



Kajian Penentuan Modulus Elastisitas Baja dan Aluminium dengan Metoda Ultrasonic Pitch & Catch

Toni Agung Priambodo^{1*}, Hermawan Judawisastra¹ & Riza Wirawan¹

¹ Program Studi Ilmu dan Teknik Material, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung, Jalan Ganesa No. 10 Bandung 40132, Jawa Barat

*Email: toniagung86@gmail.com

Abstract. Modulus elastisitas adalah salah satu sifat material yang menyatakan nilai kekakuan dari material tersebut. Modulus elastisitas menunjukkan kemampuan material untuk menahan deformasi elastis saat diberi tegangan, yang mencerminkan hubungan antara tegangan dan regangan dalam batas elastisitas material tersebut. Metoda paling umum untuk menentukan nilai modulus elastisitas adalah dengan uji tarik tetapi masih mempunyai kekurangan harus merusak benda uji. Metoda uji tidak rusak yang dapat digunakan untuk menentukan nilai modulus elastisitas salah satunya adalah dengan menggunakan uji ultrasonik. Penentuan nilai modulus elastisitas dengan metoda ultrasonik pada material logam sudah dilakukan sebelumnya namun belum dapat menentukan nilai modulus elastisitas pada material pipa atau pada material dengan permukaan yang luas. Penelitian ini bertujuan mengkaji penentuan nilai modulus elastisitas pada material baja dan aluminium dengan metoda ultrasonik *pitch & catch* dengan variasi formula, variasi frekuensi probe dan variasi tebal benda uji. Validasi hasil uji dilakukan dengan membandingkan modulus elastisitas hasil metoda ultrasonik *pitch & catch* dengan modulus elastisitas dari referensi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi frekuensi probe, jarak antar probe dan tebal benda uji diatas 5mm menghasilkan nilai modulus elastisitas yang sesuai dengan referensi. Tebal benda uji dibawah 5mm menjadi batasan dari metoda ultrasonik *pitch & catch* dalam menentukan nilai modulus elastisitas karena data kecepatan gelombang longitudinal tidak akurat pada material yang tipis.

Kata Kunci: aluminium, baja, modulus elastisitas, *pitch & catch*, ultrasonik.

1 Pendahuluan

Modulus elastisitas merupakan salah satu parameter penting dalam karakterisasi material, khususnya dalam desain komponen yang menerima beban mekanik[1]. Pengukuran modulus elastisitas secara akurat sangat diperlukan. Metode umum untuk menentukan modulus elastisitas biasanya melibatkan uji mekanis langsung, seperti uji tarik, uji tekan dan uji bending. Namun, metode ini memiliki beberapa keterbatasan, seperti memerlukan persiapan sampel yang cukup besar, pengujian yang memakan waktu, dan merusak material yang diuji. Metoda ultrasonik adalah salah satu metoda uji tidak rusak yang dapat

digunakan untuk mendapatkan nilai modulus elastisitas dengan memanfaatkan sifat propagasi gelombang pada material yang populer digunakan pada material komposit[2], medis dan biomaterial[3]. Prinsip pengujian ultrasonik untuk mendapatkan nilai modulus elastisitas adalah hubungan antara massa jenis material dan kecepatan gelombang longitudinal dan kecepatan gelombang transversal yang merambat pada material tersebut[4]. Pada penelitian ini, kecepatan gelombang transversal diukur dengan menggunakan alat uji ultrasonik konvensional dengan konfigurasi probe *pitch & catch*. Konfigurasi ini belum pernah digunakan sebelumnya untuk mendapatkan nilai modulus elastisitas pada material logam khususnya baja dan aluminium.

