

Pengaruh Variasi Frekuensi Transduser Ultrasonik Terhadap Sifat Material

Sri Maiyena^{1,2}, Shahrul Kadri Ayop¹, Anis Nazihah Mat Daud^{1*}

¹⁾ Department of Physics, Faculty of Science and Mathematics, Universiti Pendidikan Sultan Idris, 35900 Tanjong Malim, Perak, Malaysia

²⁾ Tadris Fisika, Fakultas tarbiyah dan Ilmu Keguruan, Universitas Islam Negeri Mahmud Yunus Batusangkar, Indonesia

Email korespondensi : anisnmd@yahoo.co.uk

DOI: <https://doi.org/10.20527/flux.v21i2.17166>

Submitted: 16th August, 2023 ; Accepted: 03rd April, 2024

ABSTRAK- Telah dilakukan penelitian untuk menentukan sifat material menggunakan gelombang ultrasonik. Tujuan penelitian adalah untuk melihat pengaruh variasi frekuensi transduser ultrasonik terhadap sifat material, sifat mekanik material dan sifat akustik material. Teknik ultrasonik yang digunakan berdasarkan pada teknik *pulse echo*. Sampel yang digunakan berupa baja dengan ketebalan 2,5 cm, aluminium dengan ketebalan 2 cm dan 1,8 cm dan PMMA dengan ketebalan 1,5 cm, 1 cm dan 0,2 cm. Terdapat tiga variasi frekuensi transduser yang digunakan yaitu 2,25 MHz, 5 MHz dan 10 MHz. Sifat mekanik material yang akan ditentukan yaitu modulus elastis. Sifat akustik material yang akan ditentukan yaitu kecepatan longitudinal, koefisien atenuasi dan impedansi akustik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi frekuensi transduser tidak mempengaruhi nilai modulus elastis, kecepatan longitudinal dan impedansi akustik. Akan tetapi penggunaan variasi frekuensi transduser mempengaruhi nilai koefisien atenuasi.

KATA KUNCI: *frekuensi transduser; gelombang ultrasonik; sifat material; variasi*

ABSTRACT- Research has been carried out to determine material properties using ultrasonic waves. The aim of the research is to see the effect of variations in ultrasonic transducer frequency on material properties, material mechanical properties and material acoustic properties. The ultrasonic technique used is based on the pulse echo technique. The samples used were steel with a thickness of 2.5 cm, aluminium with a thickness of 2 cm and 1.8 cm and PMMA with a thickness of 1.5 cm, 1 cm and 0.2 cm. There are three variations of transducer frequency used, namely 2.25 MHz, 5 MHz and 10 MHz. The mechanical property of the material that will be determined is the elastic modulus. The acoustic properties of the material to be determined are longitudinal velocity, attenuation coefficient and acoustic impedance. The results showed that variations in transducer frequency did not affect the values of elastic modulus, longitudinal velocity and acoustic impedance. However, the use of transducer frequency variations affects the attenuation coefficient value.

KEYWORDS: transducer frequency; ultrasonic waves; material properties; variation

PENDAHULUAN

Gelombang ultrasonik merupakan gelombang bunyi yang frekuensinya di atas 20 KHz (Rahma *et al.* 2018). Telah banyak aplikasi yang menggunakan gelombang ultrasonik, tidak hanya di bidang ilmiah tetapi juga dibidang industri. Pemanfaatan gelombang ultrasonik ini ada yang menggunakan intensitas tinggi yaitu dengan frekuensi

rendah dalam orde puluhan kilohertz dan ada yang menggunakan intensitas rendah yang menggunakan frekuensi tinggi dalam orde Mega hertz. Contoh penggunaan gelombang ultrasonik ini seperti Ultrasonografi (USG) yang dimanfaatkan untuk pemeriksaan janin (bidang kedokteran) (Agus Syafrudin, Suryono 2008), SONAR yang dimanfaatkan untuk mendeteksi keberadaan kapal selam

(bidang kelautan) (Yunitasari 2009), mendeteksi cacat atau karakterisasi material (bidang teknik) (Widharma 2020).

