



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI KARAKTERISTIK  
PENJALARAN GELOMBANG TEGANGAN (*STRESS WAVE*)  
BERUPA EMISI AKUSTIK (*ACOUSTIC EMISSION, AE*)  
UNTUK PENENTUAN METODE PREDIKSI LOKASI  
SUMBER EMISI  
PADA MATERIAL KAKU (*SOLID*) BAJA TAHAN KARAT  
(*STAINLESS STEEL SS 304*)**

**SKRIPSI**

**RAKA CAHYA PRATAMA  
0806315793**

**FAKULTAS TEKNIK  
TEKNIK MESIN  
DEPOK  
JULI 2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI KARAKTERISTIK  
PENJALARAN GELOMBANG TEGANGAN (*STRESS WAVE*)  
BERUPA EMISI AKUSTIK (*ACOUSTIC EMISSION, AE*)  
UNTUK PENENTUAN METODE PREDIKSI LOKASI  
SUMBER EMISI  
PADA MATERIAL KAKU (*SOLID*) BAJA TAHAN KARAT  
(*STAINLESS STEEL SS 304*)**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**RAKA CAHYA PRATAMA  
0806315793**

**FAKULTAS TEKNIK  
TEKNIK MESIN  
DEPOK  
JULI 2012**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Raka Cahya Pratama

NPM : 0806315793

Tanda Tangan :



Tanggal : 12 Juli 2012

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Raka Cahya Pratama

NPM : 0806315793

Program Studi : Teknik Mesin

Judul Skripsi : Studi Karakteristik Penjalaran Gelombang Tegangan (*Stress Wave*) berupa Emisi Akustik (*Acoustic Emission, AE*) untuk Penentuan Metode Prediksi Lokasi Sumber Emisi pada Material Kaku (*Solid*) Baja Tahan Karat (*Stainless Steel SS 304*)

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

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Wahyu Nirbito, MSME

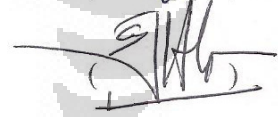
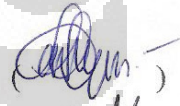
Penguji 1 : Dr. Ir. Warjito, M.Eng

Penguji 2 : Dr. Ir. R. Danardono A. S., DEA, PE

Penguji 3 : Dr. Ir. Gatot Prayogo, M.Eng

Ditetapkan di : Departemen Teknik Mesin FTUI, Depok

Tanggal : 12 Juli 2012



## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas berkat dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan sebaik-baiknya. Skripsi dengan judul “Studi Karakteristik Penjalaran Gelombang Tegangan (*Stress Wave*) berupa Emisi Akustik (*Acoustic Emission, AE*) untuk Penentuan Metode Prediksi Lokasi Sumber Emisi pada Material Kaku (*Solid*) Baja Tahan Karat (*Stainless Steel SS 304*)” ini disusun sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Dalam penulisan skripsi ini, penulis berterima kasih atas bantuan dan dukungan yang telah diberikan oleh berbagai pihak. Secara khusus, penulis mengucapkan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada :

1. Dr. Ir. Wahyu Nirbito, MSME atas segala waktu yang dicurahkan untuk memberi bimbingan dan ilmu yang bermanfaat bagi penulis. Semoga masih banyak waktu yang penulis miliki untuk mendapatkan lebih banyak ilmu dan tambahan pengetahuan serta pengalaman hidup dari beliau.
2. Dr. Ir. Harinaldi, M.Eng selaku Ketua Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia serta Dr. Ir. Ganjar Kiswanto, M. Eng selaku Sekretaris Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia yang juga merupakan pembimbing akademik penulis.
3. Bapak dan Ibu yang telah memberikan kesempatan bagi penulis untuk kuliah walau harus banting tulang siang malam, yang selalu yakin bahwa penulis dapat menjadi sarjana suatu saat kelak, yang tidak pernah lelah untuk memberi semangat kepada penulis dan yang tidak pernah lupa mengingatkan penulis untuk terus beribadah dan berdoa kepada Allah SWT.
4. Adik tercinta, Dara Cahya Ragilia, semoga suatu saat lebih baik daripada apa yang dicapai Abang.
5. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Mesin angkatan 2008 atas semua kebahagiaan dan kerjasama yang dibagi setiap hari selama 4 tahun di UI.

6. Rekan-rekan IMM, BEM, MPM dan segenap keluarga besar IKM FTUI yang memberikan ruang bagi penulis untuk mengembangkan diri dan menyalurkan minat serta bakat.
7. Prof. Dr. Ir. I Made Kartika Dhiputra, Dipl-Ing dan Dr. Ir. R. Danardono A. S., DEA, PE atas kesempatan yang diberikan dalam mengembangkan minat penulis terhadap kegiatan riset serta pembekalan kepada penulis untuk menjadi lebih bijak dan dewasa dalam bertindak
8. Prof. Ir. Yulianto S. Nugroho, M.Sc, Ph.D dan Ir. R. tris budiono, M. Si atas segala kisah inspiratif dan pencerahan pemikiran yang membekas kepada penulis.
9. Semua staf dan karyawan di Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia atas segala bantuannya.
10. Spesial untuk Saradhita Arumtaka yang selama 6 tahun selalu setia, percaya dan tidak pernah mengecewakan penulis, yang menjadi tujuan dari setiap perjalanan, yang menjadi obat dari segala kesedihan, yang menjadi tulang rusuk penulis yang hilang. Mohon maaf atas segala waktu yang tidak bisa dihabiskan bersama karena kesibukan penulis.

Semoga skripsi ini bermanfaat bagi semua yang membacanya. Kritik dan saran yang membangun penulis harapkan demi perbaikan di masa yang akan datang.

Depok, Juli 2012

Penulis

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

---

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

Nama : Raka Cahya Pratama  
NPM : 0806315793  
Program Studi : Teknik Mesin  
Departemen : Teknik Mesin  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul : “Studi Karakteristik Penjalaran Gelombang Tegangan (*Stress Wave*) berupa Emisi Akustik (*Acoustic Emission, AE*) untuk Penentuan Metode Prediksi Lokasi Sumber Emisi pada Material Kaku (*Solid*) Baja Tahan Karat (*Stainless Steel SS 304*)” beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di — : Depok

Pada tanggal : 12 Juli 2012

Yang menyatakan



(Raka Cahya Pratama)

## ABSTRAK

Nama : Raka Cahya Pratama  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul : Studi Karakteristik Penjalaran Gelombang Tegangan (*Stress Wave*) berupa Emisi Akustik (*Acoustic Emission, AE*) untuk Penentuan Metode Prediksi Lokasi Sumber Emisi pada Material Kaku (*Solid*) Baja Tahan Karat (*Stainless Steel SS 304*)

Kajian eksperimental telah dilakukan untuk mengetahui karakteristik penjalaran gelombang tegangan berupa emisi akustik (*Acoustic Emission, AE*) pada pelat baja tahan karat. Pada bentuk fungsi sinyal penjalaran *square*, gelombang AE dapat dideteksi mulai dari frekuensi 1 Hz, sedangkan pada fungsi sinus dan *triangle*, dimulai dari frekuensi 180 kHz. *Sampling rate* pengukuran yang dibutuhkan untuk mendeteksi AE adalah 50 MS/s. Karakteristik pengurangan amplitudo terhadap frekuensi sinyal penjalaran bersifat non linear yang dimungkinkan akibat dari resonansi pelat pada rentang frekuensi tertentu dan besarnya konstan pada frekuensi tertentu terhadap amplitudo sinyal aktuator. Ditemukan bahwa bentuk sinyal gelombang AE sangat tergantung dari laju perubahan tegangan terhadap waktu. Laju perubahan tegangan yang besar, membuat pengurangan amplitudo tidak sesuai dengan pendekatan medium kontinyu. Waktu penjalaran memiliki karakteristik yang non linear dan cenderung semakin kecil pada frekuensi sinyal penjalaran yang tinggi yang diprediksi akibat dari tidak dilakukannya penyerapan energi pada tingkat molekuler sehingga penjalaran berlangsung dengan cepat. Penggunaan parameter sinyal yang ditangkap sensor tanpa ada sinyal penjalaran awal sebagai basis sinyal *threshold* diusulkan untuk dapat menjadi parameter standar *threshold* dalam deteksi AE. Perhitungan energi dengan metode numerik aturan Simpson 1/3 menunjukkan bahwa fungsi pembebanan *square* memiliki besar energi yang lebih besar daripada fungsi lainnya. Analisis kualitatif terhadap beberapa metode penentuan lokasi sumber AE menghasilkan kesimpulan bahwa metode zonal adalah yang terbaik, namun metode *Time of Arrival* dan metode energi layak dikembangkan untuk menggantikan metode ini untuk menekan biaya operasional.

**Kata kunci:** Penjalaran Gelombang, Emisi Akustik, Pengurangan Amplitudo, Laju Perubahan Tegangan, Waktu Penjalaran, *Threshold*



## **ABSTRACT**

*Name : Raka Cahya Pratama  
Major of Study : Mechanical Engineering  
Title : Research on Characteristics of Stress Wave Propagation  
as Acoustic Emission to Determine a Method for  
Predicting the Emission Source Location on Solid  
Material Stainless Steel SS304*

*Experimental research has been done to understand the characteristic of acoustic emission (AE) on stainless steel plate. On square actuating function, AE can be detected since actuating frequency of 1 Hz, while on sine and triangle functions, it can be detected after 180 kHz actuating frequency. Sampling rate that needed to detect AE is 50 MS/s. Non linear characteristic of amplitude attenuation is found that most likely happened due to resonance of plate in some range of actuating frequency. It is also found that the signal form is depending on rate of stress change, bigger rate tends to not compatible with continuum medium approach. Propagation time found to be not linear and tend to decrease in higher frequency which probably caused from the absence of energy absorption in molecular level so the wave travelling faster than it used to. Proposed threshold is based on non actuating signal detected. The signal itself, its minimum-maximum value and root mean square value are the three parameters for the threshold. Then, numerical method using Simpson's 1/3 rule used to calculate the number of AE energy that carried. It is shown that square actuating function creates bigger AE energy than other actuating function. Qualitative analysis on several common methods for determining AE source location has shown that zonal method is the best approach but need very high operational cost, so time of arrival method and energy method deserve to be developed in order to substitute it.*

**Keywords:** *Wave Propagation, Acoustic Emission, Amplitude Attenuation, Stress Change Rate, Propagation Time, Threshold*

## DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	iii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iv
KATA PENGANTAR .....	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI .....	vii
ABSTRAK .....	viii
ABSTRACT .....	ix
DAFTAR ISI .....	x
DAFTAR TABEL .....	xii
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
<b>BAB 1</b> .....	
<b>PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	5
1.3 Tujuan .....	5
1.4 Ruang Lingkup Masalah .....	6
1.5 Urgensi Penelitian .....	7
1.6 Sistematika Penulisan .....	7
<b>BAB 2</b> .....	
<b>TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	9
2.1 Gelombang Emisi Akustik (Acoustic Emission = AE) .....	9
2.2 Penjalaran Gelombang .....	11
2.3 Metode Penentuan Lokasi Sumber AE .....	19
2.4 Perkembangan Terakhir Aplikasi AE .....	22
<b>BAB 3</b> .....	
<b>METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	24
3.1 Studi Awal .....	24
3.2 <i>Setup</i> Eksperimen .....	26
3.3 Pengolahan Data .....	28
3.4 Diagram Alir Penelitian .....	30

<b>BAB 4 ..</b>	.....
<b>PEMBAHASAN.....</b>	31
4.1 Frekuensi Deteksi AE.....	31
4.2 Pengurangan Amplitudo.....	34
4.3 Bentuk Sinyal AE.....	42
4.4 Waktu Penjalaran Gelombang AE.....	53
4.5 Penerapan <i>Threshold</i> .....	55
4.6 Analisis Kualitatif Metode Penentuan Lokasi Sumber AE.....	66
<b>BAB 5 ..</b>	.....
<b>KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	72
5.1. Kesimpulan.....	72
5.2 Saran.....	73
<b>DAFTAR REFERENSI .....</b>	75



## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Variabel yang terlibat dalam penelitian.....	28
Tabel 4.1. Frekuensi dan <i>Sampling Rate</i> dimana AE dapat dideteksi untuk fungsi <i>square</i> .....	31
Tabel 4.2. Frekuensi dan <i>Sampling Rate</i> dimana AE dapat dideteksi untuk fungsi sinus .....	32
Tabel 4.3. Frekuensi dan <i>Sampling Rate</i> dimana AE dapat dideteksi untuk fungsi <i>triangle</i> .....	33
Tabel 4.4. Rasio Amplitudo pada Setiap Fungsi dan Frekuensi Pembebanan.....	40
Tabel 4.5. Waktu <i>Delay</i> pada Setiap Fungsi dan Frekuensi Pembebanan.....	53
Tabel 4.6. Perbandingan Hasil Perhitungan Energi AE dari Sinyal pada Sensor untuk Setiap Fungsi Pembebanan setelah diterapkan <i>threshold</i> .....	66
Tabel 4.7. Analisis Keandalan Metode Penentuan Lokasi Sumber AE.....	71

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Perbandingan pengukuran AE dengan <i>baseline</i> dan tanpa <i>baseline</i> ..	2
Gambar 1.2. Penggunaan ambang batas amplitudo dan panjang gelombang AE masih belum standar .....	3
Gambar 1.3. Besar amplitudo gelombang AE terukur pada berbagai lokasi sensor terhadap sumber $X_0$ .....	3
Gambar 1.4. Perbedaan waktu propagasi setiap gelombang yang menjalar .....	4
Gambar 2.1. Gelombang Emisi Akustik: (a) Kontinyu dan (b) <i>Burst</i> .....	10
Gambar 2.2. Parameter Sinyal AE .....	10
Gambar 2.3. Prinsip Deteksi AE .....	11
Gambar 2.4. Bentuk Penjalaran Gelombang Elastik .....	16
Gambar 2.5. Kecepatan Gelombang dari Beberapa Material.....	18
Gambar 2.6. Penjalaran Gelombang P, S dan Rayleigh pada medium semi-tak hingga .....	19
Gambar 2.7. Skematik Metode <i>Time of Arrival</i> .....	19
Gambar 2.8. Skematik Metode Energi.....	20
Gambar 2.9. Metode <i>Cross-Correlation</i> .....	21
Gambar 2.10. Skematik Metode Zonal .....	22
Gambar 2.11. Skematik Metode Geodesi .....	22
Gambar 2.12. <i>Road Map</i> Penelitian.....	23
Gambar 3.1. Bagan pemodelan eksperimen.....	24
Gambar 3.2. <i>Setup</i> Eksperimen .....	26
Gambar 3.3. Foto Konfigurasi Eksperimen .....	27
Gambar 3.4. Diagram Alir Penelitian .....	30
Gambar 4.1. Pengurangan Amplitudo terhadap Jarak pada Pemodelan Gelombang Rayleigh Menjalar pada Seluruh Bagian Benda .....	35
Gambar 4.2. Pengurangan Amplitudo terhadap Jarak pada Pemodelan Gelombang Rayleigh Hanya Menjalar pada Permukaan yang Sama dengan Sumber.....	36
Gambar 4.3. <i>Curve Fitting</i> Pengurangan Amplitudo pada Permukaan yang Sama dengan Sumber Penjalaran dengan menggunakan Fungsi <i>Power Function</i> dan <i>Exponential Function</i> .....	37

Gambar 4.4. <i>Curve Fitting</i> Pengurangan Amplitudo pada Permukaan yang Berlawanan dengan Sumber Penjalaran dengan menggunakan Fungsi <i>Power Function</i> dan <i>Exponential Function</i> .....	38
Gambar 4.5. Contoh Pengukuran Rasio Amplitudo .....	39
Gambar 4.6. Rasio amplitudo pada setiap frekuensi penjalaran pada masing-masing fungsi penjalaran .....	41
Gambar 4.7. Karakteristik Amplitudo yang Ditangkap Sensor terhadap Amplitudo Sinyal Aktuator. ....	42
Gambar 4.8. Hasil Studi Awal Prediksi Sinyal pada Penjalaran Fungsi Square... ..	44
Gambar 4.9. Hasil Eksperimen pada Fungsi Penjalaran <i>Square</i> . ....	45
Gambar 4.10. Hasil Studi Awal Prediksi Sinyal pada Penjalaran Fungsi Sinus ... ..	47
Gambar 4.11. Hasil Eksperimen pada Fungsi Penjalaran Sinus. ....	48
Gambar 4.12. Hasil Studi Awal Prediksi Sinyal pada Penjalaran Fungsi Sinus ... ..	50
Gambar 4.13. Hasil Eksperimen pada Fungsi Penjalaran <i>Triangle</i> . ....	51
Gambar 4.14. Laju Perubahan Tegangan terhadap Waktu pada Setiap Fungsi Penjalaran .....	52
Gambar 4.15. Contoh Pengukuran Waktu <i>Delay</i> .....	53
Gambar 4.16. Hubungan Waktu Penjalaran terhadap Frekuensi .....	55
Gambar 4.17. Basis <i>Threshold</i> yang digunakan. Diukur pada saat tidak ada beban awal yang diberikan.....	56
Gambar 4.18. Hasil Penerapan <i>Threshold</i> (1) pada Fungsi <i>Square</i> . ....	57
Gambar 4.19. Hasil Penerapan <i>Threshold</i> (1) pada Fungsi Sinus .....	58
Gambar 4.20. Hasil Penerapan <i>Threshold</i> (1) pada Fungsi <i>Triangle</i> .....	59
Gambar 4.21. Hasil Penerapan <i>Threshold</i> (2) pada Fungsi <i>Square</i> . ....	60
Gambar 4.22. Hasil Penerapan <i>Threshold</i> (2) pada Fungsi Sinus .....	61
Gambar 4.23. Hasil Penerapan <i>Threshold</i> (2) pada Fungsi <i>Triangle</i> .....	62
Gambar 4.24. Hasil Penerapan <i>Threshold</i> (3) pada Fungsi <i>Square</i> . ....	63
Gambar 4.25. Hasil Penerapan <i>Threshold</i> (3) pada Fungsi Sinus .....	64
Gambar 4.26. Hasil Penerapan <i>Threshold</i> (3) pada Fungsi <i>Triangle</i> .....	65
Gambar 4.27. Metode <i>Time of Arrival</i> .....	67

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

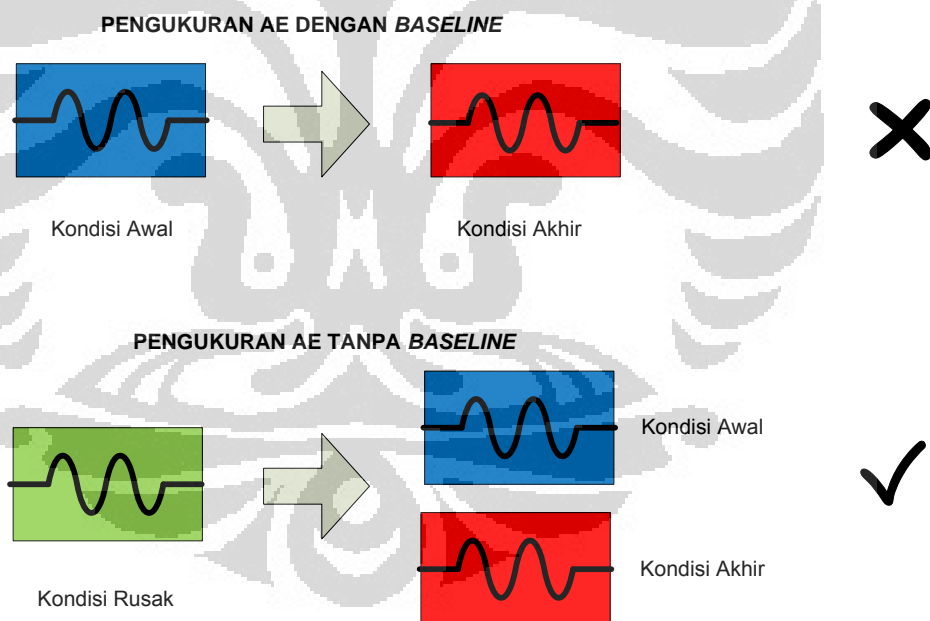
Berbagai metode pemantauan kondisi mesin dikembangkan saat ini, seperti dengan menggunakan analisis getaran, sensor inframerah, analisis partikel pelumas, dan gelombang ultrasonik. Dari segala metode yang banyak dikembangkan, pemantauan kondisi mesin dengan melakukan analisis terhadap getaran dari mesin tersebut adalah yang paling populer dan paling handal saat ini. Walaupun pengukuran getaran mesin sudah cukup handal, namun sebenarnya masih ada kekurangannya, kekurangan yang paling utama adalah bahwa getaran yang terukur sebenarnya adalah kondisi mesin yang sudah rusak secara makro karena telah bergetar, sehingga kerap kali analisis getaran menjadi terlambat walaupun sebagai dasar untuk diagnosa kerusakan mesin cukup baik.

Pada sistem pemeliharaan mesin yang tingkatannya lebih tinggi daripada preventif, dibutuhkan kemampuan untuk memprediksi kerusakan sebelum kerusakan itu terjadi. Teknik memprediksi kerusakan dini pada elemen mesin yang dinamis melalui deteksi gelombang tegangan telah dikembangkan [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, dan 8]. Gelombang tegangan menjalar dari dilepaskannya energi dalam struktur material elemen mesin akibat terjadinya disintegrasi molekuler atau mikroskopik sebagai cikal bakal timbulnya kerusakan. Gelombang tegangan ini menjalar sebagai emisi akustik (*Acoustic Emission*=AE). Dengan dapat dideteksinya AE ini, maka dapat ditentukan atau diprediksi terjadinya kerusakan dini jauh sebelum terjadi kerusakan fisik bahkan sebelum terjadinya retakan awal kelelahan (*fatigue initial crack*).

Walaupun sudah dapat diterapkan pada berbagai komponen, teknik ini sampai sekarang masih terus berkembang dan menemui berbagai tantangan atau permasalahan dalam pengembangannya. Tantangan

pengembangan teknik analisis gelombang AE tersebut diantaranya adalah:

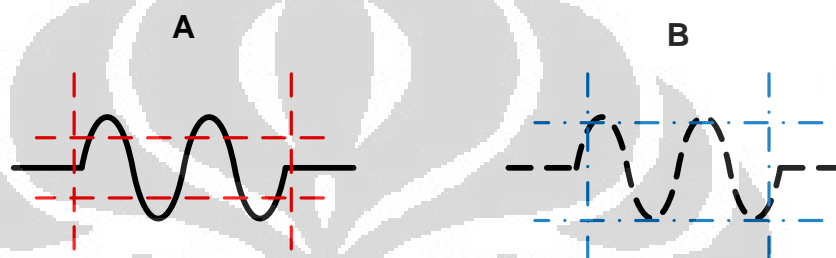
- a. Penggunaan metode *baseline* (penentuan kerusakan dilakukan dengan cara membandingkan kondisi akhir dengan kondisi awal mesin) yang mengasumsikan kondisi awal mesin adalah tanpa kerusakan. Hal ini masih diperdebatkan oleh berbagai peneliti AE. Mereka yang tidak mendukung penggunaan metode ini disebabkan penggunaan *baseline* dapat menyebabkan kesalahan analisis kecenderungan kerusakan karena kondisi awal mesin karena walaupun secara makro mesin tidak rusak, namun secara mikro, mesin pada kondisi awal pastilah juga memiliki kerusakan yang timbul dari tegangan sisa pada saat manufaktur dan juga akibat kesalahan penanganan mesin dari saat manufaktur sampai saat instalasi dan pengoperasian. Namun, bagi mereka yang mendukung, metode *baseline* dianggap sudah cukup merepresentasikan keinginan untuk menjadi metode pengganti analisis getaran [9].



**Gambar 1.1.** Perbandingan pengukuran AE dengan *baseline* dan tanpa *baseline*. Pengukuran dengan *baseline* dilakukan dengan membandingkan kondisi akhir dengan kondisi awal yang dapat menyebabkan kesalahan interpretasi ukuran kerusakan pada mesin. Metode pengukuran AE tanpa *baseline* perlu dikembangkan sehingga dapat mendefinisikan bagaimana kondisi rusak yang sebenarnya.

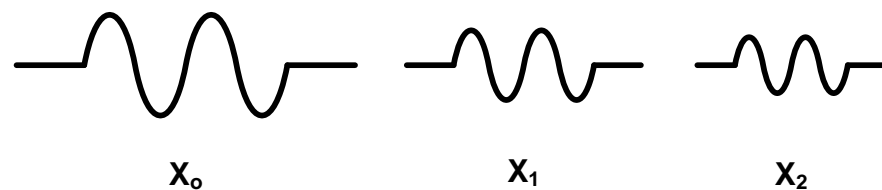


- b. Masih belum adanya standar ambang batas (*threshold*) amplitudo dan durasi AE yang signifikan dalam menentukan ukuran kerusakan mesin. Hal ini menyebabkan untuk mesin dalam kondisi yang sama, dapat saja terjadi perbedaan pendapat antara beberapa peneliti (atau pengguna AE lainnya) terkait ukuran kerusakan mesin tersebut. Saat ini, yang sering digunakan adalah amplitudo maksimum sinyal AE dengan *threshold* pada amplitudo yang diserahkan kepada masing-masing peneliti. Durasi didefinisikan sebagai waktu yang dibutuhkan dari amplitudo maksimum sampai dengan amplitudo menyentuh *threshold* [8].



**Gambar 1.2.** Penggunaan ambang batas amplitudo dan panjang gelombang AE masih belum standar. Hal ini menyebabkan dapat terjadinya perbedaan pendapat terkait kerusakan pada interpretasi gelombang AE terukur oleh dua orang yang berbeda.

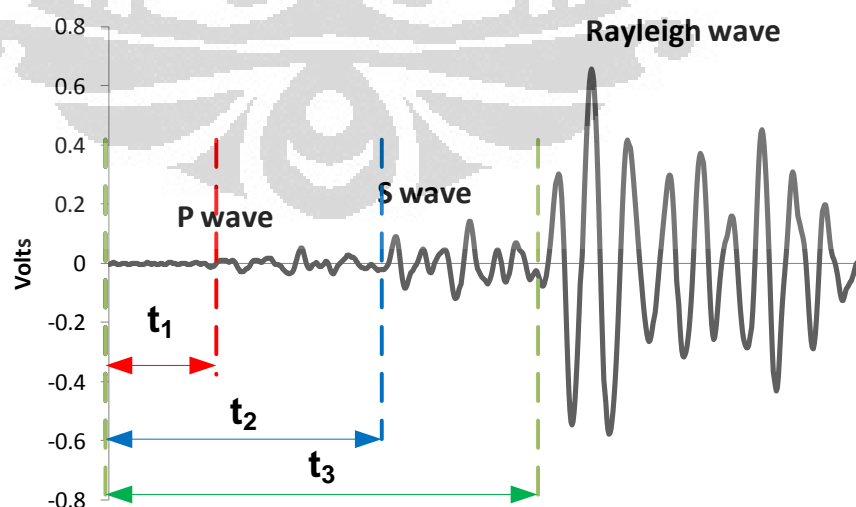
- c. Tingkat kerusakan mesin ditentukan oleh besarnya gelombang AE bebas *noise* yang terukur. Hal ini dapat menggiring pada kesalahan pengambilan kesimpulan terkait ukuran kerusakan karena tidak dilakukan reka ulang (*trace back*) terhadap kondisi penalaran gelombang dari sumbernya. Besar amplitudo gelombang AE pada saat terukur lebih kecil daripada besar amplitudo gelombang AE pada sumbernya dan pengurangan amplitudo ini sangat tergantung dari lokasi sensor ke sumber AE sehingga fokus penentuan kerusakan seharusnya bukan pada ukuran gelombang AE pada bacaan sensor tetapi pada sumber AE [10].



**Gambar 1.3.** Besar amplitudo gelombang AE terukur pada berbagai lokasi sensor terhadap sumber  $X_0$ . Artinya kerusakan seharusnya ditentukan terhadap ukuran

sumber gelombang AE, sehingga dibutuhkan suatu fungsi transfer yang menghubungkan besaran amplitudo yang dibaca sensor dengan besaran amplitudo sumber AE.

- d. Penentuan lokasi sumber AE saat ini banyak dikembangkan dalam basis waktu penjalaran pembacaan beberapa sensor kemudian dilakukan triangulasi [11,12 dan 13]. Metode ini cukup efektif untuk menentukan prediksi lokasi sumber AE. Namun demikian, gelombang menjar dalam berbagai mode, sehingga waktu penjalaran tentunya berbeda-beda antara setiap gelombang. Selain itu, waktu penjalaran sangat ditentukan oleh susunan struktur material, yang tentunya akibat anisotropi (terdapat *impurities* dan hubungan batas bulir yang tidak teratur), membuat waktu penjalaran menjadi tidak konstan, penentuan lokasi pun menjadi tidak akurat. Metode lain pun dikembangkan seperti metode energi dengan membandingkan energi AE yang terdeteksi pada setiap sensor, metode *cross-correlation* dengan melakukan *cross-correlation* antar sinyal yang ditangkap oleh dua sensor, metode zonal dengan menggunakan banyak sensor yang ditempatkan untuk merepresentasikan zona lokasi sumber AE, dan metode lain yang merupakan pengembangan metode waktu penjalaran [14]. Masih belum ada kesepakatan metode mana yang terbaik dalam menentukan lokasi sumber AE.



**Gambar 1.4.** Perbedaan waktu penjalaran setiap gelombang yang menjar. Selain itu, gelombang Rayleigh menjar hanya menjar di permukaan (*surface wave*),

sedangkan gelombang P dan S menjalar di dalam badan material (*body wave*) dan sangat kecil penjarannya di permukaan [14 telah diolah kembali]. Sehingga dapat terjadi kesalahan penentuan lokasi saat acuan gelombang yang digunakan tidak sama.

Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk dapat mengetahui karakteristik penjaran gelombang AE pada suatu model komponen mesin (berupa pelat baja tahan karat) sehingga dapat menjawab berbagai tantangan yang dipaparkan di atas, khususnya mengenai karakteristik pengurangan amplitudo dan karakteristik waktu penjaran, kemudian dapat dikembangkan suatu teknik penentuan *threshold* yang dapat digunakan secara umum dan dapat diketahui metode penentuan lokasi sumber AE yang paling handal secara kualitatif.

## 1.2 Rumusan Masalah

Dari penjelasan sebelumnya, rumusan masalah yang dapat diambil adalah:

- a. Bagaimana karakteristik pengurangan amplitudo, bentuk sinyal dan waktu penjaran gelombang AE dari berbagai faktor yang mempengaruhi?
- b. Bagaimanakah cara untuk menentukan ambang batas (*threshold*) dalam deteksi AE?
- c. Metode apakah yang paling handal dalam penentuan lokasi sumber AE?

Dalam penelitian ini dilakukan upaya untuk menjawab masalah-masalah tersebut dengan melakukan kajian eksperimental pada pelat baja tahan karat sebagai pemodelan komponen mesin.

