

Pengukuran Nilai Densitas pada Minyak Pelumas Sepeda Motor dengan Gelombang Ultrasonik

Ahmad Fauzi Firmansyah¹, Agus Indra Gunawan¹, Indra Adji Sulistijono¹, dan Denny Hanurawan²

¹Politeknik Elektronika Negeri Surabaya

Kampus PENS, Jalan Raya ITS Sukolilo, Surabaya 60111

²PT. Yerry Primatama Hosindo [Engineering Division]

Bizhub Office Park Blok GN 09-10, Jalan Raya Serpong, Bogor 16340

e-mail: afafirmansyah@pasca.student.pens.ac.id

Abstrak—Densitas atau massa jenis adalah ukuran kerapatan massa setiap satuan volume benda, semakin tinggi massa jenis suatu benda, maka semakin besar massa setiap volumenya. Nilai densitas dapat digunakan untuk membedakan karakteristik minyak pelumas yang rentan terkontaminasi partikel padat maupun cair. Nilai densitas juga dipengaruhi oleh perubahan suhu, semakin tinggi suhu minyak pelumas maka semakin kecil nilai densitasnya. Peraturan yang berlaku di Indonesia dengan metode uji ASTM D1298-12b standar densitas menyatakan bahwa pengukuran menggunakan suhu 15°C. Pada penelitian ini, nilai pengukuran densitas didapatkan pada suhu 28°C sehingga memerlukan konversi nilai dengan menggunakan tabel ASTM 53B tentang faktor koreksi densitas. Teknik pengujian material tanpa merusak benda uji dengan menggunakan sensor ultrasonik digunakan untuk mengukur nilai densitas pada minyak pelumas sepeda motor. Pengukuran dilakukan dengan mentransmisikan sinyal pemicu ultrasonik 3 MHz yang dapat menembus setiap medium dengan karakteristik berbeda. Sinyal pantul (*echo*) yang diterima menghasilkan informasi jarak antar medium, kecepatan suara, dan impedansi akustik. Hasil pengukuran 11 sampel minyak pelumas sepeda motor baik dalam kondisi baru maupun sudah terpakai dengan menggunakan metode impedansi akustik, menghasilkan akurasi 93,6% atau 0,058 kg/dm³ jika dibandingkan dengan nilai yang diukur menggunakan piknometer. Pengukuran sampel MPX-2-C menunjukkan kesalahan terendah yaitu 0,41% atau 0,004 kg/dm³.

Kata kunci: *densitas, minyak pelumas, impedansi akustik, ultrasonik, piknometer*

Abstract—Density is a measure of the mass of each unit volume of an object; the higher the density of an object, the greater the mass of each volume. The density value can be used to distinguish the characteristics of lubricating oils that are prone to contamination with solid or liquid particles. The density value is also affected by changes in temperature; the higher the temperature of the lubricating oil, the smaller the density value. The regulations in force in Indonesia with the ASTM D1298-12b standard density test method state that the measurement uses a temperature of 15°C. In this study, the density measurement value was obtained at a temperature of 28°C so it required a value conversion using the ASTM 53B table about the density correction factor. The technique of testing the material without damaging the test object using an ultrasonic sensor is used to measure the density value of motorcycle lubricating oil. Measurements are made by transmitting a 3 MHz ultrasonic trigger signal that can penetrate each medium with different characteristics. The received echo signal produces information about the distance between the medium, the speed of sound, and the acoustic impedance. The results of the measurement of 11 samples of motorcycle lubricating oil both in new and used conditions using the acoustic impedance method resulted in an accuracy of 93,6% or 0,058 kg/dm³ when compared to the value measured using a pycnometer. The MPX-2-C sample measurement showed the lowest error of 0,41% or 0,004 kg/dm³.

Keywords: *density, lubricating oil, acoustic impedance, ultrasonic, pycnometer*

I. PENDAHULUAN

Material atau zat dapat berwujud padat, cair, ataupun gas. Cairan dan gas tidak dapat mempertahankan bentuk yang tetap, keduanya memiliki kemampuan mengalir sehingga secara kolektif disebut fluida [1]. Salah satu karakteristik dari fluida adalah densitas atau massa jenis. Benda yang terbuat dari material atau zat tertentu memiliki berbagai jenis ukuran, namun massa jenisnya akan selalu

sama [2].

Secara matematis, densitas dapat dinyatakan dalam rumus massa dibagi dengan volume. Satuan internasional densitas cairan dinyatakan dalam satuan kg/dm³ atau g/l. Simbol yang digunakan densitas adalah (ρ). Nilai densitas cairan dipengaruhi oleh jenis cairan, kemurnian, suhu, dan tekanan. Pengaruh suhu dan tekanan pada suatu densitas cairan tidak terlalu signifikan, jika dibandingkan dengan densitas gas [3]. Secara umum, kenaikan suhu

menyebabkan densitas cairan turun. Hal ini disebabkan oleh zat cair akan mengalami pemuaian dan peningkatan volume, sehingga menghasilkan kerapatan yang lebih kecil. Kebanyakan cairan mengembang ketika dipanaskan dan menyusut ketika cairan didinginkan, karena molekul di dalam cairan tersebut berada dalam posisi yang tetap pada keadaan padat, tetapi butuh banyak ruang untuk bergerak pada keadaan cair [4].

Minyak pelumas adalah zat kimia yang diperlukan untuk semua bagian mesin yang bergerak di antara dua benda atau lebih untuk mengurangi gaya gesek. Minyak pelumas juga berfungsi untuk membentuk lapisan film, media pendingin, penyekat, dan pembersih [5]. Nilai densitas minyak pelumas adalah indikator penting yang mendeskripsikan rasio massa untuk volume. Hal ini terkait dengan kompresibilitas dan viskositas. Parameter ini secara signifikan mempengaruhi daya yang dikirim pada transmisi dan pasokan energi dalam sirkulasi. Metode Uji ASTM D1298-12b Standar Densitas menyatakan bahwa pengukuran menggunakan suhu standar 60°F atau 15°C. Sebagian besar minyak pelumas memiliki densitas berkisar antara 0,70 kg/dm³ hingga 0,95 kg/dm³, sedangkan air memiliki densitas 1 kg/dm³. Minyak pelumas sangat rentan terhadap kontaminasi partikel sehingga akan mempengaruhi kualitasnya [6]. Kontaminan utama pelumas selain partikel padat adalah air, keduanya memiliki dampak nyata terhadap perubahan nilai densitas.