2 Metodologi

Material baja yang digunakan dalam penelitian ini adalah material baja karbon rendah dengan variasi tebal 5, 10, 25 dan 51 mm. Sedangkan untuk aluminium menggunakan benda uji dengan tebal 15mm. Alat uji ultrasonik yang digunakan adalah alat uji *ultrasonic flaw detector* Olympus Epoch 600. Probe normal menggunakan probe diameter 24mm dengan frekuensi 1, 2 dan 4 MHz merek Krautkramer. Sedangkan probe sudut yang digunakan adalah dua buah probe sudut 45⁰ frekuensi 4 MHz merek Krautkramer. Variasi parameter pengujian yang dilakukan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Untuk mendapatkan nilai modulus elastisitas diperlukan data kecepatan gelombang transversal dan longitudinal. Untuk mendapatkan data kecepatan gelombang transversal menggunakan probe pemancar gelombang ultrasonik (transmitter) dan probe penerima gelombang ultrasonik (receiver) dengan konfigurasi *pitch & catch* seperti pada Gambar 2 sedangkan untuk mendapatkan data kecepatan gelombang longitudinal menggunakan konfigurasi probe pulse echo seperti pada Gambar 3.

Variasi formula yang dibandingkan adalah formula untuk mendapatkan nilai modulus elastisitas dari persamaan Christoffel [5] dan persamaan yang digunakan pada material logam [4]. Pada persamaan Christoffel kecepatan gelombang longitudinal dan transversal digunakan untuk mendapatkan konstanta elastis C_{11} dan C_{22} dalam matriks kekakuan material isotropi berikut

$$\begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(C_{11}-C_{12}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(C_{11}-C_{12}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(C_{11}-C_{12}) \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{Matriks konstanta elastis material} \\ \text{isotropi} \end{array}$$

Untuk melengkapi matriks konstanta elastis tersebut data kecepatan gelombang longitudinal (V_L) dan gelombang transversal (V_T) pada Persamaan 1 dan Persamaan 2 Setelah diperoleh matriks konstanta elastis kemudia dilakukan invers untuk mendapatkan matriks S seperti pada Persamaan 3 dan Persamaan 4. Dari matiks S dapat diperoleh nilai modulus elastisitas dan poisson rasio dengan Persamaan 5 dan Persamaan 6. Persamaan material logam dapat dilihat pada Persamaan 7 untuk modulus elastisitas dan Persamaan 8 untuk mendapatkan nilai poisson rasio[4].

$$C_{11} = \rho V_L^2 \tag{1}$$

$$C_{12} = C_{11} - (2 \times \rho V_T^2) \tag{2}$$

$$[S] = [C]^{-1} \tag{3}$$

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$E_1 = E_2 = E_3 = \frac{1}{S_{11}} \tag{5}$$

$$v = -\frac{E}{S_{12}} \tag{6}$$

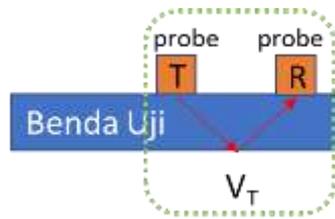
$$v = \frac{1 - 2 \left(\frac{V_T}{V_L} \right)^2}{2 \left[1 - \left(\frac{V_T}{V_L} \right)^2 \right]} \quad (7)$$

$$E = V_T^2 \times \rho \times 2(1 + v) \quad (8)$$

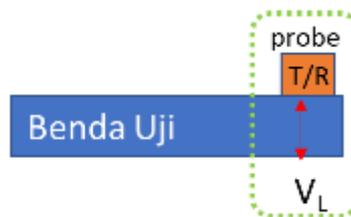
- v = Poisson rasio
 V_T = Kecepatan gelombang transversal
 V_L = Kecepatan gelombang longitudinal
 E = Modulus elastisitas
 ρ = Densitas material
 $[C]$ = Matriks kekakuan
 $[S]$ = Invers matriks kekakuan

Tabel 1. Variasi parameter penentuan modulus elastisitas pada material baja dan aluminium

Merek dan Tipe Alat Uji: Ultrasonik Olympus Epoch 600			
Spesimen	Baja	Aluminium	Keterangan
Variasi Parameter			
Formula	✓	✓	Variasi formula formula Christoffel dan formula material logam
Frekuensi Probe	✓	-	1 MHz, 2 MHz, dan 4 MHz (probe normal 0°) 4 MHz (probe sudut 45°)
Tebal benda uji	✓	-	Baja: Tebal 5, 10, 25 dan 51 mm
Tipe Probe	Normal 0° dan sudut 45°		1 buah probe normal 0°, untuk mendapatkan V_L 2 buah probe sudut 45° konfigurasi pitch and catch untuk mendapatkan V_T



