



UNIVERSITAS INDONESIA

**PREDIKSI EFEKTIFITAS *CUBE CUTTING METHOD* PADA
PENGUKURAN KONSTANTA ELASTISITAS DAN ATENUASI
GELOMBANG ULTRASONIK MATERIAL IN-519 (*CAST
AUSTENITIC STAINLESS STEEL*)**

SKRIPSI

**HASBI FAHADA
0706268543**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JUNI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PREDIKSI EFEKTIFITAS *CUBE CUTTING METHOD* PADA
PENGUKURAN KONSTANTA ELASTISITAS DAN
ATENUASI GELOMBANG ULTRASONIK MATERIAL IN-519
(*CAST AUSTENITIC STAINLESS STEEL*)**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

HASBI FAHADA

0706268543

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL

DEPOK

JUNI 2011

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri, dan
semua sumber baik yang dikutip maupun
dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Hasbi Fahada

NPM : 0706268543

Tanda Tangan :

Tanggal : 27 Juni 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Hasbi Fahada

NPM : 0706268543

Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material

Judul Skripsi : Prediksi Efektifitas *Cube Cutting Method* pada Pengukuran
Konstanta Elastisitas dan Atenuasi Gelombang Ultrasonik
Material IN-519 (*Cast Austenitic Stainless Steel*)

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing 1: Ir. Rini Riastuti, M.Sc ()

Pembimbing 2: Dr. Roziq Himawan, M.Eng ()

Penguji 1 : Dr. Ir. Dedi Priadi, DEA ()

Penguji 2 : Dr. Ir. Sutopo, M.Sc ()

Penguji 3 : Farabirazy Albiruni, M.Sc. Mech. Eng. ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 27 Juni 2011

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan atas kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya yang tak terhingga sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu persyaratan untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Skripsi ini saya persembahkan untuk keluarga tercinta dan insan akademis yang haus akan pengetahuan serta tantangan dalam hidup. Saya menyadari bahwa, skripsi ini tidak akan dapat diselesaikan dengan baik tanpa adanya bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, saya ingin mengucapkan terima kasih setulus-tulusnya kepada :

1. Orang tua dan keluarga yang telah memberikan bantuan, dukungan material, moral, kasih sayang, dan doa yang tulus.
2. Ir. Rini Riasuti M.Sc. selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini.
3. Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) PUSPIPTEK Serpong dan Dr. Roziq Himawan, M.Eng. selaku pembimbing skripsi. Tak ketinggalan juga Bapak Anni Rahmat yang selalu memberikan arahan dan bimbingan serta bantuannya.
4. Teknik Fisika Institut Teknologi Bandung dan Dr. Ir. Amoranto Trisnobudi sebagai pembimbing teknis di Laboratorium Ultrasonik, terimakasih atas semua bantuan dan kebaikan yang telah diberikan.
5. PT Radiant Utama dan Bapak Agus Salim, terimakasih atas bantuan instrumentasi yang telah diberikan.
6. PT Pupuk Kaltim Bontang dan Farabirazy Albiruni, M.Sc. Mech. Eng. yang telah memberikan dukungan, bimbingan, dan petunjuk serta inspirasi dalam penelitian ini.
7. Seluruh dosen dan staf pengajar Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI yang telah memberikan pengetahuan dan ilmu yang bermanfaat.

8. Bapak Triadi Sugiarto, S.T. sekeluarga yang telah memberikan arahan, dukungan, dan doa yang tulus. Tidak ketinggalan juga rekan-rekan penghuni Gang Rawa Pule No.61B, saudaraku Fuadi Hasan dan Nanaru.
9. Faizah Aidid yang telah memberikan dukungan moral, doa, inspirasi serta kedamaian hati. Dan terimakasih atas kesediannya untuk selalu ada baik disaat suka maupun lara.
10. David, Erliza (kiki), Halwan, Miska, Astri, Bastian, dan Lendi selaku rekan kerja satu bimbingan dalam kegiatan penelitian skripsi ini. Terima kasih atas kerjasama dan bantuannya selama penelitian.
11. Seluruh karyawan, staf, serta teknisi Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI, Terimakasih atas bantuannya selama penelitian.
12. Seluruh teman-teman mahasiswa Teknik Metalurgi dan Material FTUI Angkatan 2007. Terima kasih untuk persahabatan yang mengesankan selama ini.
13. Semua pihak yang telah membantu penyelesaian skripsi ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Depok, Juni 2011

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Hasbi Fahada
NPM : 0706268543
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Departemen : Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**PREDIKSI EFEKTIFITAS *CUBE CUTTING METHOD* PADA
PENGUKURAN KONSTANTA ELASTISITAS DAN ATENUASI
GELOMBANG ULTRASONIK MATERIAL IN-519
(*CAST AUSTENITIC STAINLESS STEEL*)**

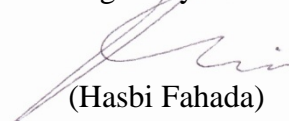
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis atau pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal : 27 Juni 2011

Yang menyatakan


(Hasbi Fahada)

ABSTRAK

Nama : Hasbi Fahada
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Prediksi Efektifitas *Cube Cutting Method* pada Pengukuran Konstanta Elastisitas dan Atenuasi Gelombang Ultrasonik Material IN-519 (*Cast Austenitic Stainless Steel*)

Salah satu metode untuk menentukan konstanta-konstanta elastisitas efektif material IN-519 (*cast austenitic stainless steel*) adalah dengan menggunakan teknik potongan kubus (*cube cutting method*) dan transmisi gelombang ultrasonik. Akan tetapi dimensi kubus dengan ukuran 10x10x10 mm menjadi salah satu kendala dalam teknis pengukuran, karena sebagian besar *probe* ultrasonik memiliki ukuran penampang yang lebih besar dari sampel. Oleh karena itu, tingkat efektifitas nilai hasil pengukurannya perlu diketahui dengan menentukan nilai deviasi pengukuran konstanta elastisitas dan atenuasi gelombang ultrasonik dengan frekuensi 1, 2,25, 4, dan 5 MHz pada kubus dengan sampel pembanding (pelat). Nilai deviasi paling besar terjadi pada pengukuran konstanta C_{33} dan atenuasi dengan frekuensi 1 MHz. Kemudian hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar frekuensi pengukuran, maka nilai konstanta elastisitas semakin kecil, dan nilai atenuasi semakin besar. Pengujian pada sampel hasil *solution anneal* memiliki nilai konstanta-konstanta elastisitas yang lebih besar dan atenuasi yang lebih kecil dibandingkan dengan sampel *non-anneal*. Dan konstanta-konstanta elastisitas baik pada sampel *annealed* maupun sampel *non-anneal* diprediksikan memiliki nilai penyimpangan pengukuran kurang lebih sebesar 31 % terhadap hasil pengujian tarik.

Kata Kunci: *Cube cutting method*, konstanta elastisitas, atenuasi, gelombang ultrasonik, *cast austenitic stainless steel*

ABSTRACT

Name : Hasbi Fahada
Study Program : Metallurgy & Materials Engineering
Title : Effectiveness prediction of cube cutting method in elastic constants and ultrasonic wave attenuation measurement of IN-519 material (Cast Austenitic Stainless Steel)

One of the methods for effective elastic constants determining in IN-519 material (cast austenitic stainless steel) is using cube cutting method and ultrasonic wave transmission. However, dimension of cubes with a minimum size of 10x10x10 mm become one of the obstacles in the technical measurement, because most of the ultrasonic probe has a larger cross-sectional size of the sample. Therefore, the level of effectiveness measurement results need to be identified by determining the deviation of the measurement of elasticity constants and the attenuation of ultrasonic waves with a frequency of 1, 2.25, 4, and 5 MHz on the cube with the comparison sample (plate). Greatest deviations occur at measurement of C_{33} and attenuation with frequency of 1 MHz. The results showed that the greater frequency of measurements the value of the constant elasticity is smaller, and the greater the attenuation value. Tests on annealed samples has a greater elasticity constant value and the attenuation is smaller than the non-anneal samples. And elastic constant in both annealed samples and non-anneal measurement are predicted has a deviation value of approximately 31% of the tensile test results.

Keywords : Cube cutting method, elastic constant, attenuation, ultrasonic wave, cast austenitic stainless steel

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR.....	vi
ABSTRAK	vii
<i>ABSTRACT</i>	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR PERSAMAAN	xvi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xxi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	2
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Ruang Lingkup Penelitian.....	3
1.4.1 Material	3
1.4.1 Bentuk Pegujian	4
1.4.2 Parameter Penelitian.....	4
1.4.3 Tempat penelitian.....	4
1.5. Sistematika Penulisan	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1. Material <i>Tube Reformer</i>	6
2.2. Elastisitas Material	8
2.3. Matriks Kekakuan (<i>Stiffness Matrix</i>)	10
2.3.1. Material Isotropik.....	10
2.3.2. Material Anisotropik	11
2.3.3. Material Orthotropik	13
2.3.4. Material Unidireksional Anisotropik	14
2.4. Gelombang Ultrasonik	15
2.4.1. Karakteristik Gelombang Ultrasonik	15
2.4.2. Mode Gelombang Ultrasonik.....	16
2.4.2.1. Gelombang Longitudinal dan transversal	16
2.4.2.2. Gelombang Permukaan/Gelombang <i>Rayleigh</i>	17
2.4.2.3. Gelombang Tipis/Gelombang <i>Lamb</i>	18
2.4.3. Hubungan Sifat-sifat Material dan Gelombang Ultrasonik	19
2.4.4. Fisika Gelombang	19
2.4.4.1. Panjang Gelombang	19
2.4.4.2. Frekuensi Gelombang	20
2.4.5. Atenuasi Gelombang Ultrasonik.....	21
2.4.6. Impedansi Akustik	22
2.4.7. Pembiasan dan Hukum <i>Snellius</i>	23

2.5. Metode Pengukuran Konstanta Elastisitas	24
2.5.1. Teknik Potongan Kubus (<i>Cube Cutting Technique</i>)	25
2.5.2. Pendekatan Satu Sisi (<i>One-sided Approach</i>)	28
2.6. <i>Solution Anneal</i>	28
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	30
3.1. Diagram Alir Penelitian	30
3.2. Alat dan Bahan	31
3.2.1. Alat	31
3.2.1. Bahan	31
3.3. Prosedur Penelitian.....	31
3.3.1. Pemotongan Benda Uji dan <i>Labeling</i>	31
3.3.2. Uji Komposisi Material.....	33
3.3.3. Perlakuan Panas <i>Solution Anneal</i>	34
3.3.4. Pengujian Metalografi.....	35
3.3.5. Pengukuran Konstanta Elastisitas dan Atenuasi Gelombang.....	35
BAB 4 HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN.....	41
4.1. Hasil Pemotongan dan Makrografi Sampel	41
4.2. Hasil Pengujian Komposisi Material	42
4.3. Hasil Pengamatan Mikrostruktur	44
4.3.1. Foto Mikro Sampel yang Tidak Mengalami Perlakuan Panas (<i>non-anneal</i>)	44
4.3.2. Foto Mikro Sampel yang Mengalami <i>Solution Anneal</i>	46
4.4. Hasil Pengukuran Konstanta Elastisitas dan Atenuasi Gelombang Ultrasonik.....	48
4.5. Pembahasan.....	50
4.5.1. Makrostruktur Butir	50
4.5.2. Mikrostruktur Butir	51
4.5.2.1. Sampel <i>Non-anneal</i>	51
4.5.2.2. Sampel dengan Perlakuan Panas <i>Solution Anneal</i>	52
4.5.3. Hubungan Nilai Konstanta Elastisitas dengan Frekuensi Gelombang Ultrasonik pada Sampel <i>Non-anneal</i>	53
4.5.3.1. Sampel Kubus <i>Non-anneal</i> (Pengukuran C_{11} , C_{22} , dan C_{33})	53
4.5.3.2. Perbandingan Hasil Pengukuran C_{33} Sampel Kubus dengan Sampel Pelat Arah R (<i>Non-anneal</i>)	54
4.5.3.3. Sampel Pelat <i>Non-anneal</i> (Pengukuran C_{44} dan C_{55})	55
4.5.4. Hubungan Nilai Atenuasi dengan Frekuensi Gelombang Ultrasonik pada Sampel <i>Non-anneal</i>	56
4.5.4.1. Atenuasi pada Sampel Kubus <i>Non-anneal</i>	56
4.5.4.2. Perbandingan Hasil Pengukurasn Atenuasi Sampel Kubus dengan Sampel Pelat Arah R (<i>Non-anneal</i>).....	57
4.5.4.3. Atenuasi Pada Pengukuran C_{44} dan C_{55} (<i>Non-anneal</i>).....	58
4.5.5. Hubungan Nilai Konstanta Elastisitas dengan Frekuensi Gelombang Ultrasonik pada Sampel <i>Annealed</i>	59
4.5.5.1. Sampel Kubus <i>Annealed</i>	59
4.5.5.2. Perbandingan Hasil Pengukuran C_{44} dan C_{55} Sampel	

Kubus <i>Non-anneal</i> dan Kubus <i>Annealed</i>	60
4.5.6. Hubungan Nilai Atenuasi Gelombang Ultrasonik dengan Frekuensi Pengukuran Sampel <i>Annealed</i> dan <i>Non-anneal</i>	61
4.5.7. Perbandingan Nilai Kontanta Elastisitas Aktual dengan Referensi.....	62
BAB 5 KESIMPULAN	64
DAFTAR PUSTAKA	66
LAMPIRAN	



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Kolom-kolom <i>tube reformer</i> dalam sebuah <i>furnace</i>	6
Gambar 2.2.	Mikrostruktur material IN-519 dengan karbida-karbidanya, perbesaran 500X.....	7
Gambar 2.3.	Mikrostruktur butir kolomnar/dendritik material IN -519 (50X). 8	
Gambar 2.4.	Kurva tegangan versus regangan pada suatu material logam	9
Gambar 2.5.	Tegangan-tegangan yang bekerja pada <i>elemental cube</i>	9
Gambar 2.6.	<i>Continuous fiber reinforced composite</i> yang memiliki sifat isotropik pada dua arah (arah 1 dan 2).....	14
Gambar 2.7.	Pergerakan partikel akibat gelombang ultrasonik longitudinal (atas) dan akibat gelombang ultrasonik transversal (bawah)	16
Gambar 2.8.	Ilustrasi propagasi gelombang permukaan pada antarmuka logam dan udara	17
Gambar 2.9	(a) Ilustrasi propagasi gelombang pelat simetris, (b) Propagasi gelombang pelat asimetris.....	18
Gambar 2.10.	Ilustrasi panjang gelombang	20
Gambar 2.11.	Gelombang sinusoidal dengan beberapa macam frekuensi, gelombang yang bawah mempunyai frekuensi lebih tinggi.....	20
Gambar 2.12.	Hukum snellius	23
Gambar 2.13.	Ilustrasi kubus yang dipotong dari bulk material dengan masing-masing arah pemotongannya.....	25
Gambar 2.14.	Ilustrasi skematis rangkaian pengukuran cepat rambat gelombang ultrasonik dengan menggunakan metode transmisi	27
Gambar 3.1.	Diagram Alir Penelitian	30
Gambar 3.2.	Ilustrasi pemotongan <i>reformer tube</i>	32
Gambar 3.3.	Ilustrasi pelat yang dipotong dari <i>bulk material</i> dengan masing-masing arah pemotongannya.....	33
Gambar 3.4.	Dapur Pemanas <i>Carbolite</i>	34
Gambar 3.5.	Siklus pemanasan <i>solution treatment (solution anneal)</i>	34
Gambar 3.6.	Rangkaian pengukuran cepat rambat gelombang ultrasonik dengan menggunakan metode transmisi 1) <i>pulser</i> , 2) konektor, 3) <i>transmitter probe</i> , 4) <i>receiver probe</i> , 5) <i>oscilloscope</i> , 6) <i>data acquisition software</i>	36
Gambar 3.7.	Skema pengukuran cepat rambat gelombang dan atenuasi pada sampel kubus dengan mode gelombang longitudinal, a) <i>Probe</i> 5 MHz (6 mm), b) <i>Probe</i> 2,25 MHz (12,5 mm), c) <i>Probe</i> 1 MHz (20 mm).....	37
Gambar 3.8.	Skema pengukuran cepat rambat gelombang dan atenuasi pada sampel pelat dengan gelombang transversal <i>mode conversion</i> , a) <i>Probe</i> 2,25 MHz yang dirangkai dengan <i>wedge</i> 60°, b) <i>Probe</i> 4 MHz.....	37
Gambar 3.9.	<i>Probe</i> normal 1 MHz	38
Gambar 3.10.	<i>Probe</i> normal 2,25 MHz yang dirangkai dengan <i>wedge</i> bersudut 60°	38

Gambar 3.11.	<i>Probe</i> normal 5 MHz	38
Gambar 3.12.	<i>Probe</i> sudut 60° 4 MHz.....	39
Gambar 4.1.	Potongan <i>reformer tube</i> yang telah terpakai (<i>used material</i>)....	41
Gambar 4.2.	Potongan penampang melintang <i>tube</i> dengan struktur butir kolumnar, elektroetsa dengan asam oksalat 15%	41
Gambar 4.3.	Balok referensi, elektroetsa dengan asam oksalat 15%	42
Gambar 4.4.	Tiga buah kubus dengan sisi sejajar arah θ , L, dan R, elektroetsa dengan asam oksalat 15%	42
Gambar 4.5.	Dua buah pelat yang akan ditransmisikan gelombang ultrasonik, a) <i>non-anneald</i> , b) <i>annealed</i>	42
Gambar 4.6.	Foto mikro IN 519 pada permukaan paralel arah θ (100) tanpa perlakuan panas dengan perbesaran 100X, elektroetsa asam oksalat 15 %	44
Gambar 4.7.	Foto mikro IN 519 pada permukaan paralel arah θ (100) tanpa perlakuan panas dengan perbesaran 500X, elektroetsa asam oksalat 15 %	44
Gambar 4.8.	Foto mikro IN 519 pada permukaan paralel arah L (010) tanpa perlakuan panas dengan perbesaran 100X, elektroetsa asam oksalat 15 %	45
Gambar 4.9.	Foto mikro IN 519 pada permukaan paralel arah L (010) tanpa perlakuan panas dengan perbesaran 500X, elektroetsa asam oksalat 15	45
Gambar 4.10.	Foto mikro IN 519 pada permukaan paralel arah R (001) tanpa perlakuan panas dengan perbesaran 100X, elektroetsa asam oksalat 15 %	45
Gambar 4.11.	Foto mikro IN 519 pada permukaan paralel arah R (001) tanpa perlakuan panas dengan perbesaran 100X, elektroetsa asam oksalat 15 %	46
Gambar 4.12.	Foto mikro IN 519 pada permukaan paralel arah θ (100) dengan perlakuan panas, perbesaran 100X, elektroetsa asam oksalat 15 %	46
Gambar 4.13.	Foto mikro IN 519 pada permukaan paralel arah θ (100) dengan perlakuan panas, perbesaran 500X, elektroetsa asam oksalat 15 %	46
Gambar 4.14.	Foto mikro IN 519 pada permukaan paralel arah L (010) dengan perlakuan panas, perbesaran 100X, elektroetsa asam oksalat 15 %	47
Gambar 4.15.	Foto mikro IN 519 pada permukaan paralel arah L (010) dengan perlakuan panas, perbesaean 500X, elektroetsa asam oksalat 15 %	47
Gambar 4.16.	Foto mikro IN 519 pada permukaan paralel arah R (001) dengan perlakuan panas, perbesaran 100X, elektroetsa asam oksalat 15 %	47
Gambar 4.17.	Foto mikro IN 519 pada permukaan paralel arah R (001) dengan perlakuan panas, perbesaran 500X, elektroetsa asam oksalat 15 %	48

Gambar 4.18.	Hubungan nilai konstanta elasisitas dengan frekuensi pengukuran cepat rambat gelombang ultrasonik pada kubus <i>non-anneal</i>	53
Gambar 4.19.	Perbandingan nilai konstanta elasisitas C_{33} hasil pengukuran pada sampel kubus dan sampel pelat <i>non-anneal</i>	54
Gambar 4.20.	Hubungan nilai konstanta elasisitas dengan frekuensi pengukuran cepat rambat gelombang ultrasonik pada pelat <i>non-anneal</i> (pengukuran C_{44} dan C_{55}).....	55
Gambar 4.21.	Perbandingan nilai atenuasi masing-masing orientasi pada sampel kubus <i>non-anneal</i>	56
Gambar 4.22.	Perbandingan nilai atenuasi arah R pada sampel kubus dan sampel pelat <i>non-anneal</i>	57
Gambar 4.23.	Perbandingan nilai atenuasi arah RL (C_{44}) dan arah R θ (C_{55}) pada sampel pelat <i>non-anneal</i>	58
Gambar 4.24.	Hubungan nilai konstanta elasisitas dengan frekuensi pengukuran cepat rambat gelombang ultrasonik pada kubus <i>annealed</i>	59
Gambar 4.25.	Perbandingan nilai konstanta elasisitas C_{44} dan C_{55} hasil pengukuran pada sampel kubus <i>non-anneal</i> dan sampel kubus <i>annealed</i>	60
Gambar 4.26.	Hubungan nilai atenuasi dengan frekuensi gelombang pada pengukuran C_{44} dan C_{55} sampel <i>anneal</i> dan <i>non-anneal</i>	61

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Notasi yang digunakan dalam 18 pengukuran cepat rambat gelombang ultrasonik.....	26
Tabel 3.1.	Notasi yang digunakan dalam pengukuran cepat rambat gelombang ultrasonik untuk menentukan nilai konstanta elastisitas	40
Tabel 4.1.	Komposisi kimia hasil spektroskopi material <i>reformer tube</i> IN-519.....	43
Tabel 4.2.	Hasil pengukuran konstanta elastisitas dan atenuasi gelombang ultrasonik pada sampel kubus yang tidak mengalami perlakuan panas.....	49
Tabel 4.3.	Hasil pengukuran konstanta elastisitas dan atenuasi gelombang ultrasonik pada sampel kubus yang mengalami perlakuan panas (<i>solution anneal</i>)	49
Tabel 4.4.	Hasil pengukuran konstanta elastisitas dan atenuasi gelombang ultrasonik pada sampel pelat yang tidak mengalami perlakuan panas.....	50
Tabel 4.5.	Hasil pengukuran konstanta elastisitas dan atenuasi gelombang ultrasonik pada sampel pelat yang mengalami perlakuan panas (<i>solution anneal</i>)	50

DAFTAR PERSAMAAN

1. Persamaan 2.3

$$\sigma = E \varepsilon$$

Ket.: σ = tegangan (*stress*), ε = regangan (*strain*), dan E = modulus elastisitas atau dikenal sebagai *Modulus Young*.

2. Persamaan 2.4

$$\tau = G \gamma$$

Ket.: G = Modulus geser, τ = tegangan geser, dan γ = regangan.

3. Persamaan 2.5

$$\tau_{ij} = \tau_{ji}$$

Ket.: τ_{ij} = tegangan pada vector ij .

4. Persamaan 2.6

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Ket.: E = modulus young, ν = *poisson ratio*, G = modulus geser.

5. Persamaan 2.7

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}$$

6. Persamaan 2.8

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl}$$

Ket.: σ_{ij} = tegangan pada vektor (ij), C_{ijkl} = konstanta elastisitas material, dan ε_{kl} = regangan dalam vektor (kl).

7. Persamaan 2.9

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= C_{1111}\varepsilon_{11} + C_{1122}\varepsilon_{22} + C_{1133}\varepsilon_{33} + C_{1123}\gamma_{23} + C_{1113}\gamma_{13} + C_{1112}\gamma_{12} \\ \sigma_{22} &= C_{2211}\varepsilon_{11} + C_{2222}\varepsilon_{22} + C_{2233}\varepsilon_{33} + C_{2223}\gamma_{23} + C_{2213}\gamma_{13} + C_{2212}\gamma_{12} \\ \sigma_{33} &= C_{3311}\varepsilon_{11} + C_{3322}\varepsilon_{22} + C_{3333}\varepsilon_{33} + C_{3323}\gamma_{23} + C_{3313}\gamma_{13} + C_{3312}\gamma_{12} \\ \tau_{23} &= C_{2311}\varepsilon_{11} + C_{2322}\varepsilon_{22} + C_{2333}\varepsilon_{33} + C_{2323}\gamma_{23} + C_{2313}\gamma_{13} + C_{2312}\gamma_{12} \\ \tau_{13} &= C_{1311}\varepsilon_{11} + C_{1322}\varepsilon_{22} + C_{1333}\varepsilon_{33} + C_{1323}\gamma_{23} + C_{1313}\gamma_{13} + C_{1312}\gamma_{12} \end{aligned}$$

$$\tau_{12} = C_{1211}\varepsilon_{11} + C_{1222}\varepsilon_{22} + C_{1233}\varepsilon_{33} + C_{1223}\gamma_{23} + C_{1213}\gamma_{13} + C_{1212}\gamma_{12}$$

8. Persamaan 2.10

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1123} & C_{1113} & C_{1112} \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2223} & C_{2213} & C_{2212} \\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & C_{3323} & C_{3313} & C_{3312} \\ C_{2311} & C_{2322} & C_{2333} & C_{2323} & C_{2313} & C_{2312} \\ C_{1311} & C_{1322} & C_{1333} & C_{1323} & C_{1313} & C_{1312} \\ C_{1211} & C_{1222} & C_{1233} & C_{1223} & C_{1213} & C_{1212} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}$$

9. Persamaan 2.11

$$[C_{ijkl}] = [C_{mn}] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix}$$

10. Persamaan 2.12

$$[C_{ijkl}] = [C_{mn}] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ & & & \text{sym} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ & & & & & C_{55} & C_{56} \\ & & & & & & C_{66} \end{bmatrix}$$

11. Persamaan 2.13

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= C_{11}\varepsilon_{11} + C_{12}\varepsilon_{22} + C_{12}\varepsilon_{33} \\ \sigma_{22} &= C_{12}\varepsilon_{11} + C_{11}\varepsilon_{22} + C_{12}\varepsilon_{33} \\ \sigma_{33} &= C_{12}\varepsilon_{11} + C_{12}\varepsilon_{22} + C_{11}\varepsilon_{33} \\ \tau_{23} &= C_{44}\gamma_{23} \\ \tau_{13} &= C_{44}\gamma_{13} \\ \tau_{12} &= C_{44}\gamma_{12} \end{aligned} \Rightarrow [C_{mn}] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & & & \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & & & \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & & & \\ & & & C_{44} & & \\ & & & & C_{44} & \\ & & & & & C_{44} \end{bmatrix}$$

12. Persamaan 2.14

$$[C_{mn}] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & & & \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & & & \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & & & \\ & & & C_{44} & & \\ & & & & C_{55} & \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix}$$

13. Persamaan 2.15

$$[C_{mn}] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & & & \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & & & \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & & & \\ & & & C_{44} & & \\ & & & & C_{44} & \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix}$$

14. Persamaan 2.16

$$V = \sqrt{C_{ij} / \rho}$$

Ket.: V = kecepatan suara, C = konstanta elastis, dan ρ = berat jenis material.

15. Persamaan 2.17

$$\lambda = V / f$$

Ket.: λ = panjang gelombang dari sebuah gelombang suara (meter), V = kecepatan gelombang (m/s), dan f = frekuensi gelombang (Hertz).

16. Persamaan 2.18

$$f = 1 / T$$

Ket.: f = frekuensi, T = periode.

17. Persamaan 2.19

$$A = A_0 e^{-\alpha z}$$

Ket.: A_0 = amplitudo gelombang awal, A = amplitudo gelombang akhir pada jarak Z dari lokasi awal, dan α = koefisien atenuasi dari gelombang yang merambat pada arah sumbu Z .

18. Persamaan 2.20

$$\alpha = \frac{0,1151}{v} U_t$$

Ket.: v = kecepatan suara dalam m/s, dan U_t dalam db/s.

19. Persamaan 2.21

$$Z = \rho V$$

Ket.: Z = Impedansi Akustik, ρ = masa jenis material, dan V = kecepatan gelombang ultrasonik di dalam material.

20. Persamaan 2.22

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

Ket.: V_1 = kecepatan gelombang longitudinal pada medium pertama, dan V_2 = kecepatan gelombang pada medium kedua, $\sin \theta_1$ = nilai sinus sudut datang, dan $\sin \theta_2$ = nilai sinus sudut pantul.

21. Persamaan 2.23

$$\text{Det} (\Gamma_{ik} - \rho V_{ph}^2 \delta_{ik}) = 0$$

Ket.: $\Gamma_{ik} = C_{ijkl} n_j n_l$ dimana C_{ijkl} adalah komponen dari konstanta elastisitas dan \mathbf{n} adalah unit vektor yang paralel dengan vektor gelombang, ρ = densitas material (Kg/m^3), V = cepat rambat pada masing-masing arah (m/s)

22. Persamaan 2.24

$$\rho V_1^2 = C_{11}$$

23. Persamaan 2.25

$$\rho V_2^2 = C_{66}$$

24. Persamaan 2.26

$$\rho V_3^2 = C_{55}$$

25. Persamaan 2.27

$$\rho V_4^2 = C_{22}$$

26. Persamaan 2.28

$$\rho V_5^2 = C_{66}$$

27. Persamaan 2.29

$$\rho V_6^2 = C_{44}$$

28. Persamaan 2.30

$$\rho V_7^2 = C_{33}$$

29. Persamaan 2.31

$$\rho V_8^2 = C_{55}$$

30. Persamaan 2.32

$$\rho V_9^2 = C_{44}$$

31. Persamaan 2.33

$$\rho V_{10}^2 = 0,5C_{66} + 0,25(C_{11} + C_{22}) + 0,5[(C_{12} + C_{66})^2 + 0,25(C_{11} - C_{22})^2]^{\frac{1}{2}}$$

32. Persamaan 2.34

$$\rho V_{11}^2 = 0,5C_{66} + 0,25(C_{11} + C_{22}) - 0,5[(C_{12} + C_{66})^2 + 0,25(C_{11} - C_{22})^2]^{\frac{1}{2}}$$

33. Persamaan 2.35

$$\rho V_{12}^2 = 0,5(C_{44} + C_{55})$$

34. Persamaan 2.36

$$\rho V_{13}^2 = 0,5C_{55} + 0,25(C_{11} + C_{33}) + 0,5[(C_{13} + C_{55})^2 + 0,25(C_{11} - C_{33})^2]^{\frac{1}{2}}$$

35. Persamaan 2.37

$$\rho V_{14}^2 = 0,5C_{55} + 0,25(C_{11} + C_{33}) - 0,5[(C_{13} + C_{55})^2 + 0,25(C_{11} - C_{33})^2]^{\frac{1}{2}}$$

36. Persamaan 2.38

$$\rho V_{15}^2 = 0,5(C_{44} + C_{66})$$

37. Persamaan 2.39

$$\rho V_{16}^2 = 0,5C_{44} + 0,25(C_{22} + C_{33}) + 0,5[(C_{23} + C_{44})^2 + 0,25(C_{22} - C_{33})^2]^{\frac{1}{2}}$$

38. Persamaan 2.40

$$\rho V_{17}^2 = 0,5C_{44} + 0,25(C_{22} + C_{33}) - 0,5[(C_{23} + C_{44})^2 + 0,25(C_{22} - C_{33})^2]^{\frac{1}{2}}$$

39. Persamaan 2.41

$$\rho V_{18}^2 = 0,5(C_{55} + C_{66})$$

40. Persamaan 4.1

$$[C] = \begin{bmatrix} 2,78 & 1,27 & 1,70 & 0 & 0 & 0 \\ 1,27 & 2,42 & 1,35 & 0 & 0 & 0 \\ 1,70 & 1,35 & 2,23 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,87 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,77 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,57 \end{bmatrix} \times 10^{11} \text{ Pa}$$

41. Persamaan 4.1

$$[C] = \begin{bmatrix} 2,64 & 1,48 & 1,56 & 0 & 0 & 0 \\ 1,48 & 2,63 & 1,63 & 0 & 0 & 0 \\ 1,56 & 1,63 & 2,35 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,94 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1,08 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,53 \end{bmatrix} \times 10^{11} \text{ Pa}$$

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1. Grafik Pengukuran Cepat Rambat Gelombang Ultrasonik

LAMPIRAN 2. Penghitungan Konstanta dan Atenuasi Gelombang Ultrasonik



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Penelitian

Karena sifatnya yang tahan terhadap korosi dan harga yang relatif rendah, dibandingkan material paduan super, *Cast Austenitic Stainless Steel* (CASS) digunakan dalam banyak aplikasi temperatur tinggi. Unsur paduan dan proses pengecoran (*casting*) yang digunakan dalam fabrikasi material CASS membentuk sifat ketahanan korosi dan kekuatan yang baik. Akan tetapi hal ini juga menjadikan sifat mikrostruktur yang kompleks dan ukuran butir yang kasar. Hal ini menyebabkan material menjadi tidak homogen (*inhomogenous*) dan anisotropik. Proses pengecoran dapat menghasilkan struktur butir yang kolumnar/dendritik bahkan dalam skala satuan sentimeter. Butir kolumnar ini memiliki orientasi yang sejajar dengan disipasi panas yang biasanya tegak lurus permukaan material. Ditambah lagi pada saat proses solidifikasi, bentuk butir kolumnar, equiakial (*nodular*), atau campurannya dipengaruhi oleh kandungan unsur paduan, kontrol temperatur pada saat pendinginan, dan beberapa variabel proses pengecoran lainnya^[1].