Teknik pengujian material tanpa merusak benda uji (*Non-Destructive Testing*, NDT) merupakan suatu aktifitas pengujian terhadap benda atau material untuk mengetahui karakteristik dari benda uji tersebut tanpa harus merusaknya. Berbeda dengan teknik pengujian yang mencampurkan suatu bahan ke dalam material uji, teknik NDT dijalankan tanpa merusak material uji sehingga properti asli dari material uji tetap sama dan tidak berubah dari sebelum hingga setelah pengujian dilakukan [7]. Pada umumnya, NDT memiliki beragam metode uji. Bagian penting dari kinerja NDT adalah memilih metode dan teknik yang tepat. Salah satu metode uji NDT dengan menggunakan sensor ultrasonik. Ultrasonik adalah gelombang suara yang berada pada frekuensi lebih tinggi dari batas pendengaran manusia atau di atas 20 kHz. Sensor ultrasonik dimanfaatkan karena memiliki beberapa kelebihan, di antaranya: dapat digunakan dengan kondisi tanpa cahaya, yang tidak terpengaruh terhadap warna, dan transparansi benda [8]. Dalam penggunaannya ultrasonik terbagi ke beberapa kelas yang diklasifikasikan berdasarkan rentang frekuensi kerja sensor ultrasonik tersebut: frekuensi rendah, sedang, dan tinggi [9]. Sensor ultrasonik frekuensi rendah bekerja pada rentang frekuensi di bawah 200 kHz, sedangkan untuk sensor ultrasonik dengan frekuensi sedang bekerja pada rentang frekuensi di antara 200 kHz-100 MHz, dan frekuensi tinggi di atas 100 MHz.

Penelitian ini mengajukan rancangan model pengukuran nilai densitas pada pelumas sepeda motor dengan metode impedansi akustik ultrasonik. Proses pengukuran dilakukan dengan memanfaatkan sinyal pantul (*echo*)

yang dihasilkan oleh *transceiver* dengan frekuensi sedang 3MHz. Transduser memberikan sinyal suara yang dapat menembus setiap medium dengan karakteristik berbeda, sinyal pantul yang diterima menghasilkan jarak antar medium, kecepatan suara, dan impedansi akustik. Sebanyak 11 sampel minyak pelumas baik dengan kondisi baru maupun sudah terpakai diuji menggunakan teknik NDT ultrasonik, hasil pengujian setiap sampel akan dibandingkan dengan pengukuran piknometer. Penelitian ini diharapkan mampu mengukur nilai densitas pelumas yang kemudian digunakan sebagai parameter untuk mengkategorikan kondisi pelumas dalam kondisi layak pakai atau tidak layak pakai, sehingga dapat mereduksi biaya operasional yang tinggi karena waktu pergantian minyak pelumas dilakukan terlalu cepat, atau terlalu lambat sehingga menyebabkan kerusakan pada kendaraan.

II. STUDI PUSTAKA

Bagian ini menjelaskan tentang teori pendukung terkait dengan rancangan desain sistem yang dibuat.

A. Gelombang Ultrasonik

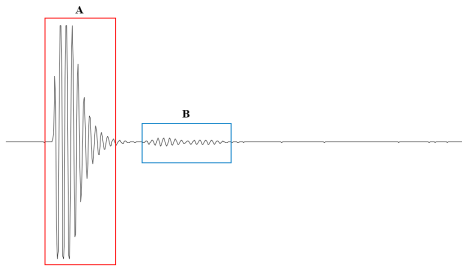
Gelombang suara/akustik merupakan energi mekanik yang menyebar melalui suatu medium yang kontinu, dua tipe dari gelombang akustik adalah gelombang longitudinal dan gelombang transversal. Pada gelombang longitudinal, gerak partikel media akustik akan searah dengan perambatannya. Sedangkan pada gelombang transversal, pergerakan partikel tegak lurus dengan arah rambatnya. Gelombang ultrasonik merupakan gelombang mekanik longitudinal yang memiliki frekuensi melampaui batas dengar telinga manusia atau di atas 20 kHz [10]. Gelombang suara yang dihasilkan melalui pantulan energi, misal suatu pulsa berukuran kecil menjalar melalui beberapa medium. Sinyal *echo* adalah pantulan dari pulsa datang yang timbul karena perbedaan sifat elastisitas medium. Informasi jarak tempuh rambatan gelombang yang dibangkitkan oleh transduser sampai ke penerima dijelaskan oleh persamaan sebagai berikut:

$$D = \frac{ct}{2} \quad (1)$$

Pada (1), D adalah jarak dalam satuan mm, c adalah kecepatan suara dalam satuan m/s, t adalah *time of flight* dalam satuan s.

B. Sinyal Echo Receiver

Sinyal *echo receiver* adalah sinyal pantulan atau gema yang terjadi pada permukaan medium dengan perbedaan impedansi berbagai jenis material [11]. Ketika gelombang datang tegak lurus terhadap permukaan, maka sebagian dari gelombang yang dipantulkan secara langsung kembali ke sumber dan sebagian ditransmisikan kontinu sesuai dengan arah asalnya. Amplitudo dari sinyal *echo* dilemahkan karena adanya absorpsi material dan energi



Gambar 1. Ilustrasi sinyal trigger transmitter dan sinyal echo receiver

yang direfleksikan. Hal ini menyebabkan gelombang echo yang dikirimkan kembali ke transceiver sangat kecil dibandingkan dengan pulsa awal yang dihasilkan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Ilustrasi dari sinyal trigger transmitter dan echo receiver ditunjukkan pada Gambar 1, seluruh sinyal trigger yang di transmisikan berada pada bagian A, sedangkan sinyal echo yang diterima berada pada bagian B mengandung beberapa informasi penting terkait dengan pengujian yang dilakukan. Sinyal echo bagian B menunjukkan dua buah sinyal yang dihasilkan oleh suatu objek akrilik yaitu permukaan dasar objek dan permukaan atas objek. Nilai amplitudo dari sinyal echo pada permukaan dasar objek akrilik lebih tinggi jika dibandingkan dengan amplitudo pada permukaan atas.

