sistem karakterisasi material menggunakan teknik perendaman pulsa-gema. Sistem ini menggunakan air sebagai media propagasinya. Sistem terdiri dari generator pulsa-gema

(Olympus Panametrics NDT Model 5200 PR untuk menghasilkan pulsa listrik yang merangsang transduser (Olympus Panametric 10 MHz) untuk menghasilkan pulsa ultrasonik, transduser yang menyebarkan pulsa ultrasonik ke dalam sampel dan menerima pulsa kembali, osiloskop (LeCroy Wave Surfer 42 MX-s 400 MHz 5 GS/s) untuk menampilkan sinyal dan komputer untuk menganalisis sinyal yang ditampilkan. seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



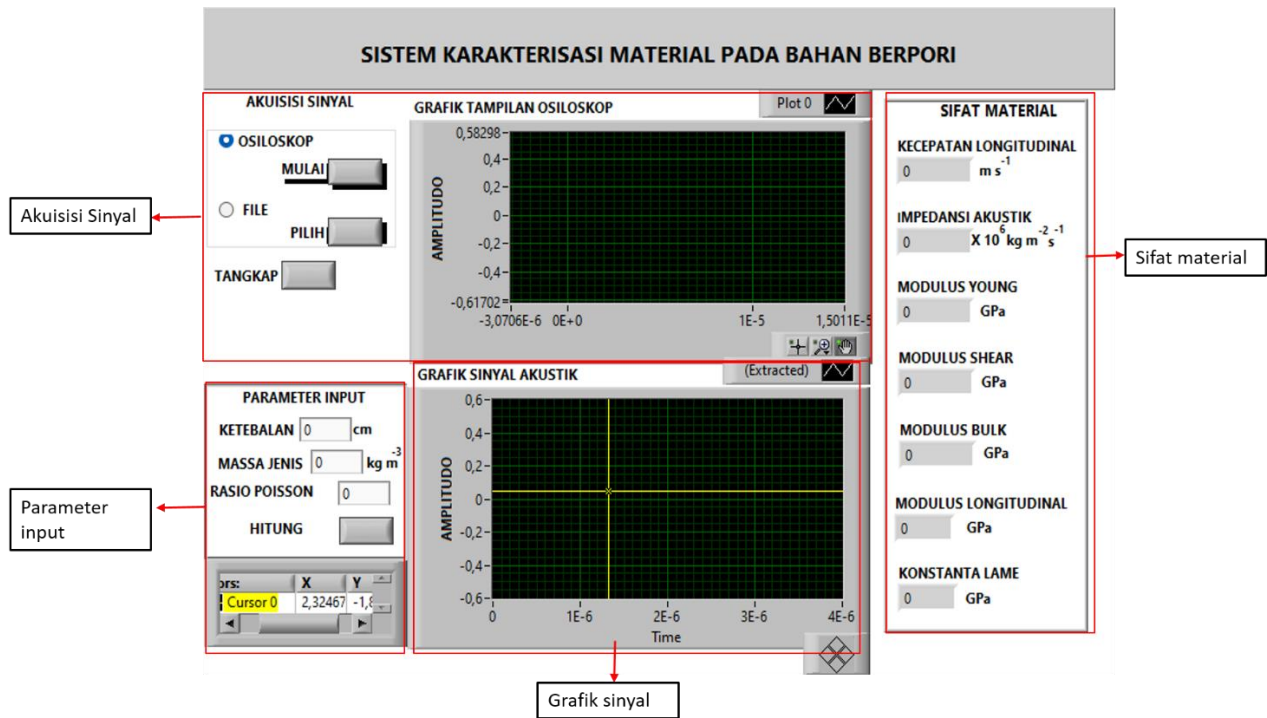
Gambar 3. Sistem karakterisasi material menggunakan teknik perendaman pulsa-gema ultrasonik.

