

Perancangan, Pembuatan dan Karakterisasi Transduser Ultrasonik 3,5 MHz untuk Pengujian Bahan Padat

Mokhamad Halim Fathoni, Harris Pirngadi, dan Muhammad Rivai

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: harris@ee.its.ac.id, muhammad_rivai@ee.its.ac.id

Abstrak—Dalam penelitian ini telah dibuat sepasang transduser ultrasonik untuk pengujian bahan padat. Konstruksi transduser ultrasonik yang dibuat terdiri dari *holder* berbahan akrilik dan kuningan, *backing material* berbahan styrofoam, epoxy dan busa karet, elemen aktif berbahan piezoelektrik dan *matching layers* menggunakan akrilik. Bahan penyusun konstruksi tersebut dilakukan pengujian terlebih dahulu untuk mengetahui pengaruhnya terhadap karakteristik transduser ultrasonik. Dan untuk menunjang pengujian, maka dibuat sebuah alat sederhana dengan metode transmisi pulsa untuk melakukan pengukuran *Time of Flight*(TOF) gelombang ultrasonik. Karakterisasi bahan transduser dilakukan dengan melakukan beberapa tahap pengujian. Tahap pertama dilakukan pengujian respon frekuensi pada piezoelektrik untuk mendapatkan frekuensi resonansi yang sesuai. Kemudian dilakukan pengujian bahan *backing material* untuk mengetahui respon *impulse* dari sinyal ultrasonik dan menguji bahan *matching layers* untuk mendapatkan faktor *delay* pada pengukuran. Setelah karakterisasi bahan didapatkan, maka dilanjutkan dengan implementasi transduser ultrasonik untuk pengujian cacat pada bahan. Pengujian ini menggunakan aluminium berdimensi (15x5x1)cm dengan bentuk cacat yang telah ditentukan. Proses pengujian cacat ini dilakukan dengan cara *scanning* secara manual dengan perubahan jarak setiap 0.5 cm. Dari hasil pengujian yang telah dilakukan diperoleh karakteristik transduser ultrasonik dengan *holder* berbahan akrilik, *backing material* berbahan styrofoam, frekuensi resonansi sebesar 3.5 MHz, *bandwith* sebesar 2.04 MHz, respon *impulse* >10 siklus, *delay* sebesar 1,6 us, *Q* (faktor kualitas mekanis getaran harmonis) sebesar 1,667 dan impedansi sebesar 78,6 ohm. Untuk pengujian cacat bahan didapatkan hasil bahwa transduser ultrasonik bisa mendeteksi adanya cacat dan mengestimasi panjang ukuran cacat dengan *error* pengukuran sebesar 0.5 cm. Namun, kedalaman cacat tidak bisa ditentukan sehingga dibutuhkan pengukuran sistem *echo* untuk memperbaiki pengukuran tersebut.

Kata Kunci—Transduser ultrasonik, Piezoelektrik, Pengujian bahan padat.

I. PENDAHULUAN

PENGUJIAN bahan padat merupakan sebuah kegiatan yang bertujuan untuk mendapatkan informasi tentang karakteristik dan kualitas dari suatu bahan, seperti menguji ada tidaknya cacat di dalam bahan padat. Untuk melakukan pengujian bahan tersebut dapat dilakukan dengan memanfaatkan gelombang ultrasonik. Karena, jika ditinjau dari karakteristiknya, gelombang ultrasonik mampu menembus

suatu medium baik padat, cair maupun gas dan memiliki kecepatan yang cukup rendah sehingga lebih mudah dalam melakukan pengukuran [1].

