



Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lambung Mangkurat
Jl. Jenderal Achmad Yani KM 35,5 Banjarbaru, Kalimantan Selatan-70714 Telp-Fax : 0511-4773858
email: kinematika@ulm.ac.id

SISTEM UJI TAK RUSAK BERBASIS ULTRASONIK UNTUK KONTROL KUALITAS PADA FABRIKASI BATA TIMBAL

ULTRASONIC-BASED NON-DESTRUCTIVE TESTING SYSTEM FOR QUALITY CONTROL IN FABRICATION OF LEAD BRICK

Rhakamerta Hijazi¹⁾, Suprijanto²⁾, Freddy Haryanto³⁾, Ahmad Haerudin⁴⁾, Yusuf Giri Wijaya⁵⁾, Jos Budi Sulistyo⁶⁾

^{1,2,5}Magister Instrumentasi dan Kontrol, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

³Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

⁴Direktorat Pengelolaan Laboratorium, Fasilitas Riset, dan Kawasan Sains dan Teknologi, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Serpong, Tangerang, Indonesia

⁵Pusat Riset Teknologi Penerbangan, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Rumpin, Bogor, Indonesia

^{1,6}Pusat Riset Teknologi Analisis Berkas Nuklir, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Serpong, Tangerang, Indonesia

email: rhak001@brin.go.id¹⁾, supri89@itb.ac.id²⁾, freddy@itb.ac.id³⁾, ahma027@brin.go.id⁴⁾, yusuf.giri.wijaya@brin.go.id⁵⁾, joseb001@brin.go.id⁶⁾

Abstrak

Pengujian kebocoran dalam produksi bata timbal menggunakan sumber radioaktif berisiko tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem uji tak rusak berbasis ultrasonik guna mengurangi risiko radiasi. Sistem ini mencakup transduser *Partial Immerse Technique*, papan unOrick, dan laptop. Karena ultrasonik jarang digunakan untuk bahan timbal, diperlukan optimasi parameter. Parameter yang dioptimalkan adalah frekuensi transduser 500 KHz dan lebar pulsa 0,5 μ s. Tiga kasus diuji: (1) Bata timbal standar, yang memiliki kecepatan rambat 2.156 m/s. (2) Bata timbal dengan cacat buatan, di mana lokasi cacat diperkirakan dengan kesalahan 16,62% , 0,44%, 9,57%, dan 6,2%. (3) Bata timbal dengan cacat alami, yang memiliki kesalahan estimasi lokasi cacat sebesar 1,08%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa optimasi parameter pada sistem uji tak rusak berbasis ultrasonik berhasil dan sistem dapat digunakan untuk kontrol kualitas dalam produksi bata timbal.

Kata Kunci: Bata timbal, PIT, unOrick, ultrasonik.

Abstract

Leakage testing in lead brick production using radioactive sources is risky. This research aims to develop an ultrasonic-based non-destructive testing system to reduce radiation risks. The system includes a *Partial Immerse Technique* transducer, an unOrick board, and a laptop. Since ultrasonics are rarely used for lead materials, parameter optimization is needed. The optimized parameters are a transducer frequency of 500 KHz and a pulse width of 0.5 μ s. Three cases were tested: (1) A standard lead brick, which had a propagation speed of 2,156 m/s. (2) A lead brick with artificial defects, where defect locations were estimated with errors of 16.62%, 0.44%, 9.57%, and 6.2%. (3) A lead brick with

Received:
8 Juli 2024

Accepted:
24 Juli 2024

Published:
19 September
2024



natural defects, which had an estimated defect location error of 1.08%. The results show that optimization parameter of ultrasonic-based non-destructive testing system is successful, and system can be used for quality control in lead brick production.

Keywords: Lead brick, Partial Immersion Technique, unOrick, ultrasonic.

DOI:10.20527/sjmekinematika.v9i2.323

How to cite: Hijazi, R., Suprijanto, S., Haryanto, F., Haerudin, A., Wijaya, Y. G., & Sulisty, J. B., "Sistem Uji Tak Rusak Berbasis Ultrasonik Untuk Kontrol Kualitas Pada Fabrikasi Bata Timbal". *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, 9(2), 167-180, 2024.

PENDAHULUAN

Hampir setiap rumah sakit saat ini memiliki fasilitas pengobatan nuklir untuk diagnostik atau pengobatan. Namun, penggunaan nuklir dalam kesehatan memiliki risiko besar, yang mana berkontribusi hingga 90% terhadap dosis efektif dari sumber radiasi buatan [1,2]. Untuk mengurangi risiko ini, diperlukan penahan radiasi seperti bata timbal, yang murah dan mudah didapatkan[3–8]. Agar dapat menjamin keselamatan di sekitar fasilitas pengobatan nuklir, bata timbal yang digunakan harus memiliki kualitas yang bagus dan sesuai standar.

Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) atau sekarang bernama Badan Riset dan Inovasi Nasional (ORTN-BRIN) bertanggung jawab memastikan bata timbal dapat menahan radiasi dengan baik untuk menjaga keamanan di sekitar fasilitas pengobatan nuklir. Namun, produksi bata timbal di Indonesia masih berskala laboratorium dengan metode konvensional, berbeda dengan fabrikasi logam lain seperti aluminium yang sudah menggunakan proses *die casting*[9] dan *squeeze casting*[10]. Kualitas bata timbal yang diproduksi bergantung pada kemampuan teknisi. Selain itu, metode pengecekan utama saat ini, yaitu uji kebocoran menggunakan sumber radioaktif, sulit dilakukan berulang. Uji kebocoran yang hanya dilakukan sekali saat pemasangan awal, menambah keraguan terhadap kemampuan bata timbal dalam menahan radiasi. Oleh karena itu, diajukan metode uji tak rusak berbasis ultrasonik yang lebih aman dan mudah sebagai tambahan untuk mendukung metode uji utama.

Uji tak rusak menggunakan metode ultrasonik umum digunakan untuk pengecekan material berbahan dasar logam seperti mendeteksi kerusakan *creep* pada baja di pembangkit listrik[11], mengevaluasi kualitas logam aditif pada pencetakan 3 dimensi dari bahan titanium[12], ataupun pengecekan cacat lubang pada pengelasan baja karbon yang digunakan untuk meningkatkan kompetensi dari teknisi uji tak rusak[13]. Namun, literatur yang membahas penggunaan ultrasonik sebagai metode uji tak rusak pada material berbahan dasar timbal masih sangat terbatas. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan sistem uji tak rusak berbasis ultrasonik yang khusus diterapkan pada penahan radiasi berbahan bata timbal. Dibutuhkan beberapa penyesuaian terhadap beberapa parameter ultrasonik yang dilakukan pada material besi atau baja untuk diterapkan pada material timbal. Penggunaan perangkat pembangkit pulsa dan akuisisi data sumber terbuka unOrick menjadi penting karena memiliki fleksibilitas dalam mengubah parameter-parameter ultrasonik[14]. Selain itu, permukaan bata timbal yang tidak rata akan membuat sudut pemindaian berubah-ubah. Untuk mengakomodir permasalahan tersebut, digunakan metode *Partial Immersion Technique* (PIT) pada penelitian kali ini[15].

