



TESIS - RC 142501

**STUDI NUMERIK PROPAGASI GELOMBANG UNTUK
MENDETEKSI KERUSAKAN PADA PLAT**

M TAUFIQ FAIZAL

3113 202 015

DOSEN PEMBIMBING

Prof. Ir. Priyo Suprobo, Ms, Ph.D
Ir. Faimun, MSc, Ph.D

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN STRUKTUR
JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015



THESIS - RC 142501

**NUMERICAL STUDY OF WAVE PROPAGATION TO
DETECT THE DAMAGE ON STEEL THIN PLATE**

M TAUFIQ FAIZAL

3113 202 015

SUPERVISORS

Prof. Ir. Priyo Suprobo, Ms, Ph.D
Ir. Faimun, MSc, Ph.D

MAGISTER PROGRAM
STRUCTURAL ENGINEERING
CIVIL ENGINEERING DEPARTEMENT
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING AND PLANNING
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2015

Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T.)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
oleh:

M TAUFIQ FAIZAL
NRP. 3113 202 015

Tanggal Ujian : 16 Juni 2015
Periode Wisuda : September 2015

Disetujui oleh:

Dosen Pembimbing :

Dosen Penguji :


Prof. Ir. Privo Suprobo, Ms, Ph.D
NIP 19590911 198403 1 001


Budi Suswanto ,ST.,MT.,Ph.D
NIP 19730128 199802 1 002


Ir. Faimun, M.Sc., Ph.D
NIP 19630605 198903 1 004


Dr. techn. Pujo Aji, ST.,MT
NIP 19730208 199802 1 001

Direktur Program Pascasarjana,


Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.
NIP 19640405 199002 1 001

STUDI NUMERIK PROPAGASI GELOMBANG UNTUK MENDETEKSI KERUSAKAN PADA PLAT BAJA

Nama Mahasiswa : Muhammad Taufiq Faizal
NRP : 3113202015
Jurusa : Teknik Struktur-ITS
Dosen Konsultasi : Prof. Ir. Priyo Suprobo, MS, Ph.D
Ir. Faimun, MSc, Ph.D

ABSTRAK

Kerusakan pada struktur plat tipis biasanya terjadi akibat crack yang berpotensi menyebabkan fatigue. Kerusakan berupa crack tidak bisa dideteksi dengan destructive test, perlu adanya deteksi secara nondestructive untuk mendeteksi kerusakan tersebut. Banyak penelitian tentang nondestructive test dilakukan untuk mendapatkan sensor dan analisa permodelan yang tepat untuk mendeteksi kerusakan berupa crack pada struktur plat tipis. Nonlinear Lamb wave adalah teknologi yang telah populer digunakan untuk mendeteksi kerusakan pada plat karena sensitifitasnya dalam mendeteksi kerusakan yang sangat kecil dan mampu menyebarkan dengan jarak yang relative luas dengan sedikit pelemahan.

Untuk mendapatkan sensor yang efisien serta ekonomis maka penggunaan piezoelectric sangat disarankan. Hal ini dikarenakan piezoelectric transducers bisa digunakan sebagai actuator and sensor untuk gelombang (lamb wave). Keuntungan dari piezoelectric transducers ini adalah sistem integrasinya yang mudah, perhitungan massa diabaikan, kekuatan mekanik yang sangat baik, respon frekuensi yang luas, konsumsi daya yang rendah, impedansi akustik yang rendah dan biaya yang murah.

Pada penelitian ini studi tentang lamb wave akan dilakukan pada plat besi tipis dengan menggunakan permodelan finite element analysis (FEM). Excitation signal (V_t) yang akan dipakai adalah Hanning windowed 5-cycle tone burst dengan berbagai variasi jumlah puncak. Permodelan terhadap kerusakan pada internal plat, surface plat serta pengaruh letak piezoelectric transducers terhadap titik kerusakan akan menjadi inti dari penelitian ini. Permodelan dilakukan menggunakan dua buah PZT-5A yang akan diletakan pada bagian atas plat.

Hasil analisa menunjukan bahwa pola gelombang yang terbentuk pada plat yang mengalami kerusakan untuk excitation signal (V_t) satu, dua dan lima ditandai dengan terjadinya penurunan amplitude dan frekuensi. Untuk pengaruh posisi piezoelectric transducers terhadap titik kerusakan, hasil analisa menunjukan bahwa semakin jauh letak piezoelectric transducers terhadap titik kerusakan, pembacaan gelombang yang terjadi semakin tidak akurat. Posisi kerusakan dapat diketahui dari fungsi kecepatan dan waktu gelombang. Propagasi gelombang yang berbasis pada lamb wave terbukti dapat mendeteksi kerusakan pada plat baja.

Kata kunci : SHMS, propagasi gelombang, lamb wave, piezoelectric, hanning windowed 5-cycle tone burst, plat baja.

NUMERICAL STUDY OF WAVE PROPAGATION TO DETECT THE DAMAGE ON STEEL THIN PLATE

Student's Name : Muhammad Taufiq Faizal
Student's ID : 3113202015
Department : Structural Engineering–ITS
Supervisors : Prof. Ir. Priyo Suprobo, MS, Ph.D
Ir. Faimun, MSc, Ph.D

ABSTRACT

Crack is one of the major issues which potentially can developed due to fatigue. However, crack damage on thin plate is very difficult to detect with destructive test, there is a need in nondestructive test for detection of such as damage. Several researches about nondestructive test have been conducted to obtain the sensor and proper numerical modeling to detect the damage on thin plate. Nonlinear lamb wave is one of the technology that has been widely used to detect the damage on plate due to its sensitiveness to detect the small damage. Furthermore, the technology is also capable of propagating waves in wide range with less weakening.

To obtain the economic and efficient sensor, the use of piezoelectric is highly recommended. This is because of piezoelectric transducers can be used as actuator and sensor for wave (lamb wave). The advantages of piezoelectric transducers consist of easy system integration, negligible mass on calculaton, excellent mechanical test, wide frequency response, low power consumption, low acoustic impedance, and low cost.

This research is focused to study the lamb wave on thin plate using finite element analysis (FEM). Damage model at internal and surface of thin plate and also the location of piezoelectric of transducer toward the damage point was the primary concern in this study. On the other hand, hanning windowed five-cycle tone burst with variations of number of peaks as excitation signal (Vt) was used. Modeling was performed using two PZT-5A at the surface of plate.

The results showed that the damage of plate due to excitation signal with one-peak, three-peak and five-peak marked by the decrease in the amplitude frequency. Wave propagation based on lamb wave was proven to detect internal damage to the surface or plate. For the effect of piezoelectric transducer location to the damage point, the result showed that more further the location of piezoelectric transducer from the damage point, the ability of the sensor to detect the wave result was more inaccurate. The damage point can be identified by using the function of velocity and time. Wave propagation based on lamb wave was proven to detect damage on steel plate.

Keywords: *SHMS, wave propagation, lamb wave, piezoelectric, hanning windowed 5-cycle tone burst, thin plate.*

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji syukur saya panjatkan kehadirat Allah SWT., atas segala karunia dan ridho-NYA, sehingga tesis dengan judul “Studi Numerik Propagasi Gelombang Untuk Mendeteksi Kerusakan Pada Plat Baja” ini dapat diselesaikan. Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan memperoleh gelar Magister Teknik (M.T.) yang diseminarkan pada tanggal 15 Juni 2015 dalam bidang keahlian Struktur pada program studi Teknik Sipil Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa hormat dan ucapan terima kasih yang sebesar besarnya, kepada :

1. Bapak Prof. Ir. Priyo Suprobo, Ms, Ph.D , Ir. Faimun, MSc, Ph.D atas bimbingan, arahan dan waktu yang telah diluangkan kepada penulis untuk berdiskusi selama menjadi pembimbing penyusunan tesis ini.
2. Orang Tua penulis, Bapak Syamsudin, Bunda O juhanah dan yang selalu memberikan doa, semangat serta dukungan selama perkuliahan dan penyusunan tesis ini.
3. Seluruh Dosen program Pascasarjana Teknik Sipil khususnya dosen struktur yang telah memberikan arahan dan bimbingan untuk mendalami ilmu struktur. Untuk Pak Ari dan Mas Dwi yang telah memberikan ilmunya untuk membantu penulis menyusun tesis ini.
4. Gusti Adhiati Andriani yang selalu menemani, mendengar keluh kesah penulis, selalu memberikan doa, semangat dan dukungannya selama kuliah dan penyusunan tesis ini.
5. Rekan S-2 Teknik Sipil angkatan 2013. Teman-teman di ruangan korbid : Mba Niar dan Asdam yang sudah memberi ilmu dan membantu banyak untuk penyusunan tesis ini. Untuk Nci, Hartana, Mas Lutfi, Taufik, Winda, Alfin, Ikom,

Laras, Ka Rini dan Mas Jaka yang selalu memberikan dukungan, semangat selama pengerjaan tesis dan untuk canda tawanya.

6. ITS untuk beasiswa Laboratorium Beton dan Bahan Bangunan yang telah memeberikan bantuan biaya pendidikan S2

Dengan keterbatasan pengalaman, pengetahuan maupun pustaka yang ditinjau, penulis menyadari bahwa tesis ini masih banyak kekurangan dan perlu pengembangan lebih lanjut agar benar benar bermanfaat. Oleh sebab itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran agar tesis ini lebih sempurna serta sebagai masukan bagi penulis untuk penelitian dan penulisan karya ilmiah di masa yang akan datang.

Surabaya, Juni 2015

M Taufiq Faizal

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xvi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	4
1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Structural Health Monitoring System	7
2.2 <i>Elastic Wave Propagation</i>	9
2.3 Lamb Wave pada plate bebas	11
2.4 <i>Phase Velocity (c_p) dan Group Velocity(c_g)</i>	18
2.5 <i>Lamb Wave Modes</i>	21
2.6 <i>Piezoelectric</i>	23
2.7 <i>Fast Fourier Transformation (FFT)</i>	24
2.8 Windowing	30
BAB 3 METODOLOGI	37
3.1 Spesifikasi Plat dan Sensor	38
3.2 Permodelan FEM	39
3.3 Variable desain	40
3.4 Analisa Time dan Frequency domain	42
3.5 Validasi	42
3.6 Analisa Kerusakan	44
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	45
4.1 Permodelan <i>finite element</i> (FEM)	45
4.2 Validasi Hasil	50
4.3 Pengaruh jumlah puncak dalam mendeteksi kerusakan	56

4.4 Pengaruh letak <i>piezoelectric transducers</i>	63
4.5 Menemukan lokasi kerusakan	69
BAB V KESIMPULAN	71
5.1 Kesimpulan	71
5.2 Saran.....	71
DAFTAR PUSTAKA	73
BIODATA PENULIS	75

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tipe <i>piezoelectric</i>	23
Tabel 2.2 Pemilihan windowing.....	35

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Transverse dan Longitudinal Waves</i>	10
Gambar 2.2 <i>Free Plate Geometry</i>	11
Gambar 2.3 Pergerakan partikel mode simetris dan asimetris	17
Gambar 2.4 <i>Group velocity</i> untuk plat dengan ketebalan 1 mm	22
Gambar 2.5 Respon mode pada <i>lamb wave</i>	22
Gambar 2.6 Dua buah signal yang digabungkan membentuk signal yang baru...26	
Gambar 2.7 Amplitudo yang terbentuk akibat penggabungan gelombang yang berpengaruh pada puncak gelombang.....	26
Gambar 2.8 Gelombang berbentuk persegi yang terbentuk dari penjumlahan fungsi sinus	27
Gambar 2.9 Ketika dua gelombang sinus dari amplitudo yang sama ditambahkan.....	28
Gambar 2.10 Grafik spike tertinggi adalah frekuensi amplitudo terbesar.....	28
Gambar 2.11 Frekuensi domain dari gelombang sinus terlihat seperti sebuah lereng	29
Gambar 2.11 Jika dua gelombang ini ditambahkan, mereka akan terlihat seperti gelombang sinus yang sempurna karena mereka begitu mirip.....	29
Gambar 2.13 Frequency domain	30
Gambar 2.14 FFT catatan asumsi-waktu diulang seluruh waktu	31
Gambar 2.15 Input sinyal periodik dalam timerecord.....	31
Gambar 2.16 Input sinyal tidak periodik dalam timerecord.....	32
Gambar 2.17 Hasil FFT actual	33
Gambar 2.18 Pengaruh windowing dalam domain waktu	33
Gambar 2.19 Pengurangan kebocoran dengan windowing	34
Gambar 2.20 Hanning window	35
Gambar 3.1 Metodologi Peneliti	37
Gambar 3.2 plat dan piezoelectric transducers	39
Gambar 3.3 <i>Excitation signal</i> satu puncak	40
Gambar 3.4 <i>Excitation signal</i> tiga puncak.....	41

Gambar 3.5 <i>Excitation signal</i> lima puncak.....	41
Gambar 3.6 Posisi sensor 75 mm terhadap titik kerusakan	41
Gambar 3.7 Posisi sensor 125 mm terhadap titik kerusakan	42
Gambar 3.8 Posisi sensor 225 mm terhadap titik kerusakan	42
Gambar 3.9 <i>Excitation signal</i> pada frekuensi 100 KHz satu puncak.....	43
Gambar 3.10 <i>Excitation signal</i> pada frekuensi 100 KHz tiga puncak.....	43
Gambar 3.11 <i>Excitation signal</i> pada frekuensi 100 KHz lima puncak.....	44
Gambar 4.1 <i>dispersion curve</i> untuk plat dengan ketebalan 1mm	45
Gambar 4.2 <i>Mode</i> S_0	46
Gambar 4.3 <i>Mode</i> S_0 dan A_0	46
Gambar 4.4 Meshing plat.....	47
Gambar 4.5 <i>Setting time step</i>	48
Gambar 4.6 Material <i>Lead Zirconate Titanate (PZT-5A)</i>	49
Gambar 4.7 <i>Settings electric potential</i>	49
Gambar 4.8 <i>Electric potential normal plate</i>	50
Gambar 4.9 Hasil FFT <i>Electric potential normal plate</i>	50
Gambar 4.10 Hasil FFT <i>normal plate</i> dengan hasil FFT <i>excitation signal</i>	51
Gambar 4.11 <i>Electric potential normal plate</i>	52
Gambar 4.12 Hasil FFT <i>Electric potential normal plate</i>	52
Gambar 4.13 Hasil FFT <i>normal plate</i> dengan hasil FFT <i>excitation signal</i>	53
Gambar 4.14 <i>Electric potential normal plate</i>	54
Gambar 4.15 Hasil FFT <i>Electric potential normal plate</i>	54
Gambar 4.16 Hasil FFT <i>normal plate</i> dengan hasil FFT <i>excitation signal</i>	55
Gambar 4.17 <i>Electric potential damage plate</i>	56
Gambar 4.18 Hasil FFT <i>Electric potential damage plate</i>	57
Gambar 4.19 <i>Electric potential damage plate vs normal plate</i>	57
Gambar 4.20 <i>FFT damage plate vs FFT normal plate</i>	58
Gambar 4.21 <i>Electric potential damage plate</i>	59
Gambar 4.22 Hasil FFT <i>Electric potential damage plate</i>	59
Gambar 4.23 <i>Electric potential damage plate vs normal plate</i>	60
Gambar 4.24 <i>FFT damage plate vs FFT normal plate</i>	60

Gambar 4.25 <i>Electric potential damage plate</i>	61
Gambar 4.26 Hasil FFT <i>Electric potential damage plate</i>	61
Gambar 4.27 <i>Electric potential damage plate vs normal plate</i>	62
Gambar 4.28 FFT <i>damage plate vs FFT normal plate</i>	62
Gambar 4.29 <i>Electric potential</i> Posisi sensor 75 mm terhadap titik kerusakan...63	
Gambar 4.30 <i>Electric potential</i> Posisi sensor 125 mm terhadap titik kerusakan.64	
Gambar 4.31 <i>Electric potential</i> Posisi sensor 225 mm terhadap titik kerusakan.64	
Gambar 4.32 <i>Electric potential</i> supersosisi.....	65
Gambar 4.33 FFT <i>Electric potential</i> Posisi sensor 75 mm terhadap titik kerusakan.....	66
Gambar 4.34 FFT <i>Electric potential</i> Posisi sensor 125 mm terhadap titik kerusakan.....	66
Gambar 4.35 FFT <i>Electric potential</i> Posisi sensor 225 mm terhadap titik kerusakan.....	67
Gambar 4.36 Supersosisi FFT	67
Gambar 4.37 Supersosisi FFT <i>Normal Plate Vs Damage Plate</i>	68
Gambar 4.38 Posisi kerusakan	69
Gambar 4.39 FFT <i>damage plate vs FFT normal plate</i>	69
Gambar 4.40 <i>Dispersion Curve</i>	70

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam beberapa tahun terakhir ini banyak terjadi kegagalan struktur yang mengakibatkan hilangnya banyak jiwa manusia. Untuk menghindari kegagalan struktur tersebut pengetahuan tentang integritas struktur dalam masa *service* secara *real-time* harus dilakukan secara terus menerus. Pemeriksaan dan pemeliharaan secara berkala terhadap struktur hanya memberikan pengetahuan terbatas tentang kondisi struktur. Negara-negara maju seperti Cina, Prancis, Swiss dan Hungaria telah memulai mengembangkan dan memakai sistem monitoring struktur yang dinamakan *Structural health monitoring System* (SHMS).

Menurut Chang et al. (1999) tujuan dari *Structural Health Monitoring System* (SHMS) adalah pengembangan sistem pemantauan kesehatan struktur yang terintegrasi untuk terus menerus melakukan pemantauan terhadap kerusakan struktur dengan tenaga kerja yang seminimum mungkin.

Worden dan Duijvelde (2004) mengatakan bahwa definisi SHMS terdiri dari lima prinsip dasar, yaitu:

1. Mengetahui kerusakan.
2. Mencari tempat terjadinya kerusakan.
3. Mengklasifikasikan tipe kerusakan.
4. Menaksir tingkat kerusakan.
5. Memprediksi sisa umur dari struktur.

Kunci dari *Structural health monitoring System* (SHMS) ini adalah mengkombinasikan antara teknologi sensor dan analisa permodelan. Sensor berguna untuk mengumpulkan data sedangkan analisa permodelan berguna untuk menentukan perilaku struktur (Gopalakrishnan, 2011).

Kerusakan pada struktur plat tipis biasanya terjadi akibat crack yang berpotensi menyebabkan fatigue. Kerusakan berupa crack tidak bisa dideteksi dengan destructive test, perlu adanya deteksi secara nondestructive untuk

mendeteksi kerusakan tersebut. Banyak penelitian tentang nondestructive test dilakukan untuk mendapatkan sensor dan analisa permodelan yang tepat untuk mendeteksi kerusakan berupa crack pada struktur plat tipis.

Propagasi gelombang yang berbasis pada *nonlinear Lamb wave* telah populer digunakan untuk mendeteksi kerusakan pada plat karena sensitifitasnya dalam mendeteksi kerusakan yang sangat kecil dan mampu menyebarkan dengan jarak yang relative luas dengan sedikit pelemahan (Alleyne, 1992). Ketika gelombang (*lamb wave*) menyebar sepanjang struktur dan menemukan sebuah celah, terjadi sebuah refleksi, refraksi serta transmisi pada gelombang tersebut. Interaksi yang terjadi pada gelombang ini bisa dipakai sebagai karakteristik kerusakan yang terjadi (Rose, 1999).

Selain karena sensitifitasnya dalam mendeteksi kerusakan, *lamb wave* juga mempunyai sisi ekonomis dalam pelaksanaannya karena dia bisa mengcover daerah plat yang luas hanya pada satu lokasi (Krautkramer, 1998). Kelebihan dari *lamb wave* yang lain adalah bisa dipakai pada plat yang sangat tipis dan bisa mendeteksi keretakan kecil yang tersembunyi pada internal plat (Xiang wan, 2014).

Gelombang (*lamb wave*) bisa ditangkap dengan beberapa jenis transduser diantaranya adalah sebagai berikut (Z. Su, 2006):

1. *Ultrasonic transducers.*
2. *Laser transducers.*
3. *Piezoelectric transducers.*
4. *Interdigital atau Comb transducers.*
5. *Optical fiber transducers.*
6. *Speckle Interferometry.*

Ultrasonic transducers digunakan untuk penggerak dan penginderaan mode *Lamb wave* tunggal. Namun, masalah utama pemakaian *ultrasonic transducers* adalah struktur harus diperiksa dari bagian atas ataupun bawahnya sehingga pemeriksaan struktur menjadi lebih sulit serta masa struktur harus diperhitungkan. Sedangkan untuk pemeriksaan menggunakan *laser tanducers* yang berbasis pada *ultrasonic waves* memang mempunyai presisi pengukuran yang tinggi (K. Heller, 2000), tetapi masalah utamanya adalah biaya pemeriksaan yang sangat mahal.

Untuk mendapatkan sensor yang efisien serta ekonomis maka penggunaan *piezoelectric* sangat disarankan. Hal ini dikarenakan *piezoelectric transducers* bisa digunakan sebagai actuator and sensor untuk gelombang (*lamb wave*). *Piezoelectric transducers* dibuat dari *piezoelectric lead zirconate titanate* (PZT) yang mempunyai kemampuan yang sangat bagus sebagai actuator and sensor gelombang (*lamb wave*) (V. Giurgiutiu, 2001).

Keuntungan dari *piezoelectric transducers* ini adalah sistem integrasinya yang mudah, perhitungan massa diabaikan, kekuatan mekanik yang sangat baik, respon frekuensi yang luas, konsumsi daya yang rendah, impedansi akustik yang rendah dan biaya rendah. Namun, transduser ini menghasilkan beberapa mode yang menunjukkan perilaku materi nonlinier dan *hysteresis* jika digunakan pada tegangan dan suhu yang tinggi, memiliki kekuatan kecil pada regangan tinggi, rapuh dan memiliki *fatigue life* yang rendah (M.J. Schulz, 1999).

Banyak penelitian yang telah dilakukan dalam mendeteksi kerusakan dengan menggunakan *piezoelectric transducers* diantaranya adalah penelitian yang dilakukan oleh Xinglong Liu (2012) tentang lokalisasi kerusakan pada plat dengan menggunakan PZT *sensor network*. Algoritma tentang penempatan PZT *sensor network* telah didapatkan dalam penelitian ini.

Howard Matt dan Ivan Bartoli (2007) melakukan penelitian tentang respon *piezoelectric transducers* berbentuk persegi panjang untuk mendeteksi gelombang *rayleigh* dan *lamb*. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini dapat digunakan untuk merancang sensor ultrasonik yang sangat baik dan *sensitive* serta dapat menyederhanakan algoritma untuk mendeteksi dan melokalisasi kerusakan.

Seth.S et al (2003) melakukan penelitian tentang optimalisasi actuator dan sensor untuk aplikasi *lamb wave* pada struktur komposit. Penelitian membuktikan bahwa *lamb wave techniques* telah terbukti dalam memberikan data yang akurat serta berguna untuk mendeteksi kerusakan pada struktur komposit dan dapat diterapkan dengan daya yang rendah.

Yun-Kyu An et al (2014) melakukan penelitian mengenai penggunaan *lamb waves* untuk mendeteksi *cracks* pada *welded stiffener*. Hasil dari penelitian ini membuktikan bahwa penggunaan *lamb waves* tidak terbatas hanya pada plat tipis tetapi dapat digunakan untuk mendeteksi kerusakan pada *welded stiffener*.

Xiang Wan (2014) melakukan penelitian mengenai simulasi numerik *Nonlinear Lamb Waves* pada plat tipis untuk mendeteksi *micro-cracks*. Berdasarkan simulasi tersebut diperoleh hasil bahwa *micro-cracks* dapat terdeteksi dari pergerakan gelombang yang terjadi.

Penelitian tentang *lamb wave* ini banyak dilakukan pada aluminium plate. Pada penelitian ini studi tentang *lamb wave* akan dilakukan pada plat besi tipis dengan menggunakan permodelan *finite element analysis* (FEM). *Excitation signal* (Vt) yang akan dipakai adalah *Hanning windowed 5-cycle tone burst* dengan berbagai variasi frekuensi dan variasi jumlah puncak.

Permodelan terhadap kerusakan pada surface plat serta pengaruh letak *piezoelectric transducers* terhadap titik kerusakan akan menjadi inti dari penelitian ini. Permodelan dilakukan menggunakan dua buah PZT-5A yang akan diletakan pada bagian atas plat.

1.2 Permasalahan

Permasalahan Utama:

Bagaimana mengidentifikasi kerusakan pada plat baja dengan propagasi gelombang yang berbasis pada *lamb wave* menggunakan *piezoelectric transducers*

Detail Permasalahan:

1. Bagaimana pola gelombang yang terbentuk pada plat mengalami kerusakan ketika *Excitation signal* (Vt) *Hanning windowed 5-cycle tone burst* dibuat dalam satu, tiga dan lima puncak.
2. Bagaimana pengaruh letak *piezoelectric transducers* terhadap titik kerusakan.
3. Bagaimana cara mendeteksi lokasi kerusakan pada plat baja.