Gelombang ultrasonik memiliki sifat tidak bisa didengar, mempunyai panjang gelombang yang lebih pendek dikarenakan frekuensi bunyinya lebih besar, akibatnya terjadi difraksi yang lebih kecil, sehingga penyebaran berkas gelombang tidak besar akibatnya dapat dilakukan pendeteksian benda yang lebih kecil. Kelebihan lain yang dimiliki oleh energi ultrasonik adalah dapat menghasilkan citra objek yang tidak dapat dideteksi oleh cahaya baik itu dari gelombang mikro, sinar X, maupun bentuk radiasi yang lain. Hal ini seperti pada organ tubuh manusia. Sinar X tidak dapat membedakan organ manusia yang menyatu dengan lapisan lunak lainnya, tetapi gelombang ultrasonik dapat membedakannya. Cahaya juga sulit melihat kapal karam yang tenggelam di dasar laut dikarenakan airnya yang keruh. Namun, penggunaan gelombang ultrasonik mudah menemukannya. Sinar X juga tidak aman dalam memonitor pertumbuhan janin dalam rahim ibu, namun dengan menggunakan ultrasonografi dapat dimonitor dan jauh lebih aman dan tidak ada risiko (Sanjaya *et al.* 2022). Dalam bidang teknik, gelombang ultrasonik ini dimanfaatkan pada *non-destructive testing*. NDT akan mendeteksi cacat pada suatu bahan tanpa merusak bahan tersebut. Selain itu metode NDT juga dapat digunakan untuk memantau dan menaksir bangunan, jalan dan jembatan (Nurmalia 2021).

Secara umum terdapat dua metode pemanfaatan gelombang ultrasonik, yaitu metode transmisi dan pulsa-gema (Xu *et al.* 2014). Metode transmisi menggunakan dua buah transduser yang berfungsi sebagai pemancar dan penerima pulsa gelombang ultrasonik (Sanabria *et al.* 2019). Di mana kedua transduser diletakkan pada kedua sisi material secara berhadapan (Umiatin *et al.* 2021). Pulsa-gema menggunakan satu buah transduser yang berfungsi sebagai pemancar dan penerima pulsa gelombang ultrasonik (Jakovljevic *et al.* 2018). Satu buah transduser ini hanya diletakkan pada satu sisi material

yang diuji (Liu *et al.* 2017). Penggunaan metode pulsa-gema ini tentunya lebih mudah dibandingkan metode transmisi (Sasmita *et al.* 2019).

Gelombang ultrasonik ketika merambat ke dalam bahan, terjadi berbagai fenomena. Salah satu fenomena yang terjadi yaitu interferensi gelombang (Ishimoto *et al.* 2019). Ketika terjadi interferensi menyebabkan gelombang pantulan dalam menentukan kecepatan rambat tidak akurat (Laugier and Ha 2011). Pada daerah tersebut kecepatan gelombang dipengaruhi oleh *near-field*, frekuensi dan diameter *probe* (Cheeke 2000).

Ada dua jenis sifat material yang dapat diketahui dari pengujian ultrasonik, yaitu sifat mekanik dan sifat akustik. Kedua sifat tersebut penting untuk menentukan kesesuaian material yang akan digunakan pada bidang tertentu. Sifat mekanik material seperti modulus young, modulus geser, dan modulus bulk yang bergantung pada kepadatan dan struktur fisik material. Sifat akustik material seperti kecepatan akustik dan koefisien atenuasi bergantung pada ketebalan material, dan suhu. Sifat mekanik bahan seperti modulus elastis pada logam telah ditentukan dengan menggunakan metode gema pulsa (Sasmita *et al.* 2019).

Penelitian ini bertujuan untuk melihat pengaruh variasi frekuensi transduser (2,25 MHz, 5 MHz dan 10 MHz) terhadap sifat material, sifat mekanik material dan sifat akustik material. Sifat mekanik material yang akan ditentukan yaitunya modulus elastis, sedangkan sifat akustik akan ditentukan kecepatan longitudinal, koefisien atenuasi dan impedansi akustik.