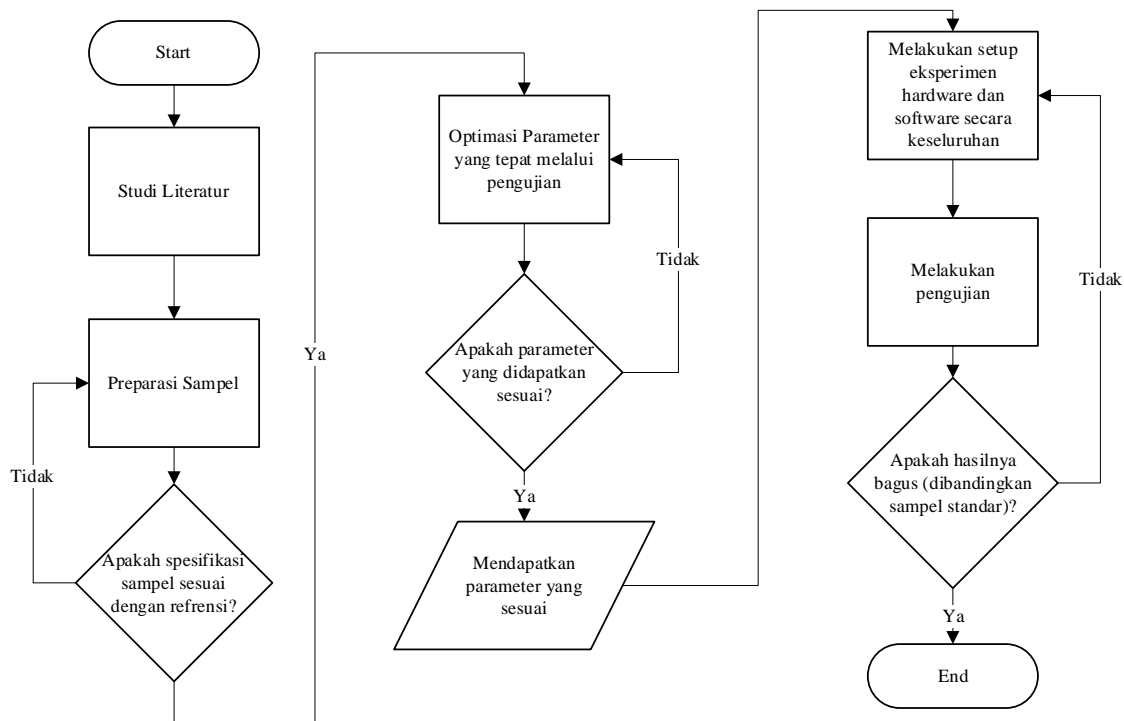
Pada penelitian ini, sistem uji tak rusak berbasis ultrasonik menggunakan metode analisis sinyal A-mode untuk mengevaluasi sampel bata timbal. Evaluasi akan dilakukan melalui parameter waktu pantulan yang didapatkan oleh proses pengolahan sinyal A-mode. Waktu pantulan tersebut juga dapat dikonversi menjadi estimasi kedalaman dari sebuah cacat. Selanjutnya, akan dihitung perbedaan antara estimasi dengan nilai sebenarnya dari

kedalaman cacat untuk mengetahui performansi dari sistem uji tak rusak berbasis ultrasonik berdasarkan *error*.

METODE PENELITIAN

Alur Penelitian

Diagram alir dari alur penelitian yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 1. Penelitian ini dimulai dari studi literatur terkait pengecoran beserta inspeksi yang dibutuhkan pada logam. Literatur tersebut akan digunakan sebagai dasar dalam menentukan parameter-parameter ultrasonik yang akan digunakan pada bata timbal. Beberapa literatur juga digunakan sebagai standar acuan untuk melakukan pengecoran bata timbal.



Gambar 1. Diagram alir penelitian.

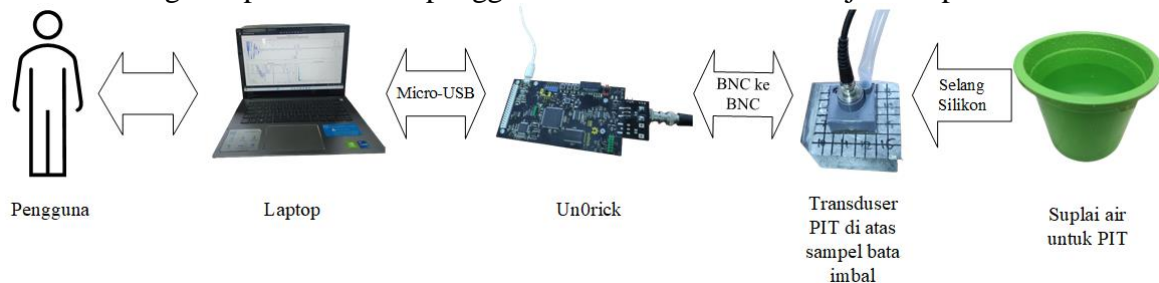
Langkah selanjutnya yang dilakukan adalah persiapan sampel. Sampel dibuat menggunakan proses *casting* atau pengecoran. Pengecoran adalah sebuah proses pembuatan sebuah logam dengan bentuk tertentu dengan cara menuangkan logam cair yang dipanaskan ke dalam sebuah cetakan[16]. Proses pengecoran harus dilakukan sesuai dengan prosedur yang telah ditetapkan untuk menghindari timbulnya cacat produksi. Pada pengecoran bata timbal, standar yang digunakan adalah standar ISO 7212-1986[17].

Terdapat 3 buah sampel bata timbal yang mewakili 3 jenis skenario uji. Sampel pertama adalah bata timbal standar yang tidak memiliki cacat. Bata timbal ini digunakan sebagai referensi untuk pengujian pada sampel bata timbal yang lain. Sampel kedua adalah bata timbal dengan lubang buatan digunakan untuk mewakili kondisi cacat retakan akibat bencana alam pada saat dipasang. Cacat retakan sangat penting untuk dievaluasi dikarenakan cacat ini dapat mengurangi kemampuan mekanik dari sebuah bata timbal. Sampel ketiga adalah bata timbal dengan cacat alami akibat dari proses solidifikasi yang tidak sempurna. Sampel ini mewakili kondisi dari kesalahan pada proses fabrikasi yang dimana seharusnya penurunan suhu saat solidifikasi harus dilakukan secara perlahan.

Langkah selanjutnya adalah melakukan optimasi parameter. Parameter yang akan dioptimasi diantaranya adalah frekuensi transduser, panjang durasi pulsa pembangkit, zona medan dekat, dan *signal to noise ratio*. Optimasi parameter tersebut akan digunakan berdasarkan penggunaan uji tak rusak berbasis ultrasonik pada logam berbahan besi. Setelah mendapatkan parameter ultrasonik yang tepat pada bata timbal, maka dilakukan pengujian pada sampel-sampel uji yang telah dicetak. Sampel uji kedua dan ketiga akan dibandingkan dengan sampel uji pertama.