### 2.3 Sistem Karakterisasi Material Berbasis LabVIEW

Program yang dikembangkan menggunakan bahasa pemrograman LabVIEW. Sistem antarmuka grafis terdiri dari empat bagian: akuisisi sinyal, grafik sinyal, parameter input dan sifat material. Bagian pertama, terdiri dari bagian AKUISISI SINYAL, dan tombol TANGKAP. Komponen pertama, bagian AKUISISI SINYAL, digunakan

untuk memperoleh sinyal akustik baik dari pengukuran real-time menggunakan OSILOSKOP DIGITAL tertentu atau dengan mengunggah FILE data yang disimpan dari komputer. tombol TANGKAP, ditekan untuk menganalisis sinyal sehingga ditampilkan pada GRAFIK SINYAL AKUSTIK.. Bagian kedua, terdiri atas GRAFIK TAMPILAN OSCILLOSCOPE dan GRAFIK SINYAL AKUSTIK, digunakan untuk menampilkan sinyal yang diperoleh.

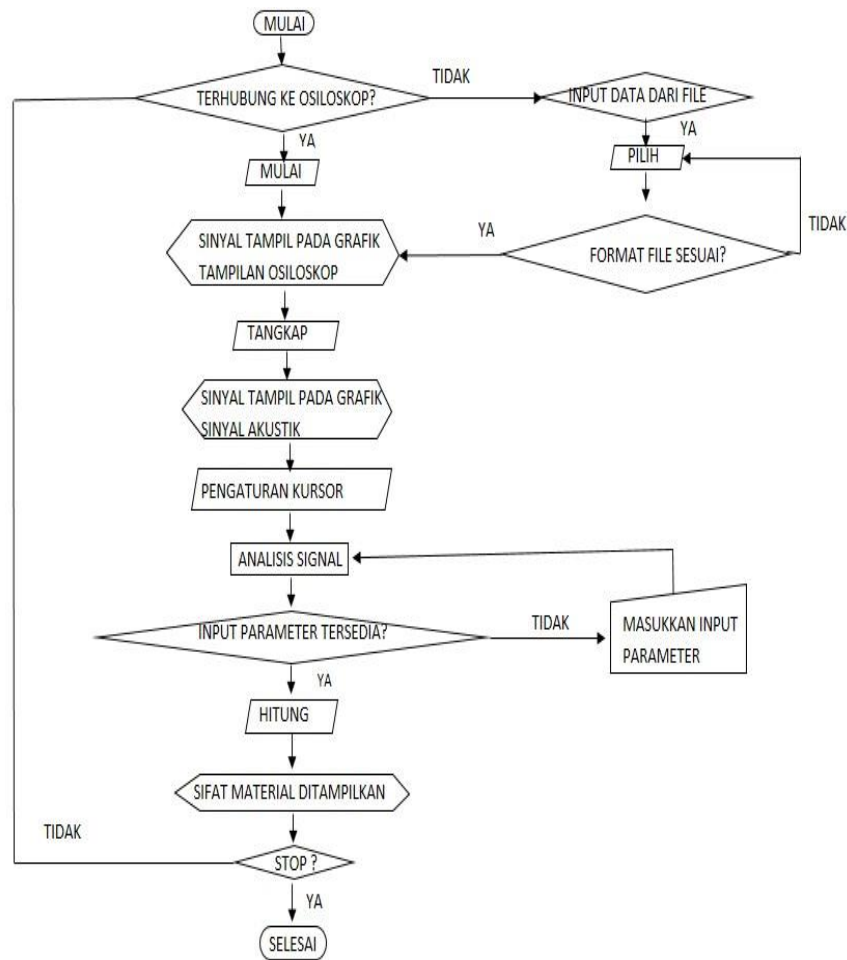
Pada bagian ketiga, terdiri dari bagian PARAMETER INPUT yang disediakan bagi pengguna untuk memasukkan nilai KETEBALAN, MASSA JENIS dan RASIO POISSON dari objek yang diteliti. Komponen terakhir, bagian SIFAT MATERIAL, digunakan untuk menampilkan sifat material (SIFAT AKUSTIK dan SIFAT ELASTIK). Gambar 4 menunjukkan sistem antarmuka grafis program.



