

**PENGUKURAN KETEBALAN MATERIAL LOGAM DENGAN
MENGUNAKAN NON DESTRUKTIF TEST (NDT) METODE
*ULTRASONIC TEST***
(Tesis)

Oleh

BELA WICAKSANA
2127041007



MAGISTER FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
2025

ABSTRAK

PENGUKURAN KETEBALAN MATERIAL LOGAM DENGAN MENGUNAKAN NON DESTRUKTIF TEST (NDT) METODE *ULTRASONIC TEST*

Oleh

Bela Wicaksana

Pada penelitian ini melakukan pengukuran ketebalan pada material logam menggunakan Non Destruktif Test (NDT) metode *ultrasonic test*. Tujuan dari penelitian ini adalah Dapat mengetahui hasil pengukuran ketebalan logam dengan metode *ultrasonic thickness testing* (UTT) dalam bentuk koordinat X,Y, dan Z, kemudian mengetahui hasil pengukuran ketebalan logam dengan metode *ultrasonic thickness testing* (UTT) dalam bentuk gambar dua dimensi, dan dapat membandingkan hasil pengukuran menggunakan *ultrasonic thickness testing* (UTT) dalam bentuk koordinat X,Y, Z terhadap hasil gambar dari *software surface*. Pada penelitian ini dilakukan pengukuran material logam dengan enam kondisi yaitu berbentuk segitiga, lingkaran, sudut 40° , sudut 45° , sudut 90° dan berbentuk huruf I, diperlihatkan hasil yang menyerupai goresan pada logam serta koordinat kedalaman dalam berbagai warna, namun kurangnya dekat antar jarak koordinat membuat garis pada surface kurang terbentuk dan adanya keterbatasan pada alat UTT yang memiliki permukaan lebar sehingga kemungkinan mendeteksi permukaan lingkaran sekitar titik koordinat. Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan nilai eror yang didapatkan dari hasil pengukuran kurang dari atau sama dengan 6%. Nilai eror tersebut disebabkan karena dua faktor yaitu faktor ketidakkonsistenan dalam pengukuran dan ketidakkonsistenan dalam melakukan pengkondisian terhadap material logam yang diukur.

Kata Kunci: Ketebalan, Logam, Non Destruktif Test, Ultrasonic Test

ABSTRACT

MEASURING THE THICKNESS OF METAL MATERIALS USING NON-DESTRUCTIVE TESTING (NDT) ULTRASONIC TEST METHOD

By

Bela Wicaksana

In this study, the thickness measurement of metal material was carried out using Non Destructive Test (NDT) ultrasonic test method. The purpose of this study is to find out the results of metal thickness measurements using the ultrasonic thickness testing (UTT) method in the form of X, Y, and Z coordinates, then find out the results of metal thickness measurements using the ultrasonic thickness testing (UTT) method in the form of two-dimensional images, and can compare the results of measurements using ultrasonic thickness testing (UTT) in the form of X, Y, Z coordinates against the results of images from the surface software. In this study, measurements of metal material were carried out with six conditions, namely in the form of a triangle, a circle, an angle of 40⁰, an angle of 45⁰, an angle of 90⁰ and in the form of the letter I, showing results that resemble scratches on the metal and depth coordinates in various colors, but the lack of proximity between the coordinate distances makes the lines on the surface less formed and there are limitations in the UTT tool which has a wide surface so that it is possible to detect the surface of a circle around the coordinate point. Based on the results of the study, the error value obtained from the measurement results is less than or equal to 6%. The error value is caused by two factors, namely the inconsistency factor in the measurement and the inconsistency in conditioning the metal material being measured.

Keywords: *Thickness, Metal, Non Destructive Test, Ultrasonic Test*

**PENGUKURAN KETEBALAN MATERIAL LOGAM DENGAN
MENGUNAKAN NON DESTRUKTIF TEST (NDT) METODE
*ULTRASONIC TEST***

Oleh

Bela Wicaksana

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh Gelar

MAGISTER SAINS

Pada

Program Studi Magister Fisika

Jurusan Fisika

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Lampung



**PROGRAM STUDI MAGISTER FISIKA
JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

Judul Penelitian : **PENGUKURAN KETEBALAN MATERIAL LOGAM DENGAN MENGGUNAKAN NON DESTRUKTIF TEST (NDT) METODE ULTRASONIC TEST**

Nama Mahasiswa : **Bela Wicaksana**

Nomor Pokok Mahasiswa : 2127041007

Program Studi : Magister Fisika

KBK : Instrumentasi

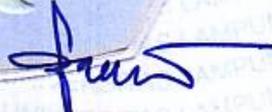
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Bandar Lampung, 13 Juni 2025

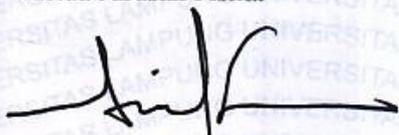


1. Komisi Pembimbing


Dr. Ir. Sri Ratna Sulistiyanti, M.T.
NIP. 196510211995122001


Dr. Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T.
NIP. 198010102005011002

2. Mengetahui,

Ketua Jurusan Fisika

Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng.
NIP. 197109092000121001

Ketua Program Studi
Magister Fisika,

Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si.
NIP. 197512192000122003

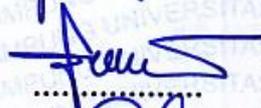
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Dr. Ir. Sri Ratna Sulistiyanti, M.T.



Sekretaris : Dr. Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T.



Penguji Anggota : 1. Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si.



2. Dr. Sri Wahyu Suciyati, S.Si., M.Si.



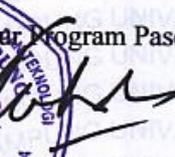
2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.
NIP. 197110012005011002



Direktor Program Pascasarjana
Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.
NIP. 196403261989021001



Tanggal Lulus Ujian Tesis : 13 Juni 2025

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam tesis yang berjudul **“Pengukuran Ketebalan Material Logam Dengan Menggunakan Non Destructif Test (NDT) Metode *Ultrasonic Test*”** tidak terdapat karya yang sama persis dengan yang pernah dilakukan orang lain, dan sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana disebutkan dalam daftar Pustaka, selain itu saya menyatakan pula bahwa tesis ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan ini tidak benar, maka saya bersedia dikenakan sanksi sesuai hukum yang berlaku.



Deia Wicaksana
NPM. 2127041007

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Bela Wicaksana. Penulis dilahirkan di Lampung Timur pada 20 Maret 1998. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Suraji dan Sri Handayani. Penulis sudah menikah dengan Agung Wahyu Widodo dan memiliki satu putri bernama Hyuna Chalondra Isvara Widodo, Penulis memulai pendidikan sekolah dasar di SD N 1 Margototo pada tahun 2003 – 2009 kemudian melanjutkan pendidikan sekolah menengah pertama di SMP N 1 Metro Kibang pada tahun 2009 – 2012 dan melanjutkan pendidikan sekolah menengah atas di SMA Negeri 6 Metro pada tahun 2012 – 2015. Penulis melanjutkan pendidikan sarjana di prodi Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Lampung pada tahun 2015 – 2020. Penulis terdaftar sebagai mahasiswa di prodi Magister Fisika FMIPA Universitas Lampung melalui jalur beasiswa pada tahun 2021. Sebelum selesai pendidikan penulis bekerja di suatu instansi negara (BGN) dan menempuh pendidikan selama 8 bulan, yaitu pelatihan kepemimpinan di akademi militer (Magelang) 2 bulan serta pelatihan manajerial di Universitas Pertahanan selama 6 bulan, hingga penulis ditugaskan di wilayah Lampung Timur.

MOTTO

”Tidak ada kata terlambat untuk menciptakan kehidupan yang kamu inginkan”

”Dan berbuat baiklah (kepada orang lain) sebagaimana Allah telah berbuat baik
kepadamu”

(QS. Al-Qashash : 77)

PERSEMBAHAN

Dengan Penuh Rasa Syukur Kepada Allah SWT, karya ini dipersembahkan kepada:

Kedua Orang Tuaku

Bapak, Ibu, Suami dan Anak

Terima kasih untuk segala do'a dan usaha yang selalu diberikan demi kesuksesan putrinya hingga mampu menyelesaikan pendidikan di Tingkat Universitas sebagai magister

Keluarga Besar & Teman-teman

Terima kasih atas segala dukungan yang telah diberikan sehingga dapat tetap bertahan dalam keadaan suka maupun duka

Almamater Tercinta

UNIVERSITAS LAMPUNG

KATA PENGANTAR

Puji Syukur kehadirat Allah SWT. Tuhan Yang Maha Esa sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul **“Pengukuran Ketebalan Material Logam Dengan Menggunakan Non Destruktif Test (NDT) Metode *Ultrasonic Test*”**. Dengan segala kerendahan hati, penulis menyadari bahwa penyusunan tesis ini masih terdapat kesalahan dan masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun penulis harapkan untuk memperbaiki tesis ini. Semoga tesis ini bermanfaat bukan hanya untuk penulis, tetapi juga untuk para pembaca.

Bandar Lampung, 13 Juni 2025

Penulis,

Bela Wicaksana

SANWACANA

Alhamdulillah, penulis menyadari bahwa tesis ini dapat terselesaikan dengan baik berkat dorongan, bantuan dan motivasi dari berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Dr. Ir. Sri Ratna Sulistiyanti, M.T. selaku pembimbing pertama yang selalu membimbing dan mengarahkan dalam proses penyusunan tesis ini;
2. Bapak Dr. Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T. selaku pembimbing kedua yang telah memberikan saran dan masukan sehingga penulisan tesis ini menjadi lebih baik dan Ketua Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung;
3. Ibu Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si. selaku pembahas pertama dan pembimbing akademik yang senantiasa memberikan bimbingan selama masa perkuliahan dan mengarahkan dalam proses penyusunan tesis ini;
4. Ibu Dr. Sri Wahyu Suciwati, S.Si., M.Si. selaku pembahas kedua yang senantiasa mengarahkan dalam proses penyusunan tesis ini;
5. Bapak Drs. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung;
6. Bapak Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si. selaku Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung;
7. Dosen, staff dan karyawan di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam;
8. Bapak, Ibu, Suami, dan Anak yang telah memberikan dukungan doa semangat, motivasi dan kasih sayang kepada penulis;
9. Sahabat yang telah memberi semangat dan dukungan kepada penulis
10. Teman-teman Magister Fisika yang selalu memberi semangat selama perkuliahan dan penyusunan tesis ini;
11. Diri sendiri yang tidak memilih menyerah dan menyelesaikan berbagai

Kesulitan dari awal perkuliahan hingga tulisan ini dapat terselesaikan.