Alat dan bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah pembangkit pulsa unOrick, transduser ultrasonik dengan frekuensi 1 MHz dan 500 KHz yang digunakan dengan metode PIT dan laptop. Laptop digunakan sebagai alat untuk mengirim, menerima, dan memvisualisasikan data yang diterima melalui program antar muka Python yang ditulis pada perangkat lunak Visual Studio Code. Laptop tersebut harus menggunakan sistem operasi Linux agar dapat terhubung dengan kompatibel dengan papan unOrick melalui kabel micro-USB. UnOrick digunakan untuk membangkitkan pulsa listrik. Listrik tersebut akan dikenakan ke transduser ultrasonik yang berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi gelombang ultrasonik. Gelombang ultrasonik akan merambat melalui medium pertama yaitu air dan diteruskan ke sampel uji yaitu bata timbal. Sedangkan untuk bahan yang digunakan adalah sampel uji, serta air sebagai koplan. Ilustrasi penggunaan alat dan bahan ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian.

Pembuatan Sampel Uji

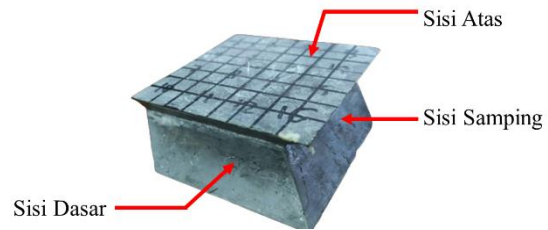
Sampel uji yang digunakan adalah bata timbal yang di fabrikasi dengan acuan standar ISO 7212-1986[17]. Proses pengecoran dilakukan secara konvensional menggunakan tungku aluminium seperti yang terlihat pada Gambar 3 komponen a. Tungku tersebut dipanaskan hingga suhu 400 °C. Selanjutnya, suhu tungku akan diturunkan secara perlahan untuk membuat proses solidifikasi dari bata timbal menjadi kokoh dan mengangkat udara yang terperangkap di dalam bata timbal. Hasil pengecoran bata timbal terlihat pada Gambar 3 komponen b yang dimana memiliki beberapa sebutan untuk bagian sisi bata timbal yaitu sisi atas, sisi samping, dan sisi dasar.

Terdapat tiga buah jenis sampel yang akan dicetak yang mana masing-masing sampel akan mewakili kondisi tertentu. Sampel pertama adalah sebuah bata timbal standar yang dicetak dengan kondisi ideal tanpa cacat. Sampel pertama ini akan dijadikan acuan untuk menentukan cacat-cacat pada bata timbal lain. Sampel kedua adalah bata timbal mirip dengan bata timbal pertama, akan tetapi dibuat beberapa lubang buatan di bagian sisi dasar dari bata timbal untuk. Lubang buatan tersebut akan digunakan untuk memverifikasi hasil pengukuran dari sistem uji tak rusak ultrasonik yang dikembangkan. Sampel ketiga adalah bata timbal yang dibuat seperti bata timbal pertama dan kedua, tetapi ketika proses solidifikasi atau pendinginan, penurunan suhu yang dilakukan cukup cepat sehingga menyebabkan masih adanya gelembung udara yang terperangkap di dalam bata timbal. Bata

timbangan akan mewakili kondisi sebenarnya dari sebuah bata timbal yang cacat. Ketiga sampel uji akan ditunjukkan pada bagian hasil dan pembahasan.



(a)

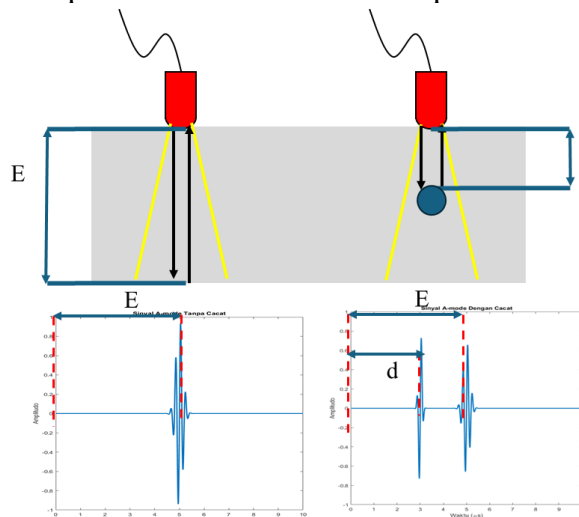


(b)

Gambar 3. (a) Proses pengecoran dari bata timbal dan (b) produk bata timbal standar dengan penyebutan nama sisi-sisinya.

Metode Uji Tak Rusak Berbasis Ultrasonik Menggunakan PIT

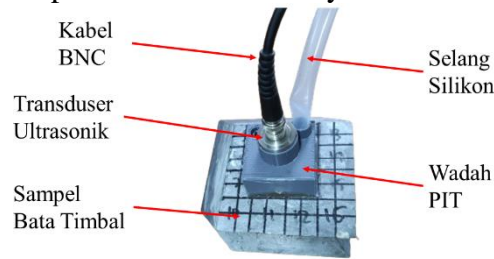
Gelombang ultrasonik adalah gelombang mekanik dengan frekuensi di atas 20 KHz dan hanya dapat merambat jika terdapat medium tertentu. Pada uji tak rusak berbasis ultrasonik, gelombang ultrasonik dibangkitkan oleh sebuah transduser. Transduser berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi gelombang mekanik. Frekuensi transduser berbeda-beda tergantung pada besar kristal dan luas permukaan transduser. Metode yang paling umum digunakan pada uji tak rusak pada logam adalah menggunakan metode kontak berbasis pantulan balik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Metode ini menggunakan koplan untuk mengkompensasi perbedaan impedansi akustik antara transduser dengan sampel. Jika terdapat udara yang dimana perbedaan impedansi akustiknya terlalu jauh dengan sampel, maka gelombang akan langsung terpantul ketika mengenai permukaan pertama sampel dan tidak dapat melalui keseluruhan sampel.



Gambar 4. Ilustrasi uji tak rusak menggunakan metode pantulan balik dengan gelombang ultrasonik.

Pada penelitian ini, wadah PIT digunakan untuk mengganti koplan untuk mengkompensasi permukaan dari bata timbal yang tidak rata. Selain itu, PIT dapat memastikan sudut propagasi dari gelombang ultrasonik tetap konsisten tegak lurus terhadap

permukaan bata timbal. Sistem pemindaian yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 5. Pada penelitian ini untuk kasus 1 akan dilakukan pemindaian pada satu titik yaitu titik tengah dari bata. Pada kasus 2, akan dilakukan pemindaian sesuai dengan jumlah cacat yang terlihat. Pada kasus 3, akan dilakukan pemindaian satu titik yaitu titik tengah.