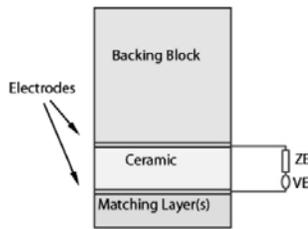
Dalam suatu penelitian menyebutkan bahwa dengan mengukur kecepatan gelombang ultrasonik dalam bahan padat, maka dapat diperoleh beberapa parameter seperti moduli elastisitas, besaran seperti temperatur, tekanan, prositas bahan dan kualitas beton [2]. Namun, pengukuran dan pengujian bahan padat tersebut membutuhkan transduser ultrasonik berintensitas rendah (berfrekuensi tinggi) diatas 1MHz[2]. Sedangkan di Indonesia, ketersediaan transduser ultrasonik tersebut masih tergolong sedikit. Untuk transduser ultrasonik yang mudah ditemukan di pasaran hanya memiliki frekuensi kerja 40 KHz, padahal tidak semua jenis bahan padat dapat diuji dengan frekuensi tersebut. Karena pada dasarnya gelombang ultrasonik dengan frekuensi 40 KHz lebih sering digunakan untuk proses komunikasi, proses pencucian dan robotika [3]. Oleh karena itu, maka dalam tugas akhir ini akan dilakukan sebuah penelitian tentang perancangan, pembuatan dan karakterisasi transduser ultrasonik untuk pengujian bahan padat.

II. URAIAN PENELITIAN

Transduser ultrasonik adalah sebuah device yang mampu mengubah energi mekanik menjadi energi listrik dan juga sebaliknya yaitu mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Jenis transduser ultrasonik untuk uji tak merusak terdiri dari empat macam yaitu kontak langsung, kontak tunda, pemancar – penerima dan bersudut [2]. Dasar konstruksi transduser ultrasonik ini memiliki tiga komponen utama yaitu *backing material*, *active element* dan *matching layers* [4]. Susunan geometry dari transduser ultrasonik ditunjukkan pada Gambar 1.

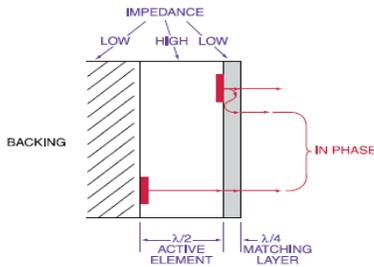
A. Backing Material

Backing material adalah bahan yang diletakkan di bagian belakang elemen aktif pada transduser ultrasonik. Bahan penyusun dari *backing material* ini memiliki karakteristik attenuasi tinggi dan kerapatan bahan tinggi, fungsinya untuk mengontrol vibrasi dari transduser ultrasonik dengan menyerap energi radiasi dari bagian belakang elemen aktif [5]. Ketika impedansi akustik *backing material* sama dengan elemen aktif

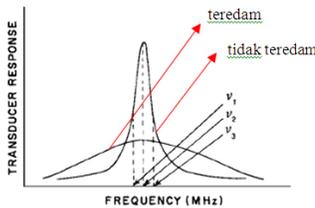


Gambar 1. Geometry transducer ultrasonik [4]

Matching layers



Gambar 2. Susunan matching layers[5]



Gambar 3. Frekuensi respon transducer ultrasonik [6].

maka transducer memiliki karakteristik sangat teredam, resolusi yang bagus tetapi amplitudo kecil. Apabila impedansi akustik *backing material* tidak mendekati elemen aktif maka akan memiliki karakteristik resolusi yang rendah, durasi respon *impulse* lama dengan amplitudo lebih tinggi [5].

B. Active Element

Gelombang ultrasonik dapat dibangkitkan menggunakan elemen aktif piezoelektrik. Piezoelektrik dapat mengubah energi listrik menjadi energi mekanis (efek piezoelektrik terbalik), dan bisa mengubah energi mekanis menjadi energi listrik (efek piezoelektrik) [1]. Piezoelektrik ini memiliki respon yang sangat baik ketika bekerja pada frekuensi resonansinya. Frekuensi resonansi dari piezoelektrik ini ditentukan oleh ketebalan dari piezoelektrik tersebut. kebanyakan piezoelektrik yang digunakan memiliki setengah panjang gelombang ($1/2\lambda$) [5]. Frekuensi resonansi ini dapat dihitung menggunakan rumus berikut ini.