Sifat anisotropik material inilah yang menjadi keterbatasan untuk dilakukan inspeksi dengan menggunakan *ultrasonic testing* apabila dibandingkan dengan material hasil pengerjaan panas (*heat treatment*) dengan struktur butir yang relatif homogen. Sebagai akibatnya, kecepatan perambatan gelombang ultrasonik bergantung pada masing-masing arah material anisotropik tersebut^[2]. Demikian halnya pada *tube reformer* yang digunakan dalam instalasi temperatur tinggi di industri petrokimia. Material ini berbasis *stainless steel* yang difabrikasi melalui metode pengecoran sentrifugal (*centrifugal casting*) dan berfasa *austenite* dengan paduan niobium dan tambahan unsur titanium, tungsten, ataupun molibdenum sebagai paduan mikro.

Ultrasonic testing adalah salah satu metode *Non-Destructive Evaluation* yang cukup akurat dan ergonomis dalam mendeteksi cacat material baik itu pengukuran dimensi cacat (*sizing*) maupun kedalaman cacat pada suatu material isotropik^[3]. Sehingga, pengujian ini sangat banyak digunakan dalam inspeksi pada

instalasi-instalasi pabrik, terutama di industri petrokimia. Akan tetapi, dengan adanya keterbatasan pada material seperti halnya pada *tube catalyst/tube reformer* yang bersifat anisotropik, pengujian dengan gelombang ultrasonik dihadapkan pada beberapa masalah, antara lain sebagai berikut:

- a. Dapat terjadi kesalahan analisis lokasi reflektor karena penyebaran gelombang yang miring (*beam skewing*) dan variasi kecepatan energi dengan sudut tertentu yang melalui material anisotropik tersebut. Sehingga akan terjadi kebingungan dalam pengukuran cacat (*defect sizing*).
- b. Terjadi anomali pada fokus penyebaran (*beam focus*), divergensi/penyimpangan (*diverging*), pembagian (*splitting*), dan ketidaksimetrisan propagasi gelombang. Sebagai akibatnya, gelombang ultrasonik menjadi terdistorsi^[4].

Untuk meningkatkan efektifitas dari *ultrasonic testing* pada material anisotropik, fenomena-fenomena yang terkait dengan interaksi antara gelombang ultrasonik dengan material anisotropik harus dipahami dan dipelajari lebih lanjut. Dan pemodelan adalah suatu pendekatan yang sangat efektif untuk mengembangkan *ultrasonic testing* sebagai salah satu metode inspeksi material *tube reformer* maupun material anisotropik lainnya. Untuk melakukan pemodelan tersebut, aspek metalurgi dan mekanik suatu material harus diketahui terlebih dahulu. Karakteristik material tersebut harus diketahui untuk menentukan *transducer* dan sinyal analisis yang sesuai.

1.2. Perumusan Masalah

Gelombang ultrasonik adalah jenis gelombang yang memanfaatkan sifat elastisitas suatu material, maka langkah awal dalam pengembangan metode inspeksi ini adalah dengan menentukan konstanta elastisitas material anisotropik tersebut. Teknik potongan kubus (*cube cutting method*) adalah salah satu metode yang cukup akurat untuk mengkarakterisasi tingkat elastisitas material anisotropik^[4]. Dan seringkali mengalami keterbatasan pada instrumentasi terutama pada diameter *probe* yang lebih besar dibandingkan dimensi sampel. Sebagai akibatnya, terjadi kehilangan energi dan distorsi gelombang ultrasonik.

Oleh karena itu, tingkat efektifitas dimensi sampel pada metode ini harus diketahui sebagai bahan pertimbangan apakah *cube cutting method* masih dapat diaplikasikan pada material *reformer tube*. Mengingat material tersebut yang hanya dapat memenuhi persyaratan minimum dimensi sampel pada metode *cube cutting technique*. Selain itu, tingkat atenuasi juga perlu diketahui dalam rangka penentuan mode gelombang dan frekuensi yang sesuai untuk dijadikan data masukan pada *modeling ultrasonic testing* material anisotropik.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Sebagai langkah awal dalam mengembangkan metode inspeksi *ultrasonic testing* pada material IN-519 (*cast austenitic stainless steel*) dengan *modeling*.
- b. Menentukan beberapa nilai konstanta elastisitas material IN-519 (*cast austenitic stainless steel*) dengan menggunakan teknik potongan kubus (*cube-cutting method*).
- c. Memprediksi tingkat efektifitas sampel kubus dengan ukuran minimum pada metode *cube-cutting method*.
- d. Mengamati hubungan antara nilai konstanta elastisitas material IN-519 (*cast austenitic stainless steel*) dan tingkat atenuasi gelombang ultrasonik dengan variabel frekuensi gelombang.
- e. Mengamati pengaruh perlakuan panas material terhadap nilai konstanta elastisitas material IN-519 (*cast austenitic stainless steel*) dan tingkat atenuasi gelombang ultrasonik.

1.4. Ruang lingkup Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan batasan-batasan khusus sebagai ruang lingkungannya, yaitu :

1.4.1. Material

Pada penelitian ini, material *tube reformer* yang digunakan adalah material tahan temperatur tinggi yang tergolong kedalam jenis *cast austenitic stainless steel*. Material ini tidak termasuk kedalam standar *heat resistant steel* seperti HP atau HN seperti pada ASTM A297. Akan tetapi termasuk ke dalam *heat resistant*

steel non standar yang merupakan pengembangan dari material HK 40 dengan designasi IN-519.

1.4.2. Bentuk Pengujian

Adapun bentuk pengujian yang akan dilakukan sebagai upaya untuk memenuhi data yang akan digunakan sebagai bahan analisis, diantaranya adalah sebagai berikut:

- a) Komposisi kimia (spektrometri).
- b) Metalografi makro dan mikro.
- c) Perlakuan panas *solution treatment (solution anneal)*.
- d) Pengukuran cepat rambat gelombang ultrasonik.
- e) Pengukuran atenuasi gelombang ultrasonik.

1.4.3. Parameter Penelitian

Pada penelitian ini beberapa variabel digunakan sebagai data pembanding dalam menentukan pengaruh faktor-faktor tersebut di atas, dengan pengelompokan sebagai berikut:

- a) Teknik potongan kubus (*cube cutting method*) dengan orientasi sisi yang sejajar arah θ atau bidang (100), L atau bidang (010), dan R atau bidang (001) serta sampel pelat dengan ketebalan arah R (arah diameter *tube*).
- b) Ukuran sampel kubus 10 X 10 X 10 mm dan pelat dengan ketebalan 7 mm.
- c) Sampel kubus dan pelat yang mengalami perlakuan panas *solution anneal* dan *non-anneal*.
- d) Mode gelombang longitudinal, transversal.
- e) Frekuensi gelombang 1 MHz, 2,25 Mhz, 4 MHz, dan 5 MHz.

1.4.3. Tempat Penelitian

Pada penelitian ini, *trial and error* pengujian ultrasonik dilakukan di Departemen Inspeksi Teknik PT Pupuk Kalimantan Timur. Kemudian, perlakuan panas (*solution anneal*) dan pengamatan makro serta mikrostruktur dilakukan di Laboratorium Metalografi dan HST Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Dan pengujian komposisi material dengan metode spektrometri dilakukan di *Centre for Material Processing and Failure Analysis (CMPFA)* Universitas Indonesia. Pengambilan data cepat rambat dan atenuasi gelombang ultrasonik dilakukan di Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN)

PUSPIPTEK Serpong dan laboratorium Ultrasonik Departemen Teknik Fisika Institut Teknologi Bandung. Serta beberapa *probe* sudut yang dipinjam dari PT Radiant Utama.

1.5. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam penulisan skripsi ini digambarkan dalam bentuk bab-bab yang saling berkaitan satu sama lain. Adapun sistematika penulisan laporan penelitian ini adalah sebagai berikut:

BAB 1 PENDAHULUAN

Pada bab ini dijelaskan mengenai latar belakang penelitian, perumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dijelaskan tentang studi literatur dan materi-materi yang berkaitan dengan penelitian ini.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi mengenai langkah kerja, prosedur penelitian, prinsip pengujian, daftar alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian, serta preparasi sampel hingga diagram alir proses penelitian.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai pengolahan data yang didapat dari hasil pengujian yang telah dilakukan. Dan juga berisi analisis dari hasil penelitian tersebut yang dibandingkan dengan hasil studi literatur.

BAB 5 KESIMPULAN

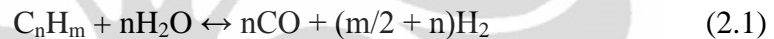
Bab ini berisikan kesimpulan akhir berdasarkan hasil dan pembahasan penelitian ini.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Material Tube Reformer

Catalytic reforming adalah suatu sistem yang didesain untuk meningkatkan kualitas dari industri petrokimia penghasil ammonia (NH₃). *Reformer* sendiri terdiri dari tabung-tabung (*tubes*) yang merupakan tempat terjadinya reaksi antara uap air (*steam*) dan gas alam. Tabung-tabung (*tubes*) tersebut berisi katalis dan disusun dalam *furnace* yang dilengkapi dengan *burner*. Kemudian reaksi terjadi antara hidrokarbon dengan *steam* melalui katalis pada temperatur tinggi dan menghasilkan hidrogen yang akan digunakan untuk sintesis ammonia (NH₃).



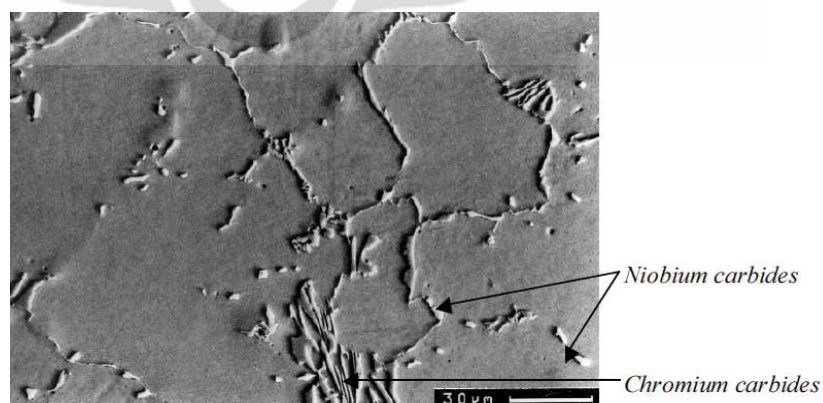
Karena jumlah mol produk melebihi jumlah mol reaktan, reaksi ini membutuhkan pembakaran gas alam atau untuk masukan energi panas karena reaksinya yang bersifat endotermik. Temperatur yang tinggi menyebabkan timbulnya tegangan aksial pada *tube* dan bertendensi kearah terjadinya kegagalan material. Tekanan yang ada dalam *tube* juga menimbulkan tegangan internal pada arah rotasi *tube* (*hoop stress*). Kedua macam tegangan ini akan mereduksi umur pakai *tube reformer/tube catalyst*. Untuk mengatasi hal tersebut, digunakan material yang memiliki ketahanan terhadap kegagalan dan memenuhi parameter aplikasi untuk *furnace*. Material ini harus tahan terhadap temperatur tinggi dibawah tekanan internalnya, tahan terhadap *creep*, dan tahan terhadap serangan korosi serta kontaminan dari *furnace*^[5].



Gambar 2.1. Kolom-kolom *tube reformer* dalam sebuah *furnace*^[5].

Material yang digunakan dalam *tube reformer* adalah *stainless steel* Fe-Ni-Cr terutama jenis *heat resistant steel* dengan designasi IN-519. Material tersebut memiliki ketahanan terhadap korosi gas panas dan ketahanan terhadap kegagalan akibat pemuluran (*Creep-Rupture Strength*) pada temperatur 800-900 °C. Material ini difabrikasi melalui metode *casting centrifugal*. Dengan metode fabrikasi dan komposisi kimia yang ada, maka paduan tersebut memiliki struktur yang bervariasi. Memiliki struktur butir kolumnar dan ekuiaksial. Dengan metode fabrikasi melalui pengecoran (*casting*), maka material dengan fasa *austenite* lebih banyak memiliki struktur butir kolumnar dibandingkan dengan fasa *ferrite*. Dengan penambahan 1,25–1,5 % niobium, akan terjadi presipitasi niobium karbida (Nb_xC_y) yang dominan di batas butir kolumnar dan ekuiaksial. Niobium, titanium, zirconium, tungsten, dan molibdenum sendiri merupakan pembentuk karbida yang kuat (*strong carbide former*)^[5].

Pada aplikasi temperatur tinggi, yang menjadi ancaman utama terjadinya kegagalan material adalah pemuluran (*creep*). Hal ini disebabkan karena pada kondisi tersebut, deformasi akibat tekanan tidak lagi berfokus pada pergerakan dislokasi didalam butir. Akan tetapi, lebih kearah *sliding* pada batas butir. Sehingga, ketika diaplikasikan energi yang tinggi dalam hal ini adalah temperatur, maka akan terjadi pergeseran batas butir dan menyebabkan pemuluran pada material (*creep*). Oleh karena itu, karbida seperti (Nb_xC_y) pada batas butir, dapat mencegah terjadinya pemuluran dan meningkatkan *creep resistance* serta umur pakai material^[6].



Gambar 2.2. Mikrostruktur material IN-519 dengan karbida-karbida pada batas butir (500X)^[6].



Gambar 2.3. Mikrostruktur butir kolumnar/dendritik material IN -519 (50X)^[6].

2.2. Elastisitas Linear Material

Elastisitas linear dideskripsikan sebagai hubungan antara tegangan (σ) dan regangan (ϵ) dalam kondisi elastisnya. Ketika material mendapatkan pembebanan dari luar, maka pada mulanya akan mengalami deformasi dengan ditandai perubahan dimensi (*displacement*) dalam skala mikro. Dan kemudian, apabila aplikasi beban dihilangkan, maka material akan kembali dalam bentuk dan ukuran semula. Hal ini disebabkan karena atom-atom yang ada pada material memiliki semacam energi yang bersifat elastis yang menghubungkan anantara satu atom bebas dengan atom bebas lainnya. Sifat inilah yang disebut sebagai perilaku elastis (*elastic behavior*). Batas pembebanan dimana material tidak lagi bersifat elastis disebut sebagai batas elastis (*elastic limit*)^[7].

Kebanyakan material, sepanjang beban tidak melewati batas elastisnya, maka deformasi dikatakan proporsional terhadap pembebanan. Hubungan ini dikenal sebagai **Hukum Hooke**, yang menyatakan bahwa tegangan proporsional terhadap regangan. Dan berikut adalah persamaan yang berkaitan dengan elastisitas linear.

$$\sigma = E \epsilon \quad (2.3)$$

Dengan σ sebagai tegangan (*stress*) dan ϵ sebagai regangan (*strain*) serta E adalah modulus elastisitas atau dikenal sebagai *Modulus Young*. Hal ini dapat dilihat dari kurva pengujian tarik suatu material logam di bawah ini. Modulus elastisitas berlaku pada daerah elastis dimana material tidak mengalami deformasi plastis.

Hal ini biasa digunakan pada desain pembebanan agar material tersebut bekerja dibawah batas elastisitasnya. Sehingga, dapat mencegah terjadinya deformasi plastis yang akan mengarah kepada patah akibat kegagalan material^[8].

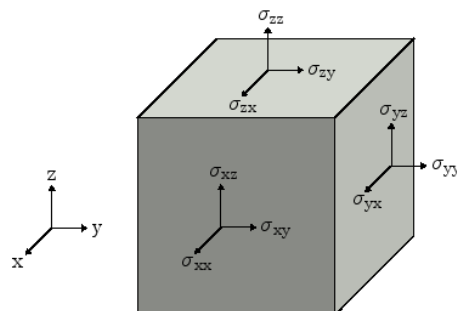


Gambar 2.4. Kurva tegangan versus regangan pada suatu material logam^[8].

Ketika berbicara tentang elastisitas linear, maka ada dua macam tegangan utama yang saling berinteraksi, yakni tegangan tarik (*tensile stress*) dan tegangan geser (*shear stress*). Kedua sistem pembebanan ini memiliki masing-masing modulus yang merepresentasikan sifat elastisitas material. Modulus young (E) pada beban tarik dan Modulus geser (G) pada beban geser. Pada sistem pembebanan geser, tegangan dinotasikan sebagai τ dan regangannya dinotasikan sebagai γ .

$$\tau = G \gamma \quad (2.4)$$

Persamaan-persamaan yang berkaitan dengan tegangan dan regangan disebut sebagai persamaan konstitutif (*constitutive equation*), yakni persamaan yang bergantung pada perilaku material itu sendiri terutama pada material solid. Tegangan yang bekerja pada material, dianalogikan pada suatu kubus dengan orientasi yang berbeda pada tiga arah dimensi, yakni arah x , y , dan z untuk memudahkan pemahaman. Sistem ini disebut sistem pembebanan triaksial^[7].



Gambar 2.5. Tegangan-tegangan yang bekerja pada *elemental cube*^[7].

Masing-masing tegangan yang bekerja dinotasikan pada tiap arah. Tegangan tarik yang bekerja pada arah x dinotasikan sebagai σ_{xx} , pada arah y berupa σ_{yy} dan pada arah z dinotasikan sebagai σ_{zz} . Sedangkan σ_{xy} , σ_{xz} , dan σ_{yz} adalah tegangan geser yang bekerja pada bidang xy, xz dan bidang yz atau dapat dinotasikan dengan τ_{xy} , τ_{xz} , dan τ_{yz} . Atau dengan kata lain, τ_{xy} adalah tegangan geser yang tegak lurus x dan menuju arah y, sedangkan τ_{xz} adalah tegangan geser yang tegak lurus x dan menuju arah z. Demikian halnya sama dengan tegangan lain pada bidang *elemental cube* yang berbeda. Kemudian karena besarnya tegangan geser pada bidang xy sama dengan besarnya tegangan pada bidang yx dan begitu juga pada bidang xz yang sama dengan zx serta yz yang sama dengan zy, maka notasinya menjadi seperti dibawah ini.

$$\tau_{ij} = \tau_{ji} \quad (2.5)$$

Kemudian, notasi tersebut juga dapat dikonversikan menjadi notasi angka agar dapat lebih memudahkan dalam pemahaman yang dipakai oleh sebagian besar dalam penghitungan yang berkaitan dengan elastisitas material. Notasi σ_{xx} menjadi σ_{11} , σ_{yy} menjadi σ_{22} , σ_{zz} menjadi σ_{33} , τ_{xy} menjadi τ_{12} , τ_{xz} menjadi τ_{13} , dan τ_{yz} menjadi τ_{23} ^[7].

2.3. Matriks Kekakuan (*Stiffness Matrix*)

2.3.1 Material Isotropik

Apabila gambar kubus diatas diasumsikan sebagai kristal tunggal pada sebuah material, maka diketahui hubungan antara tegangan-tegangan yang bekerja pada masing-masing arah yang besarnya berbeda berdasarkan besarnya konstanta yang berhubungan dengan tegangan dan regangan tersebut. Pada material isotropik, yang sifat materialnya sama disemua arah, hanya memiliki dua variable konstanta utama (konstanta elastisitas) dalam matriks kekakuannya, yakni berupa modulus young (E) dan *poisson ratio* (ν) atau modulus geser (G) dengan penghitungan melalui persamaan berikut.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.6)$$

Matriks kekakuan berbentuk simetris dan mendeskripsikan tentang hubungan antara tegangan dan regangan pada arah tiga dimensi yakni arah x, y,

dan z (dalam sistem kartesius). Berikut ini adalah hubungan antara regangan akibat tegangan tarik dan geser pada material isotropik yang direpresentasikan pada sistem matiks.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

2.3.2. Material Anisotropik

Ketika sifat fisik dan mekanik suatu material sama dalam semua arah, maka material tersebut dikatakan sebagai material isotropic. Sedangkan apabila dalam suatu sistem kristal, sifat fisik dan mekanik pada semua arahnya berbeda, maka material ini bersifat anisotropik. Dan berikut adalah hubungan antara tegangan dan regangan material anisotropik dalam elastisitas linear.

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl} \quad (2.8)$$

Dengan σ_{ij} adalah tegangan pada vektor (ij), C_{ijkl} adalah konstanta elastisitas material, dan ε_{kl} adalah regangan dalam vektor (kl). Apabila dijabarkan dengan ilustrasi tegangan-tegangan pada *elemental cube* gambar 2, maka akan diperoleh hubungan sebagai berikut^[7].

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= C_{1111}\varepsilon_{11} + C_{1122}\varepsilon_{22} + C_{1133}\varepsilon_{33} + C_{1123}\gamma_{23} + C_{1113}\gamma_{13} + C_{1112}\gamma_{12} \\ \sigma_{22} &= C_{2211}\varepsilon_{11} + C_{2222}\varepsilon_{22} + C_{2233}\varepsilon_{33} + C_{2223}\gamma_{23} + C_{2213}\gamma_{13} + C_{2212}\gamma_{12} \\ \sigma_{33} &= C_{3311}\varepsilon_{11} + C_{3322}\varepsilon_{22} + C_{3333}\varepsilon_{33} + C_{3323}\gamma_{23} + C_{3313}\gamma_{13} + C_{3312}\gamma_{12} \\ \tau_{23} &= C_{2311}\varepsilon_{11} + C_{2322}\varepsilon_{22} + C_{2333}\varepsilon_{33} + C_{2323}\gamma_{23} + C_{2313}\gamma_{13} + C_{2312}\gamma_{12} \\ \tau_{13} &= C_{1311}\varepsilon_{11} + C_{1322}\varepsilon_{22} + C_{1333}\varepsilon_{33} + C_{1323}\gamma_{23} + C_{1313}\gamma_{13} + C_{1312}\gamma_{12} \\ \tau_{12} &= C_{1211}\varepsilon_{11} + C_{1222}\varepsilon_{22} + C_{1233}\varepsilon_{33} + C_{1223}\gamma_{23} + C_{1213}\gamma_{13} + C_{1212}\gamma_{12} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Sehingga dalam konstelasi sistem matriks, persamaan yang menunjukkan hubungan antara tegangan dan regangan pada material anisotropik adalah sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1123} & C_{1113} & C_{1112} \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2223} & C_{2213} & C_{2212} \\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & C_{3323} & C_{3313} & C_{3312} \\ C_{2311} & C_{2322} & C_{2333} & C_{2323} & C_{2313} & C_{2312} \\ C_{1311} & C_{1322} & C_{1333} & C_{1323} & C_{1313} & C_{1312} \\ C_{1211} & C_{1222} & C_{1233} & C_{1223} & C_{1213} & C_{1212} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Notasi matriks kekakuan (*stiffness matrix*) yang terdiri dari 36 konstanta elastisitas ini, disederhanakan menjadi $C_{ijkl} = C_{mn}$ dengan ketentuan **ij=11** menjadi **m=1**, **ij=22** menjadi **m=2**, **ij=33** menjadi **m=3**. Kemudian untuk **kl=23** menjadi **n=4**, **kl=13** menjadi **n=5**, dan **kl=12** menjadi **n=6**. Sehingga diperoleh matriks kekakuan dengan notasi konstanta elastisitas yang baru.

$$[C_{ijkl}] = [C_{mn}] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Pada material anisotropik besar $C_{mn} = C_{nm}$, hal ini mengakibatkan konstanta elastisitas yang berjumlah 36 tereduksi menjadi 21 buah karena kesimetrisan konstanta elastisitas nondiagonal. Sebagai contoh, $C_{12} = C_{21}$, $C_{13} = C_{31}$, dan konstanta elastisitas diagonalnya seperti C_{11} , C_{22} , C_{33} , C_{44} , C_{55} , dan C_{66} tetap dan tidak tereduksi. Sehingga, matriks kekakuannya berubah menjadi seperti dibawah ini.

$$[C_{ijkl}] = [C_{mn}] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ & & \text{sym} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ & & & & C_{55} & C_{56} \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Matriks kekakuan diatas biasanya digunakan dalam sistem kristal orthogonal seperti bentuk kubik, tetragonal, dan ortorombik. Jumlah konstanta elastisitas yang ada pada matriks juga bergantung terhadap simetri kristal

materialnya. Ketika simetri kristal meningkat, maka jumlah konstanta elastisitasnya akan berkurang. Sebagai contoh pada material yang memiliki struktur kristal ortorombik. Sistem kristal ini membutuhkan sembilan konstanta elastisitas untuk mendeskripsikan elastisitas linearnya. Kemudian, pada material dengan struktur kristal tetragonal, dibutuhkan enam konstanta elastisitasnya.

Struktur kristal kubik hanya membutuhkan tiga konstanta elastisitas. Hal ini sesuai dengan ketentuan diatas yang menyatakan bahwa, semakin banyak simetri pada struktur kristal, maka jumlah konstanta elastisitasnya akan berkurang. Untuk mengilustrasikan penyebabnya, maka *elemental cube* pada gambar 2 diasumsikan sebagai struktur kristal kubik. Arah [100] adalah paralel terhadap sumbu x, [010] paralel terhadap sumbu y, dan [001] paralel terhadap sumbu z. apabila diaplikasikan tegangan pada arah [100], maka akan terbentuk respon yang ekuivalen terhadap tegangan yang diaplikasikan pada arah [010]. Demikian juga akan diperoleh respon yang sama dengan arah [001]. Dengan latarbelakang tersebut, maka dapat diambil kesimpulan bahwa $C_{11} = C_{22} = C_{33}$. Sama halnya dengan tegangan geser yang diaplikasikan pada arah [100] akan menghasilkan respon yang identik. Sehingga dapat diambil kesimpulan $C_{44} = C_{55} = C_{66}$. Dari beberapa kesimpulan tersebut, persamaan 2.9 yang begitu kompleks tereduksi menjadi lebih simpel dalam material anisotropik yang memiliki struktur kristal kubik (FCC dan BCC)^[9].

$$\begin{aligned}
 \sigma_{11} &= C_{11}\varepsilon_{11} + C_{12}\varepsilon_{22} + C_{12}\varepsilon_{33} \\
 \sigma_{22} &= C_{12}\varepsilon_{11} + C_{11}\varepsilon_{22} + C_{12}\varepsilon_{33} \\
 \sigma_{33} &= C_{12}\varepsilon_{11} + C_{12}\varepsilon_{22} + C_{11}\varepsilon_{33} \\
 \tau_{23} &= C_{44}\gamma_{23} \\
 \tau_{31} &= C_{44}\gamma_{31} \\
 \tau_{12} &= C_{44}\gamma_{12}
 \end{aligned}
 \rightarrow [C_{mn}] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & & & \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & & & \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & & & \\ & & & C_{44} & & \\ & & & & C_{44} & \\ & & & & & C_{44} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

2.3.3. Material orthotropik

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, material isotropik memiliki jumlah bidang yang semuanya simetris dan hanya memiliki dua konstanta elastisitas. Sedangkan pada material yang tidak memiliki bidang simetris

$$[C_{mn}] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & & & \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & & & \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & & & \\ & & & C_{44} & & \\ & & & & C_{44} & \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

2.4. Gelombang Ultrasonik

Suara merupakan bagian dari energi, suara berjalan melalui vibrasi atom-atom dan molekul-molekul serta merambat dengan kecepatan yang bergantung pada sifat mekanik dan sifat fisik dari suatu material. Oleh karenanya, ketidaksempurnaan dan adanya inklusi dari material menyebabkan gelombang suara mengalami hamburan dan menghasilkan gema, gaung, dan pengurangan energi. Gelombang ultrasonik merupakan bagian dari suara dengan frekuensi tinggi di atas 20 kHz. Gelombang ultrasonik merupakan gelombang elastis mekanis. Hal tersebut berarti gelombang ultrasonik memiliki karakter elastis dan karakter mekanis. Elastis berarti gelombang tersebut dapat dipantulkan dan mekanis berarti gelombang tersebut merambat dan perambatannya memberikan gambaran tentang sifat mekanis yang dimiliki oleh suatu material.

Ultrasonik memiliki sifat – sifat yang sama dengan gelombang suara yaitu, memiliki nilai frekuensi (f), panjang gelombang (λ), dan cepat rambat (v). Dalam plikasinya frekuensi yang digunakan bervariasi dari 0,1 sampai dengan 15 MHz, dan kebanyakan aplikasi inspeksi dalam logam menggunakan frekuensi di bawah 10 MHz. Panjang gelombang yang dipakai antara 1-10 mm dan cepat rambat yang digunakan antara 1-10 km/s^[12].

2.4.1. Karakteristik Gelombang Ultrasonik

Karakteristik gelombang ultrasonik adalah dapat dipantulkan dan dapat diteruskan apabila melewati batas media yang memiliki perbedaan impedansi akustik. Pantulan akan bermacam-macam bentuknya dari pemantulan (refleksi), pembiasan (refraksi) sampai pada penghamburan (*scattering*). Impedansi akustik tiap material berbeda-beda, karena impedansi merupakan hasil kali **densitas** dan **kecepatan** gelombang ultrasonik pada material tersebut.

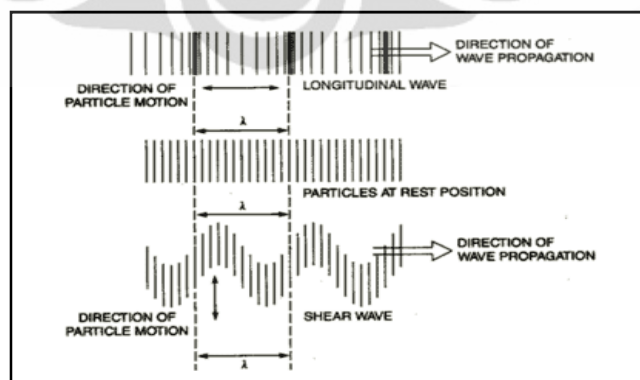
Tiap material memiliki densitas dan kecepatan gelombang ultrasonik yang berbeda-beda. Sehingga karakterisasi material melalui gelombang ultrasonik sangat dimungkinkan. Semakin besar perbedaan impedansi akustik antara media yang satu dengan yang lain maka fenomena pantulan akan semakin besar dan fenomena penerusan akan semakin kecil, begitu juga sebaliknya^[13].

2.4.2. Mode Gelombang Ultrasonik

Dalam material padat, gelombang ultrasonik dapat merambat dalam 4 (empat) bentuk yang mengacu dari arah getaran partikel – partikel pada material padat. Gelombang ultrasonik dapat merambat dalam bentuk gelombang longitudinal, gelombang transversal, gelombang permukaan, dan pada material tipis berlaku gelombang tipis (*plate waves*). Gelombang longitudinal dan gelombang transversal merupakan gelombang yang paling sering digunakan dalam pengujian ultrasonik.

2.4.2.1. Gelombang Longitudinal dan gelombang transversal

Dalam gelombang longitudinal, peristiwa osilasi terjadi pada arah longitudinal atau arah dari perambatan gelombang. Sejak gaya dilatasi dan gaya tekan aktif pada gelombang–gelombang ini, maka gelombang ini disebut juga gelombang tekan (*pressure* atau *compression waves*). Gelombang ini sering disebut juga gelombang kerapatan (*density waves*) karena kerapatan partikel berfluktuasi saat gelombang ini bergerak. Gelombang ini dapat dipakai di material cair dan padat karena perjalanan energi melalui struktur atom terjadi dengan beberapa seri dari perbandingan dan ekspansi^[14].



