

# PENENTUAN MODULUS ELASTISITAS LOGAM DENGAN METODE ULTRASONIK PULSA GEMA

## *ELASTIC MODULUS MEASUREMENT USING PULSE-ECHO ULTRASONIC METHOD*

Firmansyah Sasmita<sup>1,a)</sup>, Claudia<sup>1,b)</sup>, Gatot Wibisono<sup>1,c)</sup>, Tania Zefanya S. Tarigan<sup>1,d)</sup>,  
Hermawan Judawisastra<sup>1,e)</sup>, Toni Agung Priambodo<sup>2,f)</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Material, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung

<sup>2</sup>Balai Besar Bahan dan Barang Teknik, Kementerian Perindustrian RI

<sup>a)</sup>\*firmansyah.sasmita@material.itb.ac.id, <sup>b)</sup>angela\_claudia@students.itb.ac.id,

<sup>c)</sup>gatotwibisono@students.itb.ac.id, <sup>d)</sup>taniazefanya@students.itb.ac.id,

<sup>e)</sup>hermawan.judawisastra@material.itb.ac.id, <sup>f)</sup>toniagung@kemenperin.go.id

Diterima: 7 April 2018

Direvisi: 23 April 2018

Disetujui: 14 Mei 2018

### ABSTRAK

Modulus elastisitas merupakan sifat mekanik yang penting dari logam karena dipakai dalam proses desain suatu komponen, yaitu dalam hal analisis tegangan berupa penentuan distribusi tegangan, gaya reaksi, defleksi, dan faktor keamanan. Pengujian tidak merusak dipilih oleh industri karena faktor efisiensi dan efektivitasnya. Salah satu metode pengujian tidak merusak ialah ultrasonik. Pengukuran kecepatan gelombang ultrasonik yang merambat dalam medium suatu material digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi. Kecepatan gelombang ultrasonik tergantung pada densitas dan sifat elastik, yaitu modulus elastisitas dan *Poisson's ratio*. Metode ultrasonik yang sering digunakan, yaitu transmisi dan pulsa-gema. Pulsa-gema lebih mudah digunakan dan hanya membutuhkan satu sisi material. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan modulus elastisitas logam, yakni baja dan aluminium berdasarkan pengukuran kecepatan gelombang longitudinal dengan teknik pulsa-gema. Pengujian dilakukan menggunakan tiga *probe* lurus yang memiliki frekuensi (1, 2, 4 MHz) dan diameter yang berbeda. Dua metode pengukuran kecepatan yang digunakan adalah *2 Point (2P)* dan *Multiple Backwall Echoes (MBE)*. Modulus elastisitas berhasil ditentukan dengan galat antara 0,05% – 6,23% untuk baja dan aluminium di kisaran 0,17% – 6,53%. *Probe* berfrekuensi 4 MHz dan metode 2P menghasilkan galat terkecil, yaitu 0,05% untuk baja serta *probe* berfrekuensi 1 MHz dan metode MBE memberikan galat terkecil, yaitu 0,17% untuk aluminium.

**Kata kunci:** modulus elastisitas, logam, ultrasonik, pulsa-gema, kecepatan longitudinal

### ABSTRACT

*Elasticity modulus is an important mechanical properties of metal because it is used in the component design process, namely stress analysis such as determination of stress distribution, reaction forces, deflection, and safety factor. Nondestructive testing are preferably in industry because of its efficiencies and effectivity. One of the nondestructive testing method is the ultrasonic. Measurement of ultrasonic wave velocity which propagates in a material medium was used as a basis for evaluation. Ultrasonic wave velocity depends on the density and elastic properties i.e. elasticity modulus and Poisson's ratio. The common ultrasonic methods are transmission and pulse-echo. Pulse-echo is easier to use and require only one side of the material. This research aimed to determine elasticity modulus of metals i.e. steel and aluminum based on the measurement of longitudinal wave velocity by pulse-echo technique. The testing was performed using three straight probes with different frequencies (1, 2, 4 MHz) and diameters. Two methods for velocity measurement were used, namely 2 Point (2P) and Multiple Backwall Echoes (MBE). The successful elasticity modulus determined within error 0.05% – 6.23 % for steel and 0.17% – 6.53% for aluminum. The 4 MHz probe and 2P method resulted in smallest error, namely 0.05% for steel; the 1 MHz probe and MBE method gave lowest error i.e 0.17% for aluminum.*