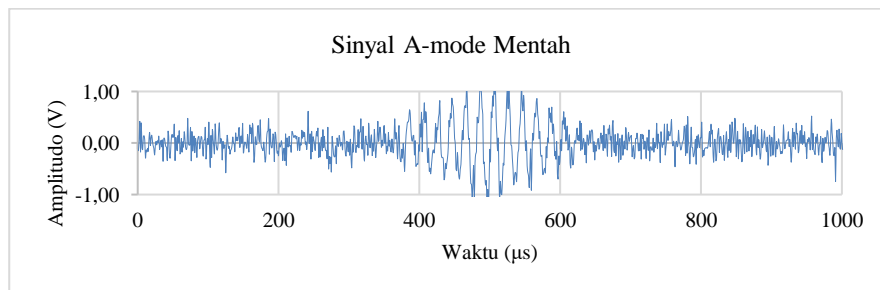


Gambar 5. Sistem pemindaian ultrasonik menggunakan PIT.

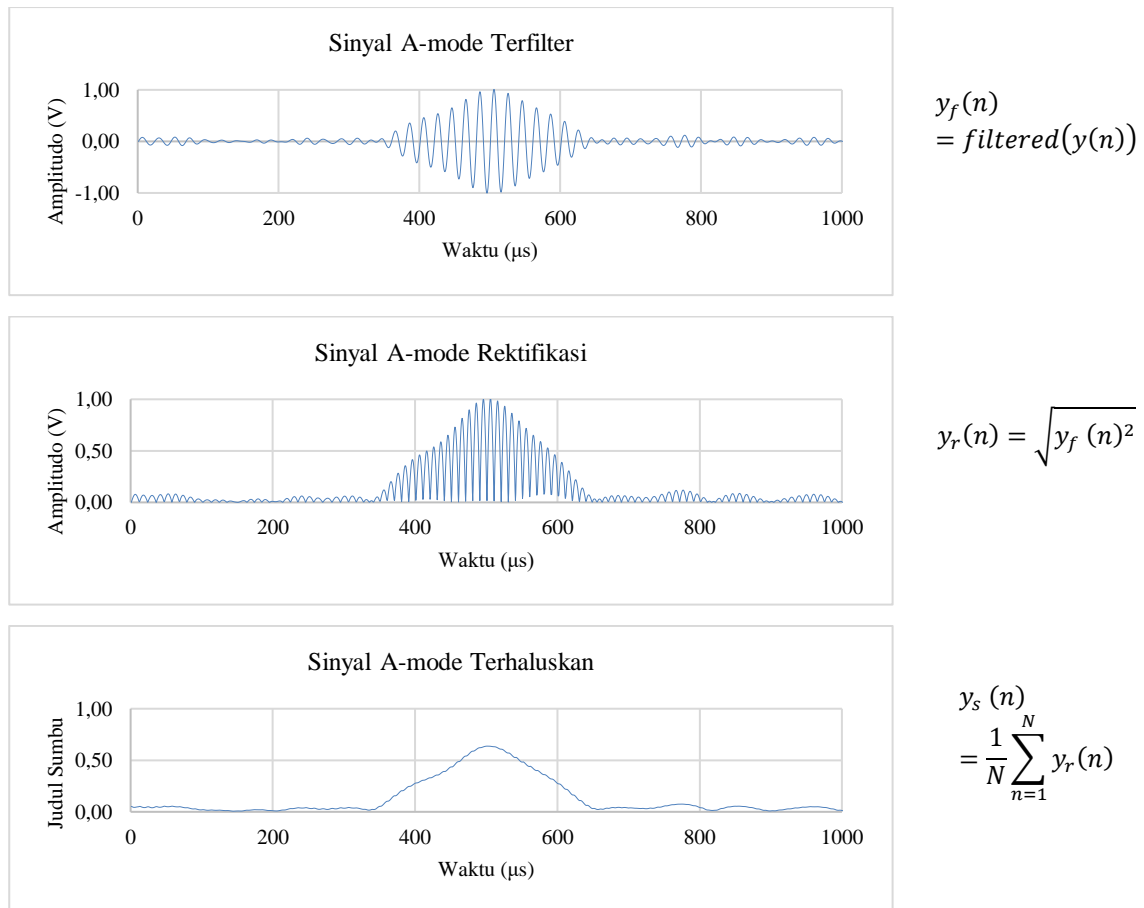
Transduser akan mengirimkan dan menerima pantulan balik dari gelombang ultrasonik. Gelombang ultrasonik tersebut berasal dari sinyal listrik yang telah diatur dari papan pembangkit pulsa un0rick. Un0rick berfungsi untuk membangkitkan sinyal listrik sekaligus melakukan akuisisi data dengan frekuensi tinggi. Selain itu, un0rick memiliki fleksibilitas untuk mengubah parameter-parameter ultrasonik seperti lebar pulsa. Semakin kecil lebar pulsa, maka pulsa tersebut akan mendekati bentuk impuls yang dimana adalah sinyal listrik terbaik agar transduser dapat mengeluarkan tepat dengan frekuensi natural transduser. Semakin lebar pulsa, maka frekuensi dari transduser akan menyebar dan tidak tepat pada frekuensi natural.

Pengolahan Sinyal A-mode

Sinyal mentah A-mode yang telah diakuisisi oleh un0rick akan diolah terlebih dahulu untuk dilakukan analisis. Pengolahan sinyal tersebut diilustrasikan pada Gambar 6 yang dimana terlihat bahwa pada sinyal mentah terdapat banyak sekali *noise*. Oleh karena itu dilakukan filter *bandpass* untuk mengeliminasi *noise-noise* selain pada frekuensi tengah dari transduser yang digunakan, yaitu 1 MHz atau 500 KHz. Sehingga, sinyal-sinyal lain yang berada pada frekuensi selain 1 MHz atau 500 KHz akan dihilangkan. Selanjutnya, sinyal a-mode akan dilakukan rektifikasi untuk menentukan puncak maksimum dari sinyal tersebut. Langkah terakhir adalah melakukan proses rektifikasi terhaluskan atau sering disebut sebagai *enveloping*. Langkah ini berfungsi untuk melihat karakteristik sinyal agar dapat dengan mudah dibandingkan dengan sinyal lain.



$y(n)$



Gambar 6. Ilustrasi pengolahan sinyal A-mode dari sebuah sistem uji tak rusak berbasis ultrasonik.