## 1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui frekuensi sumber penjaran (frekuensi sinyal aktuator) dan *sampling rate* pengukuran untuk dapat mendeteksi gelombang AE pada variasi bentuk sumber;

2. Mengetahui karakteristik pengurangan amplitudo penjalaran gelombang AE pada pelat baja tahan karat pada variasi bentuk sumber, amplitudo sumber, dan frekuensi sumber;
3. Mengetahui karakteristik bentuk sinyal AE yang ditangkap dari variasi bentuk sumber;
4. Mengetahui karakteristik waktu penjalaran gelombang AE pada pelat baja tahan karat dari variasi bentuk dan frekuensi sumber;
5. Mengembangkan teknik penentuan ambang batas (*threshold*) dari suatu sinyal gelombang AE; dan
6. Mencari pilihan teknik penentuan lokasi sumber AE yang paling handal berdasarkan hasil karakterisasi pengurangan amplitudo dan waktu penjalaran gelombang AE serta faktor-faktor lain yang mempengaruhi.

#### 1.4 Ruang Lingkup Masalah

Ruang lingkup yang menjadi batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Pelat yang digunakan terbuat dari baja tahan karat dengan sifat mekanik sesuai dengan SS 304;
2. Sumber AE yang digunakan adalah berupa aktuasi piezoceramic yang dibangkitkan oleh sinyal dari *function generator*;
3. Ujung-ujung pelat adalah bebas sehingga tidak ada pantulan gelombang;
4. Sensor dan aktuator piezoceramic diasumsikan tidak memantulkan sinyal;
5. Gelombang yang menjalar berupa gelombang elastik. Gelombang Rayleigh pada permukaan serta gelombang P dan S pada permukaan dan pada badan material.
6. Penentuan metode penentuan lokasi sumber yang terbaik dilakukan dengan membandingkan hasil karakterisasi dengan karakteristik metode itu sendiri.

## 1.5 Urgensi Penelitian

Signifikansi dari hasil penelitian ini terutama akan sangat dirasakan pada sektor pemeliharaan pada industri. Pemanfaatan teknik deteksi AE akan menjadi lebih baik dan pemeliharaan berbagai komponen mesin dalam industri dapat dilakukan secara optimal. Misalnya pada industri pengeboran migas, dengan penelitian ini, maka dapat dilakukan pemantauan kondisi batang bor dan pahat yang ada di bawah permukaan dengan memperhatikan deteksi AE cukup dari permukaan. Begitu pula pada industri pembangkit nuklir yang sangat sulit dilakukan pemantauan kondisi jarak dekat (karena potensi radioaktif), dapat dilakukan pemantauan kondisi jarak jauh dengan memperhatikan hasil penelitian ini.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi ini adalah:

### *BAB 1 – Pendahuluan*

Berisi latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup masalah dalam penelitian, urgensi penelitian serta memaparkan sistematika penulisan.

### *BAB 2 – Tinjauan Pustaka*

Bagian ini berisi pemaparan teori-teori yang digunakan dalam melakukan penelitian ini. Dimulai dari pemaparan mengenai definisi dan parameter-parameter gelombang AE. Kemudian dilanjutkan dengan pemaparan mengenai teori penjalaran gelombang. Dijelaskan pula mengenai metode-metode dalam menentukan lokasi AE. Dan terakhir ditutup dengan memaparkan perkembangan teknologi AE saat ini dan bagaimana korelasi penelitian ini dengan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya.

### *BAB 3 – Metodologi Penelitian*

Berisi penjelasan mengenai setup eksperimen. Dilanjutkan dengan pemaparan metode penentuan sampel dan pengolahan data yang

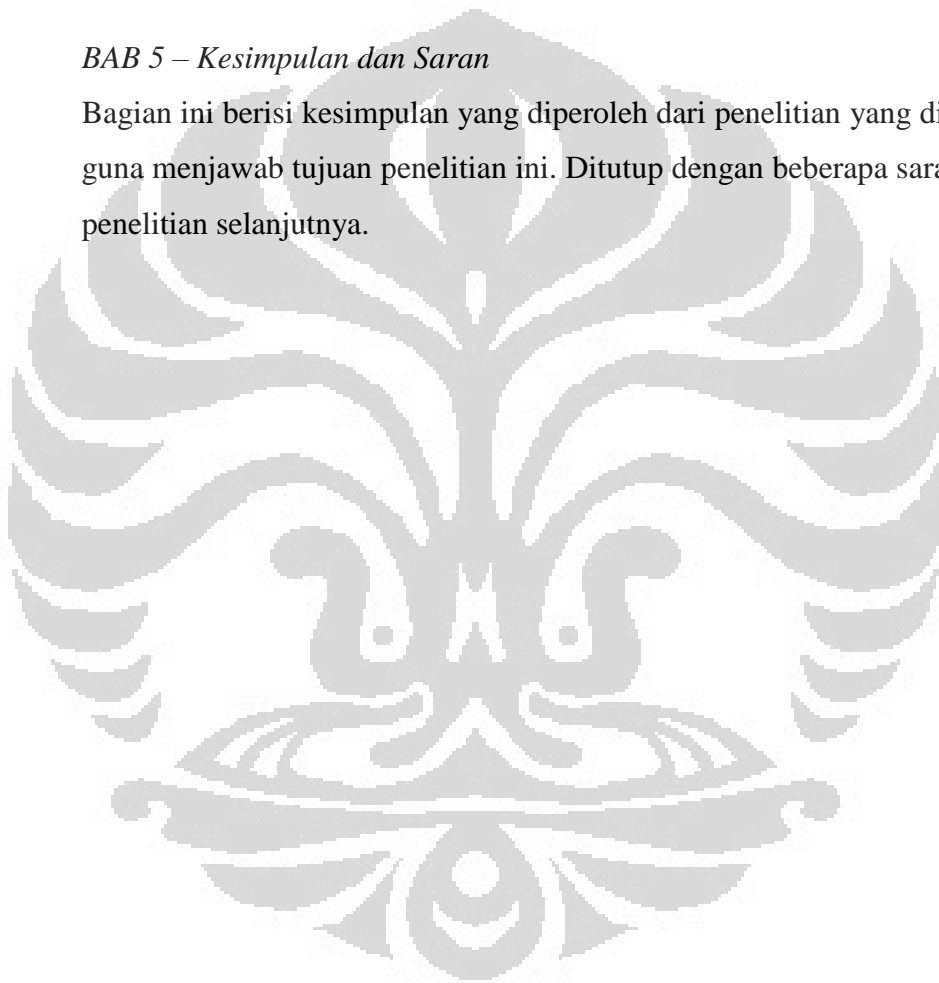
dilakukan. Lalu dirangkum dalam suatu diagram alir penelitian yang menjelaskan seluruh proses penelitian.

#### *BAB 4 – Pembahasan*

Bagian ini berisi hasil pengolahan data berupa tabel dan grafik yang kemudian dianalisis dengan mengaitkannya dengan dasar teori yang ada sehingga dapat dipahami fenomena yang terjadi

#### *BAB 5 – Kesimpulan dan Saran*

Bagian ini berisi kesimpulan yang diperoleh dari penelitian yang dilakukan guna menjawab tujuan penelitian ini. Ditutup dengan beberapa saran untuk penelitian selanjutnya.



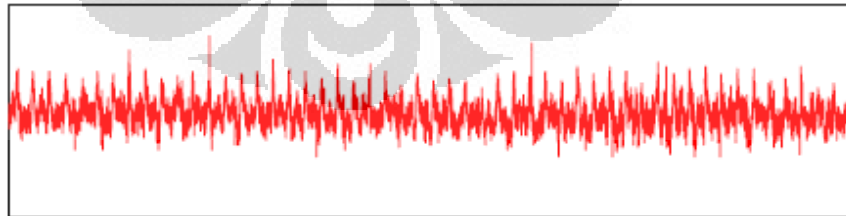
## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

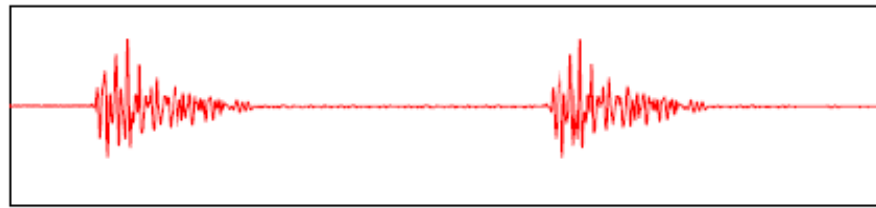
#### 2.1. Gelombang Emisi Akustik(*Acoustic Emission/AE*)

Menurut ASTM E610, definisi gelombang emisi akustik dari aspek penjalaran adalah fenomena gelombang elastik transien yang dibangkitkan oleh pelepasan energi yang sangat cepat dari suatu lokasi tertentu pada material atau dari gelombang elastik transien lain yang telah terbangkitkan. Sedangkan, menurut Muravin (2011), gelombang emisi akustik adalah suatu fenomena radiasi gelombang tegangan yang disebabkan oleh rekonstruksi dinamik struktur material yang menemani proses deformasi dan kerusakan. Gelombang tegangan dibangkitkan ketika laju dari suatu tegangan yang bekerja pada suatu daerah struktur mikroskopik yang berubah secara lokal sedemikian rupa sehingga tegangan tersebut tidak dapat ditransmisikan secara cepat ke daerah lain pada material tersebut [14].

Gelombang emisi akustik memiliki bentuk kontinyu ataupun *burst* dimana perbedaan keduanya adalah pada amplitudo dan sumber penyebabnya. Gelombang emisi akustik kontinyu disebabkan oleh retakan akibat pembebanan dari luar dengan amplitudo yang rendah. Sedangkan, gelombang emisi akustik *burst* disebabkan oleh dislokasi pada ukuran mikro dengan amplitudo yang besar. Gelombang emisi akustik kontinyu pada dasarnya adalah gabungan dari banyak gelombang emisi akustik *burst* [15].



(a)

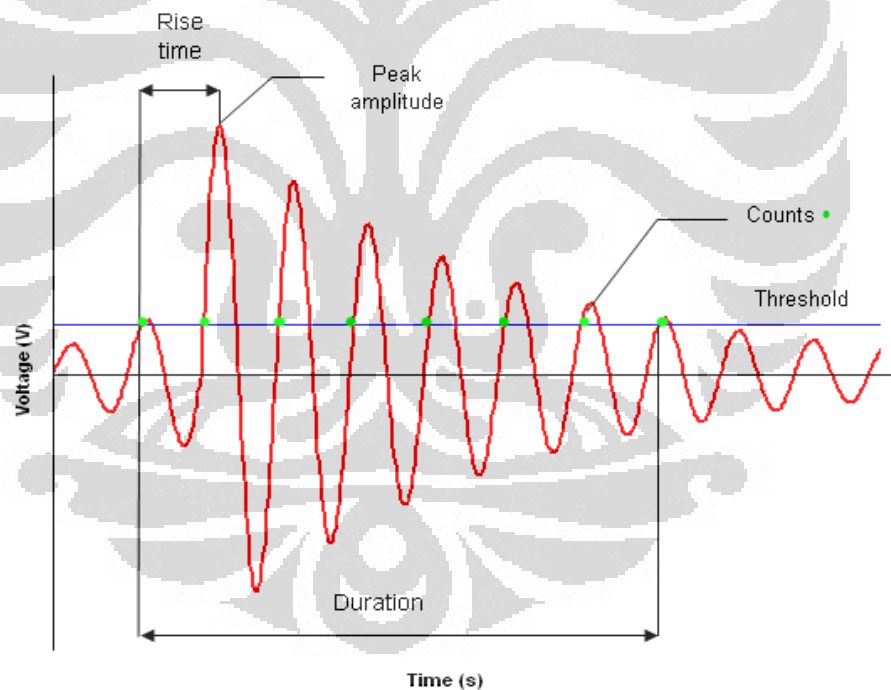


(b)

**Gambar 2.1.** Gelombang Emisi Akustik: (a) Kontinyu dan (b) *Burst* [15]

Dalam penjarangannya termodulasi pada frekuensi tinggi. Umumnya di atas 100 kHz. Namun, nilai frekuensi ini juga sangat tergantung dari ketebalan dan kerapatan dari material yang dideteksi [16].

Dalam menganalisis sinyal AE, beberapa terminologi digunakan untuk mendefinisikan parameter-parameter sinyal [9].



**Gambar 2.2.** Parameter Sinyal AE [15]

***Peak-Amplitude*** : adalah amplitudo maksimum dari suatu gelombang AE. Ada dua cara menyatakan parameter ini, yaitu dalam skala tegangan (V) atau dengan skala desibel (dBV).



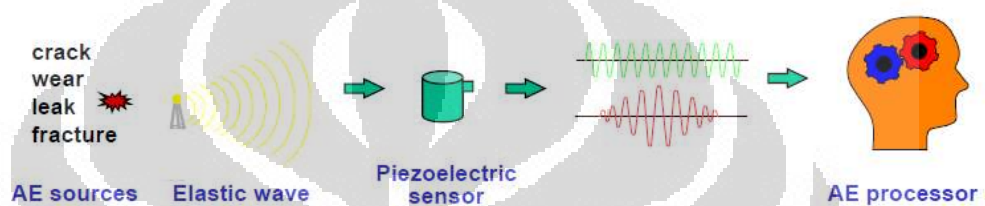
**Duration** : selang waktu antara mulai adanya AE hingga AE mulai menghilang, yaitu, pada saat amplitudo AE mulai menyentuh *threshold*

**Rise time** : selang waktu antara mulai adanya AE sampai dengan mencapai *peak-amplitude*.

**Count** : jumlah gelombang dari suatu rentang AE

**Threshold** : berupa ambang batas amplitudo. Nilainya masih belum standar dan tergantung dari penggunaannya.

Prinsip deteksi gelombang AE ditunjukkan pada Gambar 2.3. sebagai berikut:



Gambar 2.3. Prinsip Deteksi AE [15]

Suatu sumber AE menjalar melalui gelombang elastik, kemudian ditangkap oleh sensor piezoelektrik dan menjadi sinyal yang terbaca pada alat akuisisi, kemudian dilakukan pemrosesan pada sinyal ini untuk mendeteksi dari mana sumber AE tersebut dan seberapa besar ukurannya [15].

## 2.2. Penjalaran Gelombang

Pada mekanika kontinyum terdapat dua sistem koordinat untuk mempelajari gerak dari suatu medium, yaitu koordinat material (metode Lagrange) dan koordinat spasial (metode Euler) [17]. Konsep dasar dari mekanika kontinyum adalah mengabaikan struktur mikroskopik material pada saat analisis dan yang digunakan adalah suatu sistem ideal matematis berupa distribusi titik massa yang kontinyu. Atau dengan kata lain, suatu medium adalah suatu kumpulan titik massa yang kontinyu. Untuk membedakan setiap titik massa, maka diperlukan penamaan pada setiap titik, sehingga digunakanlah koordinat spasial untuk memberi nama pada setiap titik ini. Seiring dengan hal tersebut, lokasi dari setiap titik massa juga berubah pada

setiap waktu. Pada setiap titik massa  $X$ , lokasinya ( $x$ ) dapat ditentukan dari waktu ke waktu ( $t$ ).

$$x = x(X, t) \quad (2.1)$$

Dan pada setiap lokasi ( $x$ ) pada waktu tertentu ( $t$ ), dapat diketahui titik massa yang berada di sana ( $X$ ).

$$X = X(x, t) \quad (2.2)$$

Hal ini berujung pada dua kemungkinan pendefinisian gerak, yaitu melihat suatu titik massa yang tetap (metode Lagrange) atau melihat suatu lokasi yang tetap (metode Euler). Variabel bebas  $X$  pada definisi Lagrange disebut pula koordinat Lagrange atau koordinat material, sedangkan variabel bebas  $x$  pada definisi Euler disebut pula koordinat Euler atau koordinat spasial.

Pada metode Lagrange,

$$\psi = f(X, t) \quad (2.3)$$

Sedangkan, pada metode Euler

$$\psi = f(x, t) \quad (2.4)$$

Sehingga dapat dilakukan konversi antara koordinat material dengan koordinat spasial.

$$f(x, t) = F[X(x, t), t] \quad (2.5)$$

atau

$$F(X, t) = f[x(X, t), t] \quad (2.6)$$

Sehingga terdapat dua jenis turunan terhadap waktu, yaitu turunan spasial dan turunan material.

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = \left( \frac{\partial f(x, t)}{\partial t} \right)_x = \left( \frac{\partial F(X, t)}{\partial t} \right)_X \quad (2.7)$$

Dengan menggunakan aturan rantai, didapatkan

$$\begin{aligned} \frac{d\psi}{dt} &= \left( \frac{\partial f[x(X, t), t]}{\partial t} \right)_x + \left( \frac{\partial f[x(X, t), t]}{\partial x} \right)_t \left( \frac{\partial x}{\partial t} \right)_X = \\ &= \left( \frac{\partial f(x, t)}{\partial t} \right)_x + \left( \frac{\partial f(x, t)}{\partial x} \right)_t \left( \frac{\partial x}{\partial t} \right)_X \end{aligned} \quad (2.8)$$

Pada persamaan di atas  $\left(\frac{\partial x}{\partial t}\right)_x$  adalah turunan material partikel X pada lokasi spasial  $x$ . Sehingga dapat disebut kecepatan partikel X yang dinotasikan sebagai  $v$ ;

$$v = \left(\frac{\partial x}{\partial t}\right)_x \equiv \frac{dx}{dt} \quad (2.9)$$

Sehingga dari (2.8) dan (2.9) didapatkan persamaan,

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{\partial\psi}{\partial t} + v \frac{\partial\psi}{\partial x} \quad (2.10)$$

Jika  $\psi$  merepresentasikan kecepatan partikel  $v$ , turunan materialnya adalah percepatan dari partikel,  $a$ , yang dinyatakan sebagai:

$$a = \left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)_x \equiv \frac{dv}{dt} \quad (2.11)$$

Substitusi persamaan (2.11) ke (2.10) didapatkan persamaan,

$$a = \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2.12)$$

Pada bagian bagian pertama persamaan di sisi kanan, adalah turunan waktu dari kecepatan partikel pada lokasi  $x$  terhadap waktu  $t$  atau yang disebut akselerasi lokal. Pada bagian kedua dari persamaan di sisi kanan, adalah perubahan kecepatan partikel terhadap waktu akibat dari perubahan lokasi titik massa atau disebut sebagai akselerasi migrasi, yang mana nilainya dalam nol pada suatu medan yang seragam.

Kecepatan gelombang sendiri sangat tergantung dari koordinat yang dipilih, jika diobservasi dengan koordinat material, maka kecepatan gelombang adalah,

$$C = \left(\frac{dx}{dt}\right)_w = \dot{\phi}(t) \quad (2.13)$$

Atau disebut sebagai kecepatan gelombang material (kecepatan gelombang Lagrange), atau kecepatan gelombang intrinsik. Jika diobservasi pada koordinat spasial, maka kecepatan gelombang menjadi,

$$c = \left(\frac{dx}{dt}\right)_w = \dot{\psi}(t) \quad (2.14)$$

Atau kecepatan gelombang spasial (kecepatan gelombang Euler). Sebagaimana sebelumnya, dapat didefinisikan turunan gelombang yang dapat menghubungkan kecepatan gelombang material dan spasial.

$$\left(\frac{d\psi}{dt}\right)_W = \left(\frac{\partial\psi}{\partial t}\right)_x + c \left(\frac{\partial\psi}{\partial x}\right)_t \quad (2.15)$$

dan

$$\left(\frac{d\psi}{dt}\right)_W = \left(\frac{\partial\psi}{\partial t}\right)_X + C \left(\frac{\partial\psi}{\partial X}\right)_t \quad (2.16)$$

Jika  $\psi$  adalah  $x(X,t)$ , dan dalam gerak material satu dimensi,

$$\left(\frac{\partial x}{\partial X}\right)_t = (1 + \varepsilon) \quad (2.17)$$

Dengan  $\varepsilon$  adalah regangan *engineering* dari suatu material, maka dapat diturunkan persamaan,

$$c = v + (1 + \varepsilon)C \quad (2.18)$$

Sehingga pada gelombang bidang yang menjalar pada medium dengan kecepatan awal nol dan juga regangan awal nol, kecepatan penjalaran material adalah sama dengan kecepatan penjalaran spasial

Dari hukum Newton diketahui,

$$\rho_0 A_0 dX \frac{\partial v}{\partial t} = P(X + dX, t) - P(X, t) = \frac{\partial P}{\partial X} dX \quad (2.19)$$

Dengan mensubstitusi tegangan *engineering*  $\sigma = P/A_0$ , persamaan gerak menjadi,

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial X} \quad (2.20)$$

Dimana diketahui  $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ , dari diagram material.

Persamaan  $\sigma = \sigma(\varepsilon)$  dapat diturunkan kembali. Dengan mendefinisikan,

$$C^2 = \frac{1}{\rho_0} \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (2.21)$$

Dengan mengeliminasi  $\varepsilon$ , didapat persamaan,

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \rho_0 C^2 \frac{\partial v}{\partial X} \quad (2.22)$$

atau dengan mengeliminasi  $\sigma$ , didapat persamaan,

$$\frac{\partial v}{\partial t} = C^2 \frac{\partial \varepsilon}{\partial X} \quad (2.23)$$

Dalam notasi perpindahan, persamaan (2.23) dapat dinyatakan sebagai,

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - C_0^2 \frac{\partial^2 u}{\partial X^2} = 0 \quad (2.24)$$

Solusi dari persamaan di atas adalah

$$u(X, t) = u_1(X + C_0 t) + u_2(X - C_0 t) \quad (2.25)$$

dan

$$u(X, 0) = u_1(X, 0) + u_2(X, 0) \quad (2.26)$$

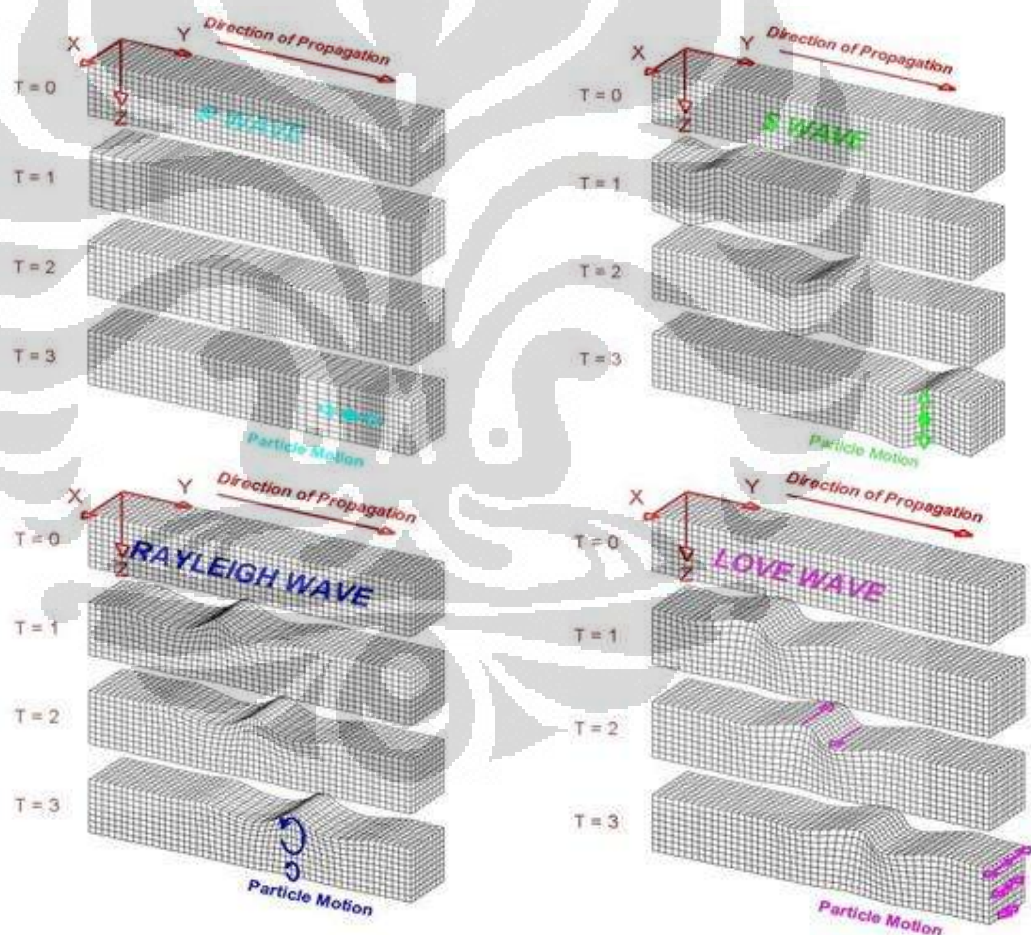
Beberapa pengertian fisis dapat disimpulkan dari persamaan (2.25) dan (2.26) [18].

1. Ketika gelombang penjalaran memantul dari suatu ujung tetap, besarnya gaya aksial menjadi 2 kalinya pada saat memantul, setelah pantulan selesai, kembali ke besaran awal dan arah gaya tetap sama seperti awal.
2. Ketika gelombang penjalaran memantul dari suatu ujung bebas, besarnya gaya aksial menjadi nol pada saat memantul, setelah pantulan selesai, kembali ke besaran awal tetapi arah gaya berlawanan arah dari arah awal.
3. Pada gelombang tekan, arah kecepatan gelombang sama dengan arah kecepatan partikel. Namun pada gelombang tarik, arah kecepatan gelombang berlawanan arah dengan kecepatan partikel.
4. Besarnya kecepatan gelombang adalah sama dengan kecepatan penjalaran gelombang pada saat transien.

Gelombang elastik menjalar pada berbagai mode [14], di antaranya:

- **Gelombang Longitudinal (*dilatational, P-*)** adalah gelombang yang beresilasi pada arah yang sama dengan penjalarannya.
- **Gelombang Shear (*transverse, distortional, equivolumal, S-*)** adalah gelombang yang beresilasi tegak lurus dengan arah penjalarannya.

- **Gelombang Rayleigh (permukaan)** adalah gelombang dengan gerak partikel eliptik pada bidang normal dari permukaan dan sejajar dengan arah penjarannya.
- **Gelombang Lamb** adalah gelombang dengan gerak partikel yang tegak lurus dengan pelat.
- **Gelombang Stoneley (interfacial)** adalah gelombang yang terjadi pada kontak antara dua media semi-tak hingga
- **Gelombang Love** adalah gelombang pada suatu media berlapis, sejajar terhadap bidang lapisan dan tegak lurus terhadap arah penjarannya
- **Gelombang Creeping** adalah gelombang yang terdifraksi di sekitar permukaan terhalang oleh halangan yang halus



**Gambar 2.4.** Bentuk Penjalaran Gelombang Elastik [14]

Setiap gelombang memiliki kecepatan yang berbeda-beda dan juga berasosiasi dengan energi yang dibawa. Umumnya, hanya 3 gelombang

**Universitas Indonesia**

elastik yang digunakan untuk analisis, yaitu gelombang P, gelombang S dan gelombang Rayleigh. Gelombang P dan S mewakili gelombang yang terjadi pada badan material, sedangkan gelombang Rayleigh merepresentasikan gelombang permukaan. Ketiga gelombang ini memiliki kecepatan yang berbeda-beda. Gelombang P adalah gelombang yang paling cepat, lalu diikuti gelombang S dan kemudian gelombang Rayleigh. Namun, perbedaan tidak terlalu jauh antara kecepatan gelombang S dan gelombang Rayleigh, membuat keduanya sulit dibedakan saat membaca sinyal. Gelombang Rayleigh sendiri sangat tergantung dengan gelombang S dan juga Poisson's *ratio* dari media penjalaran. Menurut Richart et all. dan M. Meyer, gelombang Rayleigh membawa 67%, gelombang S 26% dan gelombang P 7% dari total energi penjalaran [19, 20]. Sehingga dapat dikatakan gelombang Rayleigh mendominasi penjalaran gelombang.

Persamaan-persamaan kecepatan gelombang di bawah ini didasarkan pada persamaan yang digunakan oleh [18].

Gelombang Primer (*P-wave*)

$$c_p = \sqrt{\frac{E_{ef}}{\rho}} \quad (2.27)$$

$$E_{ef} = \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (2.28)$$

Dengan  $c_p$  adalah kecepatan penjalaran gelombang primer [ $m/s^2$ ]  $E$  adalah modulus elastisitas [ $N/m^2$ ],  $\nu$  adalah Poisson's Ratio dan  $\rho$  adalah massa jenis [ $kg/m^3$ ].

Gelombang Sekunder/*Shear (S-wave)*

$$c_s = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{5Gh_s}{m}} \quad (2.29)$$

$$h_s = \frac{h}{1.2} \quad (2.30)$$

Dengan  $c_s$  adalah kecepatan penjalaran gelombang sekunder [m/s<sup>2</sup>]  $G$  adalah modulus geser [N/m<sup>2</sup>],  $\nu$  adalah Poisson's Ratio,  $m$  adalah massa pelat [kg], dan  $h$  adalah tebal pelat [m].

### Gelombang Badan

Gelombang badan didefinisikan sebagai gabungan dari gelombang primer dan gelombang sekunder.

$$c_B = \sqrt{c_s^2 + c_p^2} \quad (2.31)$$

### Gelombang Rayleigh

Gelombang Rayleigh hanya menjalar pada permukaan pelat pada pendekatan pelat tebal, sedangkan pada pendekatan pelat tipis, gelombang ini menjalar di seluruh bagian pelat. Persamaan kecepatan gelombang ini adalah,

$$c_R = \frac{0.862 + 1.14\nu}{1 + \nu} c_s \quad (2.32)$$

Dengan  $c_R$  adalah kecepatan penjalaran gelombang Rayleigh [m/s<sup>2</sup>],  $\nu$  adalah Poisson's Ratio dan  $c_s$  adalah kecepatan penjalaran gelombang sekunder. Berikut adalah tabel kecepatan dari beberapa material.

Material	$E$ (GPa)	$P$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\nu$	$G$ (GPa)	$c_0$ (m/s)	$c_s$ (m/s)	$E_{ef}$ (GPa)	$c_p$ (m/s)
Steel	200	7850	0.3	76.92	5047.5	3130.4	269.23	5856.4
Aluminum alloy	69	2700	0.35	25.56	5055.3	3076.5	110.74	6404.3
Copper	110	8970	0.3	42.31	3501.9	2171.8	148.08	4063.0
Brass	110	8500	0.35	40.74	3597.4	2189.3	176.54	4557.4
Lead	18	11300	0.45	6.21	1262.1	741.1	68.28	2458.1
Glass	70	2300	0.25	28.00	5516.8	3489.1	84.00	6043.3
Granite	65	2600	0.22	26.64	5000.0	3200.9	74.21	5342.5
Concrete	31	2400	0.2	12.92	3594.0	2319.9	34.44	3788.4
Hardwood	12	590	0	6.00	4509.9	3189.0	12.00	4509.9

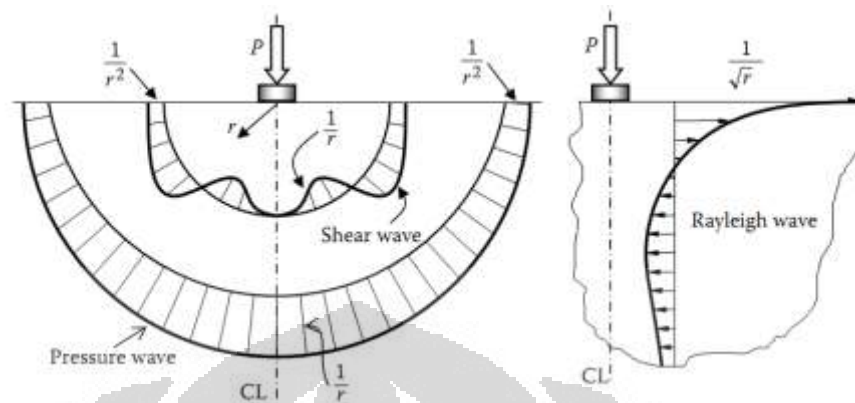
*Note:* Wave speeds are designated as follows:  $c_0$ : uniaxial wave, in thin bar;  $c_s$ : shear wave, beam, or medium;  $c_p$ : pressure wave, confined bar or medium.