Semoga Allah SWT membalas dengan yang lebih baik dan menjadi pemberat amal di akhirat nanti, aamiin.

Bandar Lampung, 13 Juni 2025

Penulis,

Bela Wicaksana

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
MENGESAHKAN	v
PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
MOTTO	viii
PERSEMBAHAN	ix
KATA PENGANTAR	x
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xvii
I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Masalah	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Masalah	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Penelitian Terkait	4
2.2 Pengujian Material	4
2.3 Non Destruktif Tes	5
2.4 Ultrasonic Test.....	7
2.5 Gelombang Ultrasonik	11
2.6 Mode Perambatan Gelombang Ultrasoni	12

2.7 Teknik Pengujian Gelombang Ultrasonik	12
---	----

III. METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian.....	24
3.2 Alat dan Bahan Penelitian.....	24
3.3 Prosedur Penelitian	25
3.4 Pengujian Sistem dan Pengambilan Data.....	26
3.7 Pengambilan Data	28

IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian	
4.1.1 Hasil Pengukuran Ketebalan Material Logam Dengan Kondisi Segitiga ...	30
4.1.2 Hasil Pengukuran Ketebalan Material Logam Dengan Kondisi Lingkaran	33
4.1.3 Hasil Pengukuran Ketebalan Material Logam Dengan Kondisi Membentuk Sudut Sebesar 40°	35
4.1.4 Hasil Pengukuran Ketebalan Material Logam Dengan Kondisi Membentuk Sudut Sebesar 45°	38
4.1.5 Hasil Pengukuran Ketebalan Material Logam Dengan Kondisi Membentuk Sudut Sebesar 90°	40
4.1.6 Hasil Pengukuran Ketebalan Material Logam Dengan Kondisi Membentuk Huruf I	43
4.2 Pembahasan	45

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan	46
5.2 Saran.....	46

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Trans misi dan Refleksi pada medium yang berbeda	12
Gambar 2.2	Mode Gelombang Longitudial.....	14
Gambar 2.3	Mode Gelombang Transversal.....	15
Gambar 2.4	Mode Gelombang Permukaan	17
Gambar 2.5	Mode Gelombang Plat	19
Gambar 2.6	Probe Kontak	22
Gambar 2.7	Probe Imersi.....	22
Gambar 2.8	Probe Sudut.....	23
Gambar 2.9	Probe Dual Element.....	23
Gambar 2.10	Probe Phased Array.....	23
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	24
Gambar 3.2	Diagram blok sistem pendeteksi ketebalan material logam dengan menggunakan Non Destruktif Testing metode Ultrasonic Test... 25	
Gambar 4. 1	Contoh Bidang Material	26
Gambar 4. 2	Material Logam Dengan Kondisi Segitiga	29
Gambar 4. 3	Material Logam Yang Diukur Dengan Kondisi Segitiga.....	30
Gambar 4. 4	Material Logam Dengan Kondisi Lingkaran	34
Gambar 4. 5	Material Logam Yang Diukur Dengan Kondisi Lingkaran	33
Gambar 4. 6	Material Logam Dengan Kondisi Membentuk Sudut 40 °.....	36
Gambar 4. 7	Material Logam Yang Diukur Dengan Kondisi Membentuk Sudut 40°	36
Gambar 4. 8	Material Logam Dengan Kondisi Membentuk Sudut 45 °.....	39
Gambar 4. 9	Material Logam Yang Diukur Dengan Kondisi Membentuk Sudut 45°	39
Gambar 4. 1	Material Logam Dengan Kondisi Membentuk Sudut 90°	41
Gambar 4. 11	Material Logam Yang Diukur Dengan Kondisi Membentuk Sudut 90°	41
Gambar 4. 12	Material Logam Dengan Kondisi Membentuk Huruf I.....	44
Gambar 4. 13	Material Logam Yang Diukur Dengan Kondisi Membentuk Huruf I	43

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Cepat Rambat Impedansi.....	28
Tabel 3. 1 Hasil Pengujian Variasi Koordinat X,Y, dan Z Pada Material Logam.....	28
Tabel 4. 1 Data Hasil Pengukuran Pada Material Logam Dengan Kondisi Segitiga.....	31
Tabel 4. 2 Perbandingan Nilai Sebenarnya dan Nilai Pengukuran Pada Material Logam Dengan Kondisi Segitiga	32
Tabel 4. 3 Data Hasil Pengukuran Pada Material Logam Dengan Kondisi Lingkaran	33
Tabel 4. 4 Perbandingan Nilai Sebenarnya dan Nilai Pengukuran Pada Material Logam Dengan Kondisi Lingkaran	35
Tabel 4. 5 Data Hasil Pengukuran Pada Material Logam Dengan Kondisi Membentuk Sudut 40°	36
Tabel 4. 6 Perbandingan Nilai Sebenarnya dan Nilai Pengukuran Pada Material Logam Dengan Kondisi Membentuk Sudut 40°	37
Tabel 4. 7 Data Hasil Pengukuran Pada Material Logam Dengan Kondisi Membentuk Sudut 45°	38
Tabel 4. 8 Perbandingan Nilai Sebenarnya dan Nilai Pengukuran Pada Material Logam Dengan Kondisi Membentuk Sudut 45°	40
Tabel 4. 9 Data Hasil Pengukuran Pada Material Logam Dengan Kondisi Membentuk Sudut 90°	41
Tabel 4. 10 Perbandingan Nilai Sebenarnya dan Nilai Pengukuran Pada Material Logam Dengan Kondisi Membentuk Sudut 90°	42
Tabel 4. 11 Data Hasil Pengukuran Pada Material Logam Dengan Kondisi Membentuk Huruf I.....	43
Tabel 4. 12 Perbandingan Nilai Sebenarnya dan Nilai Pengukuran Pada Material Logam Dengan Kondisi Membentuk Huruf I	45
Tabel 4. 13 Rata-Rata Ketebalan Material Logam Berdasarkan Bentuk Yang Telah Di Kondisikan	46

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri modern, material yang digunakan sangat berdampak pada banyak hal. Salah satu contoh material yang seringkali digunakan pada dunia industri modern adalah logam. Logam merupakan elemen kimia yang memiliki karakteristik konduktivitas listrik yang tinggi dan plastisitas (mampu ditempa dan ditarik). Material logam biasanya digunakan pada banyak sektor misalnya konstruksi, manufaktur, otomotif, dan juga penerbangan. Dalam penggunaan material logam di dalam dunia industri modern salah satu parameter penting yang perlu dipertimbangkan adalah ketebalan. Karena parameter ketebalan logam dapat menentukan kekuatan, daya taham serta keamanan dari suatu logam tersebut. Karena itulah, pengukuran ketebalan material logam secara akurat dan efisien sangat dibutuhkan, baik dalam proses produksi maupun inspeksi kualitas.

Metode pengukuran ketebalan material logam dapat dilakukan dengan berbagai macam teknik. Mulai dari metode konvensional yaitu dengan menggunakan mikrometer ataupun kaliper. Hingga metode modern yaitu menggunakan metode non-destruktif yaitu seperti metode *ultrasonic thickness testing* (UTT), *eddy current testing*, *radiographic testing*, dan masih banyak metode lainnya. Dari berbagai macam metode non-destruktif salah satu metode yang paling banyak digunakan untuk melakukan pengukuran ketebalan tanpa merusak benda kerja dan mampu menjangkau permukaan yang hanya bisa diakses dari satu sisi adalah metode *ultrasonic thickness testing* (UTT) (Singh & Palanisamy, 2010).

Namun, penggunaan *ultrasonic thickness testing* (UTT) juga menghadapi sejumlah tantangan teknis, seperti kebutuhan permukaan yang bersih, penggunaan *couplant*, dan ketergantungan pada operator yang terlatih. Oleh karena itu, penting untuk terus melakukan evaluasi dan optimasi terhadap penggunaan metode ini,

terutama dalam lingkungan industri yang kompleks di mana kondisi permukaan dan geometri material sangat bervariasi.

Penggunaan teknologi non-destruktif ini juga menjadi krusial pada inspeksi material logam yang sudah digunakan dalam jangka waktu tertentu, seperti pipa saluran gas, tangki penyimpanan, dan struktur baja, di mana ketebalan logam dapat berkurang akibat korosi atau keausan. Penurunan ketebalan yang tidak terdeteksi dapat menyebabkan kerusakan struktural yang fatal, sehingga pemantauan secara berkala sangat diperlukan (Hellier, 2012).

Penelitian ini menggunakan alat detektor untuk mendeteksi ketebalan logam dengan pemanfaatan gelombang ultrasonik menggunakan metode non-destruktif. Gelombang ultrasonik digunakan karena mempunyai frekuensi yang tinggi sehingga dapat menembus suatu medium. Objek dalam penelitian ini dideteksi tanpa menyentuh (*non-contact*) atau merusaknya (*non-destructive testing*, NDT). Frekuensi yang dapat digunakan pada penelitian ini adalah 5MHz dengan tingkat ketelitian hingga 0,01 mm. Hasil dari pendeteksian tersebut akan ditampilkan pada koordinat X,Y,dan Z serta ditampilkan dalam bentuk gambar dua dimensi yang dimana keluaran dari *software Surfer*.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana hasil dari pengukuran ketebalan logam dengan menggunakan metode *ultrasonic thickness testing* (UTT) untuk bentuk koordinat X,Y, Z?
2. Bagaimana hasil dari pengukuran ketebalan logam dengan menggunakan metode *ultrasonic thickness testing* (UTT) untuk bentuk gambar di *software Surfer*?
3. Bagaimana perbandingan hasil dari koordinat X,Y,Z terhadap gambar yang dihasilkan oleh *software surfer*?