C. Impedansi Akustik

Pemindai ultrasonik bertumpu pada pantulan suara atau echo dari bidang batas pemantul. Jika dua medium berbeda disejajarkan, misalnya air dan pelumas, akan menghasilkan bidang batas akustik. Perbedaan bidang batas akustik akan menghasilkan variasi jumlah pantulan dari gelombang suara datang. Jumlah pantulan hamburan (scattering) ditentukan berdasarkan perbedaan impedansi akustik dari jaringan pada bidang batasnya. Impedansi akustik (Z) dapat didefinisikan sebagai perkalian antara densitas (ρ) dari gelombang suara tegak lurus dengan kecepatan perambatan suara c dalam medium seperti dinyatakan pada (2).

$$Z = \rho c \tag{2}$$

Tabel 1. Nilai impedansi akustik dari berbagai jenis material

Jenis	Material	Densitas ρ [kg/dm ³]	Kecepatan c [m/s]	Impedansi Z [kg/m ² s]
Cair	Air	1,00	1.480	1.480
Cair	Bensin	0,80	1.250	1.000
Cair	Gliserin	1,26	1.904	2.340
Padat	ABS	1,03	2.230	2.310
Padat	Polikarbonat	1,22	2.270	2.770
Padat	PVC	1,38	2.380	3.270
Padat	Emas	19,7	3.240	6.380
Padat	Magnesium	1,73	5.800	10.500
Padat	Perak	10,6	3.600	38.000

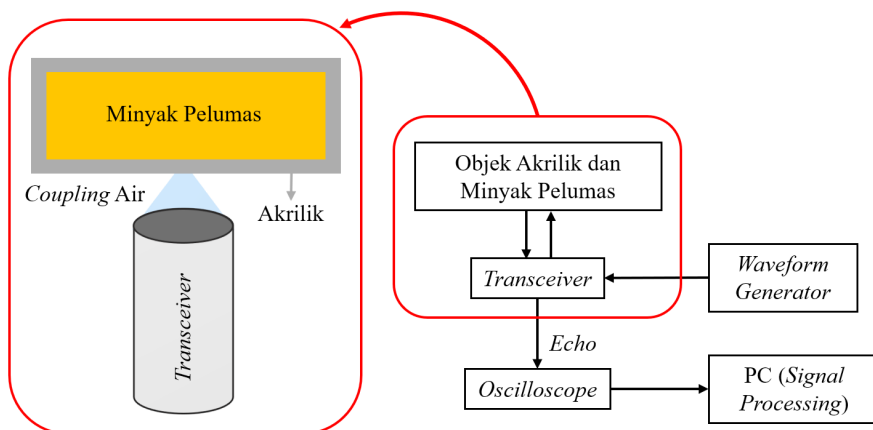
Perbedaan impedansi akustik pada bidang batas besar, seperti PVC dan bensin, sinyal suara yang datang hampir seluruhnya dipantulkan. Sedangkan jika perbedaan bidang batas kecil seperti ABS dan gliserin, sinyal suara datang hanya sebagian kecil yang dipantulkan. Tabel 1 merupakan nilai impedansi dari berbagai jenis material [12].

III. DESAIN DAN METODE PENGUJIAN

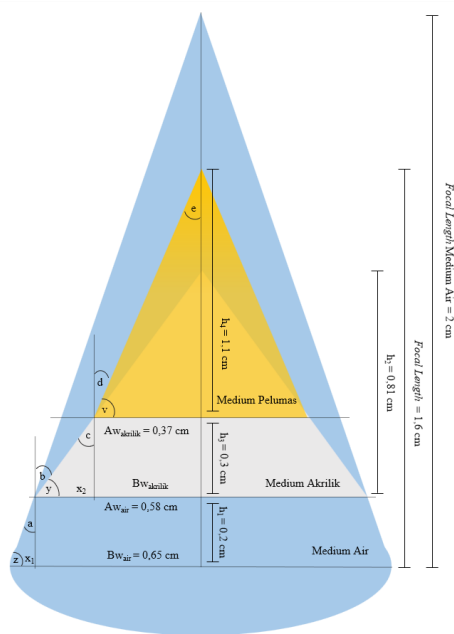
Bagian ini menjelaskan tentang desain yang dibuat dan metode yang digunakan untuk pengujian.

A. Diagram Blok Sistem

Secara umum rancangan sistem yang digunakan untuk mendapatkan nilai densitas pada minyak pelumas dengan menggunakan sensor ultrasonik dapat dilihat pada Gambar 2. Pengukuran dimulai dengan waveform generator memberi sinyal trigger kontinu kepada transduser, berupa pulsa dengan frekuensi 3 MHz dan tegangan 10 Vpp. Pada penelitian ini, transduser yang digunakan adalah jenis tunggal (transceiver) dan mempunyai beam terfokus kepada satu titik dengan panjang 20 mm. Pada penelitian ini, objek yang diuji dengan ultrasonik adalah minyak pelumas sepeda motor, dimana objek tersebut diletakkan di dalam substrat yang terbuat dari akrilik. Selanjutnya transduser mentransmisikan gelombang ultrasonik menuju



Gambar 2. Diagram blok sistem pengukuran densitas minyak pelumas



Gambar 3. Bentuk transmisi gelombang ultrasonik tiap medium

objek pengujian. Setelah mengenai objek, transducer yang sebelumnya berada pada mode *transmitter* berubah menjadi mode *receiver*, pada mode ini gelombang *echo* dari objek akan diterima oleh osiloskop. *Personal Computer* (PC) berfungsi sebagai pengatur osiloskop untuk melakukan *capture data echo* dan kontrol pemilihan area sinyal yang akan diambil, dimana komunikasi antara PC dan osiloskop dilakukan melalui komunikasi serial.

Letak transducer dari setiap jenisnya memiliki perbedaan. Transducer dengan fokus searah diletakkan menempel pada permukaan objek, dalam hal ini adalah permukaan akrilik. Umumnya penggunaan gel berfungsi meratakan permukaan antara transducer dengan objek. Pada penelitian ini, transducer yang digunakan adalah transducer dengan fokus terpusat yang memiliki permukaan berbentuk cekung. Medium berupa air akan digunakan untuk meratakan permukaan dengan objek. Panjang *focal length* pada transducer yang digunakan pada penelitian ini adalah 20 mm menggunakan medium berupa air. Namun, apabila suatu substrat yaitu akrilik diletakkan pada area fokus transducer, maka terbentuk beberapa lapisan yang dilewati oleh gelombang ultrasonik. Lapisan pertama merupakan medium kopling dari transducer dengan substrat yaitu air. Lapisan kedua adalah substrat dengan ketebalan 3 mm. Lapisan terakhir adalah objek atau spesimen yang akan diukur yaitu minyak pelumas.

Memanfaatkan sudut dari *focal length* yang diketahui, maka proses transmisi gelombang dari tiap-tiap medium juga akan diketahui. Hukum Snellius menyatakan bahwa cahaya datang dari medium yang kurang rapat menuju medium yang lebih rapat akan dibiaskan mendekati garis normal (udara ke air). Sebaliknya, jika cahaya datang dari medium yang lebih rapat menuju medium yang kurang rapat dibiaskan menjauhi garis normal (kaca ke air). Gambar 3 menunjukkan proses transmisi sinyal tiap medium berdasarkan hukum Snellius.