**Gambar 2.5.** Kecepatan Gelombang dari Beberapa Material [18]

Amplitudo gelombang elastik berkurang pada tingkat yang berbeda-beda, menurut [18] dan [20], gelombang P dan S berkurang pada rasio  $1/r^2$  pada



permukaan dan  $1/r$  pada badan media. Sedangkan gelombang Rayleigh berkurang pada rasio  $1/\sqrt{r}$ .



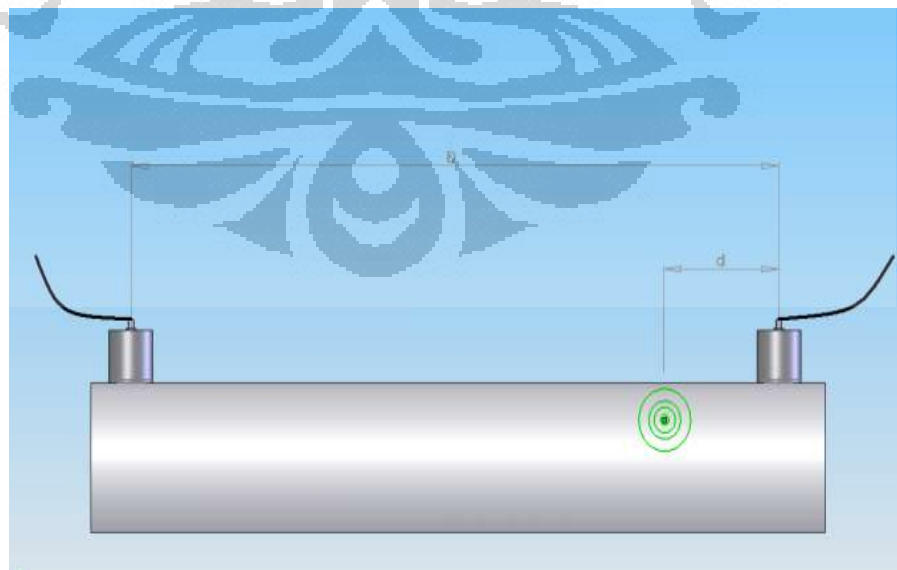
Gambar 2.6. Penjalaran Gelombang P, S dan Rayleigh pada medium semi-tak hingga [18]

### 2.3. Metode Penentuan Lokasi Sumber AE

Beberapa metode digunakan untuk mengetahui lokasi sumber AE, yang paling umum menurut [14] adalah:

- Metode *Time of Arrival*

Metode *Time of Arrival* dengan menggunakan waktu *delay* sinyal yang ditangkap sensor terhadap sinyal sumber, seperti yang dilakukan oleh [11], [12] dan [13]. Dibutuhkan minimal 2 sensor untuk mengetahui lokasi sumber AE.



Gambar 2.7. Skematik Metode *Time of Arrival* [14]

$$d = \frac{1}{2}(D - \Delta T \cdot V) \quad (2.33)$$

$d$  = jarak dari sensor yang pertama kali mendeteksi AE

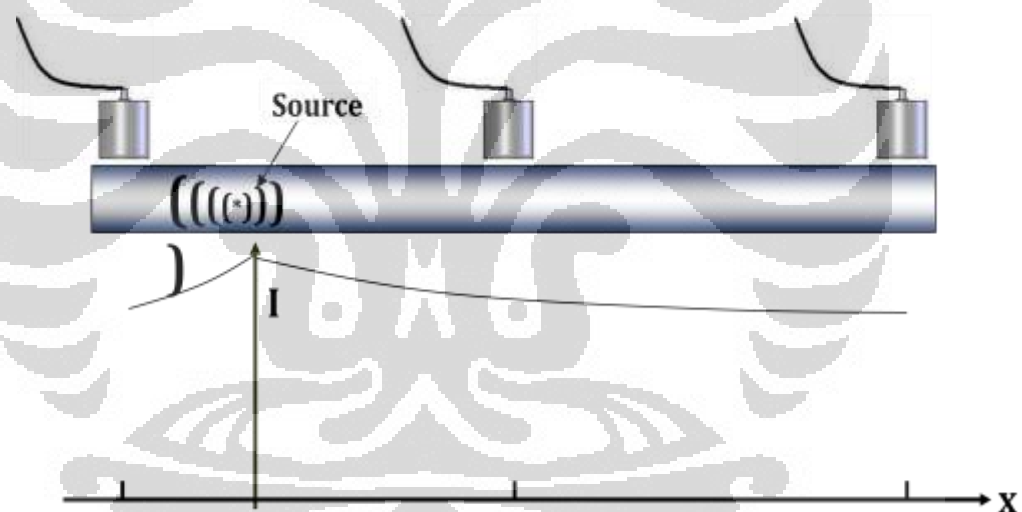
$D$  = jarak antar sensor

$\Delta T$  = selisih waktu deteksi antar sensor

$V$  = kecepatan gelombang

- Metode Energi

Metode Energi dengan membandingkan energi AE yang terukur oleh sensor, seperti yang dilakukan oleh [3]. Untuk properti konstanta pengurangan material yang belum diketahui, dibutuhkan minimal 3 sensor untuk mengetahui lokasi sumber.



Gambar 2.8. Skematik Metode Energi [14]

$$E_i = E_o e^{-\beta(|x_i - x_o|)} \quad (2.34)$$

$$\frac{\ln\left(\frac{E_1}{E_2}\right)}{\ln\left(\frac{E_2}{E_3}\right)} = \frac{|x_1 - x_o| - |x_2 - x_o|}{|x_2 - x_o| - |x_3 - x_o|} \quad (2.35)$$

$X_o$  – lokasi sumber

$X_i$  – lokasi sensor ke- $i$

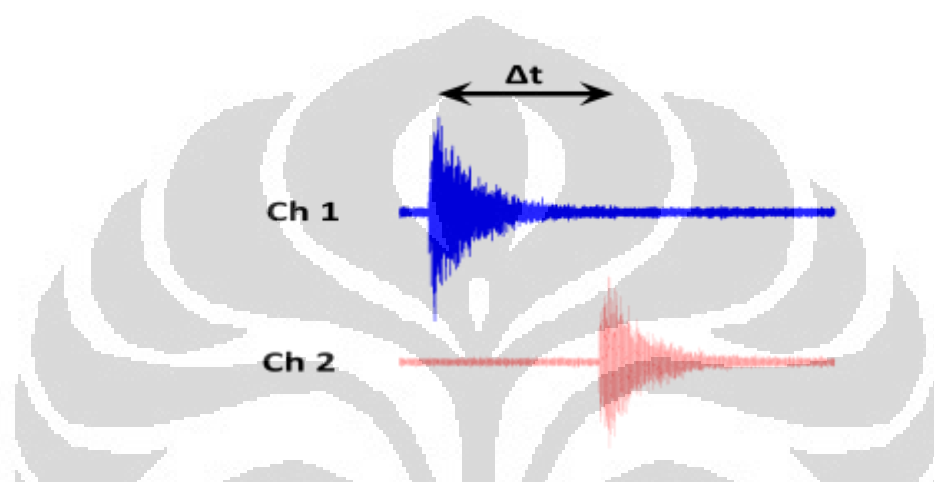
$E_o$  – energi pada sumber

$E_i$  – energi pada sensor ke- $i$

$\beta$  – konstanta atenuasi

- Metode *Cross-Correlation*

Metode *Cross-Correlation* dengan menerapkan cross-correlation terhadap dua sinyal yang ditangkap oleh sensor. Metode ini adalah pengembangan metode *Time of Arrival*.



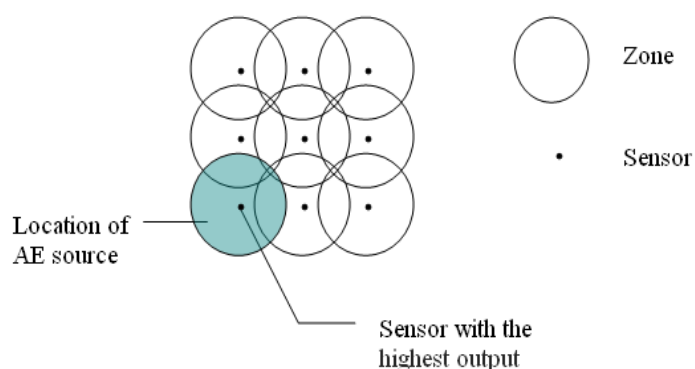
Gambar 2.9. Metode *Cross-Correlation* [14]

$$C(t) = \int S_{Ch\ 1}(\tau) \cdot S_{Ch\ 2}(\tau + t) dt \quad (2.36)$$

$$\Delta t = t \big|_{\max\{C(t)\}} \quad (2.37)$$

- Metode Zonal

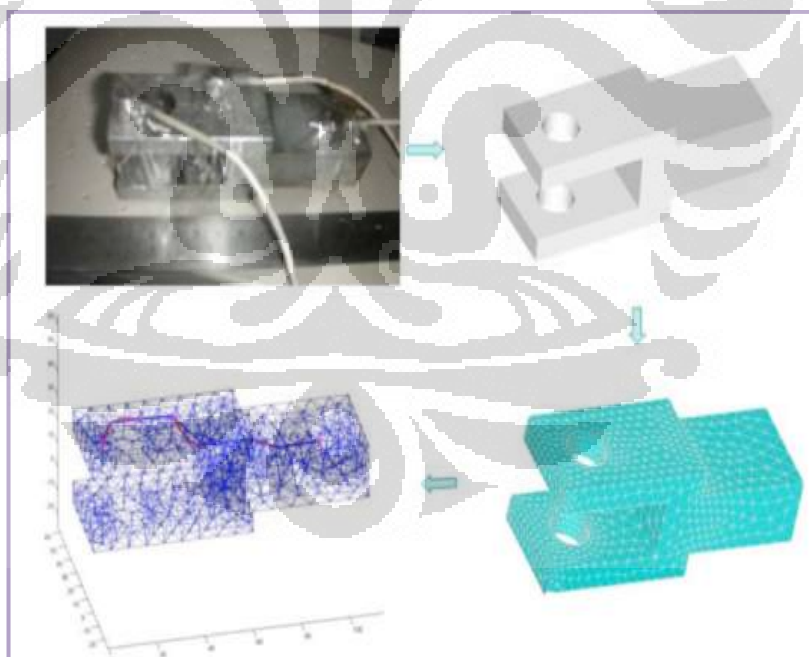
Metode Zonal dengan cara menempatkan sejumlah sensor AE untuk menangkap sinyal sebagaimana dibahas dalam [21]. Sinyal AE terbesar yang ditangkap oleh suatu sensor menjadikan zona sensor tersebut sebagai lokasi sumber AE. Kekurangan metode ini adalah dibutuhkan jumlah sensor yang banyak dan ruang yang cukup untuk penempatan sensor.



Gambar 2.10. Skematik Metode Zonal [14]

- Metode Geodesi

Metode Geodesi merupakan turunan dari metode time of arrival yaitu dengan pendekatan jalur terpendek yang mungkin dicapai suatu mesh objek dengan menggunakan prinsip energi minimum [25]. Metode ini sangat baik untuk bentuk-bentuk yang kompleks, namun komputasi yang dilakukan sangat rumit dan memakan waktu [14].



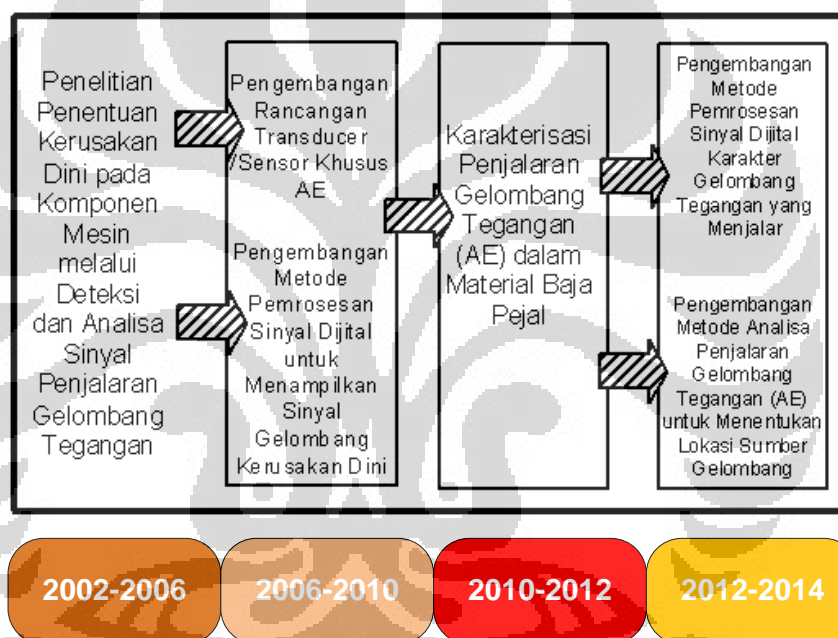
Gambar 2.11. Skematik Metode Geodesi [14]

## 2.4. Perkembangan Terakhir Aplikasi AE

Gelombang emisi akustik telah banyak digunakan dalam berbagai aplikasi. [22], [23] dan [24] mengembangkan teknik monitoring konstruksi sipil

**Universitas Indonesia**

seperti jembatan dan konstruksi beton. Sedangkan, [3], [4], [7] mengembangkan teknik monitoring kondisi bantalan dengan memanfaatkan gelombang emisi akustik. Monitoring kondisi mesin induksi dengan AE dilakukan oleh [2]. Dan dari penelitian sebelumnya, telah dikembangkan suatu sensor berbasis piezoceramic PZT yang disertai teknik filtrasi sinyal dengan metode *Blind Deconvolution* [5 dan 26]. Dan telah diketahui bahwa frekuensi gelombang emisi akustik yang ditangkap (frekuensi kerusakan dini) adalah frekuensi yang sama dengan frekuensi kerusakan makro bantalan [5,6, dan 8]. Penelitian kali ini adalah kelanjutan dari penelitian sebelumnya yang digambarkan oleh Gambar 2.12 berikut.



Gambar 2.12. Road Map Penelitian [8]

## BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1. Studi Awal

Studi awal dimaksudkan untuk mengetahui bentuk sinyal yang akan ditangkap, khususnya mengenai karakteristik pengurangan amplitudo. Karakteristik pengurangan amplitudo melalui simulasi perhitungan dibutuhkan karena gelombang menjalar pada beberapa mode (yang dominan adalah gelombang Rayleigh pada permukaan dan gelombang badan berupa *Primary* dan *Secondary/Shear Wave*) yang karakteristik pengurangan amplitudonya berbeda-beda dan juga dikarenakan perbedaan pendekatan dari berbagai referensi yang ditemukan. Dengan studi awal ini diharapkan diketahui karakteristik pengurangan amplitudo yang tepat sebagai satu gelombang AE utuh, sehingga tidak diperlukan penguraian sinyal gelombang menjadi gelombang-gelombang penyusunnya.

Studi awal dilakukan dengan memperhatikan *setup* eksperimen yang akan dilakukan, yang secara sederhana digambarkan pada Gambar 3.1. berikut.



**Gambar 3.1.** Bagan pemodelan eksperimen

Berdasarkan bagan di atas, maka disusunlah persamaan-persamaan matematis yang terlibat dalam studi awal ini.

- *Function Generator*

$$V_{gen} = f(t) \quad (3.1)$$

- Piezo Aktuator [27]

$$\Delta TH_{gen} = d_{33}V_{gen} \quad (3.2)$$

Dengan  $d_{33}$  adalah koefisien gerak mekanik terhadap beda potensial elektrik piezo ( $500 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ )

- Pelat Baja Tahan Karat

$$\Delta TH_{acq} = \frac{\Delta TH_{gen}}{\sqrt{R}} \quad (3.3)$$

untuk Gelombang Rayleigh

$$\Delta TH_{acq} = \frac{\Delta TH_{gen}}{R} \quad (3.4)$$

untuk Gelombang Badan

$$\Delta TH_{acq} = \frac{\Delta TH_{gen}}{R^2} \quad (3.5)$$

untuk Gelombang Badan di Permukaan yang Sama dengan Sumber

Persamaan-persamaan pengurangan amplitudo di atas, menggunakan pendekatan yang digunakan oleh [14], [18] dan [20].

- Piezo Sensor [27]

$$V_{acq} = g_{33} E \Delta TH_{acq} \quad (3.6)$$

Dengan  $g_{33}$  adalah koefisien beda potensial akibat gaya yang bekerja pada satuan tebal piezo ( $0.02 \text{ Vm/N}$ ) dan  $E$  adalah modulus elastisitas piezo ( $100 \text{ GPa}$ ).

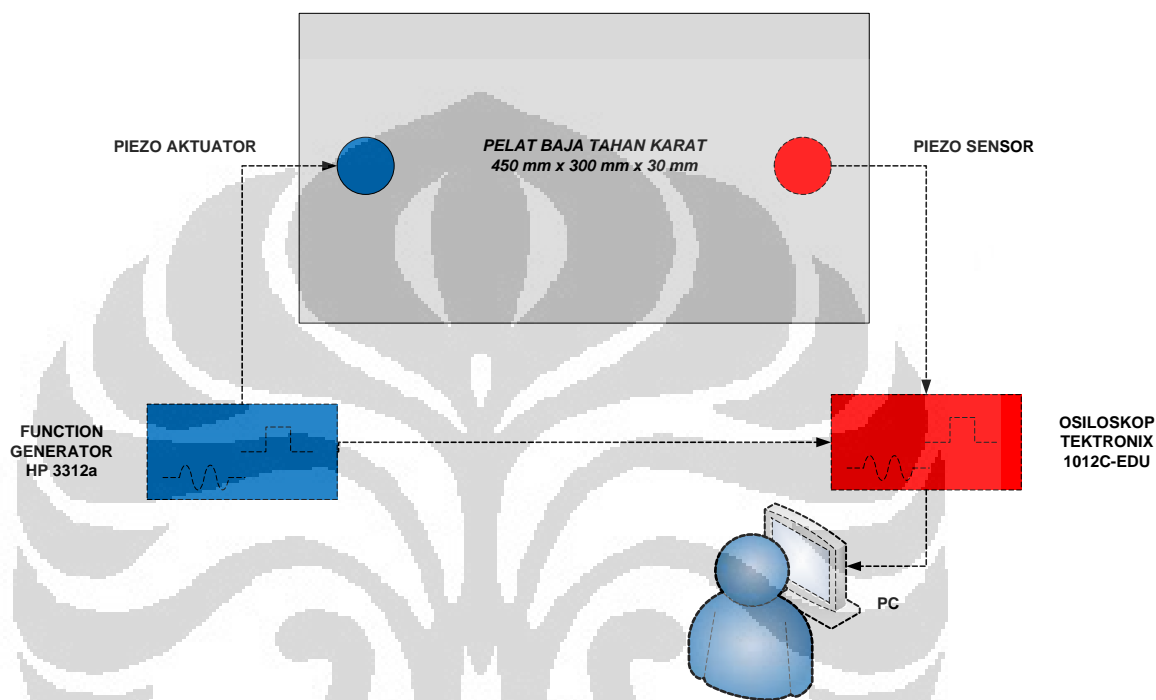
Dengan  $f(t)$  divariasikan terhadap fungsi sinus dan square (amplitudo  $5 \text{ V}$  dan frekuensi  $200 \text{ kHz}$ ). Diterapkan pula *noise* akibat White Gaussian Noise dengan rasio sinyal terhadap *noise* tersebut (SNR) adalah 100. Penggunaan SNR yang besar diasumsikan bahwa sangat kecil *noise* yang dapat mengganggu sinyal yang ada pada saat eksperimen dilakukan.

Waktu delay dihitung dengan persamaan:

$$t_{delay} = \frac{L}{c} \quad (3.7)$$

L adalah jarak dari sensor ke aktuator (terhadap arah transversal adalah 450 mm dan terhadap arah longitudinal adalah 30 mm). Nilai  $c$  sendiri ditentukan melalui persamaan-persamaan kecepatan gelombang sebagaimana dibahas pada Bab 2.

### 3.2. Setup Eksperimen



Gambar 3.2. Setup eksperimen

Eksperimen dilakukan sebagaimana dijelaskan pada Gambar 3.2 dan Gambar 3.3. *Function* Generator membangkitkan sinyal listrik yang kemudian diubah menjadi gerak mekanik oleh piezo aktuator, selain itu, sinyal ini juga dikirim ke osiloskop untuk diakuisisi. Kemudian, pelat baja tahan karat (ukuran 450 mm x 300 mm x 30 mm) menjalankan gerak ini sebelum akhirnya juga ikut menggerakkan piezo sensor. Kemudian piezo sensor mengubah gerak mekanik menjadi sinyal listrik untuk kemudian ditangkap oleh osiloskop. Osiloskop menampilkan dan mengakuisisi kedua sinyal yang diterimanya (satu sinyal dari *function generator* dan lainnya dari piezo sensor). Data sinyal ini kemudian dikirim ke PC dengan



menggunakan koneksi USB, dan kemudian disimpan sebagai data mentah (berupa gambar dan *file* format .csv).



**Gambar 3.3.** Foto Konfigurasi Eksperimen

*Function Generator* yang digunakan adalah HP seri 3312a yang memiliki *range* frekuensi 0.01 Hz sampai dengan 13 MHz, serta dilengkapi 3 pilihan fungsi sinyal, yaitu sinusoidal, *square* dan *triangle*. Osiloskop yang digunakan adalah Tektronix 1012C-EDU, osiloskop 2 input yang memiliki *range sampling rate* dari 1 S/s sampai dengan 1 GS/s. Detail lengkap spesifikasi *function generator* dan osiloskop terdapat pada bagian lampiran.

Seluruh instrumen yang terlibat dalam penelitian ini dilakukan pengecekan terlebih dahulu untuk memastikan semua berfungsi dengan baik, khususnya osiloskop yang menjadi kunci pengambilan data. Kalibrasi *function generator* dan osiloskop dilakukan dengan bantuan multimeter digital.

Adapun variabel-variabel yang digunakan pada eksperimen ini adalah sebagaimana ditunjukkan oleh Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1. Variabel yang digunakan dalam penelitian

Variabel Tetap	Variabel Bebas			Variabel Kontrol
	I	II	III	
Setup Amplitudo Function Generator	<b>Fungsi Sinyal</b>	<b>Frekuensi Sinyal</b>	<b>Sampling Rate</b>	Kondisi Ruangan
	Sinus	1 Hz	100 S/s	
	Square	10 Hz	1 kS/s	
	Triangle	100 Hz	10 kS/s	
		1 kHz	100 kS/s	
		10 kHz	1 MS/s	
		100 kHz	10 MS/s	
		1 MHz	25 MS/s	
			50 MS/s	
			100 MS/s	
			250 MS/s	
			500 MS/s	
		1 GS/s		

### 3.3. Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan menjadi 2 tahap:

a. Pengolahan Data Grafik dan Tabel

Berupa pengolahan data mentah hasil pengambilan data menjadi:

- (1) Tabel hubungan antara fungsi sinyal penjalaran aktuator, frekuensi sinyal penjalaran dan *sampling rate* untuk mengetahui pada frekuensi sinyal penjalaran aktuator dan *sampling rate* pengukuran berapa AE dapat dideteksi.
- (2) Tabel dan grafik hubungan antara waktu *delay* antara sinyal yang ditangkap dengan sinyal penjalaran aktuator pada masing-masing frekuensi sinyal penjalaran yang dapat menyebabkan AE dideteksi dengan tujuan untuk mengetahui karakteristik waktu *delay* terhadap frekuensi dan fungsi sinyal penjalaran aktuator.
- (3) Tabel dan grafik hubungan antara rasio amplitudo sinyal ditangkap dengan sinyal yang dibangkitkan terhadap frekuensi sinyal penjalaran aktuator pada masing-masing fungsi sinyal penjalaran aktuator. Hal ini ditujukan untuk

dapat mengetahui karakteristik pengurangan amplitudo terhadap frekuensi dan fungsi sinyal penjalaran aktuator.

- (4) Grafik laju perubahan tegangan terhadap waktu yang dapat digunakan untuk menjelaskan kaitan frekuensi penjalaran aktuator dengan bentuk sinyal yang ditangkap.

Hasil pengolahan data awal ini dapat digunakan pada saat mengevaluasi kelebihan dan kekurangan setiap metode penentuan lokasi sehingga dapat diketahui metode mana yang paling handal.

b. Penerapan Threshold

Pengolahan data dilakukan dengan menerapkan *threshold* pada sinyal. Sinyal yang digunakan adalah fungsi sinus, square dan *triangle* pada frekuensi 200 kHz dan *sampling rate* pengukuran 100 MS/s. Adapun yang dijadikan basis *threshold* yang dikembangkan adalah dengan menjadikan sinyal yang ditangkap sebelum penjalaran sinyal aktuator. Tiga buah *threshold* dikembangkan, yaitu:

- (1) Penggunaan sinyal yang ditangkap tanpa ada sinyal penjalaran aktuator.
- (2) Penggunaan nilai minimum dan maksimum sinyal yang ditangkap tanpa ada sinyal penjalaran aktuator.
- (3) Penggunaan nilai rms positif dan negatif sinyal yang ditangkap tanpa ada sinyal penjalaran aktuator.

Penggunaan sinyal yang ditangkap tanpa sinyal penjalaran aktuator awal sebagai basis *threshold* dimaksudkan untuk mengeliminir *White Gaussian Noise* yang mungkin terjadi akibat *noise* pada instrument, *noise* dari lingkungan dan *noise* pada struktur material. Penerapan *threshold* ini dilakukan dengan bantuan MATLAB R2007b yang juga dimaksudkan agar setelah sinyal di-*threshold*, dilakukan penghitungan energi dari sinyal tersebut, yaitu dengan menghitung luas kurva dibawah sinyal. Hal ini dilakukan dengan

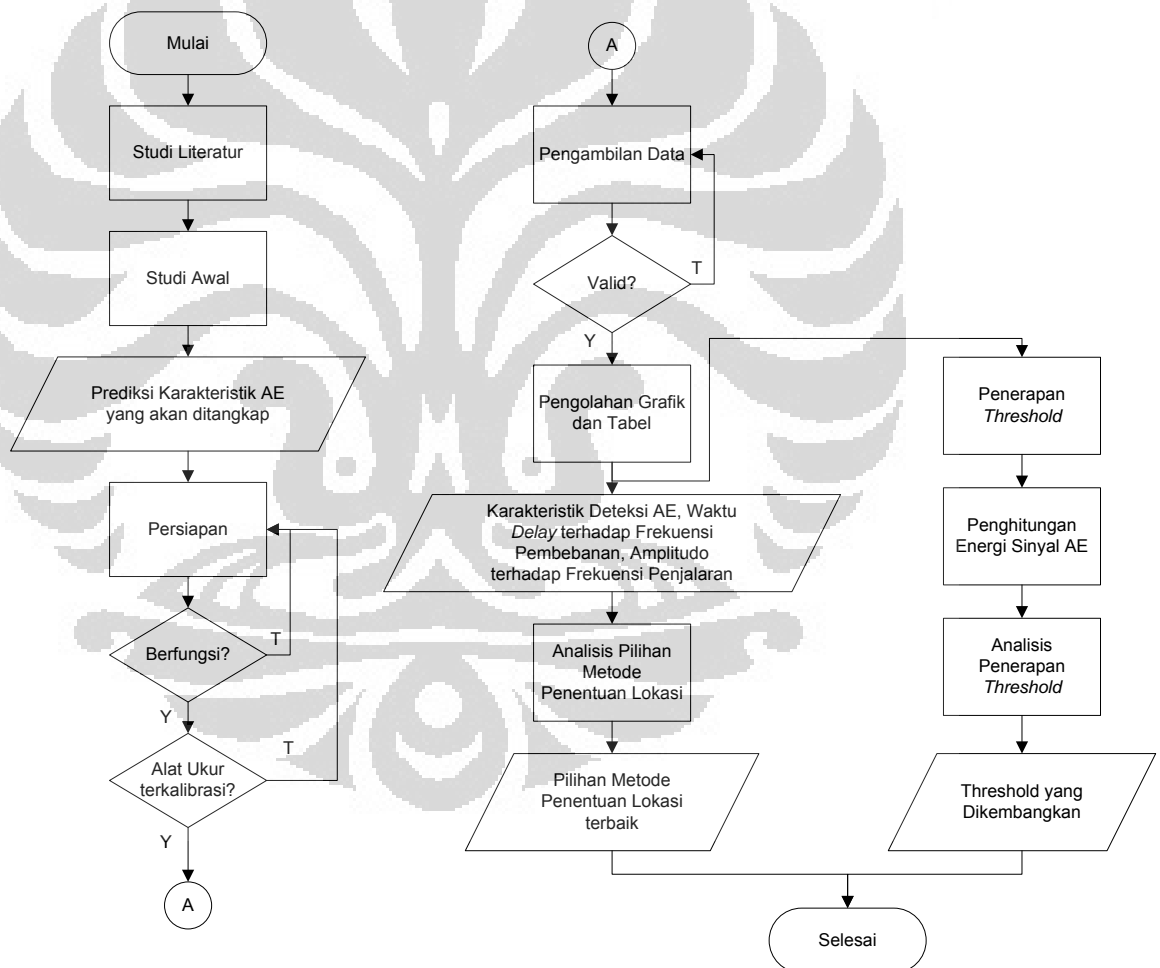
melakukan integrasi numerik metode Simpson 1/3. Adapun metode Simpson 1/3 sendiri dijelaskan pada persamaan 3.8.

$$I = (b - a) \frac{f(x_0) + 4 \sum_{i=1,3,5}^{n-1} f(x_i) + 2 \sum_{j=2,4,6}^{n-2} f(x_j) + f(x_n)}{3n} \quad (3.8)$$

Kemudian dibandingkan energi AE dari ketiga fungsi sinyal penjalaran aktuator pada setiap *threshold* yang digunakan untuk melihat fungsi sinyal penjalaran aktuator mana yang menghasilkan energi AE terbesar.

### 3.4. Diagram Alir Penelitian

Adapun seluruh penelitian ini dijelaskan melalui diagram alir berikut.



Gambar 3.4. Diagram Alir Penelitian

## BAB 4 PEMBAHASAN

### 4.1. Frekuensi Deteksi AE

Dari hasil pengambilan data, diperoleh hubungan antara frekuensi penjalaran dan *sampling rate* dimana AE dapat dideteksi pada setiap fungsi penjalaran. Yang dimaksud fungsi penjalaran sendiri adalah fungsi sinyal yang dibangkitkan dari *function generator*, yang kemudian diubah menjadi pergerakan mekanik oleh piezo aktuator sebagai pemodelan dari berbagai sumber AE yang mungkin muncul.