1.3 Tujuan Masalah

Tujuan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dapat mengetahui hasil pengukuran ketebalan logam dengan metode *ultrasonic thickness testing* (UTT) dalam bentuk koordinat X,Y, dan Z.;
2. Dapat mengetahui hasil pengukuran ketebalan logam dengan metode *ultrasonic thickness testing* (UTT) dalam bentuk gambar dua dimensi; dan
3. Dapat membandingkan hasil pengukuran menggunakan *ultrasonic thickness testing* (UTT) dalam bentuk koordinat X,Y, Z terhadap hasil gambar dari *software surfer*.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah untuk memudahkan dalam pengecekan ketebalan logam dengan menggunakan metode non-destruktif.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menggunakan alat ukur metode *ultrasonic thickness testing* (UTT) jenis GM 100 Benetech.;
2. Logam yang diukur hanya ukuran 5cm x 5cm;
3. Penggunaan aplikasi *surfer*; dan
4. Metode yang digunakan yaitu NDT.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh (Mei, 2019) mengenai pembuatan alat pendeteksi ulat dalam buah menggunakan sensor ultrasonik HC-SR04. Alat yang dikendalikan mikrokontroler dalam modul Arduino Uno ini dibuat untuk membantu masyarakat mengetahui ada tidaknya ulat dalam buah mangga yang akan dibeli atau dimakan, dan memudahkan eksportir dalam mensortir buah mangga yang hendak diekspor. Modul sensor ultrasonik HC-SR04 bekerja berdasarkan prinsip lamanya waktu perambatan gelombang ultrasonik sejak dipancarkan oleh transmitter hingga diterima kembali oleh receiver pada modul yang sama akibat pemantulan oleh objek. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tegangan keluaran sensor lebih besar ketika mendeteksi buah yang berulat (yaitu di atas 30 mV) daripada buah tak-berulat (di bawah 30 mV). Hal ini terjadi karena buah yang berulat memiliki struktur dalam yang lebih lunak atau berongga sehingga gelombang ultrasonik dapat menembus lebih dalam, mengakibatkan waktu perambatan gelombang menjadi lebih lama dibandingkan pada buah yang tak-berulat. Hasil pengujian juga memperlihatkan bahwa pendeteksian paling efektif terjadi ketika detektor berjarak 6 cm, detektor hanya dapat mendeteksi keberadaan ulat pada salah satu sisi mangga dengan keakuratan alat sebesar 84,6%.

2.2 Pengujian Material

Dalam proses pengujian sebuah bahan, terdapat dua jenis pengujian yang dapat dilakukan berdasarkan sifat dari pengujian tersebut, adalah :

1) Pengujian Destruktif

Pengujian destruktif merupakan pengujian yang bersifat merusak bahan yang diuji. Sehingga, bahan yang diuji tersebut akan mengalami kerusakan baik untuk sifat, bentuk, ataupun dimensi dari material tersebut. Contoh-contoh pengujian

yang bersifat merusak atau destruktif adalah pengujian tarik, pengujian kekerasan, pengujian impact, serta masih banyak pengujian lainnya.

2) Pengujian Non Destruktif

Pengujian Non Destruktif merupakan kebalikkan dari pengujian destruktif. Artinya jika pengujian destruktif adalah pengujian yang dilakukan dengan merusak sedangkan untuk pengujian non destruktif adalah pengujian yang tidak merusak sifat, bentuk, ataupun dimensi dari material yang diuji (ASME, 2015).

2.3 Non Destruktif Test

Non Destruktif Test (NDT) atau Pengujian Tanpa Merusak adalah metode pengujian material, komponen, atau struktur tanpa menyebabkan kerusakan permanen terhadap benda yang diuji. Menurut Hellier (2001), NDT merupakan serangkaian teknik analisis yang digunakan untuk mengevaluasi sifat material atau sistem tanpa mengubah integritas asli objek yang diuji. Hal ini menjadikan NDT sangat penting dalam industri seperti penerbangan, otomotif, energi, dan konstruksi, di mana keselamatan dan keandalan sangat krusial (Moore dkk, 2012). Tujuan utama dari NDT adalah untuk mendeteksi cacat atau ketidaksesuaian pada material yang dapat mengancam integritas struktural tanpa menghancurkan produk tersebut. Menurut ASNT (*American Society for Nondestructive Testing*), manfaat utama NDT antara lain:

- 1) Menjamin keselamatan dan keandalan produk.
- 2) Memperpanjang umur pakai komponen atau struktur.
- 3) Mengurangi biaya inspeksi karena tidak perlu mengganti atau menghancurkan material.

Terdapat beberapa *metode Non Destruktif Test* (NDT) yang biasa digunakan antara lain :

1) *Visual Testing* (VT)

Pengujian ini merupakan pengujian yang dilakukan hanya dengan menggunakan mata manusia. Test ini merupakan test yang paling sederhana diantara metode test lainnya pada metode *Non Destruktif Test* (NDT). Metode ini pun biasanya akan digabungkan dengan metode lainnya. Serta metode ini merupakan metode paling pertama yang digunakan. Prinsip kerja dari metode *Visual Testing* (VT) sangat

sederhana yaitu hanya dengan menggunakan mata manusia yang hanya dibantu dengan kaca pembesar saja. Metode ini digunakan untuk menemukan cacat ataupun keretakan permukaan. Dalam hal ini keretakan yang dimaksud adalah keretakan yang masih dapat dilihat dengan mata ataupun bantuan kaca pembesar (Malhota & Carino, 2004).

2) *Ultrasonic Testing (UT)*

Inspeksi ultrasonik merupakan salah satu metode pengujian NDT yang memanfaatkan gelombang ultrasonik berfrekuensi tinggi untuk mendeteksi keberadaan cacat internal maupun mengukur ketebalan suatu material. Prinsip dasar dari teknik ini adalah pemanfaatan gelombang akustik, umumnya dengan frekuensi antara 0,5 hingga 20 MHz, yang dipancarkan dan dipantulkan dalam medium padat. Gelombang ultrasonik dihasilkan oleh sebuah transduser piezoelektrik, yaitu perangkat yang dapat mengubah energi listrik menjadi getaran mekanik, dan sebaliknya. Ketika transduser ini ditempelkan pada permukaan material yang diuji (dengan bantuan medium kopel, biasanya berupa gel), gelombang suara ditransmisikan ke dalam material dan sebagian dipantulkan kembali jika menemui diskontinuitas seperti retakan, *void* (rongga udara), delaminasi, atau batas antar lapisan. Pada prinsip kerjanya. Gelombang yang dipantulkan kembali ke transduser akan diubah kembali menjadi sinyal listrik, yang kemudian dianalisis oleh perangkat penerima. Perubahan waktu tempuh gelombang, amplitudo, serta bentuk gelombang yang diterima memberikan informasi penting tentang keberadaan, ukuran, dan kedalaman cacat. Apabila tidak ditemukan anomali dalam jalur rambat gelombang, metode ini juga dapat digunakan untuk melakukan pengukuran ketebalan material, dengan tingkat ketelitian yang tinggi. Misalnya, pengukuran ketebalan dinding pipa baja dalam sistem perpipaan bertekanan tinggi dapat dilakukan secara presisi menggunakan metode ini, tanpa harus menghentikan operasi atau memotong pipa. Keunggulan utama metode ini terletak pada kemampuannya menembus jauh ke dalam material, serta sensitivitas tinggi terhadap cacat internal. Selain itu, metode ini bersifat non-destruktif, portabel, dan dapat memberikan hasil secara real-time. Namun, penggunaan metode ini juga memiliki beberapa keterbatasan. Hasil

inspeksi sangat bergantung pada keahlian operator, terutama dalam interpretasi sinyal pantulan. Selain itu, geometri kompleks atau permukaan yang tidak rata dapat mengganggu propagasi gelombang dan menurunkan akurasi hasil. (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990)

3) *Radiographic Testing (RT)*

Radiographic Testing (RT) merupakan salah satu metode pengujian NDT yang menggunakan radiasi elektromagnetik dalam bentuk sinar-X (X-ray) atau sinar gamma untuk mendeteksi cacat internal pada suatu material. Metode ini didasarkan pada prinsip perbedaan penyerapan radiasi oleh material yang diuji. Radiasi dipancarkan dari sumber eksternal dan diarahkan ke objek uji, lalu sebagian sinar tersebut akan diserap oleh material, tergantung pada ketebalan dan densitasnya. Prinsip kerja pada metode ini adalah Ketika sinar-X atau gamma menembus suatu material, sinyal radiasi akan mengalami atenuasi (penurunan intensitas) karena interaksi dengan atom dalam struktur material. Daerah yang lebih padat akan menyerap lebih banyak radiasi, sementara daerah yang memiliki cacat seperti retakan, porositas, atau rongga udara akan menyerap lebih sedikit. Perbedaan intensitas sinar ini kemudian ditangkap oleh media perekam, seperti film radiografi konvensional atau detektor digital, dan diinterpretasikan sebagai gambar bayangan. Hasil pencitraan menunjukkan kontras antara daerah yang cacat dan yang utuh. Biasanya, area gelap (hitam) pada film menunjukkan bagian yang padat atau utuh, sedangkan area terang (putih atau abu-abu muda) mengindikasikan keberadaan cacat, karena radiasi lebih banyak melewati bagian tersebut dan meninggalkan jejak yang lebih kuat pada film. Salah satu keunggulan utama dari radiographic testing adalah kemampuannya menghasilkan citra visual dari struktur internal material, sehingga sangat efektif dalam mendeteksi cacat volumetrik. Selain itu, hasil pengujian dapat didokumentasikan dalam bentuk arsip film atau data digital, yang berguna untuk audit teknis dan pemeliharaan preventif (Sulaiman dkk, 2020). Namun, metode ini juga memiliki sejumlah keterbatasan, antara lain:

1. Risiko radiasi bagi operator, sehingga memerlukan pengamanan ketat dan sertifikasi khusus dalam penggunaannya;

2. Kurang sensitif terhadap cacat planar (seperti retakan tipis yang sejajar arah pancaran sinar);
3. Tidak efektif untuk material sangat tebal, karena penyerapan radiasi bisa terlalu tinggi, serta;
4. Proses interpretasi gambar memerlukan pengalaman teknis tinggi, terutama dalam membedakan antara indikasi cacat nyata dan bayangan semu (artefak).