Selanjutnya, melalui sinyal A-mode tersebut dapat ditentukan nilai cepat rambat sebagai

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

dimana d adalah tebal dari sampel yaitu 50 mm dan Δt adalah selisih antara waktu munculnya puncak pertama, t_{puncak} , dengan waktu pertama kali menerima sinyal A-mode, t_0 . Pada Persamaan 1, nilai V yang dihitung dari sebuah bata timbal standar tanpa cacat pada kasus 1 akan digunakan sebagai nilai cepat rambat referensi, V_{ref} untuk menghitung estimasi kedalaman dari cacat pada bata timbal kasus 2 dan kasus 3. Sehingga, didapatkan nilai estimasi cacat sebagai fungsi dari, V_{ref} dan selisih antara t_0 dan t_{cacat} yaitu

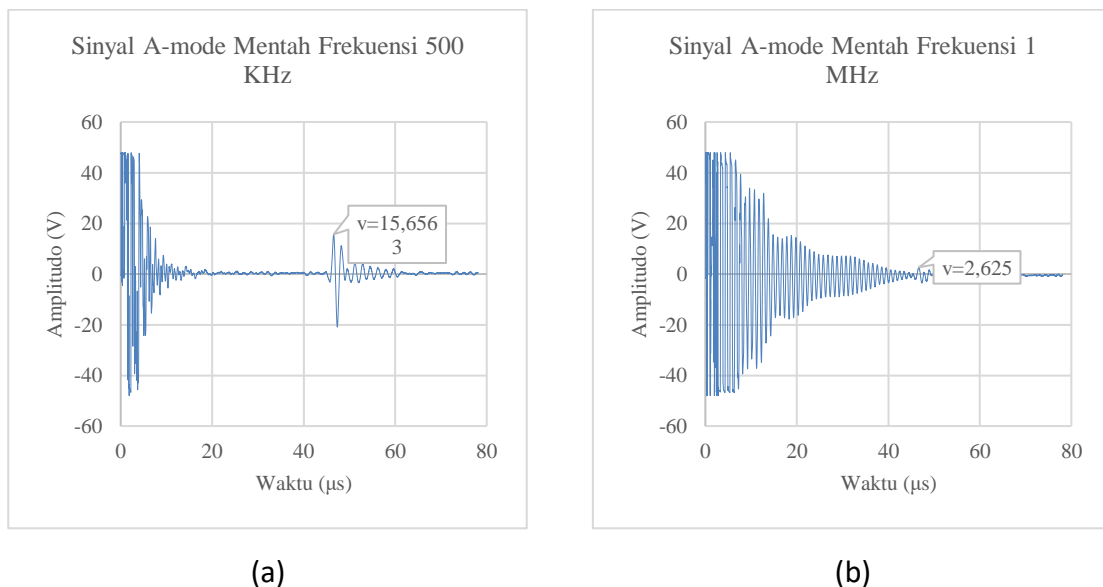
$$d_{\text{cacat}} = \frac{V_{\text{ref}} \cdot (t_{\text{cacat}} - t_0)}{2} \quad (2)$$

Persamaan 2 akan digunakan untuk mengonversi nilai waktu pada sinyal A-mode pada kasus 2 dan kasus 3 menjadi nilai estimasi kedalaman. Selanjutnya, nilai estimasi kedalaman akan diukur kesalahannya melalui perbandingan dengan nilai kedalaman sebenarnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

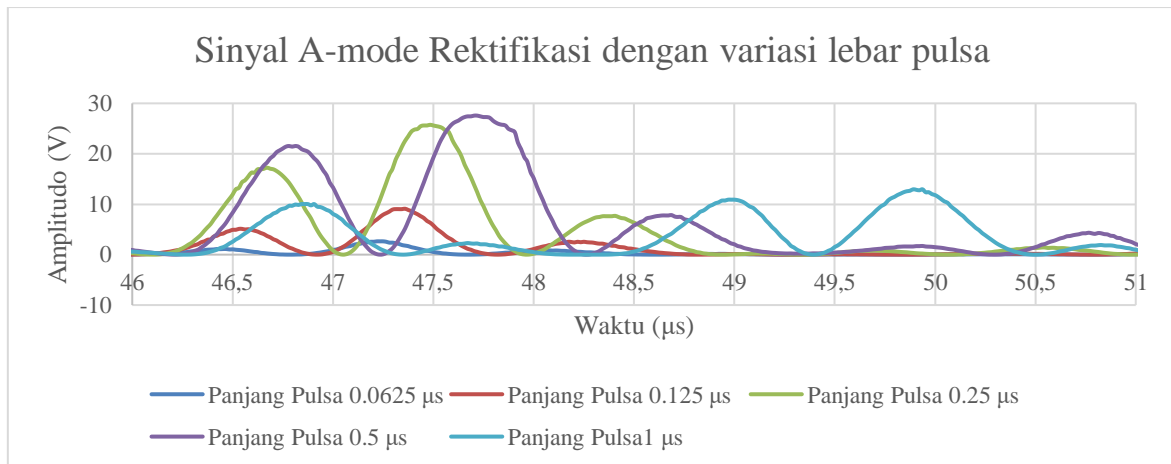
Optimasi Parameter

Uji tak rusak pada logam berbahan dasar besi umumnya menggunakan transduser dengan rentang frekuensi 1 MHz hingga 5 MHz tergantung pada ketebalan benda dan metode yang digunakan[11–13]. Semakin rendah frekuensi, maka daya tembus dari gelombang ultrasonik semakin dalam dan resolusi sinyal semakin buruk. Berdasarkan pertimbangan tersebut, mengingat sampel uji memiliki ketebalan 50 mm, maka digunakan transduser dengan frekuensi terendah yaitu 1 MHz. Akan tetapi seperti yang terlihat pada Gambar 7, sinyal A-mode pada transduser 1 MHz memiliki puncak pantulan yang sangat rendah yaitu 2,625 V, sedangkan pada transduser 500 KHz memiliki puncak yang cukup tinggi yaitu 15,656 V. Selain itu, terdapat *noise* pada transduser 1 MHz yang menyebabkan transduser 500 KHz lebih tepat untuk digunakan pada material dengan jenis bata timbal.



Gambar 7. Perbandingan amplitudo dari sinyal A-mode dari transduser dengan frekuensi (a) 1 MHz dan (b) 500 KHz

Parameter selanjutnya yang harus disesuaikan adalah lebar pulsa listrik yang dikenakan pada transduser. Seperti yang telah diceritakan sebelumnya, transduser mengubah sinyal listrik menjadi gelombang ultrasonik. Lebar pulsa listrik harus cocok dengan frekuensi dari transduser. Umumnya, nilai maksimum dari periode pulsa listrik adalah setengah dari panjang frekuensi. Sehingga, lebar pulsa maksimal yang dapat digunakan adalah 1 μs. Sehingga, lebar pulsa akan divariasikan dari 0,0625 μs, 0,125 μs, 0,25 μs, 0,5 μs, dan 1 μs. Sinyal A-mode yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Perbandingan sinyal A-mode variasi lebar pulsa 0,0625 μ s, 0,125 μ s, 0,25 μ s, 0,5 μ s, dan 1 μ s.

Nilai puncak dari sebuah sinyal A-mode dapat dihitung setelah sinyal A-mode mentah di rektifikasi agar amplitudo yang bernilai negatif menjadi positif sehingga bisa mengetahui dengan pasti berapa puncaknya. Berdasarkan sinyal A-mode rektifikasi tersebut, maka dilakukan perhitungan mengenai nilai puncak dan nilai SNR seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Terlihat bahwa nilai terbaik adalah pada saat lebar pulsa bernilai 0.5 μ s.