**Keywords:** elasticity modulus, metal, ultrasonic, pulse echo, longitudinal velocity

## PENDAHULUAN

Modulus elastisitas merupakan salah satu sifat mekanik yang penting dari suatu material. Pada saat mendesain suatu komponen atau struktur dengan geometri tertentu, modulus elastisitas diperlukan untuk menentukan distribusi tegangan, gaya reaksi, defleksi, faktor keamanan, tegangan sisa, dan juga tegangan termoelastik [1,2].

Sifat elastis material umumnya ditentukan dengan pengujian merusak seperti uji tarik dan uji lentur. Pengujian merusak memerlukan waktu persiapan sampel yang lama, dan dapat merusak komponen yang sedang beroperasi. Pengujian merusak tidak sesuai digunakan untuk mengevaluasi sifat elastis material di lapangan (*in situ*). Salah satu metode pengujian tidak merusak yang berpotensi untuk mengevaluasi sifat elastis material adalah pengujian dengan menggunakan gelombang ultrasonik [3].

Pengujian ultrasonik memanfaatkan perambatan gelombang suara pada frekuensi 0,5 - 25 MHz [4]. Pada medium yang berbeda, kecepatan rambat gelombang ultrasonik akan berbeda pula sesuai dengan massa jenis dan sifat elastisitasnya, yaitu modulus elastisitas dan *Poisson's ratio*. Semakin besar modulus elastisitasnya maka semakin besar kecepatan rambat gelombangnya. Salah satu fenomena yang terjadi dalam perambatan gelombang ultrasonik adalah fenomena interferensi gelombang sehingga gelombang pantulan untuk menentukan kecepatan rambat menjadi tidak akurat. Pada daerah tersebut kecepatan gelombang dipengaruhi oleh *near-field*, frekuensi dan diameter *probe* [4].

Beberapa metode penelitian mengenai penggunaan gelombang ultrasonik untuk menentukan modulus elastisitas material adalah transmisi dan pulsa-gema [5,6]. Metode pulsa-gema lebih mudah dipakai karena memanfaatkan gelombang pantul sehingga hanya dibutuhkan satu sisi material yang ingin diuji. Sedangkan metode transmisi memanfaatkan gelombang yang diteruskan sehingga membutuhkan dua sisi material.

Terdapat 2 metode pengukuran kecepatan rambat gelombang ultrasonik pada suatu material yaitu metode 2 titik (*2 Point/2P*) dan *Multiple Backwall Echoes* (MBE). Metode 2 titik umumnya dipakai untuk material dengan atenuasi besar karena hanya terdapat 1 *backwall echo* yang terbaca. Metode ini menggunakan 2 blok

sampel material yang sama namun memiliki ketebalan (yang sudah diketahui) berbeda. Sedangkan metode MBE menggunakan banyak *backwall echo* dari blok sampel uji dibandingkan dengan blok sampel referensi [7,8].

Logam merupakan material yang banyak digunakan untuk komponen struktural. Variasi jenis logam yang tersedia serta perkembangan pembuatan logam paduan tinggi yang baru dapat menghasilkan variasi modulus elastisitas. Baja dan aluminium merupakan dua jenis material logam populer untuk aplikasi struktur yang menerima beban. Penggunaan ultrasonik untuk menentukan modulus elastisitas logam akan sangat berguna di lapangan tanpa perlu merusak komponen strukturnya. Tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan modulus elastisitas baja dan aluminium dengan metode ultrasonik pulsa-gema. Evaluasi dilakukan dengan variasi frekuensi *probe* serta membandingkan dua metode penentuan kecepatan gelombang ultrasonik.

## BAHAN DAN METODE

Logam yang dievaluasi adalah baja AISI/SAE 1019 dan aluminium Al 2024 dengan ketebalan masing-masing 19,8 mm untuk baja dan 35,1 mm untuk aluminium. Pengujian ultrasonik dilakukan dengan alat GE USM 35X yang dioperasikan dengan mode pulsa-gema. Kecepatan longitudinal dari tiap spesimen dideteksi dengan *probe* lurus berfrekuensi 1 dan 2 MHz dengan diameter 24 mm dan *probe* lurus berfrekuensi 4 MHz dengan diameter 10 mm.