METODE PENELITIAN

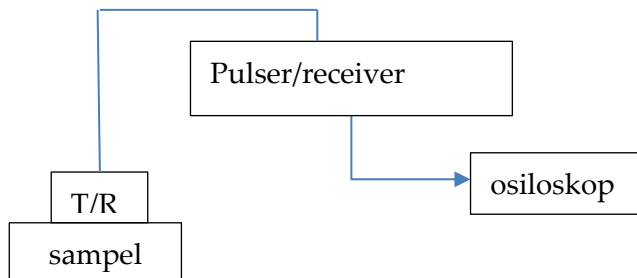
Bahan penelitian terdiri dari *polymethyl methacrylate* (PMMA), aluminium dan baja dengan ketebalan sampel yang berbeda seperti ditunjukkan pada tabel 1. PMMA yang digunakan dengan ketebalan 1,5 cm, 1 cm dan 0,2 cm, aluminium dengan ketebalan 2 cm dan 1,8 cm, dan baja dengan ketebalan 2,5 cm. Alat yang digunakan terdiri atas seperti *pulser/penerima*, *transduser*, dan osiloskop

digital serta komputer (Greenwood *et al.* 2015). *Electric pulse* tegangan tinggi dihasilkan oleh perangkat elektronik yang disebut *pulser/penerima*. *Pulser* akan menggerakkan transduser (Qodir and Putra 2016).

Tabel 1. Jenis sampel yang digunakan

No	Bahan	Ketebalan		
		1 (cm)	2 (cm)	3 (cm)
1	PMMA	1,5	1,0	0,2
2	Aluminium	2,0	1,8	
3	Baja	2,5		

Akibatnya energi ultrasonik frekuensi tinggi akan dihasilkan. Pada material yang akan diuji, energi suara akan menyebar dalam bentuk gelombang yang selanjutnya dipantulkan kembali. Transduser mengubah sinyal gelombang yang dipantulkan menjadi sinyal listrik (Fathoni *et al.* 2013). Osiloskop akan menampilkan sinyal listrik ini. Frekuensi transduser yang akan digunakan terdiri atas 3 (tiga) variasi, yaitu 2,25 MHz, 5 MHz dan 10 Mhz. Metode yang digunakan yaitu metode *pulse echo*. Skema bagan alat dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Sistem pengukuran akustik berdasarkan metode *pulse echo*

Informasi tentang lokasi reflektor, ukuran, orientasi, dan fitur lainnya terkadang dapat diperoleh dari sinyal ini. Sinyal akustik ini selanjutnya ditampilkan di layar komputer dengan bantuan program yang dikembangkan dan nilai dari sifat akustik dihitung. Pada osiloskop digital; sumbu horizontal menunjukkan waktu t dan sumbu vertikal menunjukkan amplitudo sinyal (Hadi; T. Amoranto; V. Frinsyah; K. Deddy 2010). Untuk mengetahui kecepatan gelombang, waktu perjalanan dapat secara langsung terkait dengan jarak yang ditempuh oleh sinyal. Adapun penentuan kecepatan gelombang longitudinal dituliskan dengan Persamaan 1

(Hagan *et al.* 2015).

$$v = \frac{2d}{\Delta t} \quad (1)$$

Koefisien atenuasi sampel didefinisikan sebagai pengurangan amplitudo dan intensitas pulsa *ultrasound* ketika pulsa bergerak dalam medium (Wrobel and Pawlak 2007). Persamaan untuk koefisien atenuasi dapat dihitung sesuai Persamaan 2.

$$\alpha = \frac{20 \log_{10} \left(\frac{A_1}{A_2} \right)}{2d} \quad (2)$$

Impedansi akustik adalah ukuran ketahanan partikel medium terhadap getaran mekanis (Choi *et al.* 2020). Itu juga dapat didefinisikan sebagai produk dari kerapatan medium, dan kecepatan *ultrasound* dalam medium. Persamaan untuk impedansi akustik dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan 3.

$$Z = \rho v \quad (3)$$

Modulus elastis dihitung dengan Persamaan 4. Penentuan nilai modulus elastis berkaitan dengan kecepatan longitudinal, massa jenis dan *poison's ratio*. Nilai *poison's ratio* dan densitas diperoleh dari literatur. Nilai *poison's ratio* untuk aluminium yaitu 0,33 dengan massa jenis 2770 kg/m³, *poison's ratio* baja 0,3 dengan massa jenis 7850 kg/m³, *poison's ratio* PMMA 0,34 dengan massa jenis 1180 kg/m³ (Fischer-Cripps 2004).

$$E = \frac{C_l^2 \rho (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu} \quad (4)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data diperoleh dari hasil pengukuran dengan tiga variasi frekuensi transduser (2,25 MHz, 5 MHz dan 10 MHz) terhadap material yang berbeda diperoleh data tentang sifat akustik bahan. Adapun nilai kerapatan untuk baja yaitu 7.750 kg/m³, aluminium 2.710 kg/m³ dan PMMA 1.180 kg/m³.