1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Tujuan Utama:

Mengetahui Bagaimana cara mengidentifikasi kerusakan pada plat baja dengan propagasi gelombang yang berbasis pada *lamb wave* menggunakan *piezoelectric transducers*

Detail Tujuan:

1. Mengetahui bagaimana gelombang yang terbentuk pada plat mengalami kerusakan ketika *Excitation signal (Vt) Hanning windowed 5-cycle tone burst* dibuat dalam satu, tiga dan lima puncak.
2. Mengetahui bagaimana pengaruh letak *piezoelectric transducers* terhadap titik kerusakan.
3. Mengetahui bagaimana cara mendeteksi lokasi kerusakan pada plat baja.

1.4 Batasan Masalah

1. Penelitian akan dilakukan menggunakan sensor *Piezoelectric transducers* tipe 5A
2. *Excitation signal (Vt)* yang akan dipakai adalah *Hanning windowed 5-cycle tone burst*
3. Frekuensi dibatasi sampai 0.4 MHz-mm atau setara dengan 400 khz

“Halaman sengaja dikosongkan”

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Structural Health Monitoring System

Structural Health Monitoring System (SHMS) adalah pengindraan atau pengevaluasian struktur secara non-destructive memakai banyak variasi dari sensor yang dipasang atau ditanam pada struktur. Pemasangan sensor bertujuan untuk memonitor respon dari struktur, serta mengestimasi kerusakan yang terjadi dan mengevaluasi konsekuensi dari kerusakan yang terjadi pada struktur dalam hal respon, kapasitas dan masa layan struktur (Housner et al. 1997).

Menurut Chang et al. (1999) tujuan dari *Structural Health Monitoring System (SHMS)* adalah mendapatkan pengetahuan tentang integritas struktur dalam masa service secara real-time terus menerus. Pemeriksaan dan pemeliharaan secara berkala terhadap struktur hanya memberikan pengetahuan terbatas tentang kondisi struktur. Namun, kemajuan teknologi memungkinkan pengintegrasian sensor-sensor untuk real-time inspeksi serta pendeteksi kerusakan. Dengan demikian, esensi dari *Structural Health Monitoring System (SHMS)* adalah pengembangan sistem pemantauan kesehatan struktur yang terintegrasi untuk terus menerus melakukan pemantauan terhadap kerusakan struktur dengan tenaga kerja yang seminimum mungkin.

Worden dan Dullieu-Barton (2004) mengatakan bahwa definisi *SHMS* terdiri dari lima prinsip dasar (1) mengetahui kerusakan, (2) mencari tempat terjadinya kerusakan, (3) mengklasifikasikan tipe kerusakan, (4) menaksir tingkat kerusakan dan (5) memprediksi sisa umur dari struktur.

Menurut Sikorsky (1999), *Structural Health Monitoring System (SHMS)* dapat diklasifikasikan baik dari segi kecanggihannya ataupun dari jenis informasi (algoritma pengambilan keputusan) yang mereka mampu berikan. Klasifikasi sistem (*SHMS*) dapat dibagi kedalam beberapa level sebagai berikut (Bisby 2006):

Level 1 : pada tingkat ini, (*SHMS*) mampu mendeteksi kerusakan dalam struktur, tetapi tidak dapat memberikan informasi apapun tentang sifat, lokasi dan seberapa besar kerusakan yang terjadi.

Level 2 : sedikit lebih canggih dari level 1, dimana pada tingkatan ini sistem dapat mendeteksi adanya kerusakan dan juga dapat memberikan informasi tentang lokasi kerusakan yang terjadi.

Level 3 : sistem (*SHMS*) mampu mendeteksi dan menentukan kerusakan, dan memberikan informasi seberapa parah kerusakan yang terjadi.

Level 4 : sistem ini adalah sistem yang paling canggih. Pada tingkat ini, sistem mampu memberikan informasi rinci tentang keberadaan, lokasi dan besarnya kerusakan yang terjadi. Informasi yang didapat bisa dipakai untuk mengevaluasi keamanan dari sistem struktur.

Tingkatan-tingkatan diatas adalah kunci sukses (*SHMS*). Semakin tinggi level sistem semakin tinggi pula informasi yang didapatkan. Walaupun, pengembangan riset masi pada level pertama.

Kunci dari *Structural health monitoring System* (SHSM) ini adalah mengkombinasikan antara teknologi sensor dan analisa permodelan. Sensor berguna untuk mengumpulkan data sedangkan analisa permodelan berguna untuk menentukan perilaku struktur (Gopalakrishnan, 2011)

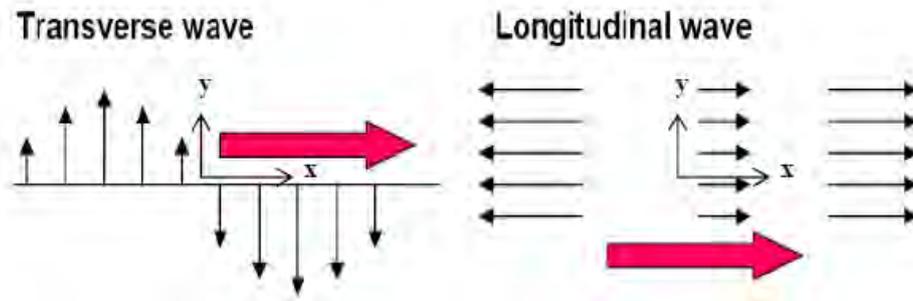
Salah satu aspek penting dalam penggunaan sensor adalah kemampuan untuk mendeteksi kerusakan. Ada beberapa metode untuk mengidentifikasi kerusakan, tetapi fokus dalam tesis ini adalah pada propagasi gelombang *lamb wave* menggunakan sensor *Piezoelectric transducers* pada plat baja tipis.

2.2 Elastic Wave Propagation

Mode gelombang atau *wave mode* didefinisikan berdasarkan perilaku dari osilasi partikel selama masa propagasi gelombang. pada material solid, partikel dapat berosilasi dalam empat bentuk mode; *longitudinal waves*, *shear* (transverse) *waves*, *surface waves*, dan pada material tipis sebagai *plate waves*. Gelombang ini terjadi akibat perpindahan elastis material (material elastically displacing). Partikel mengalami perpindahan dari posisi equilibrium sehingga terjadi internal (electrostatic) *restoring forces* antar partikel yang dipengaruhi pula oleh pergerakan osilasi akibat inersia partikel yang dapat disebut sebagai gelombang elastis atau *elastic waves*.

Ketika *shear waves* terjadi, struktur partikel dapat berpindah terhadap 2 arah, keduanya tegak lurus terhadap garis propagasi. Sebuah gelombang dapat terjadi dalam plane dari suatu plat, *horizontal shear waves*, dan *vertical shear waves* dan terpropagasi normal terhadap plate (sepanjang ketebalan). Sebaliknya, longitudinal waves terosilasi terhadap arah propagasi gelombang. Plate waves adalah suatu getaran gelombang yang kompleks, bergerak terhadap seluruh ketebalan plate dari suatu material dan umumnya dikenal sebagai *Lamb waves*. Gelombang ini sebagai hasil konversi dari *transverse* (T) and *longitudinal* (L) *modes* (Andrews, 2007).

Jika sebuah gelombang *lamb waves* terjadi pada plane strain *free plate*, maka hanya displacement terhadap ketebalan (arah sumbu-y) dan pada arah propagasi gelombang (arah sumbu-x) yang harus diperhatikan. Displacements pada arah sumbu x berhubungan terhadap *longitudinal waves* dan displacement pada arah sumbu y berhubungan dengan *vertical shear waves*. Apabila arah sumbu z diperhitungkan pada propagasi *lamb waves*, hasil gelombang pada arah ini akan dirujuk terhadap *horizontal shear waves*. Bersesuaian dengan *vertical shear waves*, *horizontal shear waves* terpropagasi tegak lurus terhadap *longitudinal waves*. Gambar 2.1 menggambarkan pergerakan partikel pada *transverse* dan *longitudinal waves*. Garis hitam merupakan arah pergerakan gelombang dan panah merah merupakan arah dari propagasi gelombang (Andrews, 2007).



Gambar 2.1 *Transverse dan Longitudinal Waves* (Sejin Han. 2007)

Propagasi gelombang tergantung terhadap *density* (ρ) dan propertis elastis dari suatu medium. Kecepatan *longitudinal wave* dikarakteristikan berdasarkan *Young's modulus* (E) sebagai berikut:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.1)$$

Kecepatan *Transverse* (shear) *wave* dikarateristikan berdasarkan shear modulus (G) yaitu:

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.2)$$

Dikarenakan nilai modulus untuk material isotropis yang digunakan pada *free* plat adalah konstan pada berbagai arah, maka perumusan *longitudinal* and *transverse wave* sebelumnya dapat digantikan dengan *Lamé constants* (λ and μ). Selain itu, nilai modulus dasar dimodifikasi untuk penggunaan pada kecepatan *longitudinal waves*. Ketika dimensi lateral pada medium, yakni pada gelombang arah propagasi memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan panjang gelombang, dimana pada kasus ini, nilai modulus kadang disebut sebagai *plane waves modulus* (M). *Plane waves modulus* bernilai setara dengan $\lambda + 2\mu$ dan nilai *shear modulus* adalah setara dengan μ . Perumusan baru untuk kecepatan *longitudinal* dan *transverse wave*, dengan *plane wave modulus* dirumuskan sebagai berikut:

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2.3)$$

$$M = \frac{E(1-\nu)}{(1-\nu-2\nu^2)} \quad (2.4)$$

$$c_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.5)$$

Dimana ν adalah *Poisson's ratio*. Hubungan *Lamé constants* terhadap nilai E dan *Poisson's ratio*, ν , ditampilkan pada persamaan berikut:

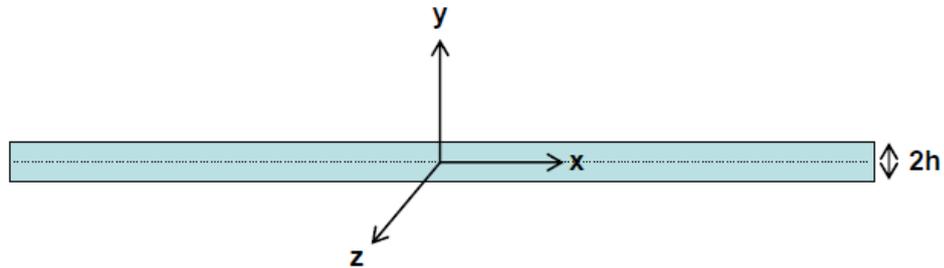
$$\mu = G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.6)$$

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (2.7)$$

Diturunkan sebagai *guided waves*, Lamb waves berperilaku sebagai sebuah sebaran. Pada poin ini, *longitudinal* dan *transverse waves* tidak berperilaku tersebar di karenakan kecepatan gelombang tersebut hanya berupa fungsi dari properties material, bukan frekuensi.

2.3 Lamb Wave pada plate bebas

Pada bahasan ini, teori dan rumus, yang mana berhubungan dengan *propagasi Lamb waves* pada plate bebas dikemukakan. Gambar 2.2 menunjukkan model plate bebas yang digunakan pada thesis ini.



Gambar 2.2 *Free Plate Geometry*

Untuk memahami perilaku *Lamb wave* pada plate bebas, penurunan perumusan harus dilakukan. Pertama berdasarkan perumusan dasar elastisitas dengan Cartesian notasi tensor:

$$\sigma_{ij,j} + \rho f_i = \rho \ddot{u}_i \quad (2.8)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (2.9)$$

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (2.10)$$

Perumusan 2.8 dan 2.9 dapat digunakan untuk seluruh medium yang menerus dan perumusan 2.10 hanya dapat digunakan untuk material isotropis. Setelah mengeliminasi stress dan strain pada perumusan 2.8, 2.9 dan 2.10, didapatkan perumusan:

$$\mu u_{i,jj} + (\lambda + \mu) u_{j,ji} + \rho f_i = \rho \ddot{u}_i \quad (2.11)$$

Dimana *Lame's constants* adalah μ dan λ , u adalah displacement, dan f adalah gaya yang bekerja. Sebagai tambahan, subscript i dan j adalah sama dengan x , y , dan z . Perumusan 2.11 hanya mengandung partikel displacement dan mendeskripsikan sebagian differential equation of motion (perumusan 2.11) dan membutuhkan surface traction boundary conditions:

$$t_i = \sigma_{ji} n_j \quad (2.12)$$

Ketiga komponen traksi i , t , dan j ditentukan pada kondisi batas dengan unit normal n . Permukaan kondisi batas $y = h$ dan $y = -h$ dianggap sebagai traksi bebas.

2.3.1 Solusi terhadap permasalahan plate bebas berdasarkan metode potensial (Method of Potential)

Ketika eksitasi ultrasonic terjadi di beberapa titik pada plate, energy ultrasonic dari daerah eksitasi pertemuan daerah batas atas dan bawah dari plate sehingga menghasilkan modus konversi (gelombang L ke gelombang T, dan sebaliknya). Setelah beberapa perjalanan pada plat, superposisi mengakibatkan terbentuknya "*wave packets*" atau yang umum disebut sebagai *guided wave modes* pada plate. Berdasarkan sudut masuk dan frekuensi yang digunakan, banyaknya perbedaan pada modes yang dapat dihasilkan pada plat dapat diprediksi.

Selanjutnya, solusi dari permasalahan plate bebas (yaitu *displacement potentials techniques*) diperkenalkan. Dengan meniadakan *body forces*, perumusan 2.11 menjadi sebagai berikut:

$$\mu u_{i,jj} + (\lambda + \mu) u_{j,ji} = \rho \ddot{u}_i \quad (2.13)$$

Dengan notasi vektor, perumusan 2.13 dapat ditulis sebagai:

$$\mu \nabla^2 u + (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot u = \rho \ddot{u} \quad (2.14)$$

Dengan mempertimbangkan dekomposisi dari vektor perpindahan dari bentuk:

$$u = \nabla \phi + \nabla \wedge \psi \quad (2.15)$$

Dimana u adalah vektor displacement, ϕ adalah skalar potensial, dan ψ adalah vektor potensial. Perumusan didapatkan berdasarkan *Helmholtz decomposition of a vector*. Untuk permasalahan *plane strain*, ditunjukkan pada konsidi berikut:

$$u_z = w \equiv 0, \quad \frac{\partial}{\partial z} \equiv 0 \quad (2.16)$$

Perumusan 2.15 berubah menjadi:

$$u_x = u = \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad (2.17)$$

$$u_y = v = \frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad (2.18)$$

Untuk penyederhanaan dari notasi, subskrip z telah dihilangkan dari ψ pada perumusan 2.17 dan 2.18. Komponen yang relevan dari stress tensor mengikuti hukum Hooke sebagai berikut:

$$\sigma_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) = \mu \left(2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right) \quad (2.19)$$

$$\sigma_{yy} = \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) + 2\mu \frac{\partial u_y}{\partial y} = \lambda \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) + 2\mu \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} \right) \quad (2.20)$$

Substitusi persamaan 2.15 terhadap persamaan 2.14 didapatkan:

$$\mu \nabla^2 [\nabla \phi + \nabla \wedge \psi] + (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot [\nabla \phi + \nabla \wedge \psi] = \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} [\nabla \phi + \nabla \wedge \psi] \quad (2.21)$$

Dikarenakan $\nabla \cdot \nabla \phi = \nabla^2 \phi$ dan $\nabla \cdot \nabla \wedge \psi = 0$, persamaan 2.21 dapat ditulis ulang sebagai:

$$\nabla[(\lambda + 2\mu)\nabla^2\phi - \rho\ddot{\phi}] + \nabla \wedge [\mu\nabla^2\psi - \rho\ddot{\psi}] = 0 \quad (2.22)$$

Maka, persamaan 2.15 memenuhi persamaan perpindahan apabila:

$$\nabla^2\phi = \frac{1}{c_l^2}\ddot{\phi} \quad (2.23)$$

$$\nabla^2\psi = \frac{1}{c_T^2}\ddot{\psi} \quad (2.24)$$

Dimana

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (2.25)$$

Untuk perumusan plane strain 2.23 dan 2.24 dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} = \frac{1}{c_L^2} \frac{\partial^2\phi}{\partial t^2}, \text{ governing longitudinal waves} \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} = \frac{1}{c_T^2} \frac{\partial^2\psi}{\partial t^2}, \text{ governing shear waves} \quad (2.27)$$

Dimana c_L dan c_T adalah kecepatan *longitudinal* dan *transverse wave* pada material. Karena time dependence diasumsikan harmonis pada bentuk $e^{-i\omega t}$, maka solusi umum pada perumusan 2.26 dan 2.27 (yakni ϕ and ψ) dapat ditemukan dengan rumusan:

$$\phi = \Phi(y)\exp(ikx - \omega t) \quad (2.28)$$

$$\psi = \Psi(y)\exp(ikx - \omega t) \quad (2.29)$$

Dimana ω adalah *circular frequency* pada *external pulse* yang terjadi pada permukaan dan k adalah parameter yang ditentukan yang disebut dengan *wave number* secara numerik bernilai sama dengan ω/c_p dan c_p adalah *phase velocity* yang akan dibahas selanjutnya. Solusi ini mencerminkan *traveling waves* pada arah sumbu x dan *standing waves* pada arah sumbu y. Hal ini terbukti dari fakta bahwa hanya fungsi “*static*” yang tidak diketahui dari y untuk y dependency. Substitusi persamaan tersebut pada persamaan 2.26 dan 2.27 sehingga menghasilkan persamaan Φ and Ψ yang tidak diketahui. Solusi dari persamaan ini adalah:

$$\Phi(y) = A_1 \sin(py) + A_2 \cos(py) \quad (2.30)$$

$$\Psi(y) = B_1 \sin(qy) + B_2 \cos(qy) \quad (2.31)$$

Dimana A_1, A_2, B_1 dan B_2 adalah sembarang konstanta yang dapat ditemukan dari kondisi batas. Konstanta amplitude tidak diketahui A dan B menunjukkan *longitudinal* dan *shear waves*, dan subskrip 1 dan 2 menunjukkan propagasi pada arah luar dan dalam secara berturut turut pada plate. Parameter p dan q dapat dinyatakan dalam *angular frequency* (ω), *circular wavenumber* (k), dan kecepatan *longitudinal* dan *transverse wave* (c_L dan c_T):

$$p^2 = \left[\frac{\omega}{c_L} \right]^2 - k^2 \quad (2.32)$$

$$q^2 = \left[\frac{\omega}{c_T} \right]^2 - k^2 \quad (2.33)$$

Dengan hasil demikian, maka displacement dan stresses dapat ditemukan langsung dengan persamaan 2.17 - 2.20. Menghilangkan $\exp[i(kx - \omega t)]$ pada seluruh persamaan, hasilnya adalah sebagai berikut:

$$u_x = \left[ik\Phi + \frac{d\Psi}{dy} \right] \quad (2.34)$$

$$u_y = \left[\frac{d\Psi}{dy} - ik\Psi \right] \quad (2.35)$$

Yang mana menghasilkan komponen stress dalam bentuk lengkap.

$$\sigma_{yy} = \left[\lambda \left(-k^2\Phi + \frac{d^2\Phi}{dy^2} \right) + 2\mu \left(\frac{d^2\Phi}{dy^2} - ik \frac{d\Psi}{dy} \right) \right] \quad (2.36)$$

$$\sigma_{yx} = \mu \left(2ik \frac{d\Phi}{dy} + k^2\Psi + \frac{d^2\Psi}{dy^2} \right) \quad (2.37)$$

Dikarenakan *field variables* melibatkan unsur sinus dan cosinus dengan argumentasi y, yang aneh (bahkan untuk cosinus) dikarenakan fungsi mengenai $y=0$, solusi dibagi menjadi dua set mode (yakni mode semestris dan asimetris). Khusus untuk displacement pada arah sumbu x, pergerakan akan simetris berhubungan dengan *midplane* dari plat apabila mengandung cosinus dan akan asimetris bila mengandung sinus. Pada sumbu y akan memberikan hasil pergerakan

sebaliknya. Dengan demikian, mode propagasi gelombang pada plate dibagi menjadi dua sistem:

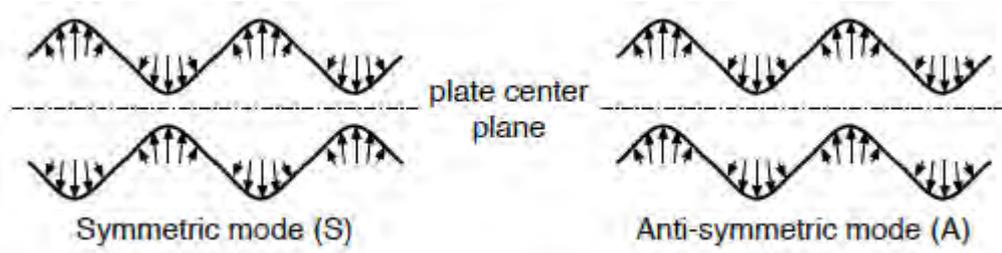
Mode simetris:

$$\begin{aligned}
 \Phi &= A_2 \cos(py) \\
 \psi &= B_1 \sin(qy) \\
 u = u_x &= ikA_2 \cos(py) + qB_1 \cos(qy) \\
 v = u_y &= -pA_2 \sin(py) - ikB_1 \sin(qy) \\
 \sigma_{yx} &= \mu[-2ikpA_2 \sin(py) + (k^2 - q^2)B_1 \sin(qy)] \\
 \sigma_{yy} &= -\lambda(k^2 - p^2)A_2 \cos(py) - 2\mu[p^2 A_2 \cos(py) + ikqB_1 \cos(qy)]
 \end{aligned} \tag{2.38}$$

Mode asimetris:

$$\begin{aligned}
 \Phi &= A_1 \sin(py) \\
 \psi &= B_2 \cos(qy) \\
 u = u_x &= ikA_1 \sin(py) + qB_2 \sin(qy) \\
 v = u_y &= pA_1 \cos(py) - ikB_2 \cos(qy) \\
 \sigma_{yx} &= \mu[-2ikpA_1 \cos(py) + (k^2 - q^2)B_2 \cos(qy)] \\
 \sigma_{yy} &= -\lambda(k^2 - p^2)A_1 \sin(py) - 2\mu[p^2 A_1 \sin(py) + ikqB_2 \sin(qy)]
 \end{aligned} \tag{2.39}$$

Untuk mode simetris, struktur gelombang sepanjang tebal plate adalah simetris untuk u dan asimetris untuk v . Di sisi lain, untuk mode asimetris, struktur gelombang sepanjang tebal plate adalah simetris untuk v dan asimetris untuk u . Gambar 2.3 menunjukkan pergerakan partikel simetris dan asimetris pada ketebalan plate.