**Tabel 4.1.** Frekuensi dan *Sampling Rate* dimana AE dapat dideteksi untuk fungsi *square*

	Square	Frekuensi (Hz)						
		1 - 10	10 - 100	100 - 1000	1 - 10 $\times 10^3$	10 - 100 $\times 10^3$	100 - 1000 $\times 10^3$	1 - 10 $\times 10^6$
Sampling Rate (kS/s)	0.1 - 1	x	x	x	x	x	x	x
	1 - 10	x	x	x	x	x	x	x
	10 - 100	x	x	x	x	x	x	x
	100 - 1000	x	x	x	x	x	x	x
	1000 - 10000	x	x	x	x	x	x	x
	10000 - 25000	x	x	x	x	x	x	x
	25000 - 50000	x	x	x	x	x	x	x
	50000 - 100000	o	o	o	o	o	o	o
	100000 - 250000	o	o	o	o	o	o	o
	250000 - 500000	o	o	o	o	o	o	o
	500000 - 1000000	o	o	o	o	o	o	o

Keterangan : o = AE terdeteksi

x = AE tidak terdeteksi

Dari Tabel 4.1 di atas, dapat terlihat bahwa pada penjalaran fungsi *square*, AE sudah dapat dideteksi pada frekuensi penjalaran 1 Hz dan pada *sampling rate* 50 MS/s. Melihat *sampling rate* yang sangat besar untuk dapat mendeteksi AE, dapat diketahui bahwa gelombang AE termodulasi pada frekuensi yang sangat tinggi. Sedangkan untuk penjalaran fungsi sinus dan *triangle* (Tabel 4.2 dan Tabel 4.3), AE baru dapat dideteksi pada frekuensi penjalaran 180 kHz dan pada *sampling rate* 50 MS/s.

Tabel 4.2. Frekuensi dan *Sampling Rate* dimana AE dapat dideteksi untuk fungsi sinus

	Sinus	Frekuensi (Hz)											
		1 - 10	10 - 100	100 - 1000	1 - 10 $\times 10^3$	10 - 100 $\times 10^3$	100 - 140 $\times 10^3$	140 - 180 $\times 10^3$	180 - 200 $\times 10^3$	200 - 220 $\times 10^3$	220 - 240 $\times 10^3$	240 - 1000 $\times 10^3$	1 - 10 $\times 10^6$
Sampling Rate (ks/s)	0.1 - 1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	1 - 10	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	10 - 100	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	100 - 1000	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	1000 - 10000	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	10000 - 25000	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	25000 - 50000	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	50000 - 100000	x	x	x	x	x	x	x	o	o	o	o	o
	100000 - 250000	x	x	x	x	x	x	x	o	o	o	o	o
	250000 - 500000	x	x	x	x	x	x	x	o	o	o	o	o
	500000 - 1000000	x	x	x	x	x	x	x	o	o	o	o	o

Keterangan : o = AE terdeteksi

x = AE tidak terdeteksi

**Tabel 4.3.** Frekuensi dan *Sampling Rate* dimana AE dapat dideteksi untuk fungsi *triangle*

	<i>Triangle</i>	Frekuensi (Hz)											
		1 - 10	10 - 100	100 - 1000	1 - 10 $\times 10^3$	10 - 100 $\times 10^3$	100 - 140 $\times 10^3$	140 - 180 $\times 10^3$	180 - 200 $\times 10^3$	200 - 220 $\times 10^3$	220 - 240 $\times 10^3$	240 - 1000 $\times 10^3$	1 - 10 $\times 10^6$
<b>Sampling Rate (ks/s)</b>	<b>0.1 – 1</b>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	<b>1 – 10</b>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	<b>10 – 100</b>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	<b>100 – 1000</b>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	<b>1000 - 10000</b>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	<b>10000 - 25000</b>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	<b>25000 - 50000</b>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	<b>50000 - 100000</b>	x	x	x	x	x	x	x	o	o	o	o	o
	<b>100000 - 250000</b>	x	x	x	x	x	x	x	o	o	o	o	o
	<b>250000 - 500000</b>	x	x	x	x	x	x	x	o	o	o	o	o
	<b>500000 - 1000000</b>	x	x	x	x	x	x	x	o	o	o	o	o

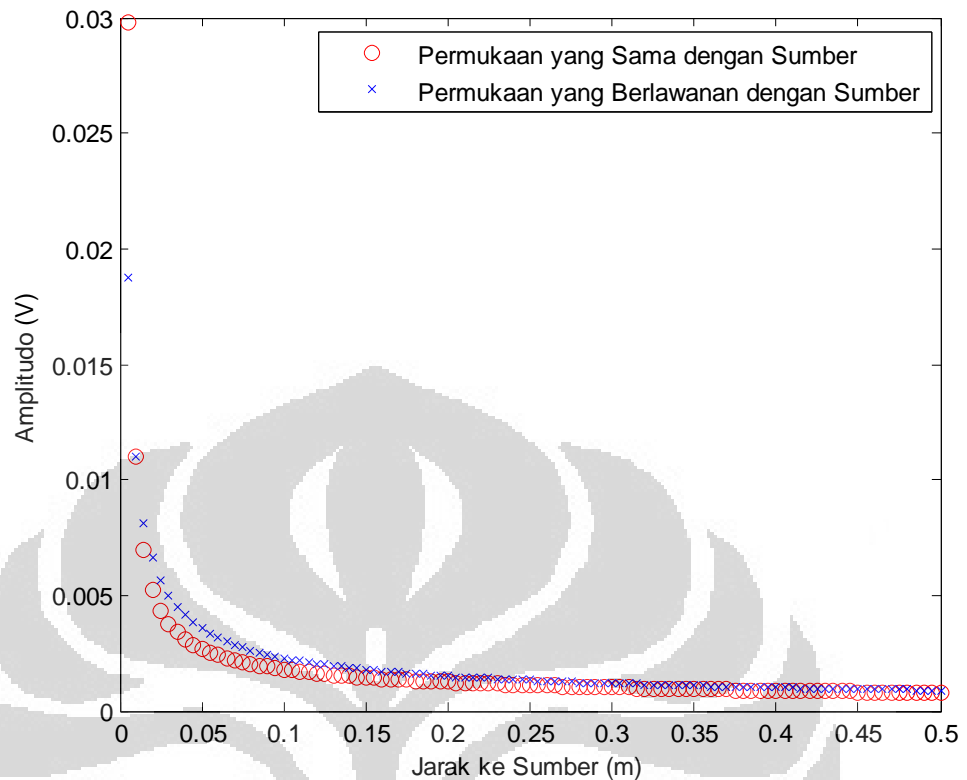
Keterangan :  
 o = AE terdeteksi  
 x = AE tidak terdeteksi

Menarik untuk dibahas mengapa terjadi perbedaan deteksi AE pada fungsi penjalaran *square* dengan fungsi penjalaran sinus dan *triangle*. Pembahasan lebih lanjut mengenai hal ini terdapat pada subbab-subbab selanjutnya.

#### 4.2. Pengurangan Amplitudo

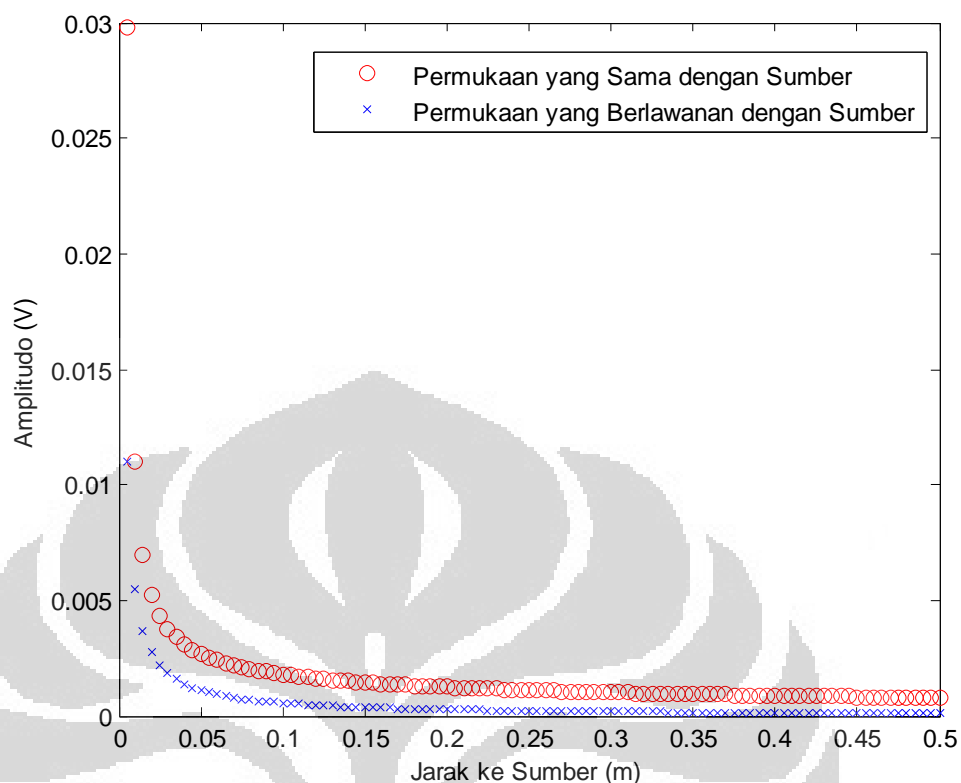
Pengurangan amplitudo berbeda-beda untuk setiap gelombang elastik yang menjalar. Sedangkan sinyal yang ditangkap, sudah merupakan gabungan dari seluruh gelombang elastik yang menjalar. Oleh karena itu, diperlukan suatu fungsi yang dapat menggabungkan berbagai fungsi pengurangan amplitudo pada masing-masing gelombang menjadi suatu fungsi tunggal pengurangan amplitudo gelombang elastik agar mudah dilakukan analisis lebih lanjut pada sinyal yang diterima. Dilakukan suatu studi awal sebagaimana dijelaskan pada Bab 3 untuk menjawab masalah ini dengan dua buah pemodelan terkait kondisi batas pada pelat baja tahan karat yang digunakan, yaitu gelombang Rayleigh menjalar pada bagian permukaan yang berlawanan dengan letak sumber sinyal aktuasi dan gelombang Rayleigh hanya menjalar pada bagian permukaan yang sama dengan letak sumber sinyal aktuasi.





**Gambar 4.1.** Pengurangan Amplitudo terhadap Jarak pada Pemodelan Gelombang Rayleigh Menjalar pada Seluruh Bagian Benda

Untuk pemodelan gelombang Rayleigh menjalar pada seluruh bagian benda, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.1, dapat terlihat bahwa amplitudo pada sisi yang berlawanan dengan permukaan sumber lebih besar, dikarenakan pada sisi tersebut, gelombang Rayleigh berinterferensi dengan gelombang *Primary* dan *Shear* yang memiliki amplitudo yang lebih besar (laju pengurangannya pangkat satu terhadap jarak, pada sisi yang sama dengan permukaan sumber laju pengurangannya pangkat dua terhadap jarak).

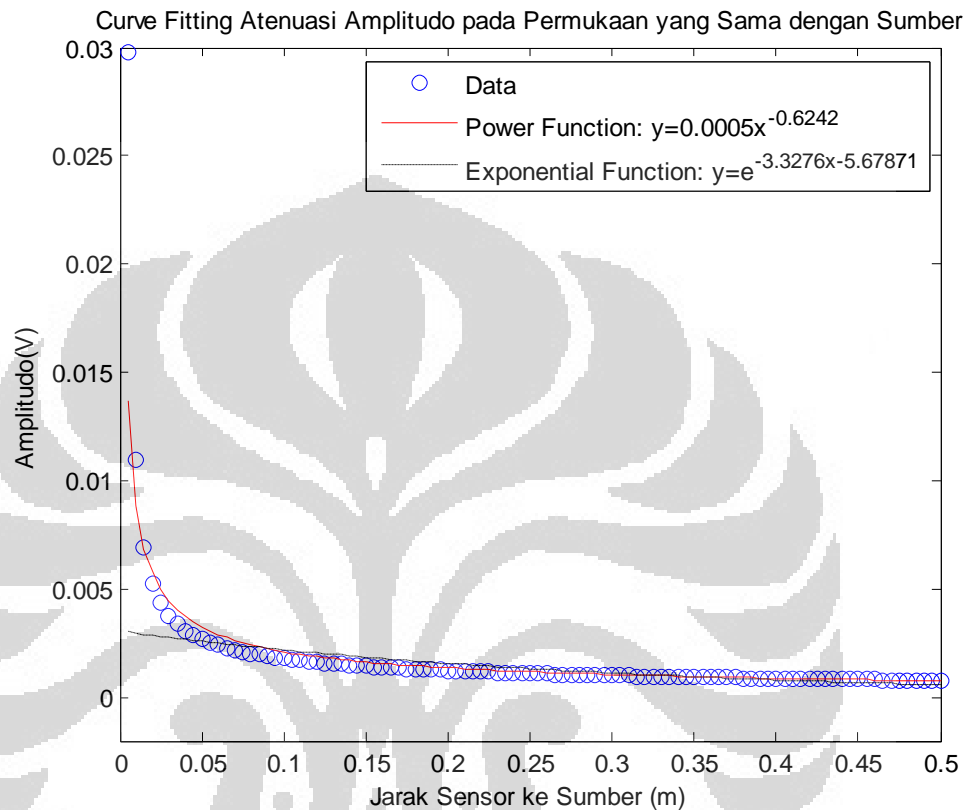


**Gambar 4.2.** Pengurangan Amplitudo terhadap Jarak pada Pemodelan Gelombang Rayleigh hanya Menjalar pada Permukaan yang Sama dengan Sumber

Sedangkan pada pemodelan gelombang Rayleigh hanya menjalar pada permukaan yang sama dengan permukaan sumber (Gambar 4.2), amplitudo pada sisi yang berlawanan dengan permukaan sumber lebih kecil, karena gelombang Rayleigh tidak menjalar pada bagian ini. Dari sinilah dapat disimpulkan bahwa gelombang Rayleigh memiliki kontribusi besar dalam menjalar gelombang AE. Hal lain yang juga dapat ditarik dari pemodelan ini adalah bahwa reka ulang penjalaran gelombang tidak mudah karena perlu diketahui letak sensor terhadap sumber, sehingga juga akan menyulitkan pada saat penentuan lokasi dan ukuran sumber pada 3D.

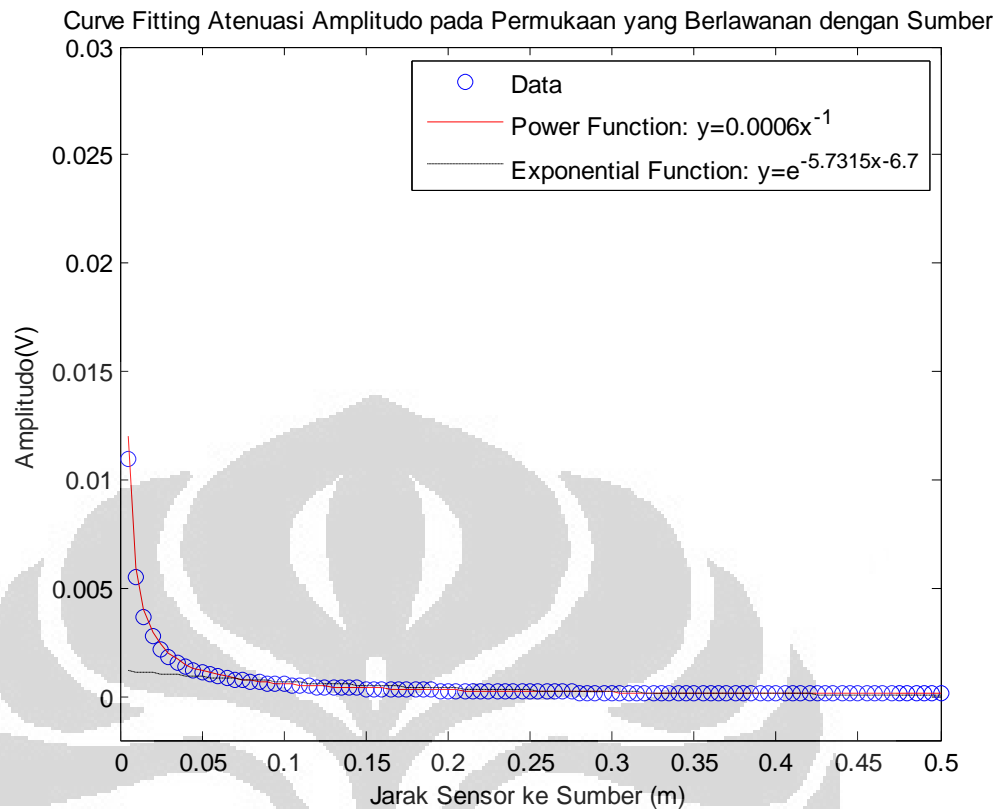
Dari kedua pemodelan ini dipilih pemodelan kedua (gelombang Rayleigh hanya menjalar pada permukaan yang sama dengan sumber) untuk pembahasan selanjutnya mengingat dari referensi [14 dan 18] menunjukkan demikian. Kemudian, dilakukan analisis *curve fitting* untuk dapat

diketahui suatu fungsi karakteristik tunggal yang menghubungkan antara pengurangan amplitudo terhadap jarak sensor ke sumber. Melihat Gambar 4.2., dapat diprediksi bahwa kurva yang mampu *fit* terhadap data ini adalah fungsi *Power Function* dan *Exponential Function*.



**Gambar 4.3.** *Curve Fitting* Pengurangan Amplitudo pada Permukaan yang Sama dengan Sumber Penjalaran dengan menggunakan Fungsi *Power Function* dan *Exponential Function*

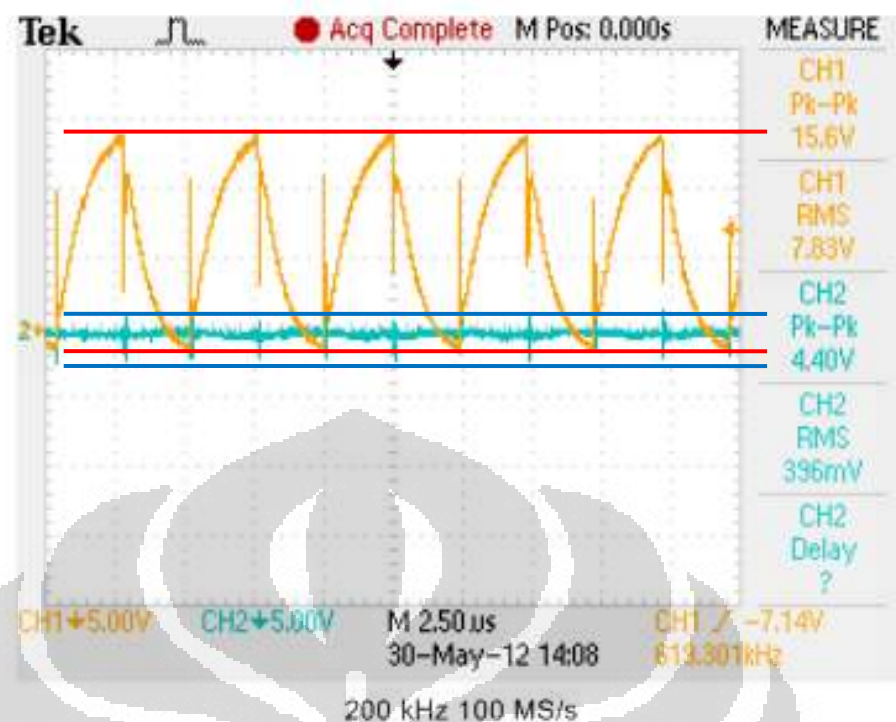
Pada Gambar 4.3., dapat terlihat bahwa kedua fungsi cukup fit dengan data yang ada. Nilai *standard estimate error* ( $s_{y/x}$ ), untuk *power function* adalah 0.0017, sedangkan untuk *exponential function* adalah 0.0029. Dari nilai ini, dapat dimengerti mengapa beberapa peneliti menggunakan fungsi eksponensial dalam menjelaskan pengurangan amplitudo dan beberapa menggunakan *power function*.



**Gambar 4.4.** *Curve Fitting* Pengurangan Amplitudo pada Permukaan yang Berlawanan dengan Sumber Penjalaran dengan menggunakan Fungsi *Power Function* dan *Exponential Function*

Pada Gambar 4.4, hubungan pengurangan amplitudo pada setiap jarak sensor ke sumber pada lokasi sensor yang berbeda permukaan dengan lokasi sumber lebih tepat dihubungkan dengan *power function*. Nilai  $s_{y/x}$  untuk *power function* adalah 0.00013, sedangkan untuk *exponential function* adalah 0.0011. Sehingga jauh lebih baik dengan pendekatan *power function* dalam menjelaskan karakteristik pengurangan amplitudo pada pelat baja tahan karat ini.

Eksperimen dilakukan hanya pada satu lokasi sensor, yaitu pada jarak 0.45 m dari sumber. Pengukuran rasio amplitudo ditangkap terhadap amplitudo dibangkitkan dilakukan sebagaimana terlihat pada Gambar 4.5.



**Gambar 4.5.** Contoh Pengukuran Rasio Amplitudo. Garis Merah mengukur *peak-to-peak* sinyal yang dibangkitkan, Garis Biru mengukur *peak-to-peak* sinyal yang ditangkap

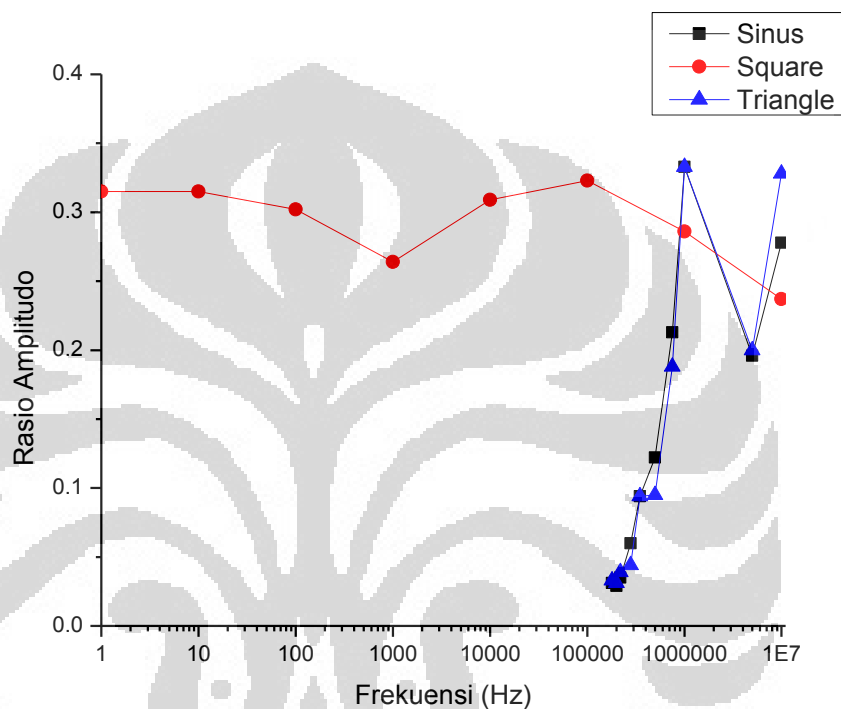
Tabel 4.4. menjelaskan rasio amplitudo pada setiap fungsi dan frekuensi penjaralan, serta nilai rasio amplitudo hasil simulasi. Dapat terlihat bahwa hasil eksperimen tidak ada yang mendekati hasil simulasi. Hal ini diprediksi akibat dari adanya *noise* berupa *White Gaussian Noise* yang membuat amplitudo dari sinyal yang ditangkap meningkat. *White Gaussian Noise* adalah *noise* yang selalu ada pada setiap pengukuran AE. *Noise* ini tidak dapat dihindari karena sumbernya berupa medan elektromagnetik yang berasal dari alat ukur, efek dari lingkungan, serta berasal dari pergerakan molekuler material (contohnya akibat *impurities*, gerakan sepanjang batas bulir dan interaksi antar bulir material). Hal lain yang juga memungkinkan kondisi ini terjadi adalah diameter luasan intensitas sumber efektif bukan lebih besar daripada yang disimulasikan (0.1 m), sehingga pengurangannya pada sensor tidak besar.

**Tabel 4.4.** Rasio Amplitudo pada Setiap Fungsi dan Frekuensi Penjalaran

<b>Fungsi</b>	<b>Frekuensi (Hz)</b>	<b>Rasio Amplitudo</b>	<b>Rasio Amplitudo Hasil Simulasi</b>
<b>Sinus</b>	180,000	0.031	0.000024
	200,000	0.029	0.000024
	220,000	0.035	0.000024
	280,000	0.06	0.000024
	350,000	0.094	0.000024
	500,000	0.122	0.000024
	750,000	0.213	0.000024
	1,000,000	0.333	0.000024
	5,000,000	0.196	0.000024
	10,000,000	0.278	0.000024
<b>Square</b>	1	0.315	0.000024
	10	0.315	0.000024
	100	0.302	0.000024
	1,000	0.264	0.000024
	10,000	0.309	0.000024
	100,000	0.323	0.000024
	1,000,000	0.286	0.000024
	10,000,000	0.237	0.000024
<b>Triangle</b>	180,000	0.033	0.000024
	200,000	0.031	0.000024
	220,000	0.039	0.000024
	280,000	0.044	0.000024
	350,000	0.094	0.000024
	500,000	0.095	0.000024
	750,000	0.188	0.000024
	1,000,000	0.333	0.000024
	5,000,000	0.200	0.000024

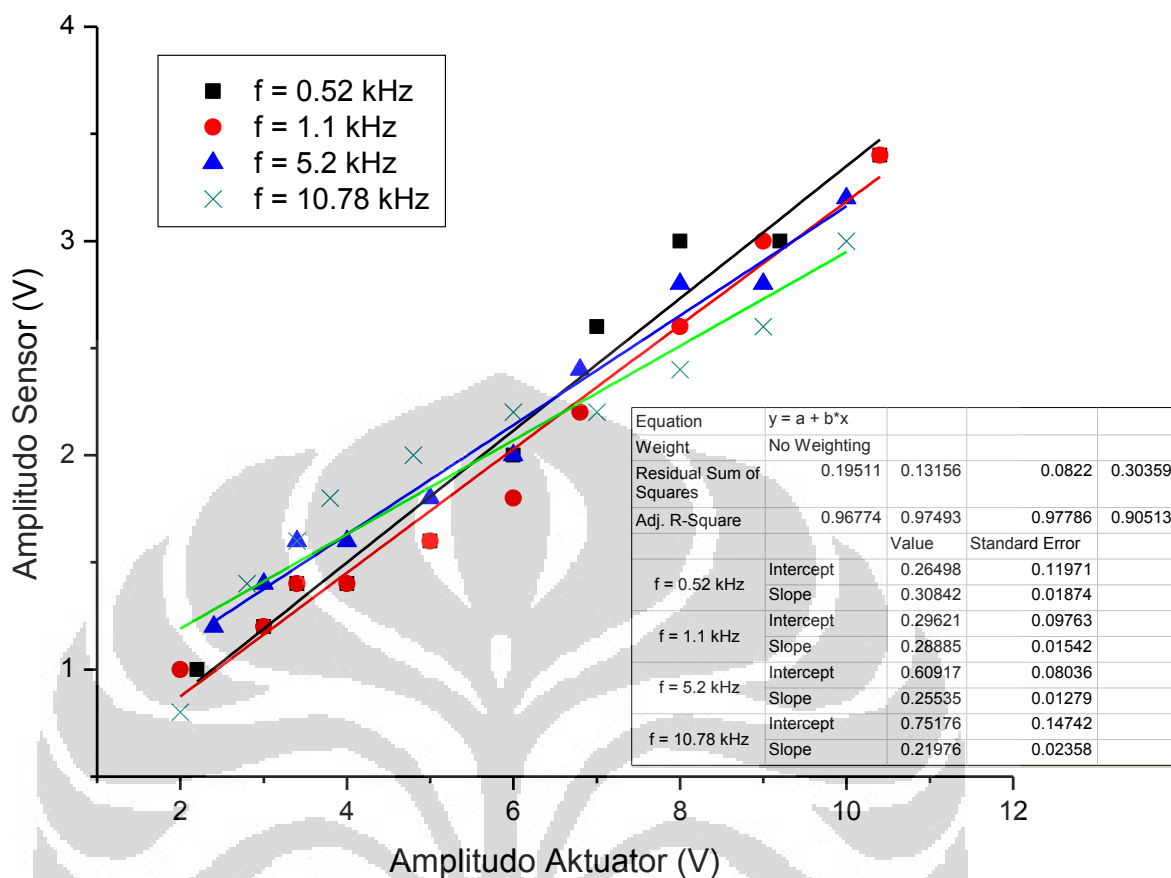
	10,000,000	0.328	0.000024
--	------------	-------	----------

Gambar 4.6. menjelaskan bagaimana hubungan antara frekuensi penjalaran terhadap rasio amplitudo sinyal yang ditangkap dengan yang dibangkitkan pada masing-masing fungsi penjalaran. Fluktuasi nilai ini diperkirakan terjadi akibat dari resonansi pelat pada rentang frekuensi tertentu.



**Gambar 4.6.** Rasio amplitudo pada setiap frekuensi penjalaran pada masing-masing fungsi penjalaran

Karakteristik amplitudo ini perlu diperhatikan karena penjalaran gelombang tidak hanya fungsi jarak sensor ke sumber, namun juga sebagai fungsi frekuensi, sehingga proses reka ulang penjalaran gelombang yang menjadi dasar penentuan ukuran sumber AE perlu memperhatikan frekuensi dari gelombang yang ditangkap serta frekuensi pribadi dari komponen atau konstruksi yang menjadi objek pengukuran.



**Gambar 4.7.** Karakteristik Amplitudo yang Ditangkap Sensor terhadap Amplitudo Sinyal Aktuator.

Dari Gambar 4.7., dapat terlihat bahwa pada suatu frekuensi tertentu, besar amplitudo yang ditangkap sensor proporsional terhadap besar amplitudo sinyal aktuator, sehingga pengurangan amplitudo adalah konstan terhadap besar amplitudo sinyal aktuator. Karakteristik ini memudahkan dalam aspek praktis yaitu pada saat mengestimasi besar energi sumber AE yang dapat dijadikan salah satu metode dalam menentukan ukuran sumber AE [3].

