



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS SINYAL SISTEM UT-NDT SONACT-X UNTUK
PENDETEKSIAN KERETAKAN TABUNG CNG**

SKRIPSI

**RHYAN EDWIN
0606068612**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI S1 FISIKA
PEMINATAN INSTRUMENTASI ELEKTRONIKA
DEPOK
SEPTEMBER 2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS SINYAL SISTEM UT-NDT SONACT-X UNTUK
PENDETEKSIAN KERETAKAN TABUNG CNG**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Sains

**RHYAN EDWIN
0606068612**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI S1 FISIKA
PEMINATAN INSTRUMENTASI ELEKTRONIKA
DEPOK
SEPTEMBER 2010**

Halaman Pernyataan Orisinalitas

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

Nama : Rhyan Edwin
NPM : 0606068612

Tanda Tangan :

Tanggal : 22 September 2010

Halaman Pengesahan

Nama : Rhyan Edwin
NPM : 0606068612
Program Studi : S1 Fisika
Peminatan : Instrumentasi Elektronika
Judul Skripsi : Analisis Sinyal Sistem UT-NDT SonaCTx
untuk Pendeteksian Keretakan Tabung CNG

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Sains pada Program Studi S1 Fisika peminatan Instrumentasi Elektronika - Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.

Pembimbing I : Dr. Warsito ()

Pembimbing II : Dr. Sastra Kusuma Wijaya ()

Penguji : Prof. Dr. B.E.F da Silva ()

Penguji : Drs. Arief Sudarmadji, M.T. ()

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 25 November 2010

Mukadimmah

"Hai jama'ah jin dan manusia, jika kamu sanggup menembus (melintasi) penjuru langit dan bumi, maka lintasilah, kamu tidak dapat menembusnya kecuali dengan kekuatan. Maka nikmat Tuhan kamu yang manakah yang kamu dustakan?"

[Ar-Rahmaan:33-34]

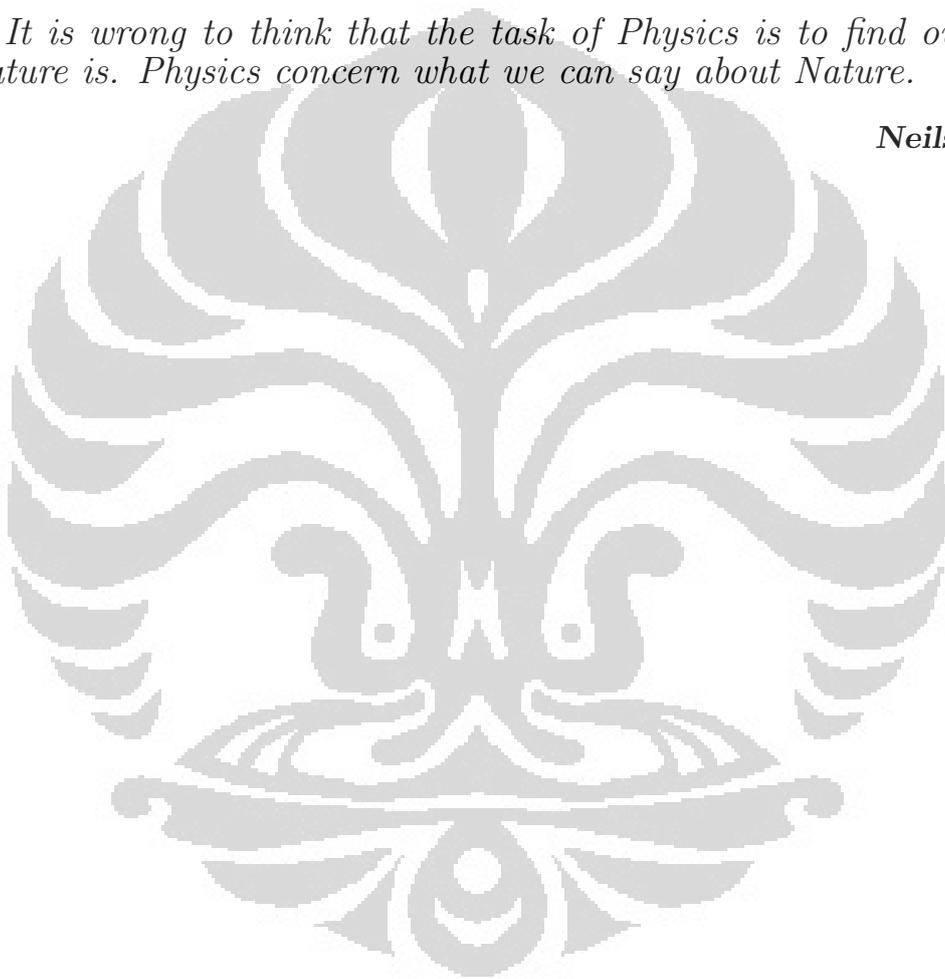
"Yang telah menciptakan tujuh langit berlapis-lapis. Kamu sekali-kali tidak melihat pada ciptaan Tuhan Yang Maha Pemurah sesuatu yang tidak seimbang. Maka lihatlah berulang-ulang, adakah kamu lihat sesuatu yang tidak seimbang? Kemudian pandanglah sekali lagi niscaya penglihatanmu akan kembali kepadamu dengan tidak menemukan sesuatu cacat dan penglihatanmu itupun dalam keadaan payah."

[Al-Mulk:3-4]

Kata Mutiara

It is wrong to think that the task of Physics is to find out how Nature is. Physics concern what we can say about Nature.

Neils Bohr



*Karya ini saya persembahkan untuk yang tercinta:
Orang Tuaku dan kedua kakak (Alm. Rheza Edwin) dan (Rahany Ardy)*

Kata Pengantar

Segala puji bagi **Allah Azza wa Jalla**, Rabb yang jiwaku berada pada genggaman -Nya; Tuhan Semesta Alam yang telah memberikan Rahmat dan Karunia-Nya yang selalu tercurahkan di bumi-Nya termasuk ke dalam jiwa ini sehingga penulis tetap istiqomah dan tabah dalam menyelesaikan Penelitian Tugas Akhir ini.

Salawat serta Sallam tak henti-hentinya penulis sampaikan ke manusia paling Agung, **Qudwah Hassanah Rasulullah SAW**, yang telah mengajarkan hikmah kepada seluruh umat manusia, membawanya menuju alam yang penuh dengan cahaya ilmu.

Penelitian Tugas Akhir ini memiliki keterkaitan kerjasama antara **PT. Edwar Technology** selaku *Project Officer* dengan **PT. Citra Nusantara Gemilang** selaku *client* dalam proyek inspeksi tabung CNG (*Compressed Natural Gas*).

Pelaksanaan Tugas Akhir ini telah memberikan manfaat pengalaman, wawasan serta ilmu yang banyak bagi penulis sehingga secara langsung maupun tidak langsung telah memberikan andil dalam melatih kemampuan penulis di dalam suatu penelitian.

Dalam pelaksanaannya, penulis banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak baik dorongan moril maupun materil, sehingga perkenankan rasa terima kasih penulis haturkan pada kesempatan ini kepada:

- Kedua **Orang Tuaku** atas kasih sayang yang selama ini diberikan tanpa mengharapakan imbalan.
- Kedua Kakak-ku, **Alm. Mas Rheza Edwin** yang telah memberikan inspirasi yang sangat berarti dalam diriku untuk tetap menjalankan hidup ini dengan sebaik-baiknya serta **Mba Rhany (Rahany Ardy)** yang sangat sayang kepadaku.
- **Dr. Warsito** selaku dosen pembimbing sekaligus **Direktur CTech Lab. PT. Edwar Technology** yang telah memberikan kesempatan untuk melakukan Penelitian Tugas Akhir ini serta tim hardware yang telah membuat alat DAS *Ultrasonic-Testing*.
- **Dr. Sastra Kusuma Wijaya** selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan banyak waktu dan tenaga untuk menuntun saya menyelesaikan skripsi ini.

- **Prof. Dr. B.E.F da Silva** dan **Drs. Arief Sudarmadji, M.T.** selaku dosen penguji serta **Dr. Imam Fachrudin** sebagai Ketua Seminar Tugas Akhir.
- **Dr. Retno** dan **Dr. Budhy Kurniawan** yang telah banyak memberikan *support* dan pembelajaran berharga kepada saya selama ini.
- Teman-teman seperjuangan di **CTech Lab. Modernland, Tangerang**: **Kak Marlin** (pioneer peneliti UT-NDT SonaCTx), **Almushfi, Mukhlisin,** dan **Pamuji** (yang telah membantu kami selama berada di CTech Lab.), **Agus Supriatna** (seorang teman yang cukup memberikan banyak inspirasi dalam hidup), **Habib Syekh Al-Jufri (Abib), Sri Elsa Fatmi (Icha), Puspita Hudanyanti (Pus-pus),** dan juga **Mursilatun (Mba Silla).**
- Teman-teman mentoring **Pak Budhy** di Fisika: **Sahrulloh, Harry Al-Anshory** (teman yang istiqomah dalam beribadah), **Iyan Subiyanto, Harris Setyo** (teman yang jago membuat retorika indah), **Imam Nurhuda,** dan **Agus Sulisty (Sulis).**
- Teman-teman di **Lab. Fisika Teori**: **Andy Octavian Latief** (atas bantuannya untuk mengerjakan skripsi menggunakan LaTeX), **M. Khalid Nurdin** (teman yang baik untuk diajak bertukar pikiran), **Chrisna SN** (yang telah mendapatkan kesempatan berharga untuk melanjutkan studinya di ICTP Trieste, Italy), serta **Moch. Januar.**
- Teman-teman seperjuangan di **Instrumen**: **Nurrachmi Putri Utami** (akhwat yang bijaksana), **Rizky Mahmudah** (teman yang selalu membantu), **Nurmaliah (Lia), Andrew Alfajrin, Faizal Ferdian, Pradipita Ranggaseno (Aga), Dwi Handoko (Doko), Annisa Sarah (Momoi), Syahrial,** dan **Lidya.**
- Teman-teman karyawan **CTech Lab PT. Edwar Technology Modernland, Tangerang**: **Mas Rochmadi, Mas Yanto, Mas Ary,** dan **Chepy.**
- Serta semua pihak yang ikut membantu dalam penyelesaian skripsi ini baik secara langsung maupun tidak langsung.

Menyadari keterbatasan pengalaman dan kemampuan yang penulis miliki, sudah tentu terdapat kekurangan dalam penulisan skripsi ini serta kemungkinan jauh dari sempurna, untuk itu penulis tidak menutup diri dari segala saran dan kritik yang sifatnya membangun dari semua pihak. Akhir kata semoga **Allah Azza wa Jalla** membalas segala kebaikan semua pihak yang telah banyak membantu dan semoga hasil penelitian ini dapat berkontribusi bagi perkembangan dunia '**Uji Tak Merusak**' (NDT) di Indonesia. Amin...

Depok, September 2010

Halaman Pernyataan Persetujuan Publikasi Tugas Akhir untuk Kepentingan Akademis

Sebagai civitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Rhyan Edwin
NPM : 0606068612
Program Studi : S1 Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Jenis Karya : Skripsi

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

ANALISIS SINYAL SISTEM UT-NDT SONACT-X UNTUK PENDETEKSIAN KERETAKAN TABUNG CNG

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 22 September 2010

yang menyatakan

(Rhyan Edwin)

Nama : Rhyan Edwin
NPM : 0606068612
Program Studi : S1 Fisika
Judul Skripsi : Analisis Sinyal Sistem UT-NDT SonaCTx
untuk Pendeteksian Keretakan Tabung CNG

Abstrak

Telah dilakukan simulasi dan eksperimen sistem ultrasonik yang dapat diaplikasikan untuk mendeteksi keretakan tabung CNG. Simulasi dilakukan dengan menggunakan software COMSOL Multiphysics v3.4 berbasis metode elemen-hingga. Sistem disimulasikan dengan mengirimkan gelombang pulsa ultrasonik 4 MHz *angle-beam* transduser 70° dari salah satu transduser yang kemudian diterima oleh transduser yang lain. Gelombang ultrasonik yang dipancarkan pada logam tabung akan mengalami efek atenuasi yang disebabkan oleh peristiwa refleksi dari adanya perbedaan impedansi akustik sehingga mampu mengurangi besarnya intensitas gelombang ultrasonik yang diterima. Analisis penelitian dilakukan dengan membandingkan intensitas sinyal gelombang ultrasonik antara simulasi dan data eksperimen yang diterima pada berbagai variasi kondisi keretakan.

Kata kunci: CNG, gelombang ultrasonik, impedansi akustik, transduser, keretakan.

Name : Rhyan Edwin
NPM : 0606068612
Study Program : S1 Physics
Title : Analyses of Signal UT-NDT System SonaCTx
for Detecting Cracks on CNG Tube

Abstract

Simulation and experiment have been carried out to characterize the propagation of ultrasonic wave in metal to detect metal fracture on inside surface of CNG tube. The simulation is using software COMSOL Multiphysics v3.4 based on finite element method. The system is simulated by transmitting waves generated by 4 MHz ultrasonic pulse-beam angle transducer with orientation angle of 70° through the metal wall, and subsequently received by another transducer. Ultrasonic waves transmitted through the metal wall will experience an attenuation effects which is caused by the absorption and wave reflection on a surface due to the difference in acoustic impedance. As a result ultrasonic waves with reduced intensity are received. Analyses of the result are done by comparing the intensity of ultrasonic wave signal from simulation and experiment received at various conditions of cracks.

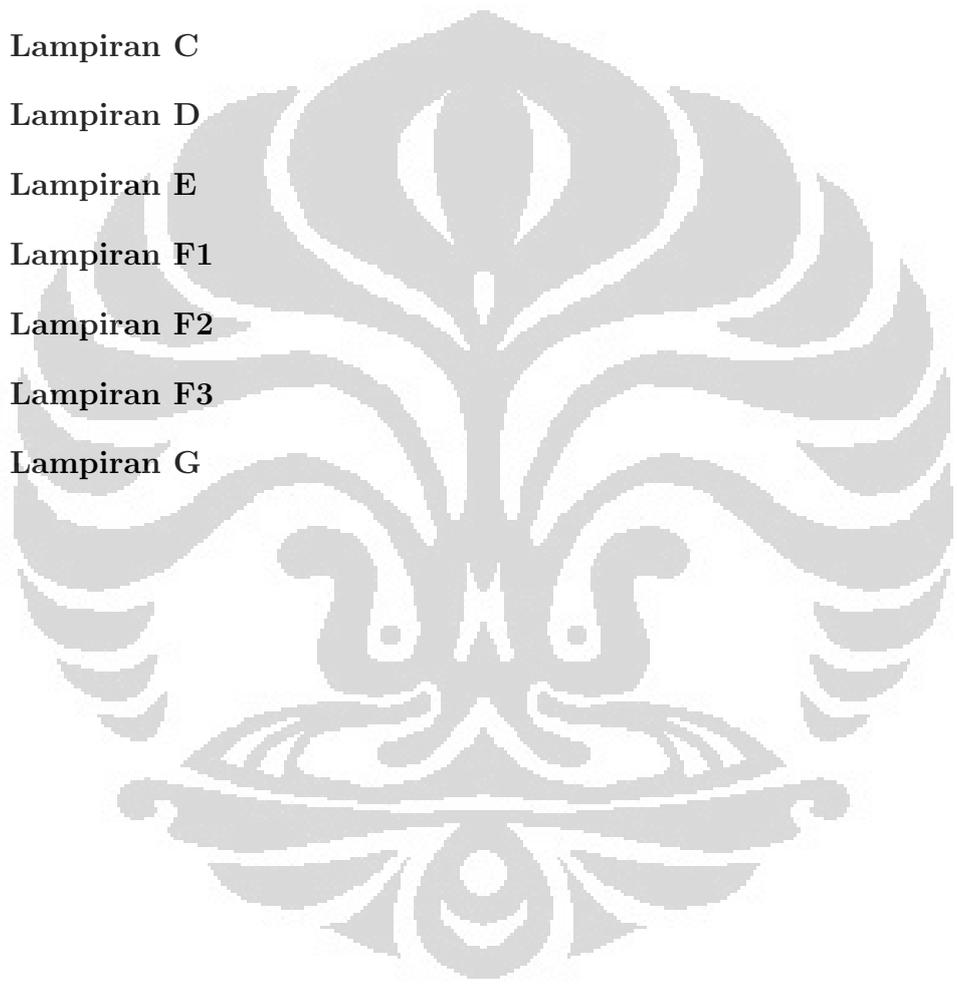
Keywords: CNG, ultrasound waves, acoustic impedance, transducer, cracks.

Daftar Isi

Halaman Pernyataan Orisinalitas	i
Halaman Pengesahan	ii
Mukadimmah	iii
Kata Mutiara	iv
Kata Pengantar	v
Halaman Pernyataan Persetujuan Publikasi	vii
Abstrak	viii
Daftar Isi	x
Daftar Gambar	xv
1 Pendahuluan	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian	4
1.4 Batasan Penelitian	4
1.5 Metode Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
1.6.1 Bab 1 Pendahuluan	4
1.6.2 Bab 2 Tinjauan Pustaka	5
1.6.3 Bab 3 Landasan Teori	5
1.6.4 Bab 4 Metodologi Penelitian	5
1.6.5 Bab 5 Hasil dan Pembahasan	5
1.6.6 Bab 6 Kesimpulan dan Saran	5
2 Tinjauan Pustaka	6
2.1 Prinsip Gelombang Ultrasonik	6
2.1.1 Gelombang Suara	7
2.1.2 Vibrasi Suara	7
2.1.3 Moda Vibrasi	8
2.1.4 Sifat Gelombang Suara	11

2.1.5	Sistem Desibel	17
2.2	Peralatan pada <i>Ultrasonic-Testing</i>	18
2.2.1	Transduser	20
2.2.2	Jenis Transduser	21
3	Landasan Teori	24
3.1	Persamaan Gelombang	24
3.2	Energi dan Intensitas	26
3.3	<i>Finite Element Method</i> (FEM)	28
3.3.1	Prinsip Dasar	28
3.3.2	Diskretisasi Menggunakan <i>Finite Element</i>	29
3.3.3	Langkah Dasar <i>Finite Element Analysis</i>	29
4	Metodologi Penelitian	32
4.1	Metode Simulasi <i>Ultrasonic-Testing</i>	32
4.1.1	Desain Sensor	32
4.1.2	Parameter Fisis	34
4.2	Metode Eksperimen <i>Ultrasonic-Testing</i>	39
4.2.1	Deskripsi Sistem	39
4.2.2	Prinsip Kerja	39
4.3	Sistem Otomatis Scanner SonaCTx 001	41
5	Hasil dan Pembahasan	44
5.1	Hasil dan Pembahasan Metode Simulasi 2D dan 3D	44
5.1.1	Hasil Pola Sinyal dan <i>Plot Solution</i>	44
5.1.2	Simulasi Pengukuran Intensitas Sinyal dengan Penambahan Kedalaman Retak Tabung	45
5.1.3	Simulasi Pengukuran Potensial Sinyal dengan Penambahan Lebar Retak Tabung	52
5.1.4	Simulasi Pengukuran Potensial Sinyal dengan Perubahan Posisi Retak Tabung	54
5.1.5	Simulasi Pengukuran Potensial Sinyal dengan Perubahan Sudut Retak	57
5.2	Hasil dan Pembahasan Metode Eksperimen	57
5.2.1	Pola Sinyal Hasil Eksperimen (Display Oscilloscope Tektronix TDS 2014B)	57
5.2.2	Eksperimen Pengukuran Intensitas Sinyal dengan Penambahan Kedalaman Retak Tabung (Posisi Keretakan di Tengah Antara <i>Transmitter</i> dan <i>Receiver</i>)	58
5.2.3	Eksperimen Pengukuran Intensitas Sinyal dengan Penambahan Kedalaman Retak Tabung (Posisi Keretakan 1 cm dari Tepi <i>Transmitter</i>)	58
5.2.4	Eksperimen Pengukuran Intensitas Sinyal dengan Penambahan Kedalaman Retak dari 2 Buah Keretakan yang Sejajar	62
5.3	Hasil <i>Image Scanning</i> Rekonstruksi Permukaan Dalam Tabung CNG	63

6 Kesimpulan dan Saran	65
6.1 Kesimpulan	65
6.2 Saran	65
Daftar Referensi	67
Lampiran A	68
Lampiran B1	70
Lampiran B2	71
Lampiran C	72
Lampiran D	73
Lampiran E	74
Lampiran F1	78
Lampiran F2	79
Lampiran F3	80
Lampiran G	81



Daftar Gambar

2.1	Pembagian Frekuensi Suara Berdasarkan Indera Pendengaran Manusia	7
2.2	Compression Waves dimana Terdapat Peregangan dan Perapatan	9
2.3	Shear Waves atau Gelombang Transversal	9
2.4	Lamb Waves (a) Asimetrik dan (b) Simetrik	10
2.5	Rayleigh Waves atau Gelombang Permukaan	10
2.6	Refraksi Gelombang	14
2.7	Hukum Snellius: dimana Sudut Datang i° sama dengan Sudut Pantul r° , sedangkan Perbandingan Sudut Datang i° dengan Sudut Refraksi R° Sesuai dengan Perbandingan Kecepatan Gelombang di Masing-Masing Medium	15
2.8	Perbandingan Sudut Datang i° (Compression Waves) dengan Sudut Refleksi r° (Compression Waves Reflected) dan Sudut Refleksi s° (Shear Waves Mode Conversion) dan dari Baja Menuju Udara	15
2.9	Amplitudo Relatif Gelombang P (Compression Waves) dan Gelombang S (Shear Waves) vs Besar Sudut Datang θ (Referensi gambar: <i>Handbook of Nondestructive Evaluation</i> , New York: McGraw-Hill Companies Inc, 2003.)	16
2.10	Grafik Amplitudo di 2 Zona (Zona Dekat dan Zona Jauh)	18
2.11	Zona Dekat (Near Field) dan Zona Jauh (Far Field) pada Pemanaran Gelombang (Referensi gambar: <i>Handbook of Nondestructive Evaluation</i> , New York: McGraw-Hill Companies Inc, 2003.)	19
2.12	Komponen Dalam Transduser	21
2.13	Perbandingan Fase Elemen Aktif dengan Matching Layer	22
2.14	Angle Beam Transducer	23
2.15	Path of Angle Beam Transducer	23
3.1	Pergeseran Gelombang	25
3.2	Elemen Titik dengan 1 Derajat Kebebasan	29
3.3	Pola Mesh di 2D	30
3.4	Pola Mesh di 3D	31
4.1	Langkah Simulasi Sistem Ultrasonic-Testing	33
4.2	Bentuk 2D Sistem pada Ultrasonic-Testing	33
4.3	Bentuk 3D Sistem pada Ultrasonic-Testing	34
4.4	Deklarasi Constants	35
4.5	Parameter Subdomain	36
4.6	Boundary Condition	37

4.7	Parameter Mesh	38
4.8	Time-dependent Solver	38
4.9	Diagram Skematik Ultrasonic-Testing	39
4.10	SonaCTx 001 DAS PT. Edwar Technology	39
4.11	Regulated DC Power Supply PT. Edwar Technology	40
4.12	Oscilloscope Tektronix TDS 2014B	40
4.13	Transduser Ultrasonik TO19967 dan TO19966 4 MHz Sonatest	40
4.14	Spesimen Tabung CNG	41
4.15	(a). Sistem Scanner SonaCTx 001 yang terdiri dari: 1. Pulse Generator DAS SonaCTx 001; 2. Head Transducer; 3. Computer System serta (b). Hasil Rekonstruksi Gambar 3D Tabung CNG	42
4.16	Automatic Scanning Gantry System	43
5.1	Pola Sinyal pada Bagian Transmitter	46
5.2	Pola Sinyal pada Bagian Receiver	46
5.3	Plot Solution Simulasi 2D pada Time $1.24e-5$ s	47
5.4	Plot Solution Simulasi 3D pada Time $1.3e-5$ s	47
5.5	Time Series Simulasi 2D: (a). Time= $1e-6$ s; (b). Time= $2e-6$ s; (c). Time= $3e-6$ s; (d). Time= $4e-6$ s; (e). Time= $5e-6$ s;	48
5.6	Time Series Simulasi 2D: (f). Time= $6e-6$ s; (g). Time= $7e-6$ s; (h). Time= $8e-6$ s; (i). Time= $9e-6$ s; (j). Time= $10e-6$ s;	49
5.7	Time Series Simulasi 3D: (a). Time= $1e-6$ s; (b). Time= $2e-6$ s; (c). Time= $3e-6$ s; (d). Time= $4e-6$ s; (e). Time= $5e-6$ s;	50
5.8	Time Series Simulasi 3D: (f). Time= $6e-6$ s; (g). Time= $7e-6$ s; (h). Time= $8e-6$ s; (i). Time= $9e-6$ s; (j). Time= $10e-6$ s;	51
5.9	Grafik Intensitas Relatif Sinyal dengan Penambahan Kedalaman 1 Buah Retak (2D)	53
5.10	Grafik Intensitas Relatif Sinyal dengan Penambahan Kedalaman 1 Buah Retak (3D)	53
5.11	Grafik Intensitas Relatif Sinyal dengan Penambahan Kedalaman Retak Hingga 2 mm (2D)	53
5.12	Grafik Intensitas Relatif Sinyal dengan Penambahan Kedalaman Retak Hingga 2 mm (3D)	54
5.13	Grafik Potensial Penambahan Lebar Retak dengan Kedalaman Retak Konstan (2D)	55
5.14	Grafik Potensial Penambahan Lebar Retak dengan Kedalaman Retak Konstan (3D)	55
5.15	Grafik Potensial Perubahan Posisi Retak terhadap Tepi Transmitter (2D)	55
5.16	Grafik Potensial Perubahan Posisi Retak terhadap Tepi Transmitter (3D)	56
5.17	Grafik Potensial Perubahan Sudut Retak dengan Kedalaman Retak Konstan (2D)	56
5.18	Grafik Potensial Perubahan Sudut Retak dengan Kedalaman Retak Konstan (3D)	56
5.19	Pola Sinyal pada Transmitter	59

5.20	Pola Sinyal pada Receiver dengan Kedalaman Retak ± 1 mm . . .	59
5.21	Pola Sinyal pada Receiver dengan Kedalaman Retak ± 1.5 mm . . .	59
5.22	Grafik Intensitas Relatif Hasil Eksperimen dengan Kedalaman Retak Hingga ± 1.7 mm	60
5.23	Grafik Intensitas Relatif dengan Kedalaman Retak Hingga ± 1.7 mm ((a). Merah untuk Simulasi dan (b). Hijau untuk Eksperimen (c). Biru untuk Data [4])	60
5.24	Grafik Intensitas Relatif Hasil Eksperimen dengan Kedalaman Retak Hingga ± 1.4 mm pada Posisi 1 cm dari Tepi Transmitter . . .	61
5.25	Grafik Intensitas Relatif dengan Kedalaman Retak Hingga ± 1.5 mm di Posisi 1 cm dari Tepi Transmitter ((a). Merah untuk Simulasi dan (b). Hijau untuk Eksperimen)	61
5.26	Grafik Intensitas Relatif Hasil Eksperimen Kedalaman Retak Hingga ± 1.3 mm dengan Dua Buah Keretakan	62
5.27	Grafik Intensitas Relatif Kedalaman Retak Hingga ± 1.4 mm dengan Dua Buah Keretakan((a). Merah untuk Simulasi dan (b). Hijau untuk Eksperimen)	63
5.28	Gambar Rekonstruksi Permukaan Sisi Dalam Tabung 2D dan 3D	64



Bab 1

Pendahuluan

Bab ini akan menjelaskan suatu kasus yang akan menjadi alasan dilakukannya penelitian ini, yang akan diuraikan pada Latar Belakang. Atas dasar masalah yang telah dikemukakan dan dirumuskan, maka diajukan suatu bentuk penelitian yang akan dilakukan dengan memiliki tujuan dan manfaat tertentu. Kemudian agar penelitian tidak jauh menyimpang, maka dibatasi dengan beberapa batasan pada Batasan Penelitian. Sistematika penulisan penelitian ini pun diajukan pada bab ini.

1.1 Latar Belakang

Semakin tingginya tingkat pencemaran udara serta semakin mahalnya harga bahan bakar minyak (BBM) membuat sebagian orang melirik bahan bakar alternatif, yang salah satunya adalah bahan bakar gas jenis CNG (*compressed natural gas*) atau gas alam terkompresi.

Sesungguhnya bahan bakar gas (BBG) bukanlah komoditas baru di negara ini. Pencanangan untuk menggunakan BBG yang harganya lebih murah serta lebih ramah lingkungan sudah dilakukan sejak tahun 1986. Pada saat itu ditetapkan bahwa 20% dari armada taksi harus memakai CNG. Namun, karena pada saat itu harga BBM masih dianggap cukup terjangkau dan stasiun pengisian BBM terdapat dimana-mana, maka minat untuk menggunakan BBG tidak sempat membesar.

Di Jakarta, pengguna BBG umumnya didominasi oleh taksi. Di luar itu masih ada sejumlah mobil pribadi dan bajaj baru serta Bus Transjakarta. Padahal di luar negeri, antara lain Thailand, India, dan Australia, penggunaan CNG sudah meluas.

Keberadaan stasiun pengisian BBG (SPBG) tidak banyak, selain pengguna BBG memang belum banyak, juga karena kehadiran SPBG harus mengikuti jaringan pipa gas milik PT Perusahaan Gas Negara yang terbatas. CNG tidak dapat disalurkan melalui jaringan pipa karena CNG memiliki tekanan operasi yang cukup tinggi sedangkan jaringan pipa gas hanya mampu menahan tekanan rendah.

CNG berbeda dengan LPG (*liquefied petroleum gas*) dan LNG (*liquefied natural gas*) yang bisa ditransportasikan. Namun, karena harga CNG jauh lebih

murah daripada LPG dan LNG, maka CNG-lah yang dipilih sebagai BBG alternatif.

Saat ini di Jakarta hanya terdapat 14 SPBG, tetapi yang berfungsi tak lebih dari enam SPBG. Untuk mendorong penggunaan CNG, Gubernur DKI Jakarta pada priode sebelumnya, Sutiyoso mengharuskan Bus Transjakarta yang melayani rute 2, rute 3, dan rute selanjutnya untuk menggunakan CNG. Dan, Presiden Susilo Bambang Yudhoyono, 21 Mei 2006, saat mencanangkan pemasyarakatan BBG pada kendaraan bermotor di SPBG Bus Transjakarta di Jalan Perintis Kemerdekaan, Jakarta Timur, mengemukakan bahwa pemerintah segera mempercepat pembangunan stasiun pengisian CNG dan infrastruktur lainnya untuk mengganti penggunaan BBM dengan BBG [1].