Gambar 1 Konfigurasi probe *pitch & catch*



Gambar 2 Konfigurasi probe pulse echo

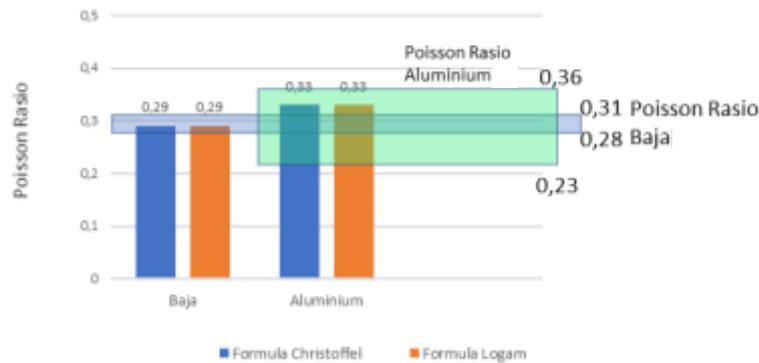
3 Data dan Analisa

3.1 Pengaruh variasi formula terhadap poisson rasio dan modulus elastisitas baja dan aluminium

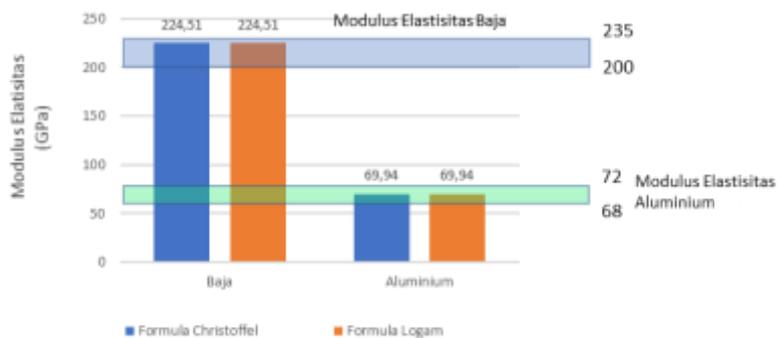
Nilai rasio poisson material baja dan aluminium yang diperoleh dari hasil uji ultrasonik menggunakan formula Christoffel dan formula untuk material logam didapatkan nilai yang sama sebesar 0,29. Nilai modulus elastisitas pada material baja dan aluminium dengan metoda ultrasonik dengan formula Christoffer dan formula logam 224,51 GPa untuk baja dan 69,94 untuk aluminium. Hasil penentuan poisson rasio dan modulus elastisitas dengan metoda ultrasonik *pitch & catch* baik dengan formula Christoffel maupun formula material logam menghasilkan nilai yang masih sesuai dengan nilai dari referensi[6][7] seperti terlihat pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Nilai Poisson Rasio dan Modulus Elastisitas referensi

Material	Poisson Rasio	Modulus Elastisitas (GPa)
Aluminium	0,23-0,36	68-72
Baja	0,28-0,31	200-235



Gambar 3 Poisson rasio baja dan aluminium hasil uji ultrasonik *pitch & catch* dengan variasi formula

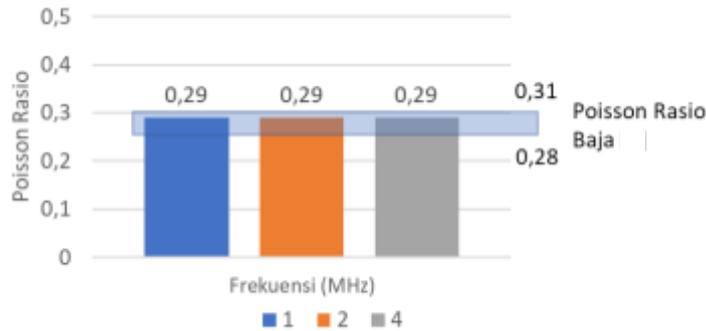


Gambar 4 Modulus elastisitas baja dan aluminium hasil uji ultrasonik *pitch & catch* dengan variasi formula