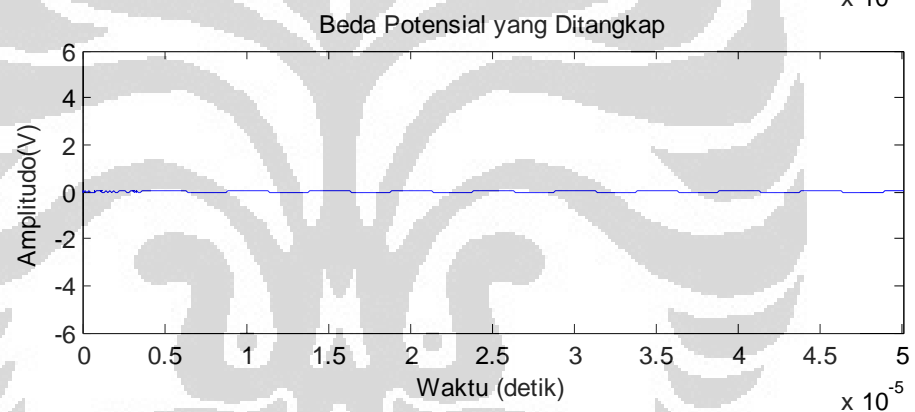
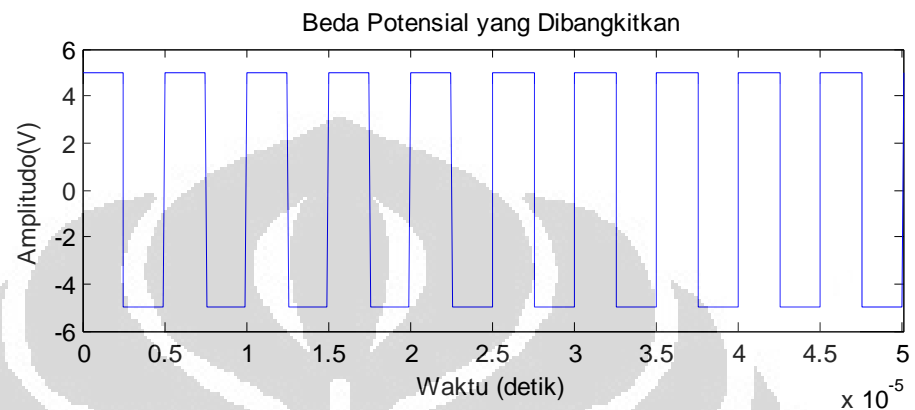
#### 4.3. Bentuk Sinyal AE

Studi awal dilakukan untuk memprediksi bentuk sinyal yang ditangkap. Sebagaimana dijelaskan pada Bab 3, studi awal ini menggunakan pendekatan penjalaran gelombang kontinyu. Hasil ini kemudian dibandingkan dengan hasil eksperimen yang dilakukan.

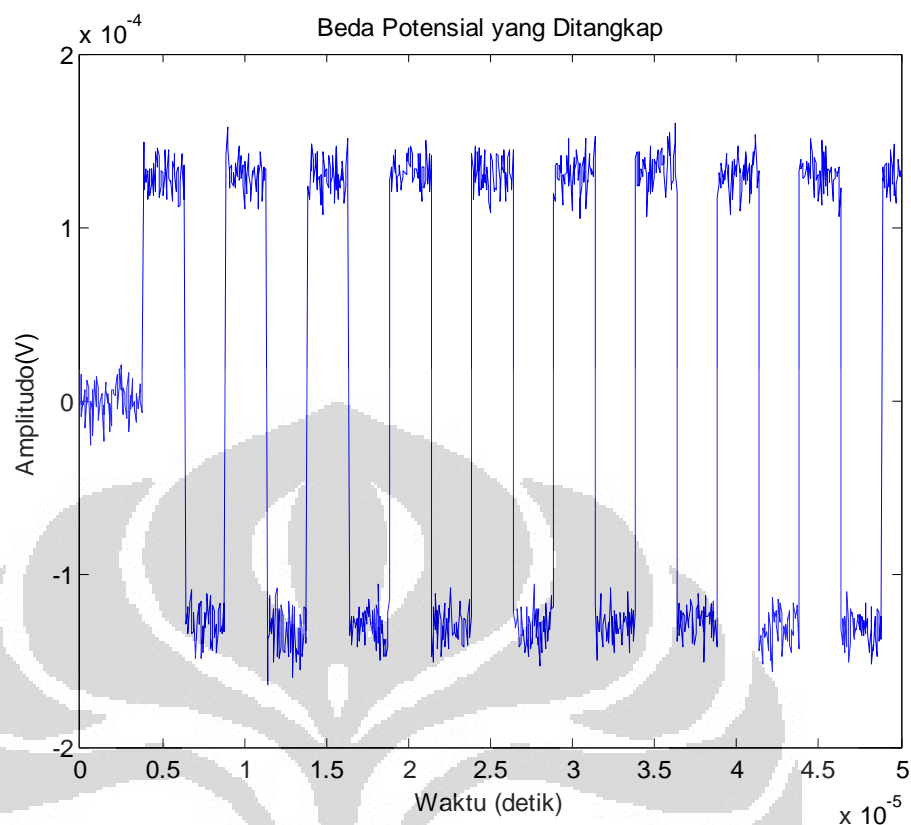


- Fungsi *Square*

Sebagaimana terlihat pada Gambar 4.8., sinyal yang ditangkap sangatlah kecil daripada sinyal yang dibangkitkan. Sedangkan, bentuk sinyal yang ditangkap proporsional dengan sinyal yang dibangkitkan.



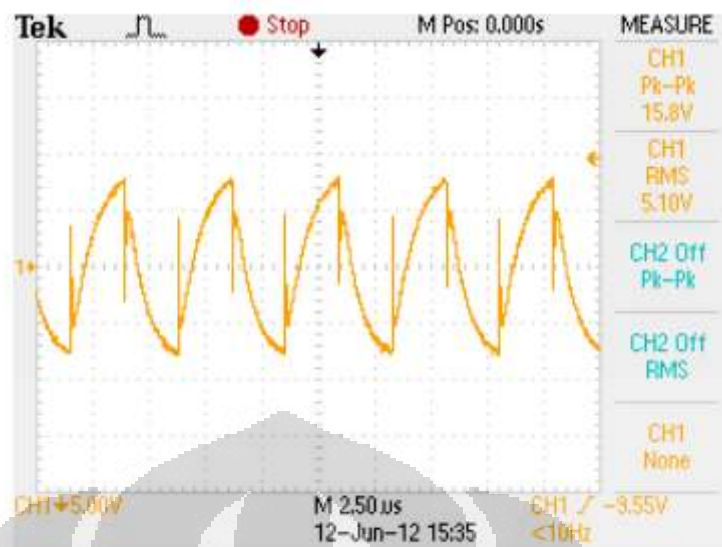
(a)



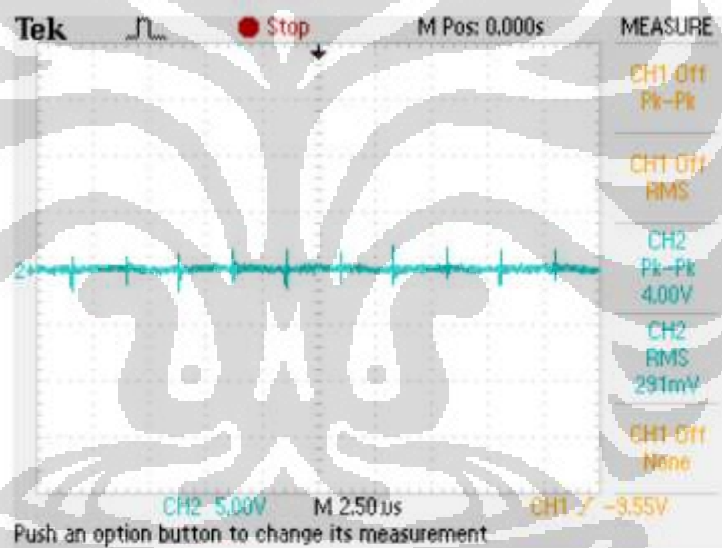
(b)

**Gambar 4.8.** Hasil Studi Awal Prediksi Sinyal pada Penjalaran Fungsi Square. (a) Perbandingan antara sinyal yang dibangkitkan dengan yang ditangkap (b) Perbesaran dari sinyal yang ditangkap

Pada hasil eksperimen, Gambar 4.9., sinyal yang ditangkap relatif memiliki amplitudo yang lebih besar daripada hasil simulasi. Selain itu, sinyal yang ditangkap tidak proporsional dengan sinyal yang dibangkitkan. Sinyal yang ditangkap berupa *burst* dan tidak kontinyu.



(a)



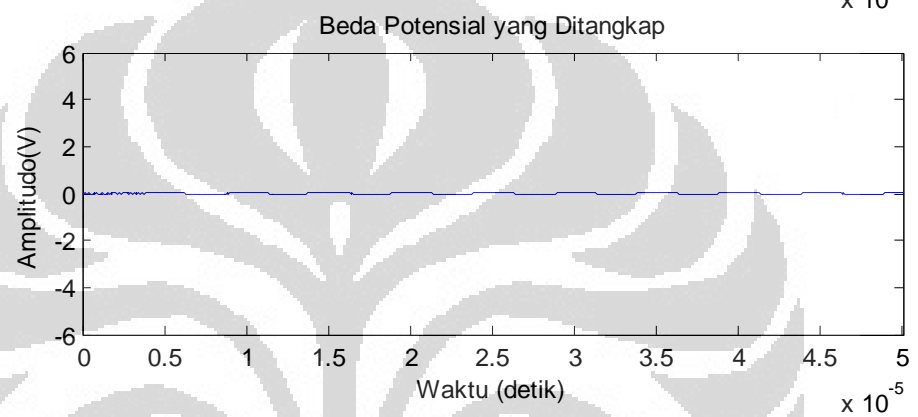
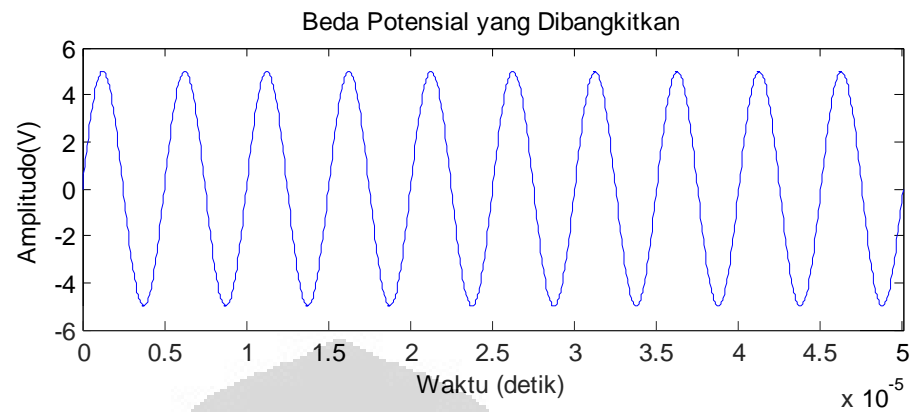
(b)

**Gambar 4.9.** Hasil Eksperimen pada Fungsi Penjalaran *Square*.

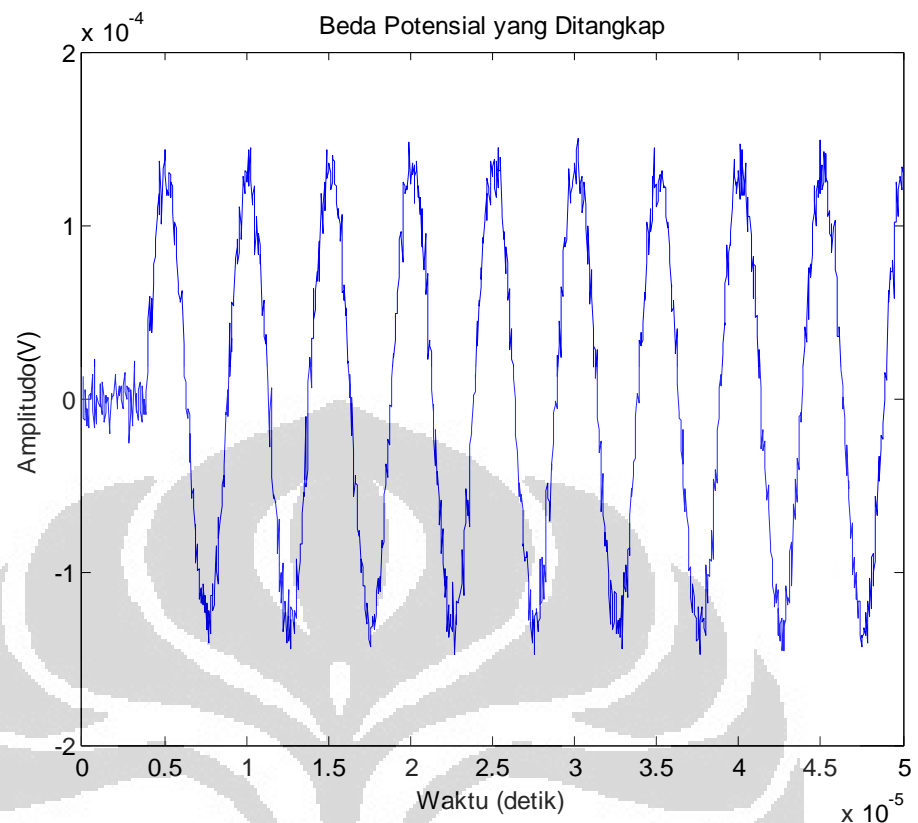
(a) Sinyal yang dibangkitkan (b) Sinyal yang ditangkap

- Fungsi Sinus

Penjalaran fungsi sinus memberikan hasil pada Gambar 4.10. Dapat terlihat bahwa sinyal yang ditangkap sangatlah kecil daripada sinyal yang dibangkitkan. Proporsionalitas antara bentuk sinyal yang ditangkap dengan bentuk sinyal yang dibangkitkan terlihat pada penjalaran ini. Hal ini sejalan dengan hasil simulasi sebelumnya pada penjalaran *square*.



(a)



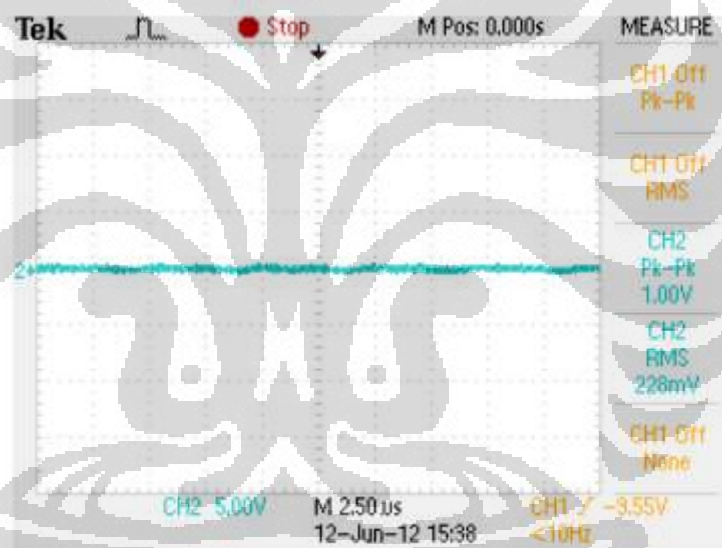
(b)

**Gambar 4.10.** Hasil Studi Awal Prediksi Sinyal pada Penjalaran Fungsi Sinus. (a) Perbandingan antara sinyal yang dibangkitkan dengan yang ditangkap (b) Perbesaran dari sinyal yang ditangkap

Hasil eksperimen penjalaran fungsi sinus, Gambar 4.11., sinyal yang ditangkap relatif memiliki amplitudo yang hampir sama dengan hasil simulasi. Sinyal yang ditangkap juga menunjukkan proporsionalitas bentuk dengan sinyal yang dibangkitkan. Hasil ini justru berbeda dengan hasil yang didapat dari penjalaran fungsi *square*.



(a)



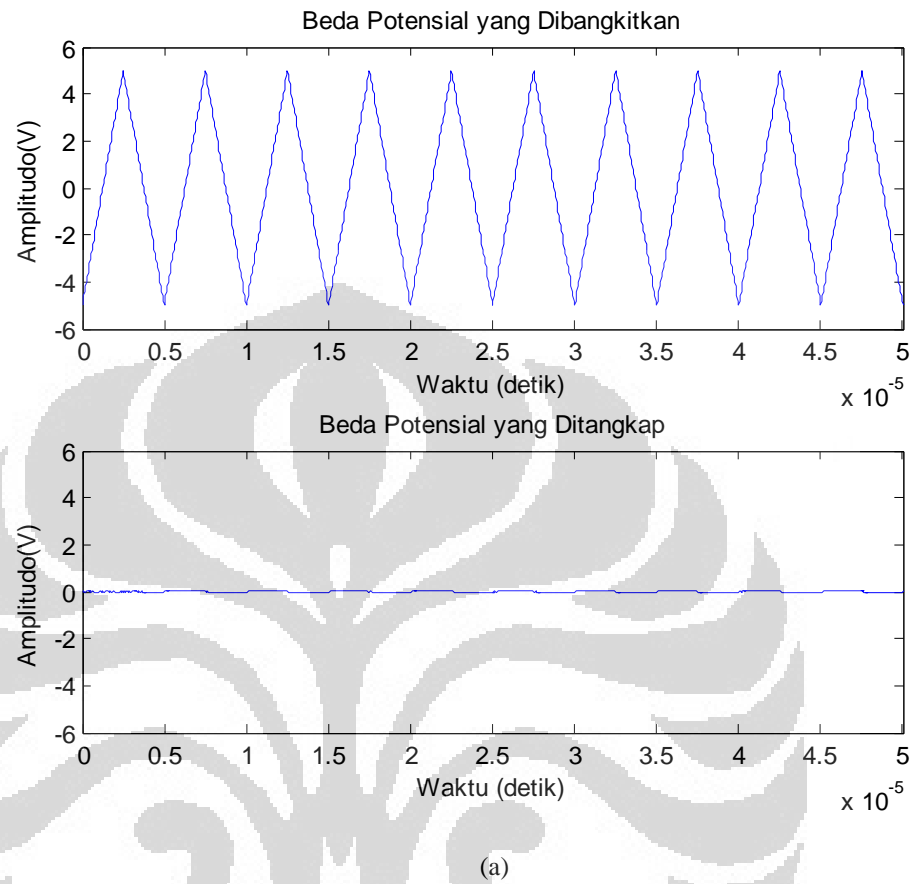
(b)

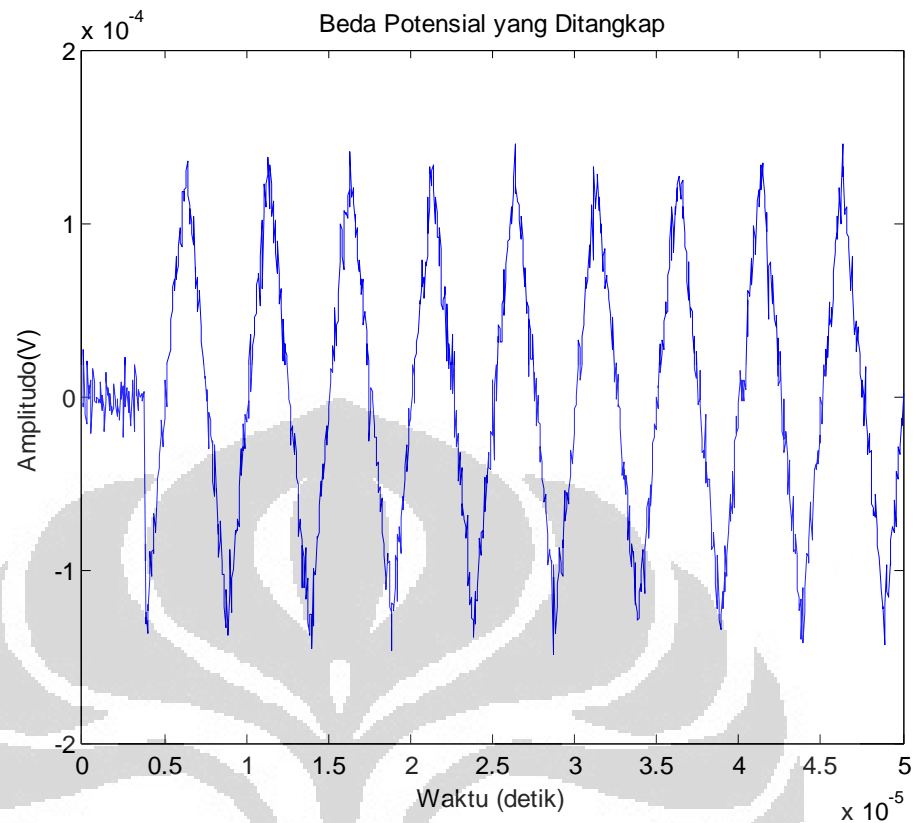
**Gambar 4.11.** Hasil Eksperimen pada Fungsi Penjalaran Sinus.  
 (a) Sinyal yang dibangkitkan (b) Sinyal yang ditangkap

- Fungsi *Triangle*

Hasil studi awal pada fungsi penjalaran *triangle* menunjukkan hasil yang mirip dengan hasil studi awal penjalaran fungsi *square* dan sinus. Sebagaimana terlihat pada Gambar 4.12. sinyal yang ditangkap sangatlah kecil daripada sinyal yang dibangkitkan. Terdapat pula proporsionalitas

antara bentuk sinyal yang ditangkap dengan bentuk sinyal yang dibangkitkan.



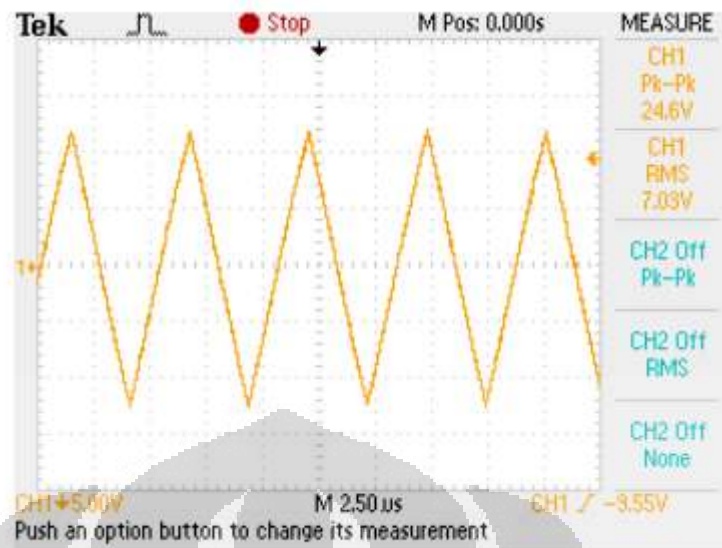


(b)

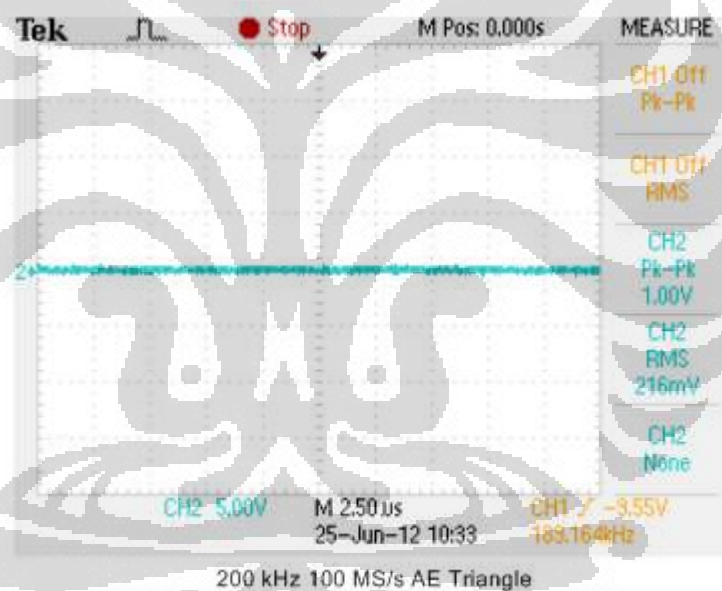
**Gambar 4.12.** Hasil Studi Awal Prediksi Sinyal pada Penjalaran Fungsi Sinus. (a) Perbandingan antara sinyal yang dibangkitkan dengan yang ditangkap (b) Perbesaran dari sinyal yang ditangkap

Dari hasil eksperimen penjalaran fungsi *triangle*, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.13., sinyal yang ditangkap relatif memiliki amplitudo yang hampir sama dengan hasil simulasi. Sinyal yang ditangkap juga menunjukkan proporsionalitas bentuk dengan sinyal yang dibangkitkan.





(a)

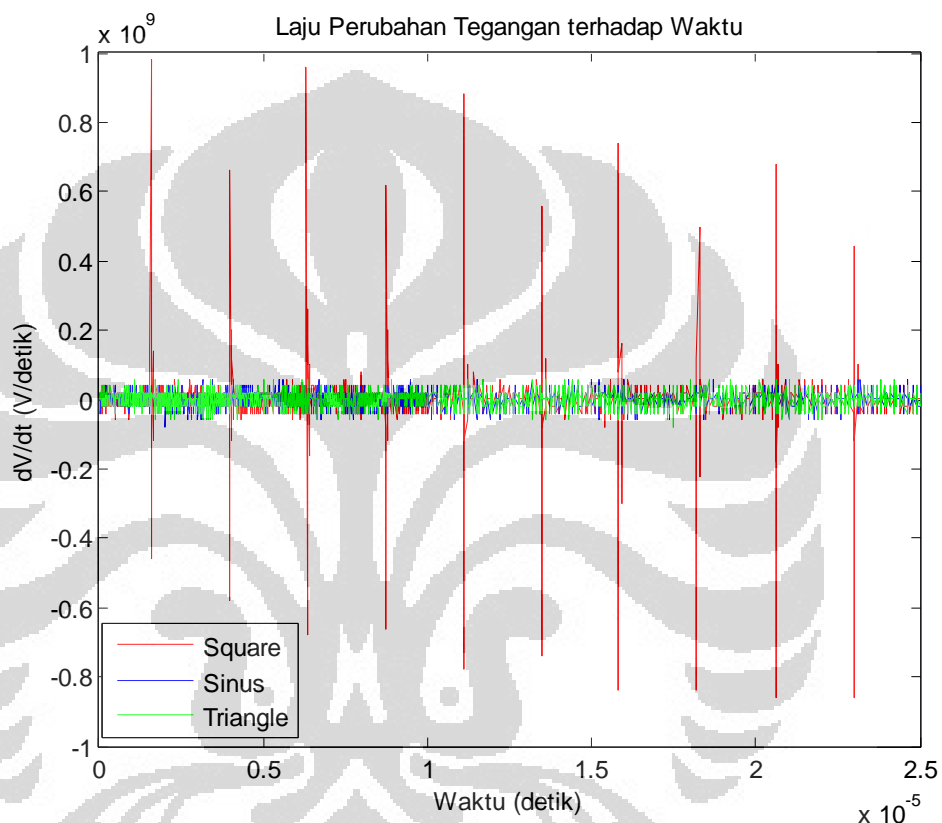


(b)

**Gambar 4.13.** Hasil Eksperimen pada Fungsi Penjalaran *Triangle*.  
 (a) Sinyal yang dibangkitkan (b) Sinyal yang ditangkap

Perbedaan bentuk sinyal yang ditangkap antara penjalaran fungsi *square* dengan fungsi-fungsi lainnya erat kaitannya dengan pengurangan amplitudo yang terjadi. Pada fungsi *square* terdapat bagian yang ditangkap berupa *burst* dan ada bagian yang mengikuti pola pengurangan layaknya pada fungsi sinus serta *triangle*.

Gambar 4.14. menunjukkan grafik gradient tegangan terhadap waktu. Jika dilihat seksama, grafik ini memiliki pola yang mirip dengan masing-masing sinyal yang ditangkap pada masing-masing fungsi penjalaran. Hal ini mengindikasikan bahwa bentuk sinyal yang ditangkap (termasuk pola pengurangan amplitudo di dalamnya) sangat tergantung pada laju perubahan tegangan terhadap waktu.



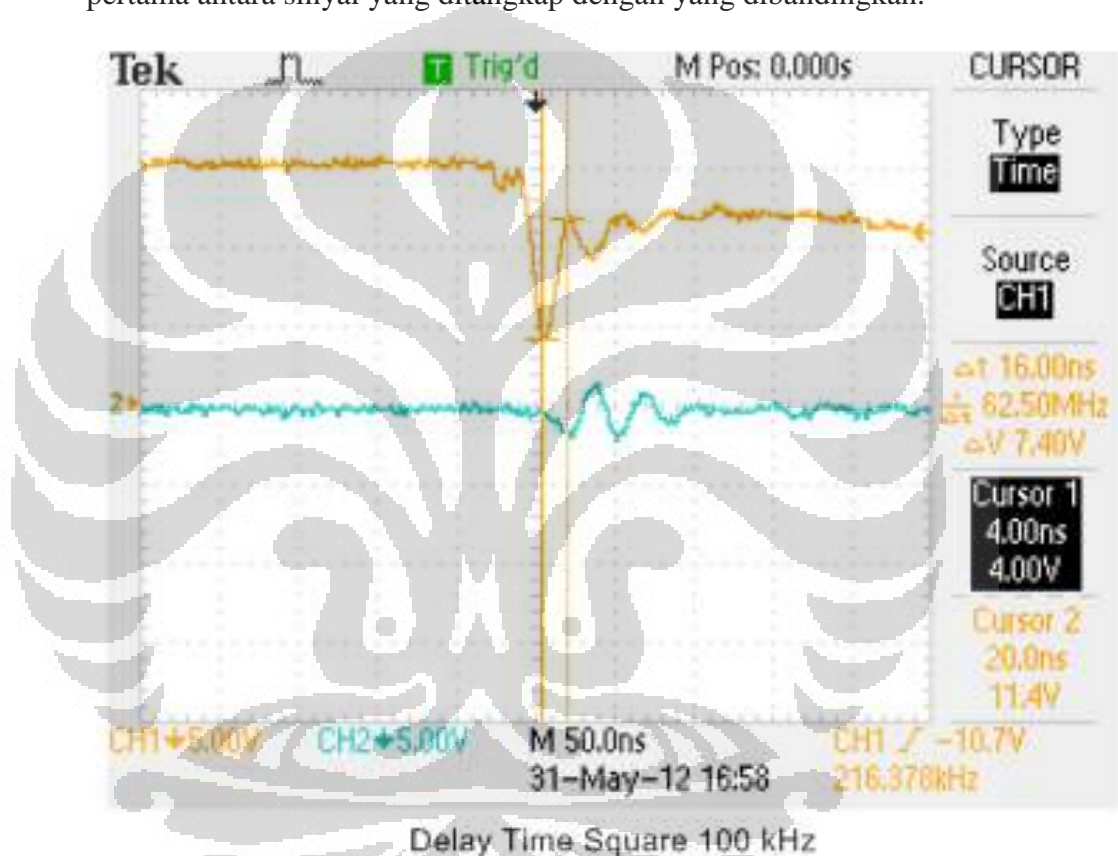
**Gambar 4.14.** Laju Perubahan Tegangan terhadap Waktu pada Setiap Fungsi Penjalaran

Pada laju perubahan tegangan yang kecil, pengurangan amplitudo AE cenderung mendekati pola pengurangan dari gelombang pada medium kontinyu (pendekatan konvensional). Sedangkan, pada laju perubahan tegangan yang besar, pengurangan amplitudo AE tidak mengikuti pola pengurangan konvensional dan memiliki pola tersendiri. Inilah yang menyebabkan pada penjalaran fungsi *square*, bentuk sinyal yang ditangkap tidak proporsional dengan bentuk sinyal yang dibangkitkan. Dari definisi gelombang tegangan menurut [14], memang penjalaran gelombang ini sangat erat kaitannya dengan laju perubahan penjalaran, sehingga dapat

dimengerti mengapa gelombang ini memiliki karakteristik yang berbeda pada laju perubahan tegangan yang berbeda.