Kecepatan Longitudinal

Data kecepatan longitudinal dan frekuensi transduser yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1. Hasil pengukuran pada material baja untuk ketiga frekuensi transduser yang berbeda dengan satu ketebalan, nilai kecepatan longitudinalnya berkisar antara 5.822 m/s dan 5.912 m/s. Adapun nilai kecepatan

longitudinal teoritis yaitu 5.850 m/s. pada material aluminium dengan ketebalan yang berbeda diperoleh nilai kecepatan longitudinal secara pengukuran dari 6.200 m/s dan 6.500 m/s, secara teoritis nilai kecepatan longitudinal ini ialah 6.320 m/s. Material PMMA dengan 3 variasi ketebalan memiliki nilai kecepatan longitudinal secara pengukuran bekisan antara 2.200 dan 2.800, nilai kecepatan longitudinal secara teoritis yaitu 2720 m/s. jadi berdasarkan data hasil pengukuran ini terlihat bahwa

penggunaan frekuensi transduser yang berbeda tidak mempengaruhi nilai kecepatan longitudinal suatu material. Akan tetapi pada material yang berbeda, memiliki nilai kecepatan longitudinal yang berbeda dengan frekuensi transduser yang sama. Hal ini dikarenakan kecepatan gelombang ultrasonik tergantung pada massa jenis dan sifat elastik, yaitu modulus elastisitas dan *Poisson's ratio* (Juansah et al. 2006)

Tabel 1. Data Kecepatan longitudinal dan Frekuensi Transduser

No	Bahan	Ketebalan (cm)	Frekuensi (MHz)	Kecepatan (m/s)
1	baja	2,5	2,25	5.877
			5,00	5.912
			10,00	5.822
2	Aluminium	2,0	2,25	6.531
			5,00	6.288
			10,00	6.223
3	Aluminium	1,8	2,25	6.300
			5,00	6.318
			10,00	6.323
4	PMMA	1,5	2,25	2.749
			5,00	2.768
			10,00	2.714
5	PMMA	1,0	2,25	2.763
			5,00	2.744
			10,00	2.839
6	PMMA	0,2	2,25	2.334
			5,00	2.147
			10,00	2.132

Koefisien Atenuasi

Data koefisien atenuasi dan frekuensi transduser yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2. Variasi transduser pada material yang berbeda dengan ketebalan yang berbeda diperoleh bahwa nilai koefisien atenuasi semakin besar dengan pertambahan frekuensi transduser yang digunakan. Hal ini berarti bahwa semakin tinggi frekuensi yang digunakan maka makin tinggi koefisien atenuasinya, begitu juga sebaliknya. Perbandingan di antara diameter sumber gelombang dan panjang gelombang medium sebagai faktor yang mempengaruhi pola berkas gelombang. Selain dari itu, berkurangnya total intensitas atau energi gelombang ketika melewati suatu medium

disebut juga sebagai atenuasi. Perubahan energi dari energi akustik menjadi energi dalam bentuk lain dan terjadinya absorpsi, maka dapat dikatakan terjadinya atenuasi.

Di samping itu juga atenuasi dapat terjadi karena pada medium tersebut terjadi pemantulan dan pembiasan pada strukturnya. Semakin tinggi frekuensi, maka energi yang diserap juga akan semakin besar, sehingga jarak tembus ke jaringan akan semakin kecil (Azhari, 1995). Semakin besar frekuensi gelombang ultrasonik, maka besar penyerapannya semakin besar, akibatnya kemampuan menembus gelombang ultrasonik pada jaringan akan semakin rendah (Lee 2011). Hal ini karena kemampuan menembus gelombang ultrasonik berbanding terbalik dengan besar frekuensi (He 1999).