Gambar 4. Sistem antar muka grafis program

Diagram alir untuk mengoperasikan program ditunjukkan pada Gambar 5. Pertama, pengguna harus memilih mode perolehan sinyal yang sesuai di bagian AKUISISI SINYAL, baik OSILOSKOP atau FILE. Untuk mode OSILOSKOP, pengguna harus menekan tombol MULAI untuk memulai koneksi dengan osiloskop. Jika osiloskop dihubungkan dengan sistem maka sinyal ultrasonik akan ditampilkan pada GRAFIK TAMPILAN OSILOSKOP. Sementara itu, pengguna harus menekan tombol PILIH untuk memilih file yang disimpan untuk ditampilkan dalam mode FILE. Jika format file kompatibel, sinyal akan ditampilkan pada GRAFIK TAMPILAN OSILOSKOP. Setelah itu pengguna harus mengklik tombol TANGKAP,

kemudian sinyal akan ditampilkan di layar. Selanjutnya, pengguna harus menentukan sinyal mana yang mewakili sinyal yang dipantulkan di sisi depan dan belakang sampel dengan menempatkan kursor di antara keduanya, dengan memasukkan nilai KETEBALAN, MASSA JENIS dan RASIO POISSON di bagian PARAMETER INPUT dan kemudian tekan tombol HITUNG. Akibatnya nilai KECEPATAN LONGITUDINAL, IMPEDANSI AKUSTIK, MODULUS YOUNG, MODULUS GESER, MODULUS BULK, MODULUS LONGITUDINAL dan KONSTANTA LAMÉ akan ditampilkan pada bagian SIFAT MATERIAL.



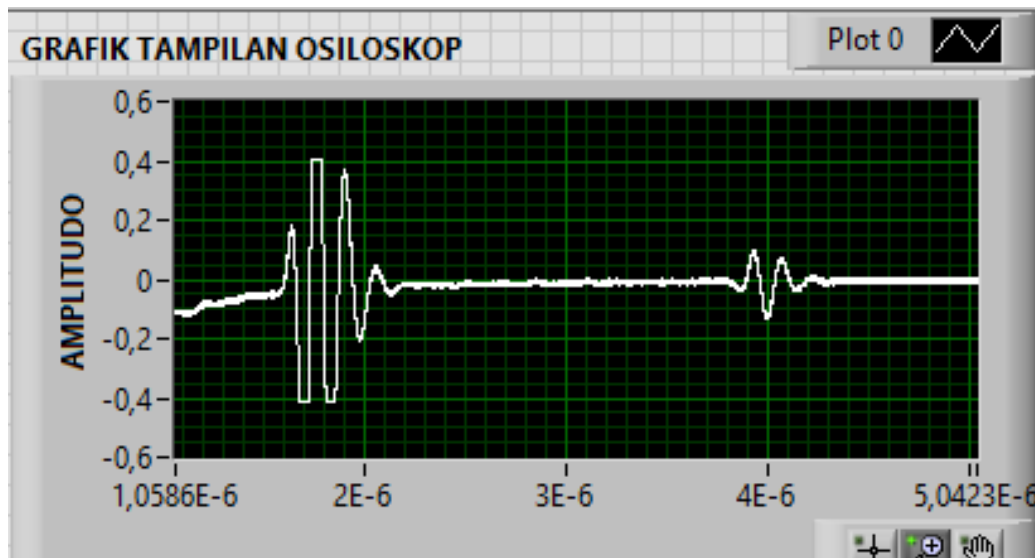
Gambar 5. Diagram alir program labview

## 2.4 Sifat Material

Sifat material yang akan ditentukan dalam penelitian ini terdiri atas sifat akustik (kecepatan longitudinal dan akustik impedansi) dan sifat elastis (modulus young, modulus bulk, modulus geser, longitudinal modulus dan konstanta Lamé).

### 2.4.1 Sifat Akustik

Sifat akustik yang akan ditentukan yaitu kecepatan longitudinal dan impedansi akustik. Gambar 6 menunjukkan contoh sinyal yang ditampilkan ketika sinyal ultrasonic merambat melalui sampel.