#### 4.4. Waktu Penjalaran Gelombang AE

Analisis ini diperlukan untuk mengetahui karakteristik waktu penjalaran terhadap frekuensi penjalaran pada setiap fungsi penjalaran. Waktu penjalaran sendiri didefinisikan sebagai selisih perbandingan waktu *peak* pertama antara sinyal yang ditangkap dengan yang dibandingkan.

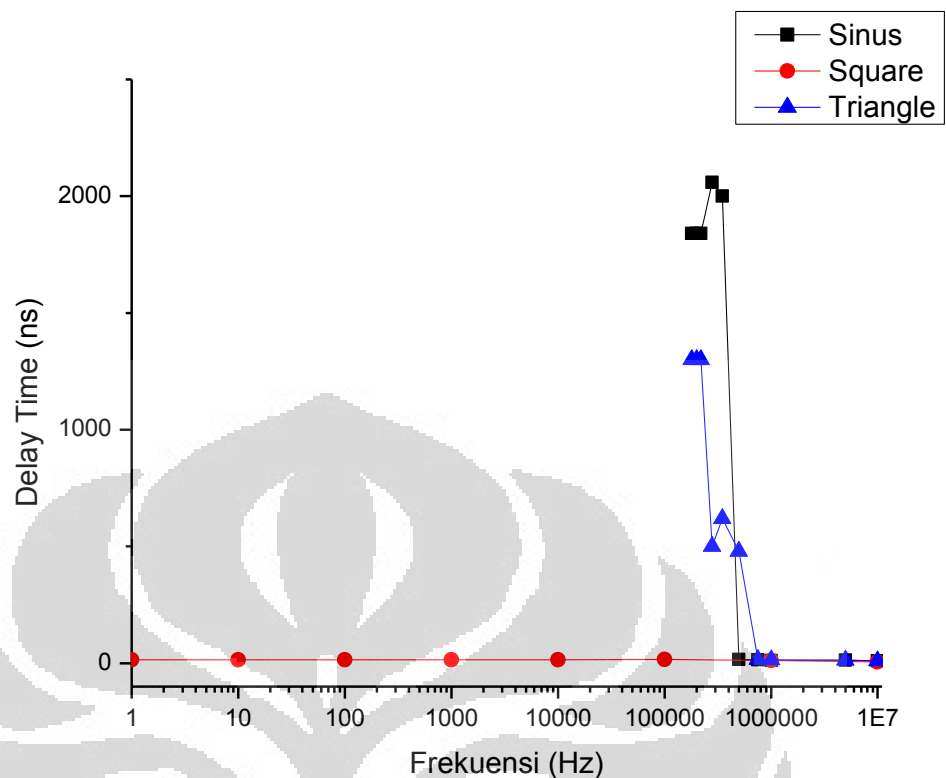


Gambar 4.15. Contoh Pengukuran Waktu Delay

Tabel 4.5. Waktu Delay pada Setiap Fungsi dan Frekuensi Penjalaran

Fungsi	Frekuensi (Hz)	Waktu Penjalaran (ns)
Sinus	180,000	1840
	200,000	1840
	220,000	1840
	280,000	2060

	350,000	2000
	500,000	16
	750,000	15
	1,000,000	12
	5,000,000	13
	10,000,000	10
<b>Square</b>	1	14
	10	14
	100	14
	1,000	14
	10,000	14
	100,000	16
	1,000,000	12
	10,000,000	6
<b>Triangle</b>	180,000	1300
	200,000	1300
	220,000	1300
	280,000	500
	350,000	620
	500,000	480
	750,000	16
	1,000,000	14
	5,000,000	13
	10,000,000	10



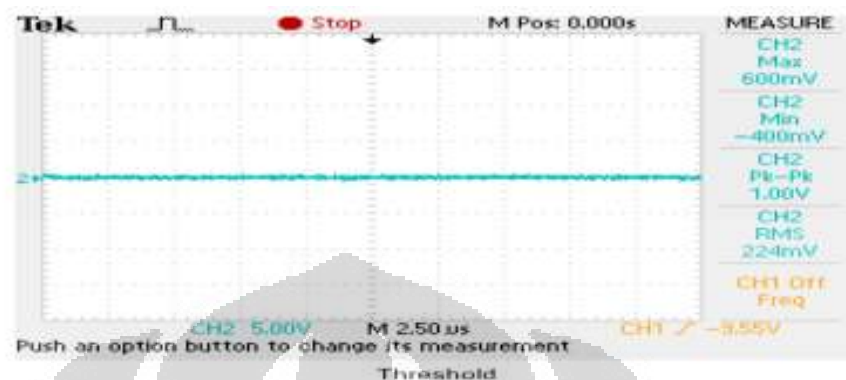
**Gambar 4.16.** Hubungan Waktu Penjalaran terhadap Frekuensi . Ditunjukkan bahwa karakteristik waktu penjalaran tidak konstan pada setiap frekuensi penjalaran

Sebagaimana dapat terlihat pada Gambar 4.16, waktu penjalaran memiliki karakteristik yang tidak konstan, walaupun pada rentang frekuensi tertentu nilainya konstan. Hal ini tentu menarik, dikarenakan berbagai pendekatan penjalaran gelombang selalu menjadikan waktu penjalaran gelombang dari suatu lokasi ke lokasi tertentu adalah konstan. Penyebab turunnya waktu penjalaran pada frekuensi tinggi dimungkinkan akibat terjadinya kenaikan kecepatan transmisi dari molekul-molekul material karena energi dari penjalaran yang diterima, langsung diteruskan tanpa diserap terlebih dahulu. Namun, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk memverifikasi hal ini.

#### 4.5. Penerapan *Threshold*

Penerapan *threshold* dilakukan dengan menggunakan 3 kriteria *threshold* sebagaimana dijelaskan pada Bab 3. Penggunaan 3 kriteria *threshold* ini

dimaksudkan agar dapat menjadi suatu standar penggunaan *threshold* untuk digunakan pada setiap analisis AE.



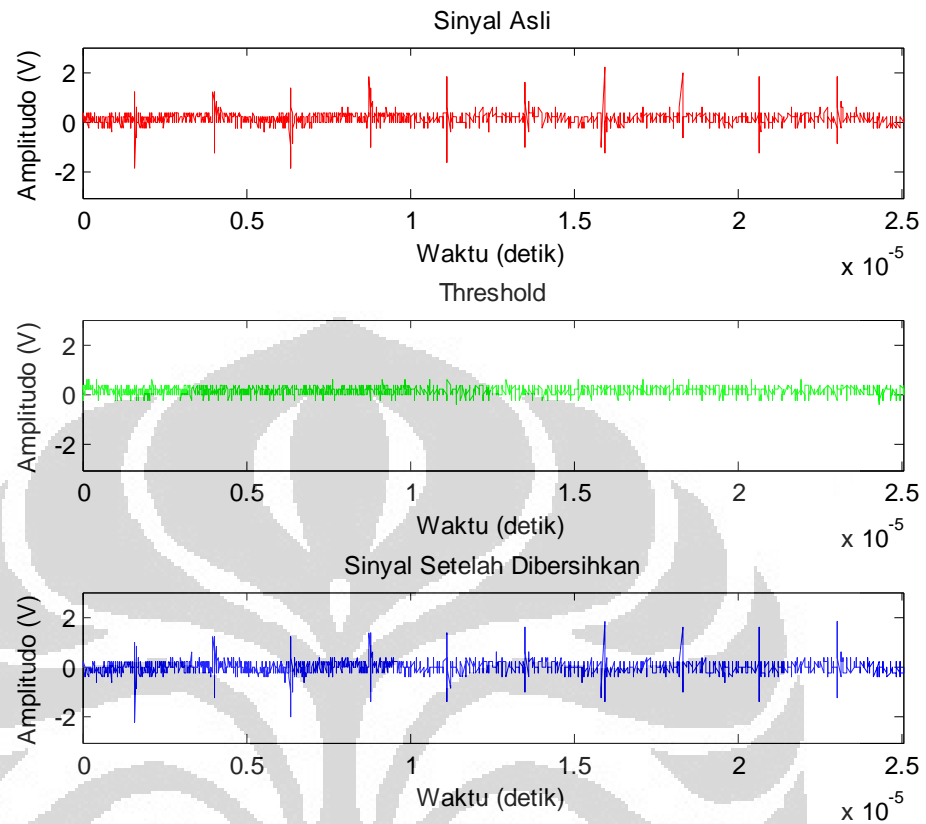
**Gambar 4.17.** Basis *Threshold* yang digunakan. Diukur pada saat tidak ada beban awal yang diberikan.

Sebagaimana terlihat pada Gambar 4.17. sudah terjadi pembacaan pada sensor sebelum diberikan penjalaran. Sinyal inilah yang dianggap merepresentasikan sinyal *White Gaussian Noise* (WGN) yang perlu dibersihkan dari sinyal yang ditangkap sensor.

### ***Threshold (1)***

*Threshold* ini menggunakan sinyal yang ditangkap tanpa penjalaran langsung untuk diterapkan pada filtrasi sinyal AE. Operasi *threshold* ini adalah operasi pengurangan sinyal antara sinyal asli yang ditangkap sensor dengan sinyal *threshold* sehingga didapatkan sinyal akhir yang merupakan sinyal bersih tanpa *noise*.

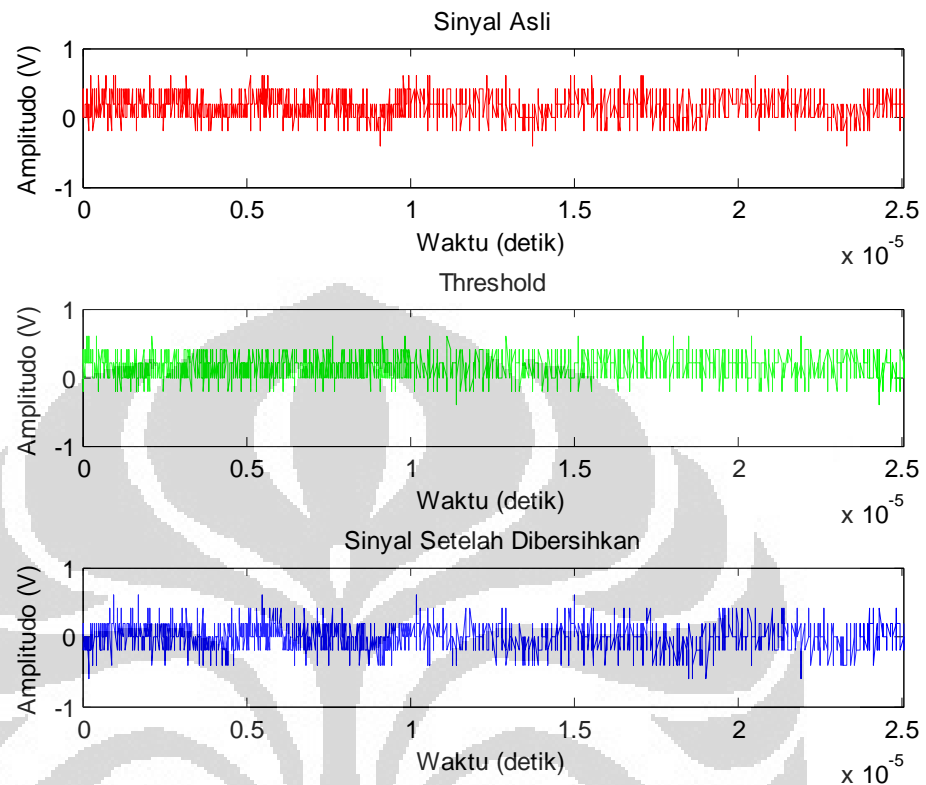
- Fungsi *Square*



**Gambar 4.18.** Hasil Penerapan *Threshold* (1) pada Fungsi *Square*

Pada Gambar 4.18. jelas terlihat penerapan *threshold* (1) kurang efektif pada sinyal hasil penalaran fungsi *square*. Hal ini dimungkinkan akibat sinyal *threshold* memiliki fase yang berbeda dengan sinyal asli bacaan sensor, sehingga pada akhirnya membuat amplitudo sinyal akhir yang dihasilkan dapat menjadi lebih tinggi pada suatu waktu dan di waktu yang lain menjadi lebih rendah.

- Fungsi Sinus

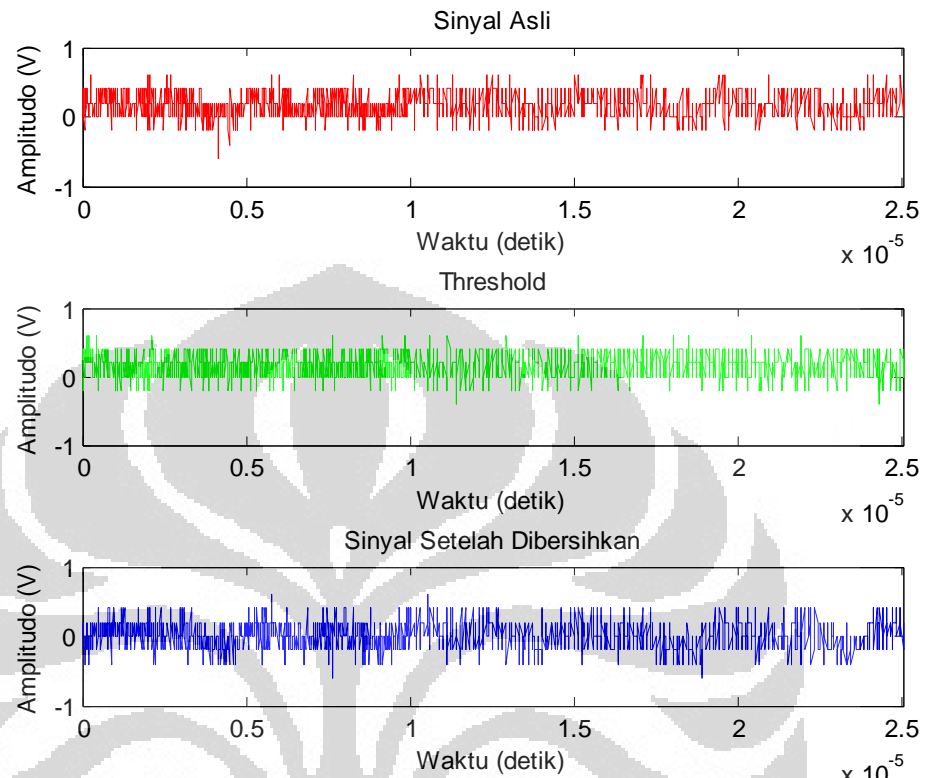


**Gambar 4.19.** Hasil Penerapan *Threshold* (1) pada Fungsi Sinus

Hasil penerapan *threshold* (1) pada fungsi sinus tidak jauh berbeda dengan hasil penerapan *threshold* (1) pada fungsi *square*. Gambar 4.19. menunjukkan bahwa penerapan *threshold* (1) kurang efektif pada sinyal hasil penjalaran fungsi sinus. Bahkan, penerapan *threshold* ini cenderung mengubah fase dari sinyal yang ditangkap dari sensor. Sehingga penerapan *threshold* ini tidak disarankan untuk fungsi sinus.



- Fungsi *Triangle*



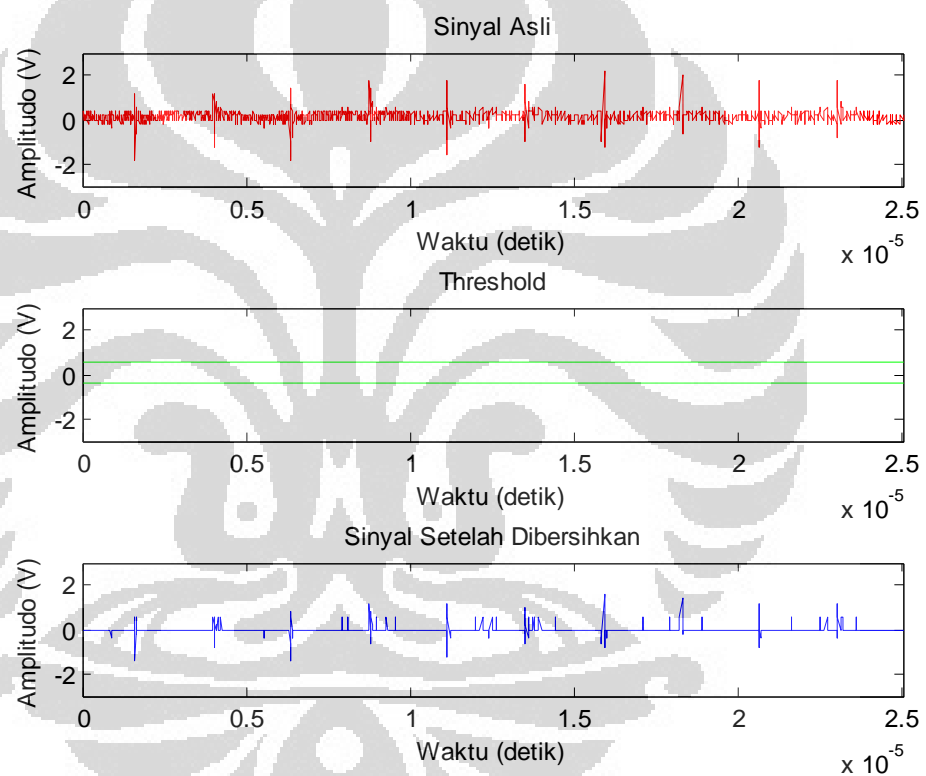
**Gambar 4.20.** Hasil Penerapan *Threshold* (1) pada Fungsi *Triangle*

Sebagaimana dengan hasil penerapan *threshold* (1) pada fungsi lainnya, *threshold* (1) juga tidak berpengaruh efektif pada fungsi *triangle*. Gambar 4.20. menunjukkan hal tersebut. Bahkan, secara lebih jelas terlihat fase dari sinyal akhir berlawanan dengan sinyal asli bacaan sensor.

### **Threshold (2)**

*Threshold* ini menggunakan nilai minimum dan maksimum dari sinyal yang ditangkap tanpa penjalaran langsung untuk diterapkan pada filtrasi sinyal AE. Operasi *threshold* ini dilakukan dengan mengambil nilai sinyal yang lebih besar daripada nilai maksimum sinyal *threshold* (600 mV) dan lebih kecil daripada nilai minimum sinyal *threshold* (-400 mV), sehingga didapatkan sinyal akhir yang merupakan sinyal bersih tanpa *noise*.

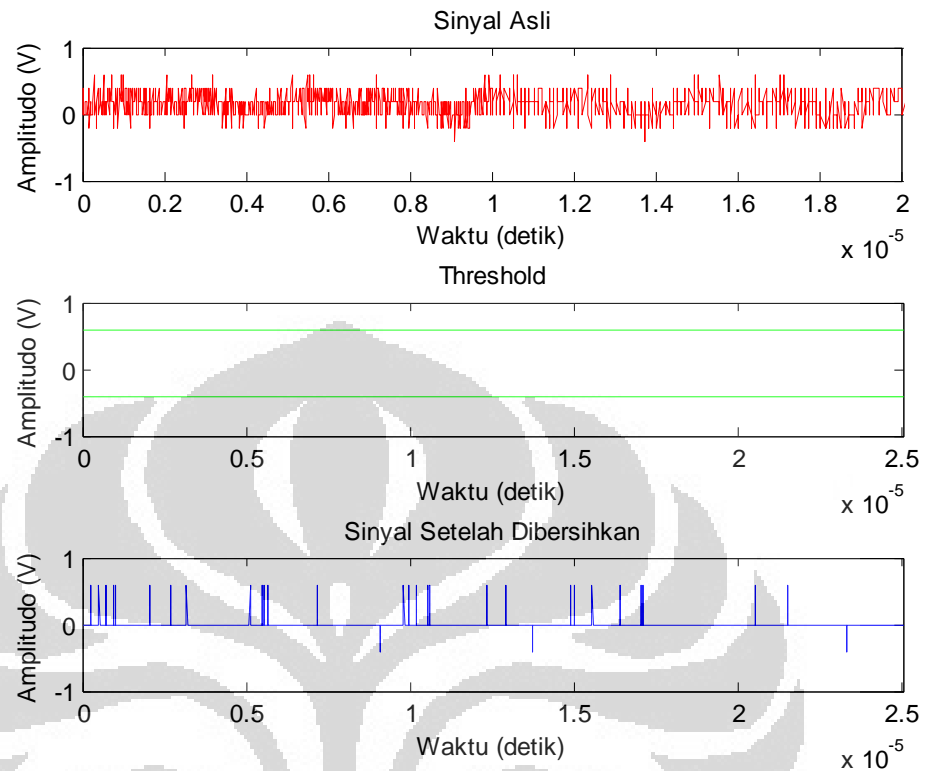
- Fungsi *Square*



**Gambar 4.21.** Hasil Penerapan *Threshold (2)* pada Fungsi *Square*

Penerapan *threshold (2)* pada sinyal yang ditangkap dari fungsi penjalaran awal *square* cukup efektif sebagaimana terlihat pada Gambar 4.21. Frekuensi sinyal akhir tidak berubah dari sinyal asli, beberapa *spike* yang ada tidak terlalu dominan sehingga sinyal AE dapat dibaca dengan baik. Namun, pengurangan amplitudo cukup signifikan hingga hampir 50%.

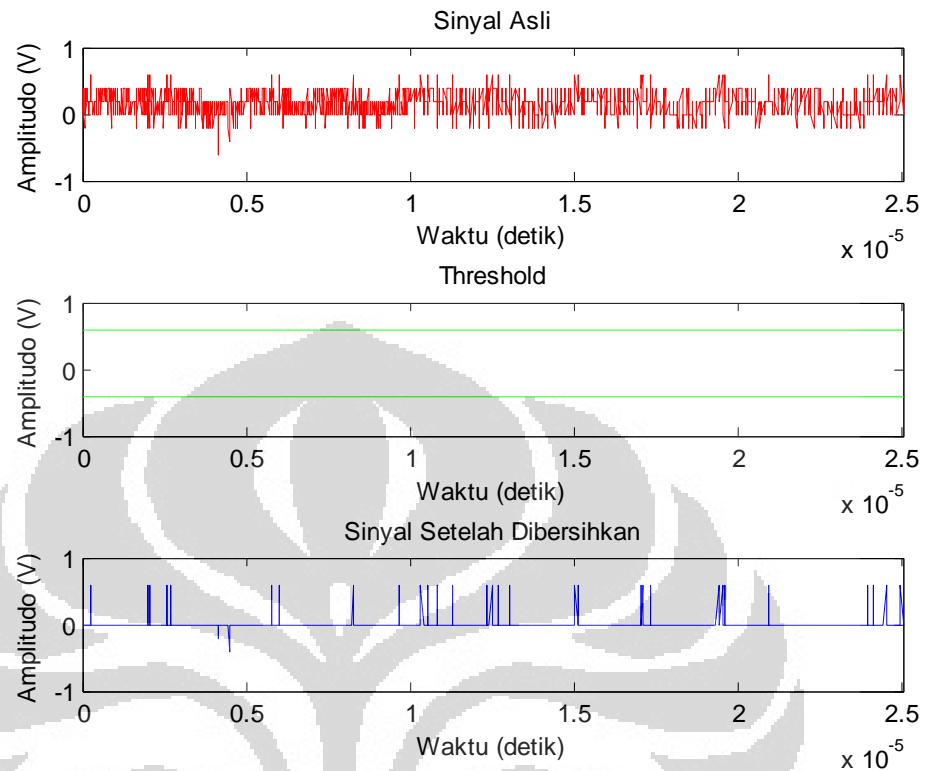
- Fungsi Sinus



**Gambar 4.22.** Hasil Penerapan Threshold (2) pada Fungsi Sinus

Pada sinyal yang ditangkap dari fungsi penjalaran awal sinus, penerapan *threshold* (2) kurang terlalu efektif sebagaimana terlihat pada Gambar 4.22. Walaupun frekuensi sinyal akhir tidak berubah dari sinyal asli, beberapa *spike* yang ada cukup dominan sehingga untuk membaca sinyal AE butuh ketelitian yang lebih. Selayaknya pada fungsi *square*, amplitudo juga terpankas cukup besar dengan penerapan *threshold* ini.

- Fungsi *Triangle*



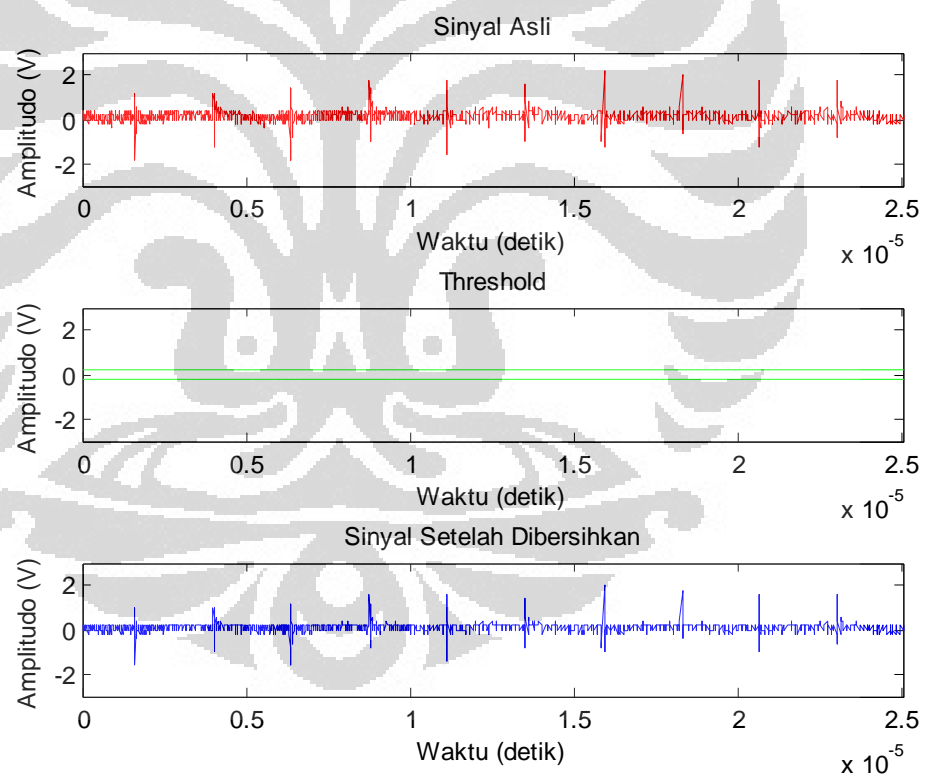
**Gambar 4.23.** Hasil Penerapan *Threshold* (2) pada Fungsi *Triangle*

Selayaknya pada sinyal dari fungsi penjalaran awal sinus, penerapan *threshold* (2) kurang terlalu efektif pada fungsi *triangle* sebagaimana terlihat pada Gambar 4.23. Ffrekuensi sinyal akhir tidak berubah dari sinyal asli, namun beberapa *spike* yang ada cukup dominan. Berbeda dengan pada fungsi penjalaran sinus yang memiliki *spike* pada bagian tengah sinyal, *spike* yang ada lebih terkonsentrasi pada bagian awal dan akhir sinyal. Selayaknya pada fungsi-fungsi sebelumnya, amplitudo juga terpankask cukup besar dengan penerapan *threshold* ini.

### **Threshold (3)**

*Threshold* ini menggunakan nilai *root mean square* (rms) dari sinyal yang ditangkap tanpa penjalaran langsung untuk diterapkan pada filtrasi sinyal AE. Nilai rms dipilih karena cukup representatif menjadi nilai rata-rata statistik sinyal *threshold* dan merupakan kriteria yang tidak seekstrim nilai minimum-maksimum yang digunakan pada *threshold* (2). Operasi *threshold* ini dilakukan dengan mengambil nilai sinyal yang lebih besar daripada nilai positif rms sinyal *threshold* (200 mV) dan lebih kecil daripada nilai negatif rms sinyal *threshold* (-200 mV), sehingga didapatkan sinyal akhir yang merupakan sinyal bersih tanpa *noise*.

- Fungsi *Square*

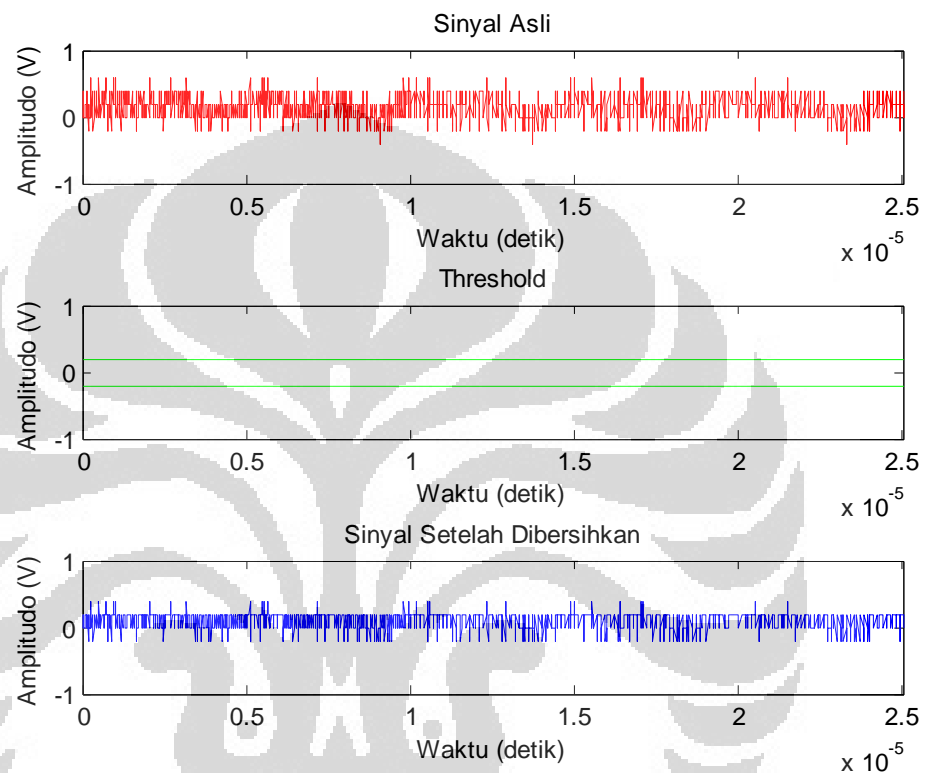


**Gambar 4.24.** Hasil Penerapan *Threshold* (3) pada Fungsi *Square*

Penggunaan *threshold* (3) pada sinyal asli bacaan sensor hasil penjalaran awal fungsi *square* terlihat cukup baik seperti ditunjukkan Gambar 4.24. Sebagaimana diprediksi, penggunaan

*threshold* ini tidak seekstrim *threshold* sebelumnya, sehingga sinyal terlihat seperti berbentuk *burst* dan bukan suatu pulsa sebagaimana pada *threshold* (2).