Tabel 2. Data Kecepatan Longitudinal dan Frekuensi Transduser

No	Bahan	Ketebalan (cm)	Frekuensi (MHz)	Koefisien atenuasi (db/cm)
1	baja	2,5	2,25	0,25
			5,00	0,45
			10,00	0,67
2	Aluminium	2,0	2,25	0,69
			5,00	1,27
			10,00	2,07
3	Aluminium	1,8	2,25	1,21
			5,00	1,43
			10,00	1,62
4	PMMA	1,5	2,25	2,61
			5,00	3,82
			10,00	5,87
5	PMMA	1,0	2,25	3,60
			5,00	10,37
			10,00	11,71
6	PMMA	0,2	2,25	8,60
			5,00	20,34
			10,00	43,22

Nilai koefisien atenuasi pada bahan yang diamati dipengaruhi oleh kerapatan dari unsur-unsur penyusun bahan tersebut (Amare, Sujatmika, Hong, Duraairaj & Hamid, 2017). Pada medium yang telah dilalui atau dilewati oleh gelombang ultrasonik, maka sinyal yang masuk pada medium tersebut akan melemah dan berkurang dari semula. Gelombang ultrasonik yang merambat pada bahan dengan unsur-unsur penyusun yang rapat, maka bahan tersebut akan menyerap sinyal masukan yang lebih banyak. Akibatnya terjadi pengurangan sinyal yang diterima oleh transduser penerima. Begitu juga sebaliknya gelombang ultrasonik yang merambat pada bahan yang tidak rapat atau encer maka transduser penerima akan lebih banyak menerima sinyal masukan (Heri Sugito 2009).

Koefisien atenuasi merupakan besaran yang menggambarkan kehilangan suatu energi karena gelombang ultrasonik melewati medium tertentu. Besarnya energi yang hilang atau diserap pada medium tertentu bergantung pada jenis medium tersebut (Hendee *et al.* 2003). Tegangan sinyal yang dikirim dan diterima ketika menempuh jarak tertentu selanjutnya dikonversi. Hasil konversi ini dapat menentukan nilai koefisien atenuasi.

Besarnya energi gelombang ultrasonik diperlihatkan dengan adanya nilai tegangan dari sinyal. Energi yang dimiliki gelombang ultrasonik berbanding lurus dengan amplitudo tegangan sinyal listrik yang dideteksi (Abd-Shukor *et al.* 2022).

Hal ini dikarenakan Menurut teori atenuasi, makin rendah frekuensi yang digunakan, makin rendah tingkat atenuasinya. Secara teoritis untuk menentukan koefisien atenuasi dengan menggunakan Persamaan 5 (Haryanto *et al.* 2000)

$$I = I_0 e^{-\alpha d} \quad (5)$$

Koefisien atenuasi sebagai besaran yang menggambarkan kehilangan suatu energi karena gelombang ultrasonik melewati medium tertentu. Besarnya energi yang hilang atau diserap oleh suatu medium tergantung pada jenis mediumnya (Bias *et al.* 2012).

Impedansi Akustik

Data impedansi akustik dan frekuensi transduser yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3. Variasi frekuensi transduser tidak memiliki pengaruh terhadap perubahan nilai impedansi akustik suatu material. Dengan frekuensi transduser berapa pun tidak akan mengubah nilai impedansi akustik. Hal ini

dikarenakan impedansi akustik sebagai perbandingan antara tekanan akustik dengan kecepatan partikel (Yang *et al.* 2020). Meskipun besar impedansi akustik ini tidak berpengaruh terhadap variasi frekuensi transduser. Akan tetapi impedansi akustik ini memiliki peran yang sangat penting dalam menentukan refleksi dan transmisi pada medium batas antara dua material yang berbeda, desain transduser dan absorpsi pada suatu medium

(Liu *et al.* 2017). impedansi akustik yang merupakan perbandingan antara tekanan akustik dengan kecepatan partikel. Tetapi impedansi ini dapat dilihat dari karakteristik benda yang berinteraksi dengan gelombang. Impedansi ini sebagai perkalian dari kerapatan dan kecepatan suara yang terdapat pada suatu materi. Oleh karena itu disebut juga sebagai sifat dasar materi atau zat.