CNG (*senji-red*) yang merupakan produk turunan gas alam; sudah saatnya untuk dimanfaatkan dengan sebaik-baiknya sebagai pengganti BBM. Saat ini konsumsi BBM di Indonesia, sejumlah 48% atau sekitar 26,24 juta liter digunakan untuk transportasi, sedangkan sisanya 52% digunakan untuk industri, militer, rumah tangga, konversi ke tenaga listrik, dll.

Dari total konsumsi BBM untuk transportasi ternyata sejumlah 88% digunakan untuk transportasi jalan, diikuti dengan transportasi laut 7%, transportasi udara 4% dan selanjutnya transportasi kereta api dan SDP (sungai & Penyebrangan) sebesar 1%. Perlu diketahui bahwa untuk memenuhi kebutuhan beberapa jenis BBM (golongan *Refined Petroleum*), ternyata Indonesia sudah menjadi net importir.

CNG terbuat dari gas alam yang diekstrak, dimurnikan, dan dikompresi; merupakan alternatif bahan bakar selain bensin dan solar yang lebih ramah lingkungan serta relatif lebih murah. Bahan bakar ini dianggap lebih 'bersih' bila dibandingkan dengan dua bahan bakar minyak karena emisi gas buangnya yang ramah lingkungan. Di Indonesia, CNG disebut juga sebagai Bahan Bakar Gas (BBG); dan pernah melonjak penggunaannya untuk kendaraan antara tahun 1998-2000, kemungkinan karena penggunaan pada kendaraan taksi di Jakarta. Komposisi CNG didominasi oleh etana (C_2H_6) dan metana (CH_4); persentase gas metana (CH_4) dapat mencapai 95% dengan nilai oktan mencapai 120 [2]. CNG biasanya disimpan dalam tabung bejana bertekanan sekitar 200 bar (*high compression*). Tabung gas yang digunakan pada kendaraan berstandarkan pada ISO 11439 dan ISO 9809-1 berbahan material *steel*, komposisi antara karbon dan mangan serta memiliki tekanan operasi 250 bar.

Sayangnya penggunaan bahan bakar gas selain memiliki sisi positif juga memiliki sisi negatif yang patut untuk dicermati. Selama masa pemakaian, tabung gas akan mengalami degradasi kualitas. Kebocoran tabung dapat mengakibatkan ledakan yang cukup hebat. Kebocoran dapat terjadi akibat kesalahan atau ketidaktahuan penggunaan serta pemeliharaan tabung gas atau pun diakibatkan oleh cacat bawaan tabung seperti korosi, keretakan, atau inklusi pada materialnya.

Bahan material tabung memiliki nilai keelastisitasan tertentu. Bahan tersebut akan mengalami proses peregangan dan pemampatan ketika diberi tekanan/gaya dan akan kembali ke bentuk semula bila tekanan/gayanya dihilangkan. Jika batas elastis bahan telah terlampaui, maka rasio besar tegangan dan regangan tidak akan bersifat linier, namun akan terjadi 'deformasi plastik' dimana ukuran

dimensi bahan tidak akan kembali ke kondisi semula bila gaya dihilangkan. Dan bila diberikan tekanan/gaya yang lebih besar lagi, bahan akhirnya akan patah atau retak. Posisi keretakan akan semakin terlokasi pada bagian bahan yang telah mengalami cacat, misalnya cacat sambungan pengelasan, inklusi benda asing nonlogam, ketidakhomogenan bahan yang diproduksi, karatan, dll. Batas kedalaman keretakan yang masih diperbolehkan pada tabung adalah dibawah 5% dari ketebalan tabung (ISO 11439). Demi keselamatan dan untuk menghindari efek akibat kecelakaan fatal yang akan terjadi, merupakan suatu hal yang penting untuk menguji serta memeriksa kondisi bahan tabung secara berkala.

Cukup banyak metode pengujian tak merusak (*non-destructive testing*) yang dapat digunakan untuk mendeteksi keretakan pada suatu bahan tanpa memasukkan alat ke dalamnya (*non-intrusive*) serta merusak medium tersebut (*non-invasive*). Salah satunya adalah Inspeksi Ultrasonik. Alasan dari penggunaan gelombang ultrasonik adalah karena karakteristiknya yang dapat memantulkan akibat adanya perbedaan impedansi akustik pada medium yang dirambatnya [3]. Keretakan yang timbul pada bahan tabung memiliki nilai impedansi akustik tertentu, sehingga akan mempengaruhi karakteristik sinyal gelombang akustik yang direfleksikan dari bahan tersebut. Gelombang mekanik ultrasonik yang dipancarkan pada logam tabung akan mengalami efek atenuasi yang disebabkan oleh peristiwa refleksi akibat adanya perbedaan impedansi akustik. Perbedaan impedansi akustik yang disebabkan oleh keretakan akan merefleksikan gelombang mekanik ultrasonik hingga mampu mengurangi intensitas gelombang ultrasonik yang diterima. Penggunaan energi ultrasonik dalam mengukur sifat elastis material, akan memberikan gambaran bagian medium secara melintang (*the view of the cross-section*) yang tidak dapat dilakukan oleh tipe energi lainnya. Pemetaan dari suatu diskontinuiti akan memberikan pola yang berbeda dengan memetakan koefisien penyerapan (*absorption*) dan hamburan (*scattering*).

Penggunaan sistem *Ultrasonic-Testing Non-Destructive Testing* (UT-NDT) pada pendeteksian keretakan yang biasa digunakan adalah dengan *single sensor transducer*, dimana *transmitter* dan *receiver* berada pada satu sensor yang bekerja secara bergantian. Namun demikian, sistem semacam ini akan sukar mendeteksi keretakan yang berukuran di bawah 1 mm dan bervariasi sudut orientasinya. Untuk itu dibuat suatu sistem UT-NDT dengan penggunaan *dual sensor transducer*. Sistem *dual transducer* ini akan memisahkan *transmitter* dan *receiver* pada sensor yang berbeda [4].

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah di atas maka dalam penelitian ini pokok permasalahannya adalah mencari hubungan antara gelombang ultrasonik yang direfleksikan permukaan dalam tabung dengan karakteristik fisis keretakan pada permukaan tabung tersebut baik secara simulasi maupun eksperimen.

1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan pengumpulan data statistik yang diperoleh dari UT-NDT Sistem SonaCTx serta melakukan analisis sinyal dengan menggunakan COMSOL Multiphysics v3.4 sehingga mengetahui karakteristik sinyal dari berbagai kondisi keretakan tabung CNG. Sedangkan manfaat penelitian ini adalah bahwa level tegangan yang didapatkan dapat digunakan sebagai basis kalibrasi sistem SonaCTx.

1.4 Batasan Penelitian

Berdasarkan pada Perumusan Masalah maka Batasan Penelitian dari penelitian Tugas Akhir ini adalah:

- Melakukan simulasi uji ultrasonik 2 dimensi (2D) dan 3 dimensi (3D) dengan COMSOL Multiphysics v3.4.
- Mengkarakterisasikan sinyal akustik dengan jenis parameter keretakan yang terdeteksi melalui model simulasi yang dibuat.
- Melakukan eksperimen pengambilan data sinyal yang akan dikorelasikan dengan hasil data simulasi.

1.5 Metode Penelitian

Di dalam penelitian ini akan dilakukan pengumpulan data statistik serta melakukan analisis sinyal yang diperoleh instrument UT-NDT Sistem SonaCTx produksi PT Edwar Technology yang digunakan dalam pendeteksian keretakan pada tabung CNG. Simulasi dilakukan dengan menggunakan software COMSOL Multiphysics v3.4 berbasis elemen-hingga (*finite-element*). Analisis penelitian dilakukan dengan membandingkan intensitas sinyal gelombang ultrasonik yang diterima sensor pada berbagai keadaan/kondisi yang berbeda yang dialami tabung CNG seperti keadaan tidak retak, retak dengan berbagai variasi kedalaman, retak dengan berbagai orientasi sudut serta posisi relatif transduser terhadap keretakan.

Untuk memanfaatkan sistem ini secara optimal maka dibutuhkan pemahaman secara komprehensif mengenai karakterisasi interaksi gelombang ultrasonik di dalam material tabung serta berbagai konsep yang dibutuhkan pada pemodelan menggunakan software COMSOL Multiphysics v3.4.

1.6 Sistematika Penulisan

1.6.1 Bab 1 Pendahuluan

Bab ini berisi tentang pemaparan dari Latar Belakang Masalah, Perumusan Masalah, Tujuan dan Manfaat Penelitian, Batasan Penelitian serta Sistematika Penulisan.

1.6.2 Bab 2 Tinjauan Pustaka

Bab ini berisi teori yang mendasari penelitian ini, yaitu Prinsip Gelombang Ultrasonik dan Peralatan pada Ultrasonic-testing.

1.6.3 Bab 3 Landasan Teori

Pada bab ini penulis menguraikan teori-teori dasar yang digunakan pada penulisan, simulasi, dan analisa dalam skripsi ini.

1.6.4 Bab 4 Metodologi Penelitian

Bab ini berisi tahapan-tahapan simulasi dan eksperimen untuk memperoleh hasil yang diinginkan dengan menggunakan program COMSOL Multiphysics v3.4.

1.6.5 Bab 5 Hasil dan Pembahasan

Simulasi dan eksperimen yang telah dilakukan memberikan hasil dan dijelaskan dalam bab ini, serta penjelasan mengenai hasil yang telah dicapai.

1.6.6 Bab 6 Kesimpulan dan Saran

Pokok-pokok utama dari bab sebelumnya akan diuraikan secara singkat pada bab ini. Selanjutnya mengenai segala ide yang belum terlaksanakan, kekurangan dan keterbatasan yang berkaitan dengan penelitian ini menjadi saran dan usulan untuk penelitian selanjutnya.

Bab 2

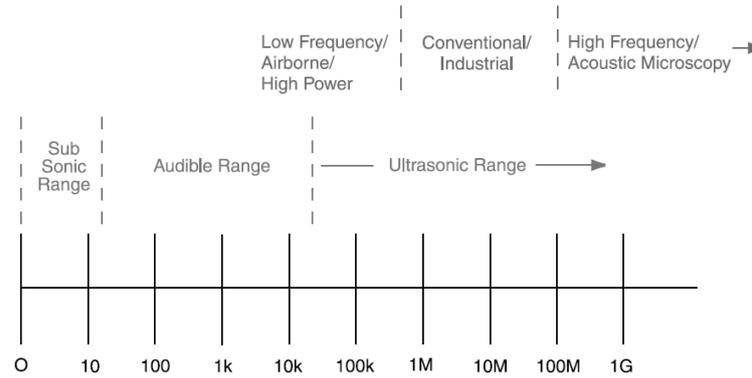
Tinjauan Pustaka

Penelitian yang berhubungan dengan penggunaan energi suara khususnya gelombang ultrasonik telah berlangsung lebih dari satu abad yang lalu dan terus mengalami perkembangan hingga saat ini. Langkah awal menuju pencapaian tersebut terjadi pada 1870-an dimana Lord Rayleigh's melakukan publikasi atas karyanya, "The Theory of Sound". Karya ini menjelaskan sifat dan karakteristik gelombang suara dalam zat padat, cair, dan gas, yang menyebabkan pengembangan teknik-teknik yang digunakan dalam pengujian tak merusak (*non-destructive testing*).

Sarana untuk menghasilkan dan mendeteksi gelombang suara pada frekuensi di atas frekuensi pendengaran normal didapat tak lama setelah penemuan efek piezoelektrik oleh Curie Bersaudara dan Lippmann. Pada tahun 1880, Curie Bersaudara menemukan bahwa potensial listrik dapat dihasilkan dengan menerapkan tekanan mekanik pada arah (sumbu potong) tertentu dari sejumlah kristal. Selanjutnya, Lippmann menemukan dan menyatakan hal yang sebenarnya terjadi adalah penerapan sinyal listrik struktur kristal tersebutlah yang menyebabkan distorsi mekanis. Bahan-bahan yang memiliki efek piezoelektrik ini, diantaranya adalah: kristal kuarsa, tourmaline, dan garam Rochelle. S.Y. Sokolov dari Rusia merupakan orang pertama yang memberikan pemahaman tentang penggunaan gelombang ultrasonik untuk mendeteksi keretakan pada logam. Pada tahun 1929, ia melakukan sejumlah eksperimen menggunakan gelombang ultrasonik pada lempengan logam. Sedangkan pada tahun 1935, ia memaparkan desain *piezo-electric transducer* untuk menghasilkan dan mendeteksi gelombang ultrasonik. Sekitar tahun 1942, teknik *pulse echo* ditemukan. Di Inggris, pengembangan ini dipelopori oleh D. O. Sproule, sedangkan di Amerika Serikat dipelopori oleh F. Firestone. Untuk memahami prinsip kerja sistem UT-NDT berbasis ultrasonik yang didesain baik pada simulasi maupun eksperimen, maka diperlukan pemahaman dari sifat serta karakteristik gelombang ultrasonik. Untuk itu pada bab kedua ini akan menguraikan konsep yang berkenaan dengan sistem tersebut [5].

2.1 Prinsip Gelombang Ultrasonik

Pada bagian ini akan dijelaskan konsep-konsep yang berhubungan dengan sifat-sifat penjalaran gelombang yang terjadi di dalam suatu medium elastik.



Gambar 2.1: Pembagian Frekuensi Suara Berdasarkan Indera Pendengaran Manusia

2.1.1 Gelombang Suara

Gelombang suara merupakan suatu getaran harmonik dari partikel di padatan, cair, dan gas. Sebagai bentuk energi mekanik, perambatan gelombang suara mengharuskan adanya 'sesuatu yang bergetar' (*something to vibrate*) sehingga gelombang suara tidak dapat terjadi di dalam vakum.

Indera pendengaran manusia dapat mendeteksi gelombang suara pada rentang frekuensi antara 20 Hz hingga 20,000 Hz yang disebut dengan '*the audible range*'. Hal ini menyebabkan frekuensi yang lebih rendah dan lebih tinggi dari frekuensi tersebut tidak dapat didengar oleh manusia. Daerah frekuensi kurang dari 20 Hz disebut dengan '*subsonic*' atau '*infrasonic*' sedangkan frekuensi di atas 20,000 Hz disebut dengan '*ultrasonic*'. Antara dua nilai frekuensi pada '*audible range*' umumnya digunakan istilah '*pitch*' yang berelasi dengan frekuensi; '*high-pitched*' menandakan *high audible frequency*, sedangkan '*low-pitched*' menunjukkan *low audible frequency*. Tuts piano pada '*middle C*' memiliki nilai frekuensi 260 Hz [6],[7].

2.1.2 Vibrasi Suara

Vibrasi atau getaran merupakan salah satu contoh gerakan periodik, suatu hal yang menunjukkan perubahan posisi suatu partikel dari kesetimbangan. Gelombang suara pada padatan, cair, dan gas; gerakan partikelnya dapat dianalogikan dengan sejumlah bola yang saling terikat satu sama lain yang dihubungkan dengan pegas. Jika salah satu bola bergerak menuju 'tetangganya', pegas akan menyebabkan terjadinya gaya pembalik '*restoring forces*' sehingga bola akan kembali ke posisinya semula.

Gelombang suara merupakan salah satu jenis moda vibrasi yang disebut dengan '*compression wave*'. Perambatan gelombang ini berasal dari 'partikel sumber' menuju ke 'partikel tetangga' di dekatnya. Setiap partikel bergetar pada frekuensi suara, berosilasi pada rentang tertentu yang disebut dengan amplitudo. Ketika partikel telah mencapai partikel terdekatnya, maka partikel terdekatnya pun akan melakukan hal yang sama, yaitu menuju ke partikel terdekatnya yang

lain. Hal tersebut terjadi secara berulang yang disebut dengan perambatan gelombang 'to propagate' melalui suatu medium. Penting untuk dipahami bahwa setiap partikel tidak berpindah ke tempat lain, namun hanya bergerak disekitar titik kesetimbangan.

2.1.3 Moda Vibrasi

Compression wave atau disebut dengan gelombang longitudinal dapat terjadi pada medium padat, cair, dan gas. Cara umum yang biasa digunakan untuk menjelaskan serta membedakan antar berbagai jenis gelombang adalah relasi antara arah pergerakan partikel dengan arah perambatan gelombangnya. Terdapat 4 jenis gelombang yang mungkin terjadi pada suatu padatan, yaitu: *compression waves* (gelombang longitudinal), *shear waves* (gelombang transversal), *Rayleigh waves* (gelombang permukaan) serta *lamb waves* (gelombang pada plat). Berikut ini merupakan penjelasan dari masing-masing gelombang:

Compression Waves

Compression waves atau biasa disebut dengan gelombang longitudinal merupakan jenis gelombang dimana pergerakan partikelnya memiliki arah yang sama dengan arah dari perambatan gelombangnya. Dalam *compression waves* dikenal dua kondisi, yaitu: merenggang dan merapat. Dipadatan, *compression waves* berelasi dengan suatu modulus elastisitas, yang dikenal dengan 'Modulus Young'.

Shear Waves

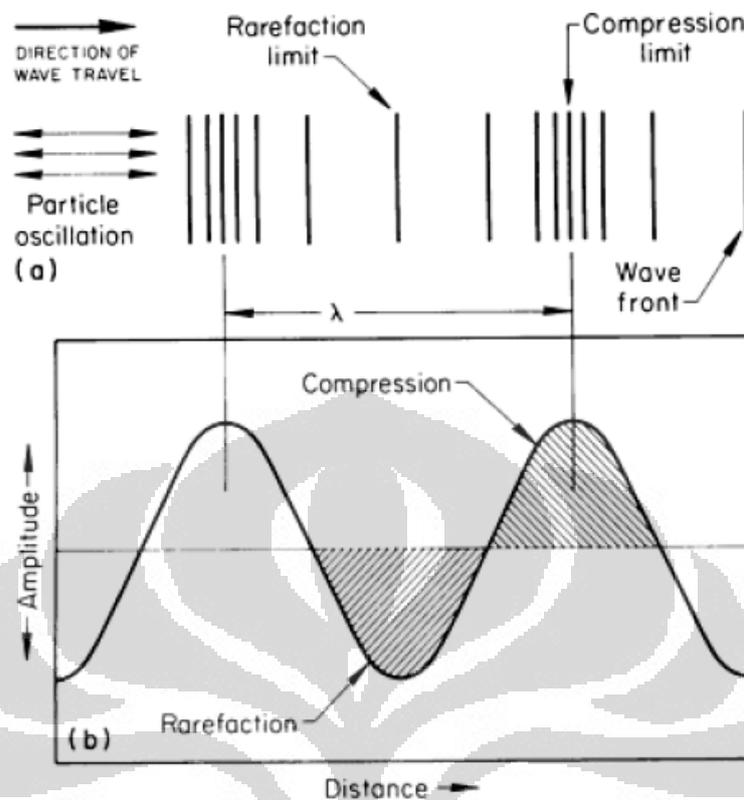
Shear waves atau biasa disebut dengan gelombang transversal merupakan jenis gelombang dimana pergerakan partikelnya tegak lurus dengan arah perambatan gelombangnya. Jika pada *compression waves* kita mengenal 'Modulus Young', maka pada *shear waves* dikenal dengan istilah 'Modulus of Rigidity'; suatu keadaan yang berhubungan dengan resistansi terhadap 'shear loads'.

Rayleigh Waves

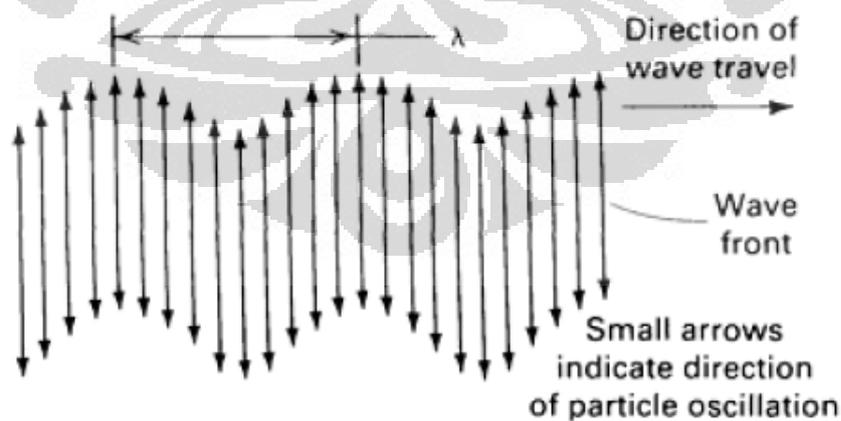
Rayleigh Waves atau *surface waves* (gelombang permukaan) merupakan jenis gelombang dimana partikel bergerak secara eliptik dan menjalar pada permukaan medium padatan. Kecepatan gelombang ini hampir sama dengan kecepatan *shear waves*, (sekitar 90% dari kecepatan *shear waves*) sedangkan kedalaman penetrasinya setara dengan satu panjang gelombang.

Lamb Waves

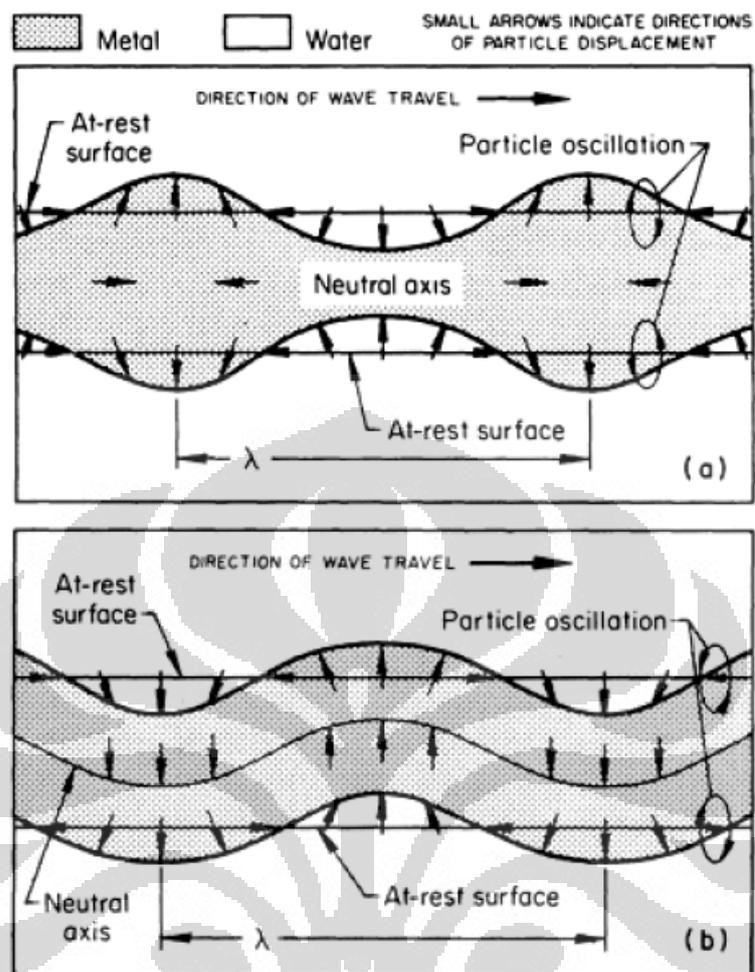
Lamb waves (gelombang plat) seperti gelombang permukaan, merambat secara tegak lurus di sepanjang permukaan. Gelombang ini akan terjadi dan terdeteksi bila ketebalan dari material/medium yang digunakan hanya berkisar beberapa panjang gelombang dari gelombang yang diberikan serta memiliki ketebalan yang (*uniform*).



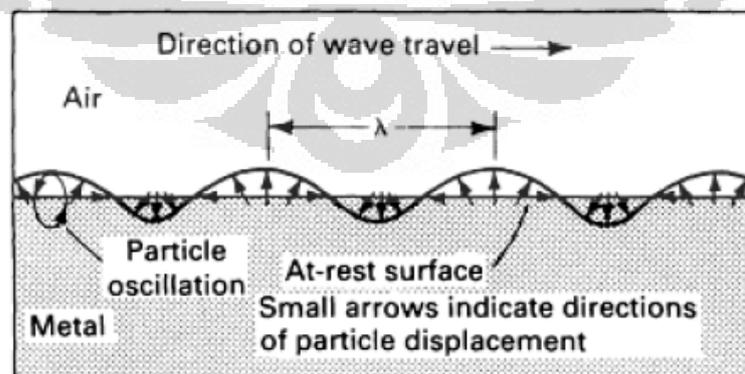
Gambar 2.2: Compression Waves dimana Terdapat Peregangan dan Perapatan
 (Referensi Gambar: *Nondestructive Evaluation and Quality Control*, ASMI Metals Handbook, 10th Edition, 1989.)



Gambar 2.3: Shear Waves atau Gelombang Transversal
 (Referensi Gambar: *Nondestructive Evaluation and Quality Control*, ASMI Metals Handbook, 10th Edition, 1989.)



Gambar 2.4: Lamb Waves (a) Asimetrik dan (b) Simetrik
 (Referensi Gambar: *Nondestructive Evaluation and Quality Control*, ASMI Metals Handbook, 10th Edition, 1989.)



Gambar 2.5: Rayleigh Waves atau Gelombang Permukaan
 (Referensi Gambar: *Nondestructive Evaluation and Quality Control*, ASMI Metals Handbook, 10th Edition, 1989.)

2.1.4 Sifat Gelombang Suara

Kecepatan

Gelombang suara akan bergerak dengan kecepatan berbeda pada medium yang berbeda. Bila kita mendekatkan telinga kita pada suatu pipa besi, maka pertama kita akan mendengar rambatan suara dari pipa besi ke telinga kita dan selanjutnya kita akan mendengar suara yang berasal dari hentakan udara di sekitar telinga kita. Begitu pula dengan gelombang ultrasonik, perambatannya pun akan berbeda bila terjadi di dua medium yang berbeda.

Dua hal utama yang mempengaruhi kecepatan rambat gelombang suara adalah densitas dan elastisitas medium. Densitas merupakan tingkat kerapatan atau banyaknya molekul berada di volume tertentu, sedangkan elastisitas berkaitan dengan ikatan yang terjadi antara molekul dalam suatu medium. Bila suatu medium memiliki densitas yang tinggi, maka setiap molekul akan 'mudah' mencapai molekul lainnya untuk mentransfer 'energi gelombang' yang dimilikinya; namun bila material tersebut memiliki elastisitas yang rendah, molekul tersebut akan membutuhkan waktu untuk mencapai 'tetangganya'.

Densitas dan elastisitas merupakan faktor dominan yang mempengaruhi kecepatan, namun terdapat faktor lain yang bersifat sekunder, yaitu '*Poisson ratio*'. *Poisson ratio* berhubungan dengan kemampuan perenggangan pada medium dan dapat dihitung sebagai nilai perbandingan antara perubahan diameter terhadap perubahan panjang suatu medium.

Shear waves dapat timbul pada zat padat, namun dengan kecepatan yang berbeda dengan kecepatan *compression waves* pada medium yang sama. Karena *Modulus of Rigidity* bernilai lebih kecil daripada *Modulus Young*, maka kecepatan *shear waves* lebih rendah dari kecepatan *compression waves*.

Panjang Gelombang

Setiap gelombang memiliki karakteristik dan dibedakan satu sama lain dari panjang gelombangnya. Panjang gelombang merupakan nilai dari sebuah gelombang untuk menempuh satu siklusnya. Pada *shear waves*, panjang gelombang dicapai setelah terjadi sebuah *peak* (puncak) dan *valley* (lembah), sedangkan pada *compression waves* satu panjang gelombang didapat oleh keadaan merenggang dan merapat. Panjang gelombang memiliki simbol λ dan merupakan hasil bagi antara cepat rambat gelombang di medium dengan frekuensinya.

Konsep panjang gelombang sangat berguna dalam *ultrasonic-testing*. Salah satunya adalah nilai keretakan yang dapat dideteksi setidaknya memiliki dimensi setengah dari panjang gelombang yang menjalar di medium tersebut. Selain itu, panjang gelombang juga berguna untuk menentukan bentuk gelombang dan jarak zona dekatnya (*near field*).

Refleksi

Antara dua medium yang berbeda terdapat batas yang disebut '*interface*'. Pada *interface*, gelombang suara mengalami dua proporsi keadaan, yaitu ditransmisikan ke medium selanjutnya dan direfleksikan ke medium awal. Pada kasus

medium logam dan udara, hampir sebagian besar energi direfleksikan ke logam dan hanya sebagian yang ditransmisikan ke udara. Pada teknik ultrasonik, *couplant* yang biasa digunakan adalah air; hanya sekitar 12% energi yang sampai ke logam dan sisanya akan kembali ke sumbernya. Besarnya nilai gelombang yang direfleksikan dan ditransmisikan bergantung dari jenis medium di permukaannya.

Dua perbedaan mendasar antara air dan baja adalah densitas dan elastisitasnya. Kedua faktor ini menentukan seberapa besar energi yang direfleksikan dan ditransmisikan. Dari kedua faktor inilah, kemudian dicetuskan konsep baru yang disebut dengan 'impedansi akustik' (*acoustic impedance*) dengan simbol Z yang berguna untuk menentukan nilai refleksi gelombang sebuah permukaan. Impedansi akustik merupakan hasil kali antara densitas dan kecepatan rambat gelombang di medium.