Gambar 6. Contoh sinyal ketika ultrasound merambat melalui sampel

Sinyal dianalisis menggunakan analisis domain waktu untuk menentukan kecepatan longitudinal [26],  $v_l$ , ditentukan dari nilai waktu transit pulsa pantulan di permukaan atas lapisan,  $t_1$ , waktu transit pulsa pantulan pada permukaan bawah lapisan lapisan,  $t_2$ , dan ketebalannya,  $d$ , menggunakan Persamaan. (1).

$$v_l = \frac{2d}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

Impedansi akustik[27],  $Z$ , ditentukan dari kepadatannya,  $\rho$ , dan kecepatan longitudinalnya,  $v_l$ , menggunakan Persamaan. (2).

$$Z = \rho v_l \quad (2)$$

#### 2.4.2 Sifat Elastis

Terdapat lima sifat elastis yang akan ditentukan. Kelima sifat elastis tersebut yaitu modulus Young, modulus geser, modulus bulk, longitudinal modulus dan konstanta Lamé. Modulus Young [28],

$E$ , ditentukan dari kecepatan longitudinalnya,  $v_l$ , densitasnya,  $\rho$ , dan rasio Poissonnya,  $\nu$ , menggunakan Persamaan. (3).

$$E = \frac{v_l^2 \rho (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu} \quad (3)$$

Modulus geser[29],  $G$ , ditentukan dari modulus Young,  $E$ , dan rasio poissonnya,  $\nu$ , menggunakan Persamaan. (4).

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (4)$$

Modulus bulk[26],  $K$ , ditentukan dari modulus Young,  $E$ , dan rasio Poisson,  $\nu$ , menggunakan Persamaan. (5).

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (5)$$

Modulus longitudinal [29],  $L$ , ditentukan dari massa jenis,  $\rho$ , dan kecepatan longitudinalnya,  $v_l$ , ditentukan menggunakan persamaan (6).

$$L = \rho v_l^2 \quad (6)$$



Konstanta Lamé[26],  $\lambda$ , ditentukan dari modulus longitudinal,  $L$ , dan modulus geser,  $G$ , ditentukan dari persamaan (7)

$$\lambda = L - 2G \quad (7)$$

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Program labview

Sebelum sistem digunakan untuk menentukan sifat material pada material berpori, terlebih dahulu sistem yang dikembangkan divalidasi. Sistem yang  $E$  dikembangkan divalidasi menggunakan transduser NDT Olympus Panametrics dengan pusat frekuensi 10 MHz menggunakan sampel PMMA tidak berpori. PMMA dipilih sebagai sampel validasi karena sifat akustiknya konsisten dalam rentang suhu sekitar yang kecil [30–32] dan sifat mekaniknya tidak bergantung pada perubahan panas [33].

Massa jenis sampel adalah  $1180 \text{ kg m}^{-3}$  dan nilai rasio Poissonnya sebesar 0,339 [29]. Hasil yang diperoleh dibandingkan dengan nilai referensi. Tabel 1 menunjukkan perbandingan hasil yang diperoleh dari sistem yang dikembangkan dan nilai acuan.

Berdasarkan hasil dari tabel 1, sistem yang dikembangkan menghasilkan hasil yang akurat dengan persentase eror berada pada rentangan 2,74% s.d 8,36% dibandingkan nilai referensi. Kesalahan ini dapat disebabkan oleh ketidakhomogenan material yang dapat terjadi selama proses produksi [31]. Dengan persentase kesalahan yang kecil ini (<10%) menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu menganalisis sifat material secara akurat.

Tabel 1. Data perbandingan hasil yang diperoleh dari sistem yang dikembangkan dengan referensi

Sampel	Ketebalan, $d$ (cm)	Sifat material	Nilai referensi	Sistem yang dikembangkan	% eror
Tidak berpori	0,3	$v_l$ ( $\text{ms}^{-1}$ )	2730[34]	2804,79	2,74
		$Z$ ( $\times 10^6 \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	3,22 [35]	3,31	2,78
		$E$ (GPa)	5,91 [29]	6,13	3,66
		$G$ (GPa)	2,21[29]	2,29	3,74
		$K$ (GPa)	5,99 [29]	6,23	3,94
		$L$ (GPa)	8,82[29]	9,28	7,93
		$\lambda$ (GPa)	4,34[36]	4,70	8,36