Gambar 2.3 Pergerakan partikel mode simetris dan asimetris terhadap ketebalan plat (Zair Asrar Bin Ahmad, 2011)

Konstanta A_1, A_2, B_1 dan B_2 , tidak diketahui. Konstanta tersebut dapat ditentukan dengan mengaplikasikan traksi kondisi batas bebas pada free plate (23):

$$\sigma_{yx} = \sigma_{yy} \equiv 0 \text{ pada } y = \pm d/2 = \pm h \quad (2.40)$$

Pada kasus *plane strain*. Hasil berupa *displacement*, *stress*, dan *strain fields* tergantung kepada tipe mode. Namun, pengaplikasian kondisi batas akan memberikan sistem homogen terhadap dua persamaan untuk dua konstanta A_2, B_1 untuk kasus simetris dan A_1, B_2 untuk kasus asimetris. Untuk persamaan homogen penentuan *coefficient matrix vanish* bertujuan untuk memastikan solusi yang ingin didapatkan dibandingkan dengan cara coba-coba. Berdasarkan persamaan 2.40:

$$\frac{(k^2 - q^2) \sin(qh)}{2ikp(\sin(ph))} = \frac{-2\mu ikq(\cos(qh))}{(\lambda k^2 + \lambda p^2 + 2\mu p^2) \cos(ph)} \text{ Untuk mode simetris} \quad (2.41)$$

$$\frac{(k^2 - q^2) \sin(ph)}{2ikp(\sin(qh))} = \frac{-2\mu ikq(\cos(ph))}{(\lambda k^2 + \lambda p^2 + 2\mu p^2) \cos(qh)} \text{ Untuk mode asimetris} \quad (2.42)$$

Setelah beberapa penyesuain, persamaan 2.41 menjadi:

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = \frac{4k^2 qp\mu}{(\lambda k^2 + \lambda p^2 + 2\mu p^2)(k^2 - q^2)} \text{ Untuk mode simetris} \quad (2.43)$$

Penyebut pada RHS di persamaan 2.41 dapat disederhanakan dengan menggunakan *wave velocities* dan definisi dari p dan q di persamaan 2.32 dan 2.33. Dengan menggunakan persamaan 2.3 untuk menyederhanakan:

$$\lambda = c_L^2 \rho - 2\mu \quad (2.44)$$

Sehingga RHS dari persamaan 2.43 akan menjadi sebagai berikut:

$$\lambda k^2 + \lambda p^2 + 2\mu p^2 = \lambda(k^2 - q^2) + 2\mu p^2 \quad (2.45)$$

$$= (c_L^2 \rho - 2\mu)(k^2 - q^2) + 2\mu p^2 = \rho c_L^2 (k^2 - p^2) - 2\mu k^2$$

Persamaan 2.45 dapat ditulis dengan persamaan 2.32, 2.33 dan 2.5

$$\begin{aligned} \lambda k^2 + \lambda p^2 + 2\mu p^2 &= \rho \omega^2 - 2\rho c_T^2 k^2 \\ &= \rho c_T^2 \left[\left(\frac{\omega}{c_T} \right)^2 - 2k^2 \right] = \rho c_T^2 (q^2 - k^2) = \mu (q^2 - k^2) \end{aligned} \quad (2.46)$$

Substitusi persamaan 2.46 pada form awal dari dispersion equation 2.42, dispersion equation untuk mode simetris ditulis sebagai:

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} \text{ Untuk mode simetris} \quad (2.47)$$

Dispersion equation untuk mode asimetris dapat ditunjukkan dengan menggunakan persamaan 2.42 dengan prosedur yang serupa:

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{(q^2 - k^2)^2}{4k^2 pq} \text{ Untuk mode simetris} \quad (2.48)$$

Untuk ω yang ditentukan dan penurunan k, displacement dapat ditentukan berdasarkan persamaan 2.38. Persamaan ini dikenal dengan nama *Rayleigh-Lamb frequency relations* dan dapat digunakan untuk menentukan kecepatan dimana suatu gelombang pada frekuensi tertentu akan merambat pada plate. Persamaan ini dikenal sebagai *dispersion relations*.

2.4 Phase Velocity (c_p) dan Group Velocity(c_g)

Terdapat beberapa solusi terhadap persamaan 2.47 dan 2.48. Dikarenakan Lamb waves adalah dispersif, untuk tiap tiap solusi, yakni kecepatan gelombang, atau kecepatan fase merupakan sebuah fungsi dari frekuensi. Gelombang-gelombang individu tersebut bereaksi dan menghasilkan rambatan gelombang pada kecepatan grup yang mana kemungkinan memiliki perbedaan dibandingkan dengan kecepatan pergerakan secara individu. Metode numerik untuk menghitung kurva persebaran kecepatan dan fase grup dijabarkan (Rose, 1999) untuk menyelesaikan persamaan 2.47 dan 2.48.

Pada bagian ini, konsep dasar dari kecepatan fase dan kecepatan grup dijabarkan. Fase kecepatan adalah kecepatan yang mana terdapat rambatan dari satu gelombang frekuensi. Dikarenakan period (\tilde{T}) dari sinyal adalah suatu waktu yang dibutuhkan suatu sinyal untuk berjalan pada satu panjang gelombang. Panjang gelombang ($\tilde{\lambda}$) dibagi oleh priode adalah fase kecepatan:

$$c_p = \frac{\tilde{\lambda}}{\tilde{T}} \quad (2.49)$$

Dikarenakan frekuensi (f) adalah jumlah pengulangan sinyal perdetik, maka periode dapat dinyatakan dengan menggunakan frekuensi:

$$\tilde{T} = \frac{1}{f} \quad (2.50)$$

Menggunakan persamaan 2.50, kecepatan fase pada persamaan 2.49 dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$c_p = f\tilde{\lambda} \quad (2.51)$$

Circular frequency (ω) dinyatakan sebagai berikut:

$$\omega = 2\pi f \quad (2.52)$$

Sebagai tambahan, circular wave number (k) dinyatakan sebagai berikut:

$$k = \frac{2\pi}{\tilde{\lambda}} \quad (2.53)$$

Substitusi frekuensi (f) pada persamaan 2.52 dan wavelenght ($\tilde{\lambda}$) dari persamaan 2.53 pada persamaan 2.51 menghasilkan persamaan kecepatan fase baru sebagai berikut (4):

$$c_p = \frac{\omega}{k} \quad (2.54)$$

Group velocity adalah suatu kecepatan perambatan *wave packet*. *Wave packet* adalah sekelompok gelombang yang bergerak bersama dengan frekuensi yang serupa dengan kecepatan yang beragam. Sebagai contoh, sebuah sinyal yang memiliki energy pada suatu kisaran frekuensi. Ketika sinyal ini ditransmisikan pada spesimen, gelombang propagasi sesungguhnya terdiri dari beberapa gelombang komponen pada berbagai frekuensi dan kecepatan fase. Apabila gelombang pada berbagai kecepatan fase ini di superimpose, maka kecepatan yang dihasilkan adalah

sebuah kecepatan group. Kecepatan group tersebut disebut juga sebagai kecepatan sinyal (signal velocity) atau kecepatan dari sebuah *wave packet* yang melalui sebuah struktur. Kecepatan group dapat didefinisikan menggunakan pendekatan klasik. Dengan memperhatikan sebuah gelombang cosinus dengan komponen yang menyusun *wave packet*:

$$u = A \cos(k_i x - \omega_i t) \quad (2.55)$$

Ketika time inceremet $t = t_0 + dt$, perubahan fase pada komponen individual dapat direpresentasikan dengan:

$$dP_i = \{k_i(x_0 + dx) - \omega_i(t_0 + dt)\} - \{k_i x_0 - \omega_0 t\} = k_i dx - \omega_i dt \quad (2.56)$$

Agar *wave packet* tidak berubah, maka perubahan fase pada seluruh komponen harus sama dengan berikut:

$$dP_j - dP_i = 0 \quad (2.57)$$

Berkenaan dengan sudut fase $kx - \omega t$, perumusan 2.57 dinyatakan sebagai berikut:

$$\underbrace{(k_j - k_i)}_{dk} dx - \underbrace{(\omega_j - \omega_i)}_{d\omega} dt = 0 \quad (2.58)$$

Dari persamaan 2.58, kecepatan group dapat ditulis sebagai:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{d\omega}{dk} = c_g \Rightarrow \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad (2.59)$$

Dimana c_g adalah kecepatan group, ω adalah circular frequency dan k adalah jumlah circural wave. Kecepatan group dapat berhubungan dengan kecepatan fase dengan mensubstitusikan k dari persamaan 2.54 pada persamaan 2.59 sebagai berikut:

$$c_g = d\omega \left[d \left(\frac{\omega}{c_p} \right) \right]^{-1} = d\omega \left[\frac{d\omega}{c_p} - \omega \frac{dc_p}{c_p^2} \right]^{-1} = c_p^2 \left[c_p - \omega \frac{dc_p}{d\omega} \right]^{-1} \quad (2.60)$$

Dengan menggunakan persamaan 2.52, kecepatan group dapat ditulis sebagai:

$$c_g = c_p^2 \left[c_p - (fd) \frac{dc_p}{(fd)} \right]^{-1} \quad (2.61)$$

Ketika kecepatan fase atau kecepatan gelombang independen dari frekuensi, kecepatan fase setara dengan kecepatan group. Namun, dalam medium dispersif kecepatan fase bergantung kepada frekuensi. Ketika kecepatan gelombang

menurun terhadap frekuensi, kecepatan group bernilai lebih kecil dibandingkan dengan kecepatan fase. Sebaliknya apabila kecepatan gelombang meningkat dengan frekuensi maka kecepatan group lebih besar dibandingkan dengan kecepatan fase. pada medium dispersif, *packet wave* umumnya terpopagasi pada kecepatan *group* lebih lambat dari kecepatan fase dibandingkan pada kondisi sinyal sesungguhnya.

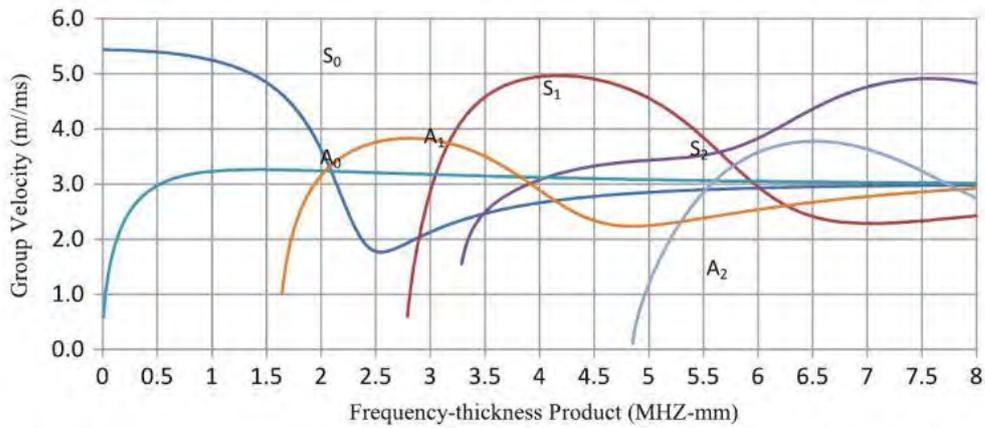
2.5 Lamb Wave Modes

Tujuan utama dari thesis ini adalah untuk mendapatkan respon *lamb wave* dari sebuah sinyal. Apabila *free plate* tereksitasi, eksitasi tersebut akan menghasilkan *plate waves (guided lamb waves)*. Seperti yang disebutkan sebelumnya, *plate waves* terdiri dari *displacement elastis* partikel arah x dan y. *Displacement elastis* pada arah sumbu x disebut sebagai *longitudinal wave* dan pada arah sumbu y disebut sebagai *transverse wave*. Dikarenakan untuk *lamb waves*, *angular frequency* tidak berbanding lurus terhadap jumlah gelombang atau *wavenumber*, dispersi terjadi dan menyebabkan distorsi gelombang ketika terpopagasi. Oleh karena itu *lamb waves* memiliki berbagai mode. Model *lamb wave* dapat dikategorikan menjadi dua mode (yakni *mode simetris* (S_0) dan *mode asimetris* (A_0)). Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3, gerakan partikel simetris terhadap *midplane plate* pada mode simetris. Sebaliknya, gerakan partikel asimetris dengan *midplane plate* pada mode asimetris.

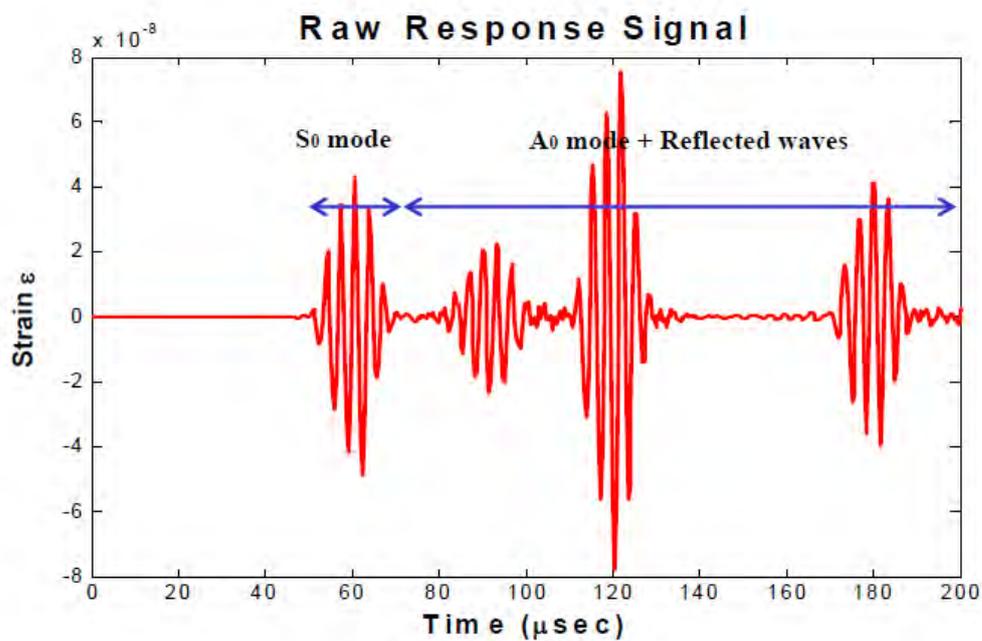
Dalam menerima respon *guided lamb wave*, dapat menghasilkan beberapa mode simetris dan asimetris *lamb wave*. Dari dispersion curve untuk plat dengan ketebalan 1mm pada gambar 2.4 dapat dilihat untuk *frequency-thickness product* (fd) kurang dari 1.6 MHz-mm hanya satu mode yang akan dihasilkan yakni S_0 dan A_0 . Untuk *frequency-thickness product* (fd) lebih dari 1.6 MHz-mm jumlah mode yang akan terjadi lebih dari satu mode hal itu akan mempersulit analisis.

Pada *frequency-thickness product* (fd) 0.4 MHz-mm, kecepatan *group* dari *symmetric mode* relatif lebih cepat dari pada *asymmetric mode*. Sehingga S_0 mode

lebih mudah untuk dianalisa. Maka pada frekuensi 400 KHz dipilih menjadi maximum frekuensi.



Gambar 2.4 *Group velocity* untuk plat dengan ketebalan 1mm (Roy, A et al. 2011)



Gambar 2.5 Respon mode pada *lamb wave* (Sejin Han, 2007)

2.6 Piezoelectric

Piezoelektrik adalah fenomena yang memungkinkan polarisasi listrik dapat diproduksi oleh *mechanical stress* pada bahan tertentu. Ini didefinisikan sebagai efek piezoelektrik langsung. Erat terkait adalah efek *converse* dimana kristal menjadi tegang ketika medan listrik diterapkan. Kedua efek adalah manifestasi dari sifat dasar yang sama dari kristal. Variabel dalam hubungan linear satu sama lain baik dalam proses langsung dan tidak langsung.

2.6.1. Tipe piezoelectric

Adapun beberapa tipe *piezoelectric* adalah sebagai berikut:

Tabel 2.1 Tipe *piezoelectric*

<i>PZT Material Supplier</i>	<i>Navy Type I (PZT-4)</i>	<i>Navy Type II (PZT-5A)</i>	<i>Navy Type VI (PZT-5H)</i>	<i>Navy Type III (PZT-8)</i>
<i>Morgan Matroc</i>	<i>PZT-4</i>	<i>PZT-5A</i>	<i>PZT-5H</i>	<i>PZT-8</i>
<i>Channel Ind.</i>	<i>C5400</i>	<i>C5500</i>	<i>C5700</i>	<i>C5800</i>
<i>EDO Corp.</i>	<i>EC-64</i>	<i>EC-65</i>	<i>EC-76</i>	<i>EC-69</i>
<i>Keramos</i>	<i>K-270</i>	<i>K-350</i>		<i>K-278</i>
<i>Transducer</i>	<i>LTZ-1</i>	<i>LTZ-2</i>	<i>LTZ-2H</i>	
<i>Staveley Sensors</i>	<i>EBL1</i>	<i>EBL2</i>	<i>EBL3</i>	<i>EBL4</i>

1. Navy Type I

Navy type I cocok untuk kondisi konstan ataupun berulang-ulang pada sonar, *ultrasonic cleaning*, dan aplikasi daya tinggi lainnya. Bahan ini menghasilkan amplitudo drive mekanis besar tetapi tetap menjaga *low mechanical* dan *dielectric losses*. Tipe ini biasanya digunakan untuk aplikasi STM, *nano-positioning*, dan terapi medis.

2. Navy Type II

Navy type II memiliki sensitivitas, permitivitas, dan stabilitas yang tinggi apabila digunakan sebagai *receiver* atau *generator* untuk kecepatan, getaran, dan *hydrophones*. Tipe ini biasanya digunakan untuk aplikasi *flow and level sensing* dan transduser doppler medis

3. Navy Type III

Navy type III digunakan dalam aplikasi daya tinggi dan memiliki kualitas mekanik yang sangat tinggi. Dengan kemampuan untuk menahan tingkat tinggi eksitasi listrik dan stres mekanik, navy tipe III memiliki kemampuan terbaik dalam

penanganan daya. Aplikasi termasuk pembersih ultrasonik, gangguan sel, fakoemulsifikasi, dan ultrasonik daya tinggi.

4. Navy Type IV

Navy type IV memiliki permitivitas sangat tinggi, kopling, dan piezoelektrik constant, tetapi stabilitas waktu yang lebih rendah. Hal ini digunakan dalam aplikasi yang memerlukan kontrol gerakan halus atau penerima sensitif. Suhu *Curie* yang rendah membatasi rentang temperatur operasi. Aplikasi termasuk diagnosa medis, NDT industri, STM atau AFM, dan nano-posisi.

Pada tesis ini digunakan navy type II (pzt-5A) karena memiliki sensitivitas dan stabilitas yang tinggi apabila digunakan sebagai *receiver* atau *generator* untuk kecepatan.

2.7 Fast Fourier Transformation (FFT)

Fast Fourier transformation (FFT) adalah revisi dari *continuous and discrete Fourier transformation*. *FFT* 500 kali lebih cepat dalam menemukan frekuensi getaran. Metode *FFT* untuk dua bilangan bulat dapat didefinisikan dalam persamaan ini.

$$xk = \sum_{j=0}^{N-1} xj e^{-2\pi i \frac{jk}{N}} \quad (2.62)$$

Dengan menghilangkan $1/N$ dari rumusan diatas, maka satu dimensi dari rumusan *continuous Fourier transformation* dapat diubah menjadi dua dimensi.

$$j = j(a, b) = aN_1 + b; \quad 0 \leq a \leq N_2, 0 \leq b < N_1 \quad (2.63)$$

$$k = k(c, d) = cN_2 + d; \quad 0 \leq c \leq N_2, 0 \leq d < N_1 \quad (2.64)$$

Dengan mensubtitusikan persamaan 2.63 and 2.64 maka didapatkan persamaan 2.65 adalah sebagai berikut

$$x(c, d) = \sum_{b=0}^{N_1-1} W_N^{b(cN_2+d)} \sum_{a=0}^{N_2-1} x(a, b) W_{N_2}^{ad} \quad (2.65)$$

Pendekatan untuk *FFT derivation* dapat diterapkan dalam $N = \prod_{i=1}^{PN} P_i^{r_i}$, ini membuat aritmatika menjadi seperti berikut

$$O\left(N\left(\sum_{i=1}^{PN} r_i \cdot p_i\right)\right) = O(N)^2 \quad (2.66)$$

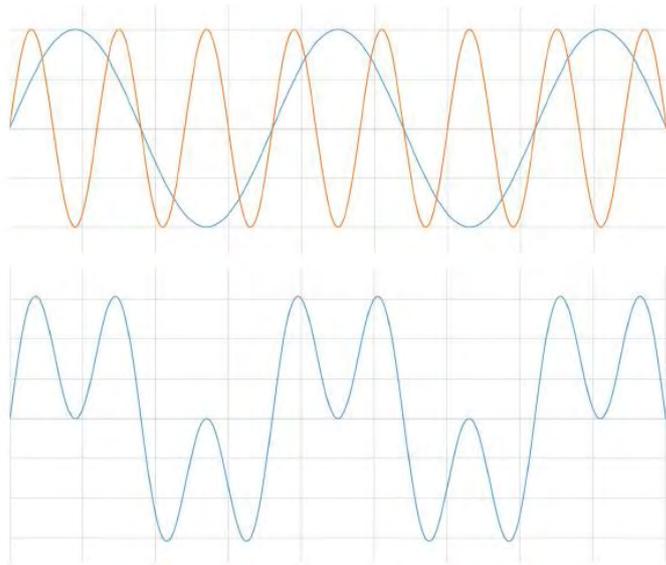
And if $N = 2^n$. FFT arithmetic is

$$O\left(N\left(\sum_{i=1}^N 2\right)\right) = O(N2n) = O(N\log_2(N)) \quad (2.67)$$

FFT algorithm menggunakan data array dalam perhitungan. $N=2$ berarti menggunakan dua array dalam mendeteksi frekuensi.

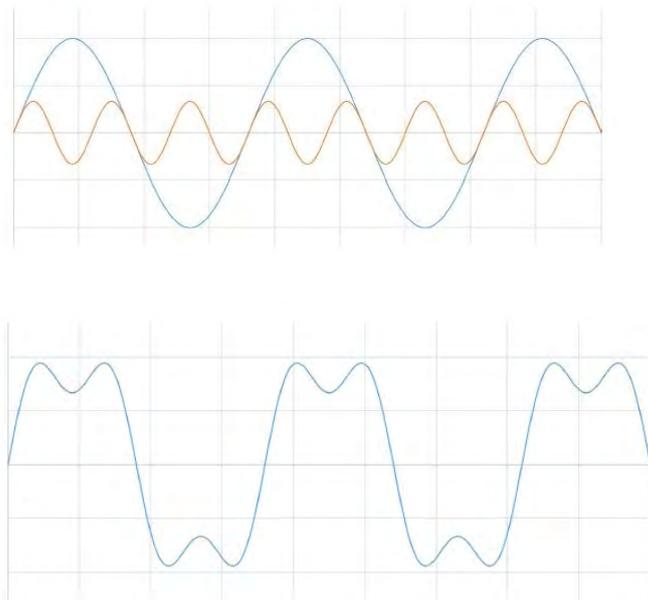
Transformasi Fourier sangat powerful dalam pengolahan sinyal dan pemecahan masalah dalam error pada sinyal. Meskipun transformasi Fourier adalah fungsi matematika yang rumit, tetapi untuk memahami konsepnya bukan sesuatu yang begitu sulit. Pada dasarnya sinyal yang ada dikelompokkan ke dalam gelombang sinus dari amplitudo dan frekuensi yang berbeda.

Sinyal biasanya dilihat sebagai sebuah *voltage* yang berubah dari waktu ke waktu. Hal ini disebut sebagai domain waktu. Teorema Fourier menyatakan bahwa setiap bentuk gelombang dalam domain waktu dapat diwakili oleh jumlah yang sama dengan sinus dan cosinus. Sebagai contoh, dua gelombang sinus di mana sinyal pertama tiga kali lebih cepat dari sinyal kedua. Ketika sinyal itu digabung maka gambaran sinyal adalah sebagai berikut:



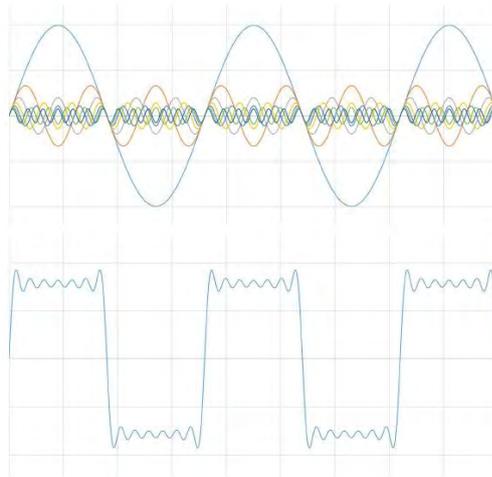
Gambar 2.6 Dua buah signal yang digabungkan membentuk signal yang baru

Jika gelombang kedua juga $1/3$ amplitudo. Kali ini, hanya puncaknya yang terpengaruh.



Gambar 2.7 Amplitudo yang terbentuk akibat penggabungan gelombang yang berpengaruh pada puncak gelombang

Setelah itu, sinyal ketiga ditambahkan lagi $1/5$ amplitude dan frekuensi dari sinyal yang original. Jika hal ini terus dilakukan maka bentuk dari gelombang itu akan diketahui.



Gambar 2.8 Gelombang berbentuk persegi yang terbentuk dari penjumlahan fungsi sinus

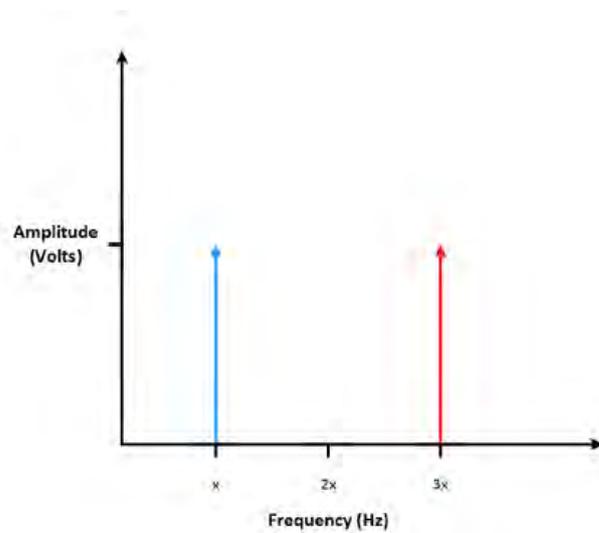
Dari gambar 2.8 terlihat bahwa sinyal yang ada mempunyai bentuk persegi. Dengan cara ini, semua sinyal dalam domain waktu dapat diwakili oleh serangkaian fungsi sinus.