$$f = \frac{c}{2t}$$

dimana c adalah kecepatan rambat dari Quartz (5740m/s), f adalah frekuensi resonansi dan t adalah ketebalan piezoelektriknya. Dimisalkan $t=2$ mm maka f adalah sebagai berikut

$$f = \frac{5740 \text{ m/s}}{2 \times 0.002 \text{ m}} = 1.435 \text{ MHz.}$$

C. Matching Layers

Matching layers berfungsi sebagai kopling antara transducer dan bahan uji(matching impedance) [5]. Penggunaan matching layers ini dimaksudkan untuk mengoptimalkan pengiriman dan penerimaan sinyal[5]. Untuk jenis transducer kontak langsung, lapisan yang cocok terbuat dari bahan yang memiliki karakteristik impedansi akustik antara elemen aktif piezoelectric dan baja [5]. Susunan dari matching ditunjukkan pada Gambar 2.

Dalam pembuatan transducer ultrasonik perlu dilakukan karakterisasi untuk mengetahui performa dari transducer ultrasonik yang telah dibuat. karakteristik dari transducer ultrasonik ini terdiri dari frekuensi respon dan Q (faktor kualitas mekanis dari suatu getaran harmonis).

D. Respon Frekuensi Transducer Ultrasonik

Respon frekuensi digunakan untuk mengetahui frekuensi resonansi dan bandwith dari transducer ultrasonik akibat pengaruh bahan. Bandwith dari transducer ultrasonik akan menggambarkan karakteristik redaman dari transducer. Pengaruh bahan backing material terhadap bandwith transducer ultrasonik ditunjukkan pada Gambar 3. Bandwith dinyatakan dengan rumus berikut ini.

$$\text{Bandwith} = v_3 - v_1$$

Nilai v_3 dan v_1 ditentukan ketika 70 % dari frekuensi resonansinya [7]. v_2 merupakan frekuensi resonansi.

E. Faktor Kualitas Mekanis (Q)

Q (faktor kualitas mekanis) merupakan salah satu parameter yang menggambarkan kemampuan dan kualitas dari sebuah transducer ultrasonik untuk memancarkan gelombang ultrasonik. Semakin tinggi Q maka semakin bagus transducer ultrasonik tersebut. Hubungan antara Q, bandwith, frekuensi dan redaman dijelaskan sebagai berikut [8].

$\uparrow \text{redaman} \propto \uparrow \text{bandwith} \propto \uparrow Q \text{faktor} \propto \uparrow \text{frekuensi}$
$\downarrow \text{redaman} \propto \downarrow \text{bandwith} \propto \downarrow Q \text{faktor} \propto \downarrow \text{frekuensi}$

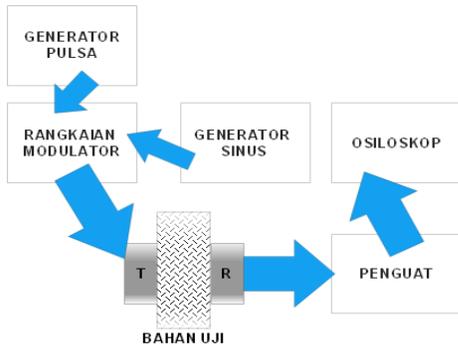
Untuk mendapatkan nilai Q maka digunakan rumus berikut ini

$$Q = \frac{\text{frekuensi resonansi}}{\text{frekuensi bandwith}}$$

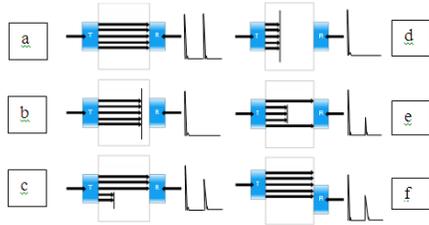
Metode pengukuran gelombang ultrasonik digunakan untuk mendapatkan parameter yang dapat membantu dalam menginterpretasikan karakteristik dari bahan padat yang diuji. Berikut ini adalah salah satu metode pengukuran gelombang ultrasonik.