Tabel 2. Nilai amplitudo berdasarkan jarak dan frekuensi

Jarak Transducer	Frekuensi 3 MHz	Frekuensi 4 MHz	Frekuensi 5 MHz
13 mm	57,5 mV	50,9 mV	42,5 mV
14 mm	64,6 mV	59,5 mV	52,6 mV
15 mm	75,9 mV	73,2 mV	64,7 mV
16 mm	78,5 mV	76,9 mV	68,7 mV
17 mm	86,6 mV	81,5 mV	75,3 mV

Hukum Snellius digunakan untuk mengetahui pembiasan dan pemantulan sinyal dari tiap-tiap medium yang dilewati gelombang ultrasonik sesuai pada (3).

$$\frac{c_a}{\sin a} = \frac{c_b}{\sin b} \quad (3)$$

Dimana c_a adalah kecepatan suara medium air, c_b adalah kecepatan suara medium akrilik, a adalah sudut gelombang datang pada air, b adalah sudut gelombang bias pada akrilik. Besar sudut a adalah 19° diperoleh dengan menggunakan hukum sinus segitiga, dimana diketahui panjang pada sisi miringnya adalah *focal length* dari transducer yaitu 20 mm dan sisi bawahnya adalah jari-jari dari permukaan atas transducer yaitu 65 mm.

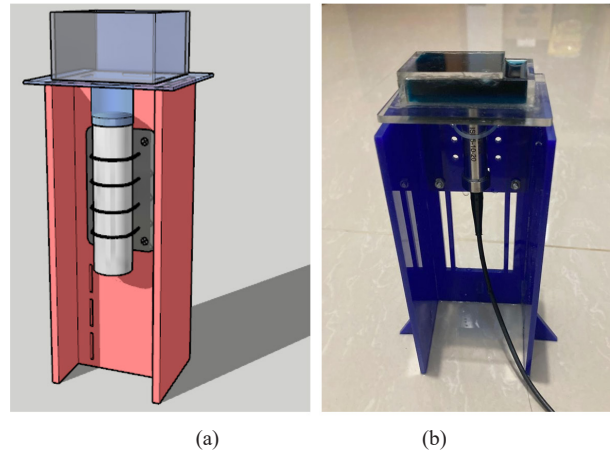
Transducer yang digunakan harus diletakkan tegak lurus terhadap objek pengujian, hal ini bertujuan agar amplitudo sinyal *echo* yang dihasilkan tidak melemah karena absorpsi dari setiap medium pengujian. Oleh karena itu, desain untuk membuat transducer tegak lurus, dan dapat menentukan jarak optimal terhadap objek dibutuhkan. Gambar 4 menunjukkan desain letak transducer terhadap objek secara tegak lurus, serta dapat diatur ketinggian dari transducer terhadap objek.

B. Pengujian Transducer

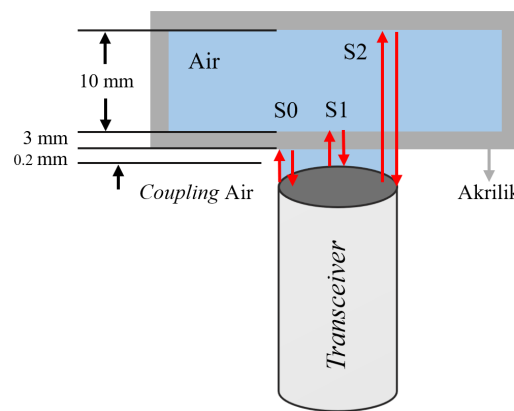
Pengujian transducer dilakukan untuk memastikan bahwa transducer yang akan digunakan dapat bekerja dengan baik. Pengujian dilakukan dengan melihat amplitudo sinyal *echo* berdasarkan jarak transducer terhadap objek akrilik, dengan medium berupa air mulai dari jarak 13 mm–17 mm, dengan frekuensi 3 MHz–5 MHz. Tabel 2 menunjukkan nilai dari amplitudo berdasarkan jarak dan frekuensi tertentu.

Dari hasil pengujian yang dilakukan dapat dilihat bahwa frekuensi optimal adalah 3 MHz, karena memiliki amplitudo yang lebih tinggi sehingga akan mempermudah melakukan analisa dari sinyal *echo* yang didapatkan. Pengujian kedua dilakukan dengan *scanning* objek berupa air yang diletakkan dalam substrat akrilik. Gambar 5 menunjukkan ilustrasi dari beberapa medium yang dilalui gelombang ultrasonik.

Pengujian kedua dilakukan dengan cara *scanning* objek berupa air yang diletakkan dalam substrat akrilik. Gambar 5 menunjukkan ilustrasi dari beberapa medium yang dilalui gelombang ultrasonik. Gelombang ultrasonik akan melewati medium pertama yaitu kopling air dan lapisan bawah akrilik sehingga muncul sinyal *echo* S0,



Gambar 4. Desain alat pengujian, (a) 3D desain, (b) Implementasi desain



Gambar 5. Ilustrasi medium yang dilalui sinyal ultrasonik

lalu merambat menuju medium kedua yaitu lapisan atas akrilik yang bersentuhan dengan objek air sehingga muncul sinyal S1, dan selanjutnya gelombang merambat pada air yang bersentuhan dengan bagian bawah akrilik sehingga muncul sinyal S2.

Dalam melakukan *scanning*, transduser akan ditempatkan tegak lurus terhadap objek dengan diberi kopleng berupa air dan diletakkan dengan jarak sesuai dengan *focal length*. Gambar 6 menunjukkan beberapa sinyal *echo* dengan besar amplitudo berbeda, menandakan terdapat beberapa medium yang memantulkan kembali gelombang ultrasonik transduser. *Time of Flight* (ToF) merupakan pedoman untuk menghitung jarak antar sinyal *echo*, hasilnya dibandingkan dengan jarak asli dari objek [16].