Dengan cara diatas, sinyal bisa dibentuk dari fungsi sinus. Sebaliknya, jika sinyal bisa dibentuk dari fungsi sinus, maka sinyal yang ada juga pasti bisa di dekonstruksikan ke fungsi sinus. Ketika sinyal sudah didekonstruksikan, sinyal original bisa dianalisa dalam frekuensi yang berbeda-beda.

2.7.1 Dekonstruksi Sinyal Menggunakan FFT

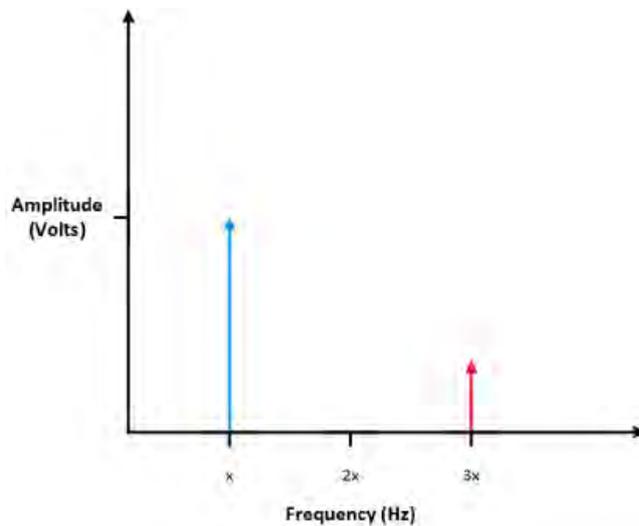
Transformasi Fourier mendekonstruksi sinyal dari *time domain* ke dalam *frequency domain*. *Frequency domain* menunjukkan *voltages* pada frekuensi yang berbeda-beda. Ini adalah cara yang berbeda untuk melihat sinyal yang sama.

Dari gambar 2.6, terlihat dua buah sinyal dengan dua fungsi sinus yang berbeda. Dalam *frequency domain* sinyal dengan dua fungsi sinus yang berbeda itu hanya terlihat dalam dua garis yang berbeda (lihat Gambar).



Gambar 2.9 Ketika dua gelombang sinus dari amplitudo yang sama ditambahkan, mereka menghasilkan dua paku dalam domain frekuensi.

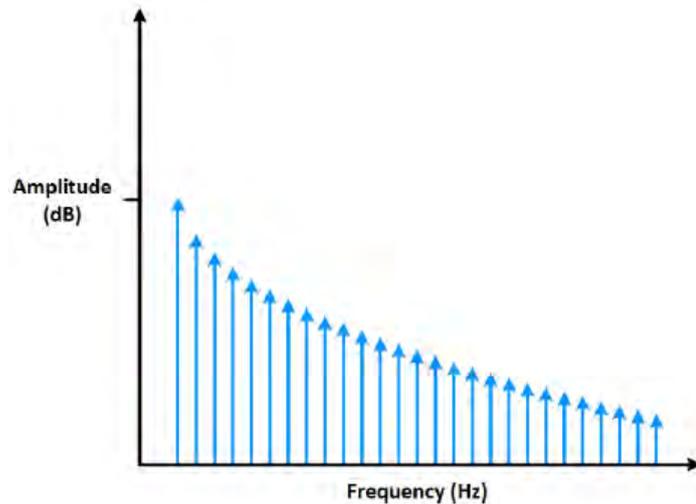
Amplitudo original signal diwakili oleh sumbu vertikal. Dari Gambar 2.7 dapat dilihat dua sinyal yang berbeda dengan amplitudo yang berbeda, terjadi lonjakan yang berbeda pada amplitudanya. Dalam frequency domain lonjakan yang terjadi dapat terlihat dari dua garis yang berbeda (lihat gambar).



Gambar 2.10 Grafik spike tertinggi adalah frekuensi amplitudo terbesar.

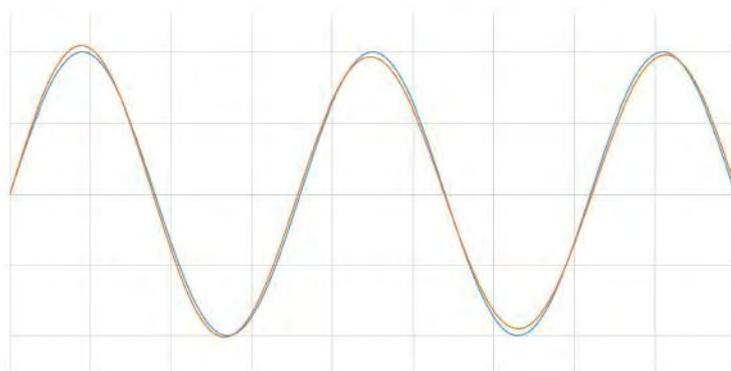
Hal ini juga dapat membantu untuk melihat bentuk sinyal dalam domain frekuensi. Sebagai contoh, gelombang persegi yang terjadi dalam frequency domain. Dengan membuat gelombang persegi menggunakan banyak gelombang

sinus pada berbagai frekuensi, akan terlihat banyak garis sinyal dalam frequency domain untuk setiap sinyal ditambahkan. Jika garis sinyal yang terjadi tertata dalam bentuk seperti gambar dibawah maka sinyal aslinya adalah gelombang persegi.



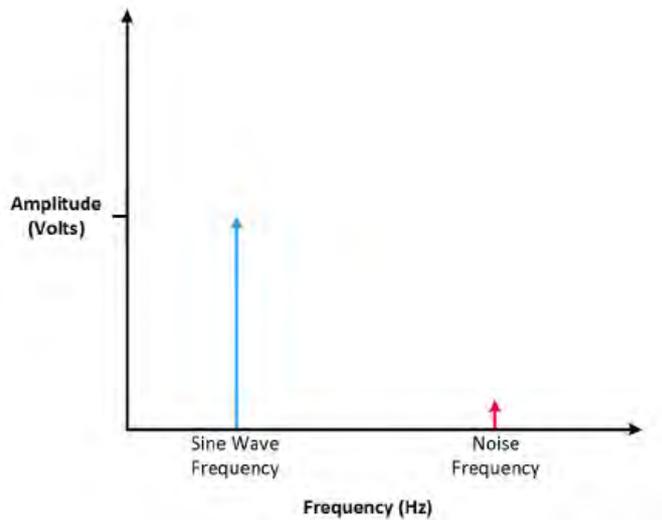
Gambar 2.11 Frekuensi domain dari gelombang sinus terlihat seperti sebuah lereng.

Melihat sinyal dalam *frequency domain* dapat membantu ketika memvalidasi dan pemecahan masalah sinyal. Sebagai contoh, jika kita memiliki sinyal dengan output berupa gelombang sinus. Kita dapat melihat sinyal output pada osiloskop dalam *time domain* seperti pada Gambar 2.12 di bawah ini.



Gambar 2.12 Jika dua gelombang ini ditambahkan, mereka akan terlihat seperti gelombang sinus yang sempurna karena mereka begitu mirip.

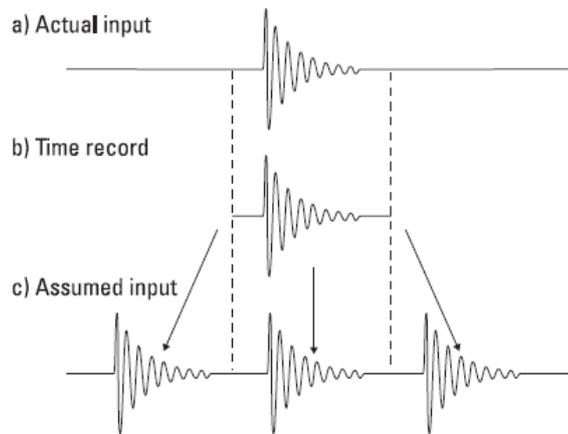
Namun, kita melihat sinyal dalam frequency domain, kita mengharapkan hanya satu lonjakan yang terjadi karena pada output gelombang sinus hanya frekuensi tunggal yang akan terjadi. Namun, jika terjadi lonjakan lain, ini berarti gelombang sinus yang terjadi terganggu.



. Gambar 2.13 Frequency domain

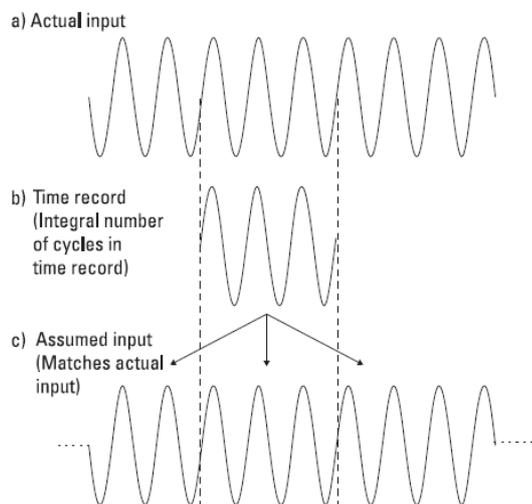
2.8 Windowing

Ada beberapa hal yang dapat mempengaruhi penggunaan *Fast Fourier Transform* dalam domain frekuensi analysis. FFT menghitung spektrum frekuensi hanya dari satu blok sampel input yang disebut *time record*. Selain itu, algoritma FFT didasarkan pada asumsi bahwa *time record* diulang sepanjang waktu seperti yang diilustrasikan pada Gambar



Gambar 2.14 FFT catatan asumsi-waktu diulang seluruh waktu

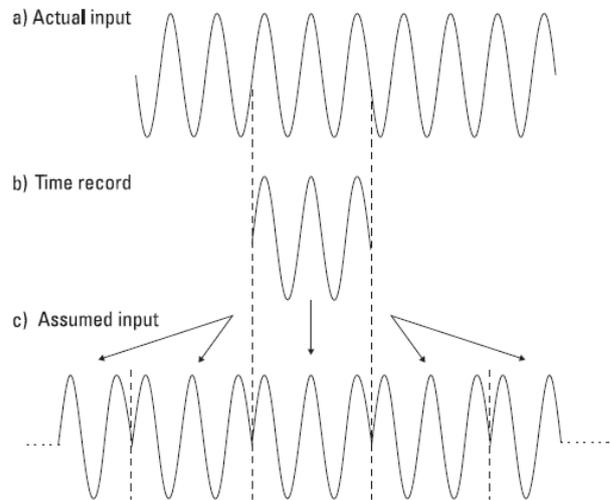
Kasus diatas tidak akan menjadi masalah jika sinyal yang terjadi adalah transient. Tapi jika sinyal yang terjadi adalah sinyal yang *continuous* seperti sinyal dalam fungsi sinus maka akan terjadi masalah jika sinyal yang terjadi tidak periodik. Ketika sinyal periodik terjadi asumsi diatas masi benar. Gambar dibawah ini mengilustrasikan sinyal periodik yang terjadi:



Gambar 2.15 Input sinyal periodik dalam timerecord.

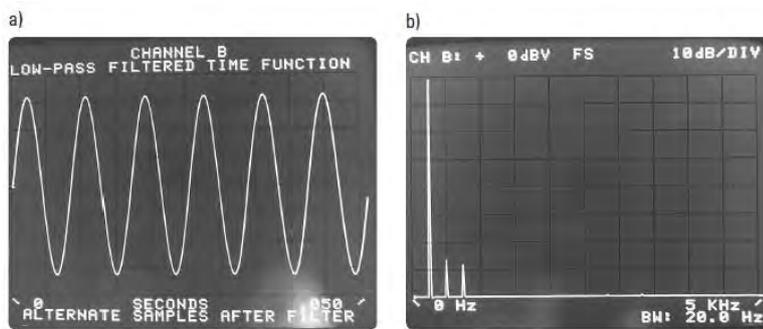
Tetapi, jika sinyal yang terjadi tidak periodik maka akan sangat sulit mengasumsikan sinyal yang ada. Gambar (2.16) mengilustrasikan masalah yang terjadi jika input sinyal tidak periodik. Algoritma FFT dihitung atas dasar bentuk gelombang yang sangat terdistorsi pada Gambar 2.16c. input gelombang sinus yang

sebenarnya memiliki spektrum frekuensi baris. Spektrum input diasumsikan oleh FFT pada Gambar 2.16c menjadi sangat berbeda.

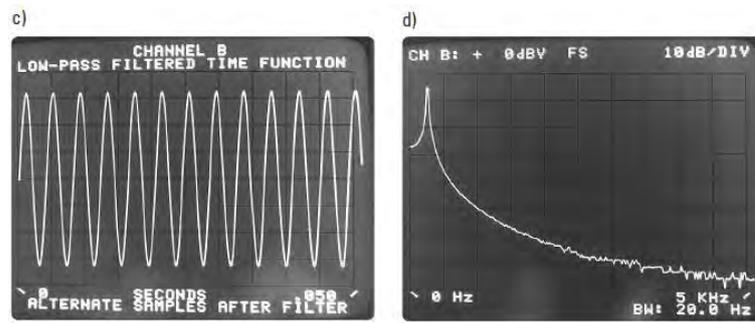


Gambar 2.16 Input sinyal tidak periodik dalam timerecord.

Pada Gambar 2.17 kita lihat dalam pengukuran aktual bahwa harapan kita sudah benar. Pada gambar 2.17 a dan b, kita melihat gelombang sinus yang periodik. Spektrum frekuensi adalah satu baris yang lebar hanya ditentukan oleh resolusi Dinamis *Signal Analyzer*. Di sisi lain, pada gambar 2.17 c dan d ditunjukkan gelombang sinus yang tidak periodik. Kekuatannya telah menyebar ke seluruh spektrum seperti yang kita prediksi. Energi yang menyebar di seluruh domain frekuensi adalah fenomena yang dikenal sebagai kebocoran. Kebocoran energi terjadi dari satu baris resolusi FFT ke semua lini lainnya.



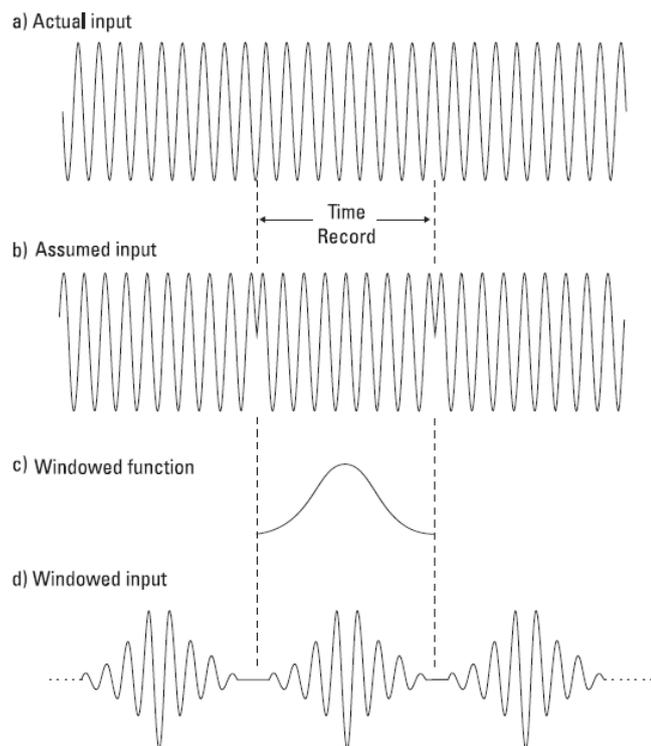
a) & b) Sine wave periodic in time record



c) & d) Sine wave not periodic in time record

Gambar 2.17 Hasil FFT aktual

Dengan kebocoran yang terjadi, FFT tidak akan menjadi spektrum yang sangat berguna, karena hasil fft yang didapat tidak tepat. Solusi untuk masalah kebocoran ini dikenal sebagai windowing. Proses windowing akan diilustrasikan pada gambar:



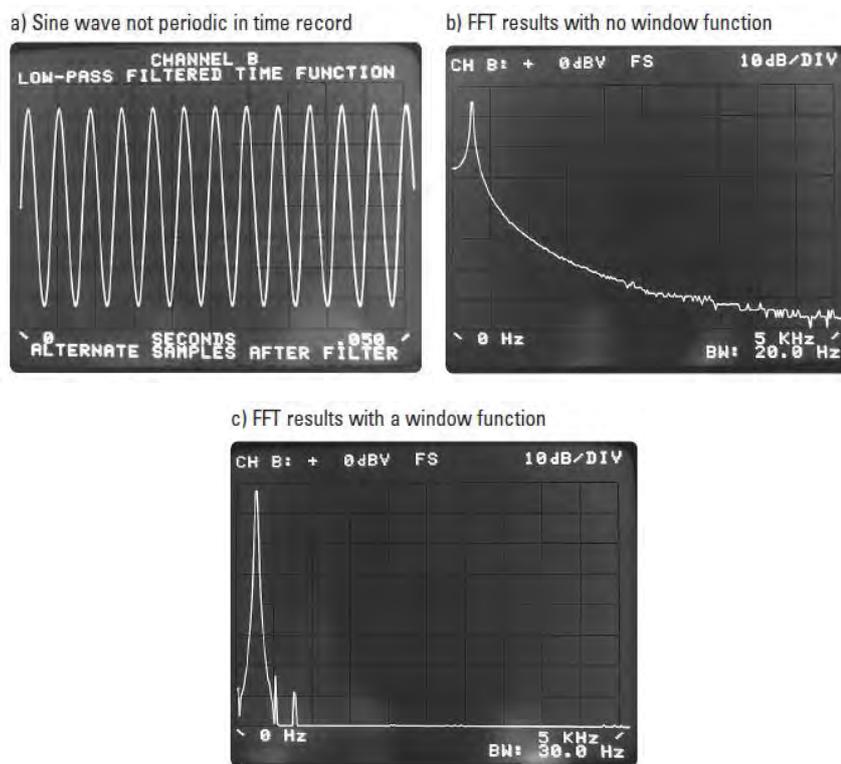
Gambar 2.18 Pengaruh windowing dalam domain waktu.

Pada Gambar 3.18 bentuk gelombang input diasumsikan dari gelombang sinus yang tidak periodik. Sebagian besar masalah terjadi di tepi catatan waktu. FFT

biasanya mengabaikan catatan waktu diakhir dan berkonsentrasi pada catatan waktu ditengah, sedangkan kita mengharapkan satu line pada spectrum *frequency domain*.

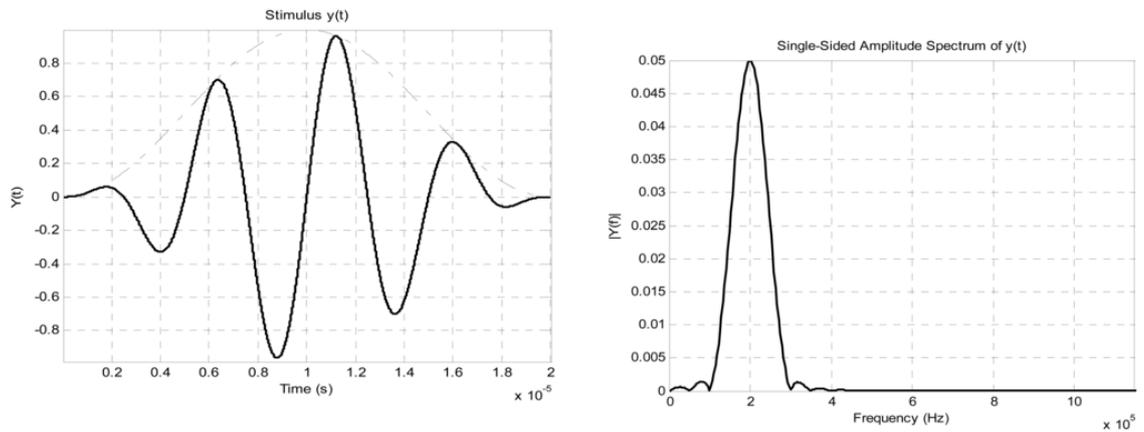
Jika kita menggabungkan catatan waktu diujung yang bernilai nol dan ditengah yang merupakan puncak dari catatan waktu, kita bisa mengkonsentrasikan FFT pada catatan waktu ditengah. Fungsi gabungan tersebut bisa dilihat pada gambar 3.18c fungsi gabungan itu biasa disebut *window functions*.

Gambar 3.19 mengilustrasikan proses FFT tanpa *window functions* dengan proses FFT memakai *window functions*.



Gambar 2.19 Pengurangan kebocoran dengan windowing.

Sejumlah fungsi dapat digunakan untuk windowing data, diantaranya yang paling sering dipakai adalah Hanning. Hanning window mempunyai sentuhan nol di kedua ujungnya menghilangkan semua diskontinuitas. Gambar 2.20 adalah contoh fungsi hanning window



Gambar 2.20 Hanning window

Tidak ada pendekatan universal untuk memilih fungsi jendela. Namun, tabel di bawah dapat membantu dalam pilihan awal. Selalu membandingkan kinerja fungsi jendela yang berbeda untuk menemukan yang terbaik untuk aplikasi

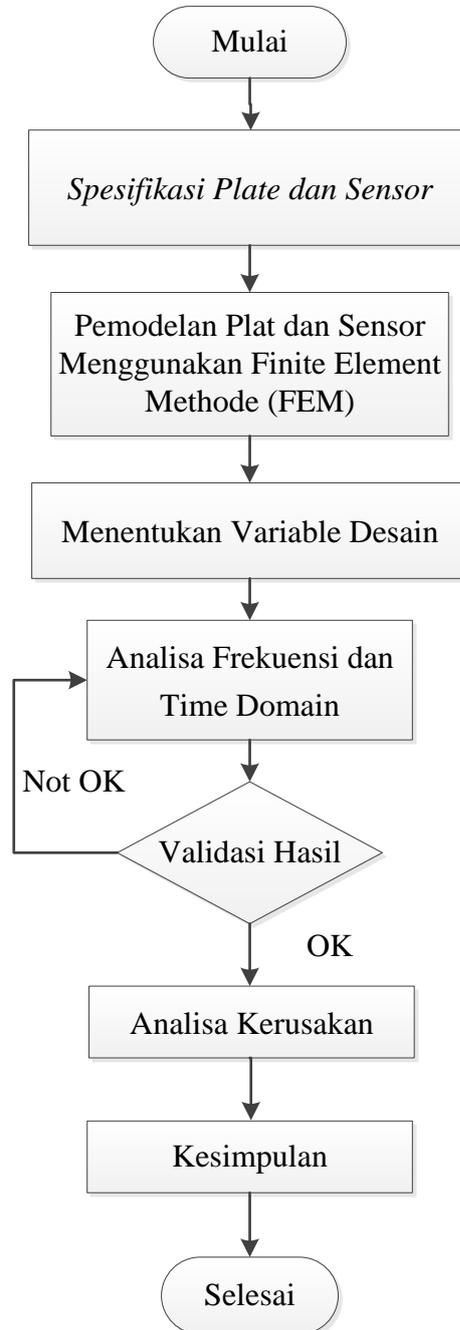
Tabel 2.2 Pemilihan windowing

Signal Content	Window
<i>Sine wave or combination of sine wave</i>	<i>Hann</i>
<i>Sine wave (amplitude accuracy is important)</i>	<i>Flat Top</i>
<i>Narrowband random signal (vibration data)</i>	<i>Hann</i>
<i>Broadband random (white noise)</i>	<i>Uniform</i>
<i>Closely spaced sine waves</i>	<i>Uniform, Hamming</i>
<i>Excitation signals (hammer blow)</i>	<i>Force</i>
<i>Response signals</i>	<i>Exponential</i>
<i>Unknown content</i>	<i>Hann</i>
<i>Sine wave or combination of sine wave</i>	<i>Hann</i>
<i>Sine wave (amplitude accuracy is important)</i>	<i>Flat Top</i>
<i>Narrowband random signal (vibration data)</i>	<i>Hann</i>
<i>Broadband random (white noise)</i>	<i>Uniform</i>
<i>Two tones with frequencies close but amplitudes very different</i>	<i>Kaiser-Bessel</i>
<i>Two tones with frequencies close and almost equal amplitudes</i>	<i>Uniform</i>
<i>accurate signal tone amplitude measurements</i>	<i>Flat Top</i>

Pada tesis ini, fungsi windowing dipakai sebagai *Excitation signal* (Vt). Dimana $w(t)$ adalah *Hanning window*. *Hanning windowed 5-cycle tone burst* dengan fungsi sebagai berikut:

$$\begin{aligned} v(t) &= w(t) \cdot [-V_{\max} \sin(2\pi f_e t)] \\ w(t) &= 0.5 \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi f_e t}{5}\right) \right] \end{aligned} \quad t = 0 \dots 5/f_e \quad (2.68)$$

BAB 3 METODOLOGI



Gambar 3.1 Metodologi Penelitin

3.1 Spesifikasi Plat dan Sensor

3.1.1 Model Plat dan *piezoelectric transducers*

Model Plat baja yang dipakai adalah sebagai berikut:

Lebar	= 500 mm
Tebal	= 1 mm
Berat Jenis (ρ)	= 7850 kg/m ³
Shear Modulus (G)	= 7.93 x 10 ⁹ N/m ²

Model *piezoelectric transducers* yang dipakai adalah sebagai berikut:

Type	= <i>Lead Zirconate Titanate (PZT-5A)</i>
Lebar	= 6.35 mm
Tebal	= 0.25 mm
<i>Density</i>	= 7750 kg/m ³
<i>Crystal symmetry class</i>	= Uniaxial

Compliance matrix (ordering: xx, yy, zz, yz, xz, xy):

$$S_E = \begin{bmatrix} 16.4 & -5.74 & -7.22 & 0 & 0 & 0 \\ -5.74 & 16.4 & -7.22 & 0 & 0 & 0 \\ -7.22 & -7.22 & 18.8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 47.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 47.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 44.3 \end{bmatrix} \times 10^{-12} \frac{m^2}{N}$$

Coupling matrix (ordering: xx, yy, zz, yz, xz, xy):

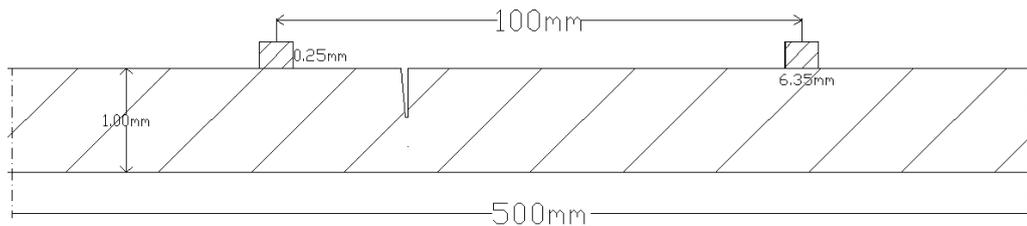
$$d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 584 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 584 & 0 & 0 \\ -171 & -171 & 374 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times 10^{-12} \frac{C}{N}$$

Relative permittivity:

$$\frac{\epsilon_t}{\epsilon_0} = \begin{bmatrix} 1730 & 0 & 0 \\ 0 & 1730 & 0 \\ 0 & 0 & 1700 \end{bmatrix}$$

Dimana $\varepsilon_0 = 8.852 \times 10^{-12} \frac{F}{m}$

Berikut gambar dimensi plat serta *piezoelectric transducers*. Untuk mempermudah visualisasi, gambar dibawah ini dibuat skala arah lebar 1:2 dan skala arah tebal 1:0.1



Gambar 3.2 plat dan *piezoelectric transducers*

3.2 Permodelan FEM

Pada dasarnya setiap analisa struktur mempunyai step-step yang sama dalam pembuatan permodelan strukturnya. Penjelasan Singkat Tahapan dalam Membuat Model akan dijelaskan Berikut ini :

1. *Defining Geometry*

Pada tahap ini dibuat elemen - elemen penyusun plat dengan sensor yang nantinya akan disusun menjadi satu kesatuan struktur untuk dianalisa. Elemen - elemen penyusun tersebut adalah plat baja dan dan dua buah *Lead Zirconate Titanate (PZT-5A)* yang satu sebagai sensor dan yanglainnya sebagai actuator.