4. Magnetic Particle Testing (MT)

Magnetic Particle Testing (MT) merupakan metode yang dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui cacat pada permukaan (*surface*) dan juga pada permukaan bawah (*subsurface*) dari suatu material yang berbahan dasar ferromagnetik. Melalui metode Magnetic Particle Testing (MT) ini material dengan bahan dasar ferromagnetik dapat diketahui cacat pada permukaan (*surface*) ataupun pada permukaan bawah (*subsurface*). Prinsip dari metode ini adalah melalui memagnetisasi bahan ataupun material yang akan dilakukan pengujian. Dengan terdapatnya cacat yang tegak lurus terhadap medan magnet maka hal tersebut akan menyebabkan kebocoran terhadap medan magnet. Kebocoran tersebut akan mengindikasikan bahwa terdapat cacat pada material yang diukur tersebut. Cara yang digunakan untuk melakukan pendeteksian adanya kebocoran medan magnet tersebut ialah dengan menaburkan partikel magnetik pada permukaan material. Maka, nantinya partikel tersebut akan berkumpul pada daerah kebocoran medan magnet. Namun, metode ini memiliki kelemahan yaitu material yang dapat diukur hanya material yang berbahan dasar ferromagnetik. Kelemahan selanjutnya adalah medan magnet yang dibangkitkan harus tegak lurus ataupun memotong daerah cacat. Serta kesulitan lainnya adalah metode ini memerlukan demagnetisasi pada saat selesai melakukan pengujian (Crishtin dkk, 2021).

5) *Liquid Penetrant Testing (PT)*

Liquid Penetrant Inspection (PT), juga dikenal sebagai *Dye Penetrant Testing (DPT)*, merupakan salah satu teknik pengujian NDT yang paling sederhana dan ekonomis. Metode ini digunakan secara luas untuk mendeteksi cacat permukaan terbuka seperti retakan halus (*microcracks*), kekeroposan (*porosity*), dan

discontinuity lain pada material padat non-poros. Cacat-cacat tersebut bisa muncul akibat proses manufaktur seperti pengecoran, pengelasan, dan pembentukan, atau karena fatigue dan degradasi akibat penggunaan jangka panjang. Prinsip utama dari PT adalah kapilaritas, yaitu kemampuan cairan untuk meresap ke dalam celah sempit tanpa bantuan gaya eksternal, karena adanya tegangan permukaan rendah dan daya adhesi tinggi dari penetrant. Proses pengujian terdiri dari beberapa tahap sistematis: Pembersihan permukaan (*pre-cleaning*): Permukaan material dibersihkan dari kotoran, minyak, atau oksida agar penetrant dapat meresap secara efektif. Aplikasi penetrant: Cairan penetrant, biasanya berwarna merah terang atau fluoresen, diaplikasikan pada permukaan dan dibiarkan beberapa menit agar meresap ke dalam cacat. Penghapusan penetrant berlebih: Penetrant yang tidak masuk ke cacat dibersihkan secara hati-hati dari permukaan tanpa mengganggu cairan yang sudah masuk ke dalam cacat. Aplikasi developer: Lapisan developer (bubuk putih atau cairan berbasis pelarut) diaplikasikan untuk menarik penetrant dari dalam cacat ke permukaan, sehingga menciptakan indikasi visual kontras pada permukaan. Interpretasi hasil: Cacat akan tampak sebagai garis atau noda warna mencolok di atas latar belakang terang. Inspektor kemudian mengevaluasi bentuk, ukuran, dan pola cacat tersebut. Keunggulan LPI terletak pada kesederhanaan proses, biaya yang relatif rendah, dan kemampuan mendeteksi cacat halus pada permukaan tanpa merusak komponen. Proses ini juga tidak memerlukan peralatan mahal dan bisa dilakukan di lapangan dengan hasil yang cepat. Namun, metode ini memiliki keterbatasan signifikan: Tidak dapat mendeteksi cacat internal atau yang tertutup oleh lapisan pelindung. Tidak efektif pada material berpori, karena penetrant akan terserap ke seluruh permukaan dan menyebabkan hasil tidak akurat, serta keakuratan inspeksi sangat bergantung pada pembersihan awal dan pengalaman inspektor dalam membaca indikasi (Wijaya, 2019).

6) Eddy Current Testing (ET)

Eddy Current Testing (ET) merupakan salah satu metode pengujian non-destruktif (NDT) yang memanfaatkan prinsip induksi elektromagnetik untuk mendeteksi cacat pada material logam. Teknik ini dilakukan dengan mengalirkan arus listrik

bolak-balik (AC) melalui kumparan penghantar, sehingga menghasilkan medan magnet di sekelilingnya. Ketika kumparan ini didekatkan ke permukaan logam yang menjadi objek uji, medan magnet yang terbentuk akan menginduksi terbentuknya arus pusar atau *eddy current* di dalam material tersebut. Arus pusar ini secara alami akan menciptakan medan magnet sekunder yang memiliki arah berlawanan terhadap medan magnet awal. Jika terdapat ketidakaturan struktural seperti retakan, korosi, atau perubahan ketebalan pada logam, maka arus Eddy yang terbentuk akan terganggu. Gangguan ini menyebabkan perubahan karakteristik medan magnet sekunder, yang kemudian berdampak pada perubahan impedansi pada kumparan induktor. Perubahan impedansi inilah yang dianalisis untuk mengidentifikasi keberadaan dan lokasi cacat. Dalam praktiknya, metode ini sangat efektif untuk mendeteksi cacat permukaan dan sub-permukaan dangkal, khususnya pada bahan logam konduktif seperti aluminium, baja tahan karat, dan tembaga. Misalnya, dalam industri penerbangan, ET digunakan untuk memeriksa adanya retakan rambut (*hairline cracks*) pada bilah turbin atau badan pesawat tanpa harus membongkar komponen secara keseluruhan. Namun, metode ini memiliki keterbatasan penting, yaitu sensitivitasnya menurun drastis pada cacat yang berada jauh di bawah permukaan. Oleh karena itu, ET paling cocok digunakan untuk inspeksi permukaan atau cacat dangkal. Selain itu, ET tidak dapat digunakan pada material non-logam seperti plastik atau keramik karena prinsip kerjanya bergantung pada kemampuan material untuk menghantarkan arus listrik (Cox, 1997).

2.4 Ultrasonic Test

Ultrasonic Testing (UT) merupakan salah satu metode Non Destructif Test (NDT) yang menggunakan gelombang ultrasonik frekuensi tinggi (biasanya antara 1–10 MHz) untuk mendeteksi cacat internal pada material padat. Prinsip dasar UT adalah pemancaran gelombang ultrasonik ke dalam material, lalu menganalisis gelombang yang dipantulkan kembali dari batas-batas antar lapisan atau cacat dalam material. (Krautkrämer & Krautkrämer, 1990). Menurut Hellier (2001), UT adalah metode yang sangat efektif untuk inspeksi internal karena mampu

mendeteksi retakan, porositas, inklusi, dan ketidakhomogenan lainnya dengan akurasi tinggi.

Metode UT bekerja berdasarkan prinsip pantulan (pulse-echo) dan transmisi gelombang ultrasonik. Gelombang dipancarkan oleh transduser ke dalam material, kemudian pantulan gelombang dari cacat atau batas belakang material akan ditangkap oleh transduser penerima. Waktu tempuh gelombang dan amplitudonya dianalisis untuk menentukan lokasi dan ukuran cacat (Latifah dkk, 2020).

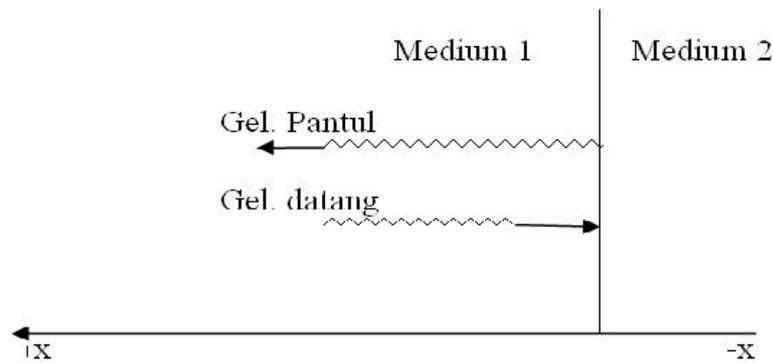
Jenis gelombang ultrasonik yang digunakan antara lain:

1. *Longitudinal wave* (gelombang tekan)
2. *Shear wave* (gelombang geser)
3. *Surface wave* (gelombang permukaan)

2.5 Gelombang Ultrasonik

Gelombang ultrasonik adalah gelombang bunyi yang memiliki daerah frekuensi diatas daerah frekuensi pendengaran manusia. Ultrasonik merambat dalam bentuk gelombang, sama dengan merambatnya cahaya, tapi tidak seperti gelombang cahaya yang dapat merambat dalam ruang hampa udara (*vacuum*), gelombang ultrasonik memerlukan medium untuk merambat seperti pada medium udara, cair dan tidak memperbesar apapun pada formasi citra, tapi transmisi harus cukup kuat menghasilkan gema-gema ditingkat yang lebih dalam. Prosentase suara yang direfleksikan diantara muka jaringan tergantung pada impedansi (Linggasari, 2019).