Persamaan (1) digunakan untuk dapat menentukan jarak sebenarnya dari objek pengujian, dengan kecepatan suara air yang sudah diketahui 1.480 m/s, maka perhitungan

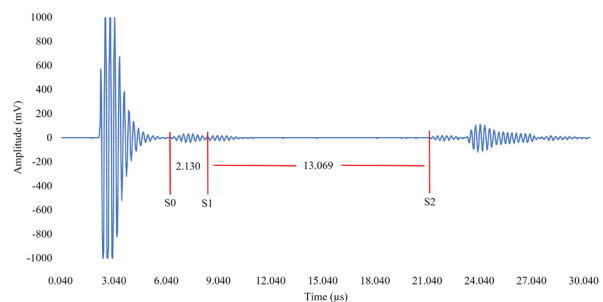
Tabel 3. Hasil pengukuran dengan objek berupa air

Time of Flight [μs]	Kecepatan c [m/s]	Jarak D [mm]	Jarak Asli [mm]	Error [%]
0,281	1.480	0,208	0,200	4,22
2,130	2.730	2,907	3,000	3,09
13,069	1.480	9,671	10,000	3,29

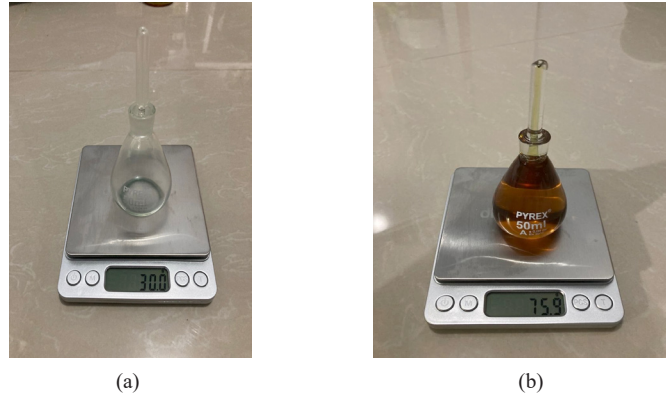
jarak asli transduser terhadap akrilik, ketebalan akrilik, dan ketinggian objek dapat diketahui seperti ditunjukkan pada Tabel 3.

C. Teknik Pengukuran Densitas

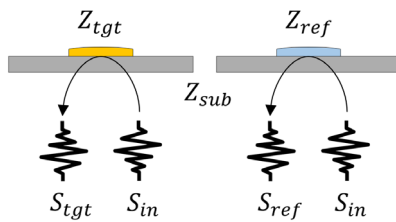
Penelitian ini menggunakan piknometer untuk mengukur nilai densitas sebagai hasil perbandingan dengan pengukuran menggunakan ultrasonik. Piknometer terbuat dari kaca yang terdapat penyumbat ketat berupa pipa, sehingga gelembung udara dapat lolos dari alat tersebut. Alat ini memungkinkan untuk mengukur densitas sebuah cairan secara akurat dengan mengacu pada fluida kerja yang sesuai, seperti air atau raksa, menggunakan



Gambar 6. Sinyal echo dari substrat akrilik dan objek air



Gambar 7. Pengukuran (a) Massa piknomet, (b) Densitas pelumas



Gambar 8. Teknik pengukuran impedansi akustik ultrasonik

neraca analitik. Metodologi yang mempelajari hasil yang diperoleh oleh alat ini disebut Piknometri.

Metode pengukuran densitas menggunakan piknometer dengan cara piknometer kosong ditimbang, kemudian diisi air sampai tanda batas untuk menentukan volume pada suhu tertentu, dan kemudian diisi dengan cara yang sama dengan cairan sampel. Semua penentuan massa jenis, baik pada air maupun cairan sampel dalam hal ini minyak pelumas harus dilakukan pada suhu yang sama.

Volume setiap cairan pada piknometer selalu sama, pada penelitian ini menggunakan piknometer dengan volume 50 ml dan massa 30 g. Sampel minyak pelumas ditimbang lalu hasilnya dikurangi dengan berat piknometer sehingga akan mendapatkan hasil densitasnya. Tabel 4 menunjukkan hasil pengukuran densitas pada 11 sampel minyak pelumas pada suhu 28°C, dengan variasi jarak dan

Tabel 4. Densitas sampel cairan uji pada suhu 28°C

Jenis Minyak Pelumas	Jarak Pemakaian [km]	Durasi Pemakaian [hari]	Densitas ρ [kg/dm ³]
MPX-1-A	0	0	0,930
MPX-1-B	2.182	127	0,926
MPX-1-C	1.890	92	0,920
MPX-2-A	0	0	0,918
MPX-2-B	2.334	169	0,922
MPX-2-C	3.614	255	0,926
SPX-2-A	0	0	0,918
SPX-2-B	2.832	184	0,912
SPX-2-C	1.918	59	0,910
Enduro 4T-A	0	0	0,906
Enduro 4T-B	1.796	144	0,912

durasi pemakaian.

Jenis minyak pelumas yang telah digunakan dalam jarak dan durasi tertentu dibandingkan dengan minyak pelumas dalam keadaan baru, sehingga akan diketahui kenaikan atau penurunan nilai densitas pada setiap jenis pelumas. Teknik pengukuran densitas menggunakan ultrasonik adalah dengan memanfaatkan impedansi akustik. Gambar 8 menunjukkan pengukuran impedansi akustik, menggunakan referensi air, dan memanfaatkan intensitas dari sinyal *echo*. Persamaan (4) dan persamaan (5) digunakan untuk memperoleh nilai dari impedansi akustik, dimana S_{ref} merupakan intensitas V_{rms} referensi, Z_{ref} merupakan impedansi akustik referensi, Z_{sub} merupakan nilai impedansi akustik akrilik, Z_{tgt} merupakan impedansi minyak pelumas, dan S_{in} merupakan gelombang suara yang ditransmisikan.

$$S_{ref} = \frac{z_{ref} - z_{sub}}{z_{ref} + z_{sub}} S_{in} \tag{4}$$

$$S_{tgt} = \frac{z_{tgt} - z_{sub}}{z_{tgt} + z_{sub}} S_{in} \tag{5}$$

Substitusi dari persamaan (4) dan (5) untuk mendapatkan impedansi akustik target ditunjukkan pada persamaan (6).

$$Z_{tgt} = \frac{1 - \frac{S_{tgt}}{S_{ref}} \frac{z_{sub} - z_{ref}}{z_{sub} + z_{ref}}}{1 + \frac{S_{tgt}}{S_{ref}} \frac{z_{sub} - z_{ref}}{z_{sub} + z_{ref}}} Z_{sub} \tag{6}$$

Nilai V_{rms} sinyal menggambarkan rata-rata penyebaran nilai amplitudo, dalam hal ini merepresentasikan tegangan yang dihitung pada tiap-tiap poin sampel yang menyusun sinyal tersebut. Perhitungan dilakukan dengan menghitung nilai akar dari rata-rata jumlah sampel. Persamaan (7) digunakan untuk menentukan nilai V_{rms} dari setiap sinyal *echo*, dimana n adalah jumlah seluruh sampel yang menyusun sinyal.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} |X_i|^2} \tag{7}$$

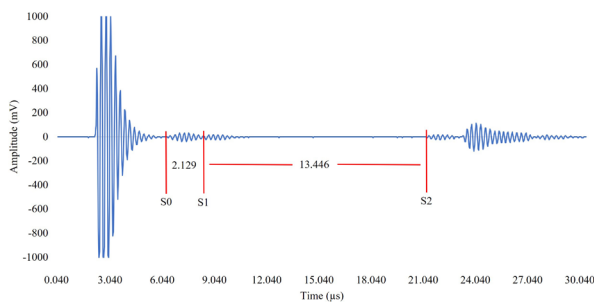
Tabel 5. Hasil pengukuran ketebalan akrilik dan ketinggian objek minyak pelumas