Couplant

Bila sebuah transduser hanya ditempelkan saja pada medium yang akan dilakukan uji coba, maka sebagian besar gelombang yang berasal dari transduser akan direfleksikan kembali. Hal ini terjadi karena adanya celah udara (*air gap*) antara dua permukaan tersebut walaupun sangat kecil. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, maka dalam *ultrasonic-testing* dibutuhkan suatu medium lain yang bersifat elastik dan berguna untuk menghubungkan (*to couple*) antara transduser dengan medium yang akan diuji coba. Medium tersebut umumnya disebut dengan "*couplant*". Biasanya *couplant* hanya dapat menstransmisikan energi antara 10% s/d 15%. Berikut merupakan contoh *couplant* yang sering digunakan:

- Air
- Minyak kelapa
- Kerosin (minyak tanah)
- Gemuk pelumas
- Gliserin

Refraksi

Pada bagian sebelumnya kita hanya membahas gelombang yang menuju medium secara tegak lurus; namun umumnya dalam sistem *ultrasonic-testing*, sebuah transduser akan memancarkan gelombang yang memiliki sudut, '*angle of incidence*'. Hal ini berkaitan dengan konsep Hukum Snellius. Sebagai permulaan kita asumsikan bahwa gelombang yang dipancarkan transduser akan melewati dua medium yang berbeda. Medium 1 adalah air (dengan kecepatan rambat gelombang v_1) dan medium 2 adalah baja (dengan kecepatan rambat gelombang v_2). Perlu diperhatikan bahwa medium air merupakan *couplant* yang digunakan. Pada gambar (2.6) terlihat bahwa gelombang dari sumber memiliki sudut datang i° . Gelombang yang berasal dari sumber bergerak dengan kecepatan yang sama

sampai suatu saat bagian kiri dari berkas gelombang sampai ke permukaan medium 1 untuk pertama kali. Seketika itu juga, gelombang akan mengalami penambahan kecepatan karena cepat rambat di medium ini lebih tinggi dari cepat rambat pada transduser. Namun karena bagian kanan berkas gelombang masih berada pada transduser dengan kecepatan yang masih tetap, maka gelombang akan mengalami pembelokan (dianalogikan seperti dua roda depan mobil yang mengalami percepatan pada salah satu rodanya, sehingga mobil secara simultan akan berbelok); sampai pada saatnya bagian kanan dari berkas gelombang sampai ke medium 1. Dan bila hal tersebut telah terjadi, maka berkas kiri dan kanan akan bergerak dengan kecepatan yang sama. Hal ini akan terulang kembali ketika berkas gelombang yang berada pada medium 1 sampai ke medium 2, sehingga secara keseluruhan akan terjadi keadaan pembelokan/refraksi sebanyak 2 kali. Berikut merupakan Hukum Snellius yang menunjukkan hubungan antara gelombang datang dengan gelombang refraksi:

$$\frac{\sin i^\circ}{V_1} = \frac{\sin R^\circ}{V_2}$$

dimana,

$\sin i^\circ =$ Sinus sudut datang

$\sin R^\circ =$ Sinus sudut refraksi

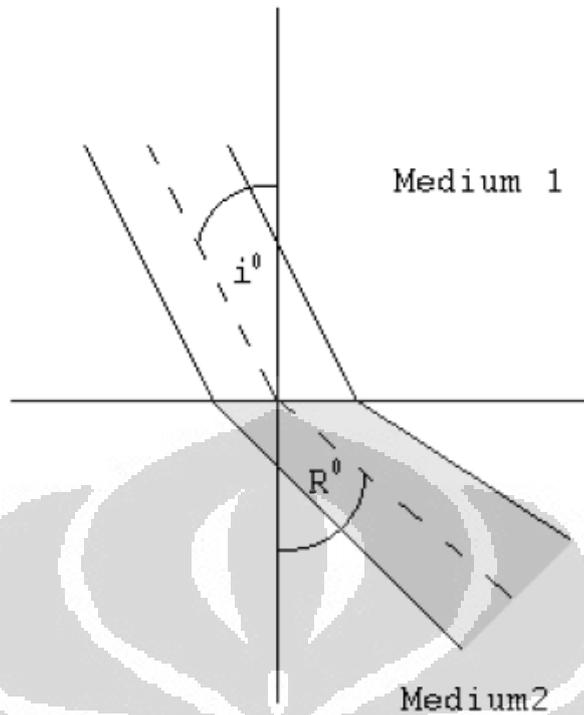
$V_1 =$ Kecepatan gelombang di medium 1

$V_2 =$ Kecepatan gelombang di medium 2

Konversi Moda

Konversi moda (*mode conversion*), merupakan fenomena yang terjadi ketika gelombang suara dengan sudut tertentu masuk ke dalam medium padatan. Dengan adanya konversi moda, gelombang longitudinal (*compression waves*) yang datang akan memicu timbulnya gelombang baru, yaitu gelombang transversal (*shear waves*), sehingga nantinya kedua gelombang ini eksis merambat di medium padatan tersebut. Pada sudut datang yang kecil, amplitudo dari gelombang transversal sangat kecil dan dapat diabaikan, namun dengan semakin besarnya sudut, maka amplitudonya pun akan semakin besar sampai suatu ketika antara gelombang transversal dan longitudinal memiliki intensitas yang sama. Hukum Snellius menjelaskan bahwa dua moda gelombang tersebut tidak terefraksi dengan sudut yang sama karena kecepatan gelombang transversal (gelombang-S) lebih rendah dari gelombang longitudinal (gelombang-P).

Dalam *ultrasonic-testing*, adanya konversi moda menimbulkan permasalahan baru; eksisnya dua jenis gelombang di medium padatan yang menjadi objek percobaan. Namun permasalahan ini akhirnya teratasi oleh Sproule pada tahun 1947, dimana ia melakukan pembesaran sudut datang sampai akhirnya gelombang longitudinal-nya terefraksi hingga 90° . Dengan ini, gelombang yang tersisa hanya gelombang transversal. Sudut datang yang menjadikan *compression waves* terefraksi hingga 90° disebut dengan 'sudut kritis pertama'. Pada permukaan air-baja, sudut kritis pertamanya sekitar 15° . Di atas sudut kritis pertama,



Gambar 2.6: Refraksi Gelombang

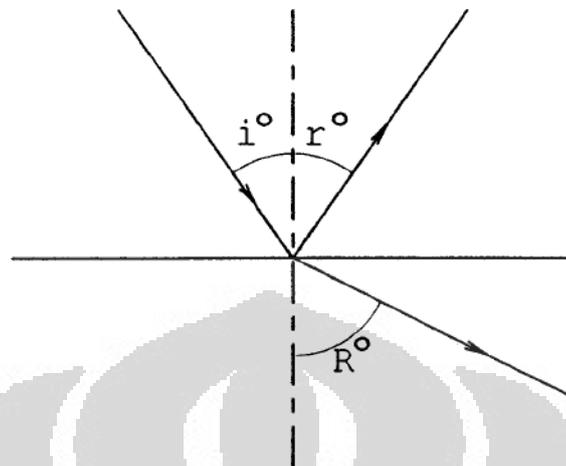
hanya *shear waves* yang eksis. Pada *immersion-testing*, umumnya transduser telah memperhitungkan sudut kritis ini.

Bila sudut datang terus mengalami pembesaran, maka dapat mengakibatkan *shear waves* mengalami refraksi sebesar 90° pula. Hal inilah yang disebut dengan 'sudut kritis kedua'. Pada sudut kritis kedua, *shear waves* akan mengalami konversi moda lainnya yaitu menjadi gelombang permukaan (*Rayleigh waves*). Pada permukaan air-baja, sudut kritis kedua sekitar 27° .

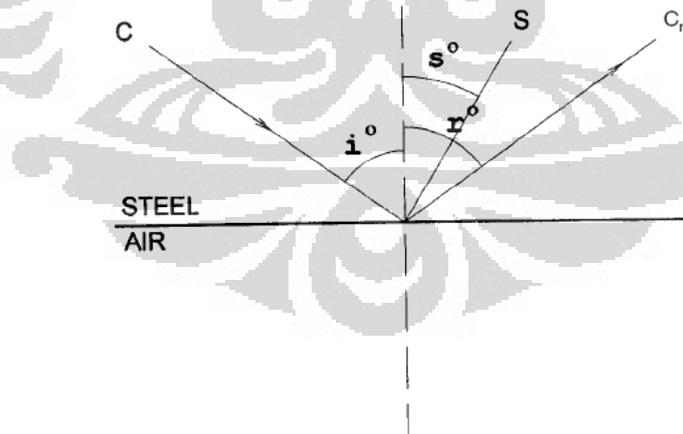
Konversi Moda Reflektif

Konversi moda dapat pula terjadi di padatan ketika gelombang ultrasonik menghantam reflektor pada sudut tertentu. Gambar (2.8) menunjukkan sebuah *compression waves* C dari baja menuju udara dengan sudut datang i° terhadap garis normal. Efek ini menghasilkan *compression waves* yang terefleksi C_r dengan sudut refleksi r° serta *shear waves* S dengan sudut refleksi s° .

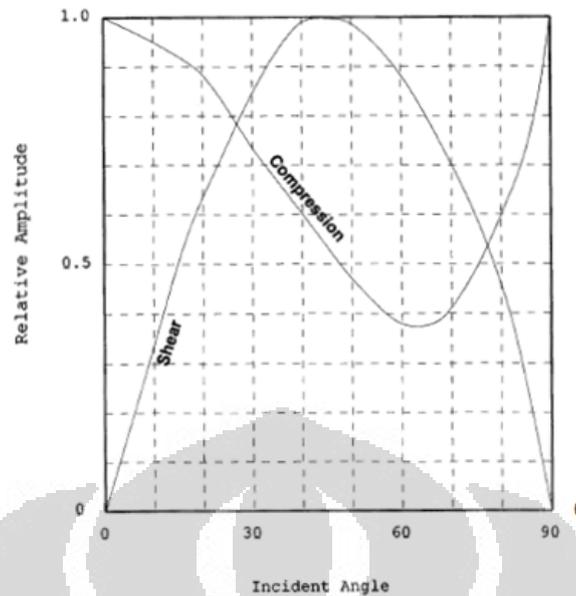
Gambar (2.9) menunjukkan amplitudo relatif dari *compression waves* terefleksi dan moda konversi *shear waves* seiring peningkatan nilai sudut datang. Pada gambar terlihat ketika sudut kecil, *shear waves* sangat lemah dan dapat diabaikan. Pada sudut 25° , *compression waves* dan *shear waves* memiliki amplitudo yang sama. Sedangkan pada sudut 70° , *compression waves* menjadi lemah, sedangkan *shear waves* menjadi kuat.



Gambar 2.7: Hukum Snellius: dimana Sudut Datang i° sama dengan Sudut Pantul r° , sedangkan Perbandingan Sudut Datang i° dengan Sudut Refraksi R° Sesuai dengan Perbandingan Kecepatan Gelombang di Masing-Masing Medium



Gambar 2.8: Perbandingan Sudut Datang i° (Compression Waves) dengan Sudut Refleksi r° (Compression Waves Reflected) dan Sudut Refleksi s° (Shear Waves Mode Conversion) dan dari Baja Menuju Udara



Gambar 2.9: Amplitudo Relatif Gelombang P (Compression Waves) dan Gelombang S (Shear Waves) vs Besar Sudut Datang θ (Referensi gambar: *Handbook of Nondestructive Evaluation*, New York: McGraw-Hill Companies Inc, 2003.)

Karakteristik Berkas Gelombang

Apa yang telah dibahas sebelumnya seakan menunjukkan bahwa gelombang yang merambat pada medium merupakan satu buah gelombang, namun pada kenyataannya gelombang suara tersebut terdiri atas beberapa gelombang yang dinamakan 'berkas gelombang'. Dalam berkas gelombang, intensitas atau amplitudo bervariasi. Sebagai ilustrasi, berkas gelombang dibagi ke dalam 2 zona, yaitu zona dekat (*near field*) dan zona jauh (*far field*). Pada dua daerah ini, berkas gelombang mengalami dua sifat mekanis yang berbeda. Sifat mekanis yang menunjukkan keadaan pengurangan/kehilangan energi disebut dengan 'atenuasi' (*attenuation*). Atenuasi merupakan efek kombinasi dari beberapa keadaan yaitu:

1. **Interferensi dan Difraksi.** Huygens mengembangkan sebuah konsep untuk menggambarkan perambatan energi dari sebuah sumber. Perambatan energi dapat diibaratkan seperti sebuah batu yang dilempar ke air dimana timbul riak gelombang mengalami perambatan yang menjauh dari sumber. Bila gelombang tersebut merupakan berkas yang terdiri dari beberapa sumber, maka terjadilah yang disebut dengan interferensi dan difraksi. Interferensi merupakan penggabungan antara dua buah gelombang atau lebih yang menghasilkan gelombang dengan frekuensi tersendiri. Sedangkan difraksi merupakan pembelokan gelombang yang dalam hal ini terjadi akibat kedatangan gelombang lain dari arah yang berbeda.
2. **Absorpsi.** Ketika berkas gelombang menjalar pada suatu medium, sangat dimungkinkan untuk terjadinya absorpsi atau penyerapan. Hal ini dikare-

nakan molekul/atom dalam medium memiliki tingkat energi tertentu dan dapat mengkonversi energi yang dimiliki gelombang menjadi energi lainnya seperti untuk mengeksitasi elektron maupun untuk menambah energi vibrasi (panas) dari molekul/atom tersebut.

3. **Hamburan.** Ketika berkas gelombang menuju ke sebuah permukaan yang tidak rata, maka gelombang-gelombang tersebut direfleksikan dengan arah yang berbeda-beda. Keadaan inilah yang disebut dengan hamburan; yang mengakibatkan jumlah gelombang yang sampai ke daerah yang akan kita ukur menjadi berkurang.
4. **Pelebaran Berkas.** Pada zona dekat (*near field*), berkas gelombang berbentuk silinder yang berdiameter sama seperti diameter sumbernya. Namun ketika telah melampaui zona dekat, maka berkas gelombang akan mengalami pelebaran. Daerah inilah yang disebut dengan zona jauh (*far field*).

Gambar (2.10) menunjukkan amplitudo gelombang mengalami dua keadaan yang berbeda di dua zona yang berbeda. Pada zona dekat, amplitudo gelombang mengalami fluktuasi karena adanya efek interferensi. Amplitudo maksimum akan terjadi pada batas antara zona dekat dan zona jauh. Garis tersebut dikenal dengan Y_0 . Sedangkan pada zona jauh, amplitudo dari berkas gelombang mengalami penurunan secara eksponensial seiring dengan penambahan jarak dari sumber. Keadaan tersebut berimplikasi terhadap konsep pengukuran intensitas pada *ultrasonic-testing*; yaitu sangat tidak dimungkinkan untuk mengukur intensitas gelombang pada zona dekat akibat fluktuasi yang terjadi. Namun yang harus dilakukan adalah pengukuran intensitas gelombang dilakukan pada zona jauh-nya.

Gambar (2.11) menunjukkan pembagian wilayah pemancaran gelombang, yaitu zona dekat (*near field*) dan zona jauh (*far field*). Pada *near field*, berkas gelombang berbentuk silinder dengan berdiameter seperti diameter kristal transduser, namun pada *far field* berkas gelombang melebar seperti *cone*. Sudut *cone* dapat dihitung berdasarkan rumus berikut:

$$\sin \frac{\theta}{2} = \frac{1.22\lambda}{D}$$

dimana,

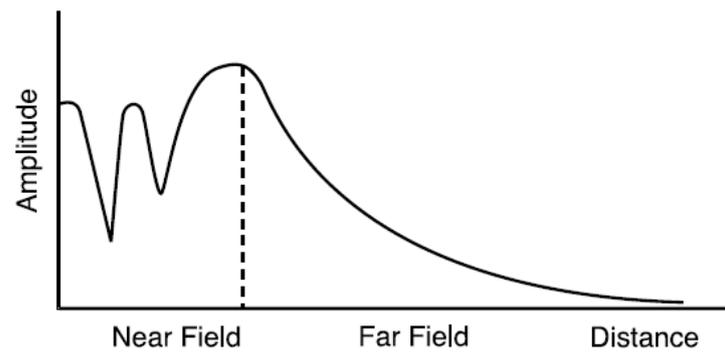
θ = Sudut berkas

λ = Panjang gelombang

D = Diameter kristal transduser

2.1.5 Sistem Desibel

Sistem satuan merupakan salah satu faktor penting yang dibutuhkan agar nilai-nilai yang ada dapat dikonversikan menjadi nilai lainnya. Dalam pengukuran



Gambar 2.10: Grafik Amplitudo di 2 Zona (Zona Dekat dan Zona Jauh)

dB	Rasio
3	1.41:1
6	2.00:1
9	2.82:1
12	3.98:1
14	5.01:1
20	10.00:1

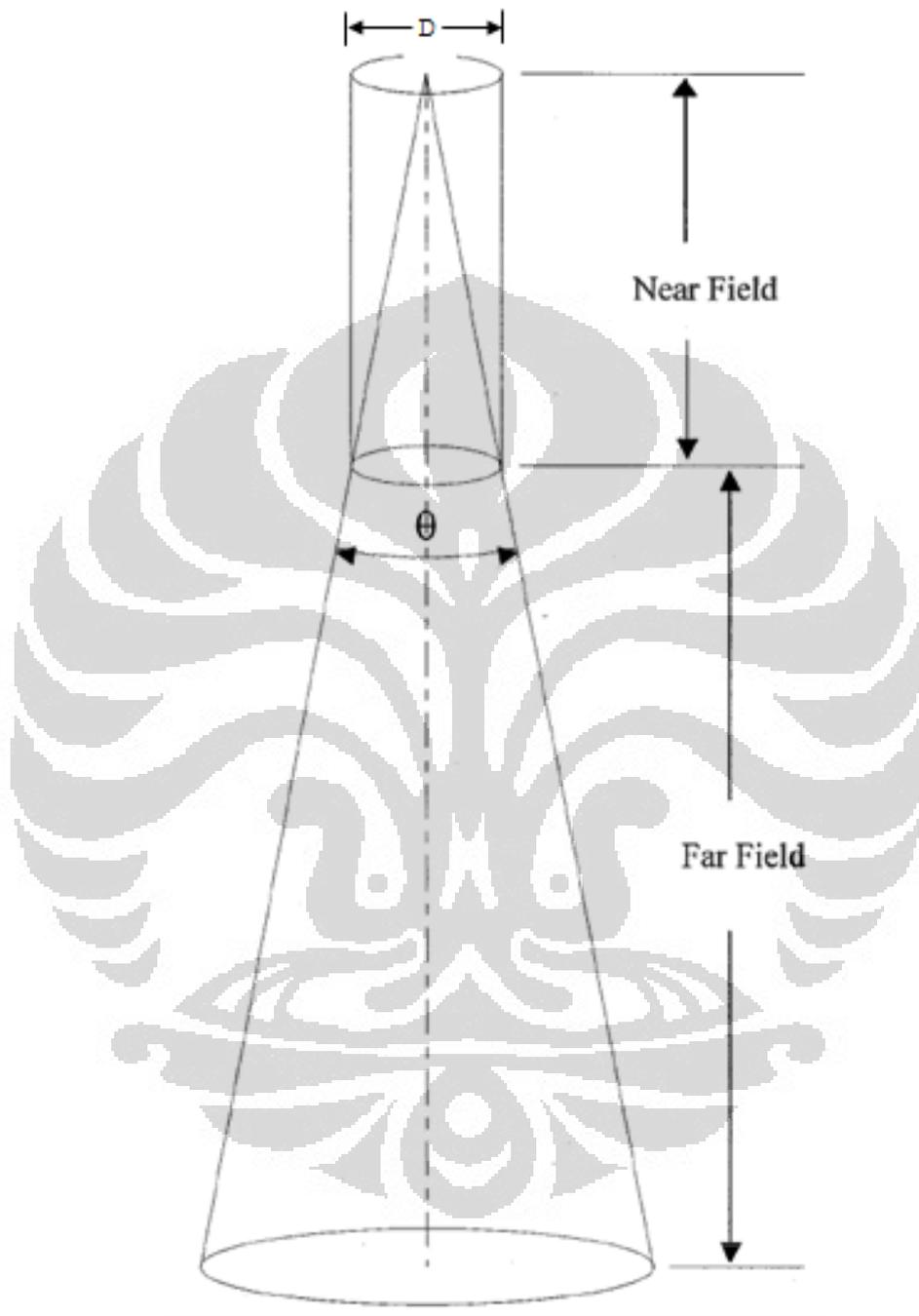
Tabel 2.1: Rasio Perbandingan Amplitudo dalam Desibel

intensitas gelombang, satuan yang digunakan adalah 'Bel'; diabadikan untuk menghormati Alexander Graham Bell (1847-1922), penemu telepon. Namun dalam perhitungan, satuan Bel dianggap terlalu besar, sehingga harus diturunkan ke dalam satuan yang lebih kecil yang disebut desibel atau dB. Kata 'desi' berasal dari bahasa Latin yang menunjukkan nilai satu per sepuluh sehingga desibel merupakan satuan yang bernilai sepersepuluh dari Bel. Satu desibel menunjukkan nilai yang setara atas 20 kali dari logaritmik rasio perbandingan amplitudo akhir terhadap amplitudo awal. Faktor 2 berelasi dengan pangkat dua (kuadrat), yaitu nilai intensitas gelombang yang setara dengan kuadrat dari amplitudonya.

Sebagai ilustrasi, nilai 6 dB menunjukkan peningkatan dua kali lipat antara amplitudo sinyal akhir dengan amplitudo sinyal awal. Tabel (2.1) menunjukkan rasio perbandingan dari beberapa nilai desibel.

2.2 Peralatan pada *Ultrasonic-Testing*

Seiring dengan perkembangan teknologi komputer yang semakin pesat, maka teknologi peralatan dalam teknik ultrasonik pun terus mengalami kemajuan. Jika sebelumnya teknik ultrasonik dijalankan secara manual, maka di zaman modern ini pengoperasiannya sudah bersifat digital yang terintegrasi dengan komputer [5],[8]. Secara garis besar, teknik pada *ultrasonic-testing* terdiri atas



Gambar 2.11: Zona Dekat (Near Field) dan Zona Jauh (Far Field) pada Peman-
caran Gelombang (Referensi gambar: *Handbook of Nondestructive Evaluation*,
New York: McGraw-Hill Companies Inc, 2003.)

beberapa bagian penting, diantaranya:

1. Transduser
2. Pembangkit pulsa (*signal generator*)
3. *Receiver* dan *amplifier*
4. *Display* (tampilan)

2.2.1 Transduser

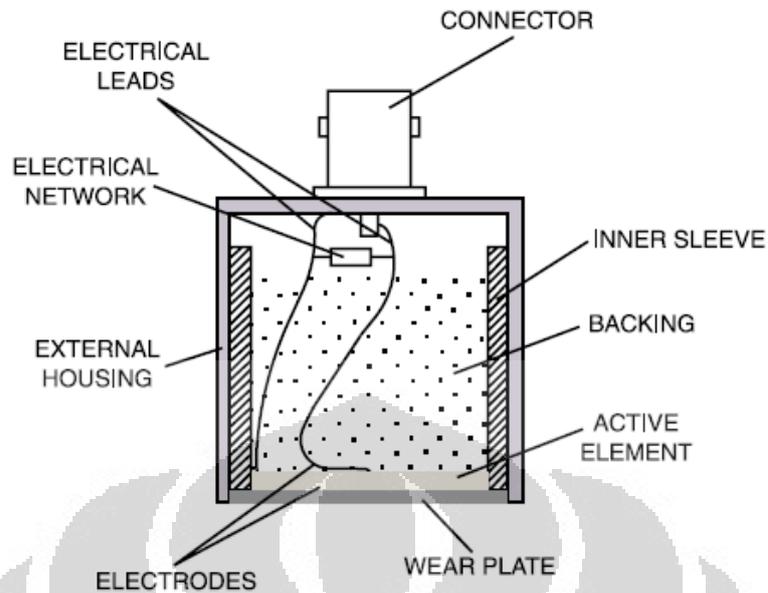
Transduser merupakan suatu alat yang dapat mengubah suatu besaran fisis tertentu ke besaran fisis lainnya. Dalam hal ini, sebuah transduser ultrasonik akan mengubah energi listrik menjadi energi mekanik (gelombang ultrasonik) dan sebaliknya. Tiga komponen utama dalam sebuah transduser ultrasonik adalah elemen aktif, *backing* (penahan), dan *wear plate* (pembungkus). Gambar (2.12) menunjukkan berbagai komponen di dalam transduser, dimana elemen aktif yang memiliki efek piezoelektrik diberikan sumber arus DC yang berasal dari sebuah konektor.

Elemen Aktif

Elemen aktif pada sebuah transduser adalah bagian yang berupa material *piezo* atau *ferroelectric* yang berguna untuk mengubah energi listrik dalam bentuk pulsa energi gelombang mekanik (ultrasonik). Bahan yang biasa digunakan pada elemen aktif adalah keramik terpolarisasi yang dipotong pada posisi tertentu (acuan pada sumbu-z) untuk menghasilkan berbagai macam bentuk gelombang yang diinginkan. Efek piezoelektrik ini merupakan konsep utama dalam sebuah transduser (sensor). Beberapa material baru seperti piezo polymers dan komposit juga sedang dikembangkan untuk mendapatkan berbagai keuntungan seperti performa sistem.

Backing (Penahan)

Backing atau penahan merupakan bahan yang memiliki atenuasi tinggi dan memiliki densitas yang besar pula untuk mengontrol besar vibrasi dari transduser dengan cara menyerap energi radiasi dari bagian belakang elemen aktif. Bila impedansi akustik pada *backing* sesuai dengan impedansi akustik pada elemen aktif, akan menyebabkan peredaman yang cukup besar di transduser yang menghasilkan daerah resolusi yang baik namun dengan amplitudo signal yang lebih rendah. Namun, bila nilai impedansi akustik antara keduanya (*backing* dengan elemen aktif) tidak sesuai, maka akan lebih banyak energi suara yang akan direfleksikan kembali. Sebagai hasilnya, transduser akan memiliki nilai resolusi yang lebih rendah yang sebanding dengan penambahan panjang gelombang, namun dengan amplitudo signal yang lebih tinggi serta sensitivitas yang lebih tinggi pula.



Gambar 2.12: Komponen Dalam Transduser
(Referensi Gambar: *Ultrasonic Transducer Technical Notes*, Panametrics-NDT, North America: Olympus, 2006.)

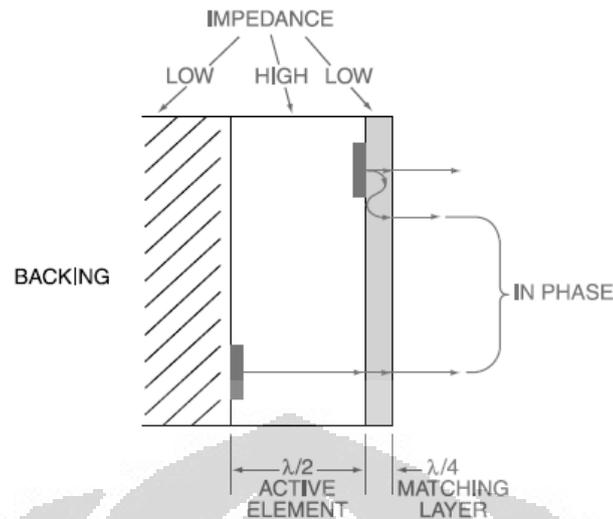
***Wear Plate* (Pembungkus)**

Kegunaan utama dari *wear plate* adalah untuk melindungi elemen transduser dari berbagai kondisi lingkungan tempat pengujian. Pada transduser "kontak", *wear plate* harus bersifat tahan lama serta anti korosi yang bisa timbul akibat kontak langsung dengan material yang diuji.

Pada *delay line transducer* dan *angle beam transducer*, *wear plate* memiliki kegunaan tambahan yaitu bertindak sebagai "transformer akustik" antara elemen aktif yang memiliki impedansi akustik yang tinggi dengan air yang memiliki impedansi akustik rendah. Hal ini didapat dengan mengatur ketebalan lapisan sebesar $1/4$ panjang gelombang (elemen aktif umumnya memiliki ketebalan $1/2$ panjang gelombang). Pengaturan ketebalan ini berdasarkan pada konsep superposisi yang mengharuskan gelombang yang dihasilkan elemen aktif sefase dengan refleksi gelombang pada *matching layer*. Hal ini menjadi keharusan karena bila beberapa signal sefase, maka akan bersifat konstruktif sehingga amplitudo gelombang yang menuju bahan uji pun menjadi lebih besar. Gambar (2.13) menunjukkan bahwa elemen aktif dengan *wear plate* yang sefase. Jika konsep ini tidak diperhitungkan, maka gelombang dihasilkan tidak sefase sehingga dapat menyebabkan kekacauan muka gelombang.

2.2.2 Jenis Transduser

Secara umum, transduser atau sensor yang biasa digunakan pada *ultrasonic-testing* terdiri dari 3 jenis, yaitu:



Gambar 2.13: Perbandingan Fase Elemen Aktif dengan Matching Layer
(Referensi Gambar: *Ultrasonic Transducer Technical Notes*, Panametrics-NDT, North America: Olympus, 2006.)

1. *Angle Beam Transducers*

Angle beam transducer menggunakan prinsip refraksi dan konversi moda untuk menghasilkan *shear waves* dan *compression waves* pada material yang diujikan. Dari gambar (2.14) terlihat bahwa sudut datang diperlukan untuk menghasilkan gelombang refraksi (*shear waves* pada baja) yang dapat dihitung berdasarkan Hukum Snellius.

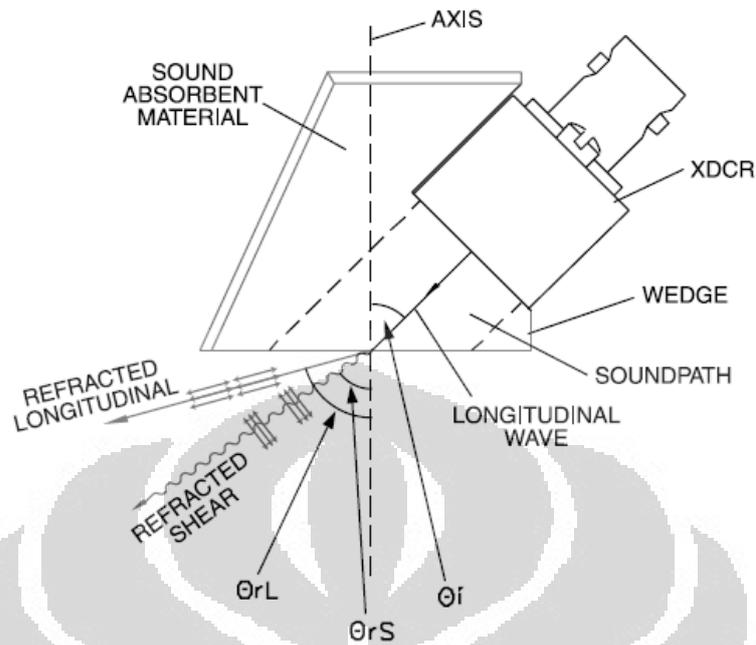
2. *Delay Line Transducers*

Delay line transducer merupakan transduser gelombang longitudinal *single element* yang menggunakan konsep *delay line* (penundaan waktu). Salah satu alasan untuk memilih *delay line transducer* adalah bahwa resolusi *near surface*-nya dapat ditingkatkan. Penundaan waktu pemberian pulsa memungkinkan elemen untuk berhenti bergetar sebelum sinyal dari reflektor kembali diterima. Bila menggunakan *delay line transducer*, akan terjadi gema dari akhir pulsa yang diterima dan perlu dilakukan filterisasi.