Impedansi akustik merupakan sifat dasar materi atau zat, dalam satuan cgs didefinisikan sebagai $\text{gram/cm}^2\text{det} \times 10^{-5}$. Apabila gelombang ultrasonik mengenai permukaan antara dua jaringan yang memiliki perbedaan impedansi akustik, maka sebagian dari gelombang Ultrasonik ini akan direfleksikan atau dipantulkan dan sebagian lagi akan ditransmisikan atau diteruskan seperti pada **Gambar 2.1**.



Gambar 2. 1 Transmisi dan Refleksi pada medium yang berbeda (Linggasari, 2019).

2.6 Mode Perambatan Gelombang Ultrasonik

Terdapat beberapa mode yang terjadi untuk perambatan gelombang ultrasonik, yaitu:

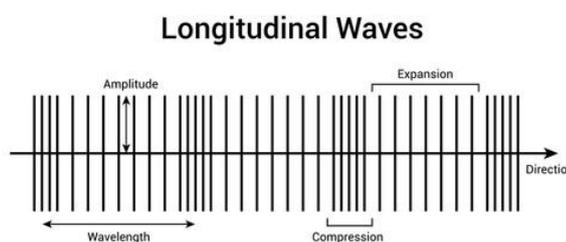
1. Mode Gelombang Longitudinal

Gelombang longitudinal merupakan jenis gelombang mekanik di mana arah perambatannya sejajar dengan arah osilasi partikel dalam medium yang dilaluinya. Dalam proses perambatan ini, partikel-partikel medium mengalami getaran bolak-balik yang sejajar dengan arah penyebaran energi, berbeda dengan gelombang transversal yang memiliki arah getar tegak lurus terhadap arah rambatnya (Kalimuthu dkk, 2020).

Kecepatan dan panjang gelombang longitudinal sangat dipengaruhi oleh sifat fisik medium, seperti kerapatan dan modulus elastisitas. Semakin rapat dan elastis suatu bahan, maka semakin cepat gelombang ini dapat merambat melaluinya. Salah satu keunggulan gelombang longitudinal adalah kemampuannya merambat melalui berbagai jenis medium, baik itu gas, cairan, maupun padatan, menjadikannya gelombang yang sangat penting dalam berbagai aplikasi fisika dan teknik, seperti dalam teknologi ultrasonik dan pemrosesan seismik (Mujab, 2020). Dalam hal arah perambatan, gelombang longitudinal dapat mengikuti arah yang sama maupun berlawanan dengan arah transfer energi, tergantung pada konfigurasi sistem yang digunakan dalam pengamatannya. Misalnya, dalam sistem pantulan gelombang, arah rambat gelombang dapat menuju sumber

maupun menjauhinya. Gelombang ini juga dikenal sebagai gelombang kompresi atau gelombang kompresional, karena selama perambatannya, ia menimbulkan zona-zona kompresi (pemadatan) dan rarefaksi (pengurangan kerapatan) dalam medium. Perubahan tekanan yang berulang ini membentuk pola propagasi yang khas dan dapat dimanfaatkan untuk mendeteksi struktur internal suatu material atau lingkungan, seperti dalam aplikasi ultrasonic testing dan pendeteksian geofisika (Susanti dkk, 2021).

Penting untuk dicatat bahwa gelombang longitudinal membutuhkan medium fisik sebagai sarana perambatan. Tidak seperti gelombang elektromagnetik yang dapat merambat dalam ruang hampa, gelombang mekanik seperti gelombang longitudinal tidak dapat merambat tanpa keberadaan partikel medium yang dapat berinteraksi satu sama lain. Adapun mode gelombang longitudinal seperti pada **Gambar 2.2**.



shutterstock.com · 2160402573

Gambar 2. 2 Mode Gelombang Longitudial (Hasbullah, 2008).

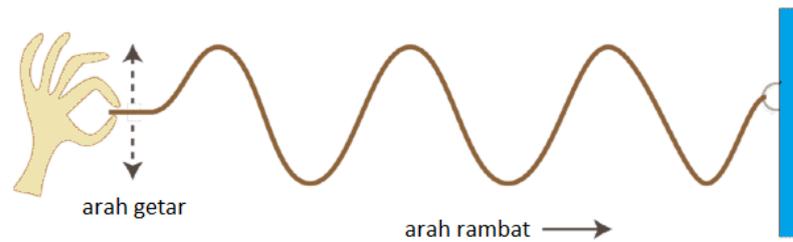
2. Mode Gelombang Transversal

Gelombang transversal merupakan salah satu jenis gelombang mekanik yang memiliki ciri khas utama berupa arah rambat yang tegak lurus terhadap arah osilasi partikel dalam medium. Artinya, jika energi gelombang ditransmisikan secara horizontal, maka partikel-partikel di dalam medium akan bergerak ke atas dan ke bawah atau secara vertikal. Konsep ini sangat penting dalam memahami dinamika gelombang karena membedakan gelombang transversal dari gelombang longitudinal, yang arah getarannya sejajar dengan arah rambat. Keberadaan dua arah yang saling tegak lurus menjadikan gelombang transversal relevan dalam berbagai fenomena alam dan sistem fisik (Susanti, 2021).

Gelombang transversal, sebagaimana gelombang lainnya, ditentukan oleh beberapa parameter utama seperti panjang gelombang, frekuensi, amplitudo, dan kecepatan rambat. Kecepatan rambat gelombang transversal ditentukan oleh sifat fisik medium, khususnya modulus elastisitas (misalnya modulus Young) dan massa jenis medium. Hubungan ini menunjukkan bahwa medium yang lebih kaku dengan kerapatan partikel yang relatif rendah cenderung mempercepat rambatan gelombang. Oleh karena itu, pengukuran sifat gelombang dapat digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik suatu material, termasuk kekuatan dan kerapatannya (Mujab dkk, 2020).

Salah satu karakteristik mendasar dari gelombang transversal adalah ketidakmampuannya merambat melalui medium cair atau gas. Hal ini disebabkan karena zat cair dan gas tidak memiliki kekakuan transversal yang cukup untuk mentransmisikan gaya tegak lurus antarpartikel secara konsisten. Sebaliknya, pada medium padat, partikel-partikelnya memiliki keterikatan yang kuat sehingga memungkinkan terjadinya perpindahan gaya dalam arah tegak lurus terhadap perambatan energi. Dengan demikian, keberadaan gelombang transversal secara alamiah hanya dapat diamati dalam kondisi di mana medium memiliki struktur internal yang mendukung ikatan antarpartikel (Latifa dkk, 2020).

Gelombang transversal seringkali divisualisasikan dalam bentuk grafik sinusoidal, yang menggambarkan hubungan antara amplitudo dan posisi terhadap waktu atau jarak. Bentuk sinusoidal ini tidak hanya berguna dalam representasi visual, tetapi juga menjadi dasar dalam perumusan matematis gelombang, khususnya dalam solusi terhadap persamaan gelombang harmonik. Model matematis ini memungkinkan analisis lebih lanjut mengenai fase, interferensi, resonansi, dan fenomena gelombang lainnya. Representasi ini menjadi penting dalam banyak aplikasi fisika, termasuk perhitungan medan dalam gelombang elektromagnetik dan vibrasi dalam sistem mekanik, Adapun mode transversal seperti pada **Gambar 2.3**.



Gambar 2. 3 Mode Gelombang Transversal (Latifa dkk, 2020)

3. Mode Permukaan

Gelombang permukaan adalah jenis gelombang transversal khusus yang merambat sepanjang permukaan suatu medium padat, bukan melalui keseluruhan volumenya. Pada mode gelombang ini, partikel-partikel di dekat permukaan medium tidak hanya berosilasi secara vertikal atau horizontal, melainkan mengikuti lintasan berbentuk elips. Gerak eliptik ini merupakan hasil dari superposisi antara komponen transversal dan longitudinal, sehingga menghasilkan pola gerak kompleks yang khas dari gelombang permukaan. Sesuai dengan karakteristik fisiknya, gelombang ini hanya menjalar di lapisan paling luar dari medium padat, dengan kedalaman penetrasi maksimum setara dengan satu panjang gelombang. Di bawah kedalaman ini, amplitudo osilasi berkurang secara eksponensial, sehingga energi gelombang semakin melemah dan praktis tidak memiliki efek signifikan pada struktur yang lebih dalam (Rakhmat dkk,2020).

Gelombang permukaan memiliki signifikansi penting dalam berbagai bidang ilmu dan teknik. Dalam seismologi, gelombang permukaan—khususnya gelombang Rayleigh dan Love—berperan besar dalam menyebabkan kerusakan struktural selama peristiwa gempa bumi karena amplitudo dan energi yang terfokus pada permukaan tanah. Gelombang Rayleigh menimbulkan gerakan eliptik retrograde pada partikel tanah, sedangkan gelombang Love menghasilkan gerak horizontal transversal yang sangat merusak. Di bidang rekayasa material dan non destruktif testing (NDT), gelombang permukaan digunakan untuk mendeteksi cacat pada permukaan atau dekat permukaan material tanpa merusak strukturnya. Karena sensitif terhadap ketidakrataan pada permukaan, gelombang ini menjadi alat diagnostik yang andal dalam pengujian logam, keramik, dan komposit (Wong & Shahirah, 2019).