Jenis Minyak Pelumas	Time of Flight [μ s]	Ketebalan Akrilik Ref. [mm]	Ketebalan Akrilik D [mm]	Error [%]	Time of Flight [μ s]	Jarak Objek Ref. [mm]	Jarak Objek D [mm]	Error [%]
MPX-1-A	2.129	3,000	2,906	3,13	13.446	10,000	9,822	1,78
MPX-1-B	2.144	3,000	2,927	2,45	13.592	10,000	9,929	0,71
MPX-1-C	2.271	3,000	3,100	3,33	13.655	10,000	9,975	0,25
MPX-2-A	2.207	3,000	3,013	0,42	13.560	10,000	9,906	0,94
MPX-2-B	2.239	3,000	3,056	1,87	13.718	10,000	10,021	0,21
MPX-2-C	2.144	3,000	2,927	2,45	13.686	10,000	9,998	0,02
SPX-2-A	2.176	3,000	2,970	0,99	13.497	10,000	9,860	1,40
SPX-2-B	2.144	3,000	2,927	2,45	13.781	10,000	10,067	0,67
SPX-2-C	2.176	3,000	2,970	0,99	13.655	10,000	9,975	0,25
Enduro 4T-A	2.176	3,000	2,970	0,99	13.781	10,000	10,067	0,67
Enduro 4T-B	2.271	3,000	3,100	3,33	13.686	10,000	9,998	0,02

D. Faktor Koreksi Volume

Berdasarkan kerjasama *The American Society for testing Material (ASTM)* dan *The Institute of Petroleum (IP)* dari Inggris, diterbitkan buku *ASTM Petroleum Measurement Tables* yang digunakan sebagai standar untuk perhitungan kuantitas minyak yang berlaku diseluruh dunia. Terdapat dua tabel yaitu ASTM-53B yang menjelaskan faktor koreksi dari densitas yang diamati hingga densitas pada suhu 15°C, dan ASTM-54B menjelaskan faktor koreksi volume ke densitas pada suhu 15°C. Tabel ini memuat tiga sistem perhitungan kuantitas minyak yaitu: sistem metrik, british, dan amerika. Minyak pelumas adalah benda cair yang volumenya akan berubah jika suhunya berubah, maka ditetapkanlah standard suhu pada sistem amerika dan british adalah 60°F, sedangkan untuk sistem metrik adalah pada suhu 15°C. Besarnya faktor koreksi volume ke suhu standard dapat dicari menggunakan stadard ASTM – IP *Petroleum Measurement Tables*.

Berdasarkan peraturan yang telah berlaku di Indonesia Ordenansi Tera 1949 (Lembaran Negara RI No. 175 1949) dan Meterologi legal (Lembaran Negara RI No. 2 1981) telah ditetapkan bahwa Indonesia menggunakan sistem metrik. Hasil dari pengujian densitas pelumas dengan pengukuran menggunakan piknometer dan ultrasonik akan dikonversi sesuai dengan sistem metrik pada suhu 15°C.

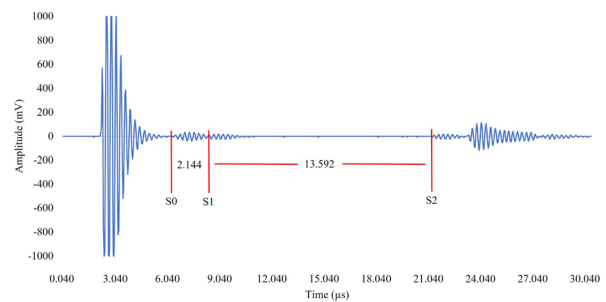


Gambar 9. Hasil pengukuran objek minyak pelumas MPX-1-A

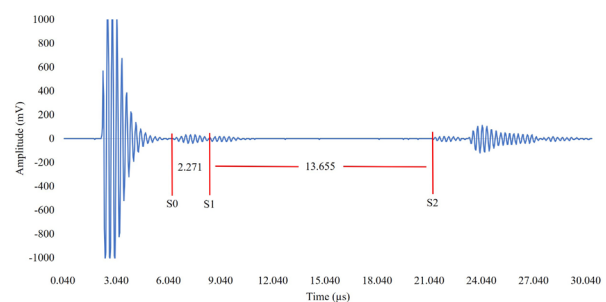
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Mekanisme pengujian telah dilakukan pada perancangan model pengukuran densitas minyak pelumas sepeda motor dengan metode impedansi akustik ultrasonik. Pengukuran dilakukan dengan membaca sinyal *echo* dari objek minyak pelumas yang telah ditempatkan pada jarak fokus, nilai yang digunakan adalah sinyal *echo* objek, sedangkan ToF digunakan untuk mengukur kecepatan suara suatu medium.

Hasil pengukuran dari tranduser ditampilkan ke dalam bentuk domain waktu, tiga sinyal *echo* awal digunakan untuk analisa nilai densitas objek. S_0 merupakan sinyal *echo* pertama dari permukaan bawah akrilik, S_1 merupakan *echo*



Gambar 10. Hasil pengukuran objek minyak pelumas MPX-1-B

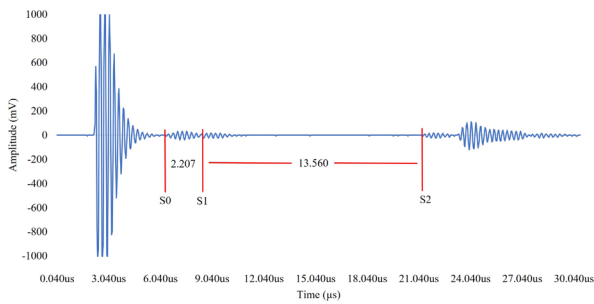


Gambar 11. Hasil pengukuran objek minyak pelumas MPX-1-C

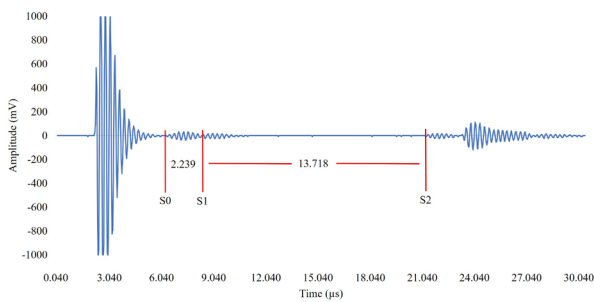
Tabel 6. Hasil pengukuran densitas minyak pelumas pada suhu 15°C