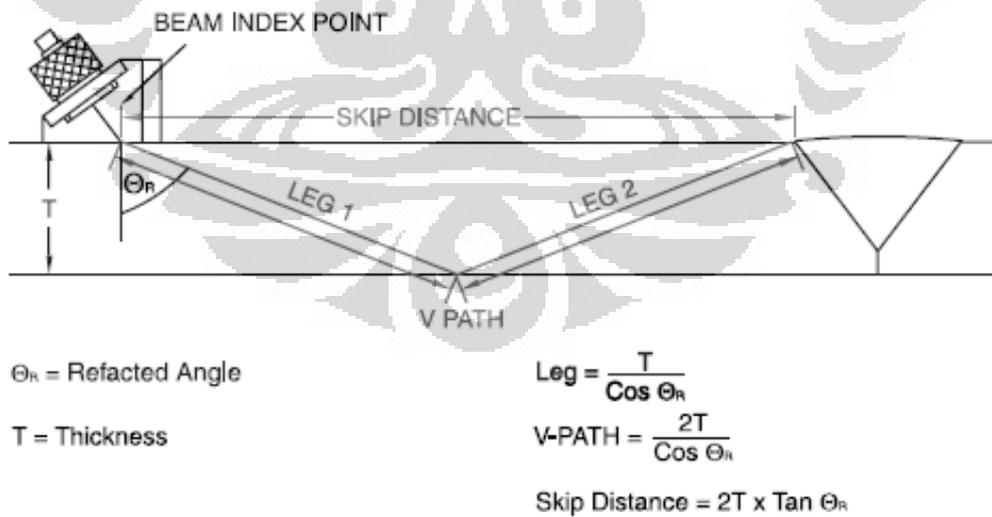
3. *Immersion Transducers*

Immersion transducer memiliki tiga kelebihan dibandingkan dengan jenis transduser lainnya, yaitu:

- (a) *Coupling* yang *uniform* untuk mereduksi berbagai variasi sensitivitas.
- (b) Mereduksi waktu *scanning* pada *scanning* bertipe otomatis.



Gambar 2.14: Angle Beam Transducer
 (Referensi Gambar: *Ultrasonic Transducer Technical Notes*, Panametrics-NDT, North America: Olympus, 2006.)



Gambar 2.15: Path of Angle Beam Transducer
 (Referensi Gambar: *Ultrasonic Transducer Technical Notes*, Panametrics-NDT, North America: Olympus, 2006.)

Bab 3

Landasan Teori

3.1 Persamaan Gelombang

Cukup banyak persamaan yang dapat digolongkan ke dalam Persamaan Diferensial Parsial (*Classical Parsial Differential Equation* (PDEs), seperti *Heat Equation*, *Helmholtz Equation*, *Laplace Equation*, *Wave Equation*, dll. Di dalam pemodelan pada dasarnya kita dapat menggunakan dua jenis persamaan, yaitu *Helmholtz Equation* dan *Wave Equation*, namun karena *Helmholtz Equation* merupakan persamaan gelombang yang hanya mengevaluasi dimensi ruang sedangkan kita harus mengevaluasi sistem terhadap perubahan waktu, maka digunakanlah Persamaan Gelombang (*Wave Equation*). Persamaan gelombang yang digunakan pada pemodelan sistem ultrasonik diturunkan dari Hukum Newton II [9]. Berikut merupakan penjelasannya:

Anggap kita memiliki sebuah tali yang salah satu simpulnya diikat pada sebuah tiang, sedangkan simpul lainnya bebas bergerak. Ketika tali kita gerakkan, maka tali akan membentuk sebuah gelombang dua dimensi. Kita definisikan pergeseran vertikal terhadap sumbu y sebagai salah satu partisi/bagian kecil dari pergerakan uniform tali. Bagian ini bertindak sebagai gerakan harmonik sederhana secara vertikal, yaitu osilasi sederhana. Pergeseran terhadap sumbu y akan berubah terhadap waktu, begitu pula dengan posisi x . T merupakan gaya tegang tali yang bekerja berlawanan arah satu sama lain.

Sesuai dengan Hukum Newton II yang menyatakan bahwa resultan gaya pada suatu sistem sama dengan massa m dikali percepatan a :

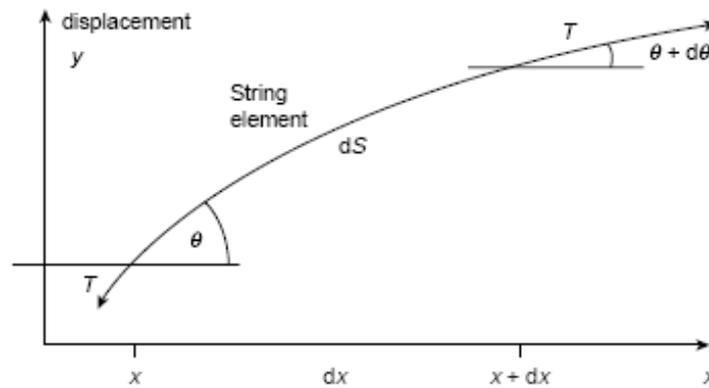
$$\Sigma F = m.a \quad (3.1)$$

maka,

$$T \sin(\theta + d\theta) - T \sin(\theta) = m.a \quad (3.2)$$

Pada sudut yang sangat kecil, $\theta \ll$, maka $\sin \theta = \tan \theta$ sehingga dapat dianggap sebagai $\tan \theta = dy/dx$

$$T \left[\frac{\partial y(x + \delta x, t)}{\partial x} - \frac{\partial y(x, t)}{\partial x} \right] = m. \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} \quad (3.3)$$



Gambar 3.1: Pergeseran Gelombang

$$T \left[\left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_{x+dx} - \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_x \right] = m \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \tag{3.4}$$

karena,

$$d \left(\frac{dy}{dx} \right) = \frac{d^2 y}{dx^2} \cdot dx \tag{3.5}$$

maka:

$$T \left[\left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_{x+dx} - \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_x \right] = T \left[\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \cdot dx \right] = T \left[\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \cdot \Delta x \right] \tag{3.6}$$

$$T \left[\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \cdot \Delta x \right] = m \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \tag{3.7}$$

$$T \left[\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right] = \frac{m}{\Delta x} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \tag{3.8}$$

Karena $m/\Delta x$ dapat dianggap sebagai densitas panjang ρ , maka:

$$T \left[\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right] = \rho \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \tag{3.9}$$

$$\left[\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right] = \frac{\rho}{T} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \tag{3.10}$$

Kita anggap $T/\rho = v^2$ sehingga $\rho/T = 1/v^2$, maka:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \tag{3.11}$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (3.12)$$

Untuk melengkapi konsep di atas, kita mengevaluasi bagian $T/\rho = v^2$. T merupakan gaya tegang tali dengan dimensi $[kg.m/s^2]$ sedangkan ρ merupakan densitas panjang dengan dimensi $[kg/m]$, maka:

$$\frac{T}{\rho} = \frac{[kg.m/s^2]}{[kg/m]} = \left[kg \frac{m}{s^2} \cdot \frac{m}{kg} \right] = \left[\frac{m^2}{s^2} \right] = \left(\frac{m}{s} \right)^2$$

Nilai $(m/s)^2$ merupakan nilai kecepatan kuadrat v^2 . Persamaan (3.8) juga dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (3.13)$$

Perambatan ultrasonik dalam medium sebagai gerak harmonik sederhana. Maka pemindahan partikel dalam medium sebagai fungsi dari solusi persamaan gelombang sebelumnya (3.12) adalah sebagai berikut:

$$\psi = Ae^{(\omega t - kx)} \quad (3.14)$$

Dimana ω merupakan frekuensi angular $2\pi f$, k merupakan bilangan gelombang $2\pi/\lambda$ atau ω/c , dan A merupakan amplitudo gelombang.

Gelombang suara merambat dalam medium dengan panjang gelombang λ , yang dapat ditulis sebagai berikut:

$$\lambda = c/f = \frac{2\pi c}{\omega} \quad (3.15)$$

(Pembuktian solusi persamaan (3.13) dapat dilihat pada Lampiran G)

3.2 Energi dan Intensitas

Daya adalah energi yang ditransfer dan diekspresikan dalam satuan watt. Intensitas adalah daya yang melewati suatu area tertentu. Intensitas adalah daya per unit area dan diekspresikan dalam satuan watt per meter kuadrat. Jika gelombang ultrasonik merambat dalam suatu medium, maka partikel medium mengalami perpindahan energi [10]. Besarnya energi gelombang ultrasonik yang dimiliki partikel medium adalah:

$$E = E_k + E_p \quad (3.16)$$

Dimana E_k adalah energi kinetik dan E_p adalah energi potensial.

Untuk menghitung intensitas gelombang ultrasonik perlu mengetahui energi yang dibawa oleh gelombang ultrasonik. Intensitas gelombang ultrasonik I adalah energi yang melewati luas permukaan medium 1 m^2 atau $watt/m^2$. Untuk sebuah permukaan, intensitas gelombang ultrasonik I diberikan dalam bentuk persamaan:

$$I = \frac{1}{2}\rho v A (2\pi f)^2 = \frac{1}{2}Z(A\omega)^2 \quad (3.17)$$

Dimana ρ adalah massa jenis medium/jaringan (Kg/m^3), f adalah frekuensi gelombang (Hz), V adalah volume (m^3), A adalah amplitudo maksimum (m), Z adalah impedansi akustik ($kg/m.s$), dan ω adalah frekuensi sudut (rad/s).

Gelombang ultrasonik merambat membawa energi dari satu medium ke medium lainnya. Energi yang dipindahkan sebagai energi getaran dari partikel ke partikel pada medium tersebut. Besarnya energi yang dibawa partikel tersebut adalah:

$$E = \frac{1}{2}kA^2 \quad (3.18)$$

Dimana k merupakan konstanta ($4\pi^2mf^2$), T merupakan periode (s), A merupakan amplitudo (m) dan m merupakan massa partikel pada medium (kg).

$$E = 2\pi^2mf^2A^2 \quad (3.19)$$

$$E = 2\pi^2rSvtf^2A^2 \quad (3.20)$$

Dimana $m = \rho V = \rho Sl = \rho Svt$ adalah massa (kg), V merupakan volume (luas.tebal) = Sl (m^3), S merupakan luas permukaan penampang lintang yang dilalui gelombang (m), $l = vt$ merupakan jarak yang ditempuh gelombang (m), v merupakan laju gelombang (m/s), dan t adalah waktu (s).

Dari persamaan di atas diperoleh hasil bahwa energi yang dibawa oleh gelombang ultrasonik sebanding dengan kuadrat amplitudo. Besarnya daya yang dibawa gelombang ultrasonik P menjadi:

$$P = 2\pi^2rSvf^2A^2 \quad (3.21)$$

Intensitas gelombang ultrasonik adalah daya yang dibawa melalui luas permukaan yang tegak lurus terhadap aliran energi, maka :

$$P = 2\pi^2rvf^2A^2 \quad (3.22)$$

Persamaan di atas menyatakan hubungan secara eksplisit bahwa intensitas gelombang ultrasonik sebanding dengan kuadrat amplitudo A dan dengan kuadrat frekuensi f .

Gelombang ultrasonik yang keluar dari sumber transduser mengalir ke semua arah. Gelombang ultrasonik merambat keluar, energi yang dibawanya tersebar ke permukaan yang makin lama semakin luas. Karena merambat dalam arah tiga dimensi, maka luas permukaan merupakan luasan permukaan bola dengan radius r adalah $4\pi r^2$. Sehingga intensitas gelombang ultrasonik menjadi:

$$I = \text{daya/luas} = \frac{P}{\text{Area}} \quad (3.23)$$

Jika keluaran daya P dari sumber konstan, maka intensitas berkurang sebagai kebalikan dari kuadrat jarak dari sumber, sehingga:

$$I = \frac{1}{r^2} \quad (3.24)$$

Jika kita ambil dua titik dengan jarak r_1 dan r_2 dari sumber, maka $I_1 = P/4\pi r_1^2$ dan $I_2 = P/4\pi r_2^2$, sehingga:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{r_1^2}{r_2^2} \quad (3.25)$$

Jika amplitudo gelombang ultrasonik berkurang terhadap jarak, maka amplitudo gelombang ultrasonik menjadi mengecil sebesar $1/r$ karena intensitas sebanding dengan amplitudo maka akan sebanding dengan kebalikan dari kuadrat jarak, sehingga:

$$A = \frac{1}{r} \quad (3.26)$$

Jika kita ambil dua jarak yang berbeda dari sumber transduser, r_1 dan r_2 maka:

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{r_1}{r_2} \quad (3.27)$$

Ketika gelombang ultrasonik dua kali lipat lebih jauh dari sumber transduser, maka amplitudo akan menjadi setengahnya. Intensitas relatif digambarkan dalam satuan desibel dB sebagai:

$$dB = 10 \log\left(\frac{I_2}{I_1}\right) \quad (3.28)$$

atau

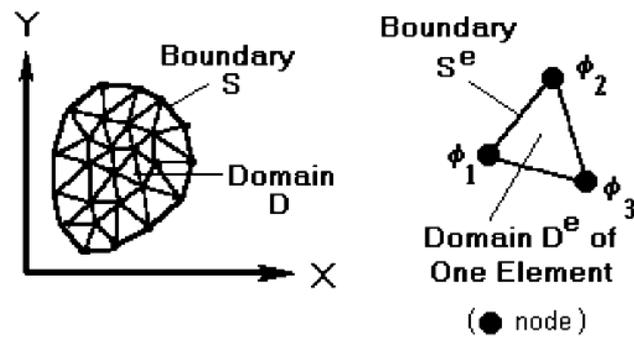
$$dB = 20 \log\left(\frac{A_2}{A_1}\right) \quad (3.29)$$

3.3 *Finite Element Method* (FEM)

3.3.1 Prinsip Dasar

Finite element method (FEM) atau metode elemen hingga merupakan salah satu teknik analisis numerik yang biasa digunakan untuk mendapatkan solusi persamaan diferensial yang menggambarkan suatu sistem secara fisis maupun non-fisis, seperti permasalahan di bidang dinamika fluida, elektromagnetik, gelombang mekanik, dll.

Landasan utama dari metode ini adalah bahwa setiap domain yang rumit dapat dibagi ke dalam sejumlah daerah/wilayah yang lebih kecil dimana persamaan diferensial tersebut mudah diselesaikan. Dengan merancang persamaan ke dalam suatu ruang tertentu, sifat-sifat dari permasalahan tersebut dapat mudah ditentukan [11].



Gambar 3.2: Elemen Titik dengan 1 Derajat Kebebasan

Setiap daerah/wilayah disebut dengan elemen dan proses pembagian setiap domain ke dalam elemen dengan jumlah terhingga disebut dengan diskretisasi. Setiap elemen dihubungkan dengan titik tertentu yang disebut dengan *nodes* sehingga pada akhirnya setiap solusi dari tiap-tiap daerah/wilayah yang diskret dirakit menjadi satu kesatuan.

3.3.2 Diskretisasi Menggunakan *Finite Element*

Dengan menggunakan FEM, solusi domain didiskretisasi ke dalam ruang yang lebih kecil yang disebut elemen dan solusinya ditentukan pada nilai diskret ψ (seperti pergeseran pada sumbu x , y , dan z) di setiap titik yang analitik. Total dari seluruh variabel yang tidak diketahui pada suatu titik disebut dengan derajat kebebasan (*degree of freedom*). Gambar 3.2 menunjukkan bahwa di setiap titik memiliki satu derajat kebebasan.

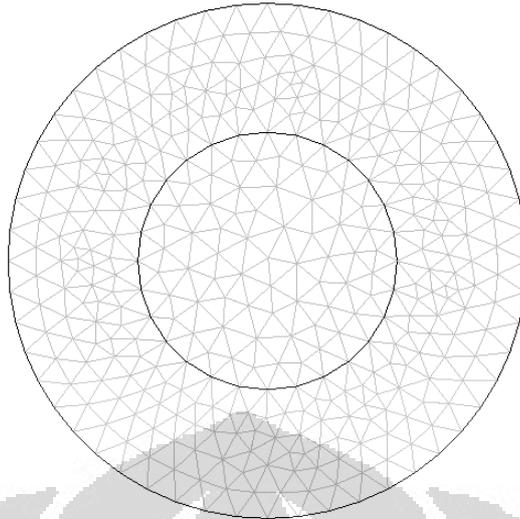
Pola menunjukkan bahwa persamaan diferensial utama diaplikasikan ke dalam domain dengan *single element*. Pada setiap level elemen, solusi dari persamaan tersebut dipindahkan dengan menggunakan pendekatan fungsi kontinyu pada distribusi ψ di seluruh elemen domain D^e , yang terekspreasi pada bagian nilai titik tak diketahui ψ_1, ψ_2, ψ_3 dari solusi ψ .

3.3.3 Langkah Dasar *Finite Element Analysis*

1. Diskretisasi Bentuk Kontinyu

Pada sebuah bentuk kontinyu, tidak ada pola dasar yang mengikat dalam pembagian subdomain, oleh karena itu diskretisasi bentuk akan terlihat sembarang. Pola yang kontinyu pada dasarnya dapat dilakukan pendekatan pembagian bentuk (partisi) dimana tiap elemennya akan saling terhubung satu sama lain sehingga karakteristik berbagai gaya dan pergeseran yang terjadi pada benda akan relatif mudah untuk dilakukan komputasi.

Elemen yang ada dihubungkan satu sama lain pada area pembatasannya, yang diasumsikan terhubung dalam suatu *nodes*. Fleksibilitas pola ini sebenarnya akan mereduksi keakuratan perhitungan, namun dengan se-



Gambar 3.3: Pola Mesh di 2D

makin banyaknya pola diskret yang terpartisi (mesh), maka akan cukup membantu mengatasi permasalahan tersebut.

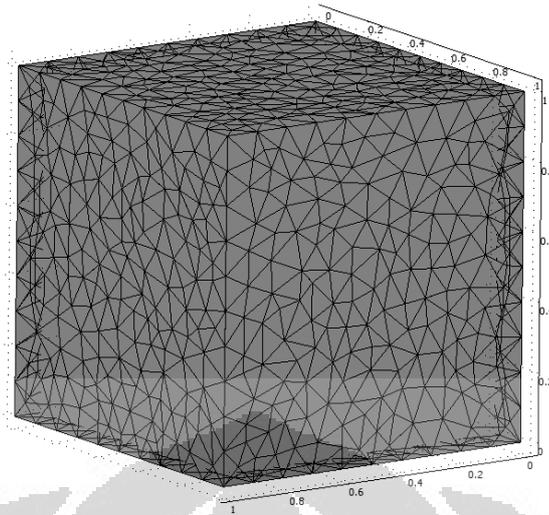
Pada bentuk 2D dan 3D, pola diskret *mesh* akan berbeda. Jika pada bentuk 2D, pola akan terlihat seperti sejumlah segitiga (triangular) tak beraturan, maka pada pola 3D bentuk *mesh* akan terlihat seperti bentuk tetrahedral dengan sembarang panjang rusuknya.

Sebuah pola *mesh* yang baik akan berusaha menjaga kontinuitas antar *nodes* sehingga jarak masing-masing *nodes* tidak boleh berkurang secara signifikan. Dengan begitu, jarak antar *nodes* berada pada *range* yang homogen satu sama lain. Selain itu, pola *mesh* yang baik juga akan berusaha melingkupi seluruh bagian dari geometri benda. Tidak boleh ada *gap* yang menyebabkan salah satu elemen benda tidak ter-*cover* yang membuatnya tidak bisa dilakukan evaluasi perhitungan di bagian tersebut.

2. Pengaturan Fungsi Interpolasi

Ketika bentuk elemen telah dipilih, maka selanjutnya yang harus dilakukan adalah melihat bagaimana variasi elemen domain yang direpresentasikan. Dalam banyak kasus, fungsi interpolasi polinomial digunakan sebagai pendekatan variasi elemen tersebut. Jumlah *nodes* yang berada pada domain tersebut akan sangat menentukan orde dari fungsi interpolasi. Fungsi interpolasi dapat juga disebut sebagai fungsi bentuk atau fungsi pendekatan.

Metode paling sederhana yang biasa dilakukan dalam melakukan interpolasi adalah dengan mengasumsikan distribusi linier dari fungsi yang tidak diketahui dalam domain elemen. Umumnya fungsi satu dimensi dapat direpresentasikan sebagai serangkaian garis lurus. Segmen garis yang lebih kecil akan membuat solusi semakin akurat. Sebaliknya, segmen garis yang lebih besar akan solusi semakin tidak akurat. Namun dengan semakin pendeknya elemen garis akan menyebabkan semakin banyaknya bagian yang



Gambar 3.4: Pola Mesh di 3D

harus dievaluasi sehingga membuat lama komputasi. Dengan demikian, perlu juga diperhitungkan jumlah elemen garis yang melingkupi bentuk tersebut.

3. Menentukan Sifat Elemen

Ketika fungsi interpolasi telah dipilih, maka selanjutnya yang harus dilakukan, medan variabel di dalam domain dilakukan pendekatan sebagai nilai diskret pada nodes sehingga bentuk persamaan sistem diekspresikan sebagai sifat elemen di seluruh nodes.

4. Meng-*assemble* Sifat Elemen

Prosedur *assembly* mengkombinasikan setiap elemen dengan pendekatan medan variabel untuk membentuk potongan-potongan yang merupakan pendekatan dari sifat domain solusinya. Assembly dilakukan dengan menggunakan konsep dasar "Nilai variabel medan di simpul harus sama untuk setiap elemen yang

5. Mengaplikasikan Syarat Batas

Sistem global dari persamaan sebelumnya tidak akan dapat diselesaikan sebelum mengaplikasikan syarat batas. Secara matematika, sebuah persamaan sistem bersifat indeterministik dan tidak memiliki solusi yang unik jika tidak ada syarat batasnya. Hal ini juga berlaku pada sebuah struktur elemen yang mengharuskan batas batasnya terdefinisi pada syarat batas ketika sebuah interaksi/gaya terjadi pada elemen tersebut.

6. Menyelesaikan Persamaan Sistem

Setelah syarat batas digunakan untuk meng-*assemble* matriks dari persamaan utama, maka teknik standar numerik dapat digunakan untuk menyelesaikan variabel yang tak diketahui pada setiap *nodes*.

Bab 4

Metodologi Penelitian

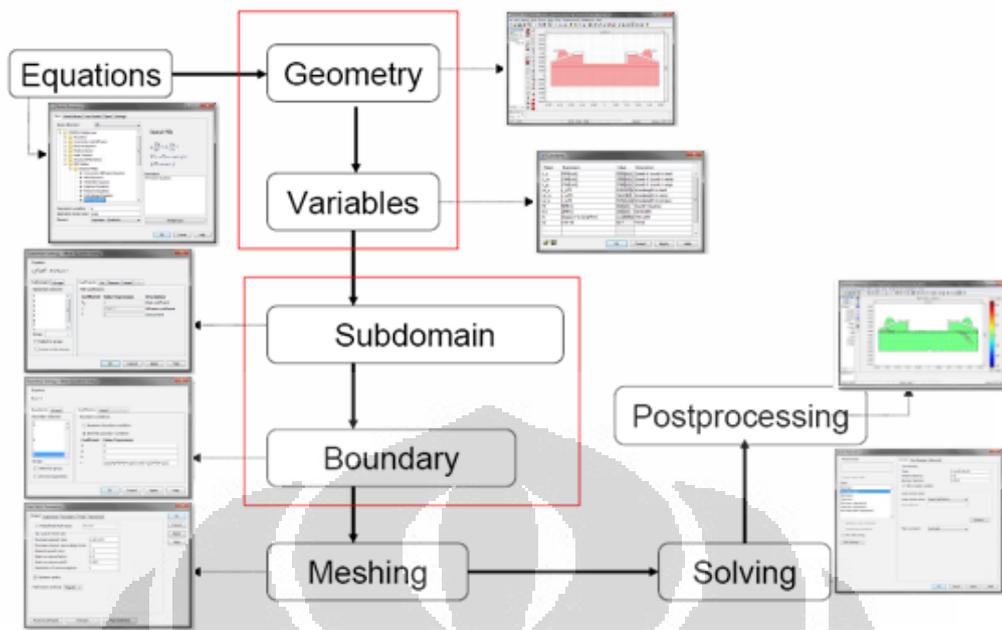
4.1 Metode Simulasi *Ultrasonic-Testing*

Simulasi sistem *ultrasonic-testing* dilakukan dengan menggunakan software COMSOL Multiphysics Ver.3.4 dan COMSOL Script 1.2. Pada proses simulasi dilakukan pembuatan desain sensor ultrasonik secara 2D dan 3D, pemasukan parameter-parameter simulasi, dan pengambilan data hasil simulasi. Proses simulasi ini memanfaatkan metode elemen hingga (*Finite Element Methode/FEM*) yang ditandai dengan proses *meshing* pada software. FEM berguna untuk menyelesaikan permasalahan kompleks seperti Persamaan Diferensial Parsial, dengan melakukan diskretisasi suatu domain yang kontinyu menjadi kumpulan elemen. Perintis FEM yang terkenal adalah Alexander Hrennikoff (1941) dan Richard Courant (1942). Pendekatan yang dilakukan oleh Hrennikoff adalah dengan membagi-bagi domain menggunakan analogi kisi-kisi, sedangkan pendekatan yang dilakukan oleh Courant adalah dengan mengubah domain menjadi subdomain yang ukurannya berbentuk segitiga-segitiga terbatas. *Meshing* yang dilakukan disini adalah dalam kondisi objek 3D sehingga *meshing* berbentuk tetrahedral.

Desain sistem ultrasonik akan sangat bergantung dari karakteristik transduser dan parameter keretakan di dalam suatu bahan uji yang digunakan. Karena menggunakan metode FEM, maka geometri sistem akan sangat berpengaruh terhadap hasil data sinyal yang didapatkan; dengan demikian simulasi dibuat semirip mungkin dengan peralatan ultrasonik yang dipakai. Pemodelan simulasi ultrasonik menggunakan persamaan fisika dan metode numerik untuk memprediksikan hasil dari eksperimen. Penggunaan software pada simulasi, akan menjadikan kemudahan dalam perubahan berbagai parameter yang mampu merubah hasil sesuai dengan yang diinginkan. Model yang dibuat akan digunakan untuk memprediksikan berbagai parameter fisis dalam percobaan yang akan di analisis [12].

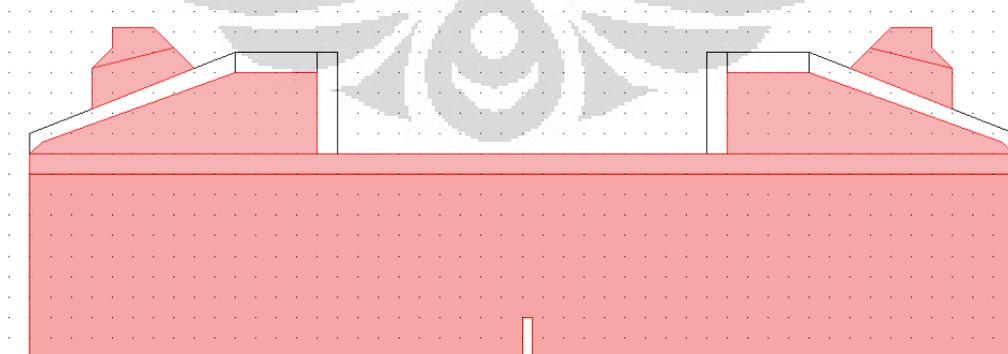
4.1.1 Desain Sensor

Baik pada sistem 2D maupun 3D, sensor ultrasonik dibuat sebanyak 2 buah (sepasang) dimana salah satunya merupakan sensor yang bertindak sebagai *transmitter* yang akan memberikan pulsa gelombang ultrasonik dan yang satunya meru-

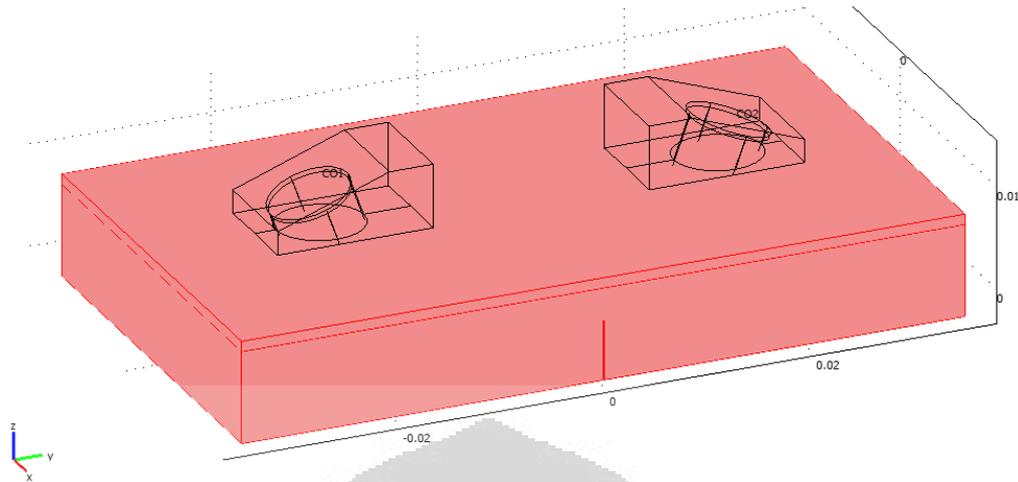


Gambar 4.1: Langkah Simulasi Sistem Ultrasonic-Testing

pakan sensor yang bertindak sebagai *receiver* dimana terdapat *boundary* khusus yang merupakan tempat pengambilan data. Desain sensor yang dibuat pada simulasi disesuaikan dengan bentuk dan ukuran sensor sebenarnya dimana terdapat elemen aktif dengan bentuk menyerupai tabung berdiameter sekitar 1 cm dan *eksternal housing* yang merupakan wadah dimana elemen aktif berada; sedangkan pada tabung hanya dibuat desain sebageian kecil dari selimut tabung agar dapat mengurangi geometri yang mengakibatkan berkurangnya jumlah *mesh* sehingga pada akhirnya dapat mengurangi waktu komputasi. Dalam model simulasi juga dibuat lapisan atas antara tabung dengan transduser yang merupakan komponen cairan yang berfungsi sebagai *couplant* pada pengujian ultrasonik.