2. *Defining Material*

Pada tahap ini ditentukan jenis material yang digunakan. Pada tesis ini material yang digunakan adalah baja dan *Lead Zirconate Titanate (PZT-5A)*. Beberapa input dimasukkan seperti kekuatan bahan, modulus elastisitas, poisson's ratio, dan lain sebagainya yang telah diperoleh dan dijelaskan pada subbab sebelumnya.

3. *Setting up Physics*

Pada tahap ini ditentukan *Boundary* dari masing masing element

4. *Meshing*

Setiap bagian harus dibagi menjadi potongan-potongan kecil. Hal ini juga berfungsi untuk perambatan gelombang.

5. Simulation

Setelah semua prosedur pemodelan sudah dilakukan, langkah berikutnya adalah memilih simulasi yang dijalankan, dalam hal ini simulasi time domain yang menjadi pilihan analisa.

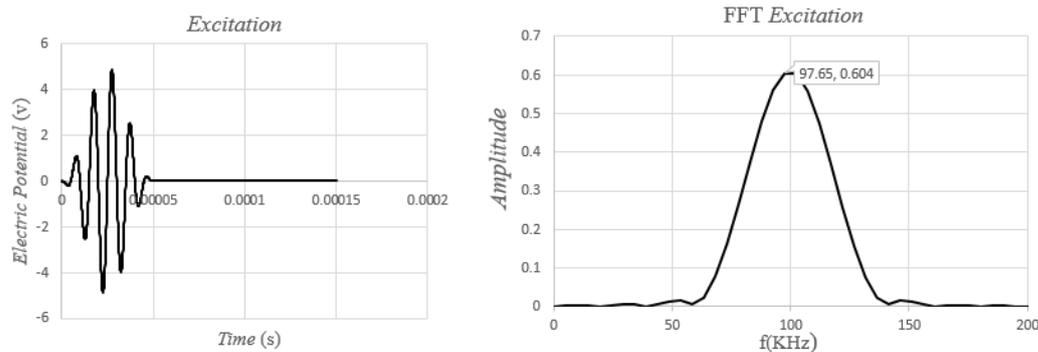
6. Analysis of Result

Setelah pemilihan analisa dilakukan, hasil dari analisa bisa didapatkan dalam bentuk grafik ataupun text.

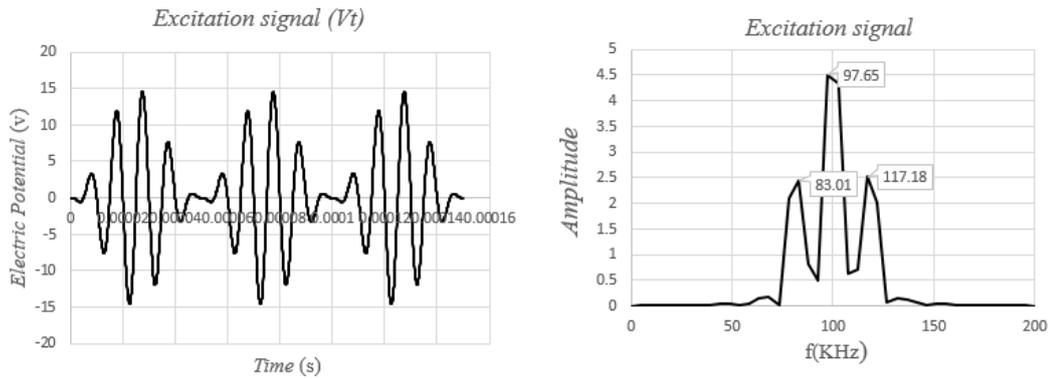
3.3 Variable desain

Dalam tesis ini, studi mengenai wave propagation yang berbasis pada lamb wave dilakukan pada plat baja tipis dengan beberapa analisa sebagai berikut:

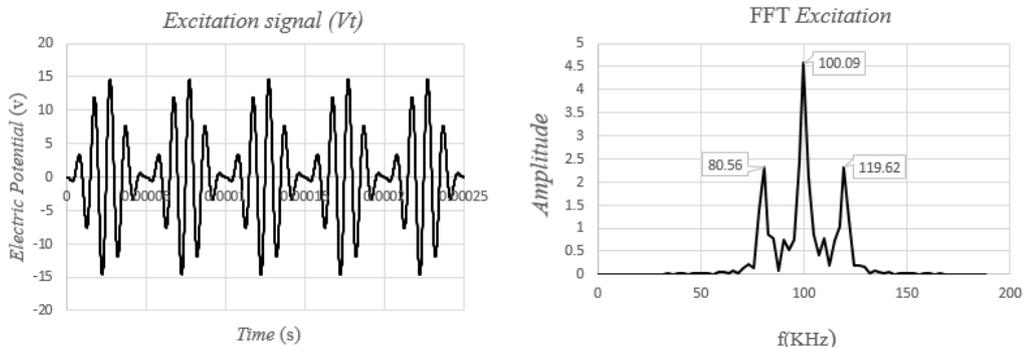
1. Studi pengaruh jumlah *cycle* pada *Excitation signal* (V_t) *Hanning windowed 5-cycle tone burst* dalam mendeteksi kerusakan. Jumlah puncak yang akan distudi masing-masing adalah satu, tiga dan lima. Berikut adalah gambar *Excitation signal* (V) dalam time domain dan frequency domain:



Gambar 3.3 *Excitation signal* satu puncak

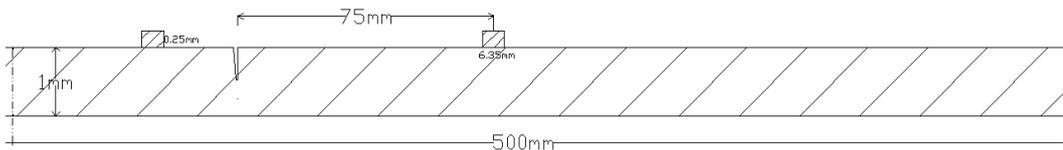


Gambar 3.4 *Excitation signal* tiga puncak

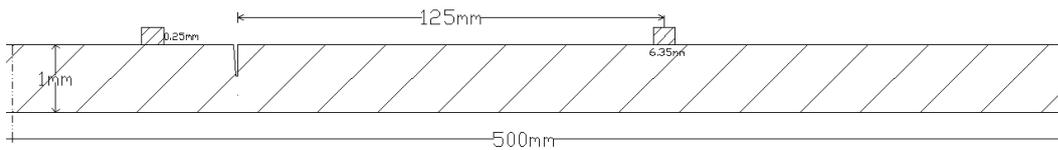


Gambar 3.5 *Excitation signal* Lima puncak

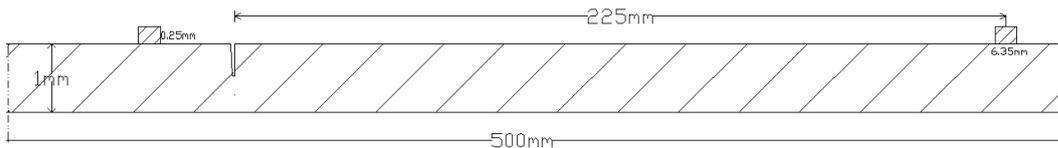
- Studi bagaimana pengaruh letak *piezoelectric transducers* terhadap titik kerusakan. Jarak *piezoelectric transducers* dari titik kerusakan masing-masing adalah 75mm, 125mm, dan 225mm. Berikut adalah gambar posisi *piezoelectric transducers* dari titik kerusakan. gambar dibawah ini dibuat skala arah lebar 1:2 dan skala arah tebal 1: 0.1



Gambar 3.6 Posisi sensor 75 mm terhadap titik kerusakan



Gambar 3.7 Posisi sensor 125 mm terhadap titik kerusakan



Gambar 3.8 Posisi sensor 225 mm terhadap titik kerusakan

3. Studi bagaimana cara menemukan lokasi kerusakan pada plat baja dengan menggunakan sensor *piezoelectric transducers*.

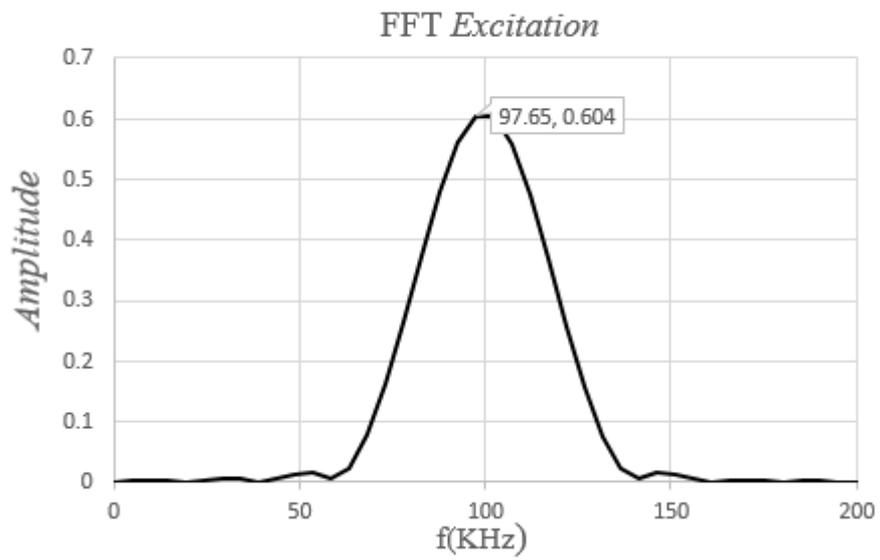
3.4 Analisa Time dan Frequency domain

Pada tahap ini, hasil output dari software *finite element* berupa electric potential dalam time domain akan dianalisa dan dibandingkan antar plat normal dengan plat yang mengalami kerusakan, untuk selanjutnya akan dilakukan proses FFT untuk mengubah dari time domain ke frekuensi domain. Hasil dari frekuensi domain analysis bisa menunjukkan pada frekuensi berapakah plat yang mengalami kerusakan.

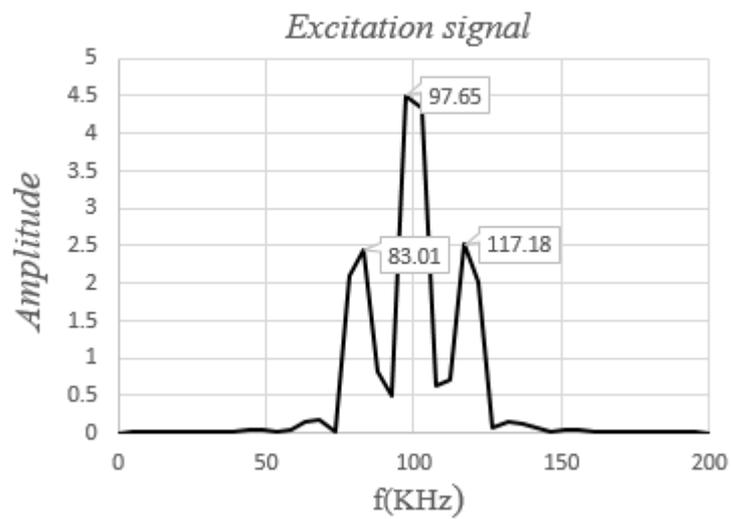
3.5 Validasi

Validasi akan dilakukan menggunakan FFT dari input *electric potential*, jika permodelan yang dilakukan benar, hasil output berupa *electric potential* untuk plat yang tidak mengalami kerusakan dalam frekuensi domain akan sama dengan input electric potential dalam frekuensi domain. Berikut adalah batasan frekuensi untuk plat normal;

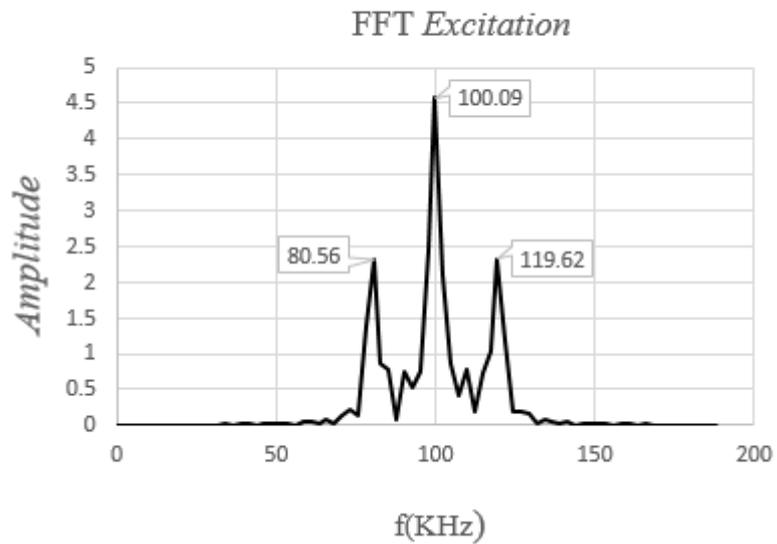
- a. Untuk exitasi frekuensi 100 Khz seharusnya hasil output plat normal berada di frekuensi ± 100 Khz seperti pada gambar dibawah ini:



Gambar 3.9 *Excitation signal* pada frekuensi 100 KHz satu puncak



Gambar 3.10 *Excitation signal* pada frekuensi 100 KHz tiga puncak



Gambar 3.11 *Excitation signal* pada frekuensi 100 KHz lima puncak

3.6 Analisa Kerusakan

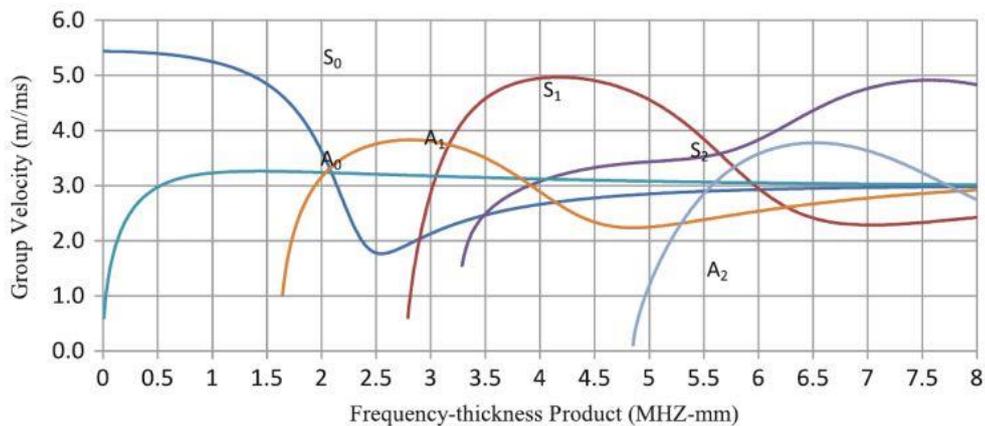
Pada bagian analisa kerusakan akan dilihat bagaimana pola gelombang yang terjadi akibat terjadinya kerusakan. Selain pola gelombang plat akan dianalisa dalam frekuensi domain, dimana akan dibandingkan pada frekuensi berapakah plat mengalami kerusakan pada surface plat.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

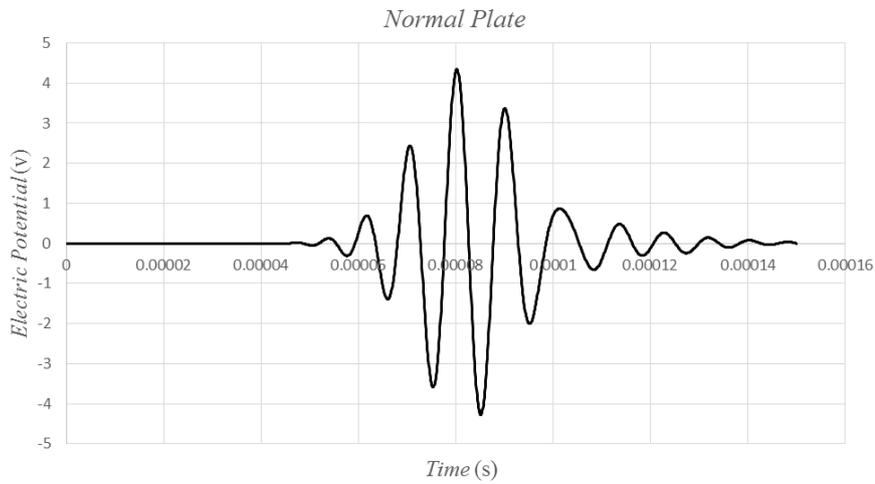
4.1 Permodelan *finite element* (FEM)

Pada bab ini akan dibahas cara dan hasil dari pemodelan plat tipis dengan dua buah *piezoelectric* yang berfungsi sebagai *actuator* dan *sensor*. Langkah pertama dalam analisa propagasi gelombang yang berbasis pada *lamb wave* adalah mengetahui *frequency-thickness product* (fd) yang berfungsi sebagai batasan agar dalam analisa tidak terjadi dua mode yang akan menyulitkan analisa. Dengan melihat *dispersion curve* pada gambar 4.1 batasan *frequency-thickness product* (fd) dapat diketahui.



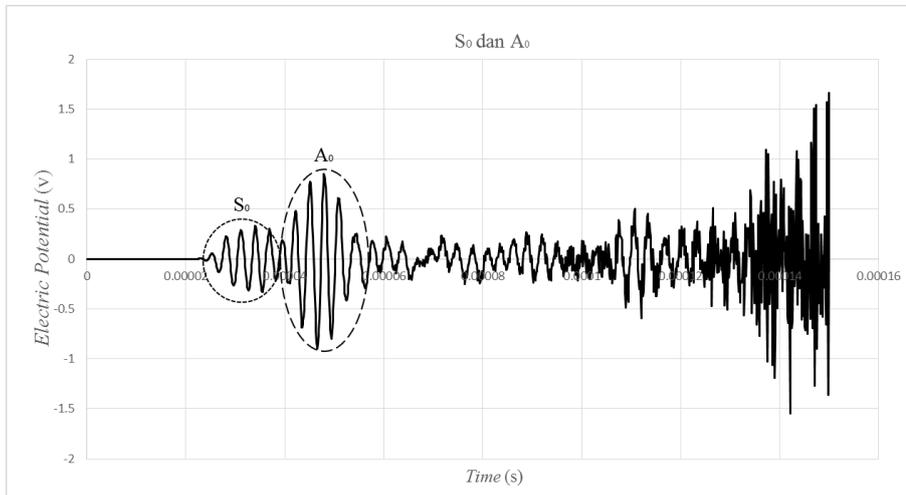
Gambar 4.1 *dispersion curve* untuk plat dengan ketebalan 1mm

Dari Gambar 4.1 diketahui bahwa batasan *frequency-thickness product* (fd) agar hasil analisa mempunyai satu mode yaitu S_0 dan A_0 adalah 1.6 Mhz-mm. Pada *frequency-thickness product* (fd) 0.4 MHz-mm, kecepatan *group* dari *symmetric mode* relatif lebih cepat dari pada *asymmetric mode*. Sehingga S_0 mode lebih mudah untuk dianalisa. Maka pada tesis ini frekuensi maksimum yang akan dipakai adalah 400 KHz agar hanya satu mode saja yang dianalisa. Berikut contoh analisa dalam 100 KHz dengan hanya satu mode yaitu S_0 .



Gambar 4.2 Mode S_0

Gambar diatas menunjukan hanya satu mode S_0 saja yang muncul ketika analisa dilakukan pada frekuensi 100 KHz. Apabila analisa dilakukan pada frekuensi lebih besar dari 400 KHz maka dua mode gelombang akan terjadi seperti gambar dibawah ini.



Gambar 4.3 Mode S_0 dan A_0

Munculnya dua mode S_0 dan A_0 pada gambar diatas membuat analisa terhadap respon gelombang menjadi sulit. Oleh karena itu sangat penting untuk menentukan batasan analisa frekuensi agar mempermudah dalam analisa respon.

Setelah menentukan batasan frekuensi maksimum, langkah selanjutnya adalah menentukan besar meshing untuk element plat. Besar kecilnya sebuah meshing dalam analisa *lamb wave* dipengaruhi oleh transverse wave speed (c_t) dan jarak terpendek sebuah gelombang (λ_{\min}). Untuk menghitung c_t persamaan dibawah ini digunakan:

$$c_t = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{7.93 \times 10^9 \text{ N/m}^2}{7850 \text{ kg/m}^3}} = 3178.35 \text{ m/s}$$

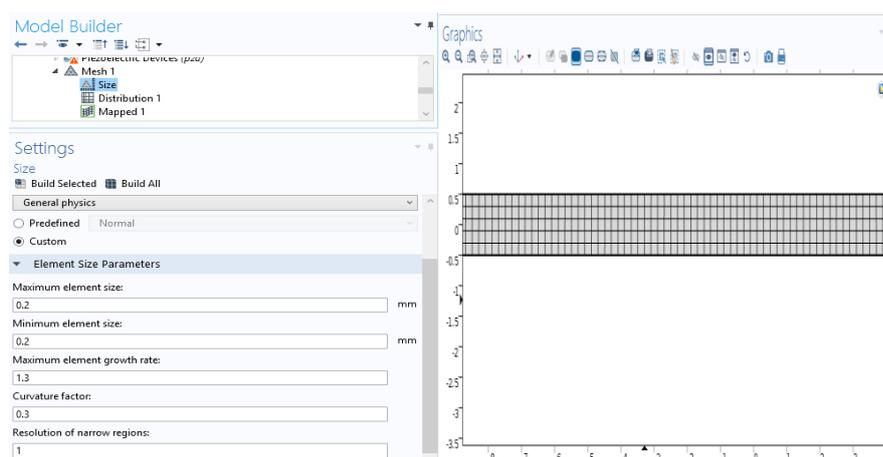
Untuk menghitung jarak terpendek sebuah gelombang (λ_{\min}), frekuensi maksimum yang dipakai adalah 400 KHz.

$$f_{\max} = 400 \text{ KHz} = 400 \times 10^3 \text{ Hz} = 4 \times 10^5 \text{ cycle/s}$$

$$\lambda_{\min} = \frac{c_t}{f_{\max}} = \frac{3178.35 \text{ m/s}}{4 \times 10^5 \text{ cycle/s}} = 7.945876 \text{ mm}$$

$$L_{\min} = \frac{\lambda_{\min}}{20} = \frac{7.945876}{20} = 0.397294 \text{ mm}$$

Dari perumusan L_{\min} diatas, jarak terpendek sebuah gelombang (λ_{\min}) setidaknya terjadi dalam 20 element. Maka meshing yang dilakukan harus kurang dari 0.397 mm dan pada tesis ini dipakai meshing 0.2mm untuk menjamin rambatan gelombang terjadi dengan baik. Gambar 4.2 menunjukkan proses meshing pada plat.