Parameter yang digunakan pada uji ultrasonik adalah : frekuensi *probe* longitudinal 1, 2, dan 4 MHz serta metode pengukuran kecepatan rambat dengan metode 2P dan metode MBE. Metode 2P adalah metode yang mengukur jarak tempuh yang diperoleh dari pengujian pada dua ketebalan sampel material. Metode MBE adalah metode yang didasarkan pada metode ASTM E 494 – 95 (R01), merupakan metode yang menentukan kecepatan gelombang longitudinal suatu material dengan cara membandingkan waktu tempuh gelombang longitudinal pada material yang belum diketahui dan waktu tempuh pada material referensi. Kecepatan longitudinal sampel uji dengan metode MBE diperoleh dengan perhitungan berdasarkan persamaan 1 [8]:

$$v = A_k n_l t_l v_k / A_l n_k t_k \quad (1)$$

Dengan:

- $A_k$  = jarak dari *back echo* pertama ke-*echo* terakhir pada material referensi (m)
- $n_l$  = jumlah lembah material yang belum diketahui
- $t_l$  = ketebalan material yang belum diketahui (m)
- $v_k$  = kecepatan longitudinal pada material referensi (m/s)
- $A_l$  = jarak dari *back echo* pertama ke *echo* terakhir pada material yang belum diketahui (m)
- $n_k$  = jumlah lembah material referensi
- $t_k$  = ketebalan material referensi (m)

Modulus elastisitas dihitung menggunakan persamaan 2 [3,9,10] dengan nilai *Poisson's ratio* dan densitas dari literatur. *Poisson's ratio* baja sebesar 0,3 dan untuk aluminium sebesar 0,33 sedangkan densitas baja yang digunakan adalah 7850 kg/m<sup>3</sup> dan densitas aluminium yang digunakan adalah 2770 kg/m<sup>3</sup> [11].

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

dengan:

- $\nu$  = *Poisson's ratio*
- $E$  = modulus elastisitas (N/m<sup>2</sup>)
- $C_l$  = kecepatan gelombang longitudinal (m/s)
- $C_s$  = kecepatan gelombang geser (m/s)
- $\rho$  = densitas material (kg/m<sup>3</sup>)

Modulus elastisitas hasil pengujian ultrasonik selanjutnya dibandingkan dengan modulus elastisitas literatur. Perbedaan galat antara modulus elastisitas dari pengujian ultrasonik ( $E_{UT}$ ) dengan modulus elastisitas literatur ( $E_l$ ) diperoleh dari persamaan 3.

$$\text{Galat} = \left| \frac{E_{UT} - E_l}{E_l} \right| \times 100\% \quad (3)$$

Sampel diberi nama berdasarkan material uji dan frekuensi *probe*. Dua digit pertama untuk material dan digit ketiga untuk frekuensi *probe*. Kodefikasi sampel dapat dilihat pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Kode Sampel

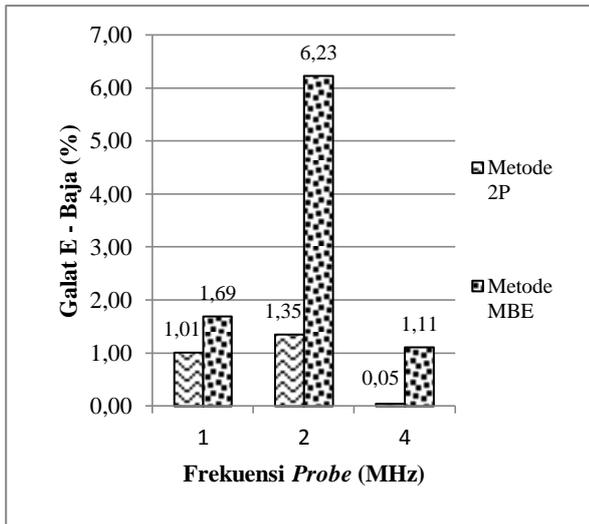
Material	Kode Sampel	Frekuensi <i>Probe</i>
		Longitudinal (MHz)
Baja	BJ1	1
	BJ2	2
	BJ4	4
Aluminium	AL1	1
	AL2	2
	AL4	4