Gambar 4.2: Bentuk 2D Sistem pada Ultrasonic-Testing



Gambar 4.3: Bentuk 3D Sistem pada Ultrasonic-Testing

4.1.2 Parameter Fisis

Dalam melakukan simulasi pada program COMSOL Multiphysics, ada beberapa parameter fisis yang harus dimasukkan agar kondisi simulasi hampir menyerupai dengan keadaan sistem uji sesungguhnya.

1. *Constants Parameter*

Pada dasarnya memasukkan nilai-nilai parameter pada bagian *constants* bertujuan untuk mempermudah mendeklarasikan berbagai nilai yang kita butuhkan. Ketika kita telah memasukkan sejumlah nilai di *constants*, maka secara otomatis program akan mengetahui nilai sebenarnya dari berbagai konstanta yang kita set di berbagai parameter setelahnya seperti subdomain dan *boundary condition* sehingga ekspresi yang kita berikan di kedua bagian itu akan terlihat lebih ringkas. Berikut ini sejumlah nilai yang dideklarasikan di bagian *constants*:

2. *Subdomain Parameter*

Subdomain merupakan bagian dari bentuk sistem yang memiliki karakteristik tersendiri yang akan kita atur. Sesuai dengan modul yang digunakan, subdomain ini memiliki fungsi persamaan gelombang sebagai berikut:

$$e_a \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \nabla \cdot (c \nabla u) = f$$

Berdasarkan persamaan di atas, maka ada beberapa parameter yang harus di atur diantaranya, koefisien massa e_a , koefisien difusi c , dan *source term* f . Koefisien massa merupakan faktor pemberat dari fungsi gelombang yang dalam hal ini bernilai 1. Sedangkan *source term* f diset 0 karena dianggap sebagai *damped oscillation* Dalam *setting* kali ini, ketiga jenis subdomain, yaitu transduser, *couplant*, dan bahan tabung dibedakan dari nilai koefisien

Name	Expression	Value	Description
c_s	5850[m/s]	5850[m/s]	Speed of sound in steel
c_w	1500[m/s]	1500[m/s]	Speed of sound in water
c_p	2760[m/s]	2760[m/s]	Speed of sound in wave
wl_s	c_s/f0	0.001463[m]	Wavelength in steel
wl_w	c_w/f0	(3.75e-4)[m]	Wavelength in water
wl_p	c_p/f0	(6.9e-4)[m]	Wavelength in perspex
f0	4[MHz]	4e6[1/s]	Sound frequency
bw	2[MHz]	2e6[1/s]	Bandwidth
A	((log(2))^0.5)/(pi*bw)	(1.325052e)	Time Limit
t0	0.5e-06	5e-7	Period

Gambar 4.4: Deklarasi Constants

diffusi-nya yang sebanding dengan kecepatan kuadrat gelombang ultrasonik pada bahan material yang digunakan v^2 . Pada subdomain tabung nilai koefisien diffusi-nya diset sebesar 5850^2 m/s, untuk transduser diset bernilai 2760^2 m/s, dan pada *couplant* bernilai 1500^2 m/s.

3. *Boundary Parameter*

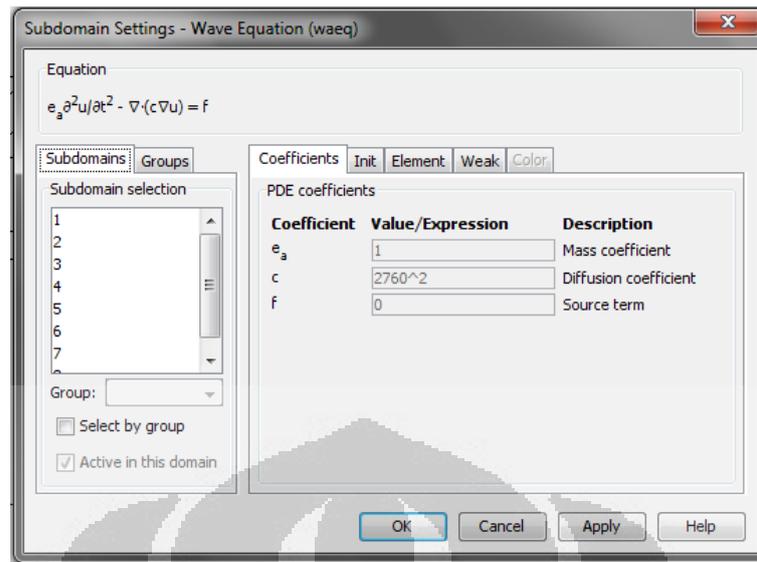
Syarat batas yang ditentukan pada saat pemodelan menentukan kondisi yang menghubungkan geometri model dengan sekelilingnya. Transduser yang dimodelkan mungkin tidak sesuai dengan bentuk aslinya namun yang diutamakan adalah *angle-beam*nya sehingga hasilnya sesuai dengan prediksi perambatan gelombang ultrasonik di dalam medium.

Perbedaan antara *boundary* geometri transduser dengan *boundary* medium yang lain adalah pada tipe-nya. Secara garis besar suatu *boundary* bertipe menyerap (*absorbing*) dan memantul (*reflecting*). Dua keadaan tersebut diwakili oleh dua jenis *boundary condition*, yaitu **Generalized Neumann Condition** dan **Dirichlet Condition**.

- **Generalize Neumann Condition** (*Robin condition*), syarat batas-nya ditentukan oleh koefisien q dan g :

$$n \cdot (c \nabla u) + q \cdot u = g$$

dimana q merupakan matrix $n \times n$, sedangkan g merupakan vektor $n \times 1$. Kondisi ini akan menspesifikasikan nilai dari turunan solusi pada suatu batas. *Neumann condition* merupakan syarat batas dimana turunan suatu fungsi bernilai nol pada batas tersebut. Dengan kata lain, fungsi tersebut bernilai konstant di daerah batasnya. Oleh karena itu setting pada *receiver* harus menggunakan syarat batas ini agar dapat kita ambil nilai potensialnya. Selain digunakan pada *receiver*, pada pada sisi samping tabung juga menggunakan syarat batas



Gambar 4.5: Parameter Subdomain

ini karena pada kenyataannya sisi tabung sangat lebar yang mengakibatkan gelombang ultrasonik akan terus menjalar ke seluruh selimut tabung.

- **Dirichlet condition**, syarat batasnya ditentukan oleh nilai r :

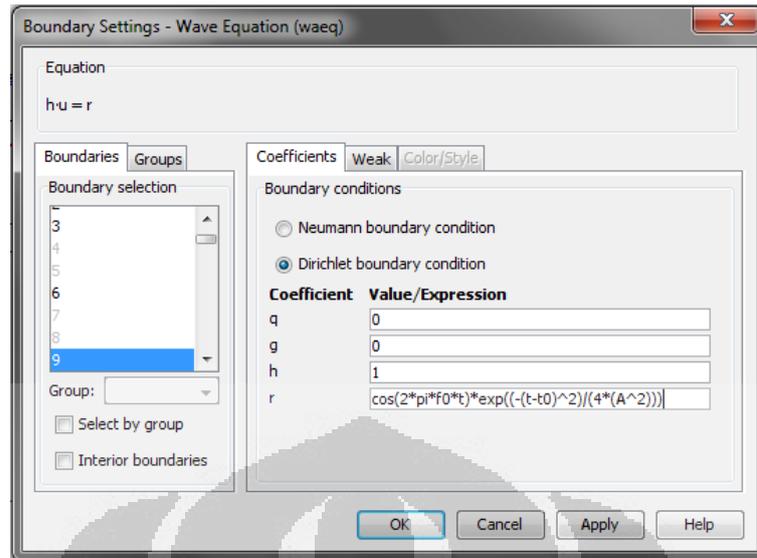
$$h \cdot u = r$$

dimana h adalah faktor pemberat (*weight factor*) dengan nilai 1, sedangkan r adalah vektor $n \times 1$ yang merupakan nilai dari u . *Dirichlet condition* merupakan syarat batas dimana suatu fungsi pada syarat batas ini bernilai nol. Dengan kata lain, setiap gelombang yang melewati syarat batas ini akan dipantulkan seolah-olah dihadap oleh tembok pejal yang sangat kuat. Keadaan *Dirichlet condition* sangat sesuai pada batas dimana impedansi akustik antar kedua subdomain memiliki nilai yang jauh berbeda.

Pulsa ultrasonik yang diemisikan dari transduser di bagian *transmitter* dapat dimodelkan dengan fungsi pergeseran partikel terhadap waktu yang merupakan bentuk dari fungsi Gaussian seperti berikut:

$$u(t) = \cos(2\pi f_0 t) \exp[-t^2/4A^2]$$

Dengan f_0 merupakan frekuensi transduser dan A bernilai $(\sqrt{\log 2})/(\pi \times bw)$. Fungsi Gaussian dapat disubstitusi dengan fungsi sinusoidal karena ingin mendapatkan bentuk pulsa dengan *bandwidth* tertentu yang berjalan. Sementara nilai A pada persamaan di atas merepresentasikan fungsi yang akan mengatur lebar dari pulsa yang dihasilkan (*bandwidth*). Agar pulsa



Gambar 4.6: Boundary Condition

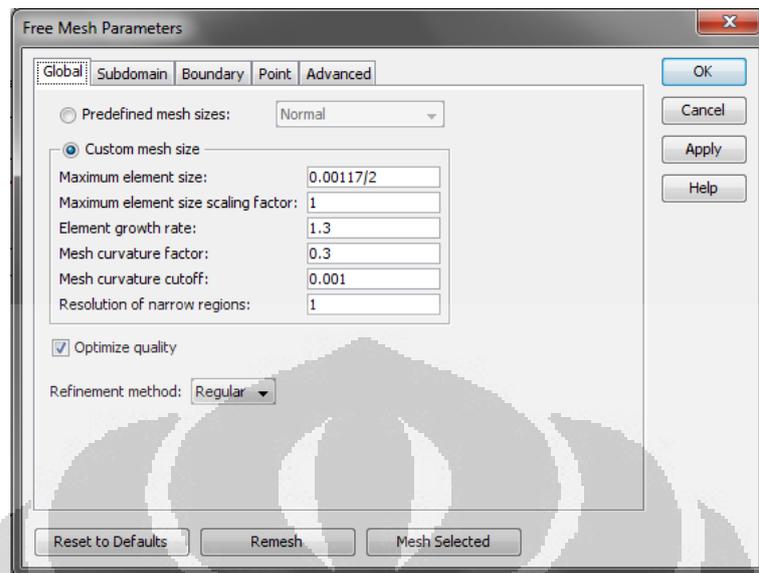
yang dihasilkan terlihat proporsional, maka pengaturan *bandwidth* ber-orde sebesar frekuensi yang digunakan yaitu dalam satuan MHz.

4. *Mesh Parameter*

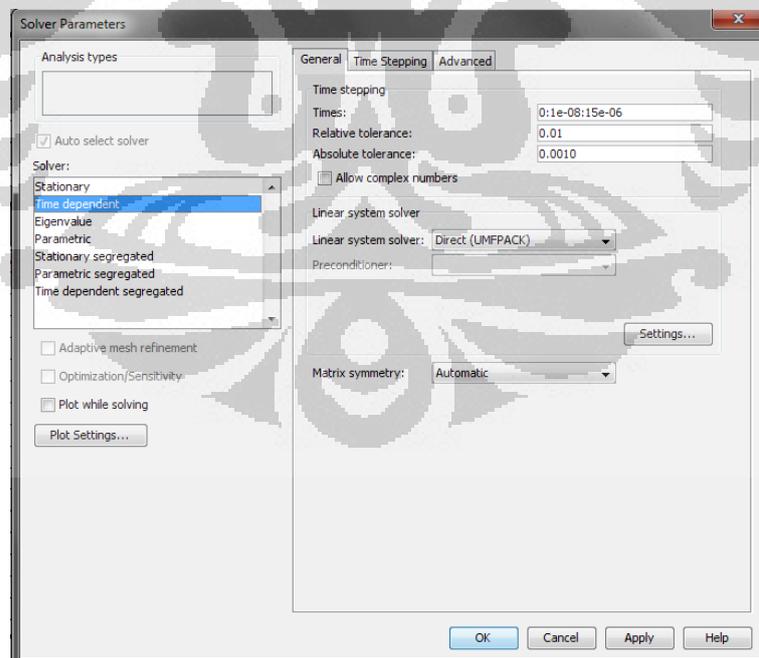
Mesh merupakan bagian dari model geometri yang terdiri dari unit-unit kecil dengan bentuk yang sederhana (triangular atau quadrilateral). Ukurnya dapat diatur sekecil apapun sesuai dengan kemampuan tingkat komputasi dari komputer yang digunakan. *Meshing* merupakan suatu metode bagian dari Metode Elemen-Hingga untuk menyelesaikan suatu kasus dimana domain kasus akan dibagi kedalam beberapa bagian kecil. Agar kondisi simulasi cukup stabil, maka ukuran *mesh* diatur hingga lebih kecil dari ukuran panjang gelombang yang merambat pada medium. Jumlah elemen dari *mesh* ini akan berhubungan langsung dengan keakuratan dari solusi. Semakin banyak jumlah elemen yang digunakan maka semakin kecil error yang dihasilkan. Namun demikian, banyaknya jumlah elemen *mesh* akan berkenaan dengan besarnya memori komputasi yang digunakan. Ukuran *mesh* yang digunakan bervariasi sekitar $1/2\lambda$. Penentuan ini dibatasi pada kemampuan komputer saat melakukan *looping* pengambilan data.

5. *Solve Parameter*

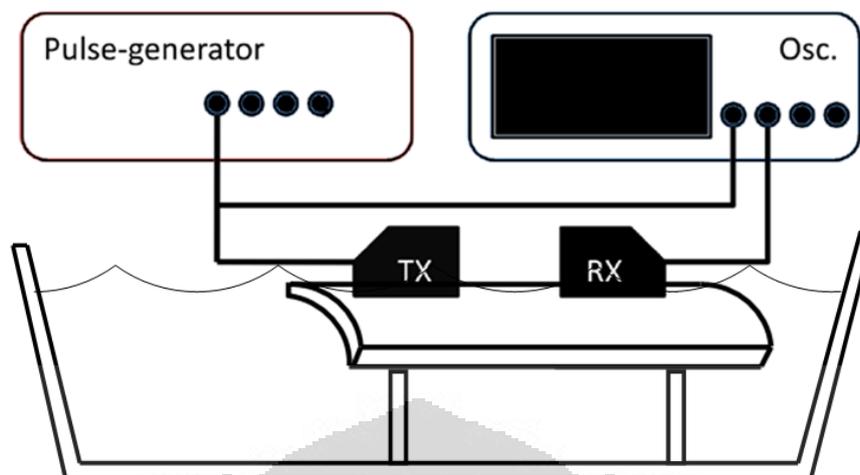
COMSOL Multiphysics memiliki beberapa *solver* yang disesuaikan dengan kasus. Kasus yang digunakan pada pemodelan ini adalah bergantung terhadap waktu (*time-dependent*). Oleh karena itu digunakan *Time-dependent Solver*. Dan *time steps* yang digunakan adalah waktu yang dibutuhkan gelombang merambat sejauh ukuran *mesh*.



Gambar 4.7: Parameter Mesh



Gambar 4.8: Time-dependent Solver



Gambar 4.9: Diagram Skematik Ultrasonic-Testing



Gambar 4.10: SonaCTx 001 DAS PT. Edwar Technology

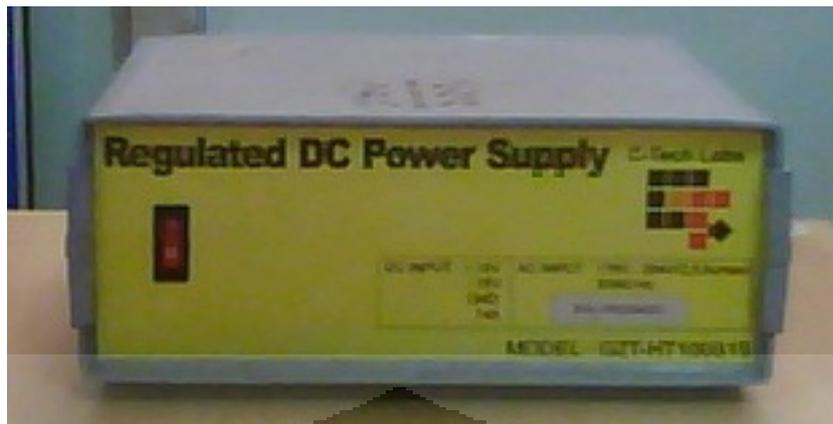
4.2 Metode Eksperimen *Ultrasonic-Testing*

4.2.1 Deskripsi Sistem

Sistem SonaCTx 001 *Ultrasonic Testing* terdiri dari beberapa perangkat seperti Generator Pulsa (SonaCTx DAS PT EDWAR TECHNOLOGY), *Oscilloscope* (Tektronix TDS2014B), Transduser Ultrasonik (TO19967 dan TO19966 SONATEST) [13].

4.2.2 Prinsip Kerja

Sebuah *pulse-generator* akan aktif menghasilkan gelombang listrik pulsa dengan amplitudo sebesar 1.72 volt dengan frekuensi $3,90 \pm 0,10$ MHz. Sinyal ultrasonik yang diemisikan ke dalam dinding tabung akan bertransmisi dari *transmitter* hingga mencapai *receiver*. Pada osiloskop akan ditampilkan data sinyal *transmitter* dan *receiver*.



Gambar 4.11: Regulated DC Power Supply PT. Edwar Technology



Gambar 4.12: Oscilloscope Tektronix TDS 2014B



Gambar 4.13: Transduser Ultrasonik TO19967 dan TO19966 4 MHz Sonatest



Gambar 4.14: Spesimen Tabung CNG

Untuk menurunkan besar impedansi akustik antara permukaan transduser dengan permukaan tabung, maka dibutuhkan *couplant* yang berupa air.

Pada sistem ini besarnya intensitas relatif dalam desibel (dB) akan memberikan gambaran umum dari kondisi cacat dari tabung. Berikut merupakan persamaan intensitas relatif perbandingan sinyal ketika terdapat keretakan dengan tanpa keretakan:

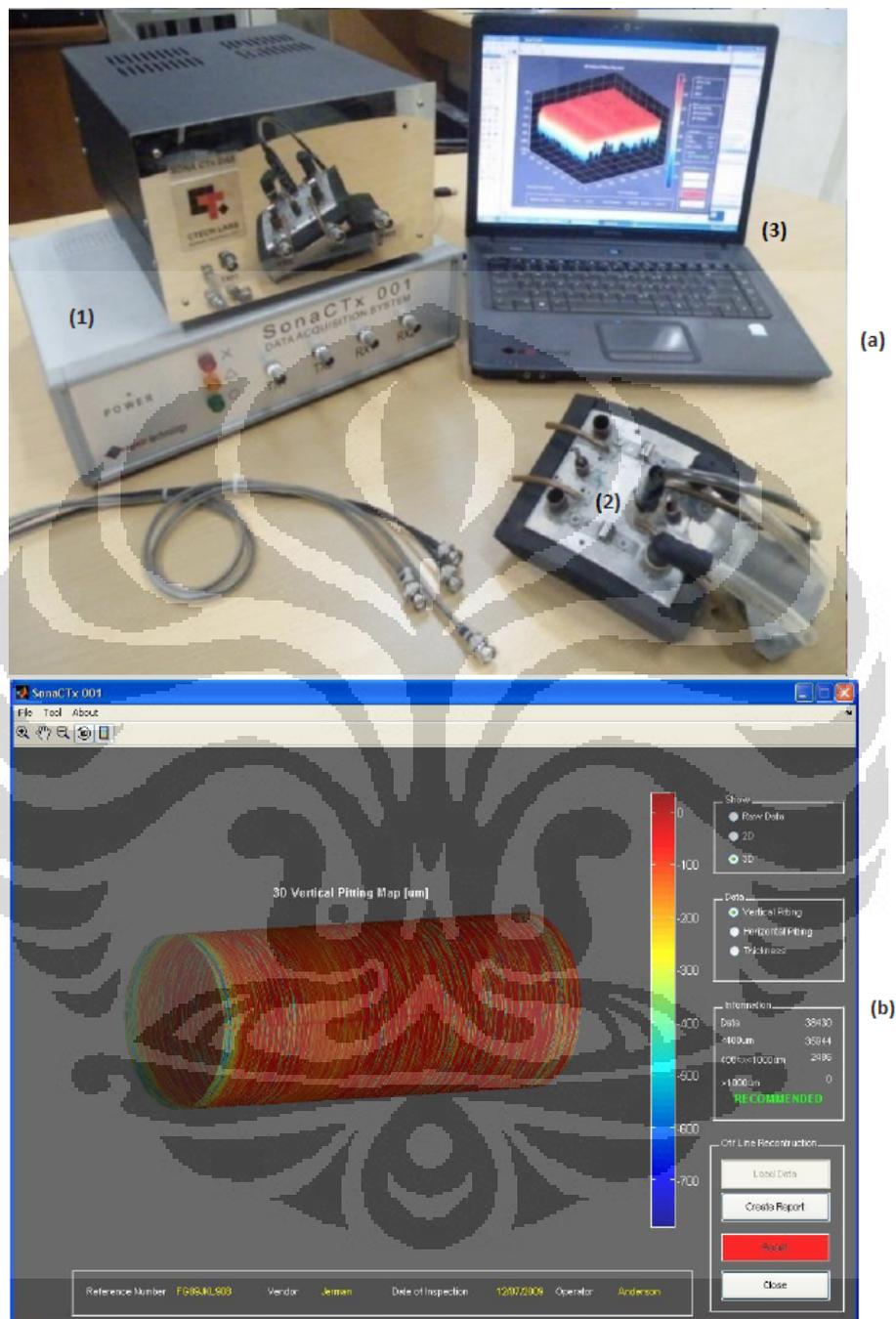
$$dB = 20 \log\left(\frac{A_2}{A_1}\right)$$

dimana intensitas relatif dalam satuan desibel (dB), A_2 merupakan amplitudo sinyal ketika terdapat keretakan dan A_1 merupakan amplitudo sinyal tanpa terdapat keretakan.

Dalam keadaan normal dimana sebuah permukaan dalam tabung tidak memiliki keretakan, maka hampir semua sinyal yang ditransmisikan oleh transmitter akan diterima oleh *receiver* (dengan mengalami efek atenuasi). Sedangkan pada keadaan abnormal dimana terdapat sebuah keretakan di dalam tabung maka keretakan tersebut akan menghambat jalannya gelombang ultrasonik yang dipancarkan. Intensitas sinyal yang diterima akan berkurang jika dibandingkan dengan keadaan normal, karena sinyal yang merambat akan terdifraksi ke berbagai arah.

4.3 Sistem Otomatis Scanner SonaCTx 001

Sistem Scanner SonaCTx 001 merupakan alat pencitraan *non-destructive testing* (NDT) yang mengkombinasikan gelombang ultrasonik moda transmisi dan refleksi sehingga memberikan hasil resolusi gambar yang tinggi untuk mendeteksi *pitting* (lubang), keretakan, dan korosi yang berukuran beberapa ratus mikron pada dinding tabung bagian dalam. Sistem ini didesain untuk menginspeksi keretakan pada tabung *compressed natural gas* (CNG) bertekanan tinggi (lebih dari 250 bar). Sistem ini menyatukan antara *data acquisition system* (DAS), sistem *software* komputer analisis sinyal dan rekonstruksi gambar, serta alat *scanning gantry* dengan kepala sensor untuk melakukan *scanning* secara otomatis. *Software* rekonstruksi gambar-nya dapat menghasilkan pola 2D dan 3D.



Gambar 4.15: (a). Sistem Scanner SonaCTx 001 yang terdiri dari: 1. Pulse Generator DAS SonaCTx 001; 2. Head Transducer; 3. Computer System serta (b). Hasil Rekonstruksi Gambar 3D Tabung CNG

Lisensi: PT. Edwar Technology



Gambar 4.16: Automatic Scanning Gantry System
Lisensi: PT. Edwar Technology

Bab 5

Hasil dan Pembahasan

Bab ini akan menguraikan hasil data yang diperoleh dari metode simulasi dan eksperimen berikut pembahasannya. Ada dua jenis simulasi yang dibuat yaitu, simulasi berbentuk dua dimensi (2D) dan simulasi berbentuk tiga dimensi (3D). Pada semua simulasi yang dilakukan bentuk gelombang yang dimodelkan adalah berbentuk pulsa. Frekuensi gelombang sebesar 4 MHz dengan amplitudo bernilai 1.

5.1 Hasil dan Pembahasan Metode Simulasi 2D dan 3D

5.1.1 Hasil Pola Sinyal dan *Plot Solution*

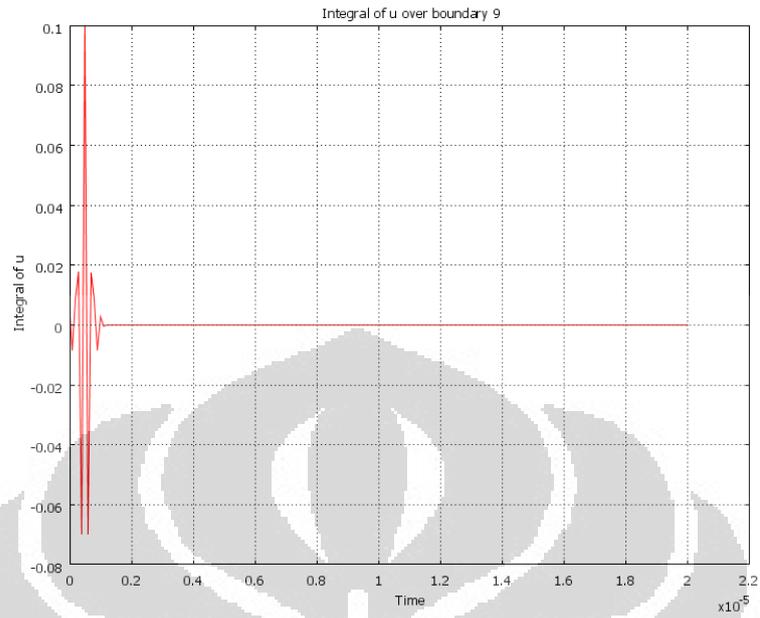
Secara umum simulasi ini bertujuan untuk melihat hasil pola sinyal di bagian *transmitter* dan *receiver*. Gambar (5.1) menunjukkan pola sinyal yang dihasilkan oleh *transmitter*. Pola sinyal yang terlihat sangat tipis karena sinyal yang diberikan memiliki frekuensi 4 MHz dengan *bandwidth* 2 Mhz sehingga terlihat seperti pola impuls gelombang yang sangat singkat. Pada bagian ini sinyal masih berbentuk proporsional dalam arti tidak ada *noise* yang terjadi. Sedangkan gambar (5.2) menunjukkan pola sinyal yang diterima pada bagian *receiver*. Dari gambar terlihat bahwa sinyal yang diterima *receiver* seperti mengalami efek *noising*. Hal ini terjadi akibat sinyal yang diberikan berjalan di tiga medium yang berbeda yaitu, medium *wedge* transduser, medium air yang bertindak sebagai *couplant* serta medium tabung itu sendiri. Dengan terjadinya pergantian medium, maka gelombang yang dipancarkan dalam hal ini merupakan *compression waves* mengalami efek difraksi sesuai dengan Hukum Snellius serta efek *mode conversion* yang mengakibatkan perubahan moda gelombang secara parsial (sebagian). Dengan demikian terdapat dua jenis gelombang yang eksis yaitu antara *compression waves* (gelombang logitudinal) dengan *refracted shear waves* (gelombang transversal). Karena interval jarak *sound path* antara *transmitter* dan *receiver* cukup dekat, maka keduanya cukup sulit dibedakan sehingga yang terlihat hanya seperti efek *random noise*. Jadi sulit untuk mengatakan bahwa sinyal dengan amplitudo yang lebih rendah yang berjalan dibelakang sinyal utama pada gambar (5.2) merupakan *refracted shear waves*. Perlu dipahami bahwa pola sinyal pada *dual*

angle beam transducer tidak akan menghasilkan sinyal *echo*, karena sinyal berjalan menuju *receiver* yang berbeda posisi dengan *transmitter*. Karakteristik sinyal *echo* berbeda dengan sinyal yang terlihat pada gambar (5.2) karena sinyal *echo* umumnya terjadi pada waktu yang cukup jauh dari sinyal utama (terpisah dari sinyal utama). Namun yang terjadi adalah efek atenuasi yang menyebabkan berkurangnya intensitas sinyal.