### 3.2 Sifat Material Pada Material Berpori dan Tidak Berpori

Data hasil penentuan sifat material pada material berpori dan tidak berpori dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Sifat material pada material berpori dan tidak berpori

Sifat material	Sampel tidak berpori	Sampel berpori
$v_l$ (ms <sup>-1</sup> )	2840,64	2734,73
$Z$ ( $\times 10^6$ kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	3,35	3,22
$E$ (GPa)	6,21	5,75
$G$ (GPa)	2,32	2,14
$K$ (GPa)	6,42	5,95
$L$ (GPa)	9,52	8,82
$\lambda$ (GPa)	4,88	4,52

Dari tabel 2 juga menunjukkan bahwa terdapat perbedaan nilai antara sampel yang tidak berpori dan sampel yang berpori pada pada masing masing sifat material yang diamati. Berdasarkan tabel 2 diperoleh bahwa nilai dari sampel berpori lebih kecil dibandingkan sampel tidak berpori, baik pada kecepatan longitudinal, impedansi akustik, modulus young, modulus geser, modulus bulk, modulus longitudinal dan konstanta Lamé. Hal ini menunjukkan bahwa material yang berpori mempengaruhi sifat material baik sifat akustik maupun sifat elastis. Hal ini disebabkan karena dengan

adanya pori-pori maka akan menyebabkan kepadatan material menurun [37, 38]. Akibatnya menghalangi jalur sinyal ultrasonik sehingga dapat memperlambat kecepatan gelombang ultrasonik [39–41]. Semakin banyak pori yang terdapat pada suatu material maka akan semakin kecil kecepatan gelombang ultrasoniknya [42].

### 4. Simpulan

Sistem karakterisasi material terkomputerisasi untuk material berpori telah berhasil dikembangkan. Hasil penelitian menunjukkan persentase eror keakuratan sistem sebesar 8,36% dibandingkan nilai referensi. Sifat material (sifat akustik dan sifat elastic) pada material tidak berpori lebih besar dibandingkan sifat material pada material berpori

### 5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Islam Negeri Mahmud Yunus Batusangkar, Indonesia, atas dukungan finansial melalui beasiswa SP DIPA-025-04.2.424069/2023. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Optik Terapan, Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Matematika, Universiti Pendidikan Sultan Idris, Malaysia, atas dukungan fasilitasnya.

## 5. Referensi

1. Pabst, W., Uhlířová, T., Gregorová, E., & Wiegmann, A. (2018). Young's modulus and thermal conductivity of model materials with convex or concave pores—from analytical predictions to numerical results. *Journal of the European Ceramic Society*, 38(7), 2694-2707.
2. Firstov, S., & Podrezov, Y. (2001). Optimization of mechanical properties of porous materials. *Powder Metallurgy Progress*, 1(1), 5-18.
3. Schlumberger, C., & Thommes, M. (2021). Characterization of hierarchically ordered porous materials by physisorption and mercury porosimetry—a tutorial review. *Advanced Materials Interfaces*, 8(4), 2002181.
4. Saraf, S., Singh, A., & Desai, B. G. (2019). Estimation of Porosity and Pore size distribution from Scanning Electron Microscope image data of Shale samples: A case study on Jhuran formation of Kachchh Basin, India. *ASEG Extended Abstracts*, 2019(1), 1-3..
5. Lu, Y. (2016). *Electron Microscopy Characterization of the Pore System in Gas Shale* (Doctoral dissertation).
6. Hagan, C. P., Orr, J. F., Mitchell, C. A., & Dunne, N. J. (2015). Critical evaluation of pulse-echo ultrasonic test method for the determination of setting and mechanical properties of acrylic bone cement: Influence of mixing technique. *Ultrasonics*, 56, 279-286.
7. Ishimoto, T., Suetoshi, R., Cretin, D., Hagihara, K., Hashimoto, J., Kobayashi, A., & Nakano, T. (2019). Quantitative ultrasound (QUS) axial transmission method reflects anisotropy in micro-arrangement of apatite crystallites in human long bones: A study with 3-MHz-frequency ultrasound. *Bone*, 127, 82-90.
8. Umiatin, U., Oktaviana, T., Wijaya, E., Riandini, R., & Yusuf, F. (2021). THE BONE MICROSTRUCTURE IDENTIFICATION MODEL BASED ON BACKSCATTER MODE OF ULTRASOUND. *Spektra: Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 6(1), 61-70.
9. Wróbel, G., & Pawlak, S. (2007). A comparison study of the pulseecho and through-transmission ultrasonics in glass/epoxy composites. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 22(2), 51-54.
10. Zou, Z., Hao, Y., Tian, F., Zheng, Y., He, W., Yang, L., & Li, L. (2020). An ultrasonic longitudinal through-