Secara teoritis, perambatan gelombang permukaan dapat dianalisis melalui persamaan elastodinamika, dengan solusi yang menunjukkan bahwa kecepatan gelombang permukaan lebih rendah dibandingkan gelombang transversal maupun longitudinal dalam medium yang sama. Sifat ini mempengaruhi urutan kedatangan gelombang pada sistem pengukuran seperti seismograf. Selain itu, amplitudo gelombang permukaan yang lebih besar di permukaan menjadikannya parameter penting dalam perancangan bangunan tahan gempa dan sistem peredam getaran (Agustina, 2022).

Dalam konteks pengembangan teknologi modern, gelombang permukaan juga dimanfaatkan dalam perangkat *Surface Acoustic Wave* (SAW), yang digunakan dalam sensor tekanan, suhu, dan perangkat komunikasi frekuensi tinggi. Kemampuan gelombang permukaan untuk merespons perubahan fisik pada permukaan material menjadikannya elemen utama dalam sistem deteksi berbasis akustik dan mikroelektronika. Oleh karena itu, pemahaman mendalam mengenai karakteristik dan perilaku gelombang permukaan menjadi hal yang esensial dalam berbagai bidang penelitian dan aplikasi rekayasa, digambarkan modenya seperti pada **Gambar 2.4**



Gambar 2. 4 Mode Gelombang Permukaan

4. Mode Pelat

Mode pelat (plate mode) adalah bentuk khusus dari perambatan gelombang transversal yang terjadi ketika gelombang merambat pada struktur padat bergeometri pelat tipis, yakni ketika ketebalan material kurang dari setengah panjang gelombang yang dipancarkan. Dalam kondisi ini, partikel-partikel penyusun medium tidak hanya bergetar dalam satu arah, melainkan mengalami gerakan elips sebagai hasil dari interaksi komponen transversal dan longitudinal di dalam pelat. Gelombang pelat menyebar melalui keseluruhan volume pelat tipis tersebut, bukan hanya terbatas pada permukaan atau satu sisi material (Sari & Widiyanto, 2021).

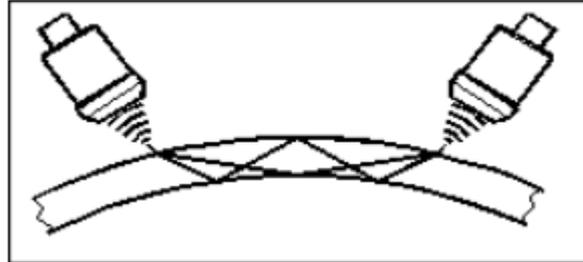
Gelombang yang merambat pada pelat tipis dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis utama, yaitu gelombang simetris (mode-S) dan gelombang asimetris (mode-A). Pada mode simetris, partikel di sisi atas dan bawah pelat bergerak ke arah yang sama secara serempak terhadap bidang netral pelat, menciptakan pola osilasi yang seimbang. Sebaliknya, pada mode asimetris, partikel di sisi atas dan bawah bergerak dengan arah yang berlawanan, menciptakan gerakan lentur yang kompleks. Keduanya memiliki kecepatan, panjang gelombang, dan karakteristik propagasi yang berbeda, tergantung pada frekuensi gelombang serta ketebalan dan sifat mekanik dari pelat tersebut (Marisa & Wahyuni, 2020).

Mode pelat sangat penting dalam berbagai aplikasi pengujian material, terutama dalam teknik NDT dan struktur monitoring. Karena mampu menjalar melalui seluruh ketebalan pelat, gelombang ini efektif dalam mendeteksi cacat internal seperti retakan, delaminasi, atau penipisan material, yang tidak dapat dideteksi hanya dengan gelombang permukaan. Selain itu, gelombang pelat juga sangat sensitif terhadap perubahan kecil dalam ketebalan dan sifat material, sehingga dapat digunakan untuk pemantauan kondisi struktural secara berkelanjutan (structural health monitoring) (Madani, 2021).

Secara teoritis, perambatan gelombang pelat dapat dijelaskan menggunakan model matematis seperti persamaan Lamb, yang menggambarkan solusi elastodinamik untuk pelat elastis tak terbatas. Persamaan ini menghasilkan spektrum mode gelombang yang kompleks dan dispersi, di mana kecepatan rambat bergantung pada frekuensi. Karena adanya dispersi ini, interpretasi sinyal gelombang pelat memerlukan analisis frekuensi-waktu yang cermat, menggunakan teknik seperti transformasi Fourier atau gelombanglet. Hal ini menjadi tantangan sekaligus peluang dalam pengembangan sistem diagnostik berbasis akustik (Susilo, 2023).

Dalam dunia industri dan teknologi modern, pemanfaatan gelombang pelat semakin luas, mulai dari inspeksi pipa, tangki, dan panel pesawat terbang, hingga aplikasi dalam sistem sensor ultrasonik frekuensi rendah. Keunggulan utamanya terletak pada kemampuannya untuk meliputi area luas dalam waktu singkat dengan penetrasi menyeluruh terhadap struktur tipis. Oleh karena itu, pemahaman

mendalam mengenai mode pelat tidak hanya penting secara teoritis, tetapi juga sangat relevan secara praktis dalam menjamin keselamatan dan keandalan struktur teknik, Adapun gelombang plat seperti pada **Gambar 2.5**



Gambar 2. 5 Mode Gelombang Plat

2.7 Teknik Pengujian Gelombang Ultrasonik

Pengujian ultrasonik UT merupakan metode non destruktif yang memanfaatkan gelombang ultrasonik frekuensi tinggi untuk mendeteksi ketebalan material maupun keberadaan cacat internal pada suatu komponen padat. Teknik ini dikenal memiliki sensitivitas tinggi terhadap ketidakraturan di dalam material tanpa perlu merusak atau membongkar struktur yang diuji. Secara umum, terdapat tiga pendekatan utama dalam penerapan pengujian ultrasonik, yaitu teknik resonansi, teknik transmisi, dan teknik gema (*pulse-echo*). Ketiganya memanfaatkan prinsip pantulan, perambatan, dan interaksi gelombang ultrasonik dengan batas-batas internal maupun eksternal suatu bahan (Lingasari, 2019).

Teknik resonansi berfokus pada prinsip resonansi gelombang akustik yang terjadi ketika frekuensi sinyal yang diberikan sesuai dengan frekuensi alami osilasi medium. Dengan mengukur frekuensi resonansi tertentu, ketebalan material dapat ditentukan secara akurat. Teknik ini banyak digunakan untuk pengukuran ketebalan bahan secara presisi tinggi, terutama pada benda uji dengan permukaan sejajar dan datar. Namun, teknik ini lebih sensitif terhadap kondisi permukaan dan tidak efektif jika terdapat cacat yang tidak sejajar dengan permukaan alat (Saputra dkk, 2017).

Teknik transmisi menggunakan dua buah transduser, satu sebagai pemancar dan satu lagi sebagai penerima, yang diletakkan di sisi berlawanan dari material yang

diuji. Jika tidak terdapat cacat di antara kedua transduser, maka gelombang akan diteruskan tanpa hambatan signifikan. Sebaliknya, kehadiran cacat seperti rongga atau retakan akan mengurangi atau menghambat transmisi sinyal, yang dapat terdeteksi sebagai penurunan intensitas pada penerima. Teknik ini sangat baik untuk pengujian bahan homogen dan komponen berukuran tetap, namun kurang praktis untuk penggunaan di lapangan karena memerlukan akses dari dua sisi material (Dwi, 2018).

Teknik gema (pulse-echo) adalah metode paling umum dan fleksibel dalam praktik lapangan. Dalam teknik ini, satu transduser bertindak sebagai pemancar sekaligus penerima gelombang ultrasonik. Gelombang dikirim ke dalam material dan akan dipantulkan kembali oleh batas permukaan belakang atau oleh ketidakrataan internal seperti retakan, pori, atau inklusi. Waktu tempuh antara pengiriman dan penerimaan gelombang digunakan untuk menentukan lokasi dan ukuran cacat, serta ketebalan material. Keunggulan teknik gema terletak pada kemampuannya melakukan pemeriksaan dari satu sisi saja, sehingga sangat ideal untuk inspeksi lapangan pada struktur besar seperti pipa, pelat, atau tangki. Dalam konteks industri, terutama pada sektor minyak dan gas, petrokimia, serta manufaktur, teknik gema digunakan secara luas untuk memantau integritas struktur secara berkala. Akurasi tinggi, kemudahan penggunaan, serta kemampuan untuk menghasilkan data dalam bentuk digital menjadikan metode ini sebagai pilihan utama dalam inspeksi berbasis gelombang ultrasonik. Dengan perkembangan teknologi transduser dan sistem analisis digital, teknik gema kini dapat diintegrasikan dengan pemrosesan sinyal lanjutan untuk mendeteksi cacat mikro dengan tingkat presisi yang lebih tinggi (Simatupang dkk, 2016).

2.8 Probe

Dalam sistem pengujian ultrasonik, probe atau transduser merupakan komponen esensial yang berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik dalam bentuk gelombang ultrasonik, serta sebaliknya menerima gelombang yang dipantulkan dan mengubahnya kembali menjadi sinyal listrik. Proses ini memanfaatkan dua fenomena fisis utama, yaitu efek piezoelektrik dan efek magnetostriktif. Kedua efek ini bersifat reversibel, artinya perubahan energi dapat

berlangsung dua arah: dari listrik ke mekanik (saat pemancaran) dan dari mekanik ke listrik (saat penerimaan). Oleh karena itu, probe berperan ganda sebagai pemancar dan penerima (transmitter-receiver) dalam sistem deteksi ultrasonik (Ulum dkk, 2022).