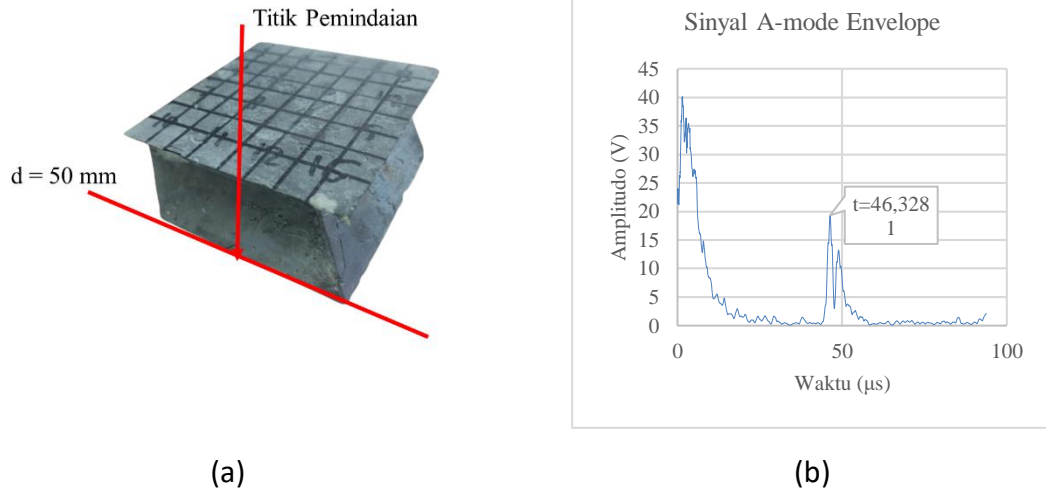
Tabel 1. Nilai SNR dan puncak maksimum dari sinyal pantulan.

Lebar Pulsa (μ s)	SNR (dB)	Nilai Puncak Pantulan(V)
0,0625	3,2238	2,6367
0,125	3,2662	9,1057
0,25	3,7184	25,7492
0,5	4,3073	27,5654
1	-0,3968	12,9558

Analisis Sinyal A-mode

Kasus 1 : Bata Timbal Standar Tanpa Cacat

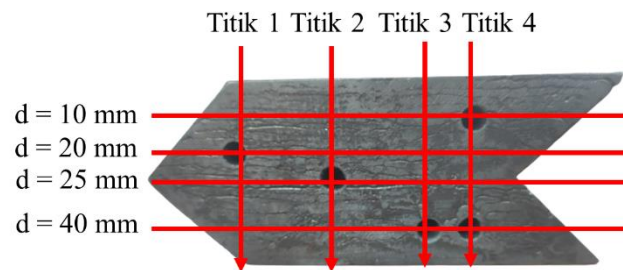
Pada analisis sinyal a-mode, akan dilakukan berdasarkan sampel uji yang telah dibuat sebelumnya. Pada kasus 1, sampel yang digunakan adalah sampel uji tanpa cacat yang telah dibuat mengacu pada standar seperti yang terlihat pada Gambar 9 komponen a. Hasil sinyal A-mode seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9. Pada Gambar 9 komponen c menunjukkan sinyal A-mode yang telah diproses menjadi sinyal *envelope*. Pada bagian sinyal yang telah diproses, terlihat hasil *envelope* menunjukkan puncak sinyal berada pada waktu 46.3281 μ s. Jika dihitung cepat rambat gelombang yang dihasilkan, maka didapatkan nilai 2.156 m/s yang dimana hampir mendekati cepat rambat gelombang ultrasonik pada timbal standar ideal yang bernilai 2.160 m/s. Maka dari itu, dapat dikatakan bahwa sinyal A-mode Gambar 9 valid dan dapat dijadikan acuan sebagai bata timbal standar. Cepat rambat gelombang ultrasonik tersebut akan digunakan untuk melakukan perhitungan mengenai estimasi kedalaman cacat pada kasus 2 dan kasus 3.



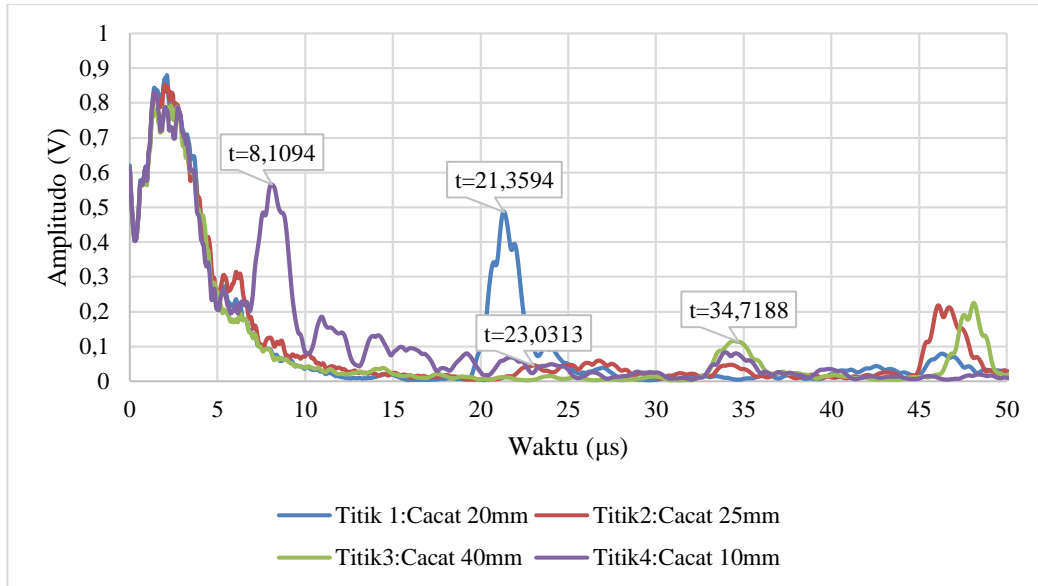
Gambar 9. (a) Sampel uji pada kasus satu dengan hasil berupa dan (b) *envelope* dari transduser 500 KHz pada kasus 1.

Kasus 2 : Bata Timbal Dengan Cacat Buatan

Pada kasus kedua, bata timbal yang digunakan adalah bata timbal yang telah dilubangi oleh mesin bor pada lokasi tertentu seperti yang terlihat pada Gambar 10. Bata timbal ini digunakan untuk menguji apakah ultrasonik dapat mendeteksi cacat pada lokasi tertentu. Sinyal A-mode *envelope* dari kasus 2 dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 10. Bata timbal pada kasus 2 dengan lubang bor yang telah dibuat pada lokasi tertentu.



Gambar 11. Sinyal A-mode *envelope* dari transduser 500 KHz pada kasus 2.