Tabel 3. Data Kecepatan Longitudinal dan Frekuensi Transduser

No	Bahan	Ketebalan (cm)	Frekuensi (MHz)	Impedansi (kg/m ² s) × 10 ⁶
1	baja	2,5	2,25	45,54
			5,00	45,18
			10,00	45,78
2	Aluminium	2,0	2,25	17,69
			5,00	17,56
			10,00	17,63
3	Aluminium	1,8	2,25	17,07
			5,00	17,12
			10,00	17,13
4	PMMA	1,5	2,25	3,24
			5,00	3,27
			10,00	3,20
5	PMMA	1,0	2,25	3,26
			5,00	3,23
			10,00	3,35
6	PMMA	0,2	2,25	2,75
			5,00	2,53
			10,00	2,51

Modulus Elastis

Data modulus elastis dan frekuensi transduser yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4. Berdasarkan Tabel 4 dapat dilihat bahwa nilai modulus elastis tidak dipengaruhi oleh besar kecilnya frekuensi transduser yang digunakan. Perbedaan ketebalan pada material yang sama dengan penggunaan frekuensi transduser yang berbeda juga tidak mempengaruhi nilai modulus elastis. Modulus elastis merupakan perbedaan yang diakibatkan oleh karakteristik benda yang berbeda satu sama lain. Semakin besar modulus elastisitasnya maka semakin besar kecepatan rambat gelombangnya (Kim *et al.* 2011). *Poisson ratio* adalah konstanta elastik yang digunakan untuk menyatakan tingkat kekakuan sebuah zat. Nilai modulus elastis

juga dipengaruhi oleh massa jenis.

Massa jenis berhubungan dengan kepadatan suatu material. Molekul-molekul dalam bahan yang lebih padat lebih dekat satu sama lain dibandingkan dengan molekul dalam bahan kurang padat (Duck 1990). Dengan demikian, gelombang ultrasonik bergerak lebih cepat di dalam bahan yang lebih padat dibandingkan dengan bahan yang kurang padat (Zou *et al.* 2020). Namun, pemisahan lebih pendek jarak antar molekul dalam bahan menyebabkan pengukuran resistansi yang lebih tinggi untuk getaran. Dengan demikian, ia menyerap jumlah energi yang lebih tinggi untuk meningkatkan tingkat getaran molekul. Oleh karena itu, bahan yang lebih padat memiliki kecepatan gelombang ultrasonik yang lebih tinggi dibandingkan

bahan yang kurang padat (Al-Aboodi & Al-Nasser, 2014). Akibatnya akan memiliki

pengaruh terhadap nilai modulus elastisnya.

Tabel 4. Pengaruh frekuensi transduser terhadap modulus elastis

No	Bahan	Ketebalan (cm)	Frekuensi (MHz)	Modulus Elastis (GPa)
1	baja	2,5	2,25	201,41
			5,00	203,82
			10,00	197,66
2	Aluminium	2,0	2,25	79,74
			5,00	73,92
			10,00	72,40
3	Aluminium	1,8	2,25	74,20
			5,00	74,63
			10,00	74,75
4	PMMA	1,5	2,25	5,79
			5,00	5,87
			10,00	5,65
5	PMMA	1,0	2,25	5,85
			5,00	5,77
			10,00	6,18
6	PMMA	0,2	2,25	4,18
			5,00	3,53
			10,00	3,49

KESIMPULAN

Penggunaan variasi frekuensi transduser memiliki pengaruh terhadap sifat material, baik sifat mekanik material maupun sifat akustik material. Pada sifat mekanik material, variasi frekuensi transduser tidak mempengaruhi nilai modulus elastis material yang ditentukan. Dari ketiga sifat akustik material yang diamati (kecepatan longitudinal, koefisien atenuasi dan impedansi akustik) hanya koefisien atenuasi yang dipengaruhi oleh variasi frekuensi transduser yang digunakan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berterima kasih kepada Allah SWT atas berkat dan rahmat-Nya dapat menyelesaikan penelitian dengan baik, dan terima kasih juga kepada labor Gelombang dan Optik laboratorium Fisika Universiti Pendidikan Sultan Idris dan Dosen Pembimbing yang telah membantu penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Abd-Shukor, R., Tan, L.K., Nik-Jaafar, N.A., and Mohd Nasir, M.N., 2022. Atenuasi Ultrasonik dan Modulus Ricih pada

Suhu Genting Superkonduktor Terdop Sederhana (Tl0.8Bi0.2)Sr2(Ca0.9Cr0.1)Cu2O7. *Sains Malaysiana*, 51 (9), 3095–3101.