Efek piezoelektrik merupakan fenomena di mana bahan kristal tertentu (seperti kuarsa, PZT—lead zirconate titanate) menghasilkan getaran mekanik ketika diberi tegangan listrik, dan sebaliknya, menghasilkan tegangan listrik ketika menerima tekanan mekanik. Sifat inilah yang memungkinkan probe piezoelektrik memancarkan dan menangkap gelombang ultrasonik. Efek magnetostriktif, di sisi lain, terjadi pada material ferromagnetik yang mengalami perubahan bentuk ketika dikenai medan magnet, dan dapat menghasilkan medan listrik ketika menerima tekanan. Meskipun lebih jarang digunakan dibanding piezoelektrik karena efisiensinya lebih rendah, efek magnetostriktif tetap relevan untuk aplikasi tertentu, terutama di lingkungan bersuhu tinggi (Moore, 2012).

Dalam praktiknya, terdapat beberapa jenis probe ultrasonik yang digunakan sesuai dengan kebutuhan pengujian, yaitu:

1. Probe Kontak (Contact Probe)

Probe jenis ini digunakan dengan langsung menempatkan permukaan transduser ke permukaan benda uji. Umumnya memerlukan couplant (zat perantara) seperti gel atau oli agar gelombang dapat ditransmisikan secara efektif dari probe ke material tanpa gangguan udara (Mei, 2019). Cocok untuk pengujian manual dan area yang mudah diakses, Adapun probe kontak seperti pada **Gambar 2.6**



Gambar 2. 6 Probe Kontak (Mei, 2019)

2. Probe Imersi (Immersion Probe)

Dirancang untuk bekerja di lingkungan cair, seperti air, yang berfungsi sebagai media transmisi antara probe dan benda uji. Biasanya digunakan dalam sistem otomatis dan skala laboratorium untuk akurasi tinggi, serta sangat efektif untuk geometri kompleks (Hani, 2010). Adapun contoh probe imersi pada **Gambar 2.7**



Gambar 2. 7 Probe Imersi (Hani, 2010)

3. Probe Sudut (Angle Beam Probe)

Probe ini mengarahkan gelombang ultrasonik ke dalam material pada sudut tertentu, bukan secara tegak lurus (Baehaki, 2019). Digunakan terutama untuk mendeteksi cacat yang tidak sejajar dengan permukaan, seperti retakan las dalam inspeksi structural, Adapun contoh probe sudut pada **Gambar 2.8**



Gambar 2. 8 Probe Sudut

4. Probe Dual Element

Terdiri dari dua elemen piezoelektrik—satu untuk memancarkan dan satu untuk menerima gelombang (Bally, 2006). Elemen-elemen ini bekerja secara bergantian dan sering digunakan untuk pengujian pada permukaan kasar atau tipis karena sensitivitasnya tinggi terhadap pantulan dangkal, Adapun probe dual element seperti pada **Gambar 2.9**



Gambar 2. 9 Probe Dual Element

5. Probe Phased Array

Menggunakan beberapa elemen kecil yang dapat dikendalikan secara elektronik untuk mengarahkan dan memfokuskan gelombang ultrasonik secara dinamis (Doni dkk, 2019). Cocok untuk inspeksi kompleks dan pemetaan cacat 3D, serta digunakan secara luas dalam aplikasi industri modern dan medis, adapun contoh probe phased array seperti pada **Gambar 2.10**



Gambar 2. 10 Probe Phased Array (Doni dkk, 2019).

Pemindai ultrasonik berlandaskan pantulan dari area batas pemantul, apabila gelombang melewati material berbeda seperti udara, baja, pipa dan material non homogenitas lainnya maka persentase pantulan pun akan berbeda. Jumlah pantulan dapat ditentukan dari perbedaan impedansi akustik di area batasnya, perbedaan pada masing masing material akan diperlihatkan pada **Tabel 2.1**.

Tabel 2.1 Cepat Rambat Impedansi

No	Material	v (m/s)	ρ (kg/m ³)	Z(MRayls)
1	Water at 20 °C	1480	1000	1,483
2	Water at 60 °C	1550	1000	1,55
3	Concrete	3100	2600	8,0
4	Iron	5900	7690	46,4
5	Brick	4300	1700	7,4
6	Steel Mild	5900	7890	46
7	Steel Stainless	5900	7890	45,7
8	Alumina	10520	3860	40,76

(Sumber:<https://www.signal-processing.com/table.php>)

III. METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Elektronika Dasar dan Instrumentasi, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung Oktober 2024 sampai dengan Juni 2025.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

3.2.1 Alat Penelitian

Alat yang digunakan pada penelitian ini meliputi perangkat lunak dan perangkat keras sebagai berikut:

1. PC (*Personal Computer*), digunakan untuk mengolah pemrograman dan pembuatan laporan penelitian;
2. *Ultrasonic Thickness Gauge GM100 BENETECH Tester GM-100*, sebagai alat utama untuk melakukan pengukuran;
3. *5MHz/10mm probe*, sebagai komponen yang akan digunakan sebagai jembatan menuju alat utama; dan
4. Bor, digunakan untuk membuat lubang atau goresan pada logam .

3.2.2 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. *Software Surfer*, digunakan untuk membuat tampilan dua dimensi dari koordinat X,Y,Z yang didapat;
2. *Ultrasonic Gel*, digunakan sebagai media penghantar gelombang ultrasonic; dan
3. Material Logam, digunakan sebagai media pengukuran.

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dibagi menjadi beberapa bagian, yaitu kalibrasi perangkat keras (*hardware*), perangkat lunak (*software*) dan pengujian alat pengukuran. Langkah yang dilakukan pada penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 3.1**.

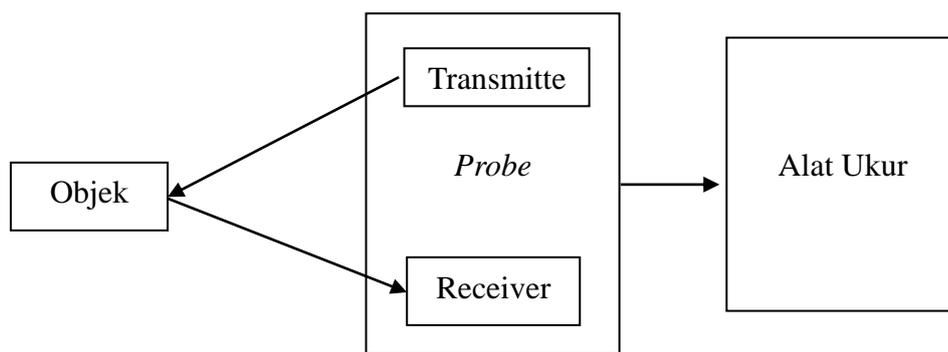


Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

Gambar 3.1 menunjukkan langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini, langkah pertama, dimulai pada tahap persiapan dengan mempelajari konsep yang terkait dalam kalibrasi alat. Langkah kedua, yaitu pengukuran nilai ketebalan logam dan memasukkan data ke aplikasi *surfer* sehingga memperoleh gambar berbentuk dua dimensi.

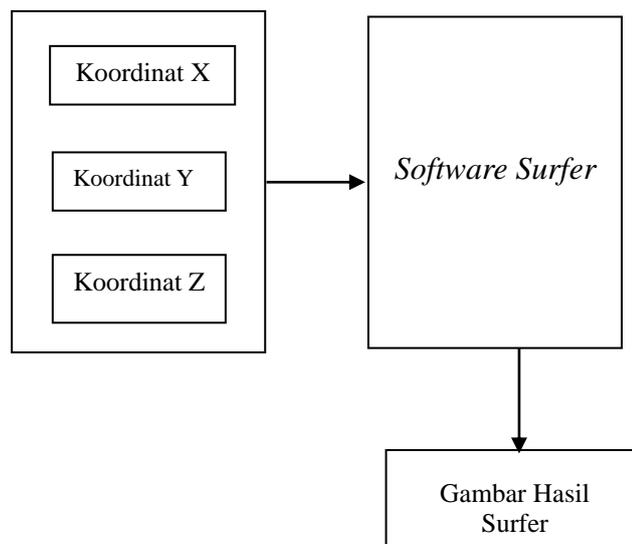
Alat pengukuran ketebalan material logam dengan metode *ultrasonic test* dari Non Destructif Test terdiri dari dua buah *probe* yang digunakan untuk melakukan pengukuran. Alat pengukuran akan membangkitkan frekuensi ultrasonik, kemudian *probe* akan mentransferkannya ke bidang yang akan diukur. Sinyal ultrasonik yang sudah dikirimkan menuju bidang, maka akan dipantulkan menuju

probe kembali dan ditransfer ke alat utama. Alat utama akan melakukan pengolahan sinyal dan menunjukkan ketebalan material logam yang diukur. Semakin dalam ketebalan material logam yang diukur, maka akan semakin lambat gelombang ultrasonik kembali menuju *probe*. Hal ini dapat ditunjukkan dengan warna biru pada *software surfer*. Semakin biru gambar yang didapatkan, artinya ketebalan ataupun lubang yang didapatkan semakin dalam, adapun diagram blok sistem pendeteksi ketebalan material logam dengan menggunakan NDT metode *Ultrasonic Test* pada **Gambar 3.2**



Gambar 3. 2 Diagram blok sistem pendeteksi ketebalan material logam dengan menggunakan Non Destructif Testing metode *Ultrasonic Test*

Pada **Gambar 3.2** menjelaskan tentang pendeteksian dari transmitte menuju permukaan objek yang diberi gel sebagai bantuan medium kopel, gelombang yang dipantulkan kembali ke transduser dianalisis oleh alat utama yaitu perangkat yang digunakan untuk pengukjuran ketebalan pada logam yang kemudian diteruskan ke LCD sebagai hasil dari pengukuran yang telah dilakukan, adapun diagram blok pengguna *software surfer* ditampilkan pada **Gambar 3.2**



Gambar 3. 2 Diagram blok penggunaan *software surfer*

Berdasarkan **Gambar 3.2** Diagram blok penggunaan *software surfer* dapat dijelaskan bahwa dalam penggunaan *software surfer* dibutuhkan tiga titik koordinat. Tiga titik koordinat tersebut adalah koordinat X, Koordinat Y, dan Koordinat Z. Setelah dilakukan *input* nilai pada ketiga koordinat, maka *software surfer* akan melakukan proses dan menghasilkan gambar yang sudah disesuaikan dengan nilai *input*.