Gambar 4.4 Meshing plat

Langkah selanjutnya dalam memodelkan analisa *lamb wave* ini adalah menghitung *time step* (Δt). Perhitungan *time step* ini sangat penting untuk akurasi hasil. Secara umum, akurasi perhitungan bisa ditingkatkan dengan menseting *time step* agar lebih kecil. Tetapi *time step* yang terlalu kecil akan menyebabkan analisa menjadi lama dan tidak efektif. Untuk menghitung *time step* pertama-tama *lame*' constants (μ dan λ) harus dihitung.

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} = 79.3 \times 10^9 \text{ N/m}^2$$

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} = \frac{2 \times 10^{11} \text{ N/m}}{(1+0.3)(1-0.66)} = 1.46\text{E}+11 \text{ N/m}^2$$

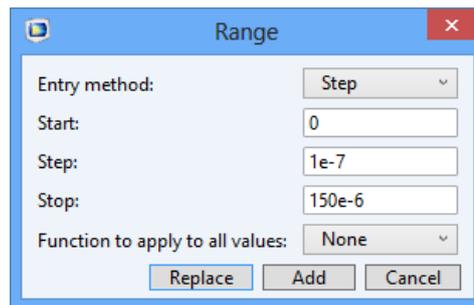
$$c_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{(1.46\text{E}+11 \text{ N/m}^2) + 2(79.3 \times 10^9 \text{ N/m}^2)}{7850 \text{ kg/m}^3}} = 6228.69 \text{ m/s}$$

$$\Delta_t = \frac{L_{\min}}{c_L} = \frac{0.2 \text{ mm}}{6228.69 \times 10^3 \text{ mm/s}} = 3.21 \times 10^{-8} \text{ s}$$

$$\Delta_t = \frac{1}{f_{\max}} = \frac{1}{400000 \text{ cycle/s}} = 1.38 \times 10^{-7} \text{ s}$$

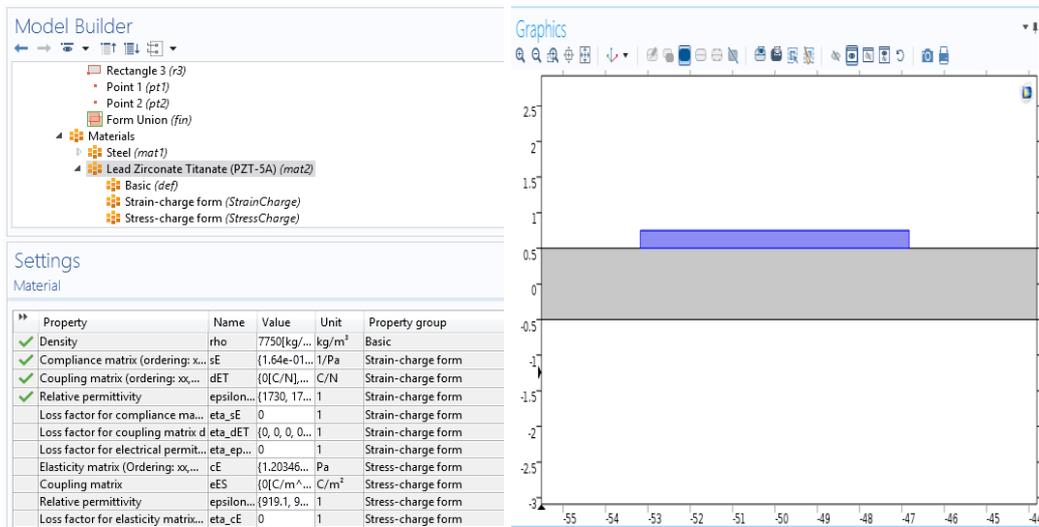
Maka *time step* yang dipakai dalam tesis ini adalah $\Delta_t = 1 \times 10^{-7} \text{ s}$.

Gambar 4.3 menunjukkan permodelan untuk setting *time step* pada program



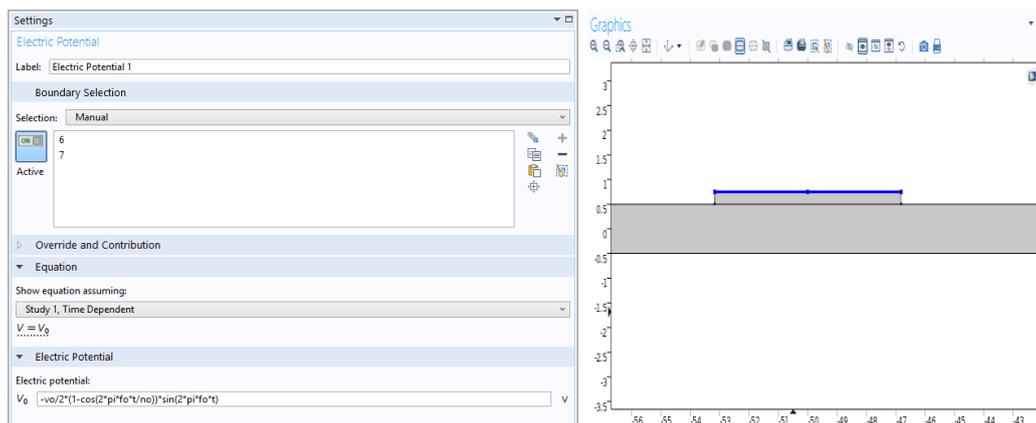
Gambar 4.5 Setting *time step*

Setelah menentukan *time step* langkah selanjutnya adalah mendefine material baik untuk plat ataupun untuk *piezoelectric*. Untuk *piezoelectric* bahan yang dipakai adalah *Lead Zirconate Titanate (PZT-5A)*. Gambar 4.4 menunjukkan material yang digunakan untuk *piezoelectric*.



Gambar 4.6 Material *Lead Zirconate Titanate (PZT-5A)*

Warna biru pada gambar diatas menunjukkan bahwa material *Lead Zirconate Titanate (PZT-5A)* dipasang pada *piezoelectric*. Setelah menetapkan material untuk *piezoelectric* langkah selanjutnya adalah memberikan *energy potential* pada *piezoelectric*, dimana *Hanning windowed 5-cycle tone burst* adalah fungsi yang dipakai. Gambar 4.5 menunjukkan *energy potential* yang digunakan pada program.



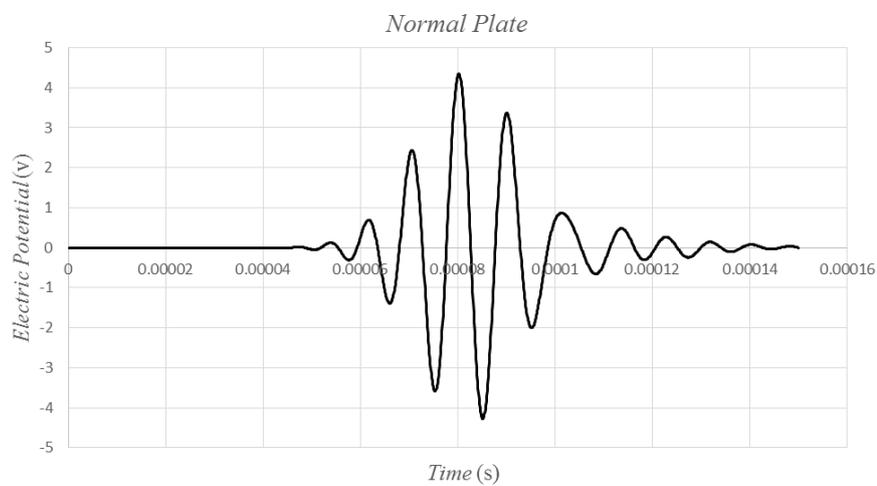
Gambar 4.7 *Settings electric potential*

4.2 Validasi Hasil

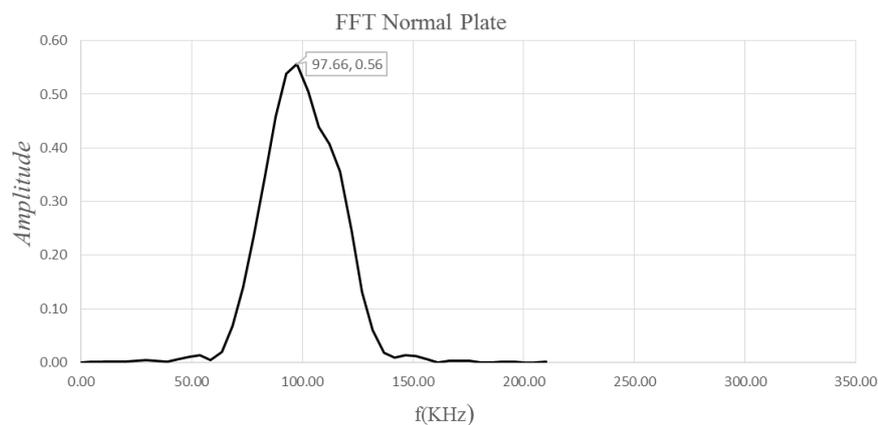
Pada bab ini validasi akan dilakukan menggunakan fft dari input *electric potential*, jika permodelan yang dilakukan benar, hasil output berupa *electric potential* untuk plat yang tidak mengalami kerusakan dalam frekuensi domain akan sama dengan input electric potential dalam frekuensi domain.

1. Validasi untuk *excitation signal* satu puncak pada frekuensi 100 KHz

Berikut adalah output grafik *electric potential* hasil analisa software dengan input *excitation signal* satu puncak pada frekuensi 100 KHz.

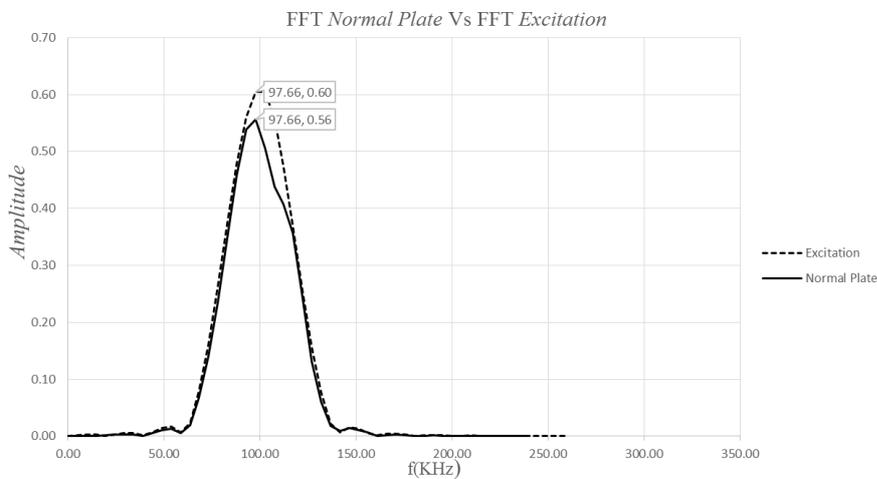


Gambar 4.8 *Electric potential normal plate*



Gambar 4.9 Hasil FFT *Electric potential normal plate*

Grafik pada gambar 4.8 menunjukkan *electric potential* plat hasil analisis software dalam time domain. Grafik pada gambar 4.9 menunjukkan hasil dari analisa fft dalam domain frekuensi. Hasil analisa frekuensi untuk plat yang tidak mengalami kerusakan dengan input *excitation signal* satu puncak pada frekuensi 100 KHz menunjukkan hasil analisa fft pada frekuensi 97.65625 KHz. Validasi hasil menggunakan analisa fft dari *excitation signal* satu puncak bisa dilihat pada gambar 4.10 dibawah ini:

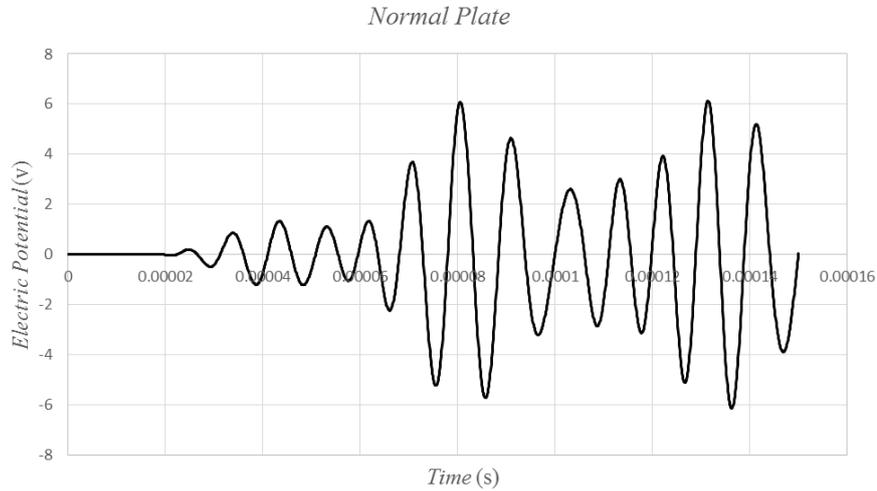


Gambar 4.10 Hasil FFT *normal plate* dengan hasil FFT *excitation signal*

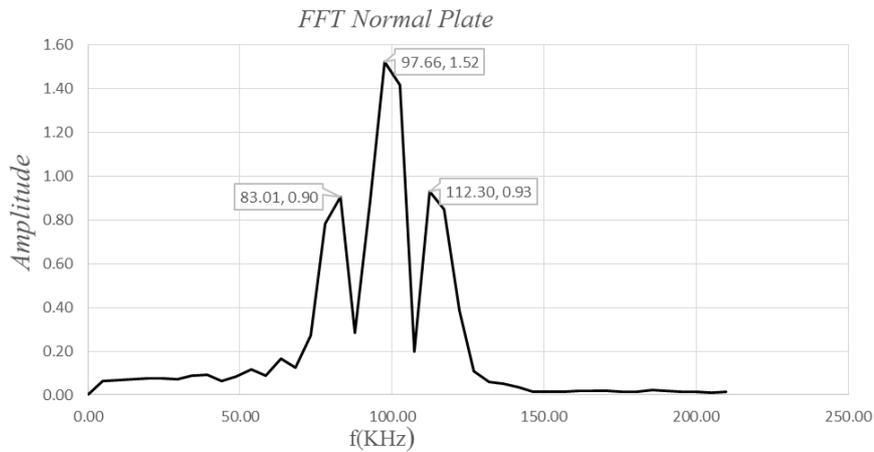
Dari gambar 4.10 bisa dilihat bahwa frekuensi dari *normal plate* sama dengan frekuensi *excitation signal*. Dari hasil tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa permodelan plat dengan input *excitation signal* satu puncak pada frekuensi 100 KHz adalah benar dan bisa dipakai untuk analisa kerusakan.

2. Validasi untuk *excitation signal* tiga puncak pada frekuensi 100 KHz

Berikut adalah output grafik *electric potential* hasil analisa software dengan input *excitation signal* tiga puncak pada frekuensi 100 KHz.



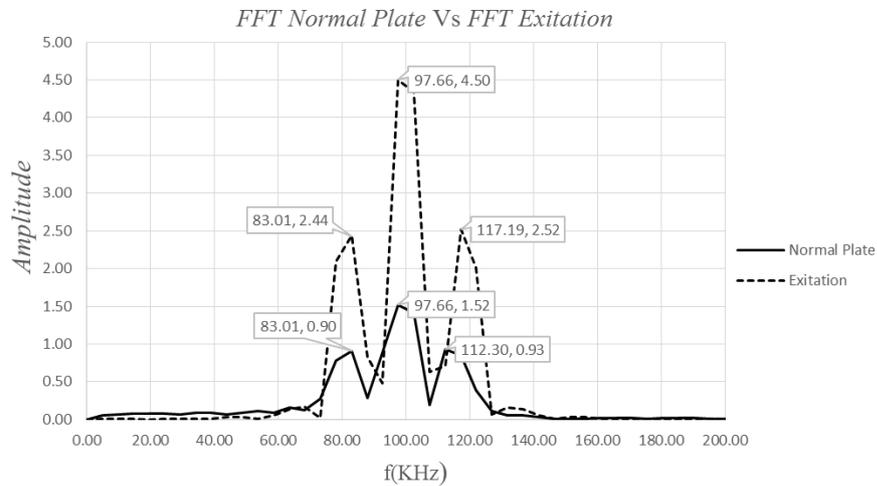
Gambar 4.11 *Electric potential normal plate*



Gambar 4.12 Hasil FFT *Electric potential normal plate*

Grafik pada gambar 4.11 menunjukkan *electric potential* plat hasil analisis software dalam time domain. Grafik pada gambar 4.12 menunjukkan hasil dari analisa fft dalam domain frekuensi. Hasil analisa frekuensi untuk plat yang tidak mengalami kerusakan dengan input *excitation signal* tiga puncak pada frekuensi 100 KHz menunjukkan hasil analisa fft pada frekuensi 97.65625 KHz. Validasi hasil

menggunakan analisa fft dari *excitation signal* tiga puncak bisa dilihat pada gambar 4.13 dibawah ini:

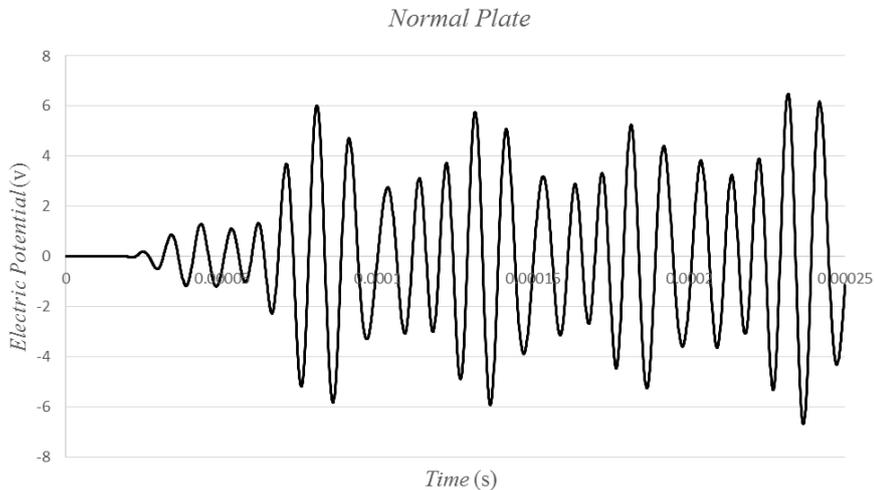


Gambar 4.13 Hasil FFT *normal plate* dengan hasil FFT *excitation signal*

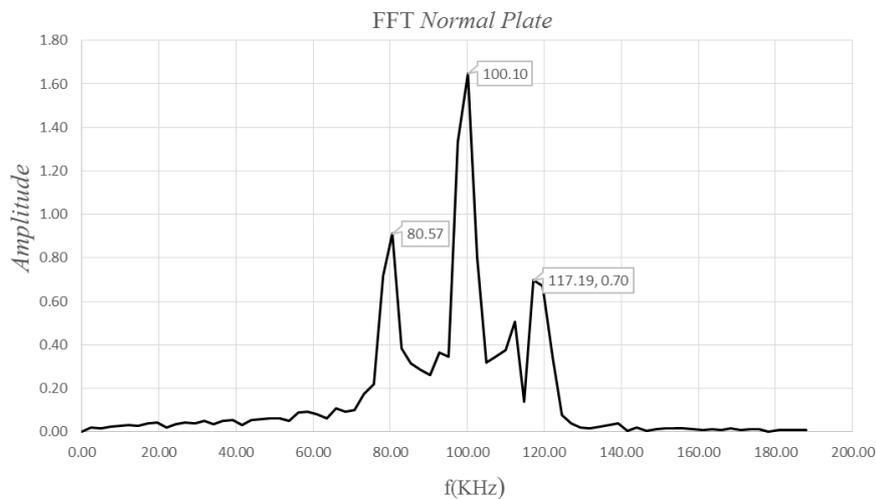
Dari gambar 4.13 bisa dilihat bahwa frekuensi dari *normal plate* sama dengan frekuensi *excitation signal*, kecuali pada puncak ketiga terjadi sedikit perbedaan frekuensi tetapi masi dalam tahap kewajaran. Dari hasil tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa permodelan plat dengan input *excitation signal* tiga puncak pada frekuensi 100 KHz adalah benar dan bisa dipakai untuk analisa kerusakan.

3. Validasi untuk *excitation signal* lima puncak pada frekuensi 100 KHz

Berikut adalah output grafik *electric potential* hasil analisa software dengan input *excitation signal* lima puncak pada frekuensi 100 KHz.



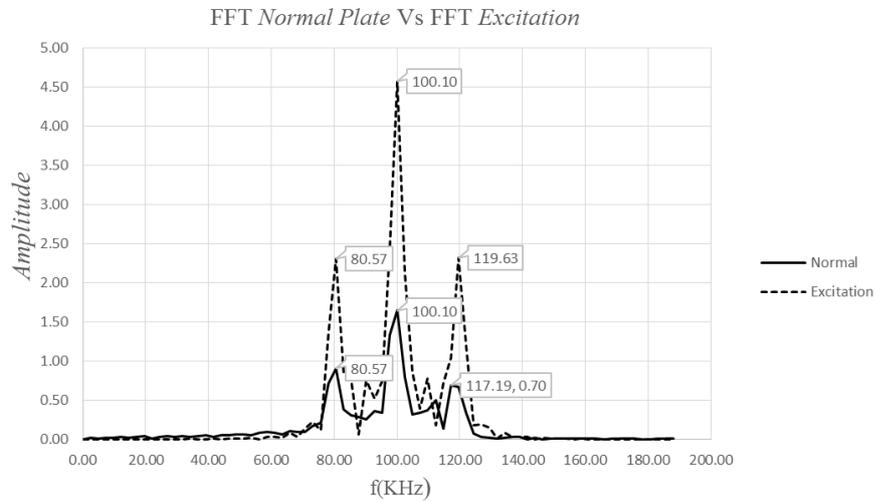
Gambar 4.14 *Electric potential normal plate*



Gambar 4.15 Hasil FFT *Electric potential normal plate*

Grafik pada gambar 4.14 menunjukkan *electric potential* plat hasil analisis software dalam time domain. Grafik pada gambar 4.15 menunjukkan hasil dari analisa fft dalam domain frekuensi. Hasil analisa frekuensi untuk plat yang tidak mengalami kerusakan dengan input *excitation signal* lima puncak pada frekuensi 100 KHz menunjukkan hasil analisa fft pada frekuensi 100.097 KHz. Validasi hasil

menggunakan analisa fft dari *excitation signal* lima puncak bisa dilihat pada gambar 4.16 dibawah ini:



Gambar 4.16 Hasil FFT *normal plate* dengan hasil FFT *excitation signal*

Dari gambar 4.16 bisa dilihat bahwa frekuensi dari *normal plate* sama dengan frekuensi *excitation signal*. Dari hasil tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa permodelan plat dengan input *excitation signal* lima puncak pada frekuensi 100 KHz adalah benar dan bisa dipakai untuk analisa kerusakan.