- transmission method to measure the compressive internal stress in epoxy composite specimens of gas-insulated metal-enclosed switchgear. *Energies*, 13(5), 1248.
11. Jakovljevic, M., Hsieh, S., Ali, R., Chau Loo Kung, G., Hyun, D., & Dahl, J. J. (2018). Local speed of sound estimation in tissue using pulse-echo ultrasound: Model-based approach. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 144(1), 254-266.
  12. Sanabria, S. J., Martini, K., Freystätter, G., Ruby, L., Goksel, O., Frauenfelder, T., & Rominger, M. B. (2019). Speed of sound ultrasound: a pilot study on a novel technique to identify sarcopenia in seniors. *European radiology*, 29, 3-12.
  13. Eren, E., Kurama, S., & Solodov, I. (2012). Characterization of porosity and defect imaging in ceramic tile using ultrasonic inspections. *Ceramics International*, 38(3), 2145-2151.
  14. Kulokas, M., Kazys, R., & Mazeika, L. (2011). Non-destructive evaluation of green ceramic body density by ultrasonic technique. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 111(5), 71-76.
  15. Chen, C., Xiang, Y., Tang, L., Li, X., Qin, L., & Cao, W. (2020). Ultrasonic pulse-echo technique for the characterization of elastic constants of single domain Pb (Zn<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub>-5.5% PbTiO<sub>3</sub> single crystals with 3 m symmetry. *Journal of Materials Science*, 55(27), 12737-12746.
  16. Judawisastra, H., & Sasmita, F. (2019, August). Elastic modulus determination of thermoplastic polymers with pulse-echo method ultrasonic testing. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 547, No. 1, p. 012047). IOP Publishing.
  17. Aliabouzar, M., Zhang, G. L., & Sarkar, K. (2018). Acoustic and mechanical characterization of 3D-printed scaffolds for tissue engineering applications. *Biomedical Materials*, 13(5), 055013.
  18. Yochev, B., Kutzarov, S., Ganchev, D., & Staykov, K. (2006, September). Investigation of ultrasonic properties of hydrophilic polymers for dry-coupled inspection. In *Proceedings of the European Conference on Non-Destructive Testing, Berlin, Germany* (pp. 25-29).
  19. Yi, J., Nguyen, K. C. T., Wang, W., Yang, W., Pan, M., Lou, E., ... & Zeng, H. (2020). Polyacrylamide/Alginate double-network tough hydrogels for intraoral ultrasound imaging. *Journal of*