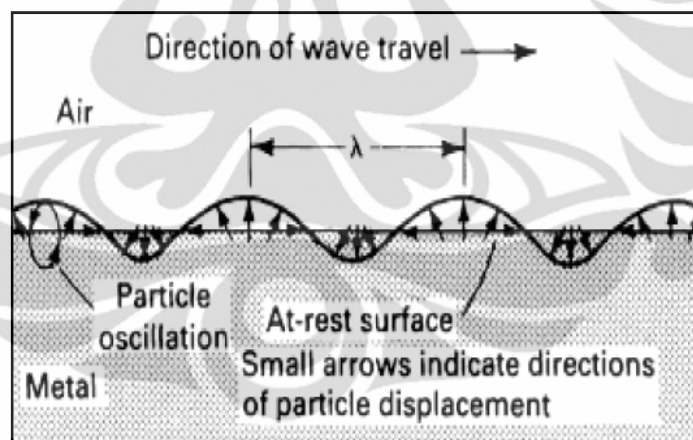
Gambar 2.7. Pergerakan partikel akibat gelombang ultrasonik longitudinal (atas) dan akibat gelombang ultrasonik transversal (bawah)^[14].

Dalam gelombang transversal atau gelombang geser, partikel – partikel berosilasi pada right angle atau arah transversal pada arah merambat. Gelombang

transversal membutuhkan material solid yang akustik untuk merambat yang efektif, karena itu gelombang ini tidak efektif merambat pada material cair dan gas. Gelombang transversal relatif lebih lemah jika dibandingkan dengan gelombang longitudinal. Faktanya gelombang transversal sering diambil menggunakan beberapa energi dari gelombang longitudinal^[12].

2.4.2.2. Gelombang Permukaan/Gelombang *Rayleigh* (*Rayleigh wave*)

Gelombang permukaan berjalan pada permukaan yang datar ataupun melengkung pada material dengan kedalaman maksimum satu panjang gelombang. Partikel padatan berosilasi secara rotasional berbentuk elips. Gelombang ini harus berjalan sepanjang satu sisi permukaan dengan gaya elastik yang kuat dan gaya elastik yang bekerja pada udara diabaikan. Karena interaksi gelombang ini pada suatu sisi permukaan material, maka akan terjadi kebocoran energi perambatan pada cairan *couplant* ataupun ketika benda solid tercelup di dalam cairan. Untuk mengantisipasi hal tersebut, cairan yang meliputi media padat harus setipis mungkin untuk menghindari terjadinya *lost energy*^[14].



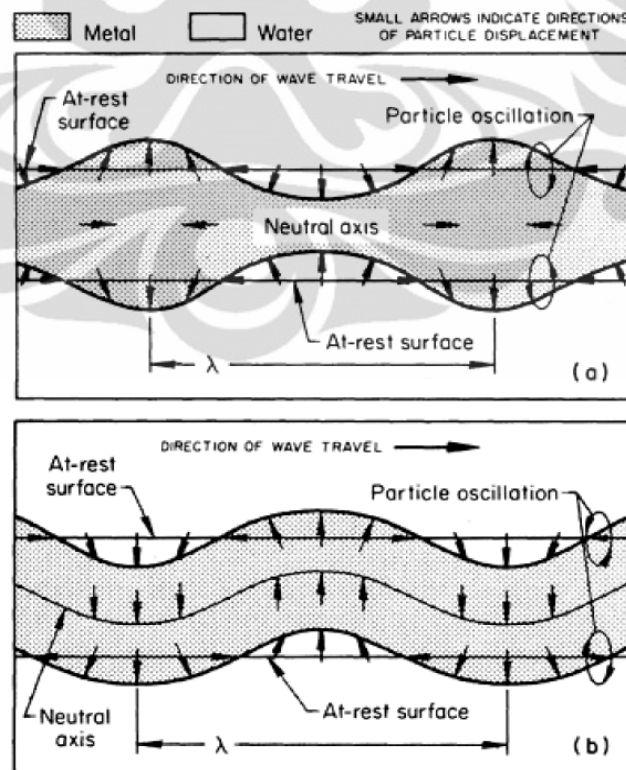
Gambar 2.8. Ilustrasi propagasi gelombang permukaan pada antarmuka logam dan udara^[14].

Gelombang permukaan berjalan mengikuti kontur material, sebagai contoh ketika merambat pada permukaan atas sebuah blok logam, maka gelombang akan terpantul dari sudut yang tajam. Gelombang ini akan berjalan mengelilingi mengelilingi permukaan sebuah kubus apabila sudut sudutnya berbentuk bulatan. Oleh karena itu, gelombang ini digunakan untuk menginspeksi permukaan material dengan kontur yang kompleks.

2.4.2.3. Gelombang tipis/Gelombang *Lamb* (*Lamb Wave*)

Jenis gelombang ini berpropagasi pada pelat logam maupun komposit dengan ketebalan kurang dari setengah panjang gelombang. Gelombang tipis terdiri dari getaran kompleks yang terjadi melalui ketebalan suatu material. Karakteristik propagasinya bergantung pada densitas, elastisitas, struktur material, ketebalan, dan frekuensi. Ada dua macam jenis gelombang pelat, yakni gelombang yang simetris (dilatasi) dan asimetris/penekukan (*bending*). Masing-masing jenis gelombang pelat tersebut dibagi kedalam subdivisi dengan mode kecepatan yang berbeda. Kecepatan ini dapat dikontrol dengan sudut ketika gelombang memasuki spesimen uji. Secara teoritis, jumlah kecepatan spesifik dari gelombang pelat jumlahnya tak terbatas dan merupakan fungsi kompleks dari ketebalan material dan frekuensinya^[14].

Didalam gelombang pelat simetris terjadi perpindahan (*displacement*) partikel secara longitudinal dengan mengacu pada sumbu netral spesimen (*neutral axis*). Sedangkan pada jenis gelombang pelat asimetris terjadi perpindahan partikel secara transversal. Hal ini dapat diilustrasikan melalui gambar 2.9.



Gambar 2.9. (a) Ilustrasi propagasi gelombang pelat simetris, (b) Propagasi gelombang pelat asimetris^[14].

2.4.3. Hubungan Sifat-sifat Material dan Gelombang Ultrasonik

Cepatrambat gelombang ultrasonik bergantung pada material yang menjadi media perambatanya. Hal ini dikarenakan masa dari partikel atom dan konstanta pegas untuk tiap material berbeda-beda. Masa partikel atom berhubungan dengan berat jenis material. Konstanta pegas berhubungan dengan konstanta elastisitas dari material. Secara umum hubungan antara kecepatan gelombang di dalam material solid, berat jenisnya, dan konstanta elastisnya dijelaskan oleh persamaan di bawah ini :

$$V = \sqrt{C_{ij} / \rho} \quad (2.16)$$

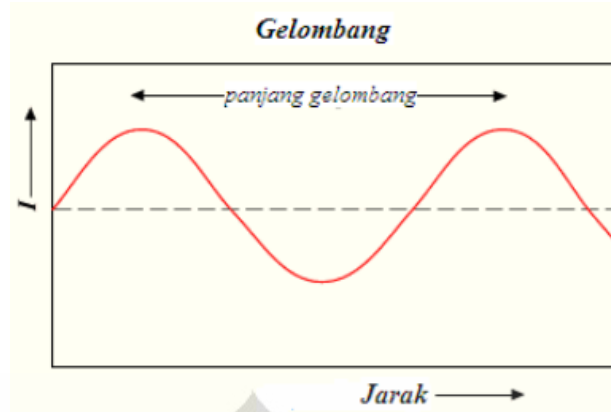
Dimana, V adalah kecepatan suara, C konstanta elastis, dan ρ berat jenis material. Perhitungan ini memiliki bentuk yang berbeda-beda tergantung pada tipe gelombangnya (gelombang longitudinal atau gelombang transversal) dan konstanta elastis yang digunakan. Ketika melakukan perhitungan kecepatan gelombang longitudinal biasa digunakan Modulus Young dan Poisson's Ratio. Ketika melakukan perhitungan dari gelombang transversal maka Modulus Geser digunakan.

Hal yang perlu diperhatikan ialah notasi C_{ij} , dalam perhitungan di atas digunakan untuk mengindikasikan arah dari konstanta elastis dalam pengaruhnya terhadap jenis gelombang dan arah dari perjalanan gelombang. Dalam material isotropik, konstanta elastik material sama untuk semua arah di dalam material. Namun, kenyataannya kebanyakan dari material merupakan material anisotropik dan memiliki konstanta elastisitas yang berbeda untuk tiap arahnya.

2.4.4. Fisika Gelombang

2.4.4.1. Panjang Gelombang

Panjang Gelombang adalah sebuah jarak antara satuan berulang dari sebuah pola gelombang. Panjang gelombang sering dilambangkan notasi huruf Yunani lamda (λ). Dalam sebuah gelombang sinus, panjang gelombang adalah jarak antara puncak.



Gambar 2.10. Ilustrasi panjang gelombang^[17].

Panjang gelombang λ memiliki hubungan berbanding terbalik terhadap frekuensi f . Panjang gelombang merupakan kecepatan gelombang dibagi dengan frekuensi gelombang. Hubungannya dapat direpresentasikan melalui persamaan berikut:

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (2.17)$$

Dimana :

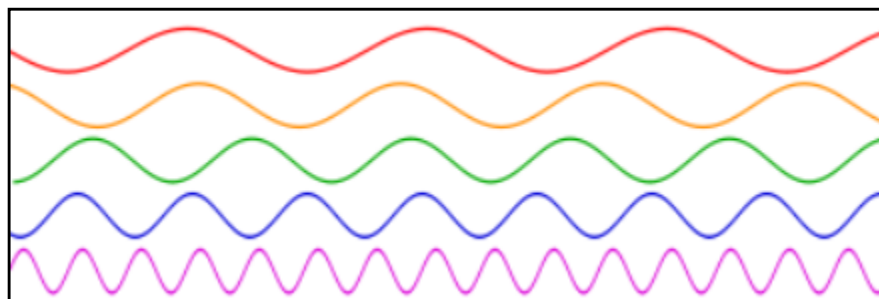
λ = panjang gelombang dari sebuah gelombang suara (meter)

V = kecepatan gelombang (m/s)

f = frekuensi gelombang (Hertz)

2.4.4.2. Frekuensi Gelombang

Frekuensi adalah ukuran jumlah putaran ulang per peristiwa dalam selang waktu yang diberikan. Hasil perhitungan ini dinyatakan dalam satuan hertz (Hz) ya itu nama pakar fisika Jerman *Heinrich Rudolf Hertz*, yang pertama menemukan fenomena ini kali. Frekuensi sebesar 1 Hz menyatakan peristiwa yang terjadi satu kali per detik.



Gambar 2.11. Gelombang sinusoidal dengan beberapa macam frekuensi, gelombang yang bawah mempunyai frekuensi yang lebih tinggi^[16].

Secara sederhana, seseorang bisa mengukur waktu antara dua buah kejadian/peristiwa (dan menyebutnya sebagai periode), lalu memperhitungkan frekuensi (f) sebagai hasil kebalikan dari periode (T), seperti nampak dari persamaan di bawah ini:

$$f = 1/T \quad (2.18)$$

2.4.5. Atenuasi Gelombang Ultrasonik

Atenuasi adalah fenomena pengurangan intensitas gelombang ultrasonik yang merambat melalui suatu material. Dalam kondisi ideal, atenuasi akan terjadi karena divergensi berkas gelombang. Akan tetapi pada kondisi sebenarnya ternyata unsur intrinsik material juga menyebabkan atenuasi. Namun, sifat material dan kondisi pembebanan dapat dihubungkan dengan atenuasi. Atenuasi seringkali berguna sebagai parameter yang berguna untuk membentuk teori atau menjelaskan fenomena fisik dan kimia yang menurunkan intensitas gelombang ultrasonik. Atenuasi terjadi dalam dua hal yaitu penyerapan (*absorpsi*) dan penghamburan gelombang (*scattering*). Unsur intrinsik itu adalah perbedaan kadar paduan, morfologi struktur mikro, dan variasi ukuran butir material yang satu dengan yang lainnya^[12].

Absorpsi terjadi karena energi mekanis berkas gelombang yang melewati media berubah menjadi energi panas, hal ini terjadi walaupun tidak menunjukkan adanya kenaikan temperatur material yang signifikan. *Scattering* terjadi apabila berkas gelombang melewati struktur yang secara mikro memiliki impedansi akustik yang berbeda, dalam hal ini batas butir memiliki impedansi akustik yang berbeda dengan butirnya karena butir dan batas butir memiliki perbedaan nilai densitas. Penghamburan merupakan bentuk pemantulan dengan sudut pantul yang acak karena berkas gelombang datang mengenai permukaan yang tidak beraturan. Perubahan amplitudo karena penurunan panjang gelombang dapat diekspresikan dengan persamaan berikut^[17].

$$A = A_0 e^{-\alpha z} \quad (2.19)$$

A_0 adalah amplitudo gelombang yang merambat pada beberapa lokasi yang sama. Amplitudo (A) akan berkurang setelah gelombang telah merambat pada jarak Z dari lokasi awal. Nilai α adalah koefisien atenuasi dari gelombang yang merambat pada arah sumbu z . Satuan dari α adalah *nepers/length* yang dapat dikonversikan menjadi *decibels/length* dengan membaginya dengan nilai 0,1151. Nilai desibel ini merupakan satuan yang lebih umum saat dihubungkan dengan nilai amplitudo dari dua sinyal. Nilai e adalah konstanta Napier's yang bernilai mendekati 2,71828.

$$\alpha = \frac{0,1151}{v} U_t \quad (2.20)$$

Dimana v kecepatan suara dalam m/s dan U_t dalam db/s. Atenuasi dapat ditentukan dengan mengevaluasi *multiple backwall reflections* yang dilihat dengan tampilan A-scan. Jumlah decibel di antara dua sinyal yang bersebelahan diukur dan nilai ini dibagi dengan interval waktu diantara mereka^[12].

2.4.6. Impedansi Akustik

Gelombang ultrasonic merambat pada material dan akan dipengaruhi oleh resistansi atom-atom pada material untuk bervibrasi ketika diberikan gaya. Resistansi ini disebut dengan impedansi akustik (Z). Pada pengujian *Non-Destructive Evaluation* (NDE) terutama *Ultrasonic testing*, retak, batas butir, atau inklusi terdeteksi melalui perubahan Z diantara media yang berbeda ketika penghamburan (*scattering*) dan pemantulan terjadi^[17].

Impedansi Akustik Z di dalam material didefinisikan sebagai hasil kali masa jenis material ρ dan kecepatan gelombang ultrasonik di dalam material V tersebut. Secara matematis ditulis sebagai berikut :

$$Z = \rho V \quad (2.21)$$

Impedansi akustik penting untuk menentukan penerusan dan pemantulan akustik pada batas diantara dua material yang memiliki perbedaan impedansi akustik, menentukan *design transducer* ultrasonik, dan menilai absorpsi suara di dalam media.

Perubahan impedansi juga mempengaruhi perubahan jumlah energi akustik yang diteruskan dan dipantulkan. Jumlah energi yang dipantulkan dan diteruskan merupakan jumlah fraksional dari jumlah energi yang diberikan pada permukaan material. Sehingga jumlah fraksional energi suara yang dipantulkan saat dijumlahkan dengan energi suara yang diteruskan sama dengan satu^[18].

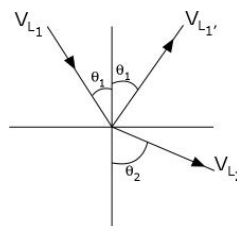
2.4.7. Pembiasan dan Hukum Snellius

Ketika gelombang ultrasonik melewati lapisan antar muka di dalam material pada sudut yang miring (*oblique*) dan material tersebut memiliki sumbu pembiasan yang berbeda, hal tersebut akan menghasilkan gelombang pantul dan gelombang bias. Seperti halnya pada cahaya, pembiasan (refraksi) terjadi pada lapisan antar muka karena perbedaan kecepatan pada gelombang suara diantara dua medium. Kecepatan suara di tiap medium ditentukan oleh sifat material (modulus elastis dan masa jenis). Saat sebuah gelombang masuk di antara dua medium, maka medium yang memiliki kecepatan akustik yang lebih tinggi menyebabkan gelombang lebih cepat bergerak di medium tersebut.

Hukum *Snellius* menjelaskan mengenai hubungan antara sudut dan kecepatan dari gelombang. Hukum ini menghitung perbandingan dari kecepatan gelombang pada material kesatu (V_1) dan pada material kedua V_2 terhadap perbandingan dari sinus sudut datang (θ_1) dan sudut pembiasan (refraksi) (θ_2) seperti yang ditunjukkan pada perhitungan di bawah ini :

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (2.22)$$

Dimana V_1 adalah kecepatan gelombang longitudinal pada medium pertama, dan V_2 adalah kecepatan gelombang pada medium kedua. Kemudian, $\sin \theta_1$ adalah nilai sinus sudut datang, dan $\sin \theta_2$ adalah nilai sinus sudut pantul^[19].



Gambar 2.12. Hukum snellius.

Perlu diperhatikan pada diagram di atas bahwa terdapat gelombang longitudinal yang dipantulkan atau direfleksikan (V_L1'). Gelombang ini dipantulkan pada sudut yang sama dengan sudut datang karena dua gelombang ini merambat pada material yang sama sehingga memiliki kecepatan yang sama. Ketika ada sebuah gelombang longitudinal yang bergerak dari material lambat ke cepat maka terdapat sudut datang yang membuat sudut bias (refraksi) menjadi 90° . Ini diketahui sebagai sudut kritis satu. Dari sudut ini kebanyakan dari energi akustik merupakan bentuk dari gelombang tekan (*compression*) yang tidak homogen, yang merambat di sepanjang permukaan dan menurun secara eksponensial dari permukaan. Gelombang ini sering disebut gelombang mulur (*creep*). Karena kondisi yang tidak homogen ini dan fakta bahwa gelombang ini mengalami penurunan energi secara cepat dan langsung, maka gelombang ini tidak digunakan seperti gelombang Rayleigh atau gelombang permukaan di dalam metode NDT. Namun gelombang mulur (*creep*) kadang berguna karena mereka sedikit mengalami pengaruh dari ketidakteraturan dari permukaan dan mikrostruktur material kasar dikarenakan panjang gelombang mereka yang lebih panjang dari gelombang permukaan (*Rayleigh Wave*)^[17].

2.5. Metode Pengukuran Konstanta Elastisitas

Nilai dari konstanta elastisitas yang merepresentasikan sifat-sifat mekanik dari material anisotropik relatif sulit untuk ditentukan. Tidak seperti pada material isotropik yang cukup dengan pengujian tarik saja sudah dapat menggambarkan sifat mekanik material secara umum. Untuk medium yang bersifat anisotropik, ada beberapa metode yang dapat digunakan baik itu yang bersifat merusak ataupun tidak dalam preparasi spesimen pengujianya. Dan gelombang ultrasonik memiliki kapasitas yang cukup akurat dalam penentuan konstanta elastisitas suatu material anisotropik^[20].

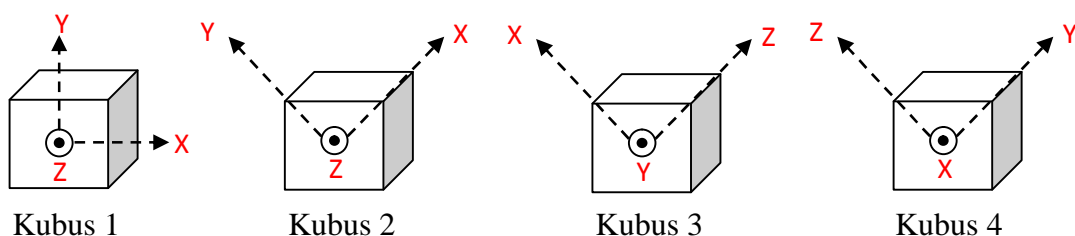
Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, gelombang ultrasonik adalah gelombang yang memanfaatkan sifat elastisitas material yang dilaluinya. Oleh karena itu, ultrasonik juga dapat dijadikan sebuah alat untuk mengkarakterisasi material yang memiliki struktur mikro yang kompleks dan tidak homogen ataupun material yang bersifat anisotropik. Mekanismenya melalui respon gelombang

ultrasonik terhadap material yang berupa kecepatan perambatannya. Perubahan cepat rambat gelombang akan berbeda-beda sesuai dengan sifat fisik dan mekanik material. Pada material anisotropik yang sifat-sifatnya berbeda pada semua arah, maka cepat rambat gelombang ultrasonik akan berbeda satu sama lainnya. Hubungan ini dapat dilihat pada persamaan 2.16.

2.5.1. Teknik Potongan Kubus (*Cube Cutting Technique*)

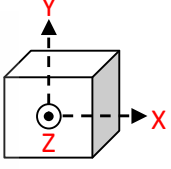
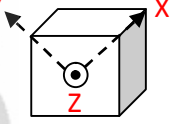
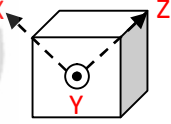
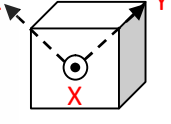
Teknik pemotongan kubus adalah satu metode pengukuran konstanta elastisitas yang cukup merusak. Hal ini disebabkan karena kubus-kubus yang akan dijadikan spesimen uji dipotong dari bulk materialnya. Metode ini akan menghasilkan konstanta elastisitas efektif, yakni konstanta elastisitas yang diukur dari rata-rata hasil pengujian. Gelombang ultrasonik digunakan dalam metode ini untuk mengukur cepat rambatnya yang merupakan respon dari sifat material pada arah perambatan tersebut.

Metode ini menggunakan material komposit sebagai pemodelan akan sifatnya yang tidak homogen terutama *composite*. Sehingga dari akan didapatkan konstanta elastisitas efektif dari material ortotropik dengan sembilan konstanta elastisitas pada matriks kekakuannya (persamaan 2.14). Dalam metode ini digunakan notasi X, Y, dan Z, sebagai penunjuk orientasi/arah yang paralel terhadap bidang (100), (010), dan (001). Kemudian, arah X-Y dengan sudut 45° terhadap garis normalnya paralel dengan bidang (110) dan begitu juga dengan bidang (101), dan (011). Sampel kubus dengan dimensi $p=l=t$ dipotong dari bulk material yang akan diuji. Kubus pertama memiliki bidang yang paralel terhadap X, Y, dan Z, dan ketiga kubus lainnya dipotong dengan arah 45° terhadap garis normalnya. Hal ini dapat dijelaskan dengan gambar berikut^[20].



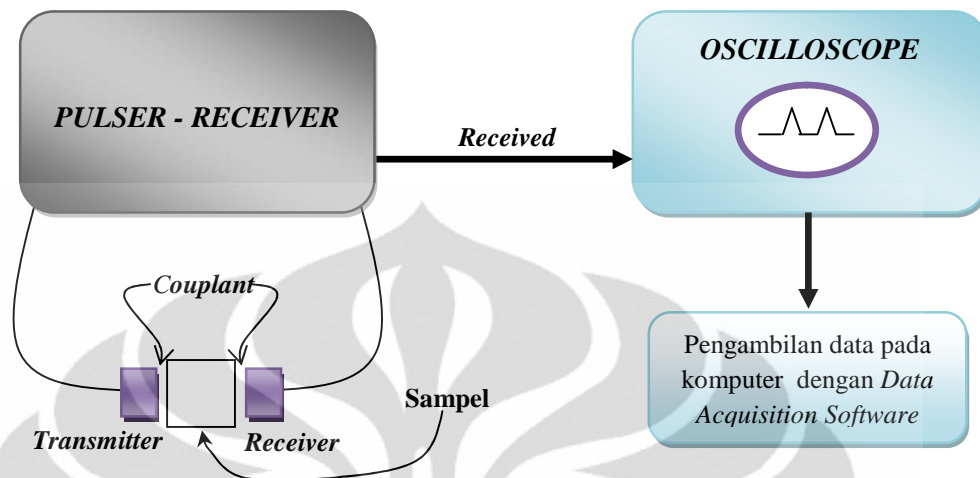
Gambar 2.13. Ilustrasi kubus yang dipotong dari bulk material dengan masing-masing arah pemotongannya^[20].

Tabel 2.1. Notasi yang digunakan dalam 18 pengukuran cepat rambat gelombang ultrasonik^[20].

Mode Gelombang	Arah/Bidang Propagasi	Arah/Bidang Polarisasi	Notasi Kecepatan	Ilustrasi Sampel	
Longitudinal Transversal Transversal	X / (100) X / (100) X / (100)	X / (100) Y / (010) Z / (001)	V1 V2 V3	 <p>Kubus 1</p>	
Longitudinal Transversal Transversal	Y / (010) Y / (010) Y / (010)	Y / (010) Z / (001) X / (100)	V4 V5 V6		
Longitudinal Transversal Transversal	Z / (001) Z / (001) Z / (001)	Z / (001) X / (100) Y / (010)	V7 V8 V9		
SemiLongitudinal SemiTransversal Transversal	Bidang X-Y 45° / (110) Bidang X-Y 45° / (110) Bidang X-Y 45° / (110)	Bidang X-Y 45° / (110) Bidang X-Y 45° / (110) Z / [001]	V10 V11 V12		 <p>Kubus 2</p>
SemiLongitudinal SemiTransversal Transversal	Bidang X-Z 45° / (101) Bidang X-Z 45° / (101) Bidang X-Z 45° / (101)	Bidang X-Z 45° / (101) Bidang X-Z 45° / (101) Y / (010)	V13 V14 V15		 <p>Kubus 3</p>
SemiLongitudinal SemiTransversal Transversal	Bidang Y-Z 45° / (011) Bidang Y-Z 45° / (011) Bidang Y-Z 45° / (011)	Bidang Y-Z 45° / (011) Bidang Y-Z 45° / (011) X / (100)	V16 V17 V18		 <p>Kubus 4</p>

Sembilan pengukuran dilakukan pada kubus 1, yakni dengan mengaplikasikan gelombang ultrasonik pada masing-masing arah X, Y, dan Z. Mode gelombang yang digunakan adalah longitudinal dan transversal dengan arah propagasi X, Y, dan Z, sehingga akan dihasilkan Sembilan (9) hasil pengukuran berupa cepat rambat gelombang (V1-V9). Kemudian, dilakukan mode gelombang semilongitudinal (*quasi-longitudinal*), semitransversal (*quasi-transversal*), dan transversal murni. Sehingga akan dihasilkan Sembilan kecepatan perambatan gelombang lainnya (V10-V18). Dalam metode ini, untuk menghindari atenuasi pada mode gelombang semi transversal dan meminimalisasi terjadinya *error*,

maka digunakan sampel kubus yang kecil dan tipis yang berkisar antara 10-25mm dan ledakan suara (*tone burst*) atau mode gelombang (*narrow band*)^[21].



Gambar 2.14. Ilustrasi skematis rangkaian pengukuran cepat rambat gelombang ultrasonik dengan menggunakan metode transmisi^[25].

Kemudian, setelah didapat hasil pengukuran berupa cepat rambat gelombang ultrasonic pada masing-masing arah tersebut, dilakukan konversi menjadi konstanta elastisitas C_{mn} yang diturunkan dari **Persamaan Christoffel** dengan hubungan sebagai berikut.

$$\text{Det} (\Gamma_{ik} - \rho V_{ph}^2 \delta_{ik}) = 0 \quad (2.23)$$

Dengan $\Gamma_{ik} = C_{ijkl} n_j n_l$ dimana C_{ijkl} adalah komponen dari konstanta elastisitas dan \mathbf{n} adalah unit vektor yang paralel dengan vektor gelombang, ρ sebagai densitas material (Kg/m^3), \mathbf{V} adalah cepat rambat pada masing-masing arah (m/s)^[21]. Dan berikut ini adalah penurunan dari Persamaan 2.23.

$$\rho V_1^2 = C_{11} \quad (2.24)$$

$$\rho V_2^2 = C_{66} \quad (2.25)$$

$$\rho V_3^2 = C_{55} \quad (2.26)$$

$$\rho V_4^2 = C_{22} \quad (2.27)$$

$$\rho V_5^2 = C_{66} \quad (2.28)$$

$$\rho V_6^2 = C_{44} \quad (2.29)$$

$$\rho V_7^2 = C_{33} \quad (2.30)$$

$$\rho V_8^2 = C_{55} \quad (2.31)$$

$$\rho V_9^2 = C_{44} \quad (2.32)$$

$$\rho V_{10}^2 = 0,5C_{66} + 0,25(C_{11} + C_{22}) + 0,5[(C_{12} + C_{66})^2 + 0,25(C_{11} - C_{22})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2.33)$$

$$\rho V_{11}^2 = 0,5C_{66} + 0,25(C_{11} + C_{22}) - 0,5[(C_{12} + C_{66})^2 + 0,25(C_{11} - C_{22})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2.34)$$

$$\rho V_{12}^2 = 0,5(C_{44} + C_{55}) \quad (2.35)$$

$$\rho V_{13}^2 = 0,5C_{55} + 0,25(C_{11} + C_{33}) + 0,5[(C_{13} + C_{55})^2 + 0,25(C_{11} - C_{33})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2.36)$$

$$\rho V_{14}^2 = 0,5C_{55} + 0,25(C_{11} + C_{33}) - 0,5[(C_{13} + C_{55})^2 + 0,25(C_{11} - C_{33})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2.37)$$

$$\rho V_{15}^2 = 0,5(C_{44} + C_{66}) \quad (2.38)$$

$$\rho V_{16}^2 = 0,5C_{44} + 0,25(C_{22} + C_{33}) + 0,5[(C_{23} + C_{44})^2 + 0,25(C_{22} - C_{33})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2.39)$$

$$\rho V_{17}^2 = 0,5C_{44} + 0,25(C_{22} + C_{33}) - 0,5[(C_{23} + C_{44})^2 + 0,25(C_{22} - C_{33})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2.40)$$

$$\rho V_{18}^2 = 0,5(C_{55} + C_{66}) \quad (2.41)$$

Metode *cube-cutting* dapat sangat akurat dalam menentukan konstanta elastisitas material terlebih dengan menggunakan frekuensi yang relatif rendah. Akan tetapi, satu-satunya kelemahan dalam metode ini adalah pemotongan sampel dari *bulk material* yang secara harfiah dapat benar-benar merusak. Kemudian, preparasi sampel yang teliti dalam dimensi dan temperatur pemotongan agar tidak terjadi perubahan mikrostruktur serta biaya yang relatif mahal dalam preparasi spesimen uji adalah kelemahan utama lainnya^[20].

2.5.2. Pendekatan Satu Sisi (*One-Sided Approach*)

Konstanta elastisitas didapat dari pengukuran cepat rambat gelombang ultrasonik pada satu sisi sebuah spesimen. Mode gelombang yang digunakan berupa gelombang longitudinal dibawah permukaan (*subsurface longitudinal*) dan gelombang permukaan (*Rayleigh Wave*). Apabila dalam *Cube-Cutting Technique* bersifat merusak *bulk material*, maka metode satu sisi tidak merusak struktur material (*nondestructive*). Kedua mode gelombang tersebut diaplikasikan pada material dengan sudut kontak tertentu. Kecepatan gelombang ditentukan oleh penerima (*receiver*) yang terpisah dari *transmitter* dengan jarak tertentu.