F. Pengukuran Gelombang Ultrasonik Metode Transmisi

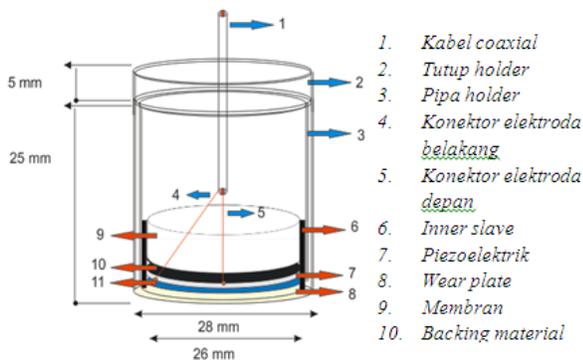
Metoda ini menggunakan sepasang transducer ultrasonik yang terdiri *transmitter* dan transducer *receiver*. Transmitter akan memancarkan gelombang ultrasonik secara longitudinal kedalam bahan uji kemudian akan diterima oleh bagian receiver [9]. Kecepatan gelombang ultrasonik tersebut dapat dihitung dengan persamaan berikut



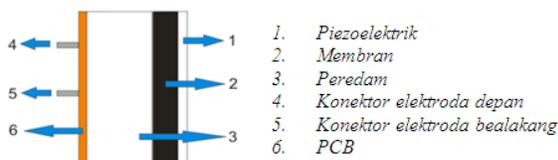
Gambar 4. Diagram blok pengukuran metode transmission [7]



Gambar 5. Pengukuran cacat bahan padat dengan metode transmission [10]



Gambar 6. Konstruksi transduser ultrasonic



Gambar 7. Susunan backing material

Dimana L adalah tebal bahan dan T adalah selang waktu yang dibutuhkan gelombang ultrasonik dari pemancar untuk sampai ke penerima (*Time Of Flight*). Diagram blok ditunjukkan pada Gambar 4. Pada Gambar 5 ada beberapa contoh pengukuran suatu cacat menggunakan metode transmisi. Dari keenam contoh tersebut identifikasi cacat dilakukan dengan menganalisa sinyal amplitudo yang ditangkap oleh transduser receiver. Dari Gambar 5 maka dapat disimpulkan bahwa semakin transduser tertutup oleh cacat maka amplitudo yang dihasilkan semakin kecil.

Tabel 1. Spesifikasi piezoelektrik

Spesifikasi	Data	(Tampak atas)
Tempat pembuatan	Guangdong China	
Brand	Cosson	
Dimensi	25 mm	
Tebal	0.73 mm	
Frekuensi	3 MHz	

Konstruksi transduser ultrasonik yang dibuat ditunjukkan pada Gambar 6. Setiap bagian penyusun dari konstruksi transduser ultrasonik dijelaskan sebagai berikut

1) Kabel coaxial dan konektor elektroda

Kabel coaxial digunakan untuk menghubungkan elektroda bagian belakang dan elektroda bagian depan pada piezoelektrik. Sebelum dihubungkan dengan kabel coaxial, pada bagian elektroda dihubungkan dengan sehelai kawat serabut. Penggunaan kawat ini agar bahan backing material tidak terinterferensi dengan bahan kabel. Konektor elektroda belakang dihubungkan dengan bagian konduktor. Sedangkan konektor elektroda depan dihubungkan dengan bagian shield kabel coaxial.

2) Tutup holder dan pipa holder

Holder dan tutup holder menggunakan dua buah jenis bahan yang berbeda, yaitu akrilik dan kuningan. Kedua jenis bahan ini akan dibandingkan untuk mengetahui efek dari kedua bahan tersebut terhadap karakteristik transduser. Holder dari transduser ultrasonik ini dibentuk menjadi pipa dari bahan silinder pejal. Ukuran resonansi dari pipa holder yang dibuat tidak begitu diperhitungkan. Karena untuk jenis transduser kontak langsung ukuran yang perlu diperhatikan adalah pada bagian *matching layer*. Sehingga untuk perancangan transduser ini ukuran pipa holder yang dibuat menyesuaikan variasi tebal dari bahan *backing material* yang digunakan.