Jika dilakukan perhitungan mengenai estimasi kedalaman, maka akan didapatkan hasil berupa Tabel 2. Perhitungan tersebut didapatkan dengan dasar cepat rambat pada kasus pertama. Terlihat pada titik ke-1 seharusnya cacat berada pada lokasi 20 mm, akan tetapi pada estimasi dari gelombang ultrasonik, lokasi cacat berada pada 23,32 mm dengan *error* 16,62 %. Pada titik ke-2, lokasi cacat berada di 25 mm dan estimasi dari cacat menunjukkan 25,1 mm dengan *error* 0,44 %. Titik ketiga berada pada lokasi 40 mm, dan estimasi dari lokasi cacat adalah 36,17 mm dengan *error* 9,57 %. Titik ke-4 berada pada lokasi 10 mm, dan estimasi cacat menunjukkan pada 9,38 mm dengan *error* 6,2 %. Rata-rata *error* dari perhitungan tersebut adalah 8,2 %.

Terlihat *error* yang dihasilkan berbeda-beda dari titik ke-1 hingga ke-4. Pada titik ke-1 terdapat deviasi sebesar 3,32 mm. Pada titik ke-2 terdapat deviasi sebesar 0,1 mm. pada titik ketiga terdapat deviasi sebesar 3.83 mm. Pada titik ke-4 terdapat deviasi sebesar 0.62 mm. Hal tersebut disebabkan oleh diameter lubang simulasi cacat yang dinilai masih terlalu besar yaitu 6 mm. Hal tersebut menyebabkan cacat dengan titik pusat, d , akan dideteksi pada jarak $d-r_{\text{lubang}} < d < d+r_{\text{lubang}}$ atau $d-3 \text{ mm} < d < d+3 \text{ mm}$. Sehingga, pengukuran kedalaman cacat pada titik ke-1, 2, dan 4 dapat dikatakan masih bagus karena berada dalam area cacat dengan deviasi $\pm 3 \text{ mm}$. Akan tetapi, hasil pengukuran titik ke-3 terlihat buruk. Nilai estimasi cacat berada diluar dari deviasi yang diperbolehkan. Hal tersebut disebabkan karena titik ke-3 memiliki kedalaman 40 mm. Sementara itu, gelombang ultrasonik semakin lama merambat ke titik paling dalam, maka energi yang dimiliki gelombang tersebut akan semakin berkurang. Hal tersebut menyebabkan kesalahan perhitungan dari titik ke-3. Solusi dari permasalahan tersebut dapat digunakan metode *Time Gain Compensation* (TGC).

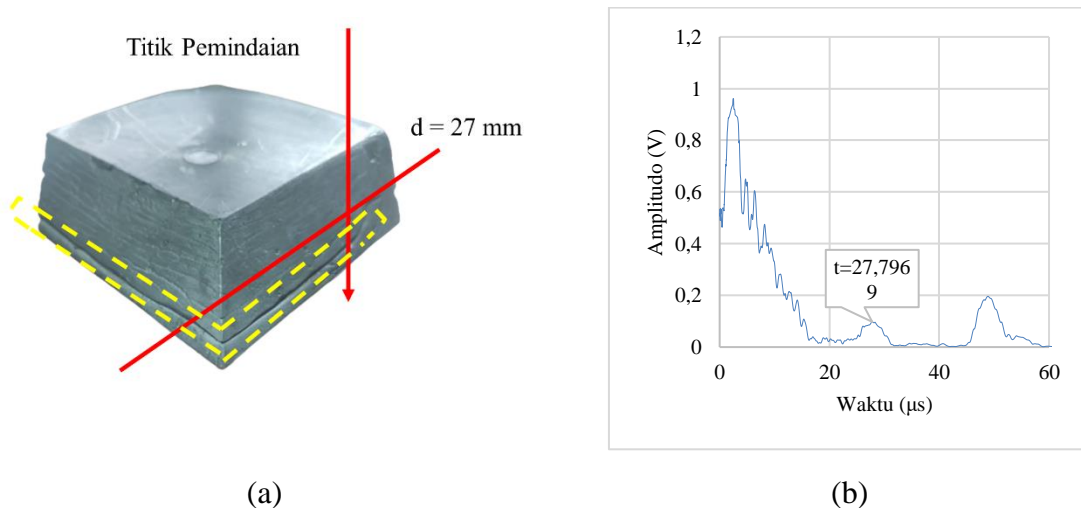
Tabel 2. Estimasi kedalaman cacat dari tiap titik pemindaian pada kasus 2.

Titik ke	Waktu puncak pantulan (μs)	t_0 (μs)	t_{cacat} (μs)	dt (μs)	d (mm)	e (%)
1	46.1094	-0.2812	21.3594	21.6406	23.3243	16.62
2	46.125	-0.2656	23.0312	23.2968	25.1094	0.44
3	47.5469	1.1563	34.7188	33.5625	36.1738	9.57

4	45.7969	-0.5937	8.1092	8.7031	9.3802	6.20
---	---------	---------	--------	--------	--------	------

Kasus 3 : Bata Timbal Dengan Cacat Alami

Pada kasus ke-3, bata timbal yang digunakan adalah bata timbal dengan cacat alami dikarenakan solidifikasi yang tidak sempurna seperti yang digambarkan oleh garis putus-putus berwarna kuning pada Gambar 12 komponen a. Sinyal A-mode yang dihasilkan terlihat pada Gambar 12 komponen b. Terlihat puncak dari echo bagian bawah sampel berada pada detik ke 49.1094 μ s. Sehingga, dapat kita pergeseran puncak bagian bawah dengan referensi berada pada sekitar 2.7188 μ s. Selanjutnya, dapat dihitung estimasi cacat berada pada kedalaman 26.77 mm. Deviasi nilai estimasi kedalaman cacat tidak terlalu jauh dibandingkan dengan lokasi cacat pada sampel berada pada kedalaman cacat 27 mm dengan *error* bernilai 1,08 %.



Gambar 12. (a) Tampak nyata dari bata timbal kasus ketiga dengan cacat alami diakibatkan solidifikasi tidak sempurna yang ditandai garis putus-putus berwarna kuning dan (b) sinyal *envelope* dari transduser 500 KHz.

KESIMPULAN

Telah dilakukan penelitian untuk mengembangkan sebuah sistem uji tak rusak berbasis ultrasonik untuk deteksi cacat pada bata timbal. Parameter-parameter ultrasonik yang diperoleh diadopsi dari penggunaan uji tak rusak berbasis ultrasonik pada logam berbahan dasar besi. Parameter-parameter ultrasonik yang didapatkan di antaranya adalah frekuensi transduser yang tepat pada bata timbal adalah 500 KHz dengan lebar pulsa 0.5 μ s. Setelah mendapatkan parameter-parameter ultrasonik, maka parameter-parameter tersebut digunakan untuk menguji tiga buah sampel yang telah di fabrikasi sebelumnya menggunakan metode pengecoran konvensional.

Pada kasus pertama digunakan bata timbal standar dengan kondisi ideal tanpa cacat. Hasil yang didapatkan pada kasus pertama adalah cepat rambat gelombang ultrasonik dari sebuah bata timbal bernilai 2.156 m/s yang dimana hampir mendekati cepat rambat ideal dari timbal dengan nilai 2.160 m/s. Cepat rambat tersebut akan digunakan sebagai dasar untuk melakukan estimasi kedalaman cacat.