2.6. *Solution Anneal*

Austenitic stainless steel adalah jenis paduan yang tidak dapat ditingkatkan sifat mekanisnya melalui perlakuan panas (*heat treatment*). Akan tetapi sifat mekanisnya dapat ditingkatkan melalui pengerjaan dingin (*cold work*). Hal ini disebabkan karena akan terjadi perubahan struktur mikro terutama fasa yang menyebabkan material menjadi getas seperti fasa chi dan fasa sigma akibat

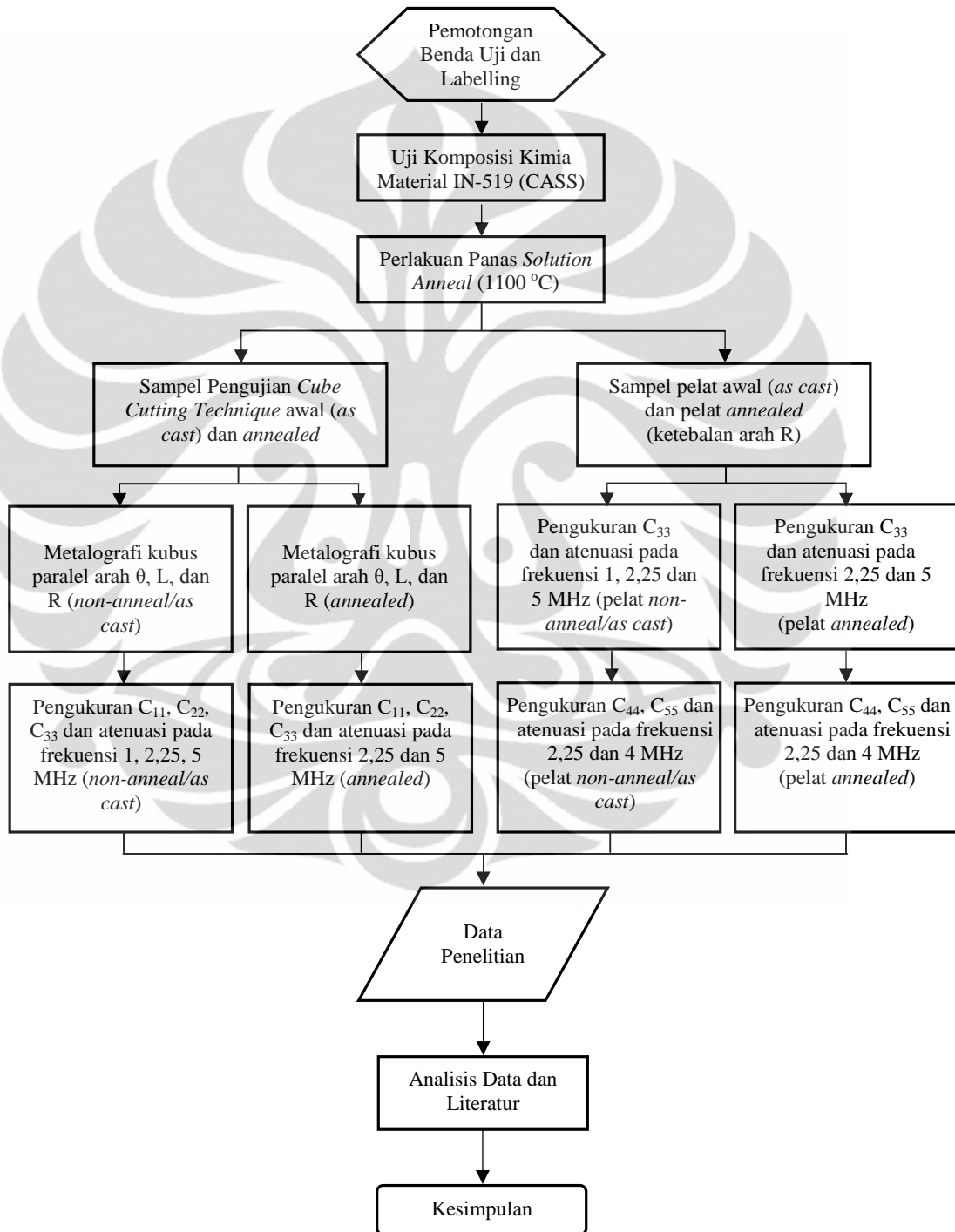
perlakuan panas. Selain itu, akan terjadi *chrom depleted zone* pada batas butir sehingga akan mengurangi tingkat ketahanan terhadap korosi.

Akan tetapi *ausenitic stainless steel* dapat diaplikasikan *solution treatment* (*solution anneal*), yakni dengan memanaskan material sampai dengan temperatur diatas 2000 °F (1095 °C) yang kemudian ditahan beberapa saat sampai semua karbida larut dan disusul dengan pendinginan cepat di media air^[22]. Dengan proses ini, maka material dapat diasumsikan kembali dalam kondisi semula.



BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian.

3.2. Alat dan Bahan

3.2.1. Alat

1. Mesin potong
2. Mesin *milling*
3. Mesin amplas
4. Mesin poles
5. *Mask respirator* dan sarung tangan
6. Instrumen ultrasonik *pulser-receiver* dan osiloskop
7. *Data Acquisition Software*
8. Probe 1 MHz, 2 MHz, , 5 MHz, dan *probe* sudut 60° 4 MHz
9. *Wedge* bersudut 60°
10. Kabel konektor *microdot/lemo/BNC*
11. *Couplant*
12. Mikroskop optik
13. Jangka sorong
14. Lain-lain: Gergaji, kantong plastik, label, pulpen, spidol, tang, penjepit, palu, dan penggaris.

3.2.2. Bahan

1. Material *reformer tube* dengan nomor designasi IN-519
2. Kertas Ampelas grid #180, #400, #600, #800, #1000, #1200, #1500
3. Kain Poles dan alumina
4. Zat etsa asam oksalat.

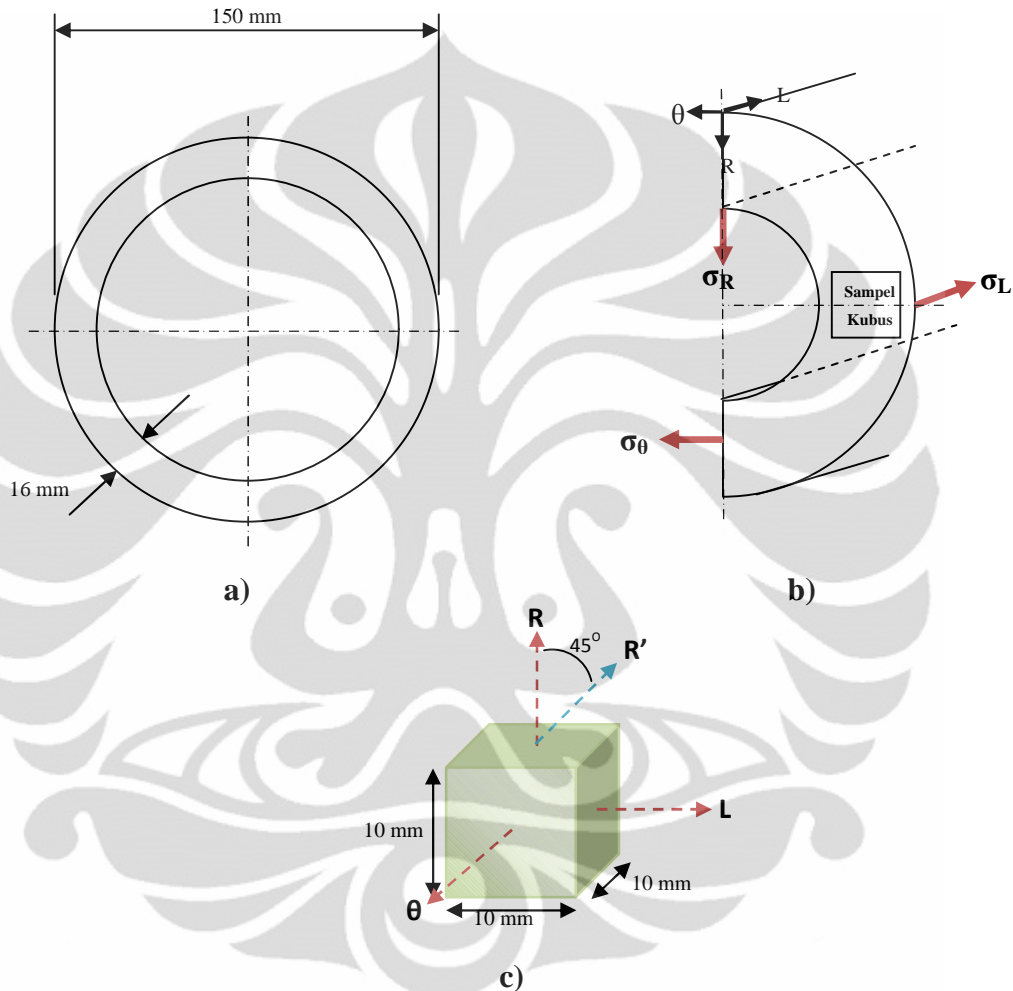
3.3. Prosedur Penelitian

3.3.1. Pemotongan Benda Uji dan *Labeling*

a. Sampel Potongan Kubus (*Cube Cutting*)

Reformer tube dengan diameter luar sebesar 150 mm yang telah terpakai (*used material*) dipotong dan kemudian dibelah sejajar dengan arah panjangnya. Pemotongan ini dilakukan pada bagian yang tidak memiliki cacat makro, baik itu retak maupun deformasi akibat pemuluran (*creep*). Kemudian dilakukan *marking* atau penentuan orientasi yang sejajar dengan sistem silinder dan paralel terhadap bidang pada Indeks Miller struktur kristal. θ sebagai arah melintang sejajar bidang

(100), L sebagai arah panjang *tube* sejajar bidang (010), dan R adalah arah ketebalan (jari-jari) *tube* sejajar bidang (001). Dengan kata lain, dalam sistem kartesius orientasi θ , L , dan R dinotasikan sebagai arah X , Y , dan Z . Gambar berikut ini adalah ilustrasi mekanisme pemotongannya.



Gambar 3.2. a) Ukuran diameter *tube*, b) Orientasi dan tegangan-tegangan pada *tube*, c) kubus terorientasi yang dipotong dari *reformer tube*.

Pemotongan sampel kubus dilakukan untuk memenuhi parameter-parameter yang ada pada metode pengujian *cube-cutting method*. Sampel kubus diusahakan tidak terlalu tebal agar pada proses pengujian dengan transmisi gelombang ultrasonik tidak timbul atenuasi yang cukup besar. Ketebalan kubus berkisar antara 10-25 mm^[5]. Sampel dipotong dengan dimensi minimum yakni 10x10x10 mm. Selain bertujuan untuk mengurangi tingkat atenuasi gelombang yang besar, ketebalan *tube* hanya sebesar 16 mm. Sebagai akibatnya, kubus hanya

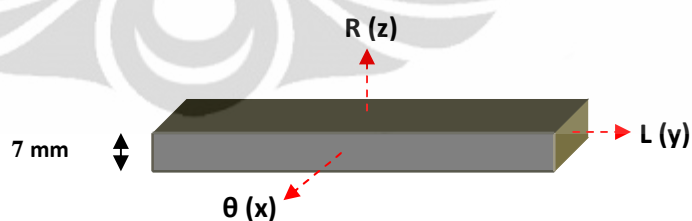
memiliki panjang sisi maksimum sebesar 10 mm dan diameternya sebesar 14,14 mm agar pada pemotongan dengan sudut 45° terhadap garis normal atau arah θ dapat terakomodasi.

Kubus terdiri dari empat macam, yakni kubus 1, 2, 3, dan 4 dan masing-masing nomor kubus terdiri dari tiga jenis A, B, dan C. Akan tetapi, mode gelombang dan jenis *probe* hanya dapat mendukung untuk pengukuran cepat rambat gelombang pada kubus 1 (yang sisinya paralel dengan arah θ , L, dan R). Kemudian dilakukan *labeling* agar tidak terjadi kekeliruan dalam penomoran dan penandaan arah.

Kemudian, dilakukan pemotongan balok referensi yang akan dijadikan acuan dalam menentukan orientasi sisi-sisi kubus. Ukuran dari balok referensi bebas menyesuaikan bentuk *tube* dan harus mewakili ketiga bidang yang paralel dengan arah/orientasi pada *tube*.

b. Sampel Pelat

Sampel yang berbentuk pelat akan digunakan sebagai pembanding dan referensi analisis dalam tingkat efektifitas metode *cube cutting technique*. Disamping itu, pelat juga digunakan dalam pengukuran V8 dan V9 karena lebarnya pelat dapat mengakomodasi luas penampang *probe* sucut. Dimensi sampel selebar mungkin menyesuaikan ketebalan *tube* dan diameter *probe* pada *ultrasonic testing*, sehingga tebal pelat maksimum hanya dapat dicapai sebesar 7 mm.



Gambar 3.3. Ilustrasi pelat yang dipotong dari *bulk material* dengan masing-masing arah pemotongannya.

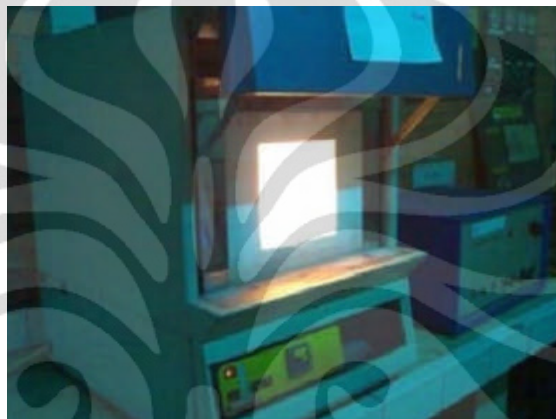
3.3.2. Uji Komposisi Material

Material *reformer tube* memiliki designasi IN-519. Oleh karena itu, perlu dilakukan uji komposisi dengan menggunakan metode spektrometri. Komposisi material dari hasil pengujian ini akan dijadikan data analisis yang berkaitan

dengan sifat fisik maupun sifat mekaniknya serta sebagai data pendukung dalam menganalisis hasil penelitian.

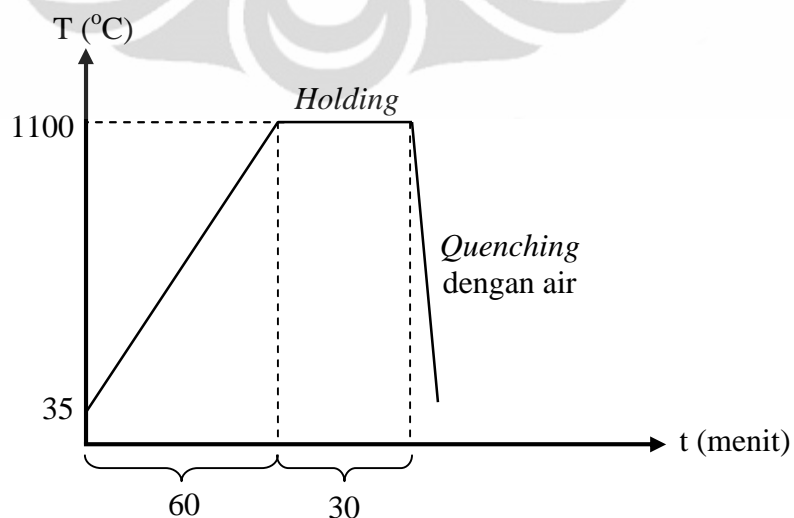
3.3.3. Perlakuan Panas *Solution Anneal*

Perlakuan panas pada sampel yang berupa *solution treatment* (*solution anneal*) dilakukan berdasarkan ASTM A269-04 “*Standard Specification for Seamless and Welded Austenitic Stainless Steel Tubing*”. Sampel kubus 1, pelat dan balok referensi dimasukkan kedalam dapur pemanas.



Gambar 3.4. Dapur Pemanas *Carbolite*.

Kemudian sampel dapur dipanaskan sampai pada temperature 1100 °C dengan waktu kenaikan temperatur selama 60 menit. Setelah itu, dilakukan *holding* selama 30 menit agar semua bagian pada sampel memiliki temperatur yang homogen. Kemudian dilakukan *quenching* pada media air. Dan berikut ini adalah siklus termal yang dilakukan.



Gambar 3.5. Siklus pemanasan *solution treatment* (*solution anneal*).

3.3.4. Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi pada penelitian ini bertujuan sebagai validasi terhadap orientasi sisi-sisi kubus sesuai dengan steuktur butirnya dan sekaligus untuk mengetahui kondisi makro dan mikro struktur butir-butir material *tube catalyst*. Metalografi makro dilakukan pada sampel penampang melintang *tube*, potongan balok referensi, dan kubus. Balok referensi digunakan sebagai referensi untuk menentukan orientasi bidang pada kubus dengan melihat struktur butirnya dalam skala makro. Standar yang digunakan adalah ASTM E3.

Proses Pengampelasan dilakukan dengan menggunakan grit amplas mulai dari yang kasar hingga halus yaitu dari grit #180, #400, #600, #800, #1000, #1200, #1500 (dalam *mesh*). Proses pengamplasan dilakukan dengan merubah arah pengamplasan setiap pergantian tingkat kekasaran kertas amplas, sehingga bisa dipastikan sisa pengamplasan sebelumnya telah hilang dan didapat permukaan yang halus dari benda uji. Setelah selesai sampel dipoles agar mendapatkan permukaan yang lebih halus dan mengkilap serta menghilangkan bekas goresan akibat pengamplasan. Sampel dipoles dengan menggunakan kain beludru dan zat polesnya menggunakan alumina.

Kemudian sampel tersebut dietsa dengan elektroetsa untuk memunculkan struktur butir material. Etsa dilakukan dengan reagen asam oksalat 15% pada voltase 6-8 Volt selama 60-90 detik dan pada temperatur ruang. Setelah struktur butir material terlihat, maka dilakukan pengecekan orientasi bidang/sisi kubus terhadap label dan balok referensi. Setelah orientasi dipastikan sesuai, maka pengukuran cepat rambat gelombang siap untuk dilakukan. Pengamatan mikrostruktur dilakukan dibawah mikroskop optik dengan perbesaran 100 dan 500 kali untuk mengetahui struktur butir dalam skala mikro. Selain untuk melihat fasa *austenite* dan distribusi fasa lain yang terdapat dalam material, pengamatan ini juga bertujuan untuk memprediksi kekuatan dan sifat mekanik material *reformer tube*.

3.3.5. Pengukuran Konstanta Elastisitas dan Atenuasi Gelombang

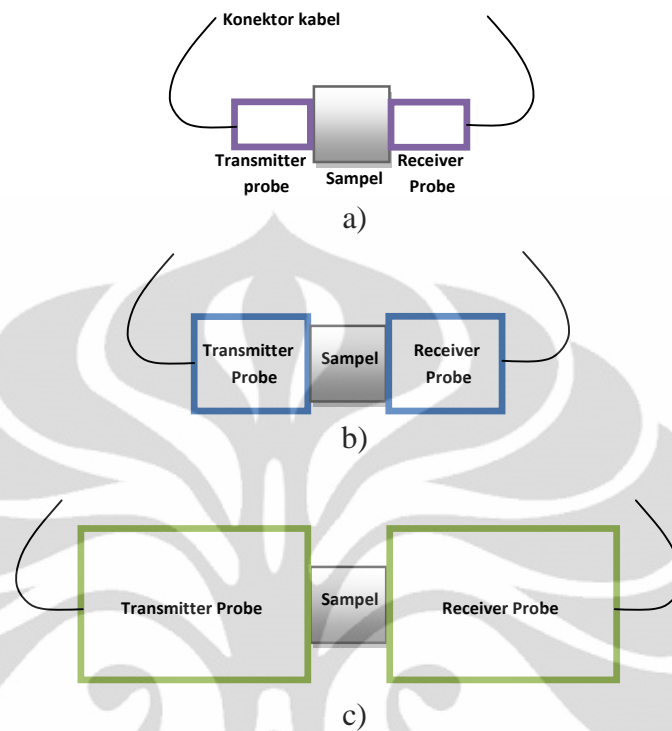
Untuk menentukan besarnya masing-masing konstanta elastisitas pada matriks kekakuan material *orthotropic* perlu diketahui besarnya masing-masing cepat rambat gelombang pada masing-masing orientasi kubus. Cepat rambat

gelombang diukur dengan menggunakan metode transmisi gelombang ultrasonik seperti yang diilustrasikan pada gambar 3.4. Metode ini melibatkan dua *transducer*, yang satu bertindak sebagai *transmitter* gelombang dan satunya lagi berperan sebagai *receiver*. Gelombang yang dihasilkan oleh *transmitter* merambat melalui sampel dan diterima oleh *receiver*. Kemudian sinyal yang ditangkap diterjemahkan oleh *oscilloscope*. Waktu *delay* antara sinyal yang satu dengan yang lain itulah yang akan dijadikan dasar penghitungan cepat rambat gelombang.

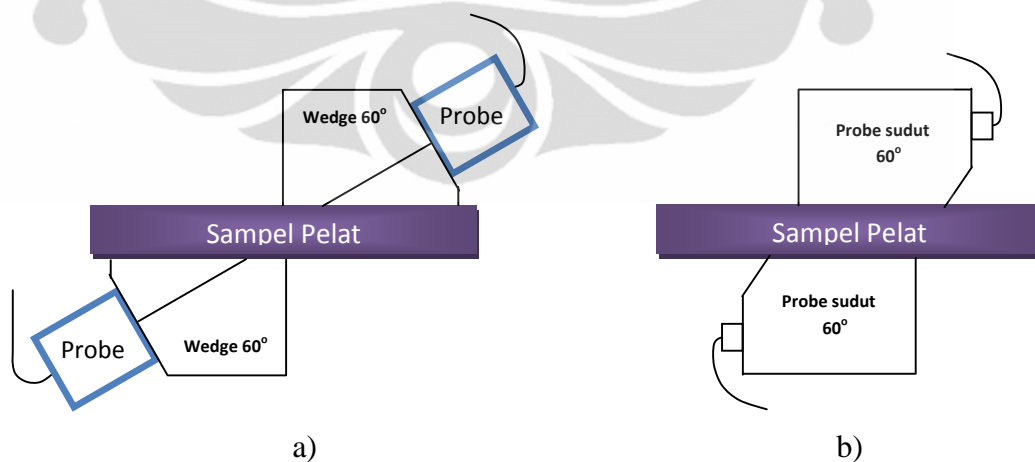


Gambar 3.6. Rangkaian pengukuran cepat rambat gelombang ultrasonik dengan menggunakan metode transmisi 1) *pulser*, 2) konektor, 3) *transmitter probe*, 4) *receiver probe*, 5) *oscilloscope*, 6) *data acquisition software*.

Setelah rangkaian instrumen tersusun seperti pada Gambar 3.6, maka langkah berikutnya adalah mengatur *gain* sekitar 20 dB untuk frekuensi 2,25 MHz, 30 dB untuk frekuensi 5 MHz, dan 40 dB untuk pengukuran dengan menggunakan mode gelombang transversal. Dan kemudian dilakukan pengaturan *damping* sampai muncul sinyal awal yang dapat diamati pada *oscilloscope*. Setelah sinyal awal muncul dan terlihat stabil pada layar, kemudian gelombang dotransmisikan pada sampel. Setelah itu, pengaturan amplitudo sinyal yang terbentuk dilakukan dengan mengatur voltase dan *display width* pada *oscilloscope*. Akan tetapi, pada pengujian ultrasonik ini tidak dilakukan pengecekan nilai *center frekuensi* dengan menggunakan grafik *fast fourier transformation* (FFT) dengan domain frekuensi.



Gambar 3.7. Skema pengukuran cepat rambat gelombang dan atenuasi pada sampel kubus dengan mode gelombang longitudinal, a) Probe 5 MHz (6 mm), b) Probe 2,25 MHz (12,5 mm), c) Probe 1 MHz (20 mm).



Gambar 3.8. Skema pengukuran cepat rambat gelombang dan atenuasi pada sampel pelat dengan gelombang transversal *mode conversion*, a) Probe 2,25 MHz yang dirangkai dengan wedge 60°, b) Probe 4 MHz.



Gambar 3.9. *Probe normal 1 MHz.*



Gambar 3.10. *Probe normal 2,25 MHz yang dirangkai dengan wedge bersudut 60°.*



Gambar 3.11. *Probe normal 5 MHz.*



Gambar 3.12. *Probe* sudut 60° 4 MHz.

Untuk mengukur semua kecepatan (V1-V18) dibutuhkan instrumen untuk membentuk gelombang longitudinal, transversal, semi-longitudinal, dan semi-transversal. Masing-masing orientasi bidang/sisi kubus digunakan mode gelombang yang berbeda baik itu arah propagasi maupun arah polarisasinya serta notasi kecepatan yang berbeda pula. Oleh karena keterbatasan instrumentasi, maka hanya dapat dilakukan pengujian dengan mode gelombang longitudinal dan transversal.

Pengukuran dilakukan pada kubus jenis 1 yakni yang sejajar arah θ , L, dan R yang terdiri dari tiga buah. Kemudian gelombang ultrasonik dengan mode longitudinal ditransmisikan pada masing-masing orientasi pada kubus (*non-anneal*) dan pelat dengan frekuensi 1, 2,25, dan 5 MHz. Pengambilan data kecepatan dilakukan dengan menggunakan *data acquisition software* pada komputer berupa data *excel*, yakni dengan mengukur selisih antara dua puncak sinyal 1 dan sinyal dua. Kemudian data atenuasi diambil dengan mengukur amplitudo sinyal satu dan amplitudo sinyal dua. Kemudian pengambilan data tersebut dilakukan pula pada kubus yang telah mengalami *solution anneal*. Akan tetapi karena keterbatasan instrument hanya digunakan *probe* dengan frekuensi 2,25 dan 5 MHz pada kubus *annealed*. Setelah pengambilan data pada kubus selesai, mode gelombang longitudinal dengan frekuensi yang sama diaplikasikan pada pelat *annealed* dengan ketebalan 7 mm. Kemudian mode gelombang transversal juga diaplikasikan untuk mengukur V8 dan V9 dengan menggunakan frekuensi 2,25 dan 4 MHz baik yang pelat *non-anneal* maupun pelat *annealed*.

Penggunaan frekuensi yang berbeda-beda pada setiap pengukuran lebih disebabkan karena keterbatasan instrumentasi dan momen insidental diluar dugaan yang mengakibatkan tidak dapat dipergunakannya variabel frekuensi yang seharusnya, yakni 1, 2,25, dan 5 MHz. Pada penelitian ini digunakan pelat untuk mengukur besarnya nilai C_{44} dan C_{55} meskipun tidak memenuhi ketentuan *cube cutting method*. Hal ini dilakukan dengan alasan seberapa jauh metode ini dapat memenuhi kesembilan konstanta yang harus dipenuhi dengan pendekatan material ortropik. Selain itu, tindakan ini juga dilakukan untuk menyiasati keterbatasan instrumentasi dan batasan-batasan dalam metode tersebut.

Tabel 3.1. Notasi yang digunakan dalam pengukuran cepat rambat gelombang ultrasonik untuk menentukan nilai konstanta elastisitas.

Mode Gelombang	Arah/Bidang Propagasi-Polarisasi	Notasi Kecepatan	Konstanta Elastisitas	Kondisi Sampel
Longitudinal	$\theta/(100) - \theta/(100)$	V1	C_{11}	Kubus (As cast/Non-anneal)
Longitudinal	$L/(010) - L/(010)$	V4	C_{22}	
Longitudinal	$R/(001) - R/(001)$	V7	C_{33}	
Longitudinal	$\theta/(100) - \theta/(100)$	V1	C_{11}	Kubus (Annealed)
Longitudinal	$L/(010) - L/(010)$	V4	C_{22}	
Longitudinal	$R/(001) - R/(001)$	V7	C_{33}	
Longitudinal	$R/(001) - R/(001)$	V7	C_{33}	Pelat (As Cast/Non-anneal)
Transversal	$R/(001) - \theta/(100)$	V8	C_{55}	
Transversal	$R/(001) - L/(010)$	V9	C_{44}	
Longitudinal	$R/(001) - R/(001)$	V7	C_{33}	Pelat (Annealed)
Transversal	$R/(001) - \theta/(100)$	V8	C_{55}	
Transversal	$R/(001) - L/(010)$	V9	C_{44}	

BAB 4 HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Pemotongan dan Makrografi Sampel

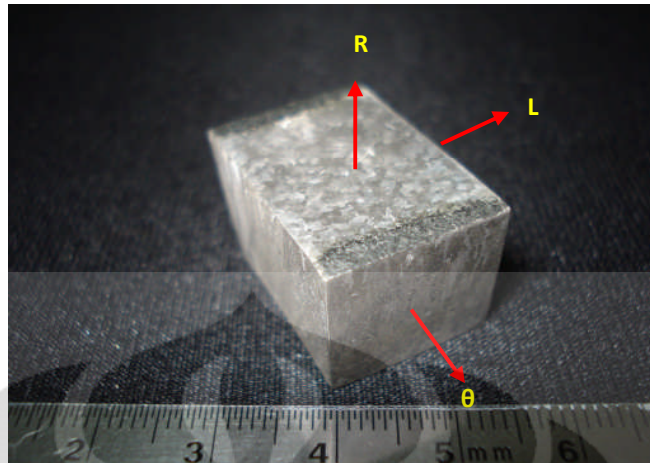
Pemotongan sampel pada metode *cube cutting method* adalah proses yang sangat menentukan tingkat efektifitas hasil penelitian. Oleh karena itu, ketelitian dan sistematika pemotongan serta penentuan orientasi adalah hal yang perlu diperhatikan. Potongan penampang melintang *tube* digunakan sebagai bagian yang akan menunjukkan profil butir-butir material IN-519 yang merupakan hasil dari proses *centrifugal casting*. Kemudian, balok referensi digunakan sebagai acuan dalam menentukan orientasi kubus-kubus yang akan diuji.



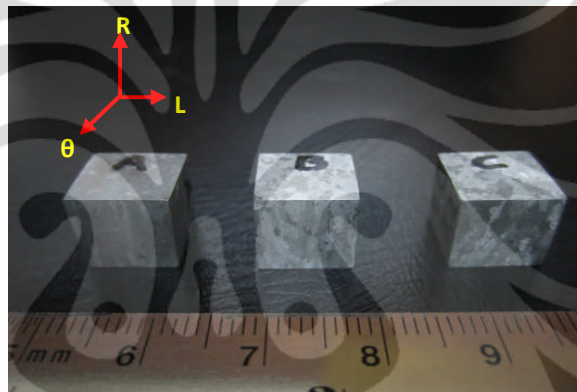
Gambar 4.1. Potongan *reformer tube* yang telah terpakai (*used material*).



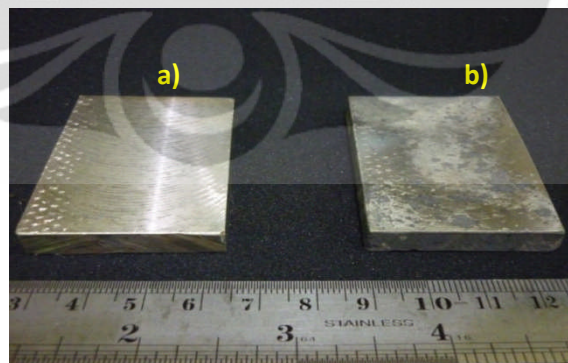
Gambar 4.2. Potongan penampang melintang *tube* dengan struktur butir kolumnar, elektrodsa dengan asam oksalat 15%.



Gambar 4.3. Balok referensi, elektroetsa dengan asam oksalat 15%.



Gambar 4.4. Tiga buah kubus dengan sisi sejajar arah θ , L, dan R, elektroetsa dengan asam oksalat 15%.



Gambar 4.5. Dua buah pelat yang akan ditransmisikan gelombang ultrasonik, a) *non-annealed*, b) *annealed*.

4.2. Hasil Uji Komposisi Material

IN-519 merupakan material hasil pengembangan dari HK 40 (24% Ni, 24% Cr) yang notabene merupakan material yang digunakan untuk aplikasi

temperature tinggi. Oleh karena itu, designasi material IN-519 tidak termasuk ke dalam material yang distandarkan oleh asosiasi maupun organisasi internasional, akan tetapi merupakan hak paten yang dimiliki oleh *Nickel Development Institute* (NiDI). Untuk itu, perlu dilakukan pengujian komposisi untuk mengetahui dan memprediksi sifat material tersebut. Dan berikut ini adalah table komposisi hasil pengujian spektometri berdasarkan ASTM A751.

Tabel 4.1. Komposisi kimiahasil spektroskopi material *reformer tube* IN-519.

Jenis Unsur	C (%)	Si (%)	S (%)	P (%)	Mn (%)	Ni (%)	Cr (%)
Komposisi	0,452	0,798	0,009	0,026	0,552	23,0	23,6
Jenis Unsur	Mo (%)	Ti (%)	Cu (%)	Nb (%)	V (%)	W (%)	Fe (%)
Komposisi	0,075	0,088	0,03	0,762	0,068	< 0,02	Bal.