3) Backing Material

Pada perancangan ini *backing material* yang akan digunakan berupa busa karet, epoxy dan *styrofoam*. Rancangan backing material ditunjukkan pada Gambar 7. Tebal bahan dari *backing material* yang digunakan divariasikan sesuai dengan ukuran dari holder yang dibuat.

4) Piezoelektrik

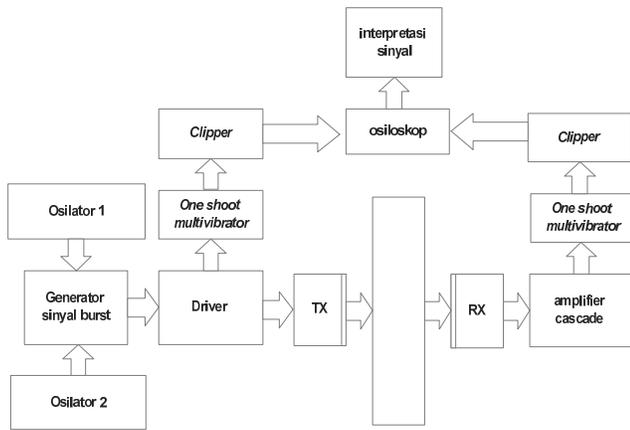
Dalam perancangan ini digunakan piezoelektrik berfrekuensi tinggi untuk menghasilkan resolusi yang bagus dalam pengukuran. Spesifikasi piezoelektrik yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 1.

5) Ultrasound Gel

Komponen ini berfungsi menjadi coupling antara transduser ultrasonik dengan media bahan yang akan diukur. Selain itu gel ini juga digunakan sebagai lapisan penghubung antara elemen piezoelektrik dengan bagian wear plate agar radiasi gelombangnya bagus.

6) Inner Slave

Inner slave merupakan komponen yang berfungsi untuk mengisolasi antara bagian komponen aktif piezoelektrik dan *backing material* dengan holder. Penggunaan *inner slave* ini bertujuan untuk meredam atau mengurangi vibrasi dari



Gambar 8. Diagram blok sistem elektronika transduser ultrasonik



Gambar 9. Transduser ultrasonik dengan holder akrilik

piezoelektrik pada bagian samping. Dalam perancangan ini bahan *inner slave* yang digunakan berupa busa yang mempunyai karakteristik impedansi yang rendah. Ukuran dari *inner slave* ini menyesuaikan dengan ukuran holder D(dalam)= 25 mm, D(luar)=27mm, tinggi= 1.5 cm.

7) *Wear Plate*

Wear plate merupakan komponen yang digunakan sebagai *matching layer* antara bahan uji dan transduser ultrasonik. Selain itu *Wear plate* ini juga berfungsi untuk melindungi bagian elemen aktif dari goresan akibat pengujian pada bahan. Ukuran *wear plate* yang dihitung dengan cara sebagai berikut. (c akrilik= 2750m/s, f=3,5 MHz, tebal piezoelektrik =0.78mm).

$$\begin{aligned} \text{Matching layer} &= 1/4 \lambda \\ \lambda &= 2750/3500000 \\ &= 0.78 \text{ mm} \\ \text{Matching layer} &= 1/4 \times 0.78 \\ &= 0.2 \text{ mm} \end{aligned}$$

G. *Perancangan Sistem Elektronika Transduser Ultrasonik*

Untuk menunjang pengujian transduser ultrasonik yang telah dibuat. maka dibuat sebuah alat sederhana dengan metode transmisi pulsa untuk melakukan pengukuran Time of Flight(TOF) gelombang ultrasonik. Diagram blok sistem ditunjukkan pada Gambar 8. Sistem kerja transduser ultrasonik ini dimulai dengan membangkitkan gelombang sinus sesaat melalui rangkaian generator sinyal burst yang dihasilkan dari modulasi antara sinyal sinus 3.5 MHz dari

Tabel 2. Hasil pengujian bahan peredam dan holder transduser ultrasonik.