4.3 Pengaruh jumlah puncak dalam mendeteksi kerusakan

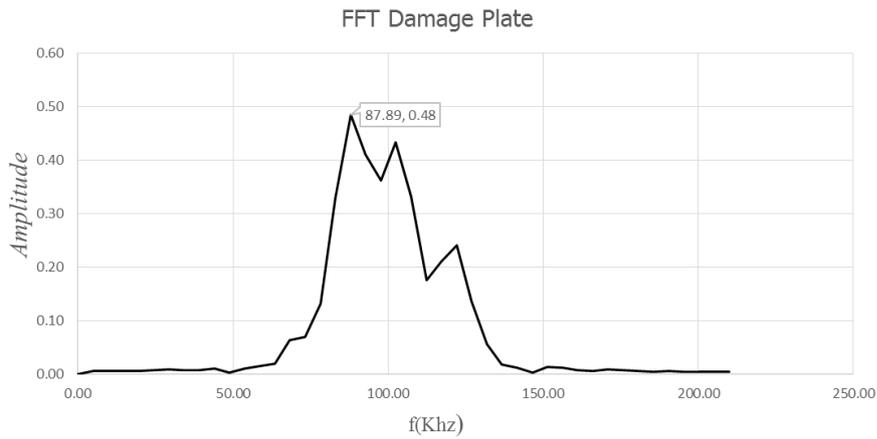
Pada bab ini akan di studi bagaimana pengaruh jumlah puncak dalam mendeteksi kerusakan. Hanning window dengan tiga variasi jumlah puncak dalam frekuensi 100 KHz akan di exitasi dengan menggunakan *piezoelectric*.

1. *Excitation signal* satu puncak

Pada sub bab sebelumnya, validasi hasil *excitation signal* satu puncak telah dilakukan dan hasilnya menunjukkan bahwa permodelan *lamb wave* memenuhi persyaratan. Untuk mendeteksi kerusakan, kurva hasil analisa software normal plate dengan *excitation signal* satu puncak akan dibandingkan dengan kurva *damage plate*, yaitu kurva hasil analisa pada plat yang mengalami kerusakan. Berikut adalah kurva hasil analisa software untuk plat yang mengalami kerusakan.

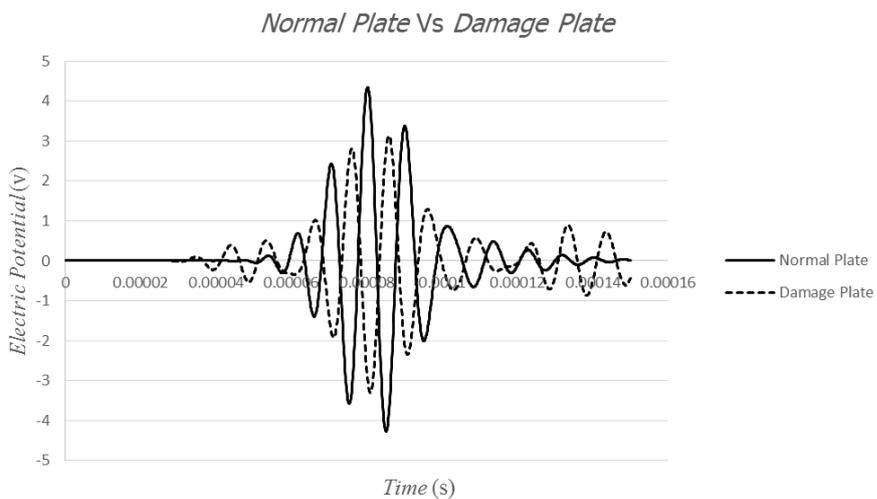


Gambar 4.17 *Electric potential damage plate*

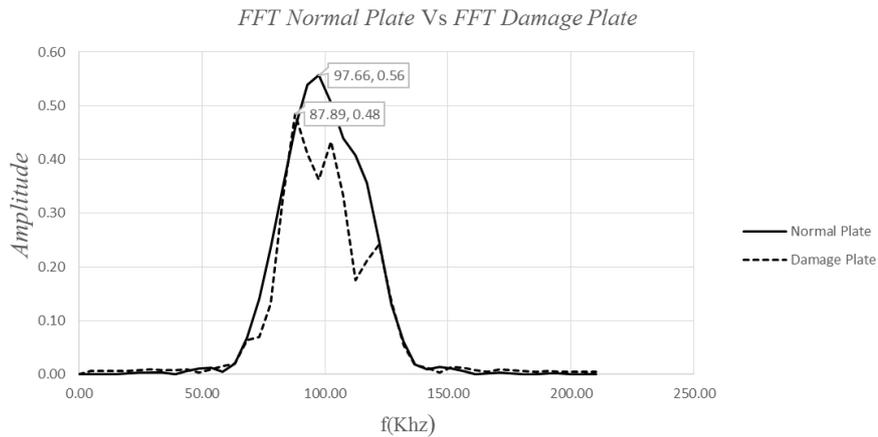


Gambar 4.18 Hasil FFT *Electric potential damage plate*

Hasil kurva pada gambar 4.17 dan 4.18 dibandingkan dengan kurva normal plate yang telah divalidasi sebelumnya. Setelah penggabungan dilakukan, pola gelombang untuk plat yang mengalami kerusakan bisa diketahui. Berikut superposisi kurva normal plate dengan kurva plat yang mengalami kerusakan.



Gambar 4.19 *Electric potential damage plate vs normal plate*



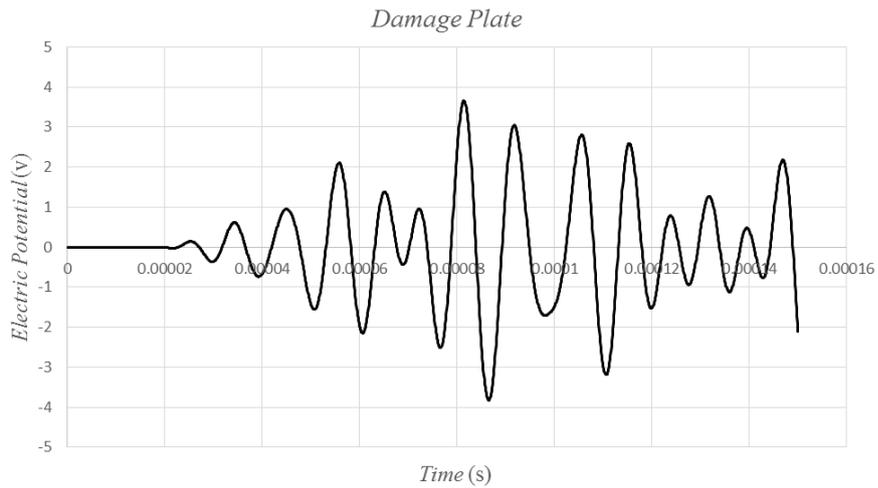
Gambar 4.20 FFT *damage plate* vs FFT *normal plate*

Dari gambar 4.19 analisa time domain, kerusakan tidak dapat didefinisikan karena bentuk kurva sangat rumit. Untuk mendefinisikan kerusakan dilakukan transformasi time domain kedalam frekuensi domain agar kerusakan bisa didefinisikan dalam bentuk angka. Gambar 4.20 menunjukkan hasil transformasi (FTT) untuk plat yang tidak mengalami kerusakan dan plat yang mengalami kerusakan.

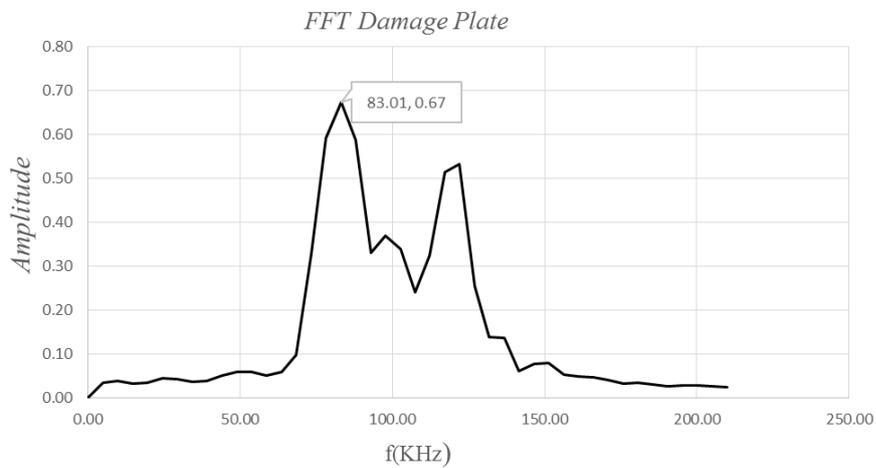
Dari gambar 4.20 analisa frekuensi domain, terlihat bahwa pada kurva plat yang mengalami kerusakan ditandai dengan terjadinya penurunan amplitude dari 0.55 ke 0.48 dan frekuensi dari 97.65 ke 87.89 KHz.

2. Excitation signal tiga puncak

Untuk mendeteksi kerusakan, kurva hasil analisa software normal plate dengan *excitation signal* tiga puncak dibandingkan dengan kurva *damage plate*, yaitu kurva hasil analisa pada plat yang mengalami kerusakan. Berikut adalah kurva hasil analisa software untuk plat yang mengalami kerusakan.

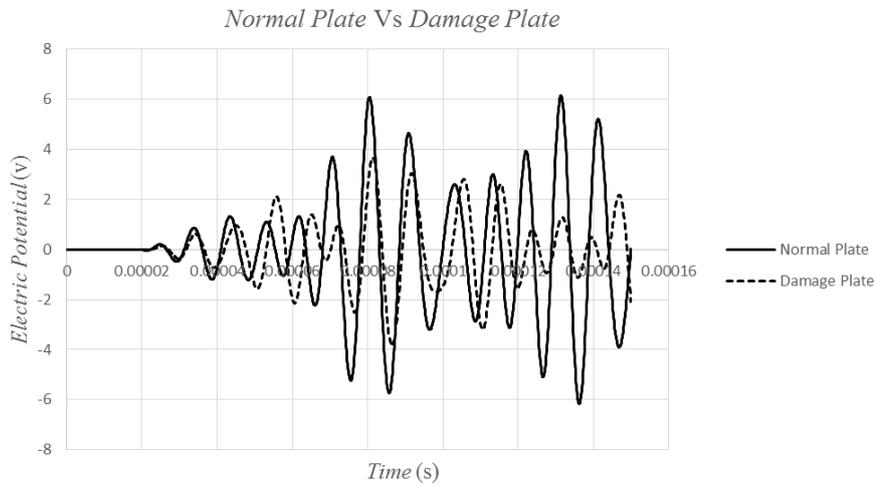


Gambar 4.21 *Electric potential damage plate*

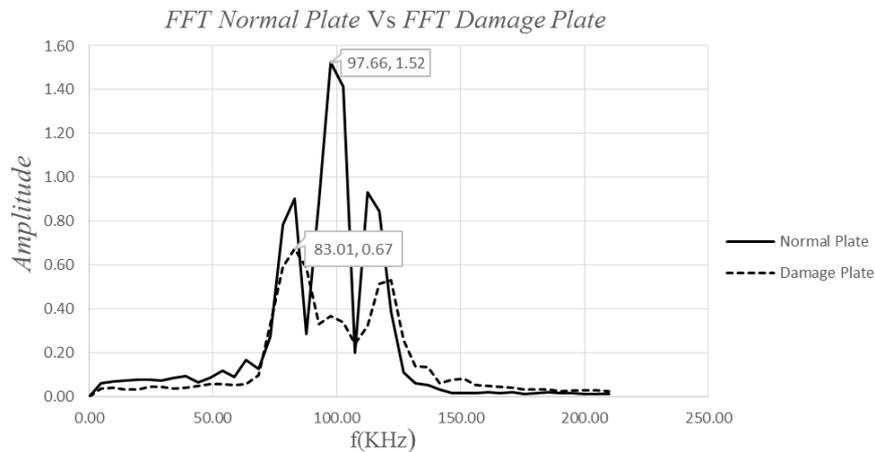


Gambar 4.22 Hasil FFT *Electric potential damage plate*

Hasil kurva pada gambar 4.21 dan 4.22 dibandingkan dengan kurva normal plate yang telah divalidasi sebelumnya. Setelah penggabungan dilakukan, pola gelombang untuk plat yang mengalami kerusakan bisa diketahui. Berikut superposisi kurva normal plate dengan kurva plat yang mengalami kerusakan.



Gambar 4.23 Electric potential damage plate vs normal plate



Gambar 4.24 FFT damage plate vs FFT normal plate

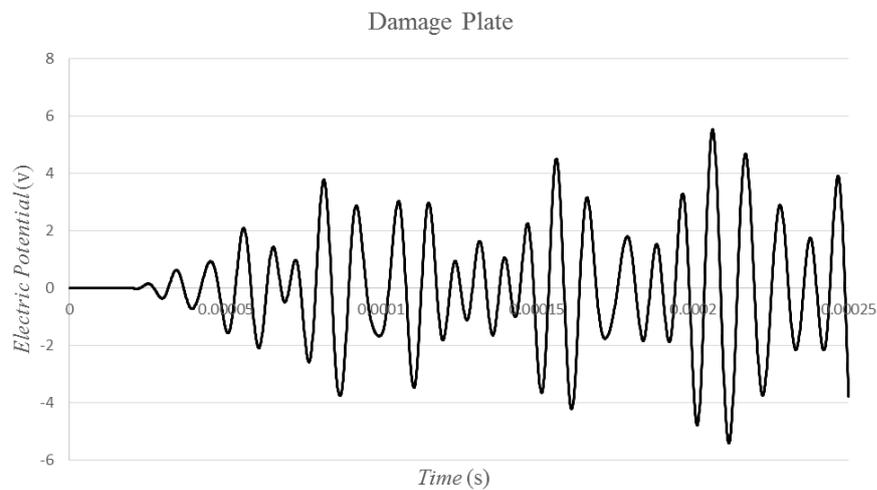
Dari gambar 4.23 analisa time domain, kerusakan tidak dapat didefinisikan karena bentuk kurva sangat rumit. Untuk mendefinisikan kerusakan dilakukan transformasi time domain kedalam frekuensi domain agar kerusakan bisa didefinisikan dalam bentuk angka. Gambar 4.24 menunjukkan hasil transformasi (FTT) untuk plat yang tidak mengalami kerusakan dan plat yang mengalami kerusakan.

Dari gambar 4.24 analisa frekuensi domain, terlihat bahwa pada kurva plat yang mengalami kerusakan terjadi penurunan amplitude dan pergeseran arah x pada puncak gelombang. Pergeseran pada arah x ini menunjukkan bahwa pada plat yang

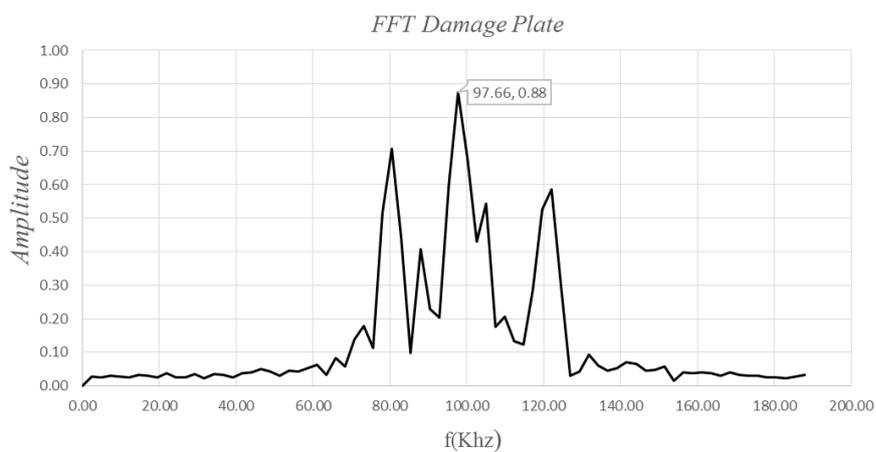
terjadi kerusakan terjadi penurunan frekuensi dari 97.65 KHz menjadi 83.00 KHz. Bisa disimpulkan dengan *excitation signal* tiga puncak terjadi kerusakan di frekuensi ± 83 KHz.

3. *Excitation signal* lima puncak

Untuk mendeteksi kerusakan, kurva hasil analisa software normal plate dengan *excitation signal* lima puncak akan dibandingkan dengan kurva *damage plate*, yaitu kurva hasil analisa pada plat yang mengalami kerusakan. Berikut adalah kurva hasil analisa software untuk plat yang mengalami kerusakan.

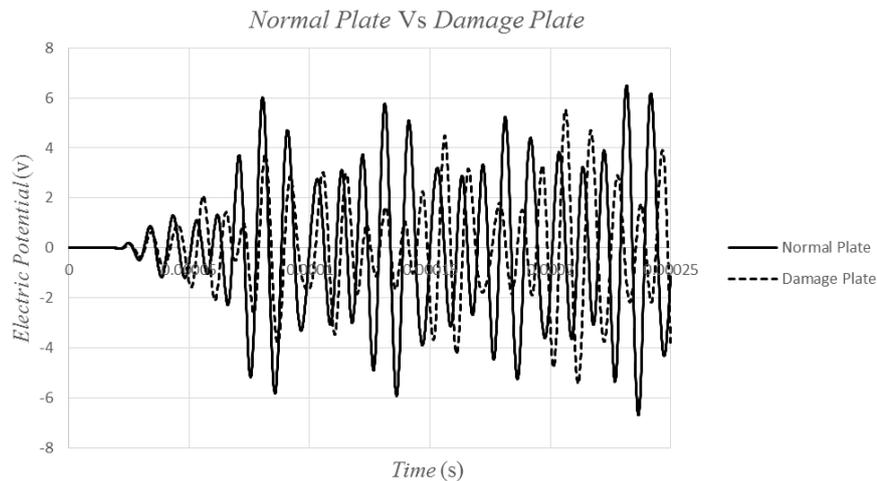


Gambar 4.25 *Electric potential damage plate*

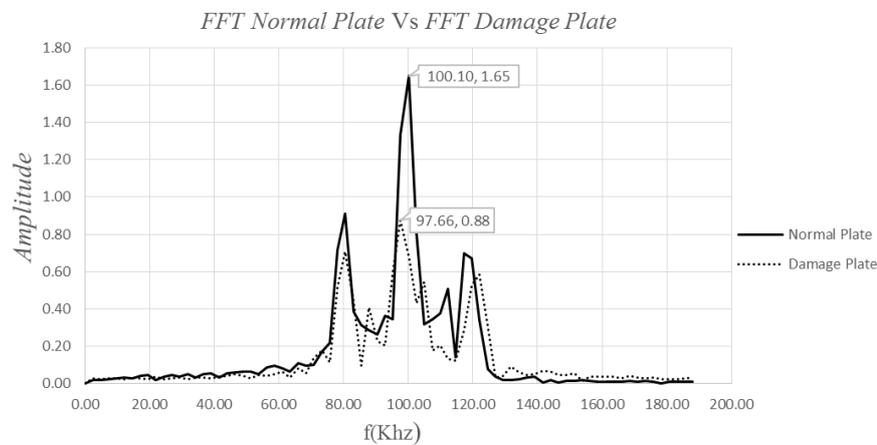


Gambar 4.26 Hasil FFT *Electric potential damage plate*

Hasil kurva pada gambar 4.25 dan 4.26 dibandingkan dengan kurva normal plate yang telah divalidasi sebelumnya. Setelah penggabungan dilakukan, pola gelombang untuk plat yang mengalami kerusakan bisa diketahui. Berikut superposisi kurva normal plate dengan kurva plat yang mengalami kerusakan.



Gambar 4.27 Electric potential damage plate vs normal plate



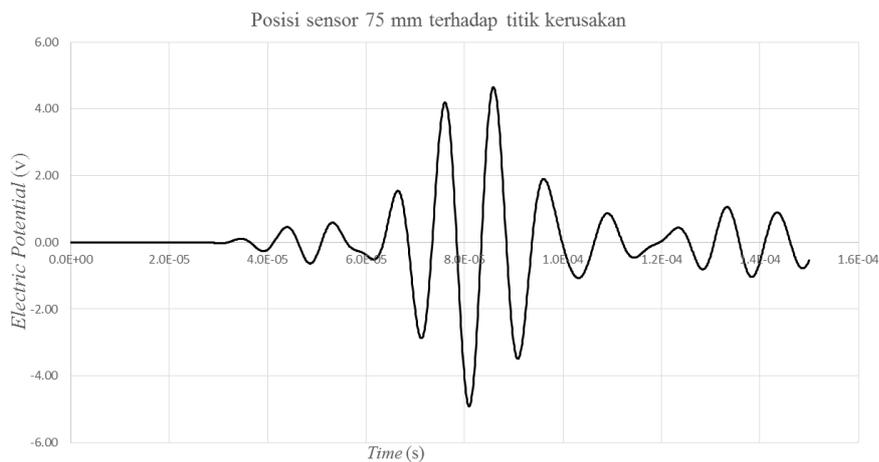
Gambar 4.28 FFT damage plate vs FFT normal plate

Dari gambar 4.27 analisa time domain, kerusakan tidak dapat didefinisikan karena bentuk kurva sangat rumit. Untuk mendefinisikan kerusakan dilakukan transformasi time domain kedalam frekuensi domain agar kerusakan bisa didefinisikan dalam bentuk angka. Gambar 4.28 menunjukkan hasil transformasi (FTT) untuk plat yang tidak mengalami kerusakan dan plat yang mengalami kerusakan.

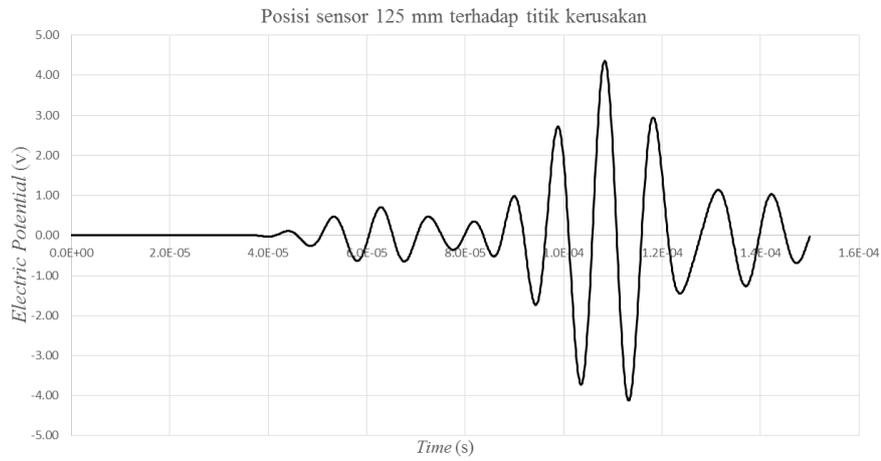
Dari gambar 4.28 analisa frekuensi domain, terlihat bahwa pada kurva plat yang mengalami kerusakan terjadi penurunan amplitude dan pergeseran arah x pada puncak gelombang. Pergeseran pada arah x ini menunjukkan bahwa pada plat yang terjadi kerusakan terjadi penurunan amplitude dari 1.64 ke 0.87 dan frekuensi dari 100.09 KHz menjadi 97.65 KHz. Bisa disimpulkan dengan *excitation signal* tiga *cycle* terjadi kerusakan di frekuensi ± 97.65 KHz.