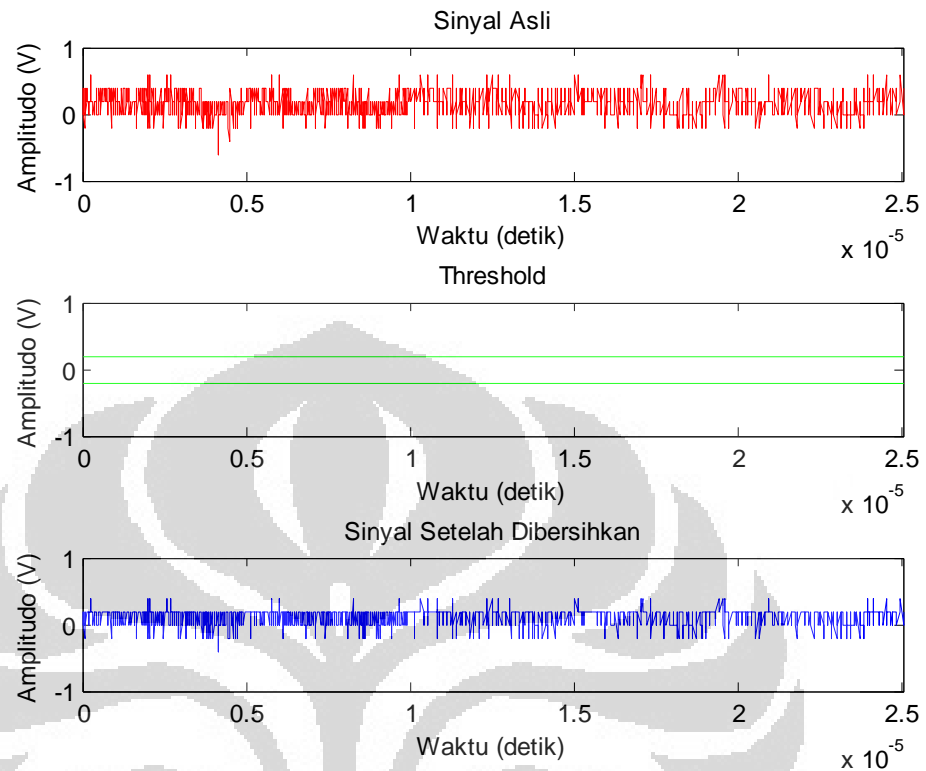
- Fungsi Sinus



**Gambar 4.25.** Hasil Penerapan *Threshold* (3) pada Fungsi Sinus

Penggunaan *threshold* (3) pada sinyal asli bacaan sensor hasil penjalaran awal fungsi sinus terlihat cukup baik seperti ditunjukkan Gambar 4.25. Setiap kelompok sinyal dapat terlihat dan berada pada frekuensi sinyal asli. Namun demikian, bentuk sinyal menjadi tidak proporsional, karena sinyal pada bagian positif lebih banyak daripada pada bagian negatif. Hal ini menunjukkan bahwa sinyal memang cenderung memiliki nilai rerata di atas nol sehingga setelah dibersihkan dengan nilai rms, nilai pada bagian positif masih ada, sedangkan nilai pada sisi negatif sudah hilang.

- Fungsi *Triangle*



**Gambar 4.26.** Hasil Penerapan *Threshold* (3) pada Fungsi *Triangle*

Selayaknya pada fungsi-fungsi sebelumnya, penggunaan *threshold* (3) pada sinyal asli bacaan sensor hasil penjalaran awal fungsi *triangle* terlihat cukup baik seperti ditunjukkan Gambar 4.26. Hasil sinyal akhir AE pada penjalaran fungsi *triangle* mirip dengan fungsi sinus. Hal ini dikarenakan kedua fungsi ini cenderung memiliki bentuk yang hampir sama pada frekuensi tinggi.

Penerapan *threshold* erat kaitannya dengan upaya menentukan ukuran sumber AE. Ukuran sumber AE dinyatakan dalam satuan energi dan oleh karena itu, dari hasil penerapan *threshold*, dilakukan perhitungan total energi AE dari setiap fungsi. Energi AE sendiri dinyatakan sebagai luas area dibawah sinyal akhir setelah diberlakukan *threshold*. Dengan menggunakan metode integrasi numerik aturan Simpson 1/3 pada setiap sinyal akhir, didapatkan hasil sebagaimana terlihat pada Tabel 4.6.

**Tabel 4.6.** Perbandingan Hasil Perhitungan Energi AE dari Sinyal pada Sensor untuk Setiap Fungsi Penjalaran setelah diterapkan *threshold*

Fungsi	Energi AE [J/A]	Energi AE [J/A]	Energi AE [J/A]
	<i>Threshold (1)</i>	<i>Threshold (2)</i>	<i>Threshold (3)</i>
<i>Square</i>	$3,65 \times 10^{-6}$	$5,95 \times 10^{-7}$	$3,94 \times 10^{-6}$
<i>Sinus</i>	$3,08 \times 10^{-6}$	$2,00 \times 10^{-7}$	$3,65 \times 10^{-6}$
<i>Triangle</i>	$3,11 \times 10^{-6}$	$1,97 \times 10^{-7}$	$3,64 \times 10^{-6}$

Dari Tabel 4.6 terlihat bahwa fungsi *square* memiliki total energi yang paling besar pada penerapan *threshold* manapun. Fungsi sinus berada pada posisi kedua pada penerapan *threshold (1)* dan posisi ketiga pada *threshold (2)* dan (3), sedangkan fungsi *triangle* sinus berada pada posisi kedua pada penerapan *threshold (2)* dan (3), serta posisi ketiga pada *threshold (1)*. Perbedaan ini dimungkinkan akibat dari perbedaan fase sinyal *threshold* dengan sinyal sinus sehingga sinyal sinus tidak dibersihkan dengan baik.

Konsistensi hasil perhitungan energi untuk *threshold (2)* dan (3) pada setiap fungsi serta kemampuan keduanya menghasilkan sinyal yang bersih tanpa menghilangkan frekuensi sinyal bacaan sensor membuat kedua *threshold* ini layak menjadi standar *threshold* deteksi AE.

Hasil perhitungan energi pada tabel 4.6 menggunakan amplitudo 5 V pada sinyal aktuator. Pada nilai amplitudo sinyal aktuator lain, dapat diprediksi hasil yang linear terhadap hasil ini. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengetahui tingkat kesetaraan amplitudo sumber AE terhadap amplitudo penjalaran

#### 4.6. Analisis Kualitatif Metode Penentuan Lokasi Sumber AE

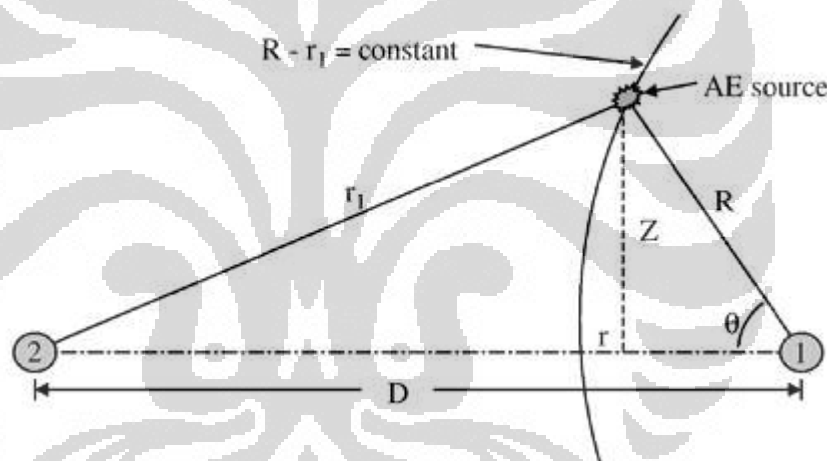
Analisis terhadap metode penentuan lokasi dilakukan dengan mempertimbangkan hasil karakterisasi yang telah dibahas sebelumnya di atas. Lima metode penentuan lokasi sumber AE akan dibahas



keandalannya pada bagian ini berdasarkan metode yang umum digunakan menurut [14].

a. Metode *Time of Arrival*

Metode *Time of Arrival* dengan menggunakan waktu *delay* sinyal yang ditangkap sensor terhadap sinyal sumber. Dibutuhkan minimal 2 sensor untuk mengetahui lokasi sumber AE [11 dan 14]. Metode ini menggunakan prinsip triangulasi, yaitu dengan mengetahui jarak sumber terhadap setiap sensor. Jarak pada setiap sensor diketahui dari hasil perkalian waktu *delay* dan kecepatan penjalaran gelombang material. Jarak ini dijadikan radius jangkauan sumber AE, kemudian secara geometri, dapat diketahui perpotongan antara radius dari masing-masing sensor yang merupakan lokasi sumber AE.



**Gambar 4.27.** Metode *Time of Arrival* [11]

Dari karakteristik waktu *delay* terhadap frekuensi penjalaran, waktu *delay* tidak linear pada rentang frekuensi tertentu (utamanya frekuensi tinggi). Hal dapat menyebabkan kesalahan dalam penentuan lokasi saat frekuensi sumber AE yang terukur sangat tinggi. Walaupun metode ini efektif untuk rentang frekuensi yang menyebabkan waktu *delay* linear. Dari aspek karakteristik amplitudo sinyal, tidak berpengaruh pada metode ini karena tidak menggunakan nilai besaran sinyal sebagai parameter penentuan lokasi. Bentuk sinyal secara tidak

langsung mempengaruhi kehandalan metode ini. Apabila bentuk sinyal yang ditangkap proporsional dengan sumber AE akan membuat penentuan waktu *delay* menjadi tepat, namun, apabila bentuk sinyal tidak proporsional, maka akan ditemui kesulitan untuk menemukan waktu *delay* yang tepat. Untuk mengetahui ukuran sumber AE, metode ini harus digabungkan dengan metode lain (seperti metode energi).

b. Metode Energi

Metode Energi dengan membandingkan energi AE yang terukur oleh sensor. Untuk properti konstanta pengurangan material yang belum diketahui, dibutuhkan minimal 3 sensor untuk mengetahui lokasi sumber [14]. Metode ini memiliki kesamaan dengan metode *Time of Arrival* yaitu dengan melakukan triangulasi terhadap jarak sensor ke sumber. Namun, metode ini justru sama sekali tidak membutuhkan waktu *delay* dan hanya membutuhkan parameter amplitudo. Kelebihan metode ini adalah langsung dapat menentukan lokasi dan sumber secara sekaligus sehingga efektivitas pengukuran menjadi lebih tinggi.

Dari hasil pembahasan sebelumnya, dapat dijelaskan kekurangan metode ini, yaitu harus memperhatikan frekuensi pribadi dari konstruksi, yang mana merupakan hal yang sulit untuk elemen-elemen mesin dinamis, karena pengurangan amplitudo bersifat tidak linear terhadap frekuensi. Selain itu, metode ini juga memerlukan penerapan *threshold* dan perhitungan numerik yang cukup memakan waktu pada sinyal yang cukup panjang.

c. Metode *Cross-Correlation*

Metode *Cross-Correlation* dengan menerapkan *cross-correlation* terhadap dua sinyal yang ditangkap oleh sensor. Metode ini adalah sebagai pengembangan metode *Time of Arrival* [14]. Metode *cross-correlation* memerlukan komputasi yang cukup lama, selain itu,

mengingat waktu *delay* yang sangat kecil dan tidak linear, maka tidak cukup baik untuk digunakan. Metode *cross-correlation* juga akan menemui kesulitan, karena amplitudo juga memiliki karakteristik yang tidak linear. Besarnya *noise* yang berubah-ubah juga dapat membuat kesalahan pada saat perhitungan. Kesalahan relatif dapat terjadi akibat dari penerapan *threshold*. Hal ini dikarenakan metode ini mengabaikan parameter amplitudo dan waktu *delay* antara sinyal yang ditangkap oleh sensor-sensor, sehingga amplitudo yang terlalu kecil atau terlalu besar dapat membuat hasil penentuan lokasi yang salah.

d. Metode Zonal

Metode Zonal dengan cara menempatkan sejumlah sensor AE untuk menangkap sinyal [9, 14 dan 21]. Sinyal AE terbesar yang ditangkap oleh suatu sensor menjadikan zona sensor tersebut sebagai lokasi sumber AE. Metode ini sudah menjadi standar bagi beberapa negara seperti Perancis dan Amerika untuk pengujian kebocoran pada bejana tekan [21]. Metode ini sangat baik untuk dapat mengetahui lokasi sumber dan ukuran sumber AE serta mampu mengeliminir kesulitan-kesulitan yang ditemui akibat karakteristik non linear dari berbagai parameter yang digunakan. Satu-satunya kekurangan metode ini, namun menjadi kekurangan yang vital, adalah dibutuhkan jumlah sensor yang banyak dan ruang yang cukup besar untuk penempatan sensor. Hal ini mendorong pada peningkatan biaya operasional untuk aplikasi dari metode ini.

e. Metode *Geodesic*

Metode *Geodesic* merupakan turunan dari metode *time of arrival* yaitu dengan pendekatan jalur terpendek yang mungkin dicapai suatu *mesh* objek dengan menggunakan prinsip energi minimum [14 dan 25]. Metode ini dilakukan dengan menggunakan algoritma penjalaran *crack* pada suatu material. Metode ini sangat baik untuk bentuk-

bentuk yang kompleks, namun komputasi yang dilakukan sangat rumit dan memakan waktu.

Sebagai metode turunan *Time of Arrival*, metode ini juga memiliki kendala akibat dari waktu *delay* yang sangat cepat dan tidak linear, sehingga kurang akurat. Dari aspek karakteristik pengurangan amplitudo, metode ini juga dapat menyebabkan kesalahan dalam penentuan lokasi dan ukuran sumber dikarenakan bentuk-bentuk yang kompleks memungkinkan terjadinya konsentrasi tegangan yang membuat laju perubahan tegangan menjadi tinggi dan dari hasil karakterisasi sebelumnya membuat pola pengurangan menjadi tidak linear dan sulit diprediksi. Penerapan *threshold* dapat menjadi masalah lain pada metode ini, dikarenakan kompleksitas bentuk dan *mesh* membuat interaksi molekuler menjadi berubah-ubah, *threshold* pun sulit ditentukan.

Ketergantungan terhadap waktu *delay* dan pengurangan amplitudo menjadi dasar penentuan keakuratan suatu metode dalam menentukan lokasi sumber AE. Metode yang sangat tergantung dari waktu *delay*, cenderung akan menemui kendala pada frekuensi tinggi. Sedangkan, metode yang sangat menitikberatkan pada karakteristik pengurangan amplitudo, cenderung akan menemui kesulitan di berbagai frekuensi apabila tidak diketahui frekuensi pribadi dari elemen mesin atau konstruksi yang menjadi objek pengukuran. Selain itu, metode yang tergantung pada karakteristik pengurangan amplitudo akan menemui kesulitan terkait penerapan *threshold*, karena nilai *threshold* amat bergantung pada tingkat *noise* pada saat pengukuran.

Tingkat kesulitan komputasi menjadi parameter penting yang harus dipertimbangkan karena terkait dengan kemungkinan terjadinya kesalahan, verifikasi hasil dan juga waktu yang diperlukan untuk dapat menentukan lokasi sumber AE. Biaya operasional juga menjadi hal yang

harus dipertimbangkan dalam menentukan metode mana yang paling handal dalam menentukan lokasi sumber AE. Biaya operasional terkait dengan jumlah sensor yang harus digunakan, sistem akuisisi data, serta kapasitas dan lama waktu pemrosesan sinyal.

Kehandalan dari setiap metode dapat dirangkum dalam Tabel 4.7. berikut.

Tabel 4.7. Analisis Kehandalan Metode Penentuan Lokasi Sumber AE

Aspek Kehandalan		Metode				
		<i>Time of Arrival</i>	Energi	<i>Cross-correlation</i>	Zonal	Geodesic
Akurasi	Ketertgantungan Waktu <i>Delay</i>	++	-	+	--	+
	Ketertgantungan Pengurangan Amplitudo	-	++	+	--	+
Tingkat Kesulitan Komputasi		-	+	+	--	++
Biaya Operasional		--	-	-	++	+

Keterangan :

- = Rendah
- = Sangat Rendah
- + = Tinggi
- ++ = Sangat Tinggi

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Dari penelitian ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- a. Gelombang AE baru dapat dideteksi pada frekuensi sumber penjalaran 180 kHz untuk fungsi sumber penjalaran sinus dan *triangle*, sedangkan pada fungsi sumber penjalaran *square*, gelombang AE sudah dapat dideteksi dari frekuensi 1 Hz.
- b. Karakteristik atenuasi amplitudo adalah tidak linear terhadap frekuensi sumber penjalaran. Karakteristik ini dimungkinkan akibat dari terjadinya resonansi pada rentang frekuensi tertentu yang mendekati frekuensi pribadi pelat. Sedangkan, besar pengurangan amplitudo adalah konstan terhadap amplitudo sinyal aktuator yang diberikan.
- c. Bentuk sinyal AE sangat ditentukan oleh laju perubahan tegangan terhadap waktu. Laju perubahan yang relatif kecil membuat atenuasi amplitudo AE mengikuti pola pengurangan amplitudo penjalaran gelombang elastik pada medan kontinyu sehingga membuat bentuk sinyal AE proporsional dengan bentuk sinyal pembebanan. Sedangkan laju perubahan yang besar memiliki karakteristik pengurangan amplitudo sendiri yang tidak sama dengan pola pengurangan amplitudo penjalaran gelombang elastik pada medan kontinyu yang membuat bentuk sinyal AE tidak proporsional dengan bentuk sinyal pembebanan.
- d. Waktu penjalaran bersifat tidak linear terhadap frekuensi sumber penjalaran namun memiliki kecenderungan semakin kecil pada frekuensi yang lebih tinggi. Hal ini dimungkinkan akibat dari adanya kenaikan kecepatan transmisi molekuler akibat segenap energi yang dibebankan langsung ditransmisikan tanpa diserap terlebih dahulu.

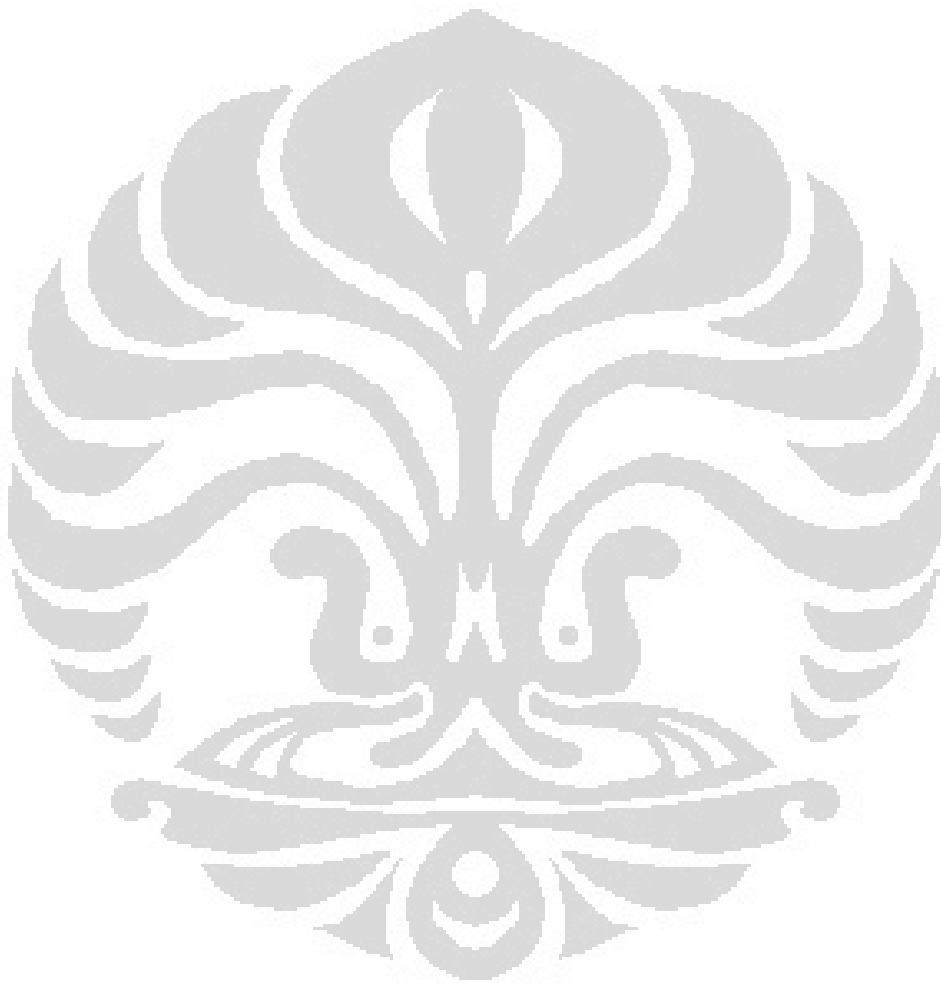
- e. Digunakan sinyal yang ditangkap sensor sebelum ada sinyal penjalaran aktuator sebagai basis *threshold* yang dikembangkan untuk pemrosesan sinyal AE sebagai upaya eliminasi *White Gaussian Noise* yang berfrekuensi tinggi yang mungkin terjadi akibat interaksi tingkat molekuler pada material pelat, efek dari lingkungan dan akibat medan elektromagnetik sensor serta alat ukur. *Threshold* tersebut adalah:
- (1) Penggunaan sinyal yang ditangkap sebelum ada sinyal penjalaran aktuator.
  - (2) Penggunaan nilai minimum dan maksimum sinyal yang ditangkap tanpa ada sinyal penjalaran aktuator.
  - (3) Penggunaan nilai rms positif dan negatif sinyal yang ditangkap tanpa ada sinyal penjalaran aktuator.
- f. Dari hasil penerapan *threshold*, diketahui bahwa dari seluruh *threshold* yang digunakan, *threshold* (2) dan (3) layak dijadikan standar *threshold* pengukuran AE. Telah dilakukan perhitungan untuk amplitudo sinyal penjalaran aktuator 5 V dan diketahui bahwa fungsi penjalaran *square* menghasilkan energi AE yang paling besar. Besarnya energi pada amplitudo sinyal penjalaran aktuator lain adalah linear terhadap hasil ini.
- g. Metode zonal adalah metode yang paling akurat dalam menentukan lokasi sumber AE, namun biaya operasional yang diperlukan juga sangat besar. Metode *Time of Arrival* bersama dengan metode energi menjadi metode alternatif yang cukup handal dan layak dikembangkan untuk dapat menggantikan metode zonal.

## 5.2. Saran

Beberapa saran untuk penelitian selanjutnya adalah:

- a. Melakukan karakterisasi penjalaran AE sebagai fungsi lokasi sensor dan fungsi material
- b. Melakukan penelitian untuk dapat mengembangkan teknik penentuan lokasi dan ukuran sumber AE secara 3D

- c. Menggunakan AE untuk berbagai aplikasi enjiniring, salah satunya pada aplikasi mikrofluid





## DAFTAR REFERENSI

- [1] Lees, A.W., dan Z. Quiney. “The use of acoustic emission for bearing condition monitoring”. *J. Physics* (2011): 1-10.
- [2] Mehrjou M. R., et. all. “Rotor fault condition monitoring techniques for squirrel-cage induction machine”. *J. Mechanical System and Signal Processing* 25 (2011): 857-869.
- [3] Al-Balushi K. R., et. all. “Energy Index technique for detection of Acoustic Emissions associated with incipient bearing failures”. *J. Applied Acoustics* 71 (2010): 812–821.
- [4] Al-Dossary S., et. all. “Observations of changes in acoustic emission waveform for varying seeded defect sizes in a rolling element bearing”. *J. Applied Acoustics* 70 (2009): 58–81.
- [5] Nirbito, Wahyu. “Detecting Incipient Defect of Rolling Elements Bearing by Applying the Blind Deconvolution Method in Numerical Technique”. *the 4<sup>th</sup> International Conference on Numerical Analysis in Engineering*. 2005.
- [6] Nirbito, Wahyu, et. all. “Detection of the Incipient Rolling Elements Bearing Defects, Directly from Time Domain Vibration Signals, By Using a Non-Mechanical Sensor “. *7th Quality In Research*. 2004.
- [7] Tandon, N. dan A. Choudhury, “A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings”. *J. Tribology International* 32 (1999): 469-480.
- [8] Nirbito, Wahyu. “Penentuan Kerusakan Dini pada Elemen Mesin Dinamis Bantalan Gelinding Melalui Deteksi Sinyal Penjalaran Gelombang Tegangan Frekuensi Tinggi”. Disertasi. 2011.
- [9] Grosse, C.U. dan M. Ohtsu. “Acoustic Emission Testing : Basic for Research-Application in Civil Engineering”. Springer-Verlag, 2008.
- [10] Naber, R.R. dan H. Bahai. “Analytical and experimental validations of a numerical band-limited Green’s function approach for modeling acoustic emission waves”. *J. Advances in Engineering Software* 38 (2007): 876–885.

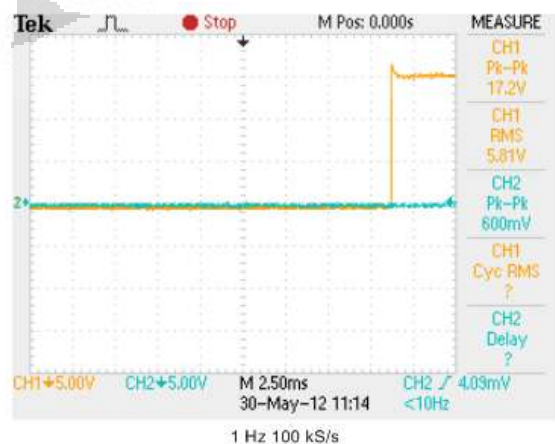
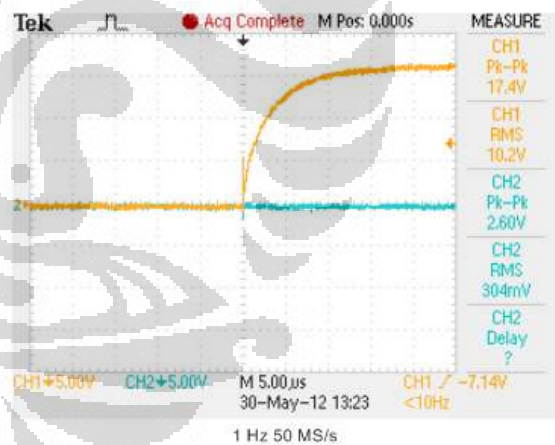
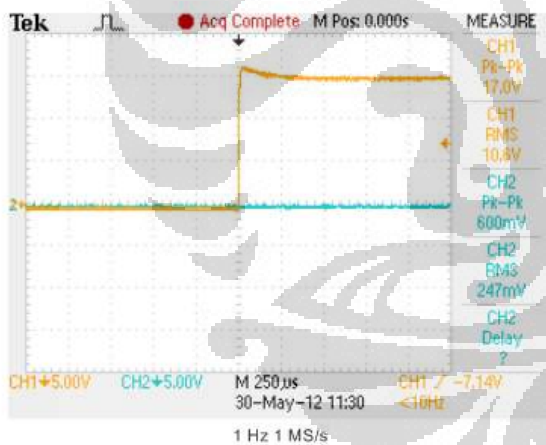
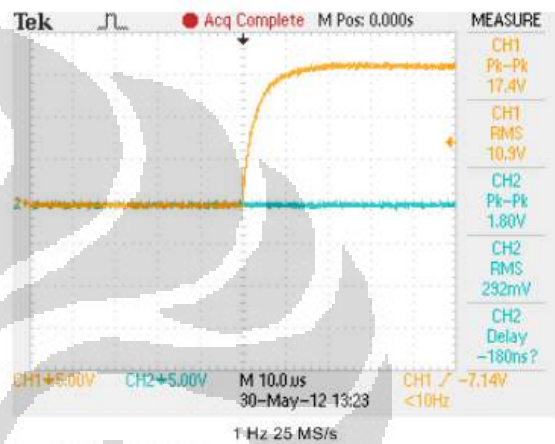
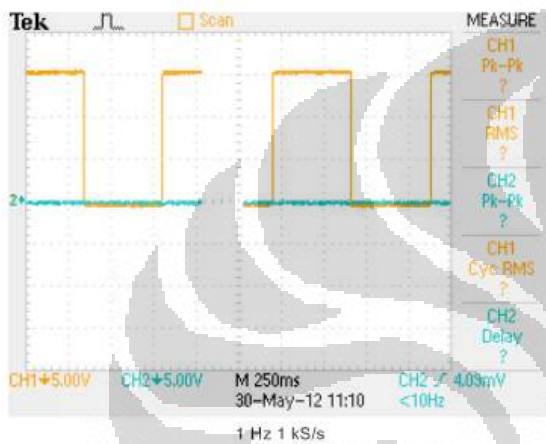
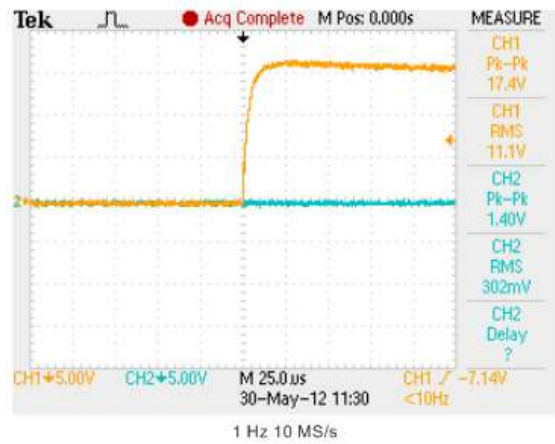
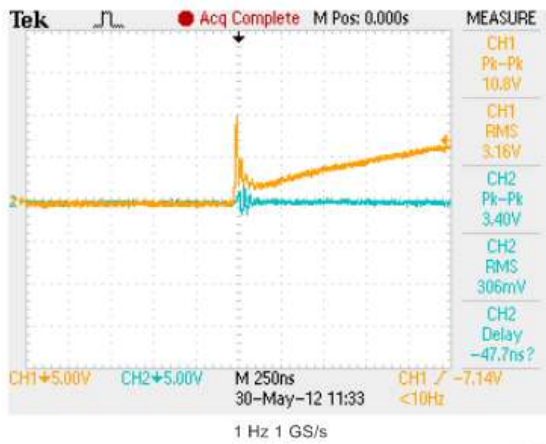
- [11] Baxter, M. G., et. all. "Delta T source location for acoustic emission". *J. Mechanical Systems and Signal Processing* 21 (2007): 1512–1520.
- [12] Scholey, J. J., et.all. "A generic technique for acoustic emission source location". *J. Acoustic Emission* 27 (2009): 291-298.
- [13] Lympertos, E. M. dan E. S. Dermatas. "Acoustic emission source location in dispersive media". *J. Signal Processing* 87 (2007): 3218-3225.
- [14] Muravin, Boris. "Acoustic Emission Wave Propagation and Source Location". Presentasi. 2008.
- [15] D.J. Yoon. "Fundamental of Acoustic Emission". *1<sup>st</sup> Asia Pasific Student Summer School on Smart Structures Technology*. 2008.
- [16] Scruby, C.B. "An introduction to acoustic emission". *J. Physics* (1987): 946-983.
- [17] W.L. Li. *Foundation of Stress Waves*. Elsevier, 2007.
- [18] Szuladzinski, G. *Formula for Mechanical and Structural Shock and Impact*. CRC Press, 2010.
- [19] Richart et all. *Vibrations of Soils and Foundations*. Prentice Hall, 1970.
- [20] Meyer, M. *Dynamic Behaviour of Material*, n.d.
- [21] Catty, J. "Acoustic Emission Testing – Defining a New Standard of Acoustic Emission Testing for Pressure Vessels". *J. Acoustic Emission* 27 (2009): 299-313.
- [22] Hay, D. R., et. all. "Monitoring the civil infrastructure with acoustic emission : bridge case studies". *J. Acoustic Emission* 27 (2009): 1-10.
- [23] Kosnik, D. E. "Acoustic emission testing of a difficult-to-reach still bridge detail". *J. Acoustic Emission* 27 (2009): 11-17.
- [24] Kalicka, M. "Acoustic emission as a monitoring method in prestressed concrete bridge health condition evaluation". *J. Acoustic Emission* 27 (2009): 18-26.
- [25] Prasana G., M. R. Bhat dan C. R. L. Murthy. "Acoustic Emission Source Location on an Arbitrary Surface by Geodesic Curve Evolution". *Advances in Acoustic Emission* (2007).