- colloid and interface science*, 578, 598-607.
20. Barkmann, R., Laugier, P., Moser, U., Dencks, S., Padilla, F., Haiat, G., ... & Glüer, C. C. (2007). A method for the estimation of femoral bone mineral density from variables of ultrasound transmission through the human femur. *Bone*, 40(1), 37-44.
  21. Cafarelli, A., Miloro, P., Verbeni, A., Carbone, M., & Menciassi, A. (2016). Speed of sound in rubber-based materials for ultrasonic phantoms. *Journal of ultrasound*, 19, 251-256.
  22. Raišutis, R., Voleišis, A., & Kažys, R. (2008). Application of the through transmission ultrasonic technique for estimation of the phase velocity dispersion in plastic materials. *Ultragarsas/Ultrasound*, 6 3(3), 15-18.
  23. Raišutis, R., Voleišis, A., & Kažys, R. (2008). Application of the through transmission ultrasonic technique for estimation of the phase velocity dispersion in plastic materials. *Ultragarsas/Ultrasound*, 6 3(3), 15-18.
  24. Tasinkevych, Y., Falińska, K., Lewin, P. A., & Litniewski, J. (2019). Improving broadband ultrasound attenuation assessment in cancellous bone by mitigating the influence of cortical bone: Phantom and in-vitro study. *Ultrasonics*, 94, 382-390.
  25. Minh, H. N., Du, J., & Raum, K. (2019). Estimation of thickness and speed of sound in cortical bone using multifocus pulse-echo ultrasound. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 67(3), 568-579.
  26. Workman, G. L., Kishoni, D., & Moore, P. O. (2007). *Ultrasonic Testing*. sl: American Society for Nondestructive Testing, 2007.
  27. Laugier, P. (2011). *Bone quantitative ultrasound* (Vol. 576). G. Haiat (Ed.). Dordrecht: Springer.
  28. Krautkrämer, J., Krautkrämer, H., Krautkrämer, J., & Krautkrämer, H. (1990). Plane sound waves at boundaries. *Ultrasonic Testing of Materials*, 15-45.
  29. Afifi, H. A. (2003). Ultrasonic pulse echo studies of the physical properties of PMMA, PS, and PVC. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 42(2), 193-205.
  30. Carlson, J. E., van Deventer, J., Scolan, A., & Carlander, C. (2003, October). Frequency and temperature dependence of acoustic properties of polymers used in pulse-echo systems. In *IEEE Symposium on Ultrasonics, 2003* (Vol. 1, pp. 885-888). IEEE.

31. Daud, A. N. M., Jaafar, R., Ayop, S. K., & Rohani, M. S. (2018). A computerized system based on an alternative pulse echo immersion technique for acoustic characterization of non-porous solid tissue mimicking materials. *Measurement Science and Technology*, 29(4), 045902.
32. Nazihah, M. D., Kadri, S., Yaacob, M. I. H., & Rosly, J. (2013, May). Computerized acoustical characterization system of medical phantoms. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1528, No. 1, pp. 406-411). American Institute of Physics.
33. Lochab, J., & Singh, V. R. (2004). Acoustic behaviour of plastics for medical applications.
34. Cheeke, J. D. N. (2010). *Fundamentals and applications of ultrasonic waves*. CRC press.
35. Ensminger, D., & Bond, L. J. (2024). *Ultrasonics: fundamentals, technologies, and applications*. CRC press.
36. Christman, D. R. Dynamic properties of poly (methylmethacrylate)(PMMA)(Plexi glas). 1972. *General Motors Technical Center Warren MI Materials and Structures Lab*.
37. Al-Aboodi, A. S., & Al-Nasser, A. A. (2015). Bone porosity modeling and FE simulation. *Int. J. Adv. Mech. Aeron. Eng.*
38. Ye, J., Kim, H. J., Song, S. J., Kang, S. S., Kim, K., & Song, M. H. (2011). The far-field scattering response of a side drilled hole in single/layered anisotropic media in ultrasonic pulse-echo setup. *Wave Motion*, 48(3), 275-289.
39. Fellah, Z. E. A., Fellah, M., Depollier, C., Ogam, E., & Mitri, F. G. (2018). Ultrasound Measuring of Porosity in Porous Materials. In *Porosity-Process, Technologies and Applications*. IntechOpen.
40. Van Toi, V., & Khoa, T. Q. D. (2010). *The Third International Conference on the Development of Biomedical Engineering in Vietnam: BME2010 January 11–14th, 2010 Ho Chi Minh City, VIETNAM* (Vol. 27). Springer Science & Business Media.
41. Abd Wahab, M. A., Sudirman, R., Razak, M. A. A., Harun, F. K. C., Kadir, N. A. A., & Mahmood, N. H. (2020). Incident and reflected two waves correlation with cancellous bone structure. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 18(4), 1968-1975.

42. Kurama, S., & Eren, E. (2012). Characterization of mechanical properties of porcelain tile using ultrasonics. *Gazi University Journal of Science*, 25(3), 761-768.