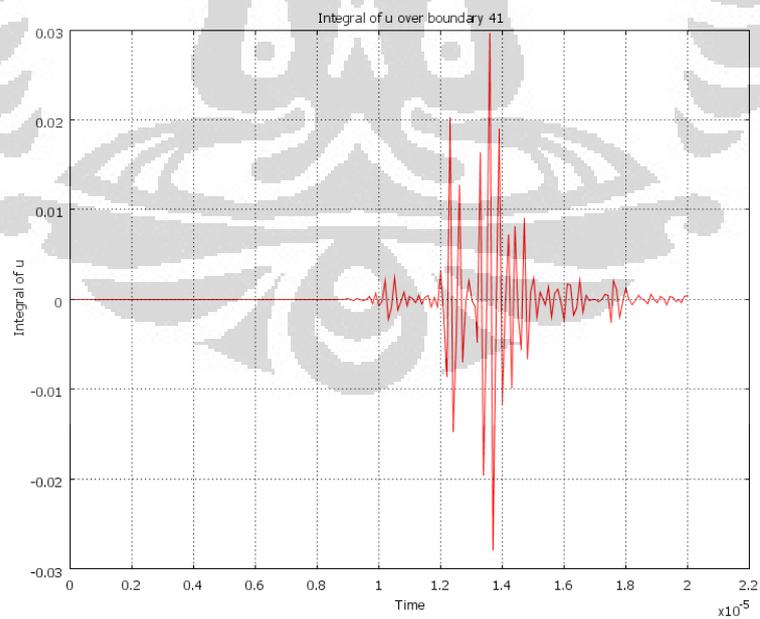
Selanjutnya dari hasil *plot solution* yang menunjukkan nilai fungsi gelombang (u) serta pola sinyal yang didapatkan pada bagian *transmitter* dan *receiver* saat terdapat sebuah keretakan (*crack*) dengan ketinggian tertentu yaitu pada gambar (5.3) untuk 2D dan (5.4) untuk 3D. Sedangkan gambar (5.5) dan (5.6) menunjukkan hasil *times series* pola dan nilai dari fungsi gelombang (u) pada simulasi 2D serta gambar (5.7) dan (5.8) menunjukkan hasil *time series* pola dan nilai dari fungsi gelombang (u) pada simulasi 3D. Keduanya memiliki *time series* yang sama yaitu dari $1e-6$ s hingga $10e-6$ s. Pada gambar (5.5) dan (5.6) pada geometri 2D, kita dapat melihat *contour* perambatan gelombang ultrasonik dengan frekuensi 4 MHz melalui tiga medium (bahan *wedge sensor*, air, dan tabung baja) yang berbeda sehingga terjadi efek refraksi (pembelokan gelombang). Secara langsung terlihat pola gelombang yang berbeda ukuran di tiga medium tersebut karena ketiganya memiliki perbedaan karakteristik dari kecepatan perambatan gelombang pada masing-masing medium. Gelombang longitudinal (*compression waves*) di *wedge transducer* memiliki kecepatan 2760 m/s; di medium air memiliki kecepatan 1500 m/s; sedangkan pada tabung baja memiliki kecepatan 5850 m/s. Dengan perubahan kecepatan gelombang, maka panjang gelombangnya pun akan berbeda. Sedangkan pada gambar (5.7) dan (5.8) secara 3D, kita dapat melihat pada permukaan *couplant* dan tabung, sinyal yang ditransmisikan memiliki bentuk radian (pola longitudinal) di sekitar *transmitter* hingga akhirnya menuju *receiver*. Dari *colour map* baik secara 2D maupun 3D, terlihat bahwa ketika sinyal (gelombang) telah mencapai bagian *receiver*, warna yang dilihat tidak terlalu kontras. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi efek atenuasi yang sangat besar sehingga sinyal mengalami peredaman. Berdasarkan konsep penggunaan *couplant*, yang menyatakan bahwa penggunaan air sebagai *couplant* mengakibatkan intensitas sinyal yang diterima hanya kurang dari 12%; dapat dikatakan cukup valid bahwa peredaman intensitas sinyal sangat besar.

5.1.2 Simulasi Pengukuran Intensitas Sinyal dengan Penambahan Kedalaman Retak Tabung

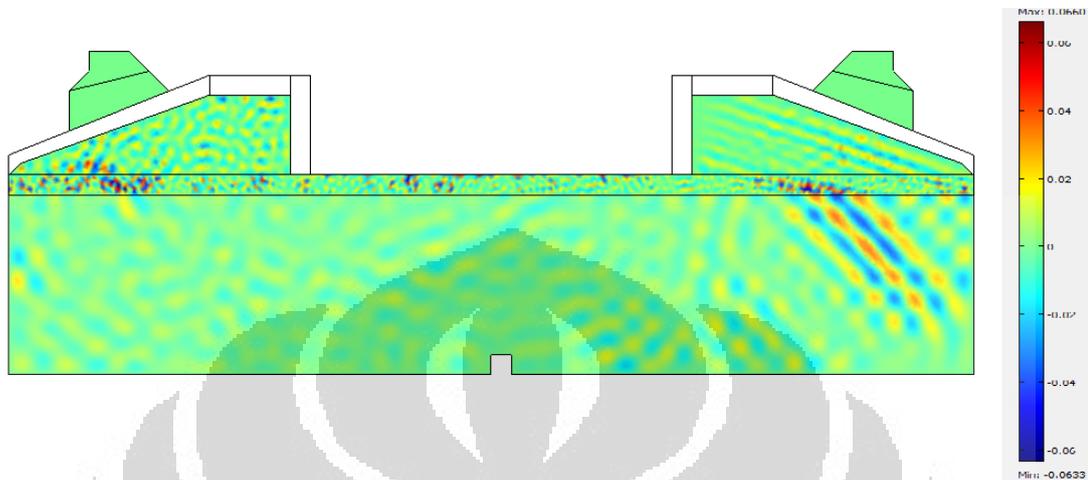
Sebuah keretakan (*crack*) pada tabung dapat disebabkan oleh berbagai akibat, misalkan cacat bawaan tabung, proses pengelasan (*welding*) yang tak sempurna, maupun akibat eksternal lainnya. Keretakan yang mungkin terjadi pada tabung baja dalam orde ratusan mikron (0.1 mm) hingga milimeter, sehingga pada umumnya pada proses NDT biasa digunakan transduser dengan frekuensi berorde ratusan kHz hingga MHz. Pemilihan frekuensi transduser akan sangat penting karena dengan semakin besar frekuensi maka ukuran sebuah keretakan yang mungkin dideteksi akan sangat kecil. Namun ada hal lain yang perlu dipertimbangkan yaitu dengan semakin besar frekuensi daya penetrasi ke dalam ta-



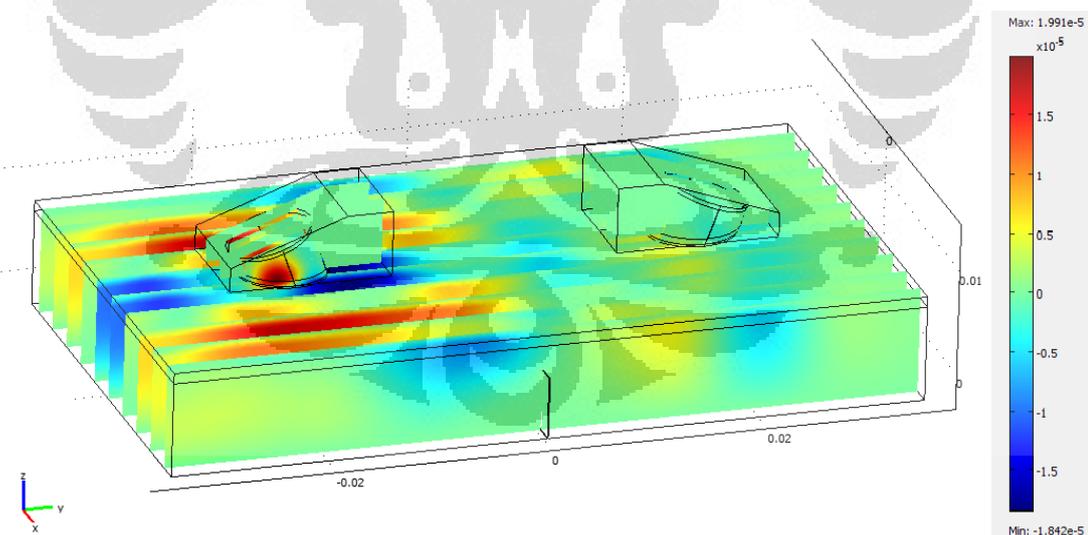
Gambar 5.1: Pola Sinyal pada Bagian Transmitter



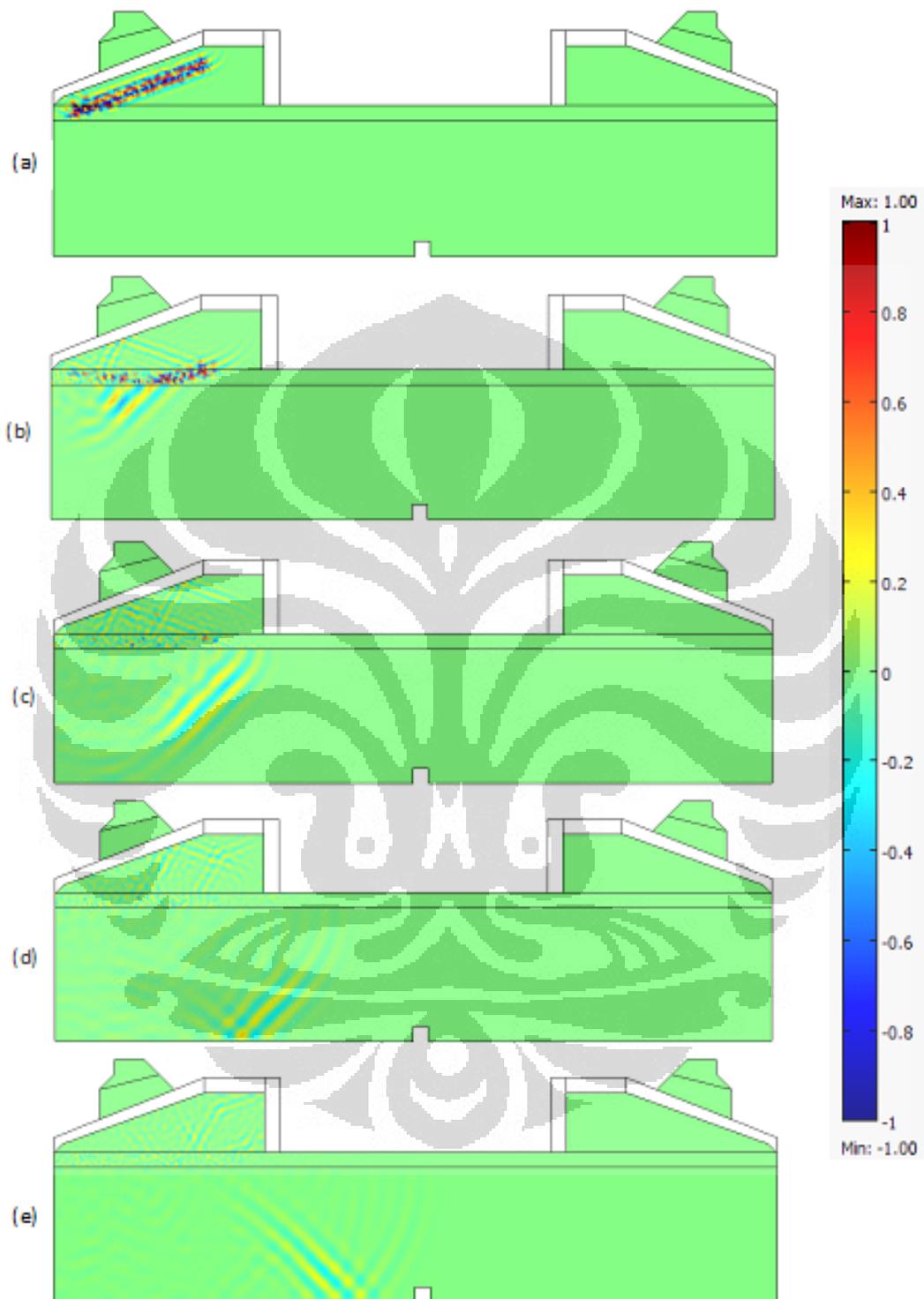
Gambar 5.2: Pola Sinyal pada Bagian Receiver



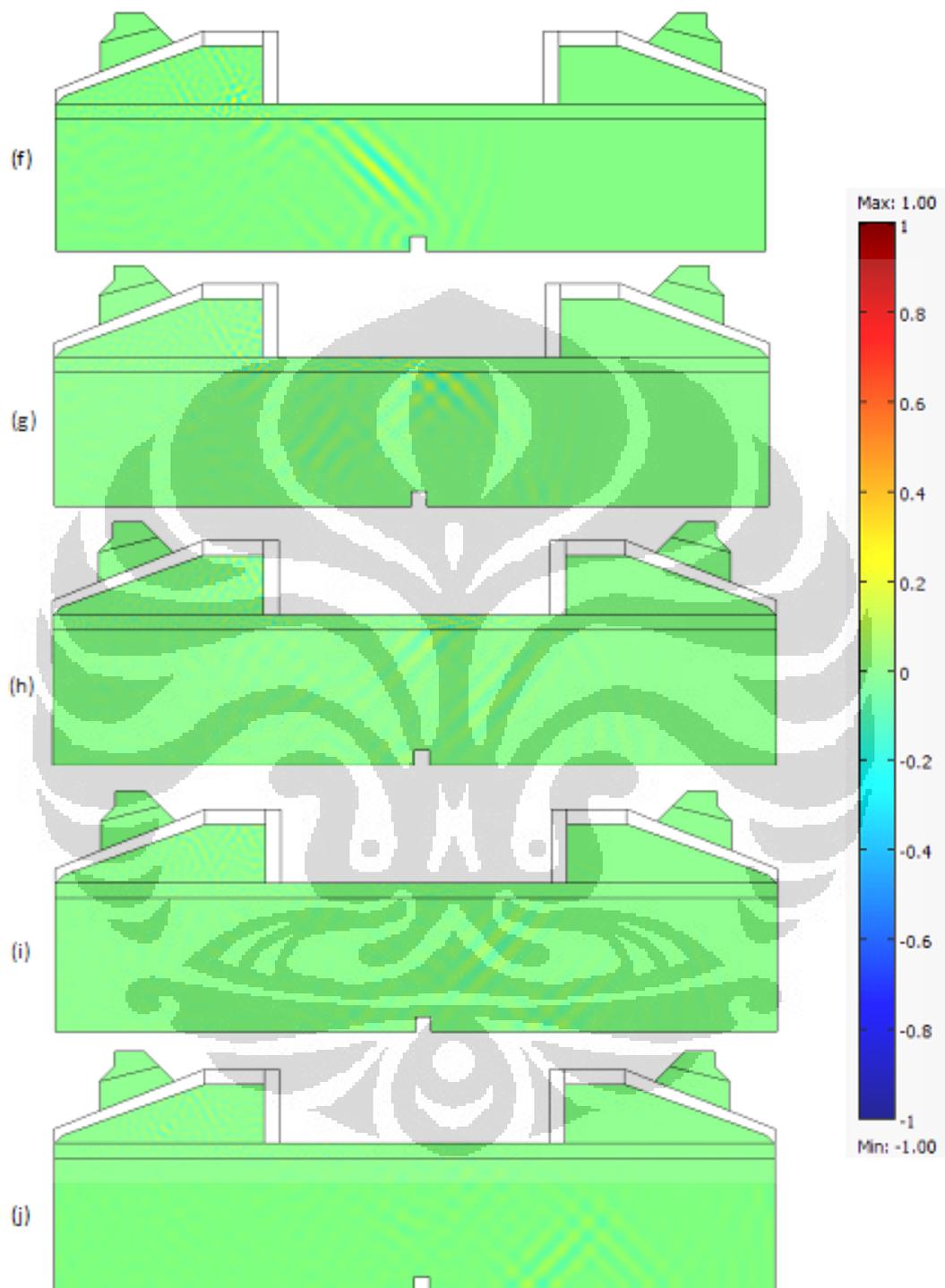
Gambar 5.3: Plot Solution Simulasi 2D pada Time $1.24e-5$ s



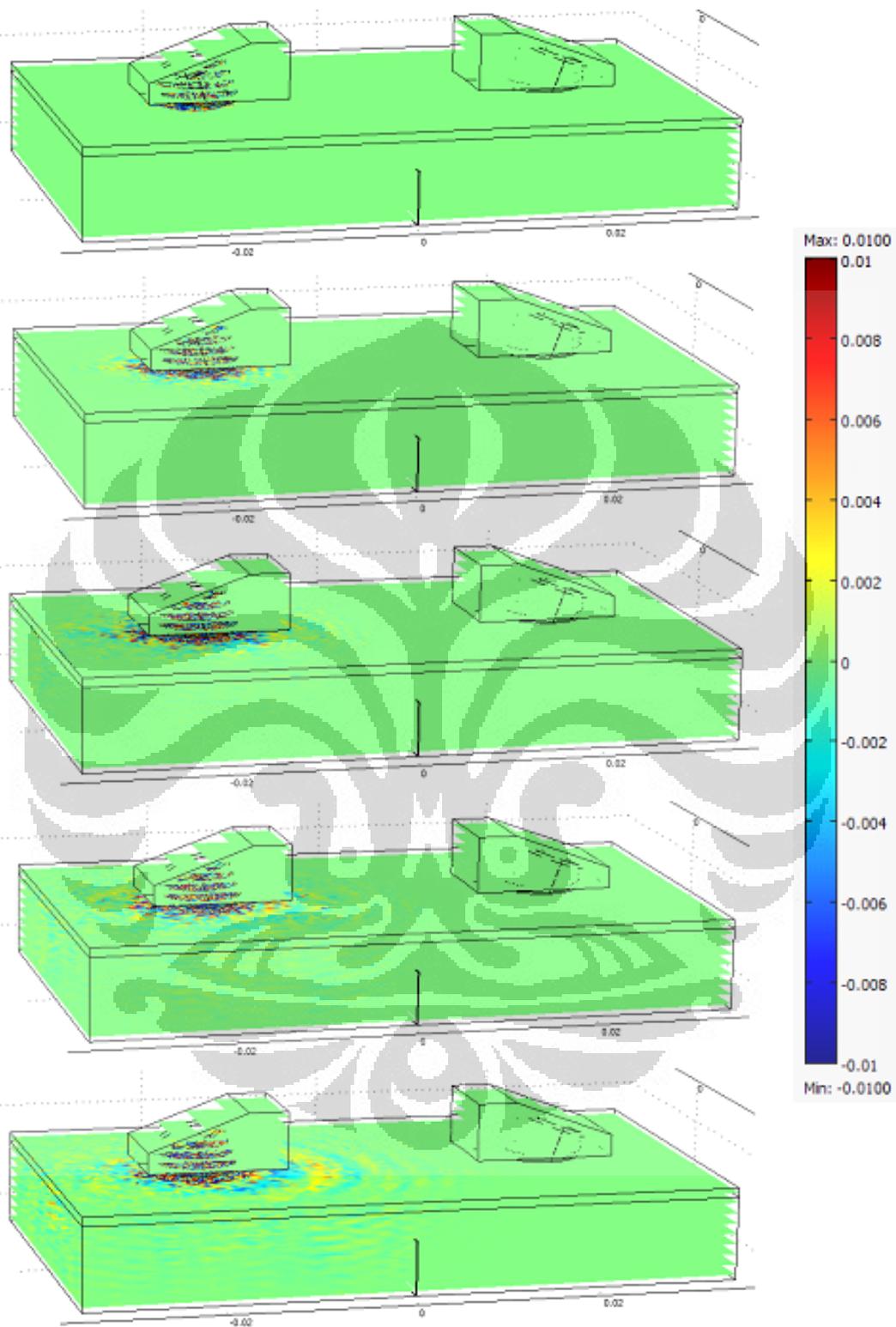
Gambar 5.4: Plot Solution Simulasi 3D pada Time $1.3e-5$ s



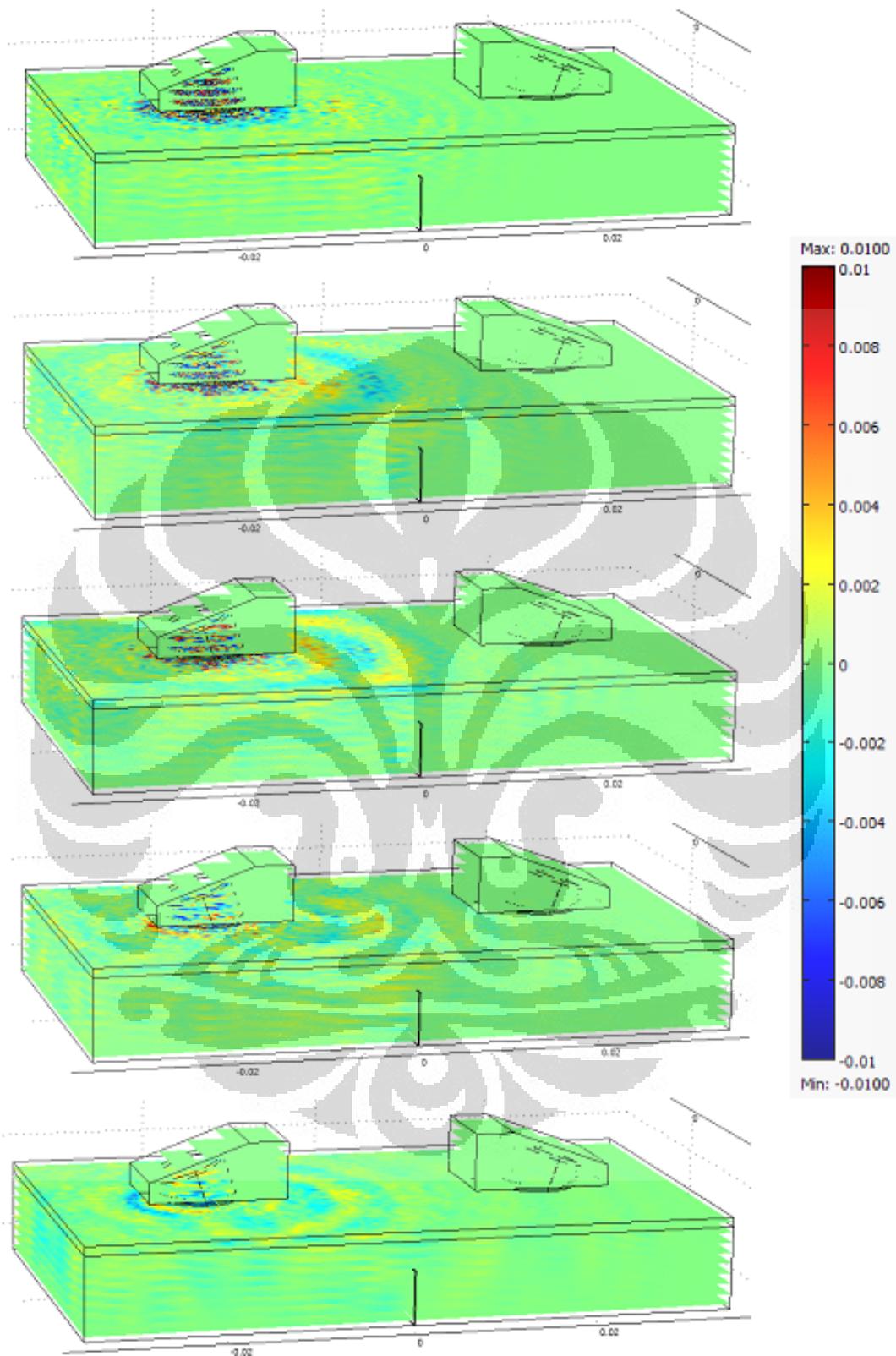
Gambar 5.5: Time Series Simulasi 2D: (a). Time= 1×10^{-6} s; (b). Time= 2×10^{-6} s; (c). Time= 3×10^{-6} s; (d). Time= 4×10^{-6} s; (e). Time= 5×10^{-6} s;



Gambar 5.6: Time Series Simulasi 2D: (f). Time= 6×10^{-6} s; (g). Time= 7×10^{-6} s; (h). Time= 8×10^{-6} s; (i). Time= 9×10^{-6} s; (j). Time= 10×10^{-6} s;



Gambar 5.7: Time Series Simulasi 3D: (a). Time= $1e-6$ s; (b). Time= $2e-6$ s; (c). Time= $3e-6$ s; (d). Time= $4e-6$ s; (e). Time= $5e-6$ s;



Gambar 5.8: Time Series Simulasi 3D: (f). Time= $6e-6$ s; (g). Time= $7e-6$ s; (h). Time= $8e-6$ s; (i). Time= $9e-6$ s; (j). Time= $10e-6$ s;

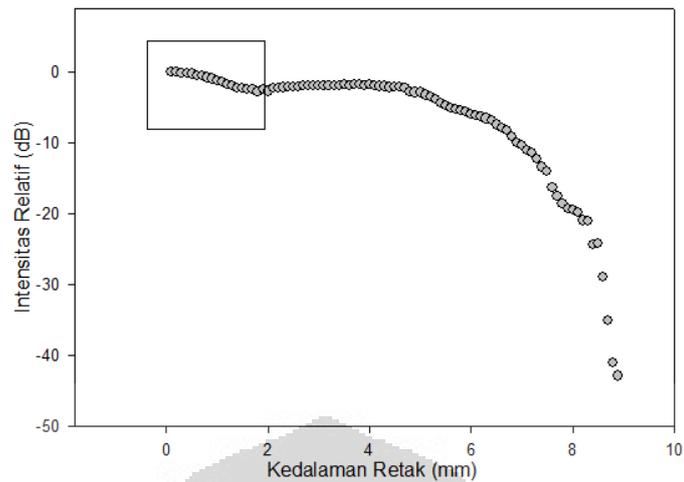
bung oleh transduser akan semakin kecil, hal ini diakibatkan panjang gelombang yang kecil mudah untuk diredam oleh kepadatan struktur molekul tabung.

Dalam kasus ini keretakan yang dapat dideteksi sesuai dengan orde panjang gelombang yang terjadi pada medium tabung baja yaitu 0.00117 m yang didapatkan dari kecepatan gelombang pada tabung (5850 m/s) dibagi dengan frekuensi transduser 4 MHz. Sebuah keretakan dapat memantulkan kembali sinyal yang mengenainya karena keretakan merupakan sebuah rongga yang kemungkinan besar terisi oleh udara dengan impedansi akustik yang rendah sehingga terjadi efek diskontinuitas karena perbedaan impedansi akustik yang besar antara kedua medium. Dengan demikian, proposi sinyal yang dipantulkan (direfleksikan) akan jauh lebih besar dari sinyal yang diteruskan (ditransmisikan) sehingga bagian *receiver* akan menerima sinyal dengan intensitas yang lebih kecil. Nilai estimasi standar error dari hasil *fitting* kurva pada grafik intensitas relatif sinyal 2D hingga kedalaman retak mencapai 2 mm yaitu 0,0980 dengan nilai deviasi standar R adalah 0,9960. Sedangkan hasil *fitting* kurva pada grafik intensitas relatif sinyal 3D hingga kedalaman retak mencapai 2 mm yaitu 1,1573 dengan nilai deviasi standar R adalah 0,9847 (*fitting* dengan pendekatan polinomial pangkat 3).

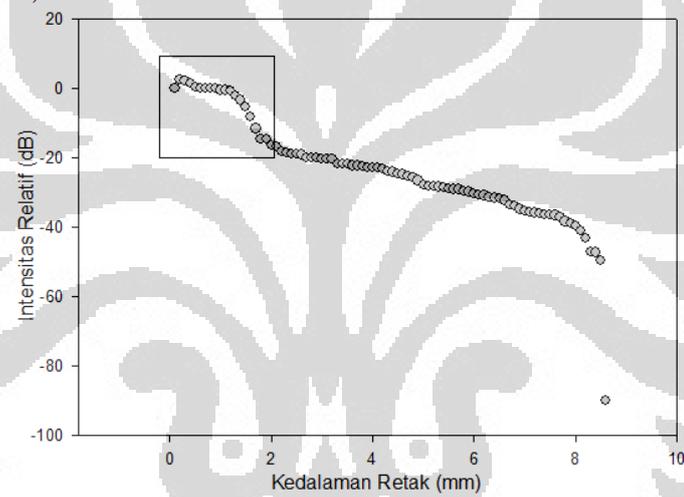
Grafik (5.9) dan (5.10) merupakan grafik intensitas relatif sinyal yang diterima *receiver* pada proses simulasi 2D dan 3D. Dikatakan sebagai intensitas relatif dalam satuan desibel (dB) karena semua sinyal yang ada dibandingkan dengan sinyal awal (*initial*) pada *receiver* yang dianggap sebagai sinyal yang diterima dengan keadaan tanpa keretakan. Berdasarkan grafik (5.11) dan (5.12) kita dapat melihat tren pola penurunan intensitas yang cukup proporsional baik secara 2D maupun 3D. Namun, dari keduanya dapat diketahui bahwa pengurangan intensitas sinyal akan sangat signifikan setelah kedalaman retak lebih dari 0.5 mm yaitu berkurang 0.4 dB setiap penambahan 0.1 mm.