4.4 Pengaruh letak *piezoelectric transducers*

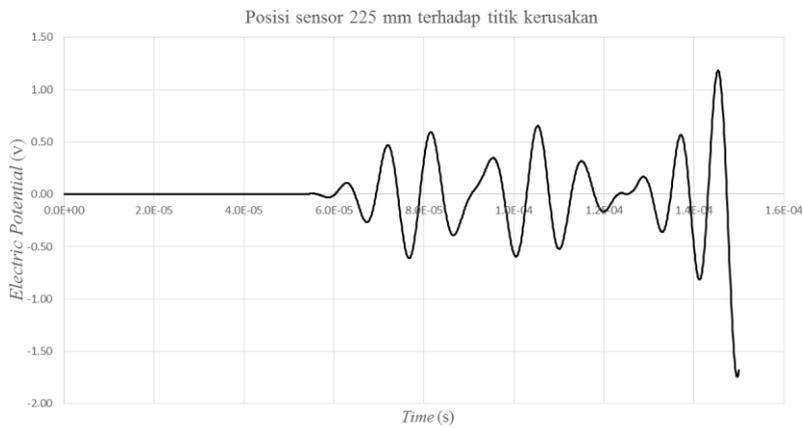
Pada bahasan ini studi tentang pengaruh letak *piezoelectric transducers* terhadap titik kerusakan akan dilakukan. Berikut adalah gambar kurva pola gelombang akibat pengaruh letak *piezoelectric transducers*



Gambar 4.29 *Electric potential* Posisi sensor 75 mm terhadap titik kerusakan

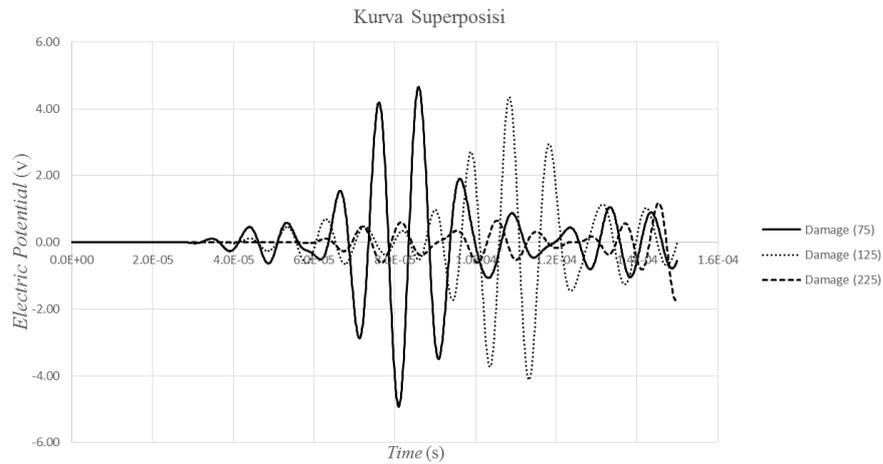


Gambar 4.30 *Electric potential* Posisi sensor 125 mm terhadap titik kerusakan



Gambar 4.31 *Electric potential* Posisi sensor 225 mm terhadap titik kerusakan

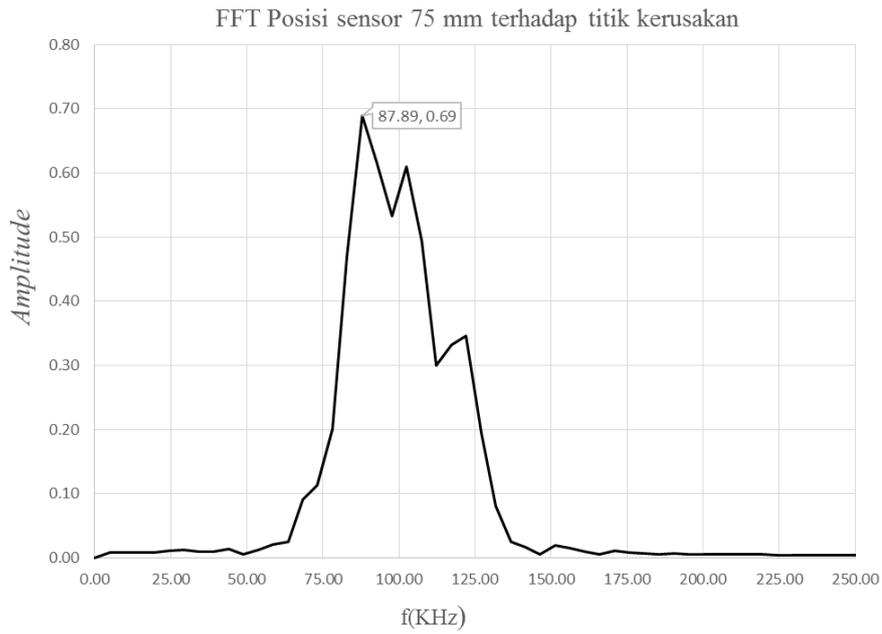
Hasil kurva pada gambar 4.29 sampai 4.31 akan disuperposisi untuk mengetahui bagaimana pola gelombang yang terjadi. Kurva 4.32 menunjukkan superposisi *electric potential* untuk setiap pola kerusakan



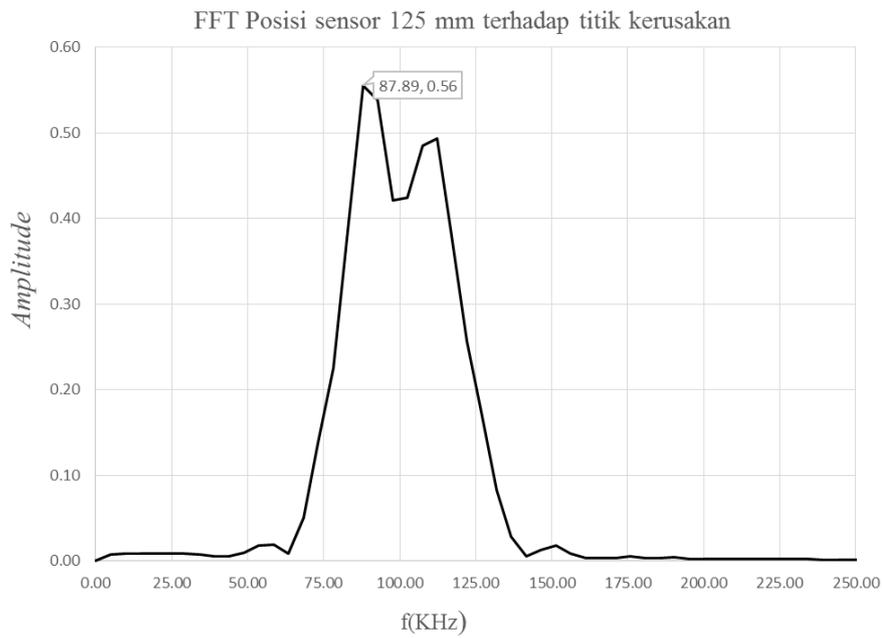
Gambar 4.32 *Electric potential* supersosisi

Dari hasil penggabungan kurva diatas terlihat bahwa besar gelombang mode S0 untuk jarak tranduser 75 mm dan 125 mm dari titik kerusakan adalah sama, sedangkan pada jarak 225mm pembacaan terhadap gelombang yang ada tidak sama. Dengan katalain jika sensor diletakan pada jarak 255 mm pembacaan data yang didapat kurang bagus atau tidak bisa dipakai.

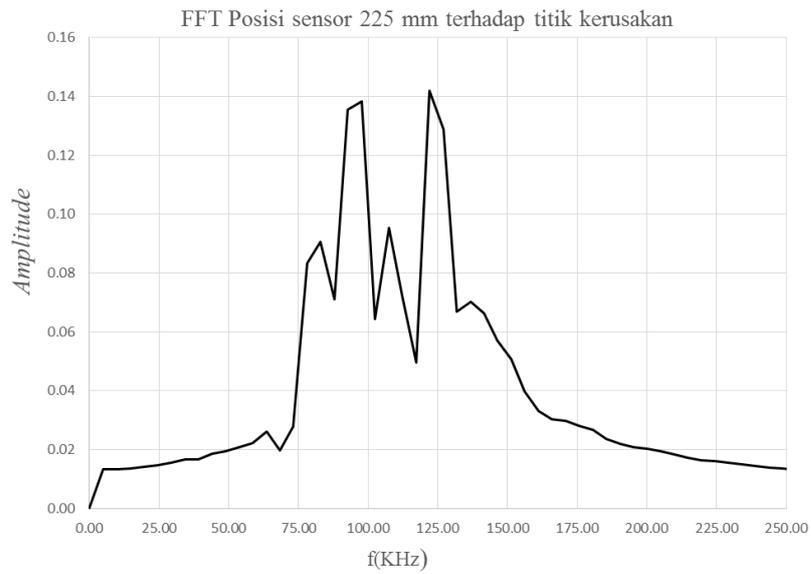
Dari hasil analisa kurva time domain, belum bisa ditarik kesimpulan karna pola gelombang yang terjadi tidak menunjukkan hasil yang terukur. Oleh karena itu hasil analisa time domain didekonstruksikan ke frekuensi domain dengan metode FFT. Berikut adalah kurva hasil FFT time domain untuk semua pola kerusakan.



Gambar 4.33 FFT *Electric potential* Posisi sensor 75 mm terhadap titik kerusakan

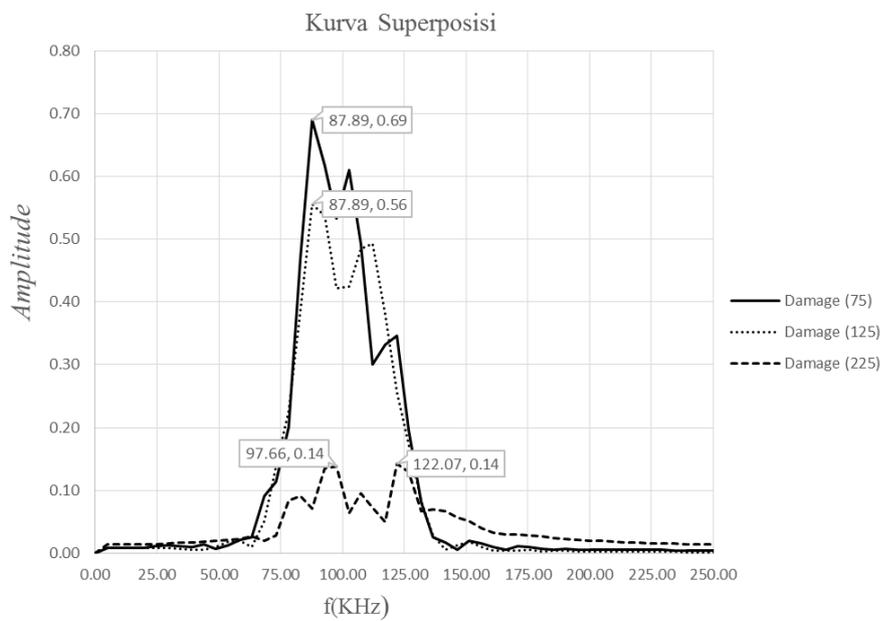


Gambar 4.34 FFT *Electric potential* Posisi sensor 125 mm terhadap titik kerusakan



Gambar 4.35 FFT *Electric potential* Posisi sensor 225 mm terhadap titik kerusakan

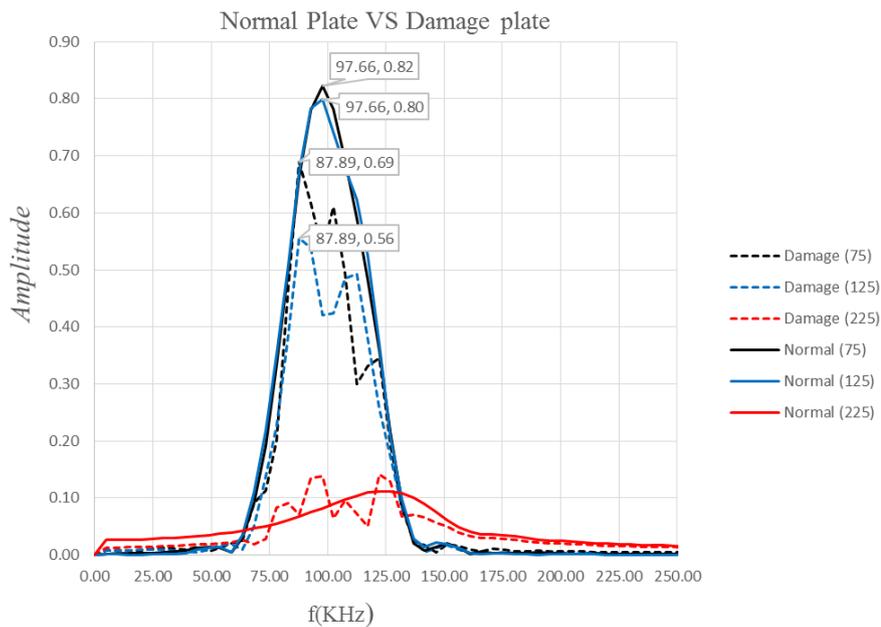
Hasil kurva pada gambar 4.33 sampai 4.35 akan disuperposisi untuk mengetahui bagaimana pola gelombang yang terjadi. Kurva 4.36 menunjukkan superposisi hasil FFT *electric potential* untuk setiap pola kerusakan



Gambar 4.36 Supersosisi FFT

Dari gambar 4.36 diatas, terlihat bahwa pada jarak tranduser 75 mm dan 125 mm dari titik kerusakan frekuensi yang terjadi adalah sama yaitu sebesar 87.89 KHz, sedangkan untuk jarak tranduser 225 mm terjadi dua frekuensi funcak yaitu pada frekuensi 97.66 KHz dan 122.07 KHz. Dari hasil diatas, dapat ditarik kesimpulan bahwa pembacaan sensor pada jarak 225 mm dari titik kerusakan tidak dapat dipakai karena data yang didapatkan eror.

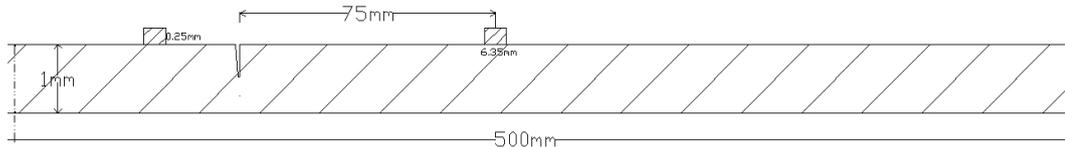
Untuk menegaskan bahwa data yang dihasilkan dari tranduser dengan jarak 225 mm dari titik kerusakan adalah salah atau eror, maka akan disuperposisikan antara pembacaan tranduser untuk plate yang mengalami kerusakan dengan plat yang tidak mengalami kerusakan. Jarak antara sensor dan actuator untuk plat yang mengalami kerusakan dengan plat yang tidak mengalami kerusakan adalah sama. Berikut adalah kurva hasil superposisinya:



Gambar 4.37 Supersosiasi FFT Normal Plate Vs Damage Plate

4.5 Menemukan lokasi kerusakan

Untuk mencari letak kerusakan yang terjadi kecepatan rambat gelombang harus diketahui baik untuk plate yang mengalami kerusakan ataupun yang tidak mengalami kerusakan. Berikut adalah gambar plat yang mengalami kerusakan:



Gambar 4.38 Posisi kerusakan

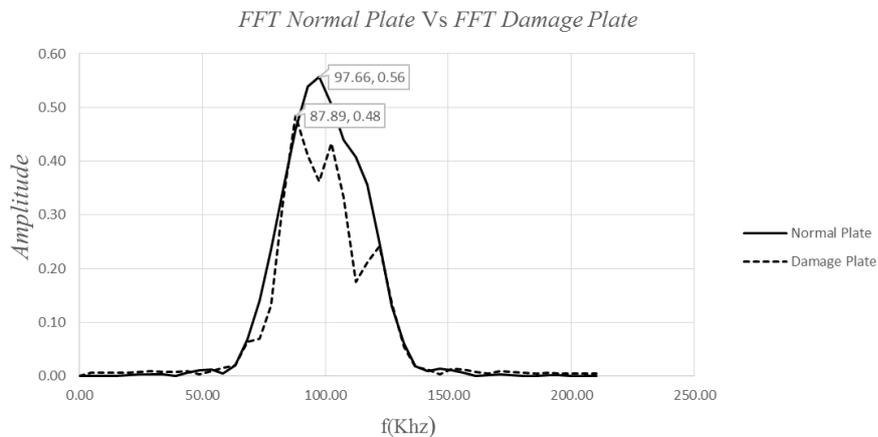
Dari gambar diatas terlihat bahwa posisi titik kerusakan adalah 75mm dari actuator. Rumus untuk mencari posisi kerusakan adalah sebagai berikut:

$$a = \frac{(v_1 t_2 - D)(2v_2 - v_1)}{2(v_1 - v_2)} \quad (4.1)$$

Dimana:

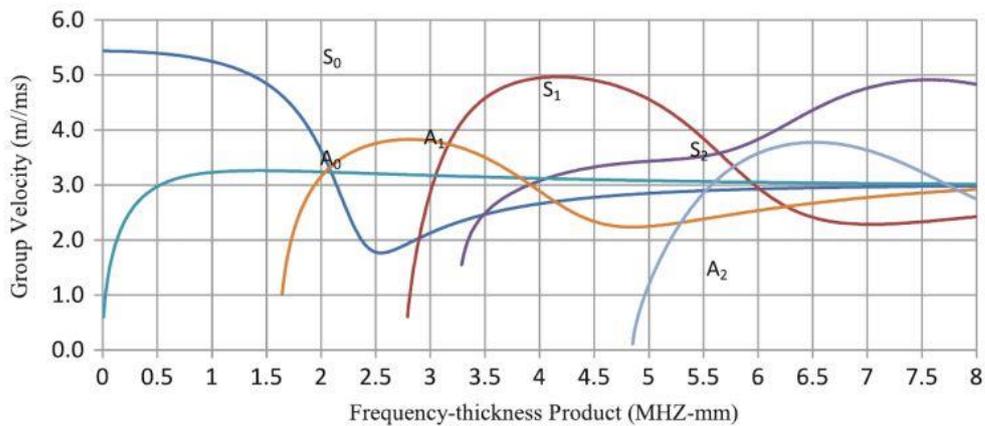
- a : jarak dari titik kerusakan terhadap transducer atau sensor sebesar 75mm
- D : jarak sensor terhadap actuator sebesar 100 mm
- V1 : Kecepatan gelombang untuk normal plat
- V2 : Kecepatan gelombang untuk damage plat
- t2 : Waktu gelombang untuk damage plate

Untuk mencari titik kerusakan hasil fft dari plat yang normal dengan plate yang mengalami kerusakan diperlukan untuk mengetahui frekuensi yang terjadi: berikut adalah gambar kurva fft dari normal plate dan damage plate:



Gambar 4.39 FFT damage plate vs FFT normal plate

Dari gambar diatas, diketahui bahwa plat yang mengalami kerusakan berada di frekuensi 87.89 KHz dan untuk plat yang tidak mengalami kerusakan berada pada frekuensi 97.66 dari data frekuensi tersebut, selanjutnya data kecepatan bisa didapatkan dari kurva dispersion curve. Berikut adalah kurva dispersion untuk plate baja tebal 1mm:



Gambar 4.40 *Dispersion Curve*

Frekuensi diplotkan kedalam kurva S0 karena mode gelombang yang terjadi adalah S0 dari hasil plotting didapatkan kecepatan untuk normal plate adalah sebesar 5454430 mm/s dan untuk damage plate adalah sebesar 5448249 mm/s. Waktu gelombang untuk plate yang mengalami kerusakan didapatkan sebesar 1.83645E-05 second.

$$a = \frac{(5454430 \times 1.8364 \times 10^{-5} - 100)(2 \times 5448249 - 5454430)}{2(5454430 - 5448249)} = 73.864 \text{ mm}$$

Maka didapatkan jarak dari titik kerusakan terhadap sensor sebesar 73.864mm. Dari hasil tersebut maka selisih yang didapat adalah 75-73.864 =1.136mm atau sebesar 1.51%.

DAFTAR PUSTAKA

- Alleyne, D, Cawley, P. (1992), "The interaction of lamb wave with defects", IEEE trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. control, Vol. 39, hal.381-397.
- Andrews, Jennifer. (2007), Lamb wave propagation in varying thermal environments, Tesis M.S., Department of Aeronautics and Astronautics, Air Force Instituted of Technology (AU), Wright Patterson, AFB, OH.
- Asrar Zair Bin Ahmad. (2011). Numerical Simulations of Lamb Waves in Plates Using a Semi-Analytical Finite Element Method, Dissertation Dr.-Ing. , University of Magdeburg, Alor Setar, Kedah.
- Chen G. (2012). "Structural Health Monitoring in Transportation Infrastructure Application – New Perspective". Sensing Technologies for Transportation Application Workshop at TRB 91st Annual Meeting. Washington DC.
- Gopalakrishnan, S, Ruzzene, M and Hanagut, S. (2011), *Computational Techniques for Structural Health Monitoring*, 1st edition , Springer, London.
- Howard Matt, and Ivan Bartoli. (2007), "The response of rectangular piezoelectric sensors to Rayleigh and Lamb ultrasonic waves", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 121, No. 1, hal. 175–187.
- K. Heller, L.J. Jacobs, and J. Qu. (2000), "Characterization of adhesive bond properties using lamb waves", NDT&E International, vol 33 hal.555-563.
- Krautkramer, (1998), "Emerging Technology - Guided Wave Ultrasonics," NDTnet, Vol 3, No 6.
- M.J. Schulz, P.F. Pai, and D.J. Inman.(1999), "Health monitoring and active control of composite structures using piezoceramic patches". Composites: Part B, vol 30 hal.713-725.
- Pierre Noël Marty (2002) Modelling Of Ultrasonic Guided Wave Field Generated by Piezoelectric Transducers, Tesis Ph.D., Department of Mechanical Engineering Imperial College of Science, Technology and Medicine London SW7 2BX.
- Raghavan, A, Cesnik, C.E.S. (2007), "Review of guided-wave structural health monitoring. Shock. Vib.Dig", vol 39 hal.91–114.

- Rose, J.L.(1999), *Ultrasonic Waves in Solid Media*; Cambridge University Press: New York, NY, USA.
- Roy, A, Tan, A.C.C, dan Gu, Y.T ROY, A. (2011), “Simulation Of Inplane and Out Plan AE Source In Thin Plate”, *Proceedings Intelligent Systems*, hal. 318-321.
- SeJin Han, Captain, Roka. (2007), *Finite Element Analysis Of Lamb Waves Acting Within a Thin Aluminium Plate*, Tesis Master of Science. , Air Force Institute of Technology, Ohio.
- Seth S. Kessler and Christopher E. Johnson. (2003), “Experimental Application of Optimized Lamb Wave Actuating/Sensing Patches for Health Monitoring of Composite Structures”.
- V. Giurgiutiu, J. Bao, and W. Zhao. (2001), “ Active sensor wave propagation health monitoring of beam and plate structures”. *Proc. of SPIE*, vol 4327 hal.234-245.
- Xiang Wan, Qing Zhang , Guanghua Xu and Peter W. Tse. (2014) “Numerical Simulation of Nonlinear Lamb Waves Used in a Thin Plate for Detecting Buried Micro-Cracks”, vol 14 hal.8528-8546.
- Xinglong Liu, Chengxu Zhou and Zhongwei Jiang. (2012). “Damage localization in plate-like structure using built-in PZT sensor network *Smart Structures and Systems*”, Vol. 9, No.1, hal.21-33.
- Yun-Kyu An, Jae Hong Kim and Hong Jae Yim. (2014). “Lamb Wave Line Sensing for Crack Detection in a Welded Stiffener”, hal.12871 -12884.
- Z. Su, L. Ye, and Y. Lu. (2006). “Guided lamb waves for identification of damage in composite structures: A review. *Journal of Sound and Vibration*”, vol 295 hal.753-780.

BAB 5

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa yang dilakukan pada pembahasan sebelumnya, didapatkan beberapa kesimpulan yang dapat diambil sebagai berikut:

1. Pola gelombang yang terbentuk pada plat yang mengalami kerusakan untuk *excitation signal* (V_t) satu, dua dan lima ditandai dengan terjadinya penurunan amplitude dan frekuensi.
2. Semakin jauh letak *piezoelectric transducers* terhadap titik kerusakan, pembacaan terhadap gelombang yang terjadi semakin tidak akurat.
3. Lokasi kerusakan didapatkan dari hasil perkalian fungsi kecepatan dengan fungsi waktu. Fungsi kecepatan didapatkan dari kurva dispersion gelombang untuk plat dengan tebal 1mm.
4. Propagasi gelombang yang berbasis pada *lamb wave* terbukti dapat mendeteksi kerusakan pada plat baja

5.2 Saran

Untuk mengembangkan metode analisa propagasi gelombang yang berbasis pada *lamb wave* maka terdapat beberapa hal yang kedepannya diharapkan dilakukan sehingga hasil analisa dihasilkan dengan lebih baik.

1. Perlu dilakukan eksperimental untuk membandingkan kebenaran dari analisa numerik yang telah dilakukan
2. Perlu dilakukan analisa untuk mengetahui besar kerusakan yang terjadi

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Garut, 24 Desember 1990, merupakan anak ketiga dari Lima bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal hingga bangku SMP di Sekolah MTS persis 76 Tarogong Garut, kemudian Melanjutkan SMA di pondok pesantren Daar El Qolam dan lulus pada tahun 2009. Penulis kemudian mengikuti seleksi penerimaan mahasiswa baru dan diterima di jurusan Teknik Sipil FTSP-ITS pada tahun 2009.

Penulis Kuliah di Teknik Sipil ITS dengan NRP 3113202015. Penulis Aktif dalam beberapa kegiatan organisasi di kampus dengan beberapa kali menjabat sebagai ketua panitia dan koordinator dari kegiatan yang dilaksanakan. Penulis pernah menjadi ketua Hari Budaya ITS dan Project Manager pembangunan Perpustakaan serta menjadi kepala Departemen Social Masyarakat.

Penulis sangat tertarik di bidang Offshore Structure sehingga mencoba menulis Tugas akhir yang berhubungan dengan Offshore structur. Pada tahun 2012 penulis Kerja Praktek di PT ACSET yang merupakan Kontraktor Struktur Terkemuka di Indonesia. Bersama selesainya tesis ini penulis berharap dapat mewujudkan impiannya mendapatkan Gelar Master Teknik dalam waktu 2 tahun dan dapat melanjutkan pendidikannya pada jenjang yang lebih tinggi juga dapat bekerja di bidang Offshore Structure.

“Halaman Sengaja Dikosongkan”