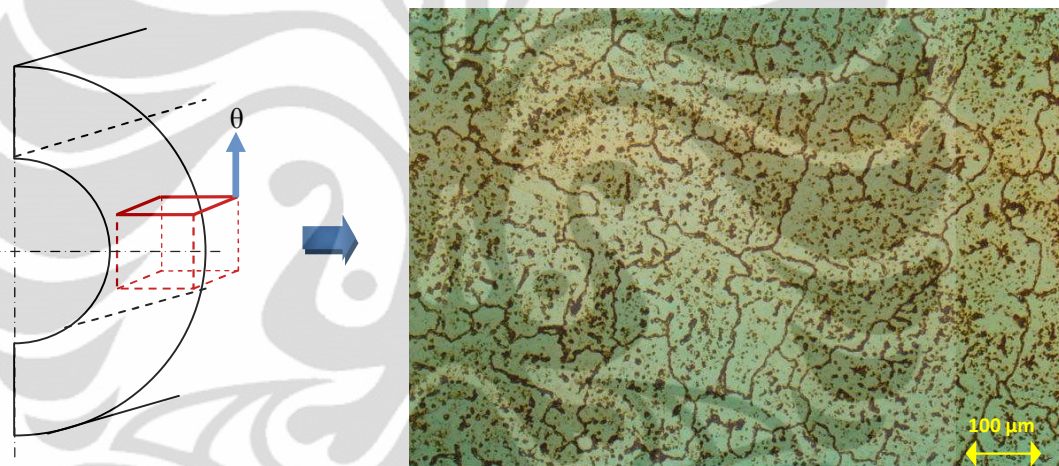
IN 519 merupakan HK 40 yang dipadukan dengan unsur Niobium (Nb). Niobium akan mengabsorpsi karbon dan membentuk karbida-karbida yang akan meningkatkan sifat material terutama ketahanan terhadap *creep*. Dengan penambahan 1,2-1,5 % Nb kekuatan dan keuletan maksimum pada aplikasi temperature tinggi dapat dicapai. Apabila diperbandingkan dengan jenis *stainless steel* pada umumnya, material ini memiliki kandungan nikel yang hampir sama dengan krom. Dengan semakin besarnya kandungan nikel, maka material tersebut akan memiliki fasa *austenite* yang stabil baik pada temperatur ruang maupun pada saat aplikasi temperatur tinggi^[6].

Dari hasil uji komposisi pada Tabel 4.1 menunjukkan bahwa kadar niobium dalam material sebesar 0,762 %, jauh dibawah atau hampir setengah dari kadar maksimum efektif dan mengakibatkan berkurangnya kadar niobium karbida dalam material. Kemudian terlihat kandungan krom sebesar 23,6 % yang sedikit dibawah ketentuan maksimum yakni sebesar 24 %. Hal ini juga yang menjadi indikasi mengapa material *reformer tube* ini mengalami kegagalan lebih awal dari umur pakainya karena pembentukan karbida-karbida lebih sedikit dan menurunkan *creep strength* material. Berkurangnya kadar niobium dan krom dari ketentuan yang juga didindikasikan karena unsur tersebut telah bersenyawa dengan karbon membentuk karbida-karbida. Sebagai akibatnya, beberapa persen kromium dan niobium tidak terdeteksi oleh spektrometer yang notabene mengukur persen unsur (bukan senyawa kimia seperti karbida).

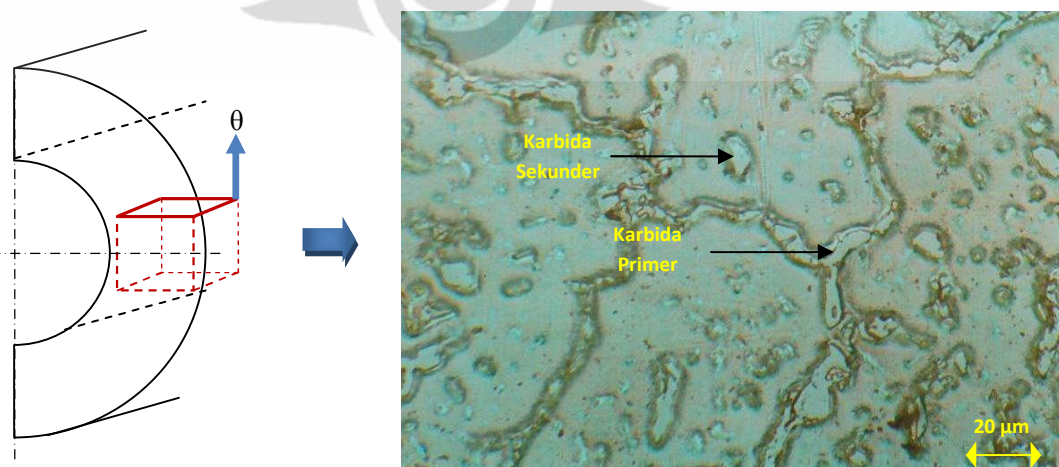
4.3. Hasil Pengamatan Mikrostruktur

Pengujian metalografi dilakukan pada material yang telah terpakai (*used material*) dan material *reformer tube* yang telah mengalami perlakuan panas *solution anneal*. Setelah kedua jenis sampel di ampla dan di poles, keduanya di etsa dengan menggunakan elektroetsa. Reagen yang digunakan adalah asam oksalat 15 % dengan voltase 6-8 Volt dan pada temperatur ruang selama 60-90 detik. Dan berikut ini adalah foto mikro kedua jenis sampel pada sisi-sisi yang sejajar dengan orientasi θ , L, dan R. Pengujian ini dilakukan dengan tujuan untuk memberikan data pendukung dalam menganalisa hasil pengujian ultrasonik.

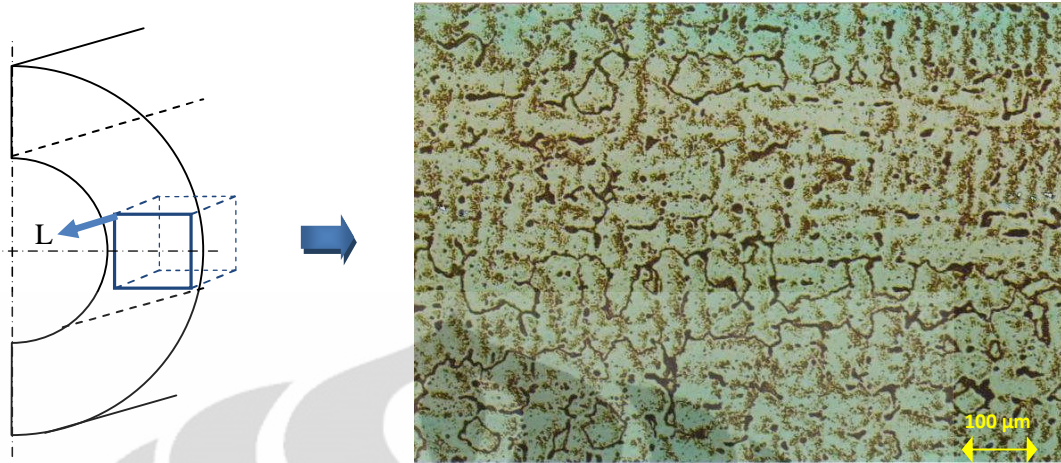
4.3.1. Foto Mikro Sampel yang Tidak Mengalami Perlakuan Panas (*Non-anneal*).



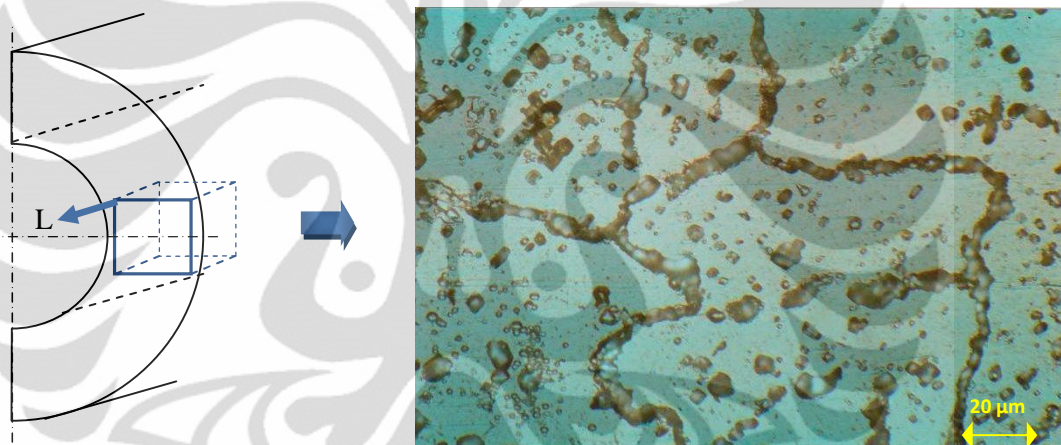
Gambar 4.6. Foto mikro IN 519 pada permukaan paralel arah θ /bidang(100) tanpa perlakuan panas dengan perbesaran 100X, elektroetsa asam oksalat 15 %.



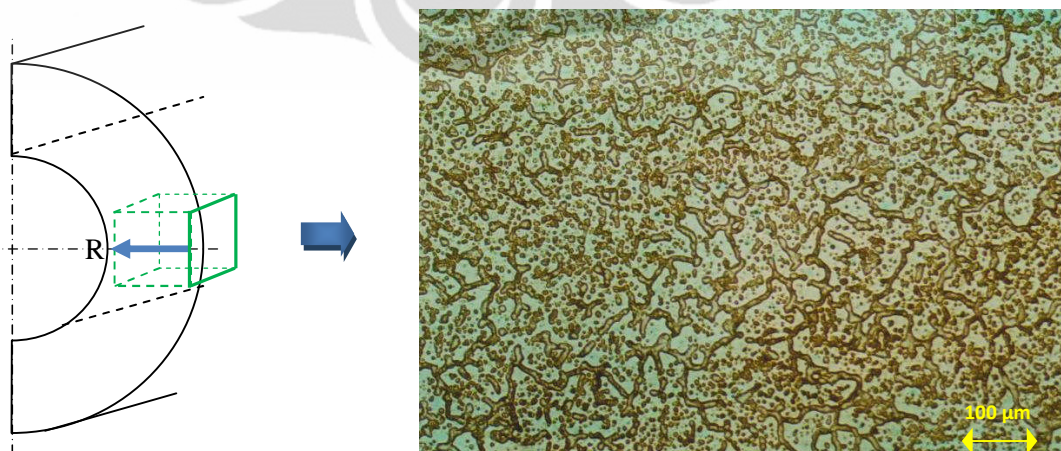
Gambar 4.7. Foto mikro IN 519 pada permukaan paralel arah θ /bidang (100) tanpa perlakuan panas dengan perbesaran 500X, elektroetsa asam oksalat 15 %.



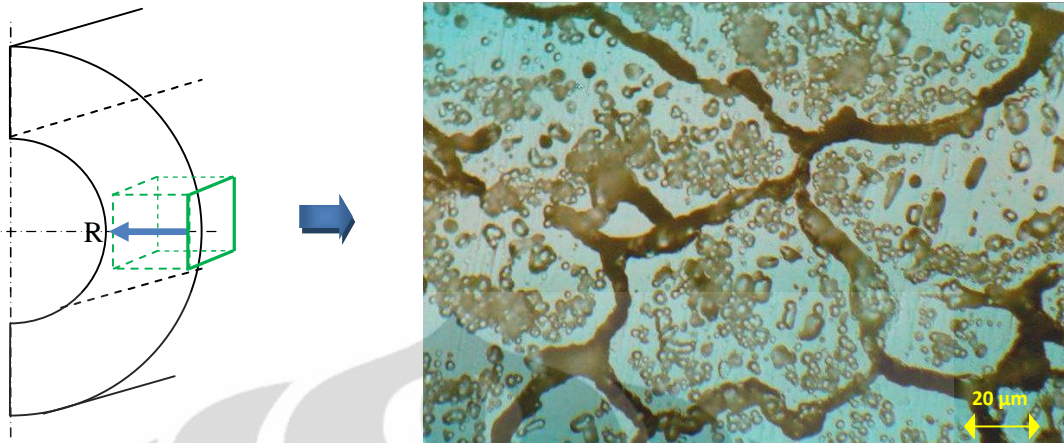
Gambar 4.8. Foto mikro IN 519 pada permukaan paralel arah L/bidang (010) tanpa perlakuan panas dengan perbesaran 100X, elektroetsa asam oksalat 15 %.



Gambar 4.9. Foto mikro IN 519 pada permukaan paralel arah L/bidang (010) tanpa perlakuan panas dengan perbesaran 500X, elektroetsa asam oksalat 15 %.

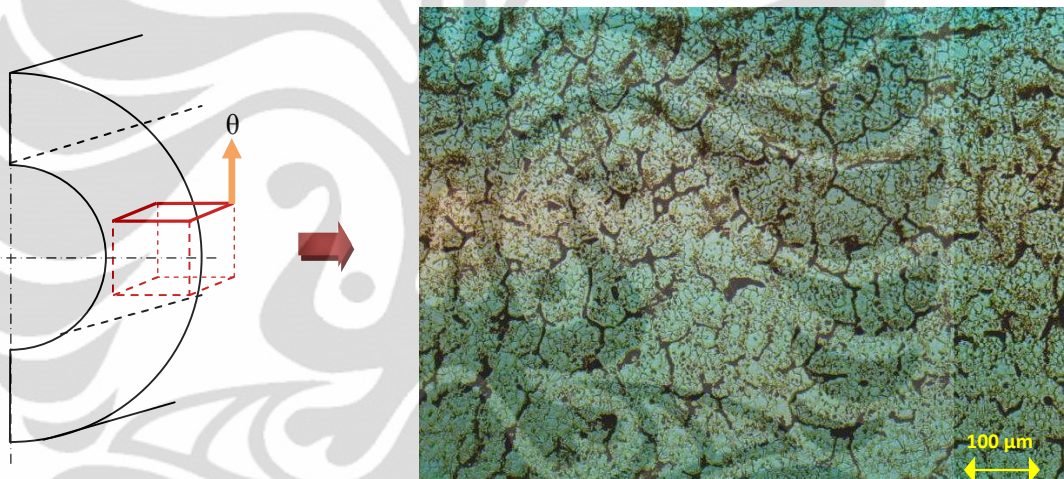


Gambar 4.10. Foto mikro IN 519 pada permukaan paralel arah R/bidang (001) tanpa perlakuan panas dengan perbesaran 100X, elektroetsa asam oksalat 15 %.

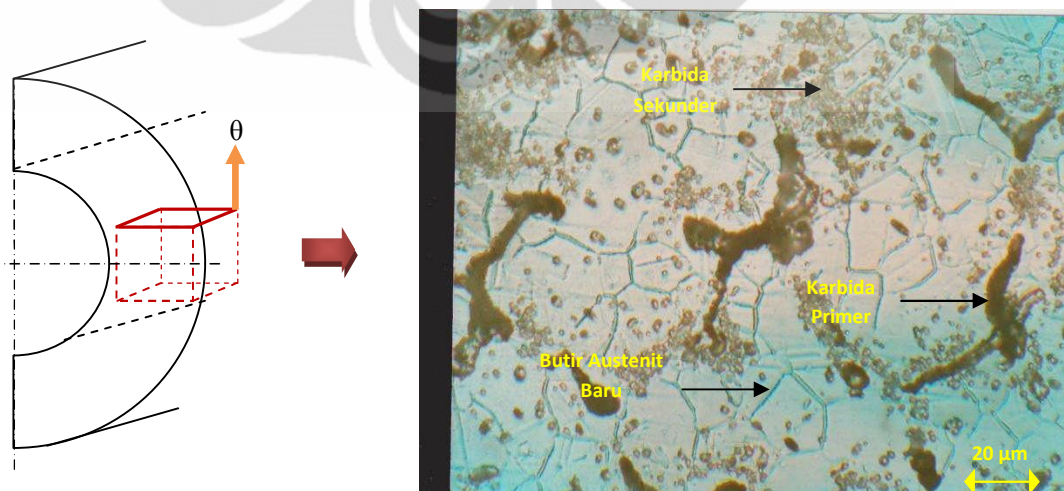


Gambar 4.11. Foto mikro IN 519 pada permukaan paralel arah R/bidang (001) tanpa perlakuan panas dengan perbesaran 500X, elektroetsa asam oksalat 15 %.

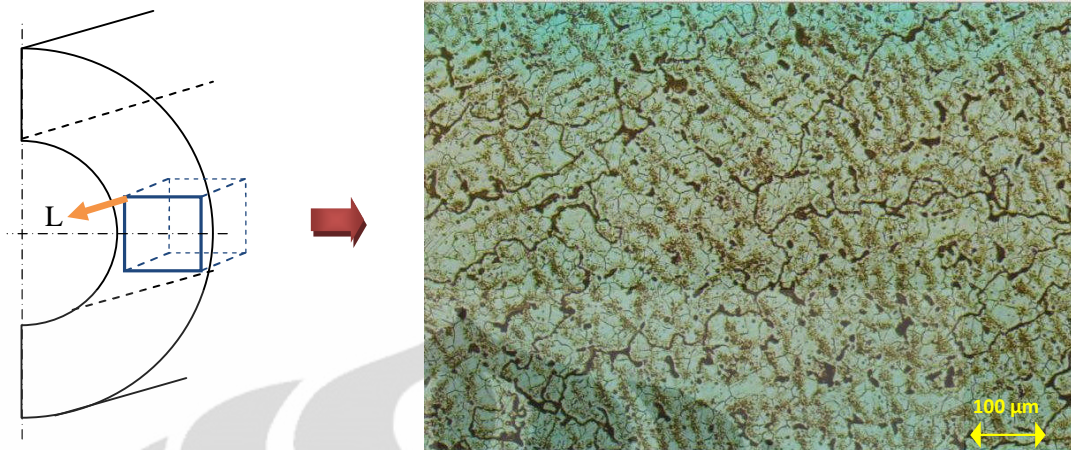
4.3.2. Foto mikro Sampel yang Mengalami *Solution Anneal*.



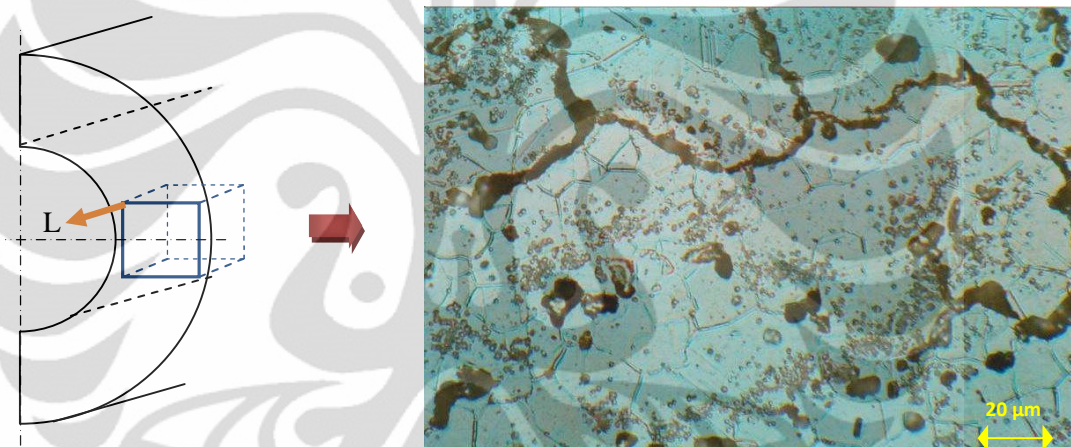
Gambar 4.12. Foto mikro IN 519 pada permukaan paralel arah θ /bidang (100) dengan perlakuan panas, perbesaran 100X, elektroetsa asam oksalat 15 %.



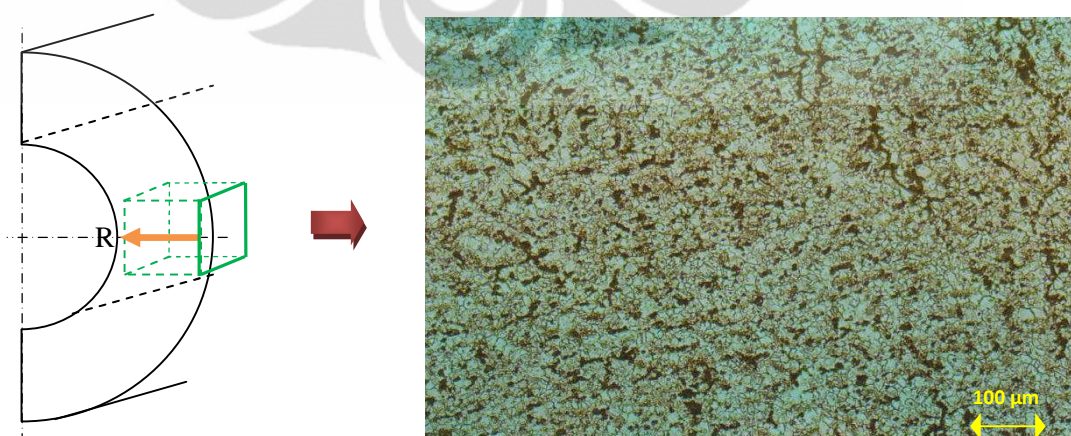
Gambar 4.13. Foto mikro IN 519 pada permukaan paralel arah θ /bidang (100) dengan perlakuan panas, perbesaran 500X, elektroetsa asam oksalat 15 %.



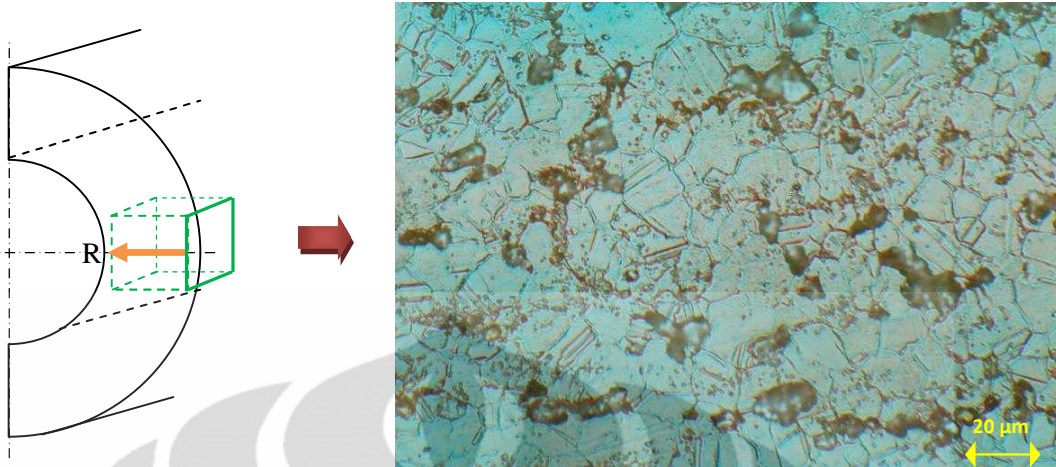
Gambar 4.14. Foto mikro IN 519 pada permukaan paralel arah L/bidang (010) dengan perlakuan panas, perbesaran 100X, elektroetsa asam oksalat 15 %.



Gambar 4.15. Foto mikro IN 519 pada permukaan paralel arah L/bidang (010) dengan perlakuan panas, perbesaraan 500X, elektroetsa asam oksalat 15 %.



Gambar 4.16. Foto mikro IN 519 pada permukaan paralel arah R/bidang (001) dengan perlakuan panas, perbesaran 100X, elektroetsa asam oksalat 15 %.



Gambar 4.17. Foto mikro IN 519 pada permukaan paralel arah R/bidang (001) dengan perlakuan panas, perbesaran 500X, elektroetsa asam oksalat 15 %.

4.4. Hasil Pengukuran Konstanta Elastisitas dan Atenuasi Gelombang Ultrasonik

Untuk mengetahui tingkat efektifitas dari metode transmisi gelombang ultrasonik terhadap potongan kubus, maka sampel pelat juga digunakan sebagai pembanding. Hal ini diasumsikan karena pelat lebih luas dibandingkan luas permukaan *probe*. Sehingga kehilangan energi gelombang ultrasonik dapat diabaikan. Tidak seperti halnya pada kubus yang ukurannya lebih kecil dibandingkan dengan luas permukaan beberapa jenis *probe* yang digunakan dalam penelitian ini.

Untuk mengetahui konstanta-konstanta elastisitas material IN 519, terlebih dahulu dilakukan pengukuran cepat rambat gelombang ultrasonik pada masing-masing orientasi yang bersangkutan yakni V1, V4, dan V7. C_{11} , C_{22} , dan C_{33} didapatkan dengan mengonversikan hasil pengukuran cepat rambat gelombang dengan menggunakan Persamaan 2.24, 2.27, dan 2.31. Kemudian densitas material didapatkan dari *material data sheet* dan hasil penimbangan yakni rata-rata sebesar 8000 Kg/m^3 . Setelah didapatkan konstanta elastisitasnya kemudian amplitudo sinyal kesatu dan kedua diukur pada masing-masing orientasi untuk menentukan besar atenuasinya. Besarnya atenuasi gelombang ultrasonik dikalkulasikan dengan menggunakan Persamaan 2.19. Pengukuran ini dilakukan pada kubus yang mengalami *solution anneal* dan yang tidak mengalami perlakuan panas. Pada sampel kubus yang tidak mengalami perlakuan panas, variabel

frekuensinya adalah 1, 2,25, dan 5 MHz. Sedangkan pada kubus yang mengalami *solution anneal* variabel frekuensinya adalah 2,25 MHz dan 5 MHz karena *probe* 1 MHz tidak lagi dapat digunakan.

Tabel 4.2. Hasil pengukuran konstanta elastisitas dan atenuasi gelombang ultrasonik pada sampel kubus yang tidak mengalami perlakuan panas (*non-anneal/as cast*).

Notasi	Nilai Konstanta (10^{11} Pa)			Notasi	Nilai Atenuasi (dB/m)		
	1 MHz	2,25 MHz	5 MHz		1 MHz	2,25 MHz	5 MHz
C ₁₁	0,283	2,758	2,659	C ₁₁	0,922	0,973	1,178
C ₂₂	0,280	2,636	2,547	C ₂₂	1,559	1,735	2,278
C ₃₃	0,701	2,512	2,471	C ₃₃	1,292	1,299	1,561

Tabel 4.3. Hasil pengukuran konstanta elastisitas dan atenuasi gelombang ultrasonik pada sampel kubus yang mengalami perlakuan panas (*solution anneal*).

Notasi	Nilai Konstanta (10^{11} Pa)		Notasi	Nilai Atenuasi (dB/m)	
	2,25 MHz	5 MHz		2,25 MHz	5 MHz
C ₁₁	2,76	2,73	C ₁₁	1,298	1,952
C ₂₂	2,57	2,53	C ₂₂	1,419	2,216
C ₃₃	2,69	2,66	C ₃₃	1,339	2,064

Demikian halnya dengan pelat yang akan dijadikan referensi dalam pengukuran tingkat efektifitas dimensi kubus. Pada pelat yang tidak mengalami perlakuan panas menggunakan tiga variabel frekuensi 1, 2,25, dan 5 MHz. Sedangkan untuk pelat yang mengalami perlakuan panas digunakan *probe* dengan frekuensi 2,25, dan 5 MHz. C₄₄ dan C₅₅ didapatkan dari pengukuran cepat rambat dengan notasi V9 dan V8. Pengukuran ini dilakukan pada jenis sampel pelat, bertujuan menyesuaikan bentuk *probe* sudut (*probe* yang menghasilkan gelombang transversal) karena ukuran sampel kubus yang minimum tidak dapat mengakomodasi ukuran *probe* sudut. Dan karena ketiadaan instrumen *probe* sudut 1 MHz dan juga 5 MHz, maka pengambilan data untuk V9 dan V8 hanya dengan menggunakan 2,25 MHz dan 4 MHz.

Kemudian sampel yang mengalami perlakuan panas (*solution anneal*), hanya menggunakan *probe* sudut 60° 2,25 MHz dan 4 MHz. Sedangkan untuk V1,

V4, dan V7 digunakan *probe* sudut normat 2,25 MHz dan 5 MHz. *Probe* 1 MHz tidak dapat dipergunakan karena permasalahan teknis seperti yang terjadi pada sampel kubus.

Tabel 4.4. Hasil pengukuran konstanta elastisitas dan atenuasi gelombang ultrasonik pada sampel pelat yang tidak mengalami perlakuan panas (*non-anneal/as cast*).

Notasi	Nilai Konstanta (10^{11} Pa)			Notasi	Nilai Atenuasi (dB/m)		
	1 MHz	2,25 MHz	5 MHz		1 MHz	2,25 MHz	5 MHz
C ₃₃	2,591	2,452	2,336	C ₃₃	0,689	1,017	1,265
Notasi	1 MHz	2,25 MHz	4 MHz	Notasi	1 MHz	2,25 MHz	4 MHz
C ₄₄	-	0,745	0,587	C ₄₄	-	1,465	3,216
C ₅₅	-	0,528	0,476	C ₅₅	-	3,892	5,184

Tabel 4.5. Hasil pengukuran konstanta elastisitas dan atenuasi gelombang ultrasonik pada sampel pelat yang mengalami perlakuan panas (*solution anneal*).

Notasi	Nilai Konstanta (10^{11} Pa)		Notasi	Nilai Atenuasi (dB/m)	
	2,25 MHz	5 MHz		2,25 MHz	5 MHz
C ₃₃	2,469	2,392	C ₃₃	1,331	1,372
Notasi	2,25 MHz	4 MHz	Notasi	2,25 MHz	4 MHz
C ₄₄	0,871	0,618	C ₄₄	1,363	2,269
C ₅₅	0,654	0,593	C ₅₅	3,423	4,046

4.5. Pembahasan

4.5.1. Makrostruktur Butir

Dari hasil pengamatan struktur butir makro, terlihat bahwa material memiliki struktur butir yang kolumnar bahkan ukuran butir dapat mencapai skala millimeter. Apabila diamati pada Gambar 4.2, penampang melintang *reformer tube* yang telah dietsa terlihat bahwa orientasi butir-butir kolumnar hampir sejajar dengan arah diameter *tube*. Namun orientasi butir kolumnar yang terlihat pada penampang melintang tersebut memiliki sudut terhadap arah diameternya, dari hasil pengukuran yakni kurang lebih sebesar 37°. Hal ini diperkirakan karena saat

nukleasi dan pertumbuhan butir, material *tube* masih mengalami gaya sentrifugal akibat fabrikasi dengan menggunakan *centrifugal casting*.

Kemudian hasil pengamatan pada balok referensi seperti pada Gambar 4.3 terlihat bahwa morfologi butir dalam skala makro berbeda-beda pada masing-masing sisinya. Sisi yang sejajar dengan arah L (pada sisi penampang melintang *tube*) atau bidang (010) terlihat butir-butir kolumnar. Sedangkan ada sisi yang sejajar arah θ atau bidang (100) terlihat butir-butir kolumnar yang lebih pendek dan pada sisi yang sejajar arah R atau bidang (001) (arah ketebalan *tube*) akan terlihat butir-butir seperti ekuiaksial. Namun, apabila diletiti lebih lanjut, sebagian besar struktur tersebut merupakan perpotongan dari butir-butir kolumnar pada arah L dan sebagian kecil merupakan butir ekuiaksial.

4.5.2. Mikrostruktur Butir

4.5.2.1. Sampel *Non-Anneal*

Pada sampel awal (*non-anneal*), dilakukan pengamatan mikrostruktur baik pada arah θ , L, maupun R. Dari hasil pengamatan mikro yang telah dilakukan, pada ketiga sisi yang sejajar dengan arah tersebut hanya memiliki perbedaan pada bentuk butir dan batas-batas butir seperti yang telah dijelaskan pada analisis hasil pengamatan makro. Apabila dilihat struktur butir terdiri dari matriks *austenite* dan gumpalan-gumpalan yang berpresipitasi pada batas butir dan pada matriksnya.

Karbida pada batas butir memiliki bentuk yang tidak kontinyu, jaringan karbida-karbida tersebut disebut karbida primer. Sebagian besar karbida primer ini terdiri dari kromium karbida yang berbentuk gumpalan yang besar dan sebagian kecil lagi berupa niobium karbida yang berupa gumpalan-gumpalan kecil^[23]. Pada sebagian besar foto mikro pada material awal terlihat *over-etching*, sehingga karbida primer terlihat hitam. Akan tetapi struktur ini dapat dilihat lebih jelas pada Gambar 4.7. Berdasarkan referensi gumpalan-gumpalan kecil dalam matriks seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.7 juga merupakan presipitasi karbida yang disebut sebagai karbida primer^[23]. Sebagian besar karbida primer ini merupakan niobium karbida dan sebagian kecil lagi merupakan karbida dari paduan mikro yang lain seperti titanium karbida. Karbida-karbida tersebut yang berperan terhadap *creep strength* material^[2,23].