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian modulus elastisitas baja pada berbagai frekuensi *probe* dan metode dapat dilihat pada Tabel 2. Hasil galat antara modulus elastisitas hasil uji ultrasonik terhadap literatur dapat dilihat pada Gambar 1. Hasil pengujian modulus elastisitas baja dengan pengujian ultrasonik bervariasi antara 194 sampai 207 GPa. Nilai modulus elastisitas baja bervariasi bergantung pada jenis *probe* yang digunakan dan metode yang dipakai. Perbandingan modulus elastisitas baja hasil uji ultrasonik pulsa-gema dengan modulus elastisitas literatur memperlihatkan galat yang relatif rendah dari minimum 0,05% sampai dengan maksimum 6,23%. Hasil pengukuran modulus elastisitas dengan pengujian ultrasonik pulsa-gema dengan *probe* berfrekuensi 4 MHz dan metode 2P menghasilkan galat terkecil sebesar 0,05%.

**Tabel 2.** Kecepatan Gelombang dan Modulus Elastisitas Baja dari Pengujian Ultrasonik

Sampel	Kecepatan Gelombang (m/s)		Modulus Elastisitas (GPa) dari Pengujian Ultrasonik		Modulus Elastisitas (GPa) Literatur [11]
	Metode 2P	Metode MBE	Metode 2P	Metode MBE	
BJ1	5928	5907	205	204	
BJ2	5918	5769	204	194	207
BJ4	5957	5925	207	205	



**Gambar 1.** Galat Modulus Elastisitas Baja Hasil Uji Ultrasonik dengan Literatur

Galat terkecil hasil modulus elastisitas baja adalah modulus elastisitas yang ditentukan dengan probe frekuensi 4 MHz sebesar 0,05%. Menurut teori atenuasi, makin rendah frekuensi yang digunakan, makin rendah tingkat atenuasinya, sehingga potensi galat yang lebih kecil ditemukan pada frekuensi yang lebih rendah [4]. Ketidakesuaian ini disebabkan karena penggunaan frekuensi probe lurus 1 MHz dan 2 MHz untuk sampel baja dipengaruhi oleh

panjang *nearfield*. Panjang *nearfield*  $N$  dari probe dihitung dengan persamaan 4 [4].

$$N = \frac{D^2 f}{4V} \tag{4}$$

dengan:

$D$  = diameter probe (m)

$f$  = frekuensi (Hz)

$V$  = kecepatan gelombang longitudinal (m/s)

Hasil perhitungan panjang *nearfield* untuk sampel baja dapat dilihat pada Tabel 3. Pada daerah di luar *nearfield* tidak terdapat lagi pengaruh interferensi gelombang sehingga perilaku gelombang menjadi seragam dan mencapai intensitas maksimum [4]. Probe frekuensi 4 MHz memiliki panjang *nearfield* terkecil yaitu 17,0 mm. Jika panjang *nearfield* dibandingkan dengan tebal sampel yaitu 19,8 mm maka sampel ini berada di daerah di luar *nearfield* dimana pengukuran kecepatan gelombang dengan probe ini tidak akan dipengaruhi oleh *nearfield*.

Metode 2P menunjukkan hasil galat yang lebih rendah yaitu 0,05% – 1,35%. Sedangkan dengan metode MBE menunjukkan hasil galat yang lebih besar yaitu 1,11% – 6,23%.