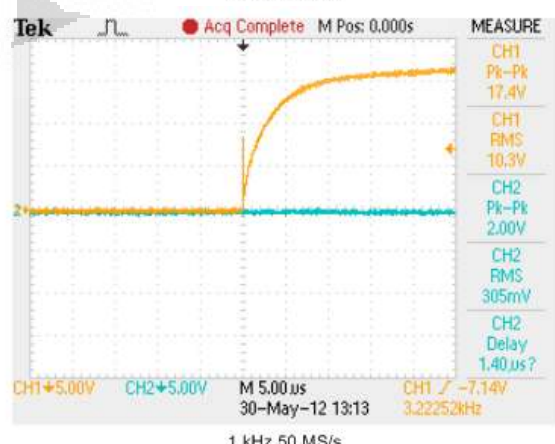
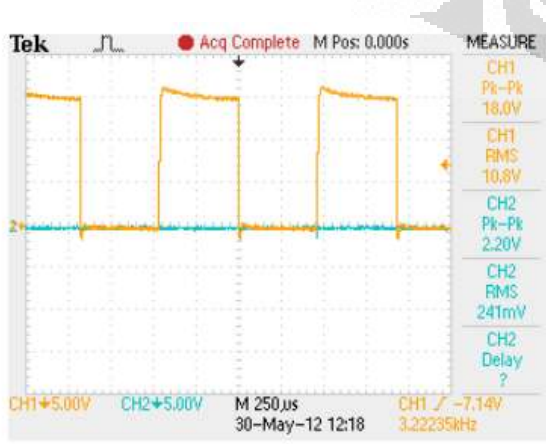
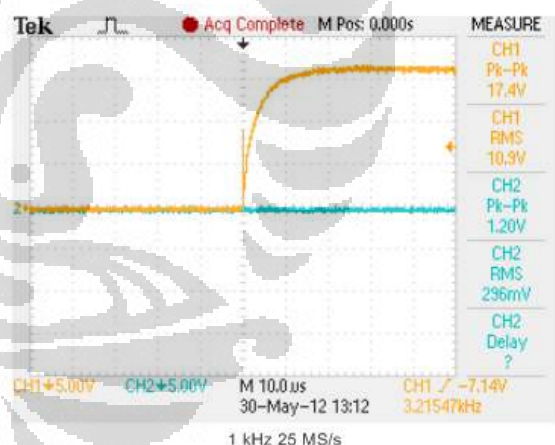
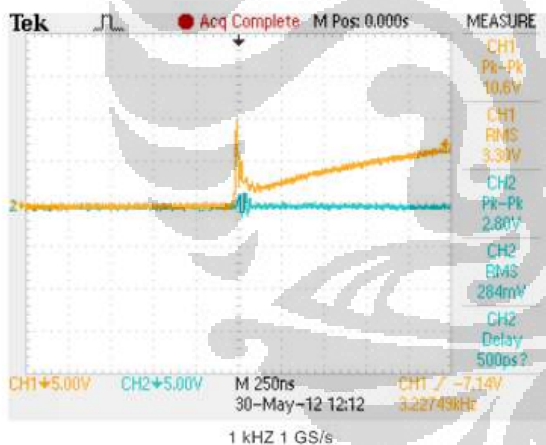
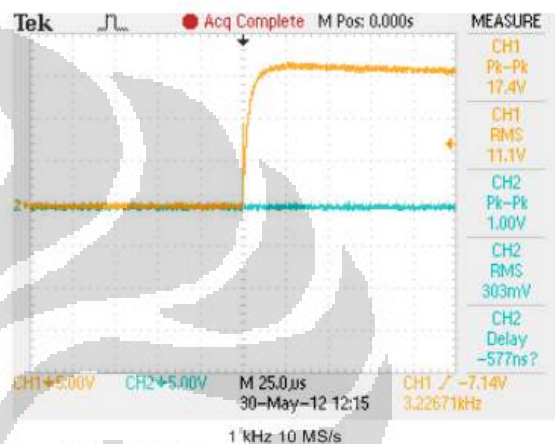
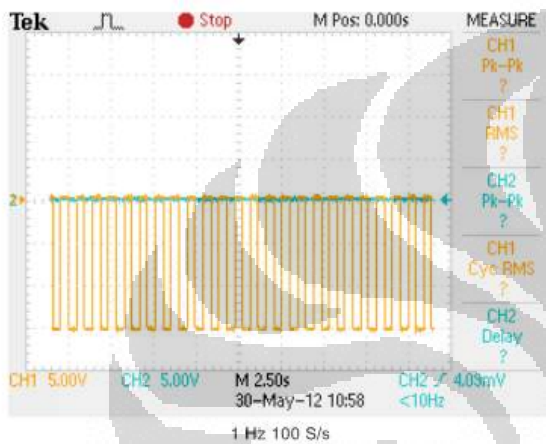
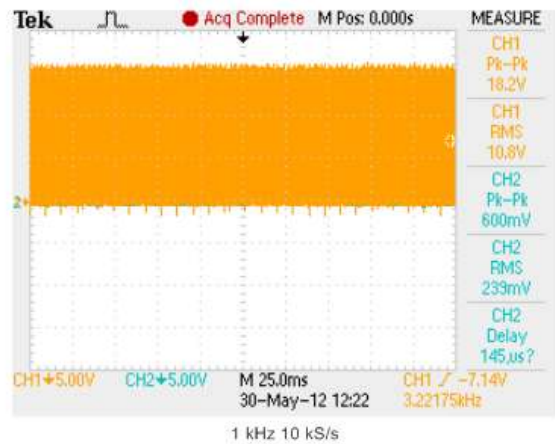
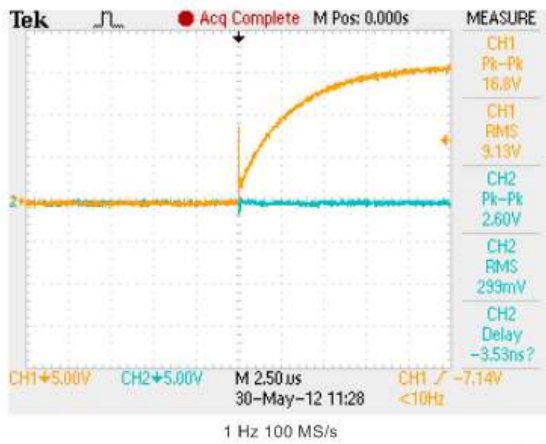
- [26] Nirbito, Wahyu, et. all. "The Enhancement of Bearing Signals Corrupted by Noise Using Blind Deconvolution - A Feasibility Study". *2nd Asia-Pacific Conference on System Integrity Maintenance (ACSIM)*. 2000.
- [27] *Catalogue 2009 Piezoceramic Product*. Physike Instument. 2009.



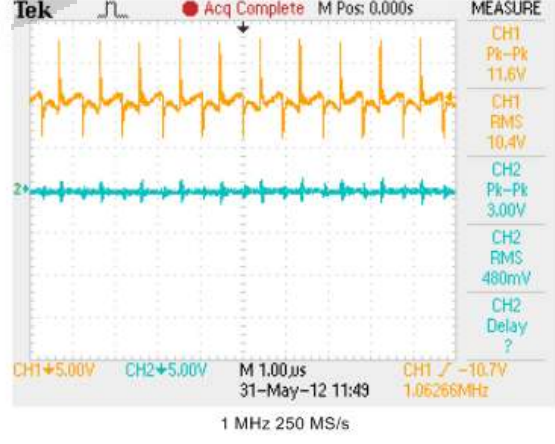
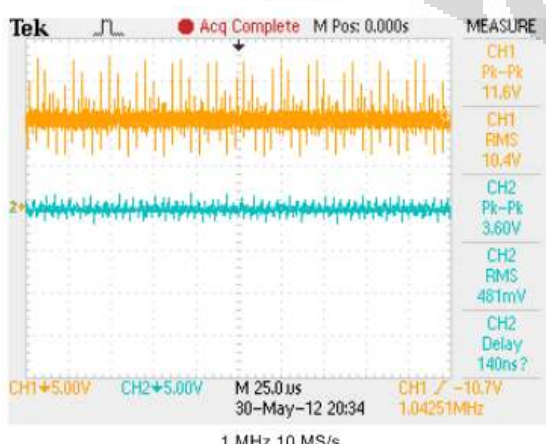
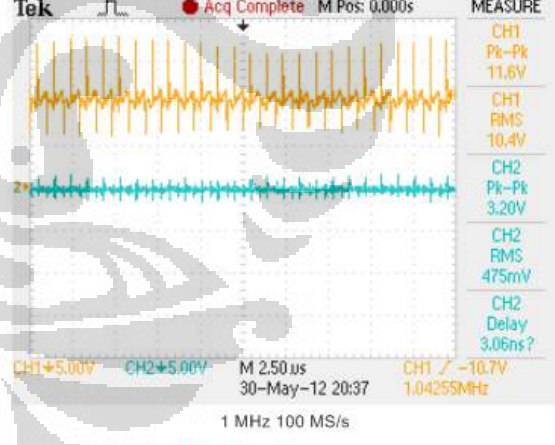
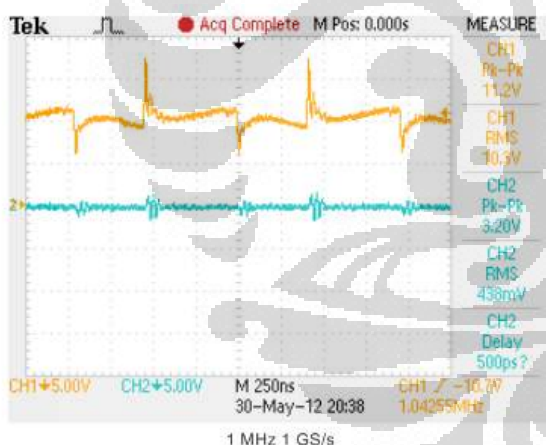
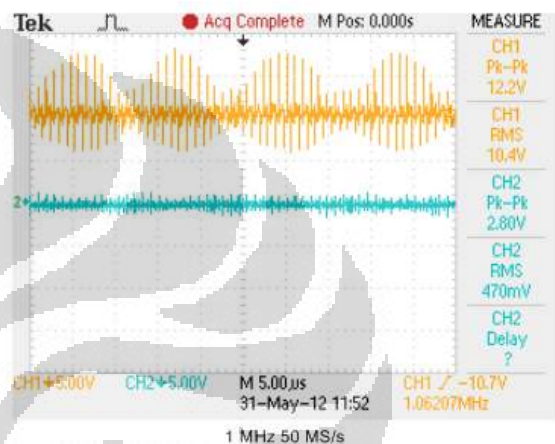
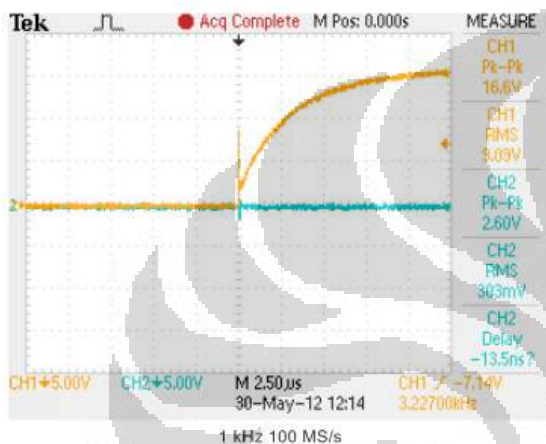
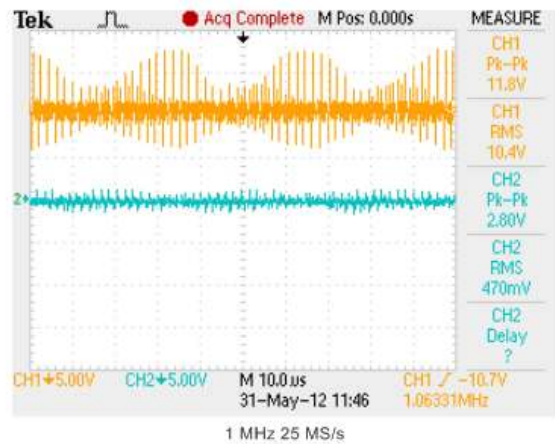
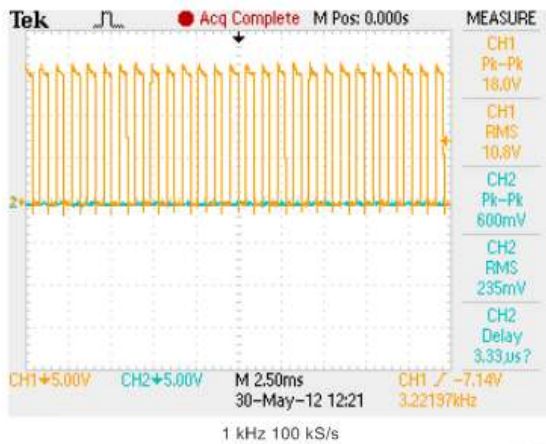


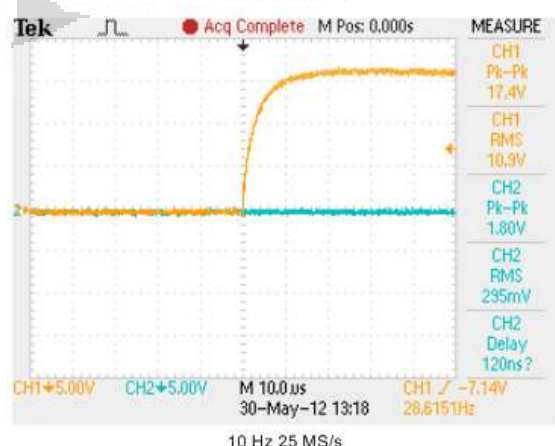
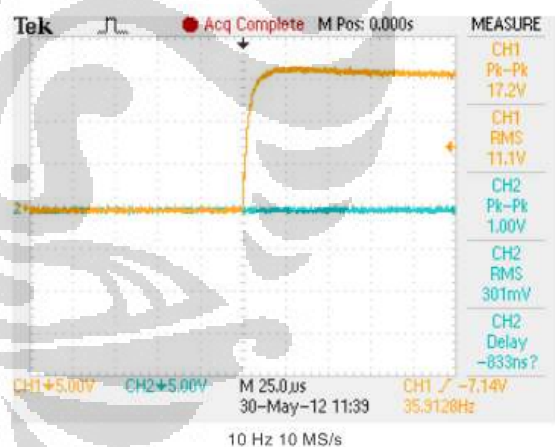
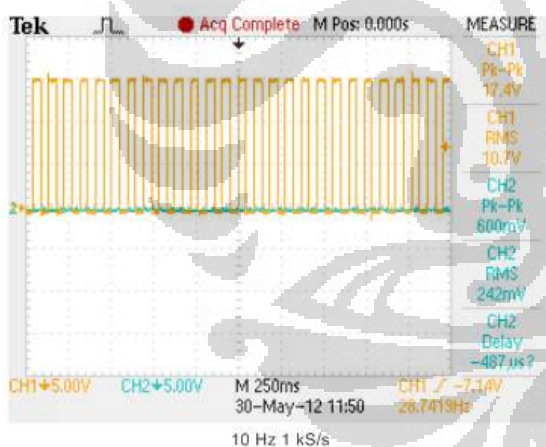
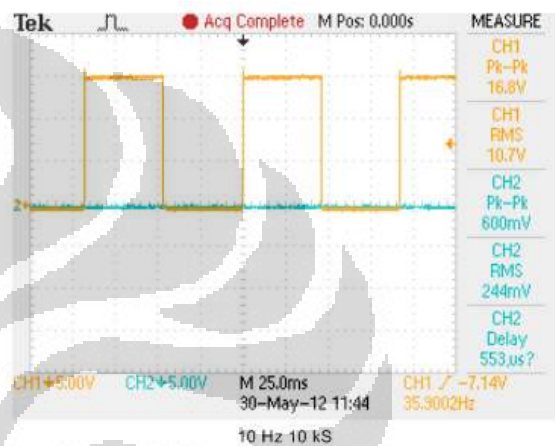
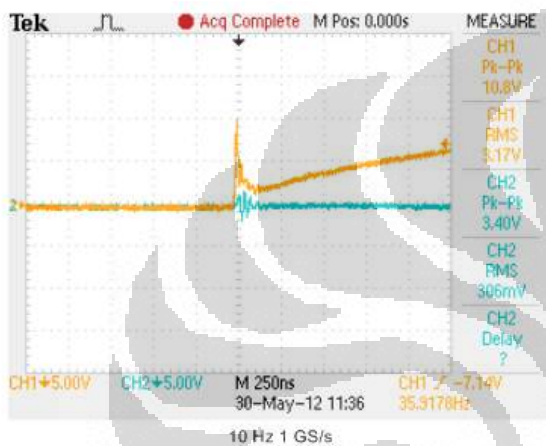
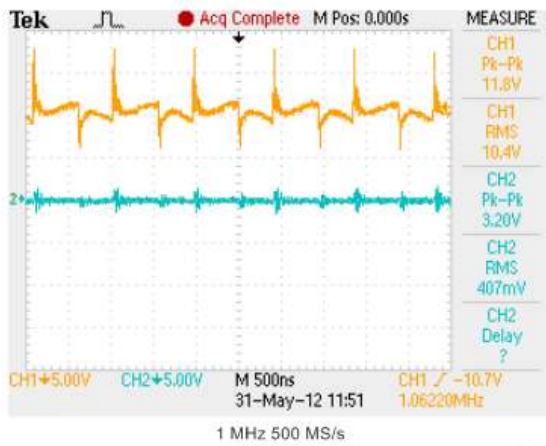
**LAMPIRAN A**  
**DATA SINYAL DENGAN**  
**PEMBEBANAN FUNGSI *SQUARE***



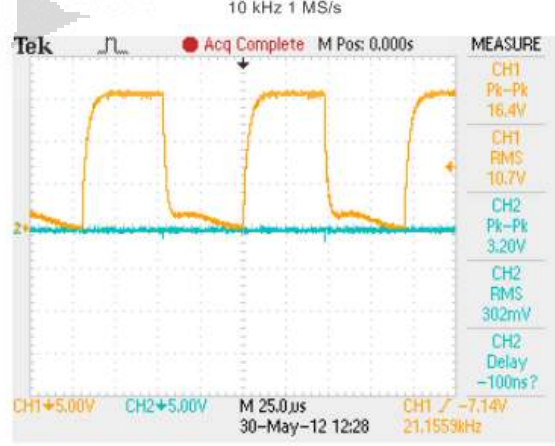
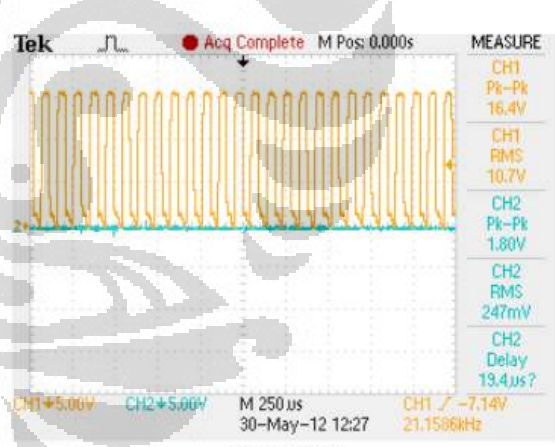
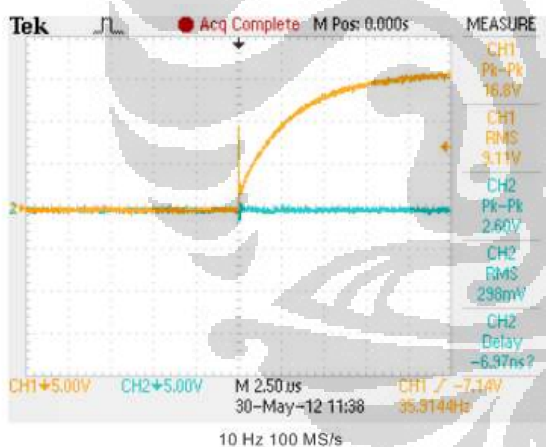
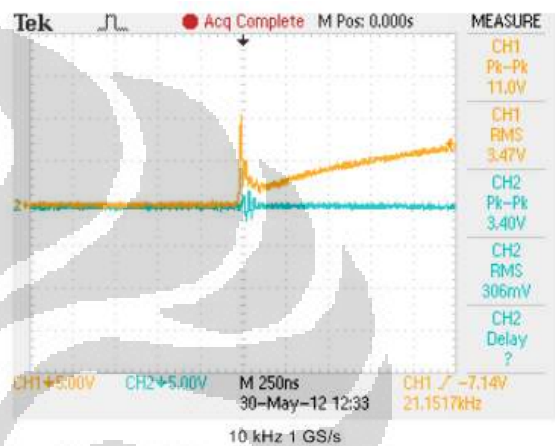
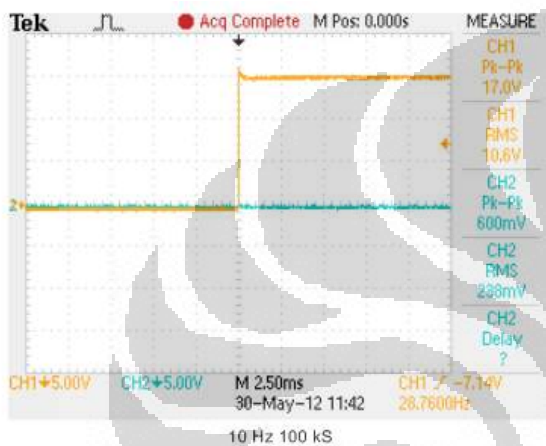
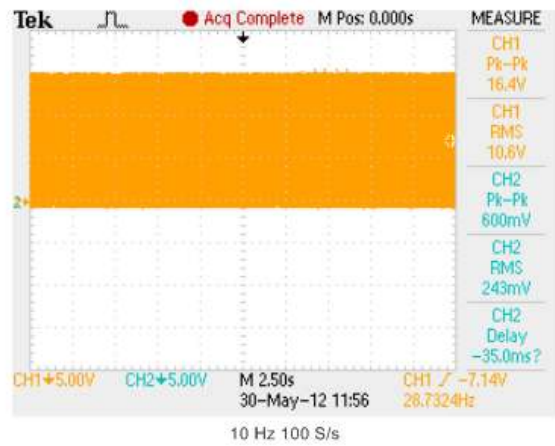
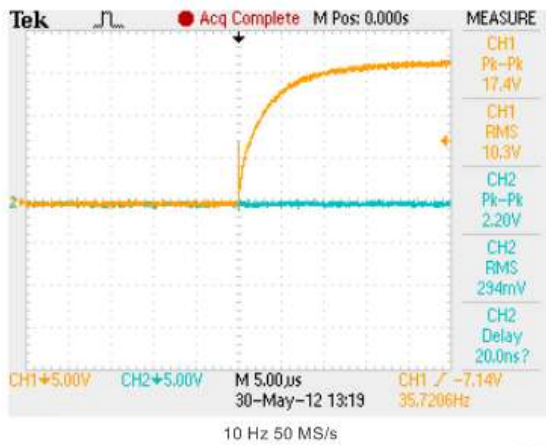


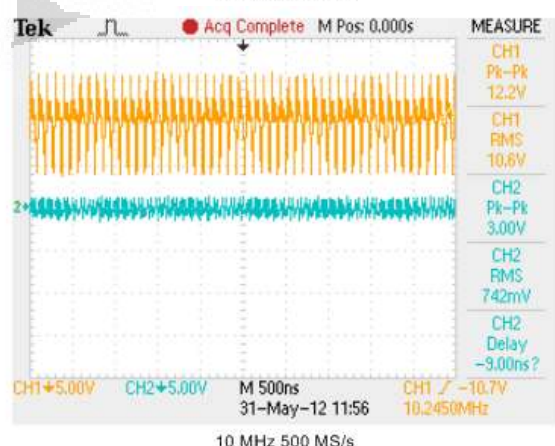
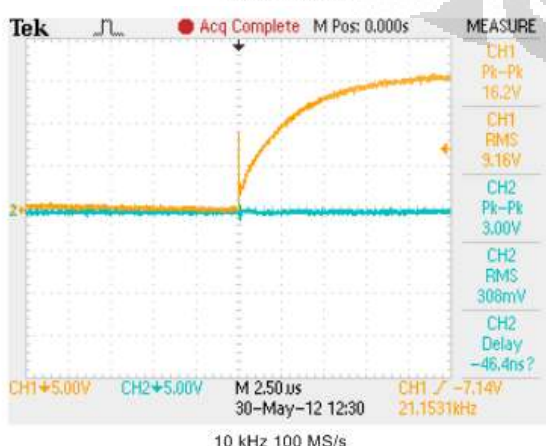
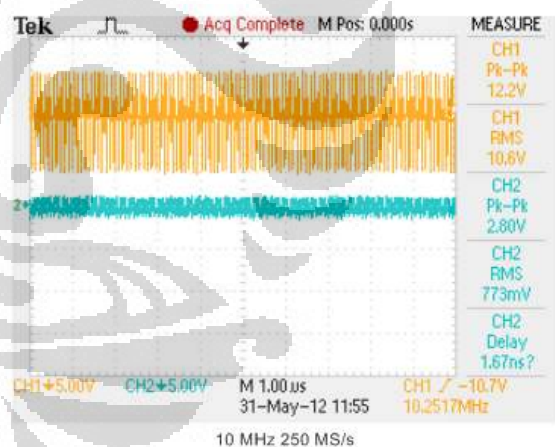
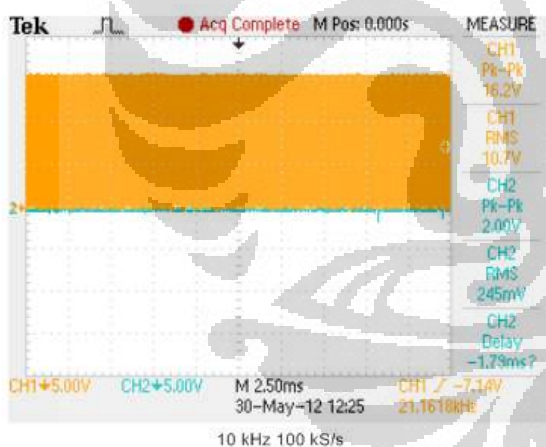
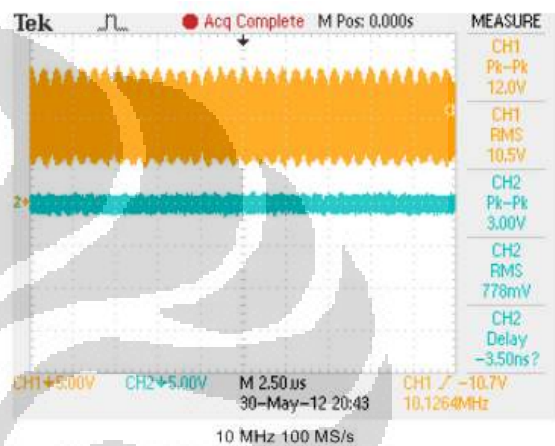
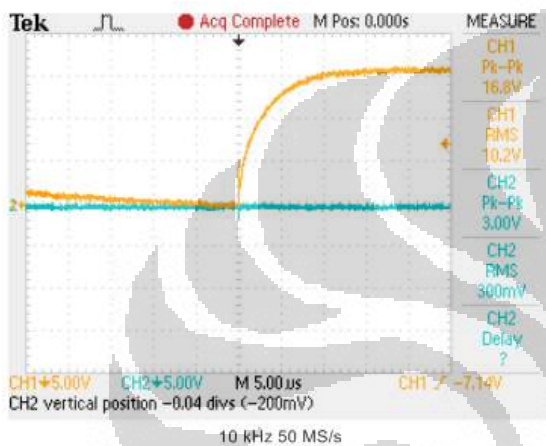
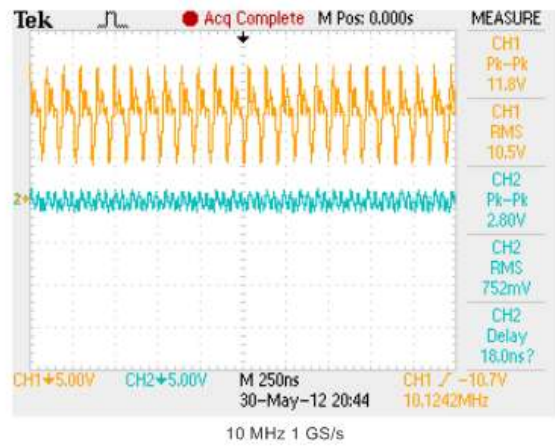
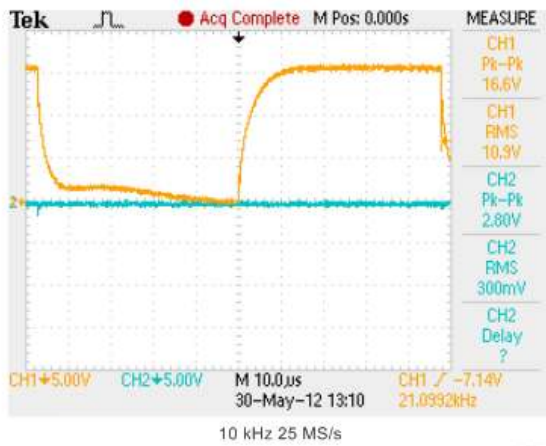




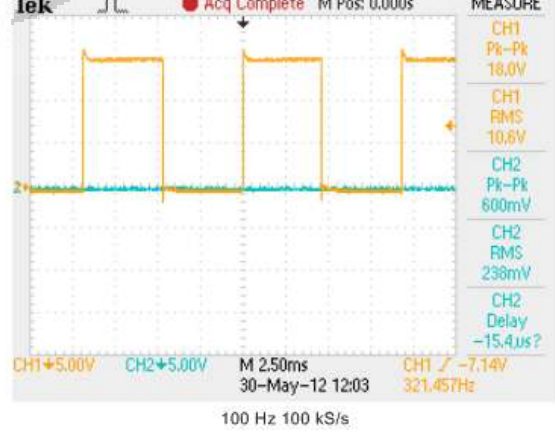