4.5.2.2. Sampel dengan Perlakuan Panas (*Solution Anneal*)

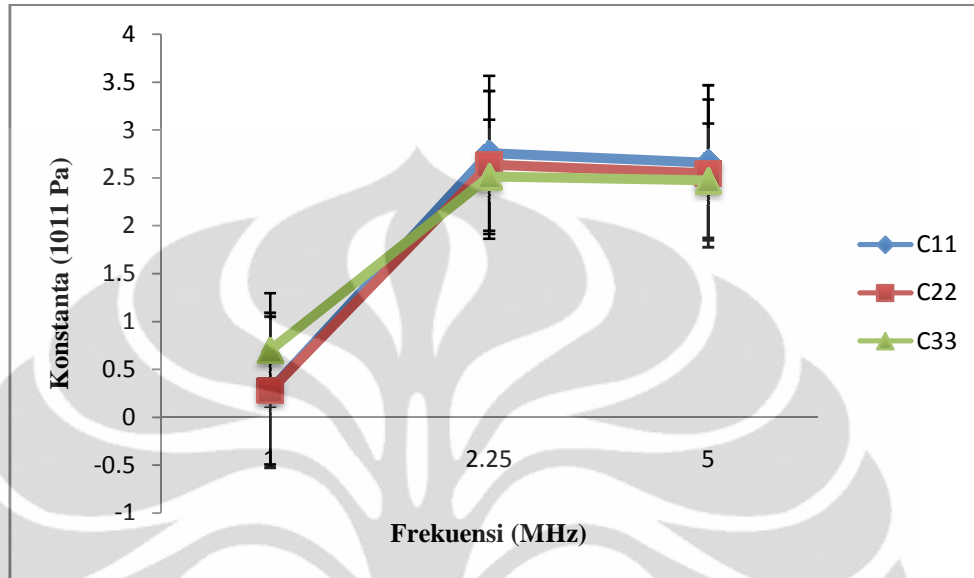
Perlakuan panas *solution anneal* dilakukan berdasarkan ASTM A269-04 dengan temperature minimum 1045 °C. Perlakuan panas ini dilakukan sampai pada temperatur 1100 °C dan dilanjutkan dengan pendinginan cepat pada media air. Hal ini dilakukan dengan tujuan agar material memiliki kondisi struktur mikro seperti semula sebelum aplikasi pada temperatur tinggi. Yang akan dijadikan data masukan dalam *modeling*.

Dari hasil pengamatan foto mikro sampel hasil *solution anneal* dengan perbesaran 100 kali, maka tidak terjadi perubahan dalam ukuran butir kolumnar baik pada sisi yang sejajar dengan arah θ , Y, maupun R. Pada batas butir juga jelas terlihat masih terdapat karbida-karbida primer seperti yang terlihat pada Gambar 4.12, 4.14, dan 4.16. Dengan perbesaran 500 kali seperti pada Gambar 4.13, terlihat mikrostruktur yang berbeda dari sampel awal. Karbida sekunder pada matriks lebih halus. Kemudian timbul batas butir yang baru di dalam butir-butir kolumnar. Berdasarkan *ASM Handbook volume* kesembilan halaman 1600, foto mikro sampel hasil *solution anneal* terjadi pembentukan butir-butir *austenite* yang baru yang lebih halus (*refine grain*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.13.

Dari hasil pengamatan mikrostruktur material hasil perlakuan panas, bentuk butir kolumnar tidak mengalami perubahan. Hal ini disebabkan karena temperature *solution anneal* yang kurang dapat melarutkan karbida-karbida terutama pada batas butir-butir kolumnar. Sehingga karbida-karbida primer masih bersifat sebagai pengunci batas butir dan pelarutan tidak sepenuhnya tercapai^[24]. Sebagai akibatnya, ketika dilakukan *quenching* butir-butir berfasakan *austenite* yang baru yang terbentuk didalam butir kolumnar terbentuk. Demikian halnya dengan karbida sekunder yang ukurannya lebih kecil apabila dibandingkan dengan ukuran karbida sekunder pada material yang tidak mengalami perlakuan panas. Butir-butir *austenite* halus baru yang terbentuk pada dendrit-dendrit butir kolumnar ini diindikasikan sebagai *refine grain* agar mempermudah penyebutan dalam analisis lebih lanjut.

4.5.3. Hubungan Nilai Konstanta Elastisitas dengan Frekuensi Gelombang Ultrasonik pada Sampel *Non-anneal*

4.5.3.1. Sampel Kubus *Non-anneal* (Pengukuran C_{11} , C_{22} , dan C_{33})



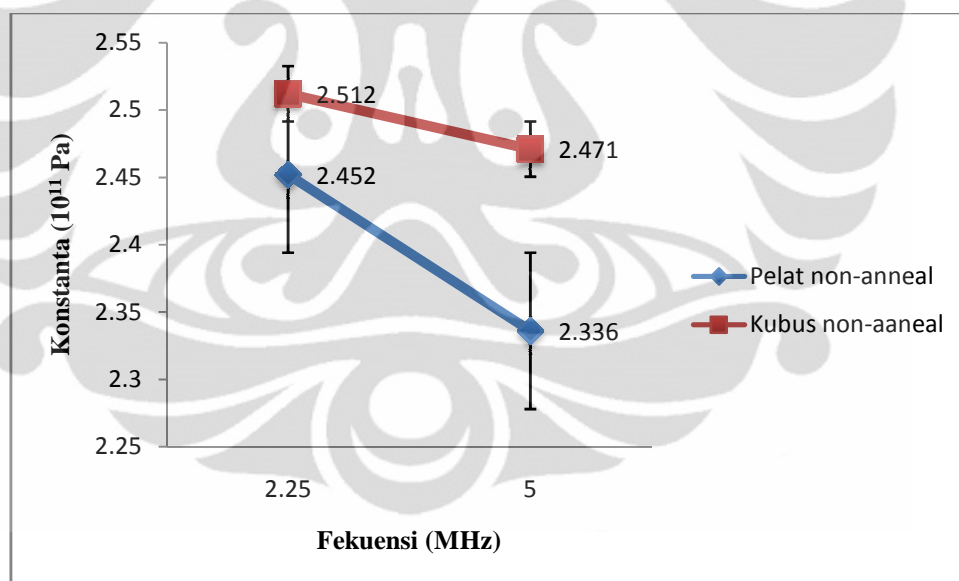
Gambar 4.18. Hubungan nilai konstanta elastisitas dengan frekuensi pengukuran cepat rambat gelombang ultrasonik pada kubus *non-anneal*.

Konstanta elastisitas C_{11} , C_{22} , dan C_{33} didapatkan dari hasil pengukuran cepat rambat gelombang pada kubus 1 dengan notasi kecepatan V_1 , V_4 , dan V_7 . Dan pengukuran pada kubus 1 yang tidak mengalami perlakuan panas (*non-anneal/as cast*) dilakukan pada frekuensi 1 MHz, 2,25 MHz, dan 5 MHz. Pengukuran pada frekuensi 1 MHz dilakukan dengan menggunakan *probe* normal 1 MHz berdiameter 20 mm. Dan didapatkan C_{11} sebesar $0,283 \times 10^{11}$ Pa, C_{22} sebesar $0,28 \times 10^{11}$ Pa, dan C_{33} sebesar $0,701 \times 10^{11}$ Pa. Pengukuran dengan frekuensi 2,25 MHz dilakukan dengan menggunakan *probe* normal berdiameter 12,5 mm. Dan didapatkan C_{11} sebesar $2,758 \times 10^{11}$ Pa, C_{22} sebesar $2,636 \times 10^{11}$ Pa, dan C_{33} sebesar $2,512 \times 10^{11}$ Pa. Kemudian pengukuran dengan frekuensi 5 MHz digunakan *probe* normal dengan diameter 6,5 mm dan didapatkan C_{11} sebesar $0,283 \times 10^{11}$ Pa, C_{22} sebesar $0,28 \times 10^{11}$ Pa, dan C_{33} sebesar $0,701 \cdot 10^{11}$ Pa

Pengukuran dengan frekuensi 2,25 MHz dan 5 MHz sudah sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa pengukuran pada kubus 1 $C_{11} > C_{22} > C_{33}$ ^[21, 25].. Kemudian, semakin besar frekuensi, nilai semua konstanta juga seharusnya semakin kecil ^[21]. Pada frekuensi 2,25 MHz dan 5 MHz juga sudah sesuai dengan literatur, karena kecenderungan nilai dari ketiga konstanta semakin kecil dengan

semakin besarnya frekuensi gelombang. Hal ini disebabkan karena semakin besar frekuensi maka panjang gelombang semakin kecil, dan gelombang ultrasonik dengan panjang gelombang kecil akan sensitif terhadap perbedaan impedansi akustik material^[13]. Perlu diketahui bahwa pada sampel pengujian terdapat karbida dan matriks *austenite* yang memiliki densitas yang berbeda. Semakin besar densitas, maka impedansi akustik akan semakin besar dan getaran akan semakin terhalang. Sebagai akibatnya, gelombang akan berjalan lebih lambat pada fasa yang memiliki impedansi akustik yang lebih besar seperti halnya pada karbida. Sedangkan anomali yang terjadi pada pengukuran konstanta elastisitas dengan frekuensi 1 MHz diindikasikan karena teknis pengukuran yang bermasalah. Ukuran *probe* yang lebih besar dari sampel mengakibatkan energi gelombang ultrasonik tidak sepenuhnya melalui sampel kubus.

4.5.3.2. Perbandingan Hasil Pengukuran C_{33} Sampel Kubus (*Non-anneal*) dengan Sampel Pelat Arah R (*Non-anneal*)



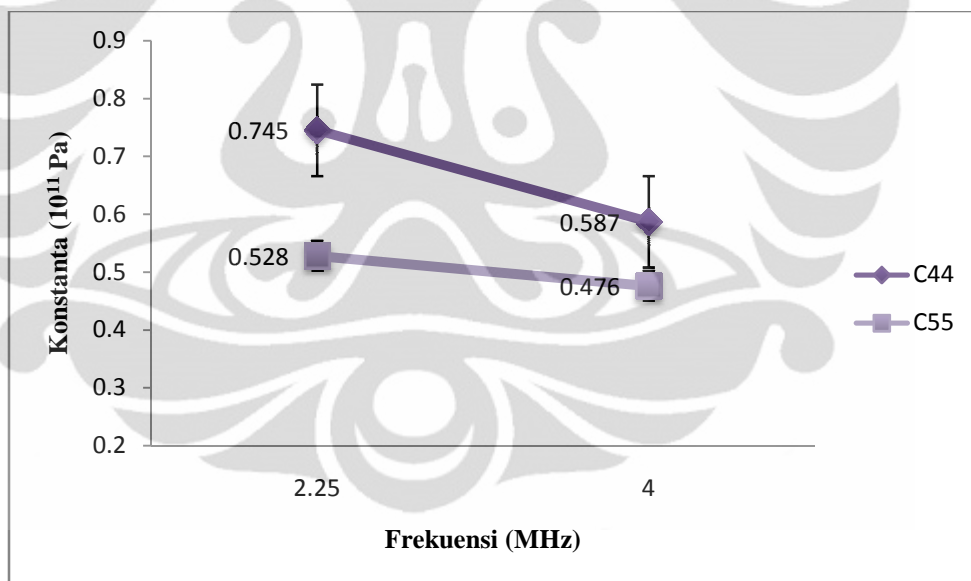
Gambar 4.19. Perbandingan nilai konstanta elasisitas C_{33} hasil pengukuran pada sampel kubus dan sampel pelat *non-anneal*.

Pengukuran pada frekuensi 2,25 MHz menunjukkan deviasi setengah dari *error bar* yakni 2,388 % dan pengukuran dengan menggunakan frekuensi 5 MHz lebih dari nilai *error bar* (5%) yakni sebesar 5,463 % yang relatif tidak terlalu besar. Dapat dilihat bahwa nilai C_{33} pada pelat memiliki gradien yang ekstrim atau perbedaan nilai konstanta C_{33} pada frekuensi 2,25 dan 5 MHz yang cukup jauh apabila dibandingkan dengan nilai C_{33} pada kubus. Hal ini menunjukkan bahwa

pengukuran pada pelat sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa semakin tinggi frekuensi maka perambatan gelombang ultrasonik akan semakin sensitif terhadap mikrostruktur akibat perbedaan impedansi akustik masing-masing fasa pada material^[13]. Sehingga semakin tinggi frekuensi, nilai pengukuran konstanta elastisitasnya akan semakin berbeda jauh.

Akan tetapi grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.18 menunjukkan perbedaan nilai konstanta elastisitas C_{11} , C_{22} , dan C_{33} pada frekuensi 5 MHz lebih kecil dari 2,25 MHz. Hal ini berkebalikan dengan nilai C_{33} pada pelat yang seharusnya semakin besar frekuensi maka semakin besar pula perbedaan nilai masing-masing konstanta elastisitas. Hal ini diindikasikan karena nilai konstanta C_{11} , C_{22} , dan C_{33} merupakan rata-rata beberapa nilai pengukuran yang telah dilakukan. Dan pengambilan data ulang pun tidak dapat dilakukan karena keterbatasan instrumentasi.

4.5.3.3. Sampel Pelat *Non-anneal* (Pengukuran C_{44} dan C_{55})



Gambar 4.20. Hubungan nilai konstanta elasisitas dengan frekuensi pengukuran cepat rambat gelombang ultrasonik pada pelat *non-anneal* (pengukuran C_{44} dan C_{55}).

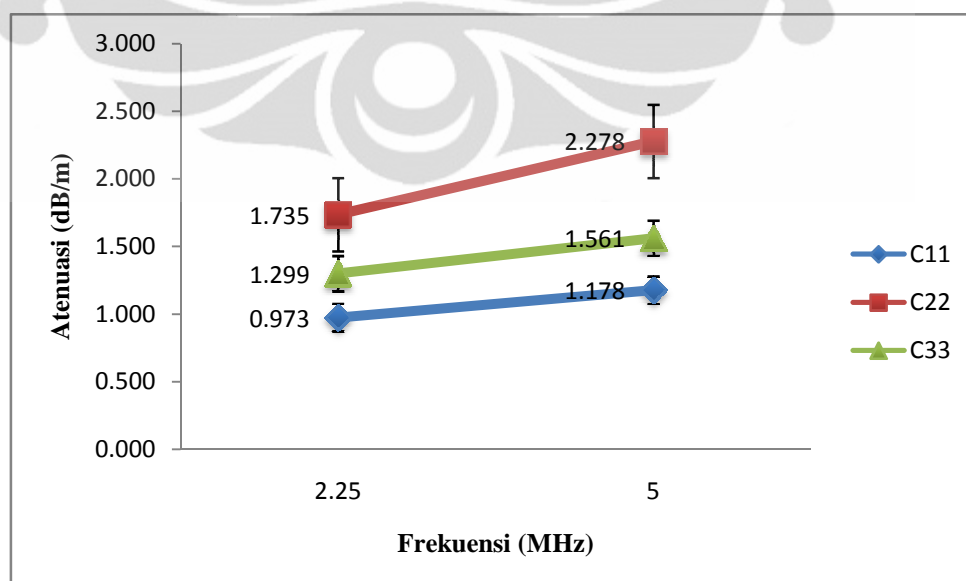
Analisis dalam pengukuran C_{44} dan C_{55} dilakukan secara terpisah dikarenakan penggunaan jenis sampel yang berbeda. Sampel pelat yang dijadikan referensi dalam pengukuran dengan menggunakan gelombang longitudinal (pengukuran C_{11} , C_{22} , dan C_{33}) juga digunakan dalam pengukuran C_{44} dan C_{55} (menggunakan mode gelombang transversal) karena masih memungkinkan untuk dilakukan pengukuran dengan menggunakan *probe* sudut.

Gambar 4.20 menunjukkan bahwa konstanta C_{44} didapatkan sebesar $0,745 \times 10^{11}$ Pa untuk frekuensi 2,25 MHz dan $0,587 \times 10^{11}$ Pa untuk frekuensi 4 MHz. C_{55} didapatkan nilai sebesar $0,528 \times 10^{11}$ Pa pada frekuensi 2,25 MHz dan $0,476 \times 10^{11}$ Pa pada frekuensi 4 MHz. Seperti halnya hasil pengukuran C_{33} pada pelat *non-anneal*, kecenderungan nilai C_{44} menurun seiring dengan meningkatnya frekuensi pengukuran. Demikian halnya dengan C_{55} yang memiliki kecenderungan yang sama. Kemudian apabila diperbandingkan antara nilai C_{44} dan C_{55} dalam satu frekuensi pengukuran, terlihat bahwa nilai C_{44} lebih besar dari C_{55} . Sesuai dengan referensi yang menyatakan bahwa pengukuran dengan menggunakan metode *trough transmission ultrasonic* akan menghasilkan pengukuran C_{44} yang lebih besar dari C_{55} [25].

Akan tetapi grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.0 menunjukkan perbedaan nilai konstanta elastisitas C_{44} dan C_{55} pada frekuensi 5 MHz lebih kecil dari 2,25 MHz. Hal ini diindikasikan karena nilai konstanta C_{44} dan C_{55} merupakan rata-rata beberapa nilai pengukuran yang telah dilakukan. Dan pengambilan data ulang pun tidak dapat dilakukan karena keterbatasan instrumentasi seperti yang telah dijelaskan pada Sub bab 4.5.3.2.

4.5.4. Hubungan Nilai Atenuasi dengan Frekuensi Gelombang Ultrasonik pada Sampel *Non-anneal*

4.5.4.1. Atenuasi pada Sampel Kubus *Non-anneal*

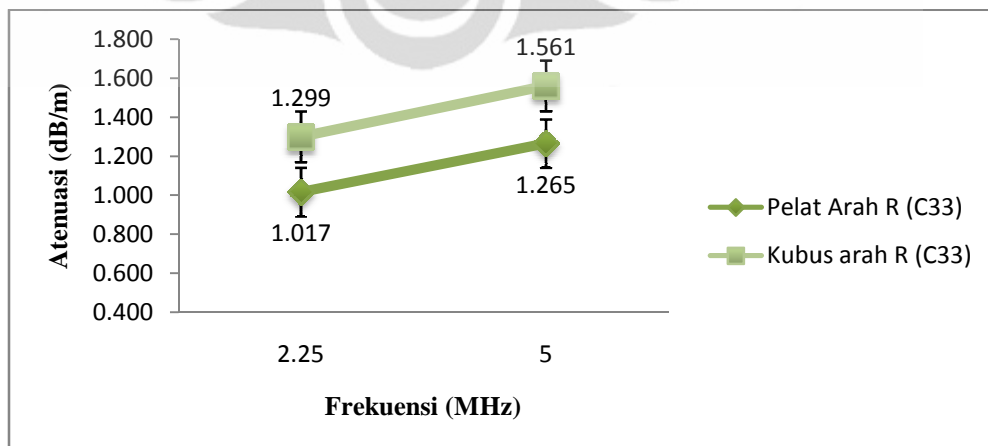


Gambar 4.21. Perbandingan nilai atenuasi masing-masing orientasi pada sampel kubus *non-anneal*.

Selain melakukan pengukuran terhadap konstanta elastisitas pada sampel kubus awal (*non-anneal*), pengukuran terhadap tingkat atenuasi gelombang ultrasonik juga dilakukan. Nilai atenuasi yang terjadi pada sisi yang sejajar dengan arah θ atau pengukuran C_{11} bernilai 0,973 dB/m untuk 2,25 MHz, dan 1,178 dB/m untuk pengukuran dengan frekuensi 5 MHz. Kemudian, pada sisi kubus yang sejajar dengan arah L atau pengukuran C_{22} menunjukkan nilai atenuasi sebesar 1,735 dB/m untuk pengukuran 2,25 MHz, dan 2,278 untuk frekuensi 5 MHz. Untuk sisi yang sejajar dengan arah R atau pengukuran C_{33} menunjukkan nilai atenuasi sebesar 1,299 dB/m untuk pengukuran 2,25 MHz, dan 1,561 untuk frekuensi 5 MHz. Dari ketiga jenis pengukuran pada arah yang berbeda, maka didapatkan kecenderungan kenaikan nilai atenuasi seiring dengan semakin tingginya nilai frekuensi pengukuran.

Ketika semakin tinggi frekuensi gelombang, maka panjang gelombang akan semakin pendek. Dengan panjang gelombang yang semakin pendek, maka perambatan gelombangnya akan semakin detail mengikuti terstruktur dan morfologi medium perambatannya. Sebagai akibatnya apabila medium yang dilalui gelombang tidak homogen atau dengan kata lain anisotropik, maka akan terjadi banyak *scattering* dan penyerapan energi gelombang. Sebagai hasilnya, semakin tinggi frekuensi, maka akan semakin besar pula tingkat penyerapan dan *scattering* gelombang ultrasoniknya^[13].

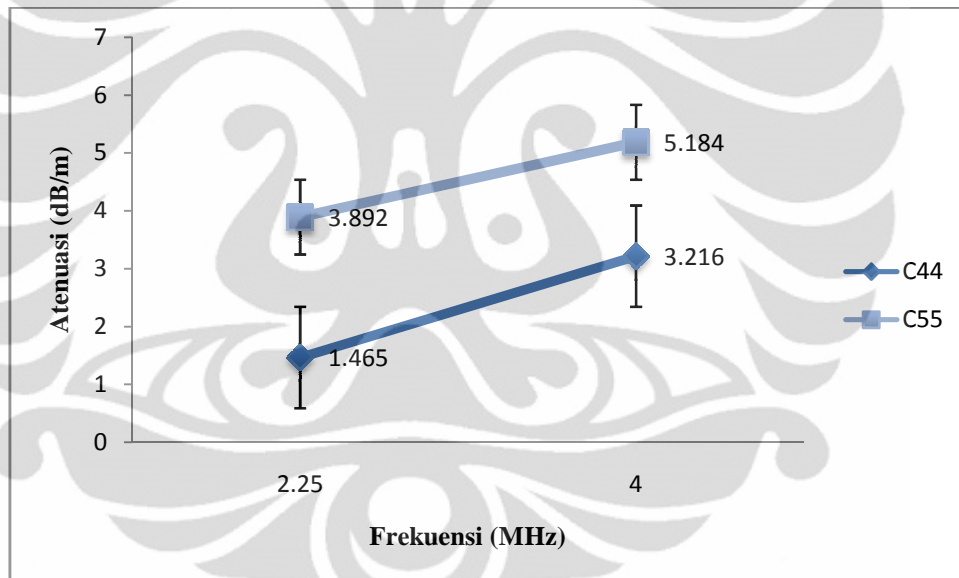
4.5.4.2. Perbandingan Hasil Pengukuran Atenuasi Sampel Kubus (*Non-anneal*) dengan Sampel Pelat Arah R (*Non-anneal*)



Gambar 4.22. Perbandingan nilai atenuasi arah R pada sampel kubus dan sampel pelat *non-anneal*.

Nilai atenuasi pada pelat *non-anneal* arah R atau pada pengukuran konstanta C_{33} adalah sebesar 1,017 dB/m untuk frekuensi pengukuran 2,25 MHz, dan 1,265 dB/m untuk frekuensi pengukuran 5 MHz. Nilai atenuasi gelombang pada pelat memiliki kecenderungan meningkat dengan gradien linier. Dan pada kubus juga memiliki kecenderungan meningkat seiring dengan meningkatnya frekuensi gelombang terutama pada frekuensi 2,25 dan 5 MHz. Kemudian terjadi deviasi nilai atenuasi pada kubus terhadap pelat sebesar 21,709 % pada frekuensi 2,25 MHz, dan 18,962 % untuk frekuensi 5 MHz. Nilai deviasi pada atenuasi juga berbanding lurus dengan nilai deviasi pada pengukuran C_{33} . Deviasi semakin mengecil ketika frekuensi pengukuran semakin besar terutama pada frekuensi 2,25 dan 5 MHz.

4.5.4.3. Atenuasi pada Pengukuran C_{44} dan C_{55} (*Non-anneal*)



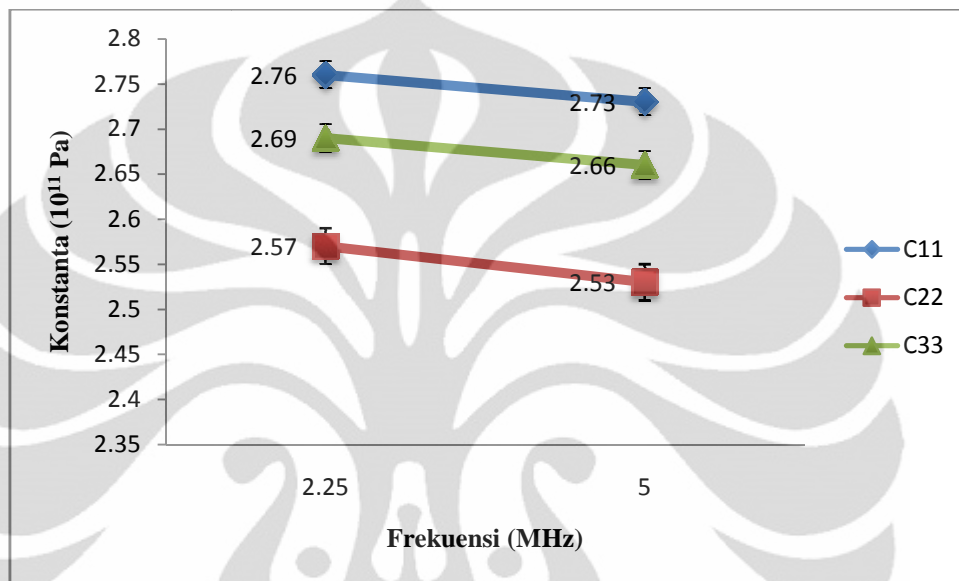
Gambar 4.23. Perbandingan nilai atenuasi arah RL (C_{44}) dan arah $R\theta$ (C_{55}) pada sampel pelat *non-anneal*.

Dari gambar 4.23 dapat diketahui bahwa nilai atenuasi baik itu pada pengukuran C_{44} dan C_{55} memiliki kecenderungan yang meningkat seiring dengan meningkatnya frekuensi pengukuran. Dengan demikian, pengukuran dengan menggunakan mode gelombang transversal ini juga memiliki kecenderungan yang sama dengan pengukuran melalui mode gelombang longitudinal (pengukuran C_{11} , C_{22} , dan C_{33}). Hasil pengukuran ini juga sesuai dengan teori yang menyatakan bahwa rasio perbandingan antara diameter butir terhadap panjang gelombang semakin besar, maka demikian halnya dengan nilai atenuasi yang akan semakin

besar pula^[13]. Pada penelitian ini diameter butir dianggap tetap, akan tetapi frekuensi meningkat (panjang gelombang semakin kecil). Sehingga nilai atenuasi akan semakin besar.

4.5.5. Hubungan Nilai Konstanta Elastisitas dengan Frekuensi Gelombang Ultrasonik Pada Sampel *Annealed*

4.5.5.1. Sampel Kubus *Annealed*



Gambar 4.24. Hubungan nilai konstanta elastisitas dengan frekuensi pengukuran cepat rambat gelombang ultrasonik pada kubus *annealed*.

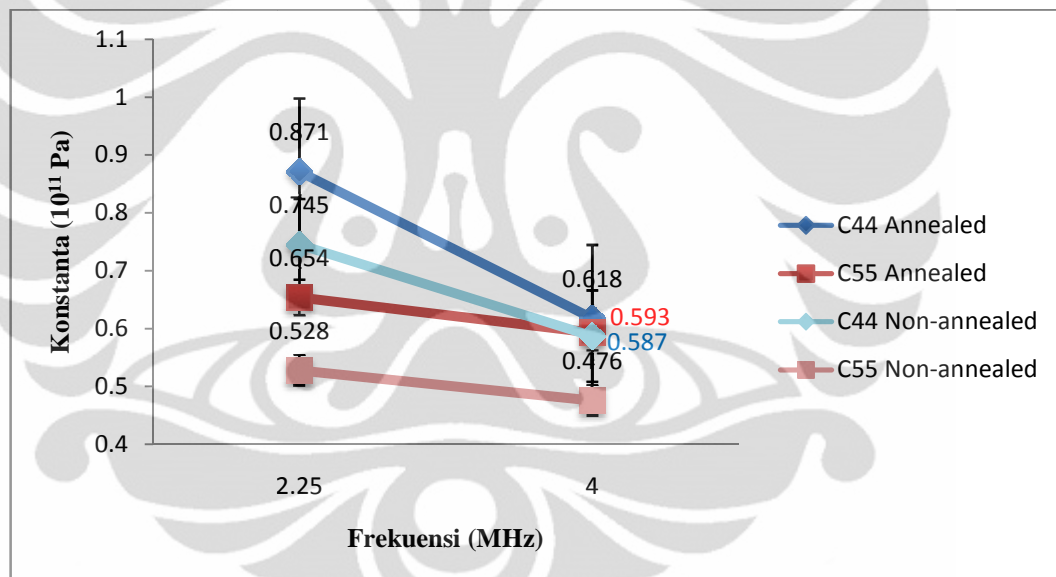
Hasil pengukuran pada kubus hasil perlakuan panas menunjukkan bahwa nilai C_{11} sebesar $2,76 \times 10^{11}$ Pa dan $2,73 \times 10^{11}$ Pa masing-masing pada frekuensi 2,25 dan 5 MHz. C_{22} sebesar $2,57 \times 10^{11}$ Pa dan $2,53 \times 10^{11}$ Pa masing-masing pada frekuensi 2,25 dan 5 MHz. Dan C_{33} sebesar $2,69 \times 10^{11}$ Pa dan $2,66 \times 10^{11}$ Pa masing-masing pada frekuensi 2,25 dan 5 MHz. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa nilai ketiga konstanta semakin kecil seiring meningkatnya frekuensi gelombang yang berarti bahwa kecenderungan yang dihasilkan sama seperti kubus *non-anneal*. Akan tetapi hal ini tidak menjelaskan mengapa kecenderungan nilai konstanta satu jenis frekuensi pengukuran tidak sesuai dengan referensi, yakni $C_{11} > C_{22} > C_{33}$ ^[21,25].

Untuk anomali yang terjadi pada pengukuran ini, tidak ada referensi yang dapat mendukung penjelasan secara langsung. Akan tetapi setelah dilakukan pengamatan pada sisi-sisi kubus yang sejajar arah L, maka butir baru *austenite* tidak banyak terbentuk dibandingkan jenis sisi/bidang yang lain. Ketika semakin

sedikit batas butir yang ada, maka kekerasan material akan lebih rendah pula. Sebagai akibatnya, tingkat kekerasan pun menurun sesuai yang direpresentasikan nilai C_{22} dari hasil pengukuran pada kubus *annealed*.

Kemudian apabila nilai C_{11} dan C_{33} kubus *annealed* dan *non-anneal* diperbandingkan pada masing-masing frekuensinya, maka nilai konstanta pada kubus yang mengalami *solution anneal* lebih besar bila dibandingkan kubus *non-anneal*. Hal ini menunjukkan bahwa terbentuknya *refine grain* pada hasil *anneal* akan meningkatkan kekerasan material karena semakin banyaknya batas butir. Hal ini akan meningkatkan cepat rambat gelombang ultrasonik dan akan menyebabkan nilai konstanta elastisitas semakin besar^[17].

4.5.5.2. Perbandingan Hasil Pengukuran C_{44} dan C_{55} Sampel Kubus (*Non-anneal*) dengan Kubus (*Annealed*)



Gambar 4.25. Perbandingan nilai konstanta elastisitas C_{44} dan C_{55} hasil pengukuran pada sampel kubus *non-anneal* dan sampel kubus *annealed*.