Agus Syafrudin, Suryono, J.E.S., 2008. Rancang Bangun Generator Pulsa Gelombang Ultrasonik Dan Implementasinya Untuk Pengukuran Jarak Antara Dua Obyek. *Berkala Fisika*, 11 (2), 29–37.

Al-aboodi, A.S. and Al-nasser, A.A., 2014. Bone Porosity Modeling and FE Simulation. *Advances in Mechanical, Aeronautical and Production Techniques*, (December), 0–5.

Amares, S., Sujatmika, E., Hong, T. W., Duraairaj, R., & Hamid, H.S.H.B., 2017. A Review: Characteristics of noise absorption material. *Journal of Physics: Conference Series*, 908 (1–9).

Azhari, H., 1955. *Basics of Biomedical Ultrasound for Engineers*. John Wiley & Sons. New Jersey.

Bias, S., Rambat, C., S, R.D., Hendropasetyo, W., and Putera, A., 2012. Pengaruh Ketebalan Cladding Terhadap Deviasi Gelombang Suara pada Pengelasan Baja

- Karbon dengan Stainless Steel, 1 (1), 1–4.
- Cheeke, J.D., 2000. *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*. CRC Press LLC. Florida.
- Choi, W.Y., Kang, K.C., and Park, K.K., 2020. Ultrasonic fingerprint sensor in under-glass prototype using impedance mismatching, 34 (2).
- Duck, F.A., 1990. *Physical properties of tissue: a comprehensive reference book*. London: Academic Press Limited.
- Fathoni, M.H., Pirngadi, H., and Rivai, M., 2013. Perancangan, pembuatan dan karakterisasi transduser ultrasonik 3,5 MHz untuk pengujian bahan padat. *J Teknik Pomits*, 2 (2), 306–311.
- Fischer-Cripps, A.C., 2004. Materials data. *The Physics Companion*.
- Greenwood, C., Clement, J.G., Dicken, A.J., Evans, J.P.O., Lyburn, I.D., Martin, R.M., Rogers, K.D., Stone, N., Adams, G., and Zioupos, P., 2015. Bone Reports The micro-architecture of human cancellous bone from fracture neck of femur patients in relation to the structural integrity and fracture toughness of the tissue. *BONR*, 3, 67–75.
- Hadi; T. Amoranto; V. Frinsyah; K. Deddy, 2010. Pengukuran kecepatan dan amplitudo gelombang ultrasonik untuk klasifikasi kualitas batubara. *Jurnal Penelitian Sains*, 13 (1 (B)), 1–5.
- Hagan, C.P., Orr, J.F., Mitchell, C.A., and 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.
- Haryanto, B., Budiastra, I., and Trisnobudi, A., 2000. Hubungan Antara Sifat Fisik dan Gelombang Ultrasonik Durian Utuh dengan Sifat Fisiko Kimia Daging Durian. *Buletin Teknologi dan Industri Pangan*, XI (2), 28–32.
- He, P., 1999. Experimental verification of models for determining dispersion from attenuation. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 46 (3), 706–714.
- Hendee, W.R., Ritenour, E.R., and Hoffmann, K.R., 2003. Medical Imaging Physics, Fourth Edition. *Medical Physics*, 30 (4), 730–730.
- Heri Sugito, S.D.L., 2009. Aplikasi Transduser Ultrasonik Jenis Immersion Transducer Untuk Karakteristik Media Cair Dan Pengukuran Tingkat Kekasaran Permukaan Beton. *Berkala Fisika* , 12 (4), 137–144.
- Ishimoto, T., Suetoshi, R., Cretin, D., Hagihara, K., and Hashimoto, J., 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 (April), 82–90.
- Jakovljevic, M., Hsieh, S., Ali, R., Chau, G., Kung, L., Hyun, D., Dahl, J.J., Jakovljevic, M., Hsieh, S., Ali, R., Chau, G., Kung, L., Hyun, D., and Dahl, J.J., 2018. approach Local speed of sound estimation in tissue using pulse-echo ultrasound : Model-based approach. *Acoustical Society of America*, 144 (Jully).
- Juansah, J., Budiastra, I.W., and Suroso, 2006. Pengembangan Sistem Pengukuran Gelombang Ultrasonik untuk Penentuan Kualitas Buah Manggis (Graciniamangostana L). *Jurnal Keteknikan Pertanian*.
- Kim, Y., Lee, B., Kim, Y., and Lee, B., 2011. Novel approach to the fabrication of an artificial small bone using a combination of sponge replica and electrospinning methods. *Science and Technology of Advanced Materials*, 6996 (May).
- Laugier, P. and Ha, G., 2011. Introduction to the Physics of Ultrasound, 29–45.
- Lee, K.I., 2011. Dependencies of acoustic

- properties on the frequency and the porosity for Biot's slow wave in water-saturated copper foams. *Journal of the Korean Physical Society*, 59 (4), 2721–2726.
- Liu, Z., Zhan, J., Fard, M., and Davy, J.L., 2017. Acoustic properties of multilayer sound absorbers with a 3D printed micro-perforated panel. *Applied Acoustics*, 121, 25–32.
- Nurmalia, N., 2021. Electromagnetic Acoustic Transducer (EMAT) sebagai Transduser Ultrasonik untuk Nondestructive Testing (NDT): Ulasan Artikel. *Jurnal Otomasi Kontrol dan Instrumentasi*, 13 (1), 1–14.
- Qodir, F. and Putra, J.A., 2016. Transduser Ultrasonik Sebagai Pendeteksi Gerak Pada Sistem Keamanan Rumah. *Semesta Teknika*, 8 (1), 61–71.
- Rahma, S.N., Suryani, S., and Nurdin, W.B., 2018. Pengukuran Intensitas Gelombang Ultrasonik Yang Terserap Pada Pemeriksaan Kehamilan. *Seminar Nasional Fisika Makassar*, 142–145.
- Rose, J.L., 2004. *Ultrasonic waves in solid media*. United Kingdom: Cambridge University press.
- Sanabria, S.J., Martini, K., Freystätter, G., Ruby, L., Goksel, O., Frauenfelder, T., and 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.
- Sanjaya, E.R., Muninggar, J., Setiawan, A., and ..., 2022. Uji Coba Metode Pencitraan Multimodalitas Ultrasonografi Dan Fotoakustik. *Jurnal Fisika: Fisika Sains dan Aplikasinya*, 7 (1), 8–14.
- Sasmita, F., Claudia, C., Wibisono, G., Tarigan, T.Z.S., Judawisastra, H., and Priambodo, T.A., 2019. Penentuan Modulus Elastisitas Logam Dengan Metode Ultrasonik Pulsa Gema. *Jurnal Teknologi Bahan dan Barang Teknik*, 8 (1), 27.
- Umiatin, Oktaviana, T., Wijaya, E., Riandini, and Yusuf, F., 2021. The bone microstructure identification model based on backscatter mode of ultrasound. *SPEKTRA: jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 6 (July).
- Widharma, I.G.S., 2020. Sensor Ultrasonik dalam Water Level Controller. *Politeknik Negeri Bali 2020*, 1 (1), 1–11.
- Wrobel, G. and Pawlak, S., 2007. A comparison study of the pulse-echo and through-transmission ultrasonics in glass / epoxy composites. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 22 (2).
- Xu, K., Ta, D., He, R., Qin, Y.X., and Wang, W., 2014. Axial transmission method for long bone fracture evaluation by ultrasonic guided waves: simulation, phantom and in vitro experiments. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 40 (4), 817–827.
- Yang, X., Fei, C., Li, D., Sun, X., Hou, S., Chen, J., and Yang, Y., 2020. Multi-layer polymer-metal structures for acoustic impedance matching in high-frequency broadband ultrasonic transducers design, 160.
- Yunitasari, D., 2009. Karakterisasi Atenuasi Ultrasonik Terhadap Variasi Tebal Bahan (Cairan) Menggunakan Transduser Ultrasonik Jenis Immersion Transducer, 1–6.
- Zou, Z., Hao, Y., Tian, F., Zheng, Y., He, W., Yang, L., and 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), 1–21.