5.1.3 Simulasi Pengukuran Potensial Sinyal dengan Penambahan Lebar Retak Tabung

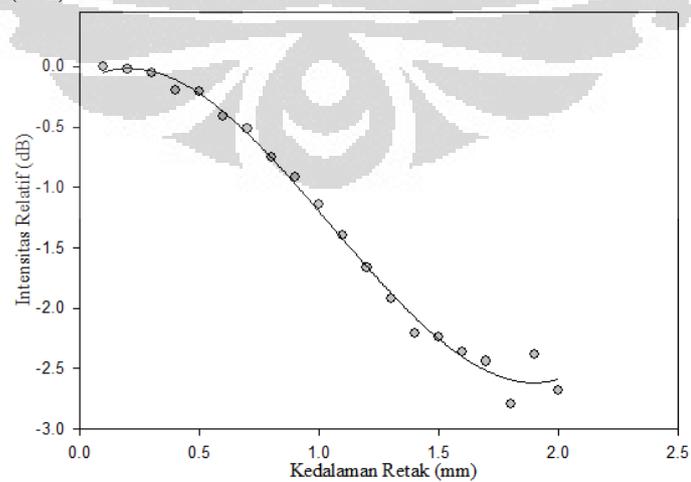
Simulasi ini bertujuan untuk melihat tren perubahan potensial sinyal ketika terjadi penambahan lebar suatu keretakan baik secara 2D maupun 3D. Metode simulasi adalah dengan memperlebar keretakan sebesar 1 mm dengan kedalaman retak konstan sekitar $\frac{2}{3}$ dari ketebalan tabung. Posisi keretakan konstan berada ditengah antara *transmitter* dan *receiver*. Dari grafik (5.13) terlihat bahwa potensial akan terus berkurang seiring dengan penambahan lebar retak dan memiliki nilai terendah saat lebar keretakan mencapai 9 mm. Namun setelah itu akan mengalami kenaikan potensial hingga akhirnya maksimum pada lebar retak sekitar 20 mm. Hal ini terjadi akibat pada rentang 10 s/d 20 mm, posisi perambatan gelombang sudah langsung berada diatas keretakan sehingga tidak ada efek pemantulan akibat keretakan. Namun hal yang sangat kontras terjadi pada gambar (5.14) pola 3D dimana potensial terendah terjadi saat lebar keretakan mencapai sekitar 2 mm. Keadaan demikian sangat bergantung dari sudut gelombang transmisi yang merambat di tabung yang berelasi dengan sudut gelombang *transmitter*. Dari simulasi ini dapat dikatakan bahwa sistem *ultrasonic-testing* hanya akan dapat mengukur perubahan potensial dengan baik (proporsional)



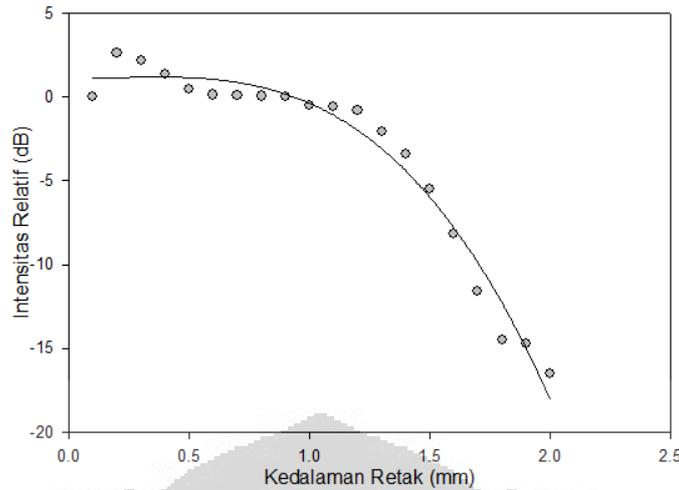
Gambar 5.9: Grafik Intensitas Relatif Sinyal dengan Penambahan Kedalaman 1 Buah Retak (2D)



Gambar 5.10: Grafik Intensitas Relatif Sinyal dengan Penambahan Kedalaman 1 Buah Retak (3D)



Gambar 5.11: Grafik Intensitas Relatif Sinyal dengan Penambahan Kedalaman Retak Hingga 2 mm (2D)

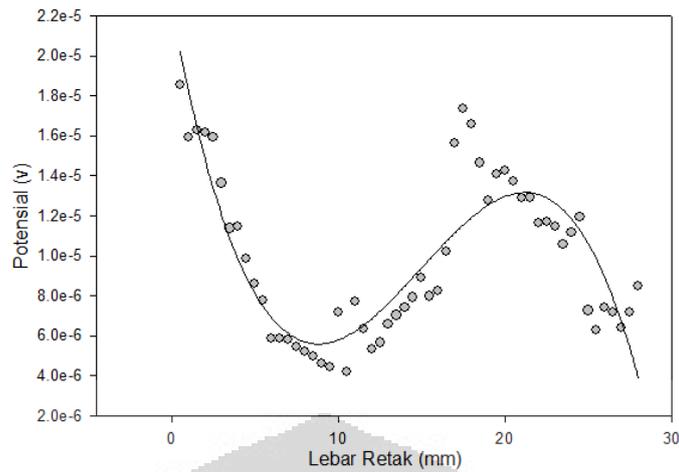


Gambar 5.12: Grafik Intensitas Relatif Sinyal dengan Penambahan Kedalaman Retak Hingga 2 mm (3D)

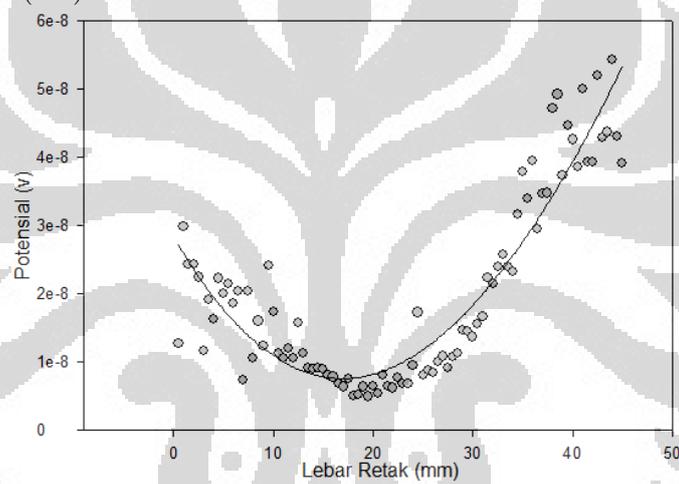
pada rentan lebar keretakan mencapai 10 mm.

5.1.4 Simulasi Pengukuran Potensial Sinyal dengan Perubahan Posisi Retak Tabung

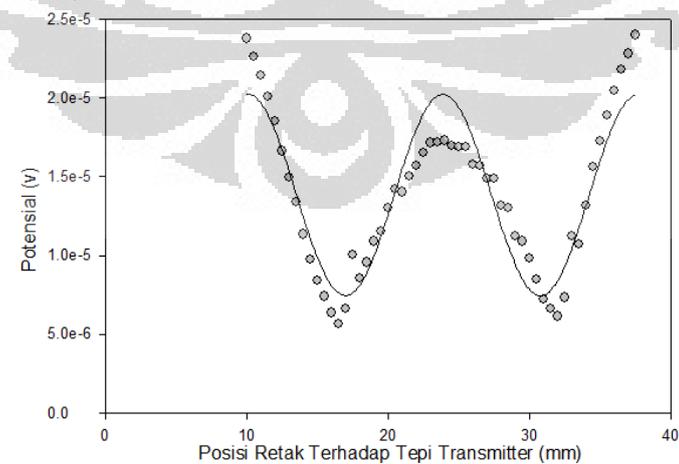
Simulasi ini bertujuan untuk melihat tren perubahan potensial sinyal terhadap perubahan posisi retak tabung terhadap *transmitter*. Dari grafik (5.15) pola 2D terlihat bahwa potensial mengalami nilai minimum pada posisi 17 dan 32 mm dari tepi *transmitter* yang masing-masing memiliki jarak yang sama yaitu 2 mm terhadap posisi tepi *transmitter* dan *receiver*. Pola yang didapat seperti efek refleksi (percerminan) dari salah satu bagian, namun pada dasarnya yang terjadi bahwa sinyal bergerak searah dari *transmitter* menuju *receiver*. Kedua posisi ini menunjukkan bahwa sinyal paling banyak direfleksikan kembali oleh sebuah keretakan pada kedalaman tertentu ($2/3$ dari ketebalan retak). Dari pola yang terlihat mengindikasikan bahwa ketepatan waktu pengiriman sinyal impuls akan sangat berpengaruh terhadap pengujian *dual-beam transducer* pada material tabung yang bergerak karena perbedaan selang waktu pengiriman sinyal akan mengakibatkan perbedaan posisi retak sehingga menyebabkan perbedaan hasil potensial yang terukur. Pada pola 2D gambar (5.15) dan pola 3D (5.16), didapatkan pola tren perubahan potensial yang sangat berbeda. Kemungkinan hal ini terjadi karena pola 3D dapat menghasilkan penyebaran (divergensi) sinyal yang bebas sehingga sinyal yang diterima bukan hanya sinyal yang merambat lurus menuju *receiver*, namun juga akibat sinyal yang berasal dari pemantulan baik sisi kiri maupun sisi kanan tabung.



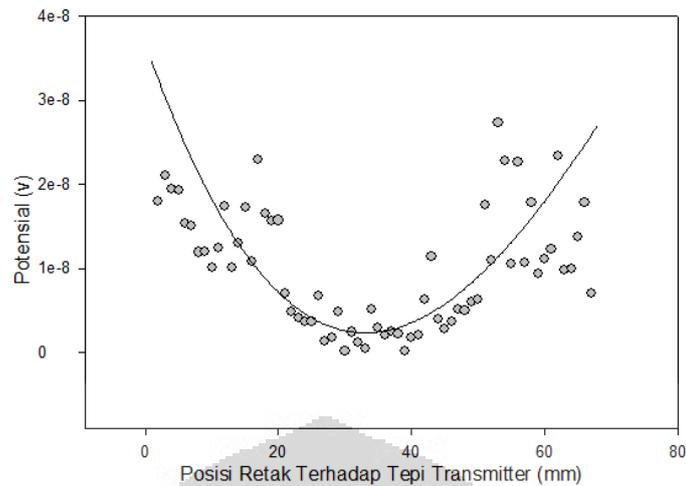
Gambar 5.13: Grafik Potensial Penambahan Lebar Retak dengan Kedalaman Retak Konstan (2D)



Gambar 5.14: Grafik Potensial Penambahan Lebar Retak dengan Kedalaman Retak Konstan (3D)



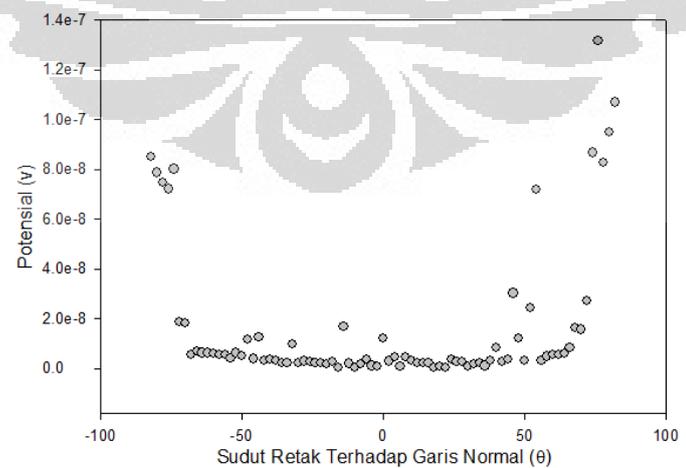
Gambar 5.15: Grafik Potensial Perubahan Posisi Retak terhadap Tepi Transmitter (2D)



Gambar 5.16: Grafik Potensial Perubahan Posisi Retak terhadap Tepi Transmitter (3D)



Gambar 5.17: Grafik Potensial Perubahan Sudut Retak dengan Kedalaman Retak Konstan (2D)



Gambar 5.18: Grafik Potensial Perubahan Sudut Retak dengan Kedalaman Retak Konstan (3D)

5.1.5 Simulasi Pengukuran Potensial Sinyal dengan Perubahan Sudut Retak

Simulasi ini bertujuan untuk melihat perubahan potensial terhadap orientasi sudut retak. Dari grafik (5.17) dan (5.18) terlihat bahwa daerah sudut retak positif dan negatif terhadap garis normal memiliki nilai potensial yang sebanding. Pada sudut retak 0° s/d 35° tidak dapat terlihat perubahan nilai potensial yang berarti. Ada hal yang menarik yaitu pada *range* sudut retak 35° s/d 65° terjadi fluktuasi potensial yang berpuncak pada sudut 50° . Hal ini berkaitan dengan sudut sinyal yang merambat pada medium tabung. Pada *range* sudut 35° s/d 50° sebagian besar perambatan sinyal terjadi di atas keretakan yang menyebabkan potensial sinyal bertambah besar sedangkan pada *range* sudut 50° s/d 65° , perambatan sinyal terjadi pada bawah keretakan yang menyebabkan potensial sinyal semakin berkurang.

5.2 Hasil dan Pembahasan Metode Eksperimen

Eksperimen *ultrasonic-testing* ini menggunakan Sistem DAS SonaCTx 001 produksi PT. Edwar Technology dengan sepasang transduser yang telah dirakit secara sejajar dengan jarak sekitar 1,5 cm. *Couplant* yang digunakan pada sistem ini adalah air sehingga energi yang dapat diserap oleh bahan uji hanya sekitar $\pm 12\%$ (berdasarkan literatur). Untuk menjaga agar sistem pengujian bersifat ideal, air diletakkan di dalam wadah *carrier* sehingga kondisi air dalam pengujian dalam keadaan tenang. Spesimen bahan uji tabung diletakkan di bawah *head transducer* yang terletak di dalam air sehingga pengujiannya seperti pengujian *immersion testing* (uji dengan keadaan "tercelup" fluida).

5.2.1 Pola Sinyal Hasil Eksperimen (Display Oscilloscope Tektronix TDS 2014B)

Data berupa pola sinyal yang berasal dari *transmitter* (5.19) maupun yang didapatkan pada bagian *receiver* (5.20) dan (5.21), keduanya diambil secara manual dengan menggunakan osiloskop Tektronix TDS 2014 yang dapat menyimpan data baik dalam bentuk gambar maupun nilai *sequence* dari pola sinyal yang didapat. Sedangkan pola keretakan yang dapat dibuat yaitu pola persegi panjang dengan lebar konstan ± 1.5 mm dan kedalaman yang bertambah yang dibuat secara manual. Kedalaman akhir yang dilakukan eksperimen tidak lebih dari 2 mm karena karakteristik *crack* (keretakan) yang ingin dianalisis tidak lebih dari itu. Berdasarkan literatur ISO 11439 yang menyebutkan bahwa batas keretakan tabung yang masih diperbolehkan kurang dari 5%. Sedangkan kedalaman sekitar 1.8 mm (10%) semata untuk memudahkan melihat tren perubahan sinyal.

Dari hasil pola sinyal yang sensor *transmitter*, baik pada simulasi maupun eksperimen masih terlihat ideal, dengan *noise* yang sangat kecil dan dapat diabaikan, namun hal sebaliknya terjadi pada pola sinyal *receiver* dimana baik dari hasil eksperimen dipenuhi oleh *noise* yang cukup besar dan merata. Hal

ini dikarenakan efek pantulan secara besar dan random akibat perbedaan impedansi akustik yang besar antara beberapa medium termasuk keretakan yang umumnya berisi medium udara maupun dari sistem DAS itu sendiri. Efek impedansi akustik yang besar pula mengakibatkan gelombang melalui tiga medium yang berbeda mengalami efek refraksi (pembelokan gelombang) sesuai dengan Hukum Snellius. Selain itu pada hasil eksperimen khususnya bagian gelombang yang diterima *receiver* lebih banyak disebabkan oleh *noise* di sekitar sistem.

5.2.2 Eksperimen Pengukuran Intensitas Sinyal dengan Penambahan Kedalaman Retak Tabung (Posisi Keretakan di Tengah Antara *Transmitter* dan *Receiver*)

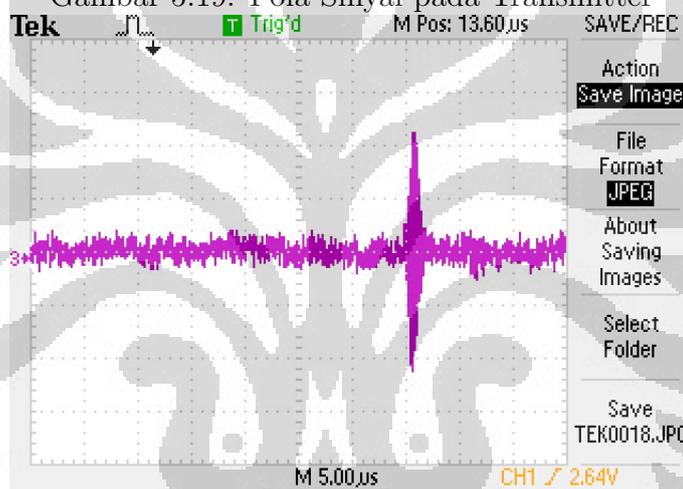
Dari hasil plot data intensitas relatif dengan penambahan kedalaman retak hingga $\pm 1,5$ mm gambar (5.22) terlihat *curvature* (kelengkungan) di sekitar kedalaman ± 1 mm yang disebabkan oleh tidak proporsionalnya pengurangan intensitas relatif sinyal pada data ke-6. Dari hasil *fitting* kurva data dengan pendekatan polinomial pangkat 3 didapatkan nilai estimasi *standar error* yaitu 0,9303 dengan nilai deviasi standar R yaitu 0,9666. Gambar (5.23) menunjukkan komparasi data dan *fitting* yang dilakukan dari hasil simulasi (data berwarna merah), hasil eksperimen (data berwarna hijau), dan juga hasil eksperimen yang didapat pada penelitian sebelumnya [4]. Dari hasil simulasi dan eksperimen didapatkan data yang cukup berbeda, namun berdasarkan *fitting* kurva terlihat pola/tren yang didapatkan tidak jauh berbeda. Sedangkan dari hasil data eksperimen saat ini dengan sebelumnya [4] menunjukkan data yang cukup konsisten.

5.2.3 Eksperimen Pengukuran Intensitas Sinyal dengan Penambahan Kedalaman Retak Tabung (Posisi Keretakan 1 cm dari Tepi *Transmitter*)

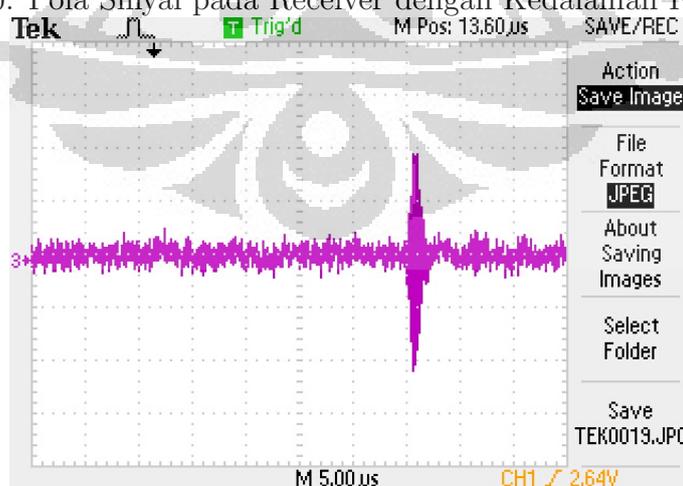
Gambar (5.24) menunjukkan grafik intensitas relatif dari hasil eksperimen penambahan kedalaman retak dengan posisi keretakan sekitar ± 1 cm dari tepi *transmitter*. Dari pola yang terlihat cukup baik dengan dengan kelengkungan kurva *smooth*. dari grafik terlihat bahwa saat keretakan yang terjadi lebih dari 2 mm akan, intensitas sinyal akan mengalami kenaikan kembali (tren perpanjangan grafik). Sedangkan berdasarkan *fitting* kurva secara polinomial didapatkan nilai estimasi *standar error* yang cukup kecil yaitu kurang dari 1. namun bila dibandingkan dengan data sebelumnya yaitu gambar (5.22) terlihat pola/tren grafik sangat jauh berbeda. Hal ini menunjukkan bahwa posisi keretakan akan sangat berpengaruh terhadap nilai intensitas sinyal yang didapatkan. Sedangkan gambar (5.25) menunjukkan perbandingan antara hasil simulasi (warna merah) dengan eksperimen (warna hijau) secara 3D untuk keadaan keretakan yang sama. Dari pola tren yang terlihat proporsional dengan nilai titik temu antara kedua grafik pada wilayah di sekitar 0.7 mm.



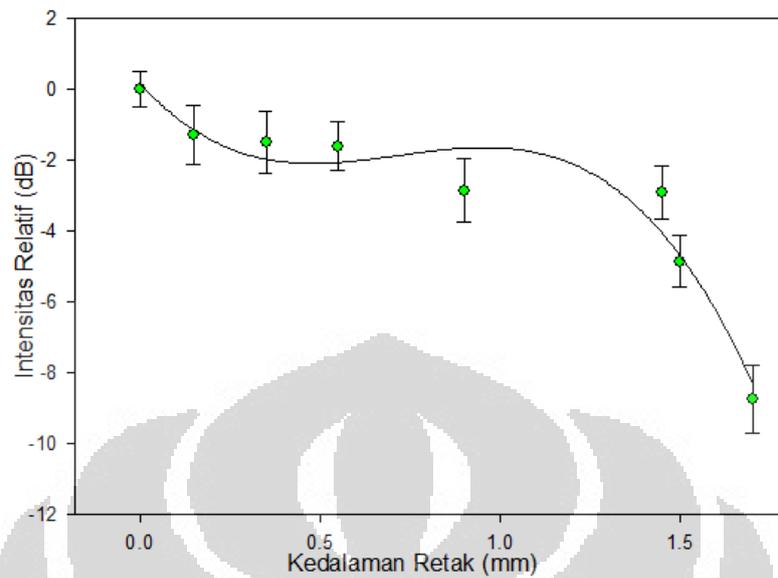
Gambar 5.19: Pola Sinyal pada Transmitter



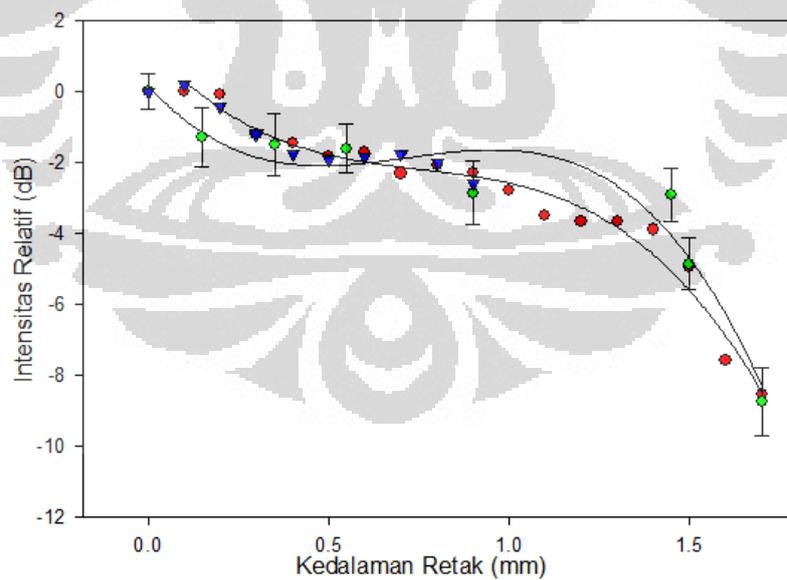
Gambar 5.20: Pola Sinyal pada Receiver dengan Kedalaman Retak ± 1 mm



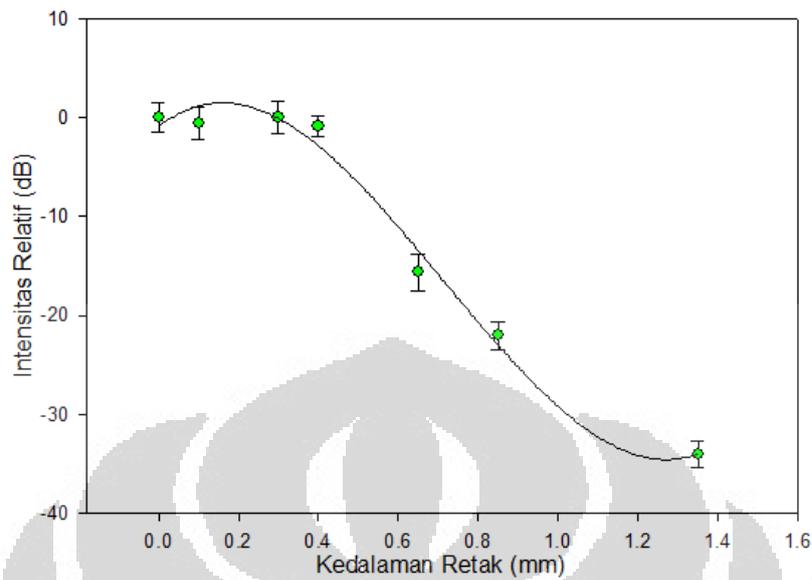
Gambar 5.21: Pola Sinyal pada Receiver dengan Kedalaman Retak ± 1.5 mm



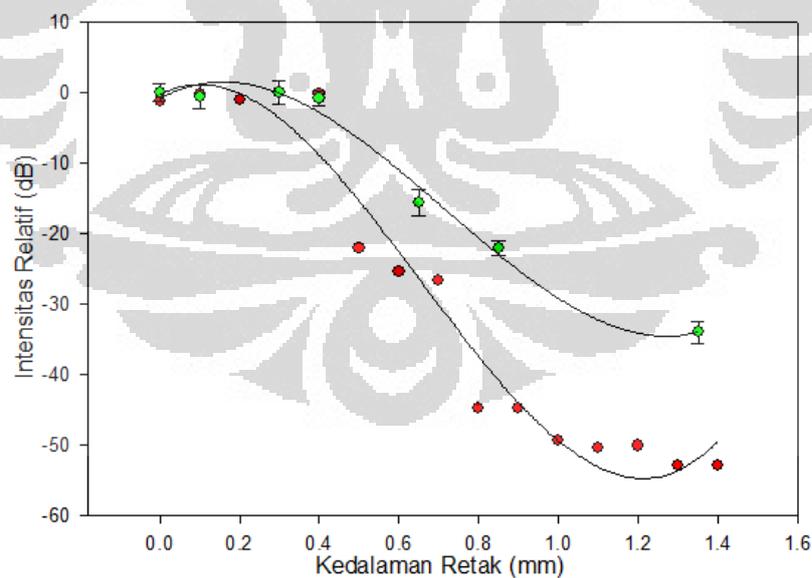
Gambar 5.22: Grafik Intensitas Relatif Hasil Eksperimen dengan Kedalaman Retak Hingga ± 1.7 mm



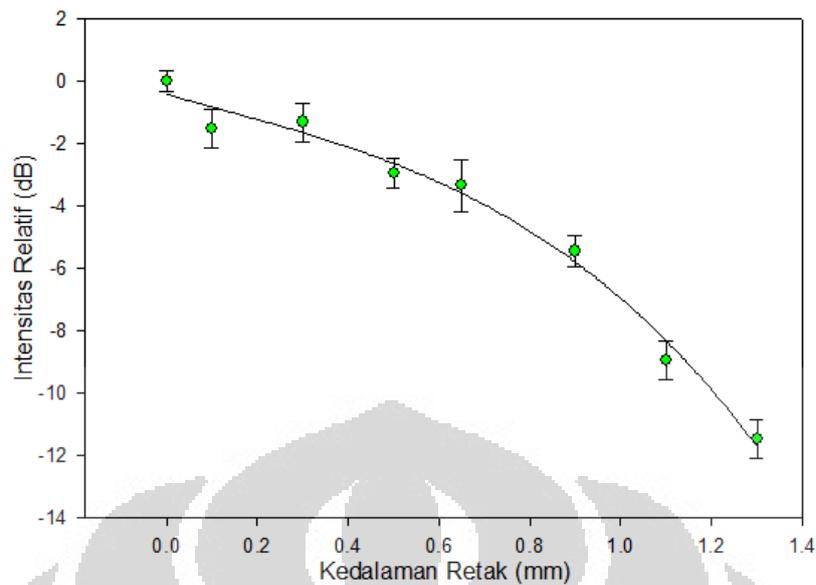
Gambar 5.23: Grafik Intensitas Relatif dengan Kedalaman Retak Hingga ± 1.7 mm ((a). Merah untuk Simulasi dan (b). Hijau untuk Eksperimen (c). Biru untuk Data [4])



Gambar 5.24: Grafik Intensitas Relatif Hasil Eksperimen dengan Kedalaman Retak Hingga ± 1.4 mm pada Posisi 1 cm dari Tepi Transmitter



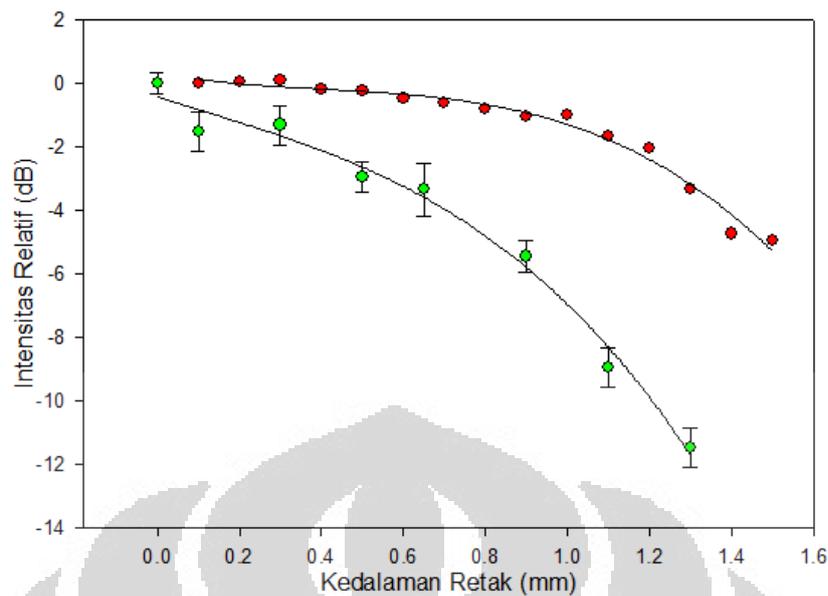
Gambar 5.25: Grafik Intensitas Relatif dengan Kedalaman Retak Hingga ± 1.5 mm di Posisi 1 cm dari Tepi Transmitter ((a). Merah untuk Simulasi dan (b). Hijau untuk Eksperimen)



Gambar 5.26: Grafik Intensitas Relatif Hasil Eksperimen Kedalaman Retak Hingga ± 1.3 mm dengan Dua Buah Keretakan

5.2.4 Eksperimen Pengukuran Intensitas Sinyal dengan Penambahan Kedalaman Retak dari 2 Buah Keretakan yang Sejajar

Gambar (5.26) merupakan grafik intensitas sinyal yang didapatkan dari eksperimen yang menggunakan 2 buah keretakan. Eksperimen ini bertujuan untuk mengetahui apakah sistem dapat membedakan adanya lebih dari satu keretakan saat sensor berada pada posisi diam. Berdasarkan grafik penurunan intensitas ini kita tidak mungkin untuk membedakana apalagi menentukan berapa jumlah keretakan yang mungkin dalam satu kali *scanning*. Dan yang sebenarnya terjadi adalah sistem tidak melakukan demikia, namun melakukan *scanning* pada seluruh wilayah selimut tabung sehingga pendekatan yang terjadi adalah semua kertakan yang ada di-*sampling* secara satu per satu. Hal ini dapat terjadi karena pengambilan data (*sampling*) terjadi pada kecepatan yang sangat tinggi jauh melebihi kecepatan putaran alat *gantry* saat melakukan scnning di seluruh selimut tabung. dari grafik pada gambar (5.26) terlihat penurunan intensitas sinyal yang cukup *smooth* dan tetap konsisten. Hal sangat berbeda justru didapatkan dari hasil simulasi pada gambar (5.27). Intensitasnya terlihat sangat fluktuatif. Jika kita beranggapan bila pengambilan data simulasi perlu diperbaiki, hal ini sangat tidak mungkin penggunaan *script* program simulasi yang sma akan menghasilkan data yang sama pula. Jadi simulasi yang dibuat bersifat general dan tidak unik.