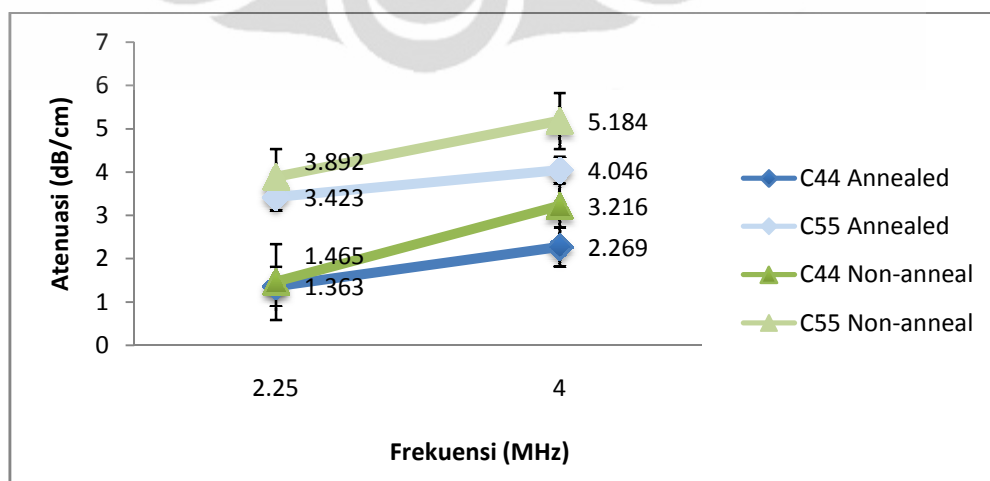
Dari gambar 4.25 dapat diketahui bahwa terjadi kecenderungan penurunan nilai C_{44} dan C_{55} baik dari hasil *anneal* maupun *non-anneal* dengan semakin meningkatnya frekuensi gelombang. Dan apabila dilakukan pengamatan terhadap selisih antara hasil pengukuran sampel *anneal* dan sampel *non-anneal*, maka didapatkan suatu hubungan bahwa konstanta elastisitas pada sampel yang mengalami perlakuan panas *solution anneal* memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan sampel normal. Hal ini mengindikasikan bahwa *refine grain austenite* yang terbentuk pada sampel hasil perlakuan panas meningkatkan nilai

konstanta elastisitas yang semakin besar. Semakin kecil ukuran butir dalam fasa yang sama, maka kekerasan akan semakin besar dan kecepatan gelombang ultrasonik juga akan semakin cepat. Hal ini disebabkan karena gelombang akan lebih cepat menutupi wilayah butir yang kecil daripada wilayah butir yang besar^[17].

Pada pengukuran konstanta elastisitas dengan menggunakan *probe* sudut 4 MHz seharusnya memiliki hasil dengan perbedaan yang besar disetiap konstantanya bila dibandingkan dengan frekuensi 2,25 MHz. Hal ini diindikasikan karena nilai konstanta C_{44} dan C_{55} merupakan rata-rata beberapa nilai pengukuran yang telah dilakukan. Dan pengambilan data ulang pun tidak dapat dilakukan karena keterbatasan instrumentasi seperti yang telah dijelaskan pada Sub bab 4.5.3.2. Selain itu terdapat indikasi ketidaktepatan posisi *transmitter probe* dan *receiver probe*, sehingga mempengaruhi nilai konstanta yang dihasilkan dari pengukuran dengan menggunakan *probe* sudut 4 MHz.

4.5.6. Hubungan Nilai Atenuasi Gelombang dengan Frekuensi Pengukuran Sampel *Annealed* Dan *Non-anneal*

Data yang akan dijadikan perbandingan adalah nilai atenuasi pada pelat yakni pada pengukuran konstanta elastisitas C_{44} dan C_{55} . Data ini diasumsikan representatif terhadap kedua variabel kondisi mengingat indikasi kehilangan energi gelombang sangat minimum pada saat dilakukannya pengambilan data. Dan gambar 4.26 menunjukkan hubungan antara nilai atenuasi dengan frekuensi pada pengukuran C_{44} dan C_{55} .



Gambar 4.26. Hubungan nilai atenuasi dengan frekuensi gelombang pada pengukuran C_{44} dan C_{55} sampel *anneal* dan *non-anneal*.

Dari grafik pada gambar 4.26 didapatkan nilai atenuasi pada pengukuran C_{44} dan C_{55} yang semakin meningkat seiring dengan kenaikan frekuensi pengukuran. Akan tetapi apabila dicermati dengan seksama, nilai atenuasi pada sampel *non-anneal* lebih besar bila dibandingkan dengan nilai atenuasi sampel *annealed*. Apabila dilihat dari peningkatan nilai atenuasi pada sampel *annealed*, hasil pengukuran sesuai dengan teori yang menjelaskan tentang rasio perbandingan antara diameter butir dengan panjang gelombang, semakin besar rasio tersebut, maka atenuasi juga akan semakin besar^[13]. Pada penelitian ini diameter butir dianggap mengecil, akan tetapi frekuensi meningkat (panjang gelombang semakin kecil). Sehingga nilai atenuasi akan semakin kecil. Demikian halnya dengan perbandingan nilai atenuasi sampel *annealed* yang relatif lebih kecil dari nilai sampel *non-anneal*.

4.5.7. Perbandingan Nilai Konstanta Elastitas Aktual dengan Referensi

Hasil dari pengujian ultrasonik yang telah dilakukan tidak dapat diperbandingkan dengan pengujian mekanik seperti uji tarik. Hal ini disebabkan karena hanya didapatkan lima konstanta dari sembilan konstanta elastisitas pada matriks kekakuan material ortotropik. Selain itu, konstanta yang didapatkan dari penelitian ini hanyalah konstanta diagonal pada matriks yakni C_{11} , C_{22} , C_{33} , C_{44} , dan C_{55} , sehingga konstanta tersebut tidak dapat dikonversikan menjadi modulus elastisitas (E) karena membutuhkan konstanta non-diagonal dalam kalkulasinya.

Penelitian yang dilakukan B.R. Dewey dan kawan-kawan tentang pengukuran konstanta elastisitas logam las *stainless steel* jenis 308 dengan menggunakan *electroslag welds* telah menunjukkan perbandingan hasil pengukuran antara metode transmisi ultrasonik dan uji tarik. Dan persamaan 4.1 adalah matriks kekakuan yang dihasilkan dari pengukuran dengan menggunakan transmisi gelombang ultrasonik pada frekuensi 2,25 MHz. Dan apabila dibandingkan dengan hasil pengujian tarik didapatkan nilai deviasi sebesar kurang lebih 31 %^[25].

$$[C] = \begin{bmatrix} 2,78 & 1,27 & 1,70 & 0 & 0 & 0 \\ 1,27 & 2,42 & 1,35 & 0 & 0 & 0 \\ 1,70 & 1,35 & 2,23 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,87 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,77 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,57 \end{bmatrix} \times 10^{11} \text{ Pa} \quad (4.1)$$

Hasil pengujian yang telah dilakukan pada sampel *non-anneal* didapatkan nilai C_{11} sebesar $2,758 \times 10^{11}$ Pa, C_{22} sebesar $2,636 \times 10^{11}$ Pa, C_{33} sebesar $2,512 \times 10^{11}$ Pa, C_{44} sebesar $0,745 \times 10^{11}$ Pa, dan C_{55} sebesar $0,528 \times 10^{11}$ Pa. Berdasarkan nilai C_{11} , C_{22} , C_{33} , C_{44} , dan C_{55} memiliki kecenderungan yang sama seperti halnya pada persamaan 4.1^[25]. Dengan mempertimbangkan hal tersebut dan dengan besarnya frekuensi pengukuran yakni 2,25 MHz, maka dapat diprediksikan hasil penelitian ini juga memiliki deviasi yang sama seperti halnya pada pengukuran logam las SS 308 yakni sebesar kurang lebih 31 % berdasarkan matriks kekakuan hasil pengujian tarik logam las SS 308 di bawah ini.

$$[C] = \begin{bmatrix} 2,64 & 1,48 & 1,56 & 0 & 0 & 0 \\ 1,48 & 2,63 & 1,63 & 0 & 0 & 0 \\ 1,56 & 1,63 & 2,35 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,94 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1,08 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,53 \end{bmatrix} \times 10^{11} \text{ Pa} \quad (4.2)$$

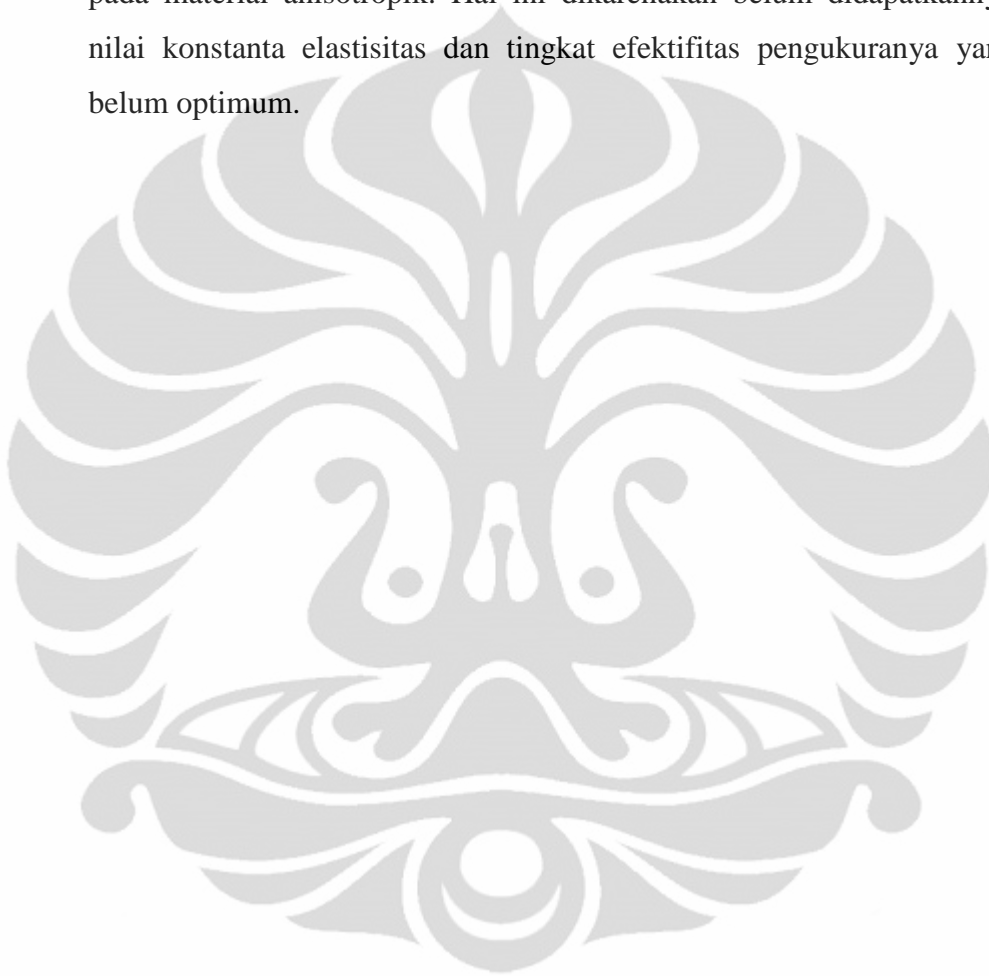
BAB 5

KESIMPULAN

Setelah dilakukan pengujian transmisi gelombang ultrasonik pada material IN-519 (*cast steel*) baik yang mengalami perlakuan panas (*annealed*) ataupun *as cast (non-anneal)* dan dengan beberapa variabel frekuensi yang memungkinkan, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- a. Pada sampel *non-anneal/as castl* didapatkan nilai C_{11} sebesar $2,758 \times 10^{11}$ Pa, C_{22} sebesar $2,636 \times 10^{11}$ Pa, C_{33} sebesar $2,512 \times 10^{11}$ Pa, C_{44} sebesar $0,745 \times 10^{11}$ Pa, dan C_{55} sebesar $0,528 \times 10^{11}$ Pa. Kemudian untuk sampel *annealed* didapatkan nilai C_{11} sebesar $2,760 \times 10^{11}$ Pa, C_{22} sebesar $2,57 \times 10^{11}$ Pa, C_{33} sebesar $2,69 \times 10^{11}$ Pa, C_{44} sebesar $0,871 \times 10^{11}$ Pa, dan C_{55} sebesar $0,654 \times 10^{11}$ Pa.
- b. Nilai deviasi terbesar didapatkan pada pengukuran konstanta dengan frekuensi 1MHz dibandingkan dengan pengukuran dengan menggunakan frekuensi 2,25 dan 5 MHz. Hal ini disebabkan karena ukuran *probe* yang jauh lebih besar dari sampel yang akan menurunkan tingkat efektifitas karena kehilangan banyak energy gelombang ultrasonik.
- c. Semakin besar frekuensi yang digunakan dalam pengukuran nilai konstanta, maka kecenderungan nilai konstanta yang didapatkan akan semakin kecil. Dan nilai atenuasi dari masing-masing pengukuran akan semakin meningkat baik pada sampel *annealed* maupun sampel *non-anneal*.
- d. Rata-rata nilai konstanta eleatisitas sampel yang mengalami perlakuan panas relatif lebih besar dibandingkan dengan sampel *non-anneal*. Hal ini disebabkan terjadinya perubahan mikrostruktur pada sampel yang mengalami *solution anneal* berupa timbulnya butir-butir baru *austenite (refine grain)* didalam butir-butir kolumnar hasil fabrikasi.
- e. Akibat dari timbulnya butir-butir baru dengan ukuran yang lebih kecil dibandingkan dengan butir kolumnar awal, maka nilai atenuasi pada sampel *ennealed* relatif lebih kecil dibandingkan dengan sampel *non-anneal*.

- f. Dari kecenderungan atau pola nilai konstanta C_{11} , C_{22} , C_{33} , C_{44} , dan C_{55} hasil pengukuran dengan frekuensi 2,25 MHz dan apabila dibandingkan dengan uji tarik, diprediksi memiliki nilai deviasi kurang lebih sebesar 31 %.
- g. Hasil pengukuran konstanta elastisitas pada material IN-519 (*cast steel*) ini belum dapat dijadikan data masukan dalam *modeling* teknik inspeksi ultrasonik pada material anisotropik. Hal ini dikarenakan belum didapatkannya semua nilai konstanta elastisitas dan tingkat efektifitas pengukurannya yang masih belum optimum.



DAFTAR PUSTAKA

1. Anderson, M.T. et al, *Research and Evaluation of Advance NDE Methods for Addressing Challenges of Inspecting Cast Austenitic Stainless Steel Piping*, Pacific Norwest National Laboratory, USA, 2008.
2. P. Ramuhalli, *Ultrasonic Characterization of Cast Austenitic Stainless Steel Microstructure: Discrimination between Equiaxed- and Columnar-Grain Material – An Interim Study*, Pacific Norwest National Laboratory, USA, 2009.
3. Eriksson, A.S. et al., *Modelling of Ultrasonic Crack Detection in Anisotropic Materials*, NDT & E International (2000), 441-451.
4. Rose, J.L. et al., *A Numerical Integration Green's Function Model for Ultrasonic Field Profiles in Mildly Anisotropic Media*, Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 8, No.3, 1989.
5. Singh, Ramesh. *Niobium Stabilized Alloys in Steam Hydrocarbon Reforming*, Gulf Interstate Engineering, Huston, Texas, 2009.
6. Rolf K. dan Peter W., *Niobium in centrifugally cast tubes for petrochemical application*, Schmidt and Clemens, Jerman, 2001.
7. Dieter, George E., *Mechanical Metallurgy (SI Metric Edition)*, McGraw-Hill, New York, 1988.
8. Callister, William D., Jr. *Materials Science and Engineering: An Introduction (7th Edition)*, John Wiley & Sons, Inc.: USA, 2007.
9. Courtney, Thomas H., *Mechanical Behavior of Materials (Second edition)*, McGraw-Hill, New York, 2000.
10. http://www.efunda.com/formulae/solid_mechanics/mat_mechanics/hooke_orthotropic.cfm: Hooke's law for orthotropic.
11. http://www.efunda.com/formulae/solid_mechanics/mat_mechanics/hooke_iso_transverse.cfm: Hooke's law for transversally isotropic.
12. Van Flack, After L.H, *Elements of Materials Science and Engineering (4th ed.)*, Edison-Wesley, 1980.
13. Krautkramer, Josef , *Ultrasonic Testing of Material*, Toppan Printing Co.,Singapore, 1969.

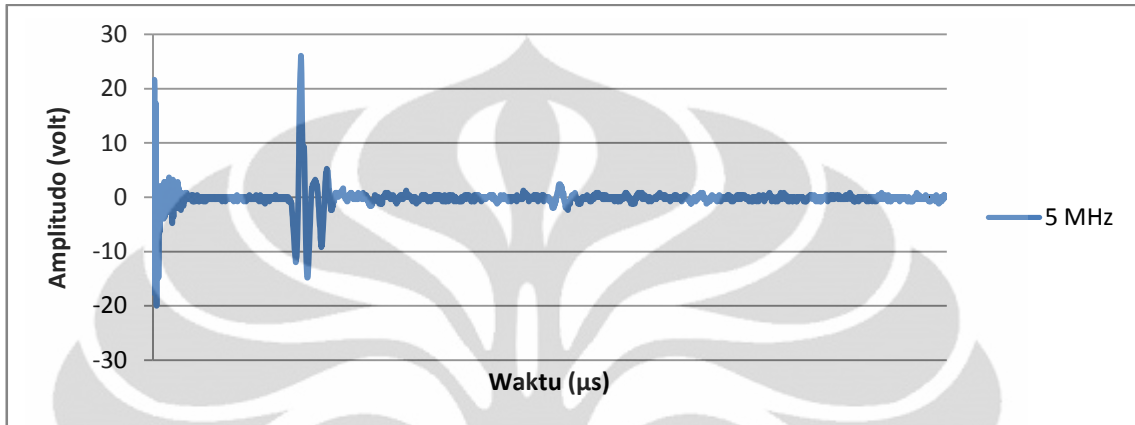
14. ASM, *Non-destructive Evaluation and Quality Control*, Metals Handbook 9th ed, Volume 17, Metals Parks, Ohio 1981.
15. http://id.wikipedia.org/wiki/Panjang_gelombang: Panjang gelombang
16. <http://id.wikipedia.org/wiki/Frekuensi>: Frekuensi Gelombang
17. Widioso, Yosef B., Studi korelasi kekerasan baja karbon rendah SS400 dengan cepat rambat dan atenuasi gelombang ultrasonik, Depok: Universitas Indonesia, 2008.
18. <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Introduction/description.htm>: Introduction of ultrasonic testing.
19. <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/refractionsnells.htm>: Snellius, s law.
20. Rose, J.L., *Ultrasonic Waves in Solid media*, Cambridge University Press, UK, 1999.
21. Rose, J.L. et al, *One-Sided Ultrasonic Inspection Technique for The Elastic Constant Determination of Advanced Anisotropic Materials*, journal of NDE, Vol. 10, No.4, 1991.
22. *Heat Treater's guide, Standard Practice and Procedures for Steel*, ASM, Metals Park, OHIO.
23. Labanowski, Jerzy. *Assesment of structural changes at IN-519 Cast Steel reformer tubes*. Department of material science and engineering, Gdansk University of Technology, Poland, 1994.
24. Alpamy, Nandyo, *Analisa Ukuran Butir Ferit Dan Laju Korosi Baja Hsla 0.029 % Nb Setelah Canai Panas*, Depok: Universitas Indonesia, 2008.
25. Dewey, B.R. et al., *Measurement of anisotropic elastic constant of type 308 stainless steel electroslag welds*, SESA Spring Meeting, Silver Spring, 1977.
26. ASTM E3-01 “*Standard Guide for Preparation for Metallographic Specimens*”.
27. ASTM A269-04 “*Standard Specification for Seamless and Welded Austenitic Stainless Steel Tubing*”.

LAMPIRAN 1

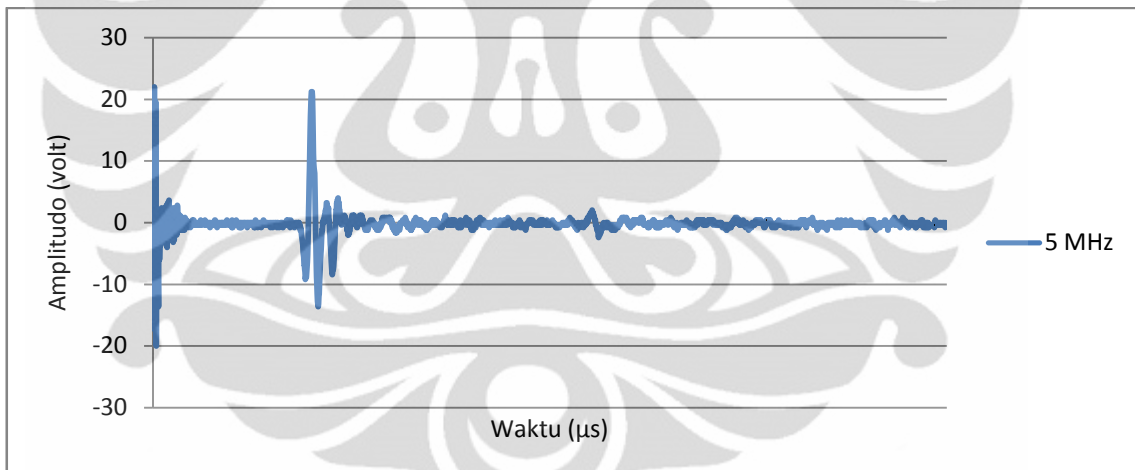
Grafik Pengukuran Cepat Rambat Gelombang Ultrasonik

1. Data hasil pengukuran cepat rambat gelombang pada kubus *non-anneal*.

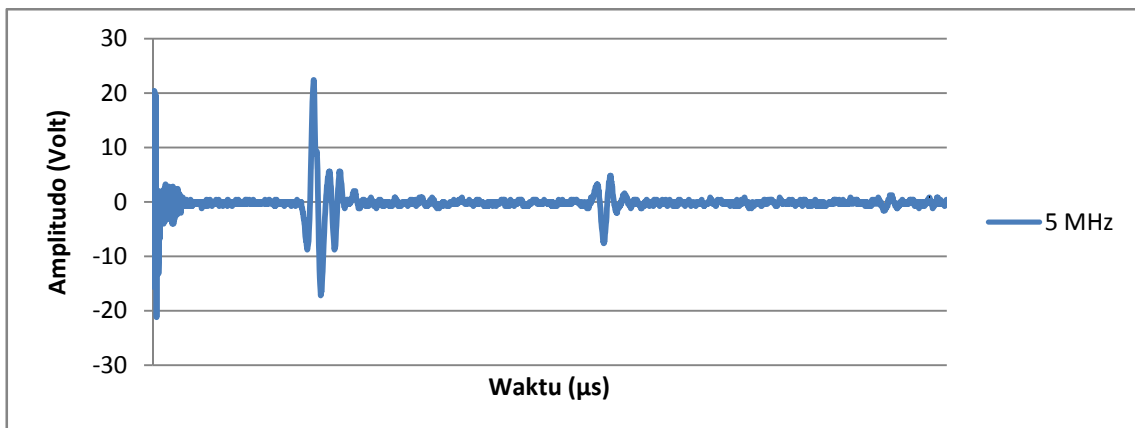
1.1. Kubus arah θ /bidang (100) notasi kecepatan V1 dengan frekuensi 5 MHz



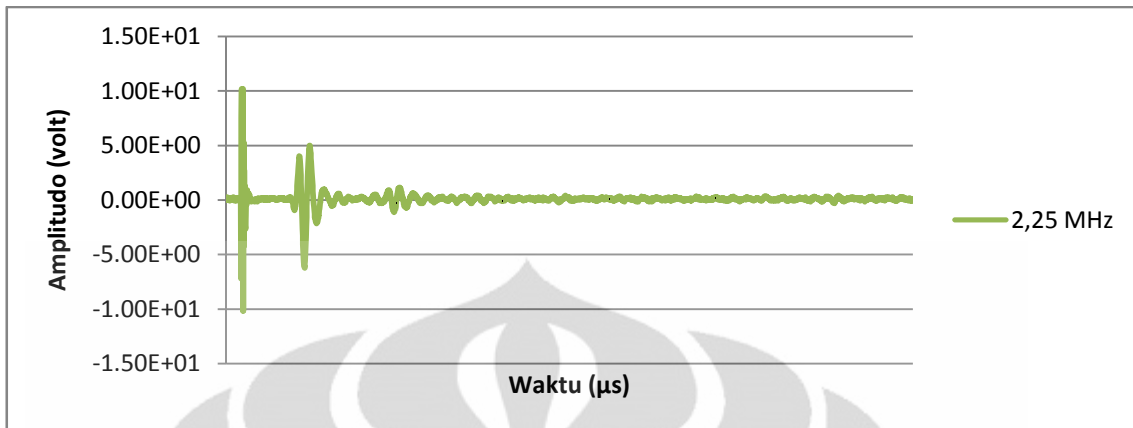
1.2. Kubus arah L/bidang (010) notasi kecepatan V4 dengan frekuensi 5 MHz



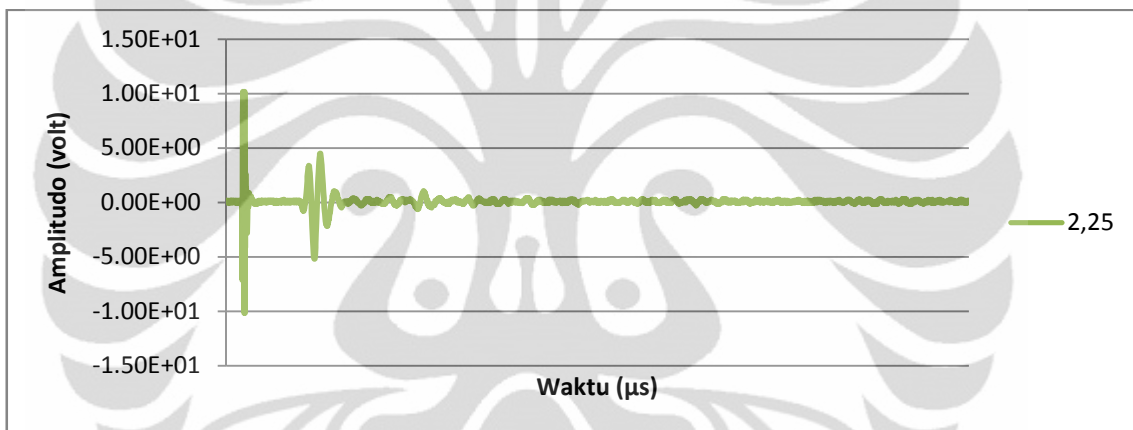
1.3. Kubus arah R/bidang (001) notasi kecepatan V7 dengan frekuensi 5 MHz



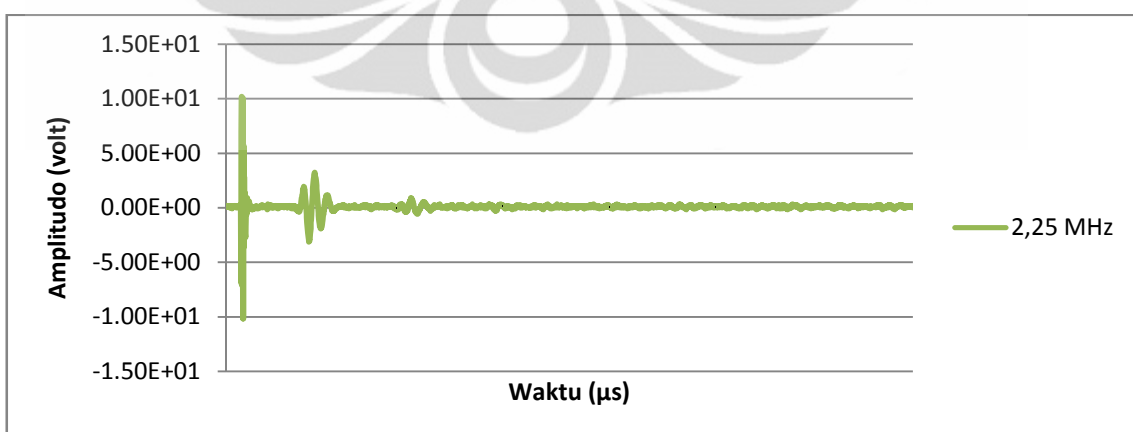
1.4. Kubus arah θ /bidang (100) notasi kecepatan V1 dengan frekuensi 2,25 MHz



1.5. Kubus arah L/bidang (010) notasi kecepatan V4 dengan frekuensi 2,25 MHz

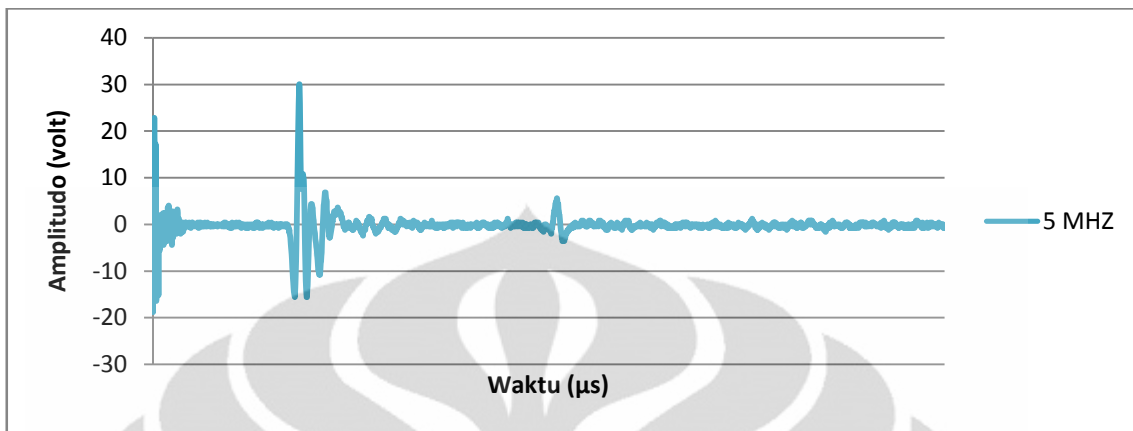


1.6. Kubus arah R/bidang (001) notasi kecepatan V7 dengan frekuensi 2,25 MHz

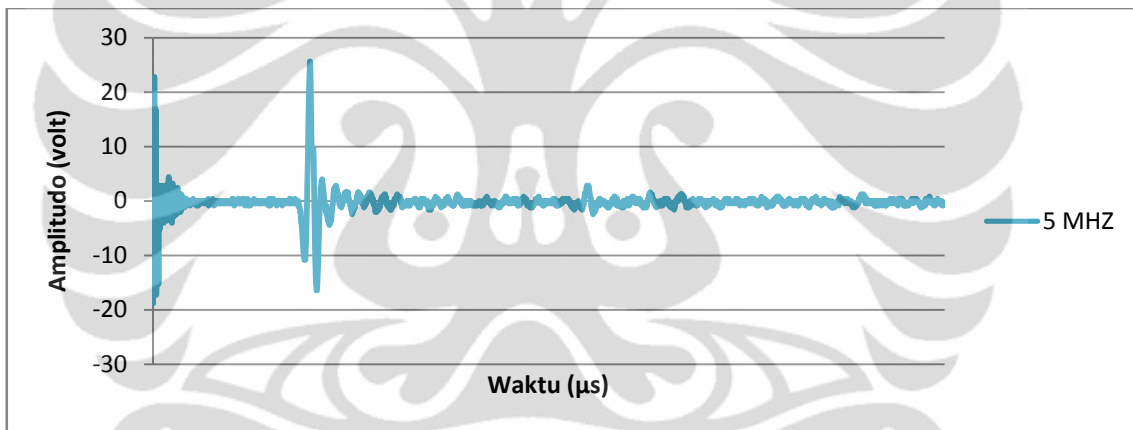


2. Data hasil pengukuran cepat rambat gelombang pada kubus *annealed*.

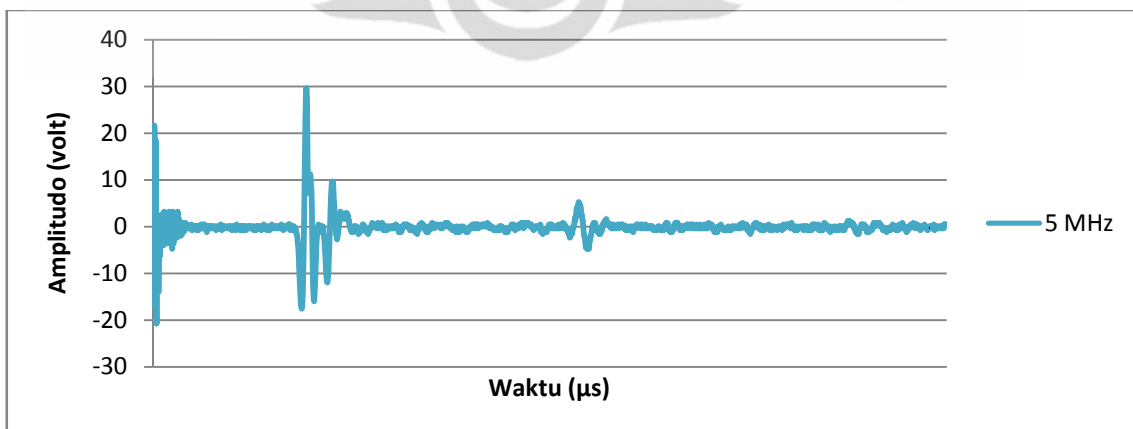
2.1. Kubus arah θ /bidang (100) notasi kecepatan V1 dengan frekuensi 5 MHz