Pada kasus kedua digunakan bata timbal dengan cacat buatan berupa lubang bor yang berada pada beberapa lokasi tertentu dengan kedalaman 10 mm, 20 mm, 25 mm, dan 40 mm. Hasil pengukuran dan perhitungan dari sistem ultrasonik menyebutkan bahwa estimasi lokasi cacat titik ke-1 berada pada 23,32 mm dengan *error* 16,62 %, estimasi lokasi cacat pada titik ke-2 adalah 25,1 mm dengan *error* 0,44 %, estimasi lokasi cacat titik ketiga adalah 36,17 mm dengan *error* 9,57 %, dan estimasi lokasi cacat titik ke-4 adalah 9,38 mm

dengan *error* 6,2 %. Rata-rata *error* dari perhitungan tersebut adalah 8,2 %. Terdapat deviasi antara lokasi cacat yang asli dengan estimasi cacat dari gelombang ultrasonik. Akan tetapi hal tersebut masih dapat diterima selama deviasi cacat masih bernilai $-r_{\text{lubang}} < d < +r_{\text{lubang}}$ atau $-3 \text{ mm} < d < +3 \text{ mm}$. Sedangkan pada kasus ketiga dengan bata timbal dengan cacat alami karena solidifikasi tidak sempurna menghasilkan estimasi cacat 26.77 mm dengan *error* bernilai 1,08 %.

Beberapa aspek yang dapat dikembangkan selanjutnya adalah meningkatkan resolusi dari transduser. Resolusi aksial berpengaruh terhadap kualitas puncak pantulan dari sinyal A-mode. Resolusi aksial dapat diperbaiki dengan penggunaan *Time Gain Compensation* (TGC). Metode ini akan memberikan amplifikasi kekuatan sinyal yang ketika semakin lama semakin melemah menjadi tetap kuat. Aspek lain yang dapat diperbaiki adalah akurasi dari sistem mengingat *error* yang dihasilkan masih cukup besar diakibatkan diameter lubang simulasi cacat yang cukup besar. Akurasi sistem dapat ditingkatkan dengan memperkecil diameter lubang simulasi cacat pada bata timbal dan diuji ulang untuk melihat kemampuan maksimal dari sistem.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Institut Teknologi Bandung (ITB) atas bantuan berupa alat pada penelitian ini. Terima kasih kepada Lembaga Pengelolaan Dana Pendidikan Republik Indonesia (LPDP RI) atas bantuan berupa dana riset pada penelitian ini.

REFERENSI

- [1] N. Tamam, A. Sulieman, and D. A. Bradley, "Evaluation of patients doses at medical imaging departments," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 203, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.radphyschem.2022.110541.
- [2] B. Amaoui, F. Safini, L. Lahlou, M. El Fahssi, S. Abbaoui, and S. Semghouli, "Physicians' knowledge about radiation protection of patients during prescription of CT scan procedures in Morocco," *Radiat Med Prot*, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.radmp.2023.02.004.
- [3] B. Oto, E. Kavaz, H. Durak, and Z. Madak, "Assessment on gamma radiation shielding properties of molybdenum doped bricks," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 207, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.radphyschem.2023.110849.
- [4] F. Shwita, N. El-Faramawy, W. Ramadan, and M. Ramadan, "Investigation of the mechanical properties, morphology and the attenuation behavior of gamma rays for OPC pastes mingled with two different glass wastes," *Constr Build Mater*, vol. 313, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125475.
- [5] O. Gencel, A. Bozkurt, E. Kam, A. Yaras, E. Erdogmus, and M. Sutcu, "Gamma and neutron attenuation characteristics of bricks containing zinc extraction residue as a novel shielding material," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 139, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.pnucene.2021.103878.
- [6] H. S. Alorfi, M. A. Hussein, and S. A. Tijani, "The use of rocks in lieu of bricks and concrete as radiation shielding barriers at low gamma and nuclear medicine energies," *Constr Build Mater*, vol. 251, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118908.
- [7] K. A. Mahmoud, O. L. Tashlykov, M. H. A. Mhareb, A. H. Almuqrin, Y. S. M. Alajerami, and M. I. Sayyed, "A new heavy-mineral doped clay brick for gamma-ray protection purposes," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 173, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.apradiso.2021.109720.
- [8] E. O. Echeweozo, A. D. Asiegbu, and E. L. Efurumibe, "Investigation of kaolin - Granite composite bricks for gamma radiation shielding," *International Journal of*

- Advanced Nuclear Reactor Design and Technology*, vol. 3, pp. 194–199, 2021, doi: 10.1016/j.jandt.2021.09.007.
- [9] Akhmad Taufik and M. Ma'ruf, "Hardness Test On Al-Cu Casting Results Die Casting Method With Variation In Pour Temperature And Pressure," *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, vol. 6, no. 1, pp. 33–42, Jun. 2021, doi: 10.20527/sjmekinematika.v6i1.160.
 - [10] R. Siswanto, Ma'ruf, and G. Aprianto, "Uji Kekerasan Paduan Al-6,7% Cu Dengan Variasi Temperatur Tuang Dan Tekanan Hasil Proses Squeeze Casting," *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, vol. 6, no. 2, pp. 174–181, Dec. 2021, doi: 10.20527/sjmekinematika.v6i2.198.
 - [11] L. Mažeika *et al.*, "High sensitivity ultrasonic NDT technique for detecting creep damage at the early stage in power plant steels," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 196, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.ijpvp.2022.104613.
 - [12] R. Zimmermann *et al.*, "In-process non-destructive evaluation of metal additive manufactured components at build using ultrasound and eddy-current approaches," *J Manuf Process*, vol. 107, pp. 549–558, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2023.10.063.
 - [13] I. Virkkunen, T. Koskinen, and O. Siljama, "Virtual round robin 2 – Phased array inspection of dissimilar metal welds," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 414, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.nucengdes.2023.112555.
 - [14] L. Jonveaux, "un0rick: open-source fpga board for single element ultrasound imaging," *Zenodo*, Aug. 2019, doi: 10.5281/zenodo.3364559.
 - [15] Y. Zhang, Z. Qin, S. Luo, J. Hyunjo, and S. Zhang, "Design and Application of Partial Immersion Focused Ultrasonic Transducers for Austenitic Weld Inspection," *Sensors*, vol. 22, no. 7, Apr. 2022, doi: 10.3390/s22072671.
 - [16] N. Dwiguna and A. Syarief, "Analisis Proses Pengecoran Dan Permesinan Bushing Roda Kereta Di Galangan Kapal," *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, vol. 1, no. 2, pp. 47–60, Dec. 2016, doi: 10.20527/sjmekinematika.v1i2.21.
 - [17] International Organization for Standardization 1986, "ISO 7212 - Enclosures for protection against ionizing radiation, Lead shielding units for 50 mm and 100 mm thick Walls," Switzerland, 1986. [Online]. Available: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/6a479993-5b0f-4868-b487->