Jenis Minyak Pelumas	V _{rms} [mV]	Kecepatan Ref. c [m/s]	Kecepatan c [m/s]	Impedansi Ref. Z [kg/m ² s]	Impedansi Z [kg/m ² s]	Error [%]	Densitas Ref. ρ [kg/dm ³]	Densitas ρ [kg/dm ³]	Error [%]
MPX-1-A	19,77326	1.461	1.487	1.358,73	1.398,06	2,89	0,921	0,952	3,24
MPX-1-B	20,32346	1.461	1.471	1.352,89	1.361,00	0,60	0,917	0,927	1,02
MPX-1-C	21,10769	1.461	1.465	1.344,12	1.302,02	3,13	0,911	0,893	2,07
MPX-2-A	19,60718	1.461	1.475	1.341,20	1.406,10	4,84	0,909	0,960	5,40
MPX-2-B	19,88445	1.461	1.458	1.347,04	1.402,76	4,14	0,913	0,947	3,59
MPX-2-C	20,44958	1.461	1.461	1.352,89	1.324,54	2,10	0,917	0,922	0,41
SPX-2-A	19,99972	1.461	1.482	1.341,20	1.381,40	3,00	0,909	0,942	3,47
SPX-2-B	20,38616	1.461	1.451	1.332,43	1.374,08	3,13	0,903	0,925	2,26
SPX-2-C	20,71306	1.461	1.465	1.329,51	1.315,08	1,09	0,901	0,910	0,90
Enduro 4T-A	19,68865	1.461	1.451	1.323,67	1.343,06	1,47	0,897	0,956	6,39
Enduro 4T-B	19,98855	1.461	1.461	1.332,43	1.288,65	3,29	0,903	0,942	4,21

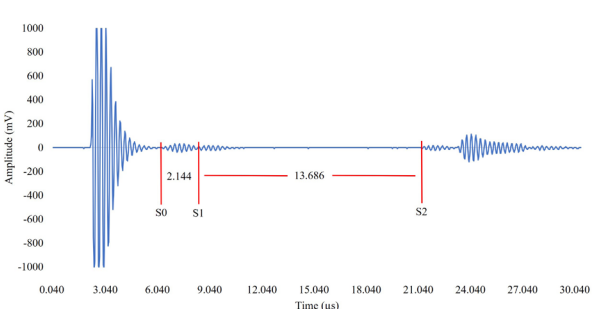
kedua dari permukaan atas akrilik dan permukaan bawah objek, S₂ merupakan *echo* ketiga dari permukaan atas objek dan permukaan bawah akrilik. Tabel 5 menunjukkan hasil pengukuran ketebalan akrilik dan ketinggian objek.



Gambar 12. Hasil pengukuran objek minyak pelumas MPX-2-A



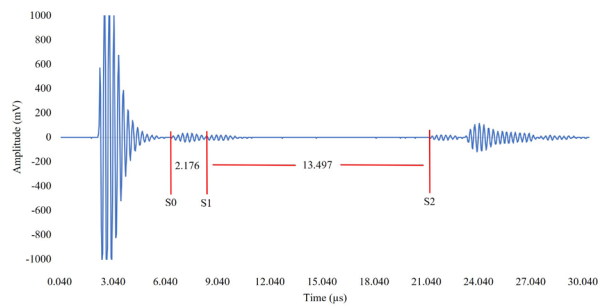
Gambar 13. Hasil pengukuran objek minyak pelumas MPX-2-B



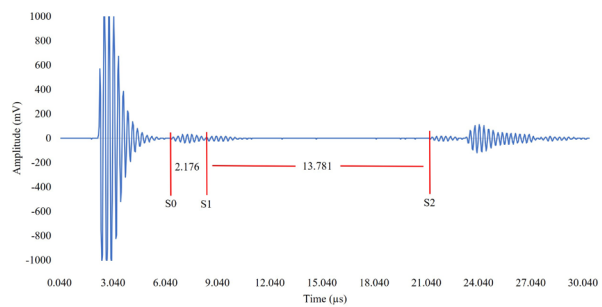
Gambar 14. Hasil pengukuran objek minyak pelumas MPX-2-C

Kesalahan tertinggi pada pengukuran ketebalan akrilik adalah 3,33% atau 0,1 mm dari hasil pengukuran langsung, sedangkan kesalahan terendah adalah 0,42% atau 0,013 mm. Dalam pengukuran jarak objek minyak pelumas, persentase kesalahan tertinggi adalah 1,78% atau 0,288 mm, sedangkan kesalahan terendah adalah 0,02% atau 0,002 mm. Faktor kesalahan tersebut dikarenakan kecepatan suara pada setiap cairan minyak pelumas berbeda-beda.

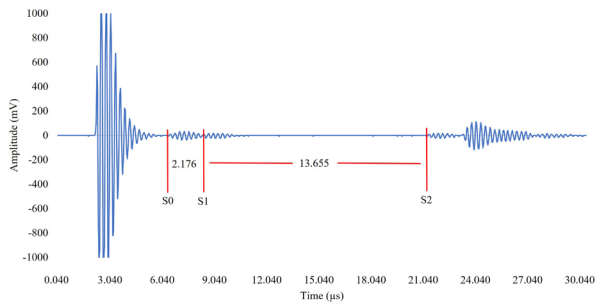
Hasil pengukuran densitas 11 minyak pelumas pada suhu 15°C ditunjukkan pada Tabel 6, dimana densitas didapatkan dengan menggunakan (6) untuk merubah nilai V_{rms} sampel kedalam impedansi akustik. Z_{sub} adalah 3.221,4 kg/m²s, dengan referensi kecepatan suara akrilik 2.730 m/s, kecepatan suara minyak pelumas 1.461 m/s.