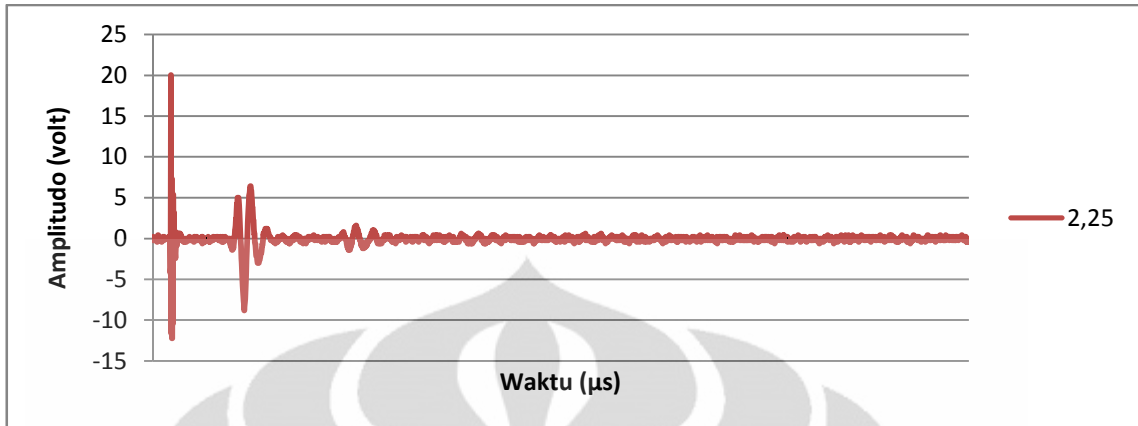
2.2. Kubus arah L/bidang (010) notasi kecepatan V4 dengan frekuensi 5 MHz



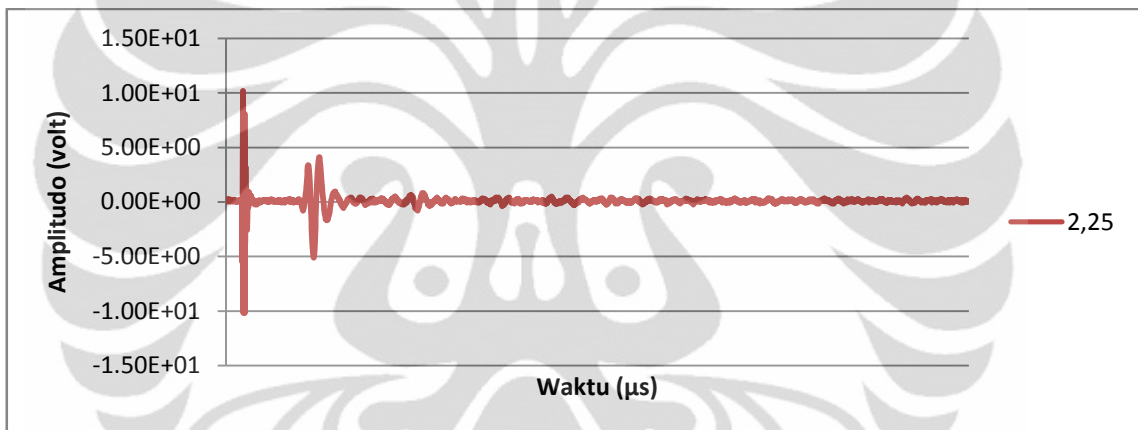
2.3. Kubus arah R/bidang (001) notasi kecepatan V7 dengan frekuensi 5 MHz



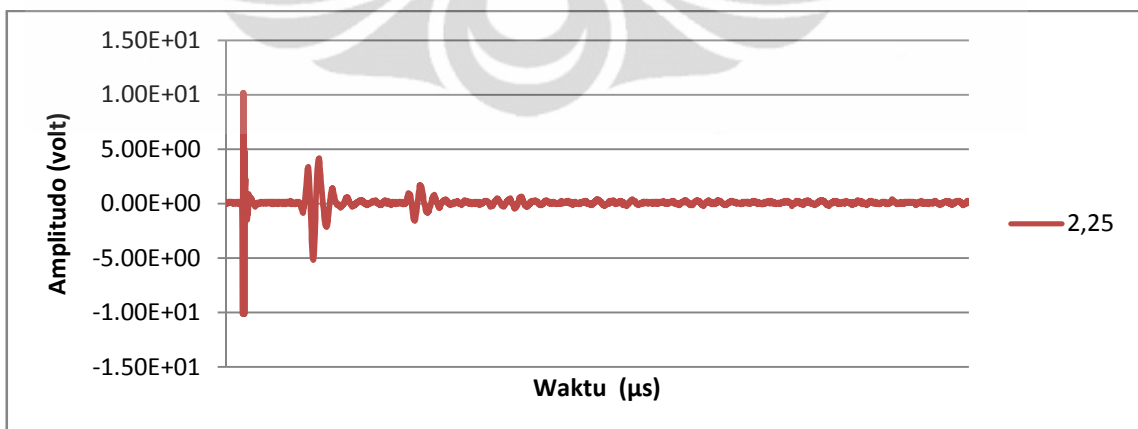
2.4. Kubus arah θ /bidang (001) notasi kecepatan V1 dengan frekuensi 2,25 MHz



2.5. Kubus arah L/bidang (010) notasi kecepatan V4 dengan frekuensi 2,25 MHz

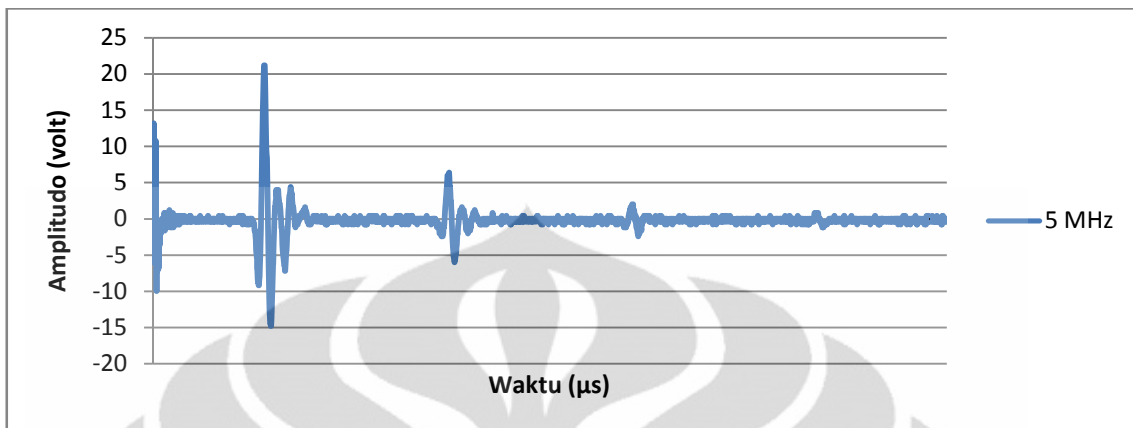


2.6. Kubus arah R/bidang (001) notasi kecepatan V7 dengan frekuensi 2,25 MHz

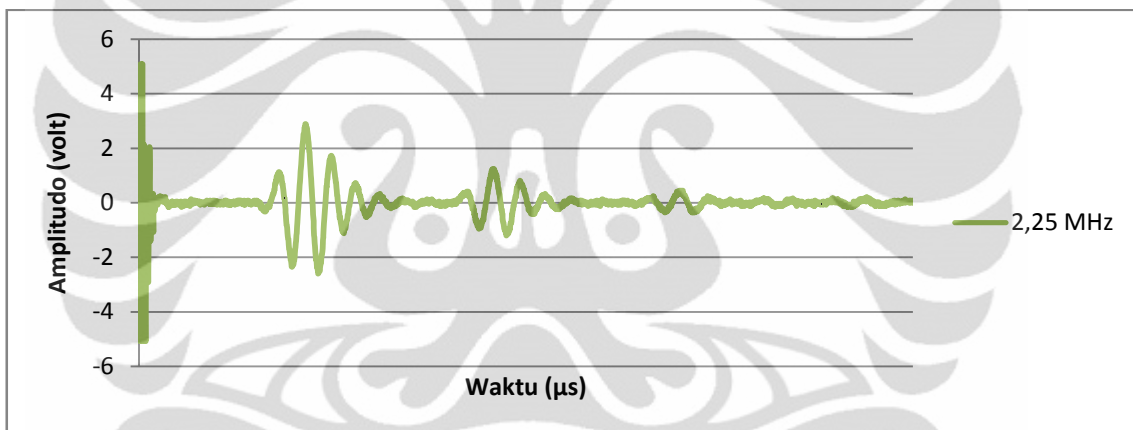


3. Data hasil pengukuran cepat rambat gelombang (V7) pada pelat *non-anneal*.

3.1. Pelat dengan ketebalan arah R/bidang (001) dengan frekuensi 5 MHz

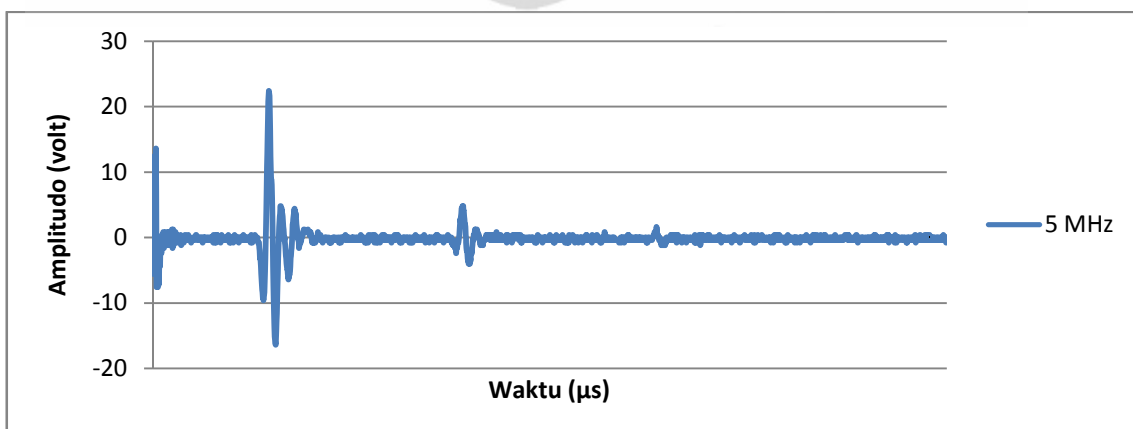


3.2. Pelat dengan ketebalan arah R/bidang (001) dengan frekuensi 2,25 MHz

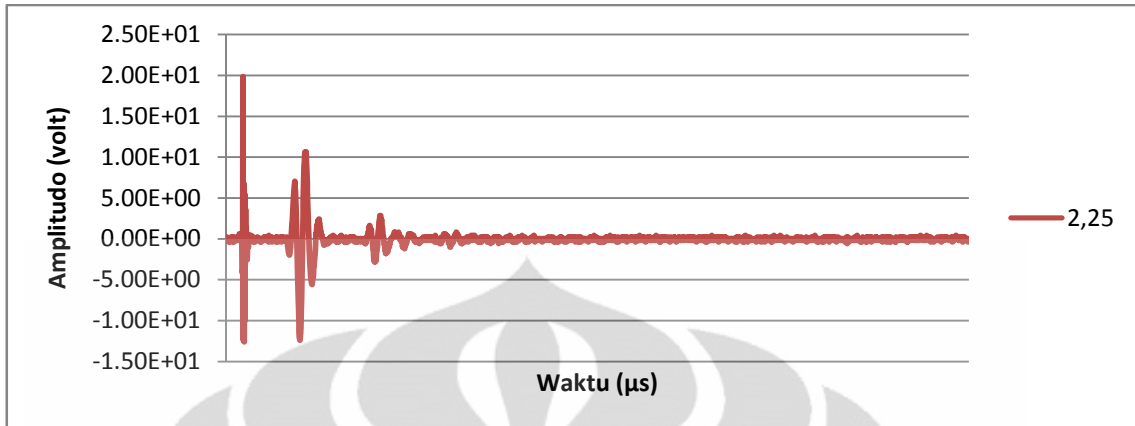


4. Data hasil pengukuran cepat rambat gelombang (V7) pada pelat *annealed*.

4.1. Pelat dengan ketebalan arah R/bidang (001) dengan frekuensi 5 MHz

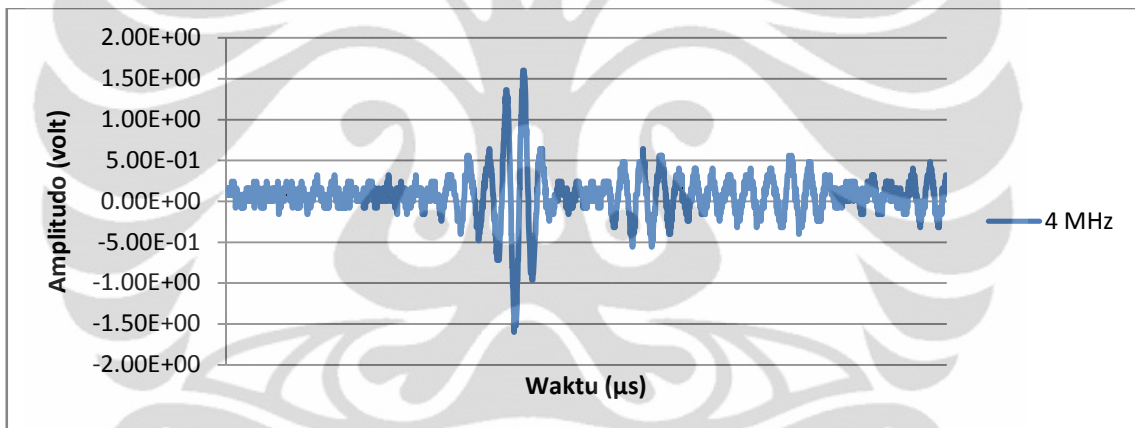


4.2. Pelat dengan ketebalan arah R/bidang (001) dengan frekuensi 2,25 MHz

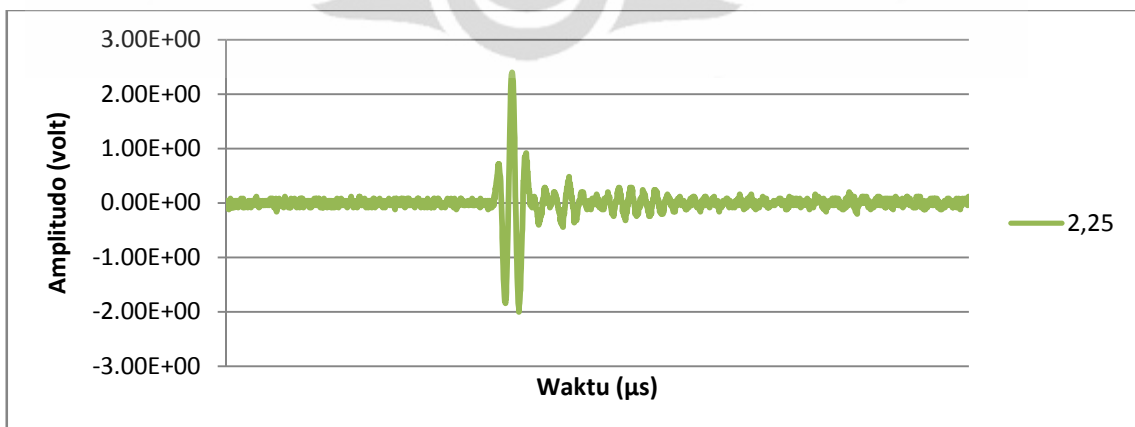


5. Data hasil pengukuran cepat rambat gelombang (V8) pada pelat *non-anneal*.

5.1. Pelat dengan ketebalan arah R/bidang (001) dengan frekuensi 4 MHz

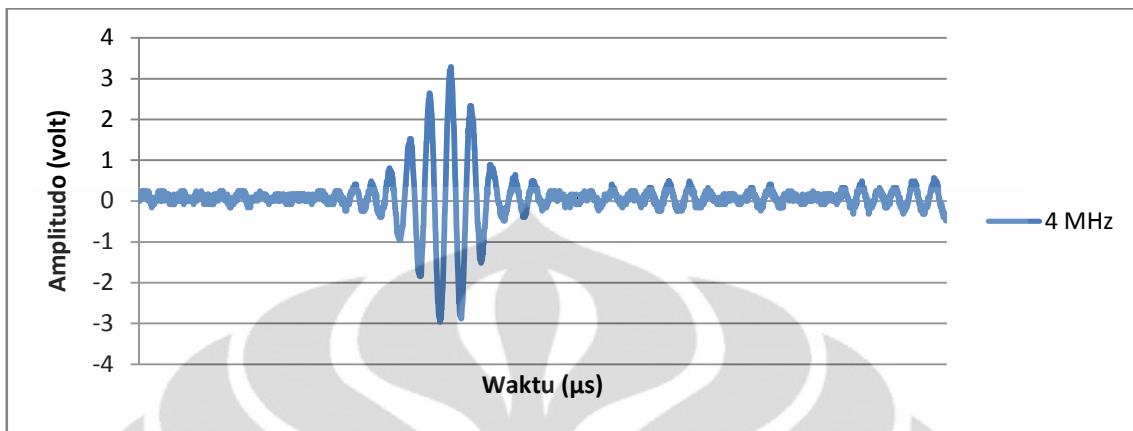


5.2. Pelat dengan ketebalan arah R/bidang (001) dengan frekuensi 2,25 MHz

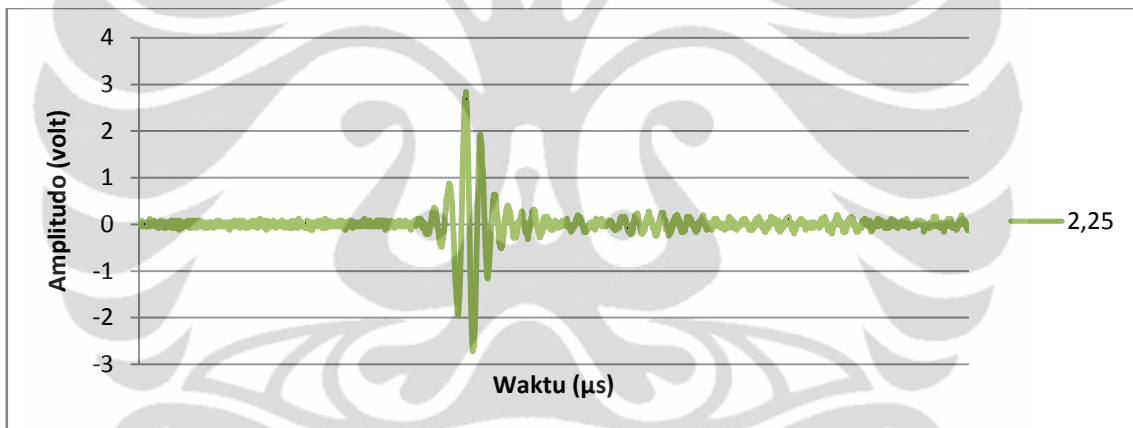


6. Data hasil pengukuran cepat rambat gelombang (V9) pada pelat *non-anneal*.

6.1. Pelat dengan ketebalan arah R/bidang (001) dengan frekuensi 4 MHz

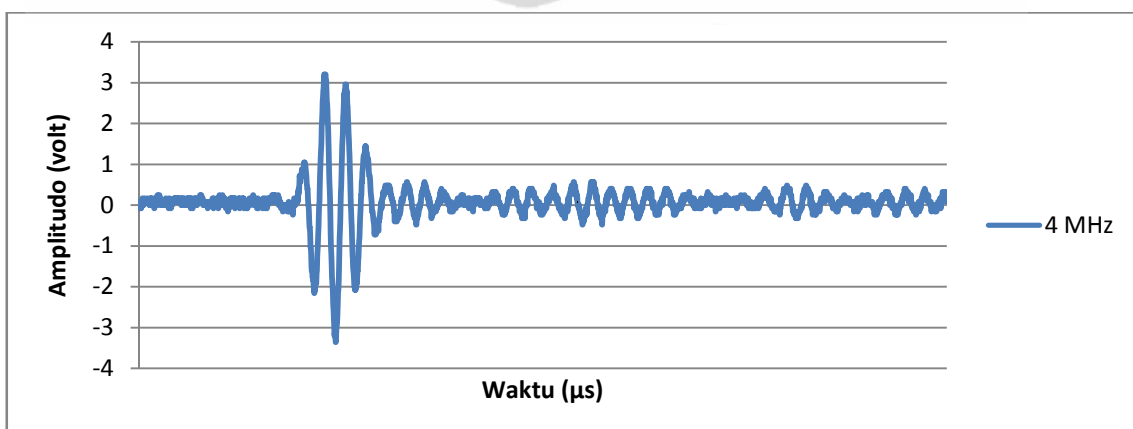


6.2. Pelat dengan ketebalan arah R/bidang (001) dengan frekuensi 2,25 MHz

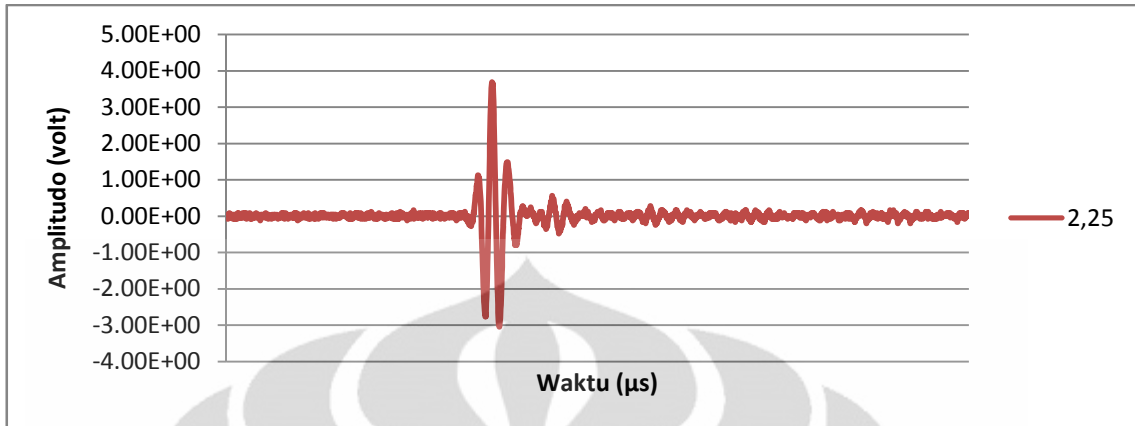


7. Data hasil pengukuran cepat rambat gelombang (V8) pada pelat *annealed*.

7.1. Pelat dengan ketebalan arah R/bidang (001) dengan frekuensi 4 MHz

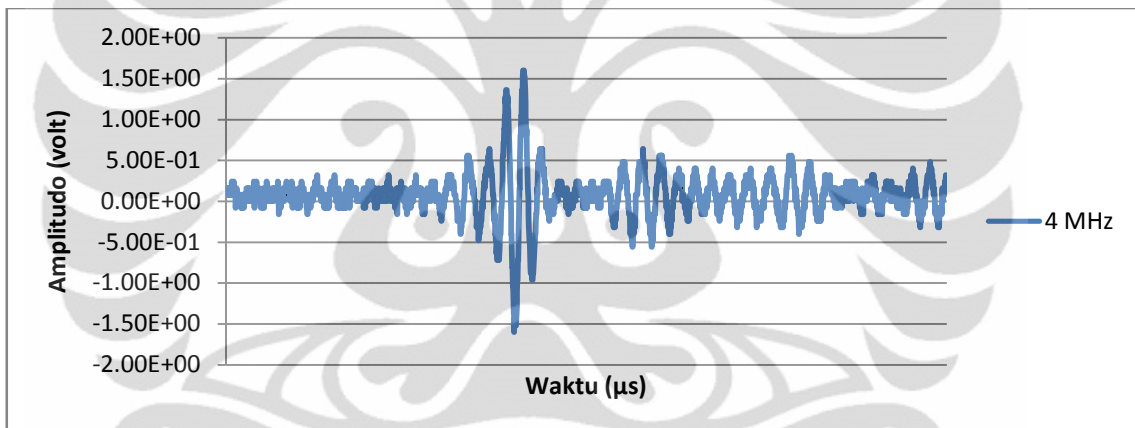


7.2. Pelat dengan ketebalan arah R/bidang (001) dengan frekuensi 2,25 MHz

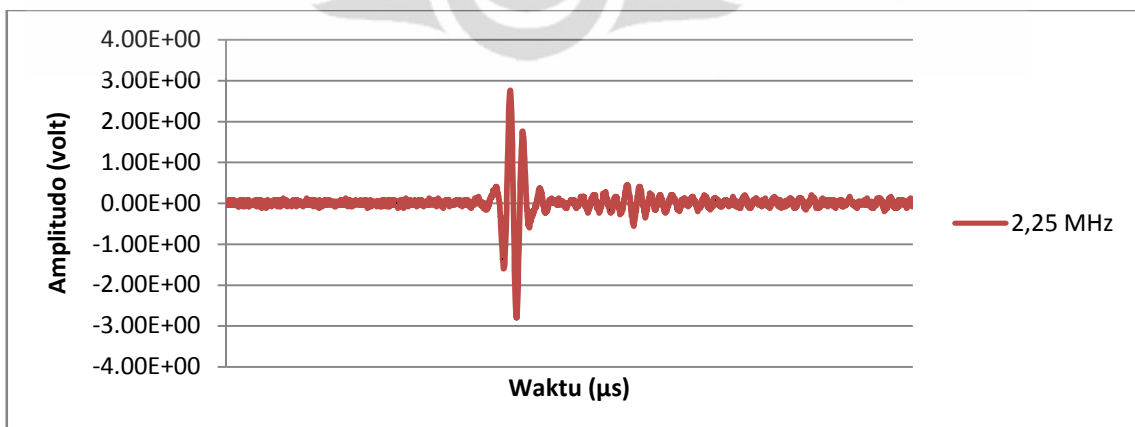


8. Data hasil pengukuran cepat rambat gelombang (V9) pada pelat *annealed*.

8.1. Pelat dengan ketebalan arah R/bidang (001) dengan frekuensi 4 MHz



8.2. Pelat dengan ketebalan arah R/bidang (001) dengan frekuensi 2,25 MHz



LAMPIRAN 2

Penghitungan Konstanta dan Atenuasi Gelombang Ultrasonik

1. Penghitungan Konstanta dan atenuasi gelombang pada sampel kubus *non-anneal* (mode gelombang longitudinal)

Orientasi	Notasi Kecepatan	Densitas (Kg/m ³)	Tebal (10 ⁻³ m)	1 MHz		2,25 MHz		5 MHz		1 MHz		2,25 MHz		5 MHz	
				waktu (μs)	A1/A0*	waktu (μs)	A1/A0*	waktu (μs)	A1/A0*	C** (10 ¹¹ Pa)	α*** (dB/m)	C** (10 ¹¹ Pa)	α*** (dB/m)	C** (10 ¹¹ Pa)	α*** (dB/m)
θ	V1	8000	9,6	10,2	0,397	3,27	0,378	3,33	0,308	0,283	0,922	2,758	0,973	2,659	1,178
L	V4	8000	9,96	10,6	0,21	3,47	0,176	3,53	0,102	0,280	1,559	2,636	1,735	2,547	2,278
R	V7	8000	9,92	6,7	0,247	3,54	0,273	3,57	0,21	0,701	1,292	2,512	1,299	2,471	1,561

* A1/A0 (Perbandingan antara amplitudo sinyal kesatu dan kedua)

** $C = \rho \cdot V^2$ (C = Konstanta elastisitas 10¹¹ Pa, ρ = densitas material Kg/m³, dan V = Cepat rambat gelombang m/s)

*** $\alpha = -\ln(A1/A0)$ (α = atenuasi gelombang dB/m, A1/A0 = Perbandingan antara amplitudo sinyal kesatu dan kedua)

2. Penghitungan Konstanta dan atenuasi gelombang pada sampel kubus *annealed* (mode gelombang longitudinal)

Orientasi	Notasi Kecepatan	Densitas (Kg/m ³)	Tebal (10 ⁻³ m)	2,25 MHz		5 MHz		2,25 MHz		5 MHz	
				waktu (μs)	A1/A0*	waktu (μs)	A1/A0*	C** (10 ¹¹ Pa)	α*** (dB/m)	C** (10 ¹¹ Pa)	α*** (dB/m)
θ	V1	8000	9.5	3,23	0,273	3,25	0,142	2,768	1,298	2,734	1,952
L	V4	8000	9.9	3,49	0,242	3,52	0,109	2,575	1,419	2,531	2,216
R	V7	8000	9.9	3,41	0,262	3,43	0,127	2,697	1,339	2,665	2,064

3. Penghitungan Konstanta dan atenuasi gelombang pada sampel pelat *non-anneal* (mode gelombang longitudinal)

Notasi Kecepatan	Densitas (Kg/m ³)	Tebal (10 ⁻³ m)	1 MHz		2,25 MHz		5 MHz		1 MHz		2,25 MHz		5 MHz	
			waktu (μs)	A1/A0*	waktu (μs)	A1/A0*	waktu (μs)	A1/A0*	C ₃₃ ** (10 ¹¹ Pa)	α*** (dB/m)	C ₃₃ ** (10 ¹¹ Pa)	α*** (dB/m)	C ₃₃ ** (10 ¹¹ Pa)	α*** (dB/m)
V7	8000	6,7	2,35	0,502	2,42	0,361	2,48	0,282	2,591	0,689	2,452	1,017	2,335	1,265

4. Penghitungan Konstanta dan atenuasi gelombang pada sampel pelat *annealed* (mode gelombang longitudinal)

Notasi Kecepatan	Densitas (Kg/m ³)	Tebal (10 ⁻³ m)	2,25 MHz		5 MHz		2,25 MHz		5 MHz	
			waktu (μs)	A1/A0*	waktu (μs)	A1/A0*	C ₃₃ ** (10 ¹¹ Pa)	α*** (dB/m)	C ₃₃ ** (10 ¹¹ Pa)	α*** (dB/m)
V7	8000	7	2,52	0,264	2,56	0,253	2,469	1,331	2,392	1,372

5. Penghitungan Konstanta dan atenuasi gelombang pada sampel pelat *non-anneal* (mode gelombang transversal)

Notasi Kecepatan	Densitas (Kg/m ³)	Tebal (10 ⁻³ m)	2,25 MHz		4 MHz		2,25 MHz		4 MHz	
			waktu (μs)	A1/A0*	waktu (μs)	A1/A0*	C** (10 ¹¹ Pa)	α*** (dB/m)	C** (10 ¹¹ Pa)	α*** (dB/m)
V8	8000	6,7	5,214	0,0204	5,494	0,0056	0,528	3,892	0,476	5,184
V9	8000	6,7	4,391	0,2310	4,963	0,0401	0,745	1,465	0,587	3,216

6. Penghitungan Konstanta dan atenuasi gelombang pada sampel pelat *annealed* (mode gelombang transversal)

Notasi Kecepatan	Densitas (Kg/m ³)	Tebal (10 ⁻³ m)	2,25 MHz		4 MHz		2,25 MHz		4 MHz	
			waktu (μs)	A1/A0*	waktu (μs)	A1/A0*	C** (10 ¹¹ Pa)	α*** (dB/m)	C** (10 ¹¹ Pa)	α*** (dB/m)
V8	8000	7	4,912	0,0326	5,126	0,0175	0,65	3,423	0,598	4,046
V9	8000	7	4,241	0,256	5,07	0,1034	0,872	1,363	0,618	2,269