3.4 Pengujian Sistem Pengambilan Data

Teknik pengujian alat pendeteksi ketebalan logam dengan menggunakan Non Destruktif Testing (NDT) menggunakan metode *Ultrasonic Test* ini dilakukan dengan 6 bentuk logam yang telah dikondisikan. Setiap bentuk material logam diukur sebanyak 9 atauun 10 kali. Nilai yang didapatkan berupa koordinat pada titik X, Koordinat pada titik Y, dan Koordinat pada titik Z. Hasil dari pengujian ini kita dapat mengetahui alat ini efektif atau tidaknya dalam melakukan pengukuran ketebalan materila logam. Berikut **Tabel 3.1** merupakan pengujian variasi koordinat X, Koordinat Y, dan Koordinat Z

Tabel 3. 1 Hasil Pengujian Variasi Koordinat X,Y, dan Z Pada Material Logam

No	Koordinat X	Koordinat Y	Koordinat Z
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan pembahasan data hasil pengukuran ketebalan material logam NDT metode UT dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Hasil dari pengukuran menggunakan Non Destruktif Test (NDT) dengan menggunakan metode *Ultrasonic Test* (UT) dapat dilakukan secara efektif dalam bentuk koordinat X,Y, dan Z.;
2. Hasil dari pengukuran menggunakan Non Destruktif Test (NDT) dengan menggunakan metode *Ultrasonic Test* (UT) ditinjau dengan menggunakan *software Surface* cenderung sama seperti pada koordinat X,Y, dan Z; dan
3. Hasil perbandingan antara pengukuran menggunakan Non Destruktif Testing dengan menggunakan metode *ultrasonic Test* (UT) terhadap gambar yang dihasilkan oleh *software surface* kurang presisi namun cenderung sama serta batas eror masih dalam toleransi.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, terdapat saran untuk penelitian selanjutnya. Saran tersebut adalah menggunakan material logam dengan berbagai macam ukuran dan berbagai macam bentuk, hal tersebut dilakukan agar dapat dilihat pengaruh dari ukuran material logam yang digunakan, dan dalam pengukuran harus sesuai dan terukur dengan benar serta koordinat yang tepat.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustina, F. 2022. Pengaruh Paparan Gelombang Ultrasonik Terhadap Pertumbuhan Bakteri Escherichia Coli, Kadar Protein Dan Ph Pada Daging Sapi. *Thesis*.
- ASME. 2015. *ASME Boiler and Pressure Vessel Code – Nondestructive Examination*. The American Society of Mechanical Engineers. New York.
- Baehaki. 2019. *Experimental study of Crack Depth Measurement of Concrete with Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)*. IOP Publishing.
- Bally, I. (2006). *Species Profiles for Pacific Island Agroforestry*. Hawaii. Permanent Agriculture Resources (PAR).
- Batukita. (2021). *Jawa Timur Raja Pasar Manga Nasional*. <https://www.batukita.com/2021/07/jawa-timur-raja-pasar-mangganasional.html>
- Christin Remayanti N, Siti N, Edhi W dan Naufal Rafif R. 2021. *Analisis Hasil Pembacaan Retak Lurus Dan Miring Pada Beton Dengan Menggunakan Metode NDT (Non Destrutive Test)*. Laporan Penelitian Mandiri Kategori A, 1–18.
- Cox, J. 1997. *Classroom Training Handbook, Nondestructive Testing, Eddy Current*. PH Diversified, Inc. South Harrisburg.
- Doni A, Murthy C, dan Kurian MZ. 2019. Water Quality Monitoring System using IoT. *International Journal of Engineering Research & Technology*. Vol. 6. No. 13. Hal. 1-6.
- Dwi, T. 2018. *Investigasi Rongga dan Kedalaman Retak Pada Balok Beton dengan UPE dan UPV*. Universitas Brawijaya. Malang.
- Fezari M. dan Dahoud. 2019. *Exploring One-wire Temperature Sensor “DS18B20” with Microcontrollers*. University of Al-Zaytoonah Faculty of IT. Jordan.
- Hasbullah, Rachmat R, Setyabudi, dan Warji. (2008). Aplikasi Ultrasonik Untuk Pendugaan Kerusakan Serangan Lalat Buah Pada Mangga Arumanis. *Skripsi*.

- Hani Slamet. 2010. Sensor Ultrasonik SRF05 Sebagai Memantau Kecepatan Kendaraan Bermotor. *Jurnal Teknologi*. Vol.3, No. 2, Hal. 120-128.
- Hirono. 2023. Pelatihan Pembuatan Peta Kontur Tiga Dimensi Dengan Menggunakan Program *Surfer*. *Jurnal Pengabdian Masyarakat*. Vol.3 No.2. E-ISSN 2807-6702.
- Ismailov AS dan Jo'rayev ZB. 2022. Study of Arduino Microcontroller Board. *Science and Education Scientific Journal*. Vol. 3. No. 3. Hal. 172-179.
- Kalimuthu K, Tseng L, Murugan K, Panneerselvam C, Aziz A, Benelli G dan Hwang JS. 2020. *Ultrasonic Technology Applied against Mosquito Larvae*. Institute of Marine Biology, National Taiwan Ocean University, Keelung, Taiwan
- Latifah, Amike Nur, Sugeng P. Budio, dan Ming Narto Wijaya. 2020. Pengaruh Variasi Coating terhadap Kerapatan Beton Keropos dengan Menggunakan Pulse Velocity pada Alat UPV (Ultrasonic Pulse Velocity). *Jurnal Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya*. Malang : Universitas Brawijaya.
- Lingasari, D. 2019. *Memperkirakan Kedalaman Retak Pada Beton Menggunakan Gelombang Ultrasonik*. Universitas Tarumanegara Jakarta. Jakarta.
- Malhotra VM dan Carino NJ. 2004. Handbook on Nondestructive Testing of Concrete. Boca Raton *CRC Press*.
- Mei. 2019. Rancang Bangun Alat Pendeteksi Ulat Dalam Buah Mangga Menggunakan Sensor Ultrasonik. *Jurnal Fisika Unand*. Vol. 4, No. 4, ISSN 2302-8491.
- Moore PO. 2012. *Non Destructive Testing Handbook*. ASNT Inc. Columbus.
- Muhlis A. (2017). Analisis Pendapatan Dan Efisiensi Biaya Usahatani Mangga Gadung Di Desa Bayeman Kecamatan Arjasa Kabupaten Situbondo. *Skripsi*. Universitas Jember. Jember.
- Mujab AA, M Rosmiati M, dan I Sari. 2020. Rancang Bangun Alat Pengusir Hama Menggunakan Gelombang Ultrasonik. *e-Proceeding of Applied Science* : 6(1), 340.
- Putra W. (2013). *Training Handout Ultrasonic testing* . General. Surabaya: NDE Center ITS.
- Rakhmat R, Djamal M, dan Syahputra T. 2020. Pengaruh Gelombang Ultrasonik terhadap Perilaku Lalat Rumah (*Musca Domestica*). *Prosiding Seminar Nasional Fisika (E-Journal)*. SNF2020, Vol. IX.

- Rokhani H. 2007. Penerapan Teknologi Karantina: Membuka Peluang Ekspor Buah-buahan Indonesia. *Jurnal Keteknik Pertanian*. Vol.21, No.1, ISSN 0216-3365.
- Saputra, Teguh Dwi, Sugeng P, Budio, dan Indra Waluyohadi. 2017. Investigasi Rongga dan Kedalaman Retak pada Balok Beton dengan UPE dan UPV. *Jurnal Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya*. Malang.
- Sari RS, Nuryanto, dan Widiyanto A. 2021. Temperature and Humidity Control System for Tempe Gembus Fermentation Process Based on Internet of Things. *Urecol Journal*. Part G Multidisciplinary Research, 1(1), 39–45.
- Simatupang R, Martin, Devi Nuralinah, dan Christin Remayanti. 2016. Korelasi Nilai Kuat Tekan Beton antara Hammer Test, Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) dan Compression Test. *Jurnal Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya (Rekayasa Sipil)*. Malang.
- Susilo H. 2023. Pengujian Ultrasonic Pulse Velocity (UPV Test) Estimasi Kedalaman Reta Proyek. *Test Upv Pier 2 Jembatan Sei Wampu*.
- Sulaiman, Budi Utomo, dan I Putu Agung Ardi Wijana. 2020. Analisis Uji Tidak Merusak (NDT) Pada Sambungan Las Lambung Frame 103 bagian Kamar Mesin Kapal Patroli 73 Dengan Metode Radiography Test. *Jurnal Gema Teknologi*. Vol 20 No 4, 2020. p : 146-152
- Syafrudin Agus. 2008. Rancang Bangun Generator Pulsa Gelombang Ultrasonik dan Implementasinya untuk Pengukuran Jarak Antara Dua Obyek. *Jurnal Fisika Teori, Eksperimen, dan Aplikasi*. ISSN 1410-9662.
- Ulum M, Sari, FN, Amini, HW, dan Sudrajat H. 2022. Extraction Method of Ultrasound-Assisted Extraction (UAE) of Robusta Coffee Skin Waste using 96% Ethanol Solution in Tanah Wulan Village, Maesan District, Bondowoso Regency. *Journal of Biobased Chemicals*. Vol. 2(2) Hal. 78–89.
- Wijaya U. 2019. Petunjuk Dasar Pemeriksaan Bangunan Existing Metode Non-Destructive Test: Studi Kasus Bangunan Industrial Struktur Baja. *Jurnal Buletin Profesi Insinyur*. Vol. 2(2) Hal. 063-068.