Bahan Holder	Bahan peredam	Amplitudo	Siklus
akrilik	udara	0.2	15
kuningan	udara	0.18	15
akrilik	styrofoam	0.2	13
kuningan	styrofoam	0.14	10
akrilik	karet	0.26	16
kuningan	karet	0.17	12
akrilik	epoxy	0.18	11
kuningan	epoxy	0.17	11
akrilik	styrofoam+udara	0.36	16
kuningan	styrofoam+udara	0.2	11
akrilik	karet+udara	0.32	16
kuningan	karet+udara	0.32	18
akrilik	epoxy+udara	0.15	13
kuningan	epoxy+udara	0.2	16

osilator 1 dengan sinyal kotak 25 KHz dari osilator 2. *Output* dari generator \sinyal burst ini akan masuk pada bagian driver terlebih dahulu untuk meningkatkan daya pancarnya. Ketika transduser *transmitter* (TX) mendapatkan sinyal burst maka TX akan bergetar sesaat dan memancarkan gelombang secara longitudinal untuk menembus bahan padat. Sinyal yang merambat melalui bahan padat akan diterima oleh transduser *receiver* (RX) berupa sinyal sinus sesaat kemudian *output* sinyalnya diperkuat oleh bagian amplifier. *Output* dari driver dan amplifier dimasukkan ke dalam rangkaian *one shoot multivibrator* dan *clipper* agar dikonversi menjadi sinyal pulsa untuk mendapatkan sinyal *start* dan *stop*. Sehingga pembacaan waktu tempuh (Δt) dari transduser *transmitter* (TX) sampai diterima transduser receiver(RX) dapat diinterpretasikan lebih mudah. Hasil pengukuran yang didapatkan akan di interpretasikan secara visual dengan mengamati perubahan sinyal yang terjadi menjadi informasi yang dapat menggambarkan kondisi dari bahan padat yang sedang diuji seperti munculnya cacat.

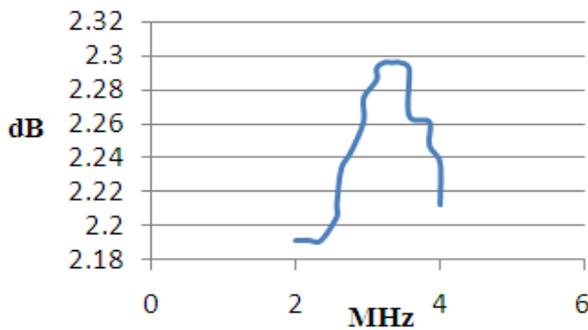
III. HASIL DAN DISKUSI

Pada bagian ini akan dijelaskan tentang hasil karakterisasi transduser ultrasonik yang telah didapatkan berdasarkan pengujian- pengujian yang telah dilakukan. Untuk bentuk fisik transduser yang telah dibuat ditunjukkan pada Gambar 9.

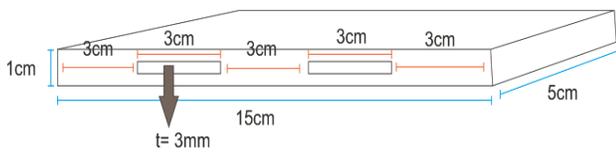
A. *Karakterisasi Transduser Ultrasonik*

Transduser ultrasonik yang ditunjukkan pada Gambar 9 merupakan transduser ultrasonik yang diimplementasikan pada pengujian bahan padat dalam tugas akhir ini. Transduser ultrasonik tersebut menggunakan bahan holder akrilik dan backing material styrofoam. Pemilihan transduser ini dilakukan berdasarkan pengujian bahan holder dan bahan *backing material* yang telah dilakukan. Hasil pengujian bahan ditunjukkan pada Tabel 2. Bahan holder akrilik dan *backing material* styrofoam dipilih untuk transduser ultrasonik ini karena memiliki respon impulse paling kecil dengan siklus sebesar 10. Semakin kecil respon impulse maka semakin bagus resolusi yang dihasilkan. Namun, tingkat peredaman yang dihasilkan masih kurang memuaskan karena belum mampu menghasilkan respon *impulse* terbaik untuk pengujian