**Tabel 3.** Perbandingan Panjang *Nearfield* dan Ketebalan pada Sampel Baja

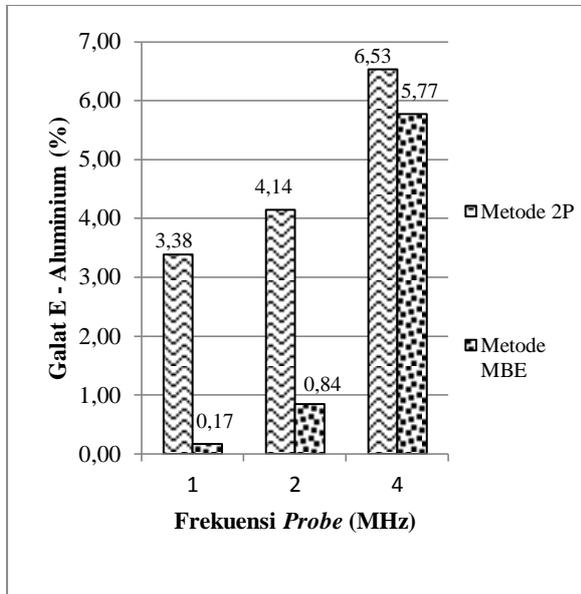
Frekuensi (MHz)	Diameter Probe (mm)	Kecepatan Gelombang (m/s) [8]	Panjang <i>Nearfield</i> (mm)	Ketebalan Sampel (mm)	Keterangan
1	24	5900	24,4	19,8	Dipengaruhi <i>nearfield</i>
2	24	5900	48,8	19,8	Dipengaruhi <i>nearfield</i>
4	10	5900	17,0	19,8	Tidak dipengaruhi <i>nearfield</i>

Hasil pengujian modulus elastisitas aluminium dengan variasi frekuensi probe dan metode dapat dilihat pada Tabel 4. Hasil galat antara modulus elastisitas hasil uji ultrasonik terhadap literatur dapat dilihat pada Gambar 2. Hasil pengujian modulus elastisitas aluminium dengan pengujian ultrasonik, bervariasi antara 70,0 sampai 77,1 GPa. Nilai modulus elastisitas aluminium bervariasi tergantung jenis probe dan

metode yang digunakan. Perbandingan modulus elastisitas aluminium hasil uji ultrasonik pulsa-gema dengan modulus elastisitas literatur memperlihatkan galat yang relatif rendah dari minimum 0,17% sampai dengan maksimum 6,53%. Hasil pengukuran modulus elastisitas dengan pengujian ultrasonik pulsa-gema dengan probe frekuensi 1 MHz dan metode MBE menghasilkan galat terkecil, yaitu sebesar 0,17%.

**Tabel 4.** Kecepatan Gelombang dan Modulus Elastisitas Aluminium dari Pengujian Ultrasonik

Sampel	Kecepatan Gelombang (m/s)		Modulus Elastisitas (GPa) dari Pengujian Ultrasonik		Modulus Elastisitas (GPa) dari Literatur [11]
	Metode A	Metode B	Metode A	Metode B	
AL1	6117	6228	70,0	72,5	
AL2	6351	6250	75,4	73,0	72,4
AL4	6423	6400	77,1	76,6	



**Gambar 2.** Galat Modulus Elastisitas Aluminium Hasil Uji Ultrasonik

Hasil pengukuran modulus elastisitas aluminium menunjukkan bahwa makin rendah frekuensi *probe* lurus, menghasilkan galat yang makin kecil. Hal ini dapat dijelaskan bahwa makin rendah frekuensi yang digunakan, makin rendah tingkat atenuasinya, sehingga potensi galatnya lebih kecil.

Hasil perhitungan panjang *nearfield* aluminium sesuai persamaan 4 ditampilkan pada Tabel 5. Panjang *nearfield* dari *probe* frekuensi 2 MHz adalah 45,7 mm yang lebih besar daripada tebal sampel yaitu 35,1 mm, sehingga nilai kecepatan rambat akan dipengaruhi oleh *nearfield*. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa pengaruh *nearfield* pada aluminium dengan frekuensi *probe* lurus 2 MHz tidak signifikan. Galat terbesar terdapat pada hasil pengukuran dengan frekuensi 4 MHz yaitu 6,53%, bukan pada frekuensi 2 MHz yang hanya menghasilkan galat maksimum 4,14%. Galat minimum sebesar 0,17% dihasilkan pada pengukuran *probe* 1 MHz.

**Tabel 5.** Perbandingan Panjang *Nearfield* dan Ketebalan pada Sampel Aluminium

Frekuensi (MHz)	Diameter <i>Probe</i> (mm)	Kecepatan Gelombang (m/s)	Panjang <i>Nearfield</i> (mm)	Ketebalan (mm)	Keterangan
1	24	6300	22,9	35,1	Tidak dipengaruhi <i>nearfield</i>
2	24	6300	45,7	35,1	Dipengaruhi <i>nearfield</i>
4	10	6300	15,9	35,1	Tidak dipengaruhi <i>nearfield</i>

Secara umum untuk material aluminium, pengukuran modulus elastisitas dengan metode MBE menghasilkan galat yang lebih kecil yaitu 0,17% – 5,77%. Sementara itu, galat modulus elastisitas dengan metode 2P bernilai 3,38% – 6,53%.