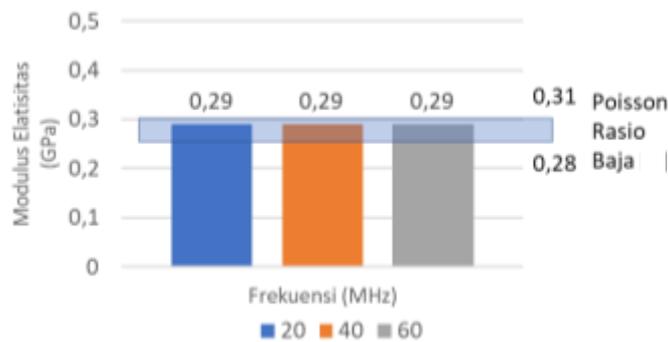
3.2 Pengaruh Variasi Frekuensi Probe Terhadap Poisson Rasio dan Modulus Elastisitas Baja

Nilai poisson rasio pada material baja dengan metoda ultrasonik *pitch & catch*, dengan variasi frekuensi probe adalah 0,29 dan masih masuk dalam rentang nilai poisson rasio dari referensi 0,28 sampai dengan 0,31[7]. Nilai modulus elastisitas pada material baja dengan variasi frekuensi probe yang berbeda, nilainya ada sedikit perbedaan (deviasi $\pm 0,76$ GPa) dan semua nilai masih masuk dalam rentang modulus elastisitas baja dari referensi (200 sampai dengan 235 GPa)[7]. Perbedaan nilai modulus elastisitas ini disebabkan oleh perbedaan data kecepatan gelombang yang diperoleh dan perbedaannya tidak signifikan,

sehingga tidak banyak berpengaruh terhadap nilai modulus elastisitas yang dihasilkan.



Gambar 5 Poisson rasio baja hasil uji ultrasonik *pitch & catch* dengan variasi frekuensi probe



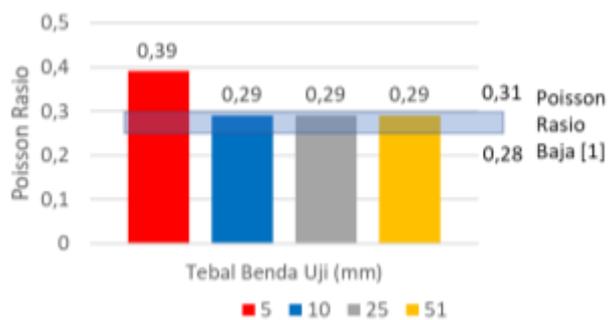
Gambar 6 Modulus elastisitas baja hasil uji ultrasonik *pitch & catch* dengan variasi frekuensi probe

3.3 Pengaruh Variasi Tebal Benda Uji Terhadap Poisson Rasio dan Modulus Elastisitas Baja

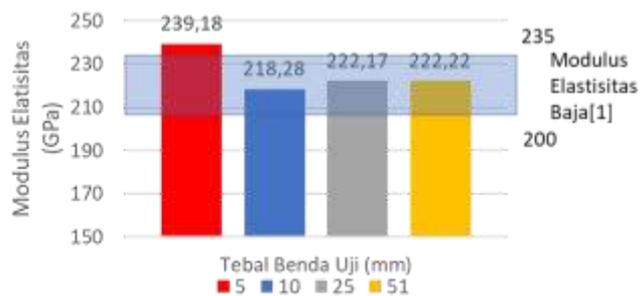
Nilai poisson rasio hasil pengujian ultrasonik dengan variasi tebal benda uji diperoleh nilai 0,39 untuk tebal 5 mm dan 0,29 untuk tebal 10, 25 dan 51 mm. Untuk tebal baja 5 mm, nilai poisson rasio lebih tinggi dari referensi. Nilai modulus elastisitas untuk tebal 5 mm diperoleh 239,18 GPa, untuk tebal 10 mm, 25 mm dan 51 mm didapat nilai modulus elastisitas 218,28 GPa; 222,17 GPa

dan 222,22 GPa. Untuk tebal 5 mm nilai modulus elastisitas dari hasil uji ultrasonik metoda *pitch & catch* diatas rentang modulus elastisitas baja dari referensi.