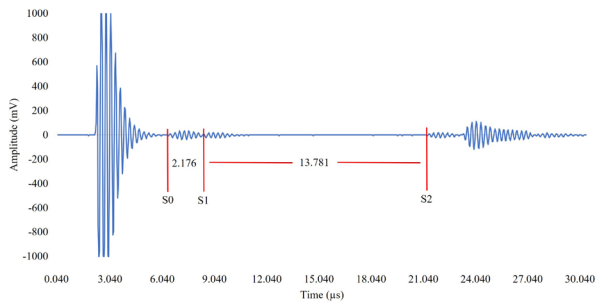
Gambar 15. Hasil pengukuran objek minyak pelumas SPX-1-A



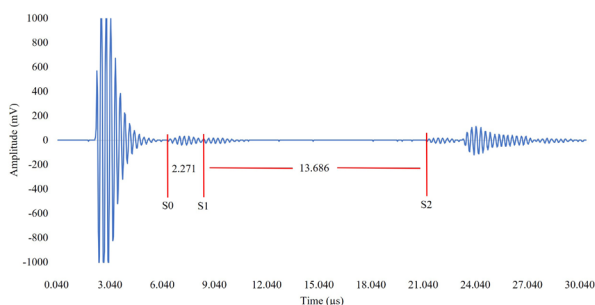
Gambar 16. Hasil pengukuran objek minyak pelumas SPX-1-B



Gambar 17. Hasil pengukuran objek minyak pelumas SPX-1-C



Gambar 18. Hasil pengukuran objek minyak pelumas Enduro 4T-A



Gambar 19. Hasil pengukuran objek minyak pelumas Enduro 4T-B

Kecepatan suara pada setiap sampel pelumas memiliki persentase kesalahan tertinggi 1,81%, sedangkan persentase kesalahan terendah adalah 0,02%.

Nilai V_{rms} dan *time of flight* dari setiap minyak pelumas didapatkan dari hasil rata-rata perulangan pengujian yang dilakukan sebanyak 20x. Nilai impedansi akustik referensi didapatkan dengan menggunakan persamaan (2), dimana nilai kecepatan suara objek telah diketahui, serta setiap sampel pelumas diukur nilai densitasnya dengan piknometer. Perubahan nilai impedansi akustik dihasilkan oleh perbedaan kecepatan suara, dimana setiap jenis-jenis pelumas memiliki karakteristik yang berbeda. Pada penelitian ini, referensi dari kecepatan suara pelumas yang digunakan adalah 1.461 m/s. Hal ini dikarenakan keterbatasan informasi dari kecepatan suara setiap sampel minyak pelumas. Persentase kesalahan tertinggi dari impedansi akustik adalah sebesar 4,84% atau 64,90 kg/m²s, sedangkan persentase kesalahan paling rendah adalah 0,60% atau 8,12 kg/m²s.

Pengukuran nilai densitas cairan paling mudah dilakukan dengan pengambilan sampel dan menimbang volume yang diketahui, sedangkan metode impedansi

akustik ultrasonik digunakan untuk mengukur densitas cairan berdasarkan *echo* yang diterima. Nilai densitas yang dihasilkan pada penelitian ini menghasilkan akurasi 93,6% atau 0,058 kg/dm³ jika dibandingkan nilai yang diukur menggunakan piknometer. Pengukuran sampel pelumas baru MPX-2-C menunjukkan kesalahan terendah yaitu 0,41% atau 0,004 kg/dm³.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian jarak antara sensor dengan objek, didapatkan hasil bahwa frekuensi optimal yang digunakan untuk mengukur densitas minyak pelumas adalah 3 MHz. Pengukuran objek berupa air digunakan sebagai referensi dan menghasilkan persentase kesalahan tertinggi pada jarak antara sensor terhadap substrat yaitu 4,22% atau 0,008 mm. Densitas minyak pelumas dipengaruhi oleh jarak pemakaian dan durasi pemakaian, pada Tabel 4 nilai densitas MPX-2 dan Enduro 4T naik secara linier. Sedangkan pada MPX-1 dan SPX-2 semakin jauh jarak pemakaian dan semakin lama durasinya akan mengakibatkan penurunan nilai densitas, hal ini terjadi karena perbedaan karakteristik setiap pelumas.

Tabel ASTM-53B digunakan untuk mengkonversi nilai densitas yang diukur pada suhu 28°C ke dalam suhu 15°C. Melalui seleksi sinyal mulai dan sinyal akhir dari *echo* akan dapat memperkecil persentase *error* dari impedansi akustik. Penggunaan metode impedansi akustik ultrasonik terbukti mampu mengukur nilai densitas minyak pelumas dengan ketelitian hingga 0,004 kg/dm³.

REFERENSI

- [1] C. Douglas Giancoli, "Physics Principles with Applications," 1st ed., vol. 6. London: Prentice-Hall, 2005.
- [2] R. A. Serway and J. W. Jewett, "Physics for Scientists and Engineers," 6th ed., vol. 2. California: Brooks Cole, 2004.
- [3] R. T. Higuti, F. R. Montero, and J. C. Adamowski, "Energy Method to Calculate the Density of Liquids Using Ultrasonic Reflection Techniques," IEEE Ultrasonics Symposium, pp. 309-322, 2001.
- [4] C. K. Sari, Balai Teknologi Bahan Bakar dan Rekayasa Disain BPPT. (View Nov. 2021). Densitas atau Massa Jenis [Online]. Available: <https://btbrd.bppt.go.id/publication/bahan-bacaan/354-densitas>
- [5] R. Siskayanti and M. E. Kosim, "Analisis Pengaruh Bahan Dasar terhadap Indeks Viskositas Pelumas Berbagai Kekentalan," Jurnal Rekayasa Proses, vol. 11, no. 2, pp.94-100, 2017.
- [6] W. Haiqun, C. Yi, Z. Yugui, and C. Zhikun, "The Design of the Ultrasonic Liquid Density Measuring Instrument," 3rd International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), vol. 3, 2011.
- [7] A. I. Gunawan, "A Study on Acoustic Impedance Microscopy for Biological and Medical Applications," Ph.D. Dissertation, Toyohashi University of Technology, 2015
- [8] M. E. Hidayat, A. I. Gunawan, and T. B. Santoso, "Rancang Bangun Sistem Multipoint Transmitter-Receiver untuk Inspeksi Bawah Air Berbasis Ultrasonik Frekuensi Rendah," Jurnal Rekayasa Elektrika, vol. 16, no. 3, hal. 143-152, 2020.

- [9] C. E. Prianto, A. I. Gunawan, and N. Tamami, "Prototipe Deteksi PEN dalam Tubuh Menggunakan B-Mode Ultrasonic Scanning," *Jurnal Rekayasa Elektrika*, vol. 15, no. 2, hal. 85-94, 2019.
- [10] J. M. Hale, "Ultrasonic Density Measurement For Process Control," *Ultrasonics*, vol. 26, pp.356-357, 1988.
- [11] L. Lusiana, A. I. Gunawan, and B. S. B. Dewantara, "Pengukuran Speed dan Impedansi Akustik pada Tanah Liat dengan Memanfaatkan Sinyal Echo Ultrasonik," *Jurnal Rekayasa Elektrika*, vol. 15, no. 2, hal. 145-156, 2019.
- [12] RS Hydro Instrumentation Company. (View Nov. 2021). Sound Speeds or Sound Velocity in Water, Liquid, and Material [Online]. Available: <https://www.rshydro.co.uk/sound-speeds/>.