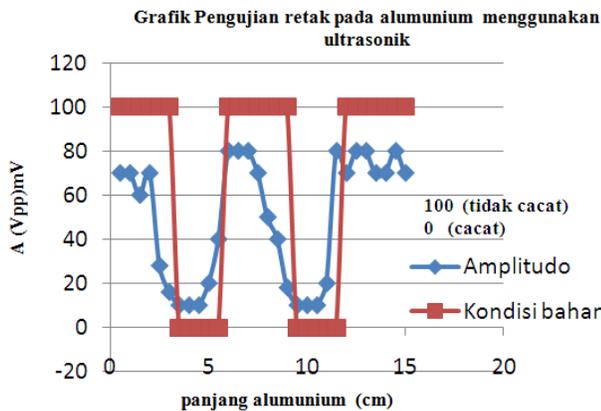
Grafik Respon Frekuensi transduser ultrasonik



Gambar 10. Grafik pengujian frekuensi respon secara *burst*



Gambar 11. Balok uji alumunium dengan cacat



Gambar 12. Perbandingan hasil pengukuran cacat dengan kondisi bahan sebenarnya menggunakan transduser ultrasonik

tak merusak (NDT) yaitu dibawah 6 siklus.

Setelah dilakukan karakterisasi bahan, selanjutnya dilakukan pengujian respon frekuensi untuk mendapatkan parameter *bandwith* dan *Q*. Hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 10.

$$f_2 = 70 \% \times 3.4 \text{ MHz} = 2.38 \text{ MHz}$$

$$f_1 = 3.4 \text{ MHz} + 30 \% \times 3.4 \text{ MHz} = 4.42 \text{ MHz}$$

$$BW = 4.42 \text{ MHz} - 2.38 \text{ MHz} = 2.04$$

$$Q = f_0 / BW$$

$$\text{Frekuensi resonansi (} f_0 \text{)} = 3.4 \text{ MHz}$$

$$\text{Bandwith (BW)} = 2.04 \text{ MHz}$$

Pada hasil pengujian respon frekuensi dari transduser ultrasonik, sebenarnya besarnya frekuensi resonansi memiliki nilai amplitudo tertinggi berada pada range 3.1-3.5 MHz sehingga penggunaan nilai frekuensi dengan range tersebut masih memungkinkan untuk melakukan pengujian bahan padat.

Tabel 3.

Hasil pengujian bahan peredam dan <i>holder</i> transduser ultrasonik.	
Parameter	Hasil
Diameter	28 mm
Tinggi	30 mm
Holder	Akrilik
Backing material	Styrofoam
Delay	1.6 us
Drive signal	Generator sinyal burst
Impulse respon	>10 siklus
Impedansi	78.6 ohm
Frekuensi resonansi	3.5 MHz
Bandwith	2.04 MHz
Q	1.667

Hasil keseluruhan dari karakterissi transduser ultrasonik ditunjukkan pada Tabel 3. Dari hasil pengujian tersebut terdapat parameter *delay* yang muncul akibat penambahan *wear plate* menggunakan akrilik pada bagian muka transduser. Kemudian parameter impedansi didapatkan dengan melakukan pengukuran menggunakan alat spectrum analyzer.

B. Pengujian Cacat Bahan

Pada bagian ini akan dijelaskan pengujian retak pada bahan padat menggunakan transduser ultrasonik. Bahan uji yang digunakan adalah alumunium. Balok alumunium yang digunakan berdimensi $p=15 \text{ cm}$, $l=5 \text{ cm}$, $t=1 \text{ cm}$ dengan panjang cacat 3 cm. dengan ukuran dan posisi retak yang telah ditentukan. Gambar balok alumunium ditunjukkan pada Gambar 11.