## KESIMPULAN DAN SARAN

Penggunaan ultrasonik pulsa-gema berhasil digunakan untuk menentukan modulus elastisitas logam dengan galat minimum sebesar 0,05% dan maksimum sebesar 6,23% pada

sampel baja sedangkan sampel aluminium menghasilkan galat sebesar 0,17% (minimum) dan 6,53 % (maksimum). Hasil ini menunjukkan bahwa metode ultrasonik pulsa gema memiliki potensi yang besar untuk digunakan dalam menentukan modulus elastisitas pada material logam-logam lainnya. Penggunaan *probe* lurus dengan frekuensi 4 MHz dan metode 2P menghasilkan galat yang terkecil, yaitu 0,05% untuk material baja. Di lain pihak, *probe* lurus berfrekuensi 1 MHz dan metode MBE memberikan galat yang terkecil sebesar 0,17%

untuk aluminium. Galat dari modulus elastisitas hasil pengujian ultrasonik ditentukan oleh frekuensi dan diameter *probe* yang menghasilkan tingkat atenuasi serta daerah *nearfield* yang berbeda.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Program Penelitian, Pengabdian kepada Masyarakat, dan Inovasi (P3MI) Kelompok Keahlian ITB Tahun Anggaran 2017-2018 dan didukung oleh Balai Besar Bahan dan Barang Teknik (B4T) – Kementerian Perindustrian RI. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan dan bantuannya.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Parveen and G. V. S. Murthy, "Determination of elastic modulus in nickel alloy from ultrasonic measurements", *Bulletin of Materials Science*, vol. 34, no. 2, pp. 323–326, April 2011.
- [2] Gedeon, M., "Elastic Modulus", *Technical Tidbits*, Materion Brush Performance Alloys, 6070 Parkland Blvd. Mayfield Heights, OH 44124, Issue No. 48, December 2012
- [3] Ginzl, E. and Turnbull, B., 2016, "Determining Approximate Acoustic Properties of Materials", [Online]. Available: [https://www.ndt.net/article/ndtmet/2016/17\\_Ginzl.pdf](https://www.ndt.net/article/ndtmet/2016/17_Ginzl.pdf), diakses 1 Juli 2018.
- [4] Hellier, C. J., *Handbook of Nondestructive Evaluation*, 1<sup>st</sup> Ed., USA: McGraw-Hill Inc., 2003.
- [5] E. E. Franco, J. M. Meza, and F. Buiochi, "Measurement of Elastic Properties of Materials by the Ultrasonic Through-Transmission Technique," *Dyna rev.fac.nac.minas, Medellín*, vol. 78, no. 168, pp. 58–64, August 2011.
- [6] H. A. Afifi, "Ultrasonic Pulse Echo Studies of the Physical Properties of PMMA, PS, and PVC," *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, vol. 42, no. 2, pp. 193–205, 2003.
- [7] Renzel, P., 2016, "Thickness Measurement with Ultrasound Not knowing the Sound Velocity", GE-Krautkramer NDT Ultrasonic Systems homepage on NDT.net. [Online]. Available: <http://www.ndt.net/forum/files/thickm-w-us-nksv-presentation.pdf>, diakses 12 September 2017.
- [8] *Standard Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials*, ASTM Standard E 494 – 95 (R01), 2001.
- [9] Olympus NDT, 2011, "Ultrasonic Transducer Technical Notes", [Online]. Available: <http://www.olympusims.com/en/resources/white-papers/ultrasonic-transducer-technical-notes/>, diakses 1 Juli 2018.
- [10] Krautkrämer, J., Krautkrämer, H., in collaboration with Grabendörfer, W. *et. al.*, *Ultrasonic Testing of Materials*, 4<sup>th</sup> Fully Rev. Ed., New York, USA: Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1990.
- [11] Callister, W. D., Jr. and Rethwisch, D. G., *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 8<sup>th</sup> Ed., New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2010.