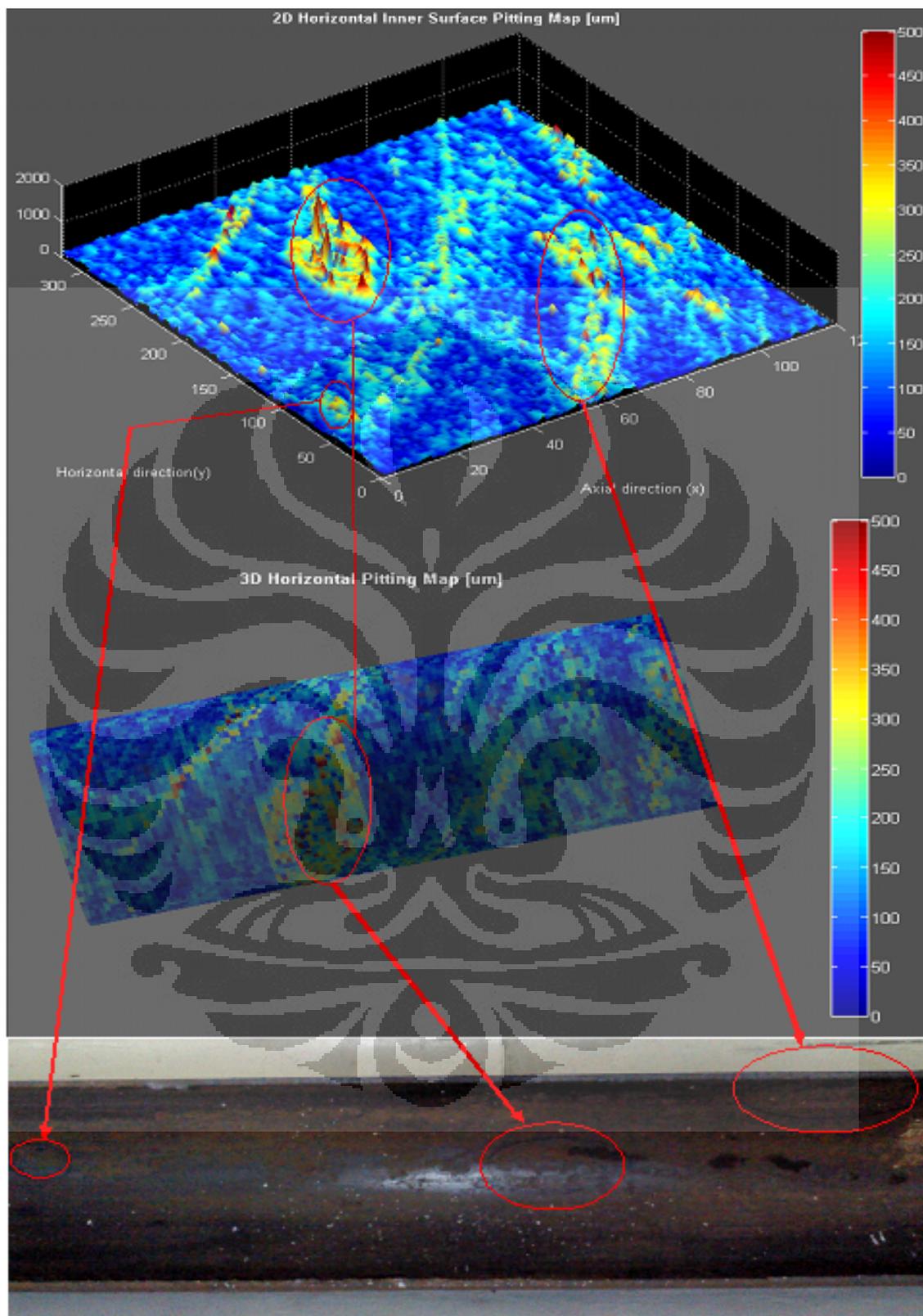
Gambar 5.27: Grafik Intensitas Relatif Kedalaman Retak Hingga ± 1.4 mm dengan Dua Buah Keretakan((a). Merah untuk Simulasi dan (b). Hijau untuk Eksperimen)

5.3 Hasil *Image Scanning* Rekonstruksi Permukaan Dalam Tabung CNG

Pada dasarnya hasil *fitting* kurva yang dilakukan baik pada simulasi maupun eksperimen bertujuan untuk menentukan persamaan yang menghubungkan antara kedalaman suatu keretakan (*crack*) maupun *pitting* dengan nilai intensitas sinyal yang diterima. Dengan kata lain persamaan yang didapatkan dari hasil *fitting* kurva akan dimasukkan ke dalam *script* program yang bertujuan untuk mengolah matriks data yang didapat dari hasil *scanning* secara keseluruhan untuk didapatkan hasil *image* yang merupakan rekonstruksi gambar sisi dalam dari tabung CNG yang kita uji. Sehingga kita nantinya tidak hanya dapat menentukan kelayakan dari suatu tabung CNG, namun juga dapat melihat serta menentukan posisi keterakan yang dialami oleh tabung tersebut.

Pitting merupakan suatu keretakan (*crack*) dengan karakteristik tertentu, yaitu berbentuk sumur yang mengerucut ke dalam. Umumnya *pitting* terjadi akibat adanya konsentrasi air yang cukup besar yang terkandung di dalam gas alam. Seperti kita ketahui bahwa gas alam hasil produksi dalam negeri masih cukup banyak mengandung air dalam bentuk uap air. Karena tekanan operasi gas yang cukup tinggi menyebabkan gas mendorong air ke arah luar. Proses korosi (oksidasi metal) yang terjadi pada saat tekanan yang sangat tinggi inilah yang menyebabkan terjadinya suatu *pitting*.

Dari gambar (5.28) *image* hasil *scanning* terlihat bahwa karakteristik *pitting* yang terjadi terkonsentrasi di tiga wilayah yang berbeda yaitu wilayah kiri, tengah, dan kanan (lihat gambar).



Gambar 5.28: Gambar Rekonstruksi Permukaan Sisi Dalam Tabung 2D dan 3D

Bab 6

Kesimpulan dan Saran

6.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari hasil metode simulasi baik 2D maupun 3D serta eksperimen adalah:

1. Sistem mampu membedakan keadaan tanpa keretakan maupun dengan keretakan.
2. Keretakan tunggal dan ganda baik simulasi maupun eksperimen memiliki tren yang berbeda.
3. Posisi keretakan akan berpengaruh terhadap level intensitas sinyal yang diterima.
4. SonaCTx berhasil melakukan rekonstruksi citra keretakan di dalam tabung CNG.

6.2 Saran

Berdasarkan pengalaman dari penelitian yang telah dilakukan maka ada beberapa gagasan yang sekiranya dapat direalisasikan untuk penelitian berikutnya, yaitu sebagai berikut:

- **Peningkatan Jumlah *Mesh***

Jumlah *mesh* akan sangat berperan penting dalam hasil simulasi yang diperoleh. Hal ini dikarenakan metode *finite-element* (elemen-hingga) sangat menitikberatkan kevalidan suatu data dengan jumlah *mesh* sebagai ruang partisi dimana evaluasi persamaan dilakukan. Dengan semakin besar jumlah *mesh* yang dibuat, maka akan semakin *real* hasil yang diperoleh, namun demikian akan semakin banyak waktu iterasi yang dibutuhkan dan semakin tinggi kemampuan hardware komputer yang dibutuhkan untuk melakukan *solving* data. Sehingga pada akhirnya didapatkan nilai 'kompromi' dimana penambahan jumlah *mesh* tidak akan mempengaruhi hasil data eksperimen secara signifikan. Faktor jumlah *mesh* sangat terlihat dari

hasil grafik potensial pada sejumlah jenis keretakan 3D yang didapatkan *standar error* yang sangat besar.

- **Pemodelan Geometri yang Lebih Baik**

Pemodelan yang dilakukan saat ini baik secara 2D maupun 3D masih merupakan pemodelan pendekatan, terlebih pada bagian transduser. Hal ini dikarenakan kesulitan peneliti melihat sisi dalam secara *cross section* dari transduser yang dipakai. Pemodelan yang lebih baik, harus memperhitungkan letak ukuran elemen aktif di dalam transduser, geometri *wedge* transduser, dan lainnya sehingga perambatan gelombang saat masih di dalam transduser sesuai dengan kenyataan.

- **Pencitraan Keretakan**

Penelitian yang telah dilakukan ini belum sampai pada tahap mendapatkan sebuah citra dari suatu retakan yang real. Proses pencitraan *Non-Destructive Testing* (NDT) secara 3D dapat dilakukan dengan menggunakan prinsip tomografi.

- **Fitting Data yang Valid**

Fitting data yang dilakukan sebelumnya masih bersifat *random* dimana tidak dimilikinya sebuah alasan yang kuat untuk melakukan pendekatan *fitting* secara polinomial pangkat tiga. Hal ini semata hanya pendekatan yang wajar. Namun dapat dipahami bahwa secara universal, suatu sistem sangat jarang yang benar-benar valid dengan pendekatan polinomial lebih dari pangkat tiga. Umumnya sifat/karakteristik sistem lebih banyak berkesesuaian dengan pangkat dua (kuadrat) ataupun pangkat tiga (kubik).

Daftar Referensi

- [1] Aptogaz. "CNG Perlu Digalakkan". AptogazIndonesia. 31 Juli 2007. <http://aptogaz.wordpress.com/2007/07/31/cng-perlu-digalakkan>
- [2] *GPSA Engineering Data Book*. Gas Processors Suppliers Association. 12th edition.
- [3] *ASM Handbook Nondestructive Evaluation and Quality Control*. Vol. 17. ASM Handbook Committee, 1997.
- [4] Baidillah, Marlin. *Aplikasi Ultrasonik untuk Pendeteksian Keretakan Dalam Logam*. Skripsi. Depok: UI Press, 2008.
- [5] Hellier, Charles J. *Handbook of Nondestructive Evaluation*. New York: McGraw-Hill Companies Inc, 2003.
- [6] *Nondestructive Evaluation and Quality Control*. ASM International Metals Handbook. Ninth Edition, 1989.
- [7] Drury, J. C. *Ultrasonic Flaw Detection for Technicians*. Ninth Edition. OIS plc. Cleveland, U.K:Stockton-on-Tees, 1997.
- [8] *Ultrasonic Transducer Technical Notes*. Panametrics-NDT. North America: Olympus, 2006.
- [9] Pain, H.J. *The Physics of Vibration and Waves*. Sixth Edition. New York: John Wiley and Sons, 1983.
- [10] Giancoli, Douglas C. *Physics (Principles With Application)*. Fifth Edition. New Jersey: Prentice-Hall International Inc, 1998.
- [11] Huebner K.H., Thornton E.A. *The Finite Element Method for Engineers*. Second Edition. New York: John Wiley and Sons, 1982.
- [12] COMSOL Multiphysics Documentation v3.4, 2007.
- [13] *SonaCTx 001 Technical Notes*. Edwar Technology, 2008.
- [14] Barauskas, R. *On space and time step sizes in rectangular finite element meshes for ultrasonic pulse propagation*. Vol. 34. ISSN 1392-2114. Nr.1(34). Ultragasas Kaunas. Lithuania: Kaunas University of Technology, 2000.

Lampiran A



A.1 Logo COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics is a powerful interactive environment for modeling and solving all kinds of scientific and engineering problems based on partial differential equations (PDEs). With this software you can easily extend conventional models for one type of physics into multiphysics models that solve coupled physics phenomena and do so simultaneously. Accessing this power does not require an in-depth knowledge of mathematics or numerical analysis. Thanks to the built-in physics modes it is possible to build models by defining the relevant physical quantities such as material properties, loads, constraints, sources, and fluxes rather than by defining the underlying equations. COMSOL Multiphysics then internally compiles a set of PDEs representing the entire model. You access the power of COMSOL Multiphysics as a standalone product through a flexible graphical user interface, or by script programming in the COMSOL Script language or in the MATLAB language.

As noted, the underlying mathematical structure in COMSOL Multiphysics is a system of partial differential equations. We provide three ways of describing PDEs through the following mathematical application modes:

- *Coefficient form*, suitable for linear or nearly linear models.
- *General form*, suitable for nonlinear models

- *Weak form*, for models with PDEs on boundaries, edges, or points, or for models using terms with mixed space and time derivatives. (The weak form provides many additional benefits, and we review them in the context of specific models in other books in this documentation set.)

Using these application modes, you can perform various types of analysis including:

- Stationary and time-dependent analysis
- Linear and nonlinear analysis
- Eigenfrequency and modal analysis

When solving the PDEs, COMSOL Multiphysics uses the proven finite element method (FEM). The software runs the finite element analysis together with adaptive meshing and error control using a variety of numerical solvers. A more detailed description of this mathematical and numerical foundation appears in the COMSOL Multiphysics Users Guide and in the COMSOL Multiphysics Modeling Guide.

Along these lines, one unique feature in COMSOL Multiphysics is something we refer to as extended multiphysics: the use of coupling variables to connect PDE models in different geometries. This represents a step toward system-level modeling.

Another unique feature is the ability of COMSOL Multiphysics to mix domains of different space dimensions in the same problem. This flexibility not only simplifies modeling, it also can decrease execution time.

In its base configuration, COMSOL Multiphysics offers modeling and analysis power for many application areas. For several of the key application areas we also provide optional modules. These application-specific modules use terminology and solution methods specific to the particular discipline, which simplifies creating and analyzing models. The COMSOL 3.2 product family includes the following modules:

- Chemical Engineering Module
- Earth Science Module
- Electromagnetics Module
- Heat Transfer Module
- MEMS Module
- Structural Mechanics Module

The CAD Import Module provides the possibility to import CAD data using the following formats: IGES, SAT (Acis), Parasolid, and Step. Additional add-ons provide support for CATIA V4, CATIA V5, Pro/ENGINEER, Autodesk Inventor, and VDA-FS.

Lampiran B1

Transduser Ultrasonik (TO19966 SONATEST) ORION4 - 70

Type of probe	:	Single angle
Frequency +/- 10% (MHz)	:	4
Beam angle +/- 2 (°)	:	70
Crystal shape	:	Circular
Crystal size (mm)	:	10
Crystal material	:	PZT
Probe Dimensions (mm)	:	17x34x25.5
Probe Weight (g)	:	36
Connector type	:	LEMO 00
Connector position	:	Rear
Wedge material	:	Perspex
Index point (mm)	:	12.5
Test Results		
Peak frequency	:	3.74 MHz
Centre frequency	:	3.73 MHz
Near field length	:	28.7 mm
Pulse duration	:	0.84 μ s
Peak to peak voltage	:	219.0 mV
Angle	:	70.2°
-6dB upper	:	4.84 MHz
-6dB lower	:	2.87 MHz
Bandwidth	:	1.97 MHz

Lampiran B2

Transduser Ultrasonik (TO19967 SONATEST) ORION4 - 70

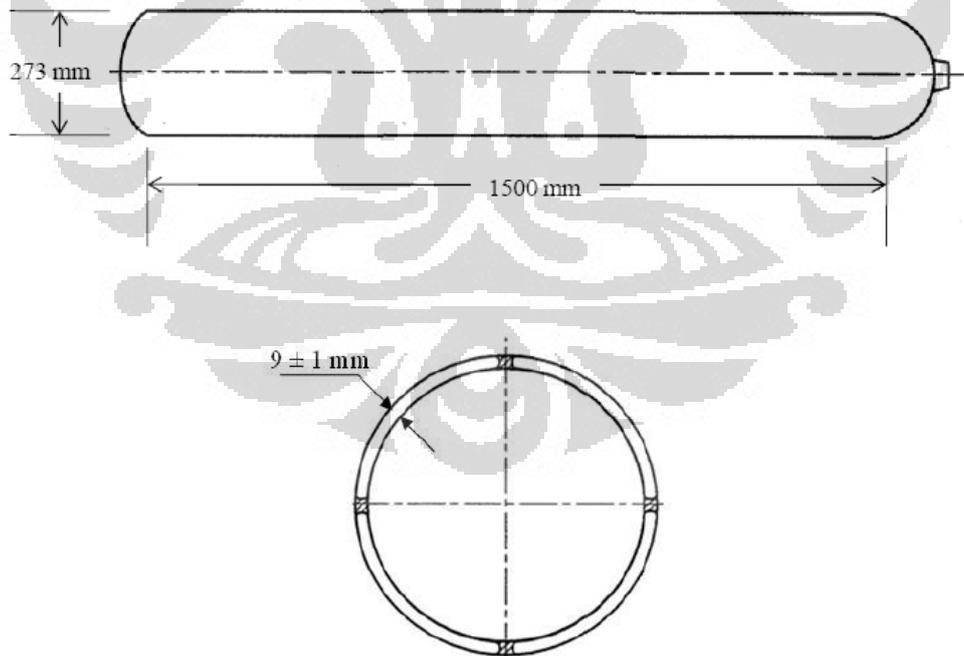
Type of probe	:	Single angle
Frequency +/- 10% (MHz)	:	4
Beam angle +/- 2 (°)	:	70
Crystal shape	:	Circular
Crystal size (mm)	:	10
Crystal material	:	PZT
Probe Dimensions (mm)	:	17x34x25.5
Probe Weight (g)	:	36
Connector type	:	LEMO 00
Connector position	:	Rear
Wedge material	:	Perspex
Index point (mm)	:	12.5
Test Results		
Peak frequency	:	4.07 MHz
Centre frequency	:	3.78 MHz
Near field length	:	31.3 mm
Pulse duration	:	0.75 μ s
Peak to peak voltage	:	363.0 mV
Angle	:	70.2°
-6dB upper	:	4.98 MHz
-6dB lower	:	2.87 MHz
Bandwidth	:	2.11 MHz

Lampiran C

Tabung Gas CNG Untuk Sektor Transportasi

Tabung gas CNG yang merupakan tabung NGV (Natural Gas as fuel for automotive Vehicles) dan yang telah diperiksa berdasarkan standar internasional ini didesain dan dicocokkan dengan ISO 11439 dan ISO 9809-1. Tipe tabung ini adalah CNG-1 metal karena kesemua bahannya terbuat dari logam/metal dan dapat dibuat dari logam campuran / alloy yang telah memenuhi standar kualifikasi desain tabung CNG NGV internasional. Tabung CNG yang digunakan pada penelitian ini memiliki spesifikasi sbb:

1. Desain, konstruksi dan kekuatan tarik sesuai dengan (ISO 9809-1)
2. Material tabung CNG berbahan *Carbon Manganese Steel* (CMn) (ISO 11439).



C.1 Gambar Skematik Tabung CNG

Lampiran D

Osiloskop Tektronix TDS 2014



D.1 Osiloskop Tektronix TDS 2014 4 Channels

	TDS1002	TDS1012	TDS2002	TDS2012	TDS2014	TDS2022	TDS2024
Display (1/4 VGA LCD)	Mono	Mono	Color	Color	Color	Color	Color
Bandwidth*1	60 MHz	100 MHz	60 MHz	100 MHz	100 MHz	200 MHz	200 MHz
Channels	2	2	2	2	4	2	4
External Trigger Input	Yes on all models						
Sample Rate on each channel	1.0 GS/s	1.0 GS/s	1.0 GS/s	1.0 GS/s	1.0 GS/s	2.0 GS/s	2.0 GS/s
Record Length	2.5 K points on all models						
Vertical Resolution	8-bits						
Vertical Sensitivity	2 mV to 5 V/div on all models with calibrated fine adjustment						
DC Vertical Accuracy	±3% on all models						
Vertical Zoom	Vertically expand or compress a live or stopped waveform						
Max Input Voltage	300 V _{RMS} CAT II; derated at 20 dB/decade above 100 kHz to 13 V _{p-p} AC at 3 MHz and above						
Position Range	2 mV to 200 mV/div ±2 V; >200 mV to 5 V/div ±50 V						
BW Limit	20 MHz for all models						
Input Coupling	AC, DC, GND on all models						
Input Impedance	1 MΩ in parallel with 20 pF						
Time Base Range	5 ns to 50 sec/div	5 ns to 50 sec/div	5 ns to 50 sec/div	5 ns to 50 sec/div	5 ns to 50 sec/div	2.5 ns to 50 sec/div	2.5 ns to 50 sec/div
Time Base Accuracy	50 ppm						
Horizontal Zoom	Horizontally expand or compress a live or stopped waveform						

D.2 TDS1000 and TDS2000 Series Electrical Characteristics

Lampiran E

COMSOL Multiphysics Script

```
% COMSOL Multiphysics Model M-file
% Generated by COMSOL 3.4 (COMSOL 3.4.0.248, ...
$Date: 2007/10/10 16:07:51 $)

for j=1:10;

flclear fem

% COMSOL version
clear vrsn
vrsn.name = 'COMSOL 3.4';
vrsn.ext = '';
vrsn.major = 0;
vrsn.build = 248;
vrsn.rcs = '$Name: $';
vrsn.date = '$Date: 2007/10/10 16:07:51 $';
fem.version = vrsn;

% Geometry
% Import CAD data
garr = geomimport('D:\Experiment\Era 2 Dimensi\ ...
Data Crack 1 Rectangular Berjalan\rhyan_formula.mphbin');
[g1,g2,g3,g4,g5,g6,g7,g8,g9,g10,g11,g12,g13,g14, ...
g15,g16,g17,g18,g19,g20]=deal(garr{:});

% Geometry

% Analyzed geometry
clear c s
c.objs={g9,g10,g11,g12,g13,g14,g15,g16,g17,g18,g19,g20};
c.name={'B1','B2','B3','B4','B5','B6','B7','B8','B9', ...
'B10','B11','B12'};
c.tags={'g9','g10','g11','g12','g13','g14','g15','g16', ...
'g17','g18','g19','g20'};
```

```

s.objs={g1,g2,g3,g4,g5,g6,g7,g8};
s.name={'C01','C02','C03','C04','C05','C06','C07','C08'};
s.tags={'g1','g2','g3','g4','g5','g6','g7','g8'};

fem.draw=struct('c',c,'s',s);
fem.geom=geomcsg(fem);

% Constants
fem.const = {'c_s','5850[m/s]', ...
    'c_w','1500[m/s]', ...
    'c_p','2760[m/s]', ...
    'wl_s','c_s/f0', ...
    'wl_w','c_w/f0', ...
    'wl_p','c_p/f0', ...
    'f0','4[MHz]', ...
    'bw','2[MHz]', ...
    'A','((log(2))^0.5)/(pi*bw)', ...
    't0','0.5e-06'};

% Geometry
loop_geometry_rectangular

% Analyzed geometry
clear c s
c.objs={g9,g10,g11,g12,g13,g14,g15,g16,g17,g18,g19,g20};
c.name={'B1','B2','B3','B4','B5','B6','B7','B8','B9', ...
    'B10','B11','B12'};
c.tags={'g9','g10','g11','g12','g13','g14','g15','g16', ...
    'g17','g18','g19','g20'};

s.objs={g1,g2,g3,g4,g5,g6,g8,g22};
s.name={'C01','C02','C03','C04','C05','C06','C08','C09'};
s.tags={'g1','g2','g3','g4','g5','g6','g8','g22'};

fem.draw=struct('c',c,'s',s);
fem.geom=geomcsg(fem);

% Initialize mesh
fem.mesh=meshinit(fem, ...
    'hmax',[0.00117/2]);

% (Default values are not included)

% Application mode 1
clear appl
appl.mode.class = 'Wave';

```

```

appl.assignsuffix = '_waeq';
clear bnd
bnd.r = {0,0,'cos(2*pi*f0*t)*exp((-t-t0)^2)/(4*(A^2))'};
bnd.type = {'dir','neu','dir'};
bnd.ind = [2,1,2,2,2,1,2,2,3,1,1,1,2,1,1,1,1,2,2,1,2, ...
    1,1,2,2,2,1,1,1,1,1,2,1,2,1,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2, ...
    2,2,2,2,2,2,2,2];
%bnd.ind = [2,1,2,2,2,1,2,2,3,1,1,1,2,1,1,1,1,2,2,1,2, ...
    1,1,2,2,2,1,1,1,1,1,2,1,2,1,2,2,1,2,2,2,2,1,1,1,2,1, ...
    1,1,1,2,1,2,2,2];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.f = 0;
equ.c = {'5850^2','1500^2','2760^2',0};
equ.ind = [1,2,3,4,4,3,4,4];
appl.equ = equ;
fem.appl{1} = appl;
fem.frame = {'ref'};
fem.border = 1;
clear units;
units.basesystem = 'SI';
fem.units = units;

% Descriptions
clear descr
descr.const= {'t0','Period','wl_p','Wavelength in perspex', ...
    'c_p','Speed of sound in wage','A','Time Limit','c_s', ...
    'Speed of sound in steel','bw','Bandwidth','f0', ...
    'Sound frequency','wl_s','Wavelength in steel','c_w', ...
    'Speed of sound in water','wl_w','Wavelength in water'};
fem.descr = descr;

% ODE Settings
clear ode
clear units;
units.basesystem = 'SI';
ode.units = units;
fem.ode=ode;
% Multiphysics
fem=multiphysics(fem);

% Extend mesh
fem.xmesh=meshextend(fem);

% Solve problem
fem.sol=femtime(fem, ...

```

```

        'solcomp',{'u'}, ...
        'outcomp',{'u'}, ...
        'tlist',[0:1e-08:15e-06], ...
        'maxorder',2, ...
        'tout','tlist');

% Save current fem structure for restart purposes
fem0=fem;

% Plot solution
postplot(fem, ...
        'tridata',{'u','cont','internal'}, ...
        'trimap','jet(1024)', ...
        'solnum','end', ...
        'title','Time=1.5e-5    Surface: u', ...
        'axis',[-0.0264,0.0264,-0.009868421052631582,...
        0.016068421052631576]);

get_data_rectangular
end

```



Lampiran F1

Fitting Kurva Data Simulasi 2D

Nonlinear Regression

Data Source: Data in Dua Dimensi

Equation: Polynomial, Cubic

$f=y_0+a*x+b*x^2+c*x^3$

R	Rsqr	Adj Rsqr	Standard Error of Estimate
0.9960	0.9920	0.9905	0.0980

	Coefficient	Std. Error	t	P	VIF
y0	-0.1409	0.1071	-1.3161	0.2067	23.8638<
a	1.2572	0.4308	2.9184	0.0101	554.4049<
b	-3.3904	0.4706	-7.2042	<0.0001	1666.1205<
c	1.0749	0.1475	7.2855	<0.0001	490.5151<

Analysis of Variance:

Uncorrected for the mean of the observations:

	DF	SS	MS
Regression	4	53.6009	13.4002
Residual	16	0.1537	0.0096
Total	20	53.7546	2.6877

Corrected for the mean of the observations:

	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	18.9702	6.3234	658.2417	<0.0001
Residual	16	0.1537	0.0096		
Total	19	19.1239	1.0065		

Lampiran F2

Fitting Kurva Data Simulasi 3D

Nonlinear Regression - Dynamic Fitting

Data Source: Data 6 in Tiga Dimensi

Equation: Polynomial, Cubic

$f=y_0+a*x+b*x^2+c*x^3$

Dynamic Fit Options:

Total Number of Fits 200

Maximum Number of Iterations 200

Parameter Ranges for Initial Estimates:

Minimum Maximum

y0 -1.0975 3.2924

a -0.0664 0.1992

b -1.7331 5.1993

c -9.8357 3.2786

Summary of Fit Results:

Converged 100.0%

Results for the Overall Best-Fit Solution:

R	Rsqr	Adj Rsqr	Standard Error of Estimate
---	------	----------	----------------------------

0.9847	0.9696	0.9639	1.1573
--------	--------	--------	--------

Coefficient	Std. Error	t	P	VIF
-------------	------------	---	---	-----

y0	1.0975	1.2642	0.8681	0.3982	23.8638<
----	--------	--------	--------	--------	----------

a	0.0664	5.0867	0.0131	0.9897	554.4056<
---	--------	--------	--------	--------	-----------

b	1.7331	5.5571	0.3119	0.7592	1666.1226<
---	--------	--------	--------	--------	------------

c	-3.2786	1.7422	-1.8818	0.0782	490.5157<
---	---------	--------	---------	--------	-----------

Lampiran F3

Fitting Kurva Data Eksperimen

Nonlinear Regression

Data Source: Data in Eksperiment

Equation: Polynomial, Cubic

$f=y_0+a*x+b*x^2+c*x^3$

R	Rsqr	Adj Rsqr	Standard Error of Estimate
0.9666	0.9343	0.8850	0.9303

Coefficient	Std. Error	t	P	VIF
-------------	------------	---	---	-----

y0	0.1655	0.8222	0.2013	0.8503	6.2492<
a	-11.3203	4.8814	-2.3191	0.0812	234.0355<
b	17.7300	7.3076	2.4263	0.0723	1147.5937<
c	-8.2345	2.9247	-2.8155	0.0480	448.5742<

Analysis of Variance:

Uncorrected for the mean of the observations:

	DF	SS	MS
Regression	4	119.9734	29.9933
Residual	4	3.4617	0.8654
Total	8	123.4350	15.4294

Corrected for the mean of the observations:

	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	49.2285	16.4095	18.9613	0.0079
Residual	4	3.4617	0.8654		
Total	7	52.6901	7.5272		

Lampiran G

Solusi Umum Persamaan Gelombang

Persamaan gelombang sebagai berikut:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

Misalkan kita anggap solusinya adalah:

$$\psi = Ae^{(\omega t - kx)}$$

karena,

$$\psi = Ae^{(\omega t - kx)} = A \cos(\omega t - kx) + A \sin(\omega t - kx)$$

Dari persamaan di atas yang merupakan persamaan umum dapat kita ambil komponen pertamanya, yaitu: $A \cos(\omega t - kx)$. Lalu kita turunkan secara parsial terhadap x dan t . Turunan terhadap x adalah:

$$\begin{aligned}\psi &= A \cos(\omega t - kx) \\ \frac{\partial \psi}{\partial x} &= -kA \cos(\omega t - kx) \\ \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} &= k^2 A \cos(\omega t - kx)\end{aligned}$$

Sedangkan turunan terhadap t adalah:

$$\begin{aligned}\psi &= A \cos(\omega t - kx) \\ \frac{\partial \psi}{\partial t} &= \omega A \cos(\omega t - kx) \\ \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} &= \omega^2 A \cos(\omega t - kx)\end{aligned}$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{k^2}{\omega^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}$$

Karena k adalah bilangan gelombang yang bernilai $\frac{2\pi}{\lambda}$ dan ω merupakan frekuensi angular $2\pi f$, maka:

$$\frac{k^2}{\omega^2} = \frac{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2}{(2\pi f)^2} = \frac{\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2}{(f)^2} = \left(\frac{1}{\lambda f}\right)^2 = \left(\frac{1}{v}\right)^2 = \frac{1}{v^2}$$

sehingga,

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