Pengujian ini menggunakan metoda transmisi. Proses pengujian cacat ini dilakukan dengan cara *scanning* secara manual dengan perubahan jarak setiap 0.5 cm. Cara *scanning* yang dilakukan, seperti yang ditunjukkan pada gambar.5. Dari hasil pengujian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa transduser ultrasonik dapat mendeteksi adanya cacat dan dapat mengikuti pola cacat yang muncul meskipun hasilnya belum memuaskan. Jika dibandingkan dengan kondisi cacat sebenarnya didapatkan error hasil pengukuran sebesar 0.5 cm. Dalam pengujian ini *coupling* gel yang digunakan selama pengukuran sangat berpengaruh. Karena, banyaknya gel yang digunakan akan mempengaruhi amplitudo yang dihasilkan oleh transduser *receiver*. Hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 12.

Kekurangan pengujian cacat bahan menggunakan metode transmisi ini adalah kedalaman cacat tidak bisa ditentukan. Karena identifikasi dengan metode transmisi ini berdasarkan amplitudo. Dengan identifikasi cacat menggunakan amplitudo maka hanya bisa untuk mendeteksi ada tidaknya cacat saja. Sehingga membutuhkan metode sistem *echo* untuk mengidentifikasi adanya cacat dan kedalaman cacat pada suatu bahan padat.

IV. KESIMPULAN/RINGKASAN

Dalam perancangan dan pembuatan transduser ultrasonik ini didapatkan karakteristik transduser yang memiliki holder berbahan akrilik, backing material berbahan styrofoam, frekuensi resonansi sebesar 3.5 MHz, bandwith sebesar 2.04

MHz, respon impulse >10 siklus, delay sebesar 1,6 us ,Q (faktor kualitas mekanis getaran harmonis) sebesar 1,667 dan impedansi sebesar 78,6 ohm. Untuk bahan backing material dan holder yang digunakan dipilih bahan holder berbahan akrilik dengan backing material styrofoam. Karena setelah diuji dan dibandingkan dengan bahan yang lain kedua bahan tersebut menghasilkan performa terbaik dengan 10 siklus dan amplitudo 0.14 Vpp. Namun, hasil redaman tersebut masih kurang sempurna karena belum bisa menghasilkan respon impulse yang sedikit berkisar < 5 siklus. Sedangkan untuk pengujian cacat bahan transduser ultrasonik dapat mendeteksi adanya cacat dan mengestimasi panjang ukuran cacat dengan error pengukuran sebesar 0.5 cm. Namun, kedalaman cacat tidak bisa ditentukan sehingga dibutuhkan pengukuran sistem echo untuk memperbaiki pengukuran tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ihara, Ikuo.2008. "Ultrasonic Sensing: Fundamentals and Its Applications to Non - destructive Evaluation (a draft)", Nagaoka University of Technology. Jepang.
- [2] Trisnobudi, Amoranto ,2001. Aplikasi Ultrasonik, Penerbit ITB. Bandung.
- [3] Marlianto, Eddy .2008. "Studi Ultrasonik Pada Bahan Superkonduktor Suhu Tinggi", Pidato Pengukuhan Jabatan Guru Besar Tetap dalam Bidang Fisika Superkonduktor pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sumatera Utara. Medan.
- [4] S.N. Ramadas, R.L. O'Leary and A. Gachagan," Ultrasonic Sensor Design for NDE Application: Design Challenges & Considerations". Proceedings of the National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation. 10-12 December, 2009
- [5] Technical Notes,"Ultrasonic Transducers", NDT-Olympus,2006
- [6] William R. Hendee, E. Russell Ritenour," Medical Imaging Physics", Wiley-Liss, Inc, ch 20, 2002
- [7] Kreshna A, Ayun P , lydiana dan Nenen,R" Probe Ultrasonik Dengan Bahan PVDF Sebagai Transduser Dengan Campuran Resin Dan PbO Sebagai Backing Material ," Telaah, Jilid XIX, No. 1-2,1998..
- [8] Physical Principles of general and Vascular Sonography,"Transducer", Jim Baun, 2011.
- [9] Trisnobudi, Amoranto ,2001. Instrumentasi Ultrasonics, Penerbit ITB. Bandung
- [10] Technical paper," Non-Destructive Ultrasonic Testing of Materials", Dr-Ing. Volker Deutsch dan Manfred Vogt.1987.