Nilai poisson rasio dan modulus elastisitas pada baja dengan tebal 5 mm berada diluar rentang ini disebabkan oleh data kecepatan gelombang yang diperoleh tidak akurat. Data kecepatan gelombang pada benda uji yang tipis disebabkan adanya *near field zone*. *Near field zone* adalah daerah di dekat probe atau transduser dimana gelombang ultrasonik masih banyak mengalami interferensi gelombang atau belum terbentuk sempurna menjadi gelombang yang utuh dan terfokus, sehingga menyebabkan pembacaan gelombang tidak akurat [8].



Gambar 7 Poisson rasio baja hasil uji ultrasonik *pitch & catch* dengan variasi tebal benda uji



Gambar 8 Modulus elastisitas baja hasil uji ultrasonik *pitch & catch* dengan variasi tebal benda uji

4 Kesimpulan

Pengujian ultrasonik dengan metoda *pitch & catch* dapat digunakan untuk mendapatkan nilai modulus elastisitas dan poisson rasio pada aluminium dan

baja dengan ketebalan diatas 5mm. Pada benda uji dengan ketebalan kurang dari 5mm nilai modulus elastisitas dan poisson rasio yang diperoleh tidak sesuai dengan referensi karena adanya *near field zone*. Penggunaan frekuensi probe yang tinggi (4MHz) tidak berpengaruh terhadap hasil pengujian karena sifat material logam yang mempunyai atenuasi atau penurunan intensitas gelombang ultrasonik yang rendah. Penggunaan persamaan material isotropik untuk mendapatkan nilai modulus elastisitas sesuai dengan sifat baja dan aluminium yang secara umum bersifat isotropi. Material baja dan aluminium dapat bersifat anisotropi akibat dari proses manufaktur yang dilakukan yang menyebabkan struktur butir yang terarah [9][10].

5 Referensi

- [1] M. F. Ashby, *The Design Process*, Butterworth-Heinemann, pp. 15–29, 2011.
- [2] S. Siva Shashidhara Reddy, K. Balasubramaniam, C. V. Krishnamurthy, & M. Shankar, *Ultrasonic Goniometry Immersion Techniques for the Measurement of Elastic Moduli*, pp. 3–17, 2005.
- [3] J. S. Rossmann, *Elastomechanical Properties of Bovine Veins* Elsevier, pp. 210–215, 2010.
- [4] J. Krautkrämer & H. Krautkrämer, *Ultrasonic Testing of Materials*, Springer Berlin Heidelberg, 1990.
- [5] Robert E. Newnham, *Properties of Materials Anisotropy, Symmetry, Structure, First Edit*, Oxford University Press, New York, pp. 248–253, 2005.
- [6] Material Property Data, *Overview of materials for Aluminum Alloy*, <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ab8aeb2d293041c4a844e397b5cfbd4e>, 2 Juni 2024.
- [7] Material Property Data, *Overview of materials for Carbon Steel*, <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=ee25302df4b34404b21ad67f8a83e858>, 2 Juni 2024.
- [8] Y. Yue, X. Mao, L. Zhang, in Proc.SPIE (2020), p. 115681X.
- [9] Shaabani, A., et.al, *Mechanical anisotropic behavior of low-carbon steel processed by asymmetric rolling*. Heliyon, **10**(13), 2024.
- [10] Sidor, J. J., *Effect of Hot Band on Texture Evolution and Plastic Anisotropy in Aluminium Alloys*, Metals, **11**(8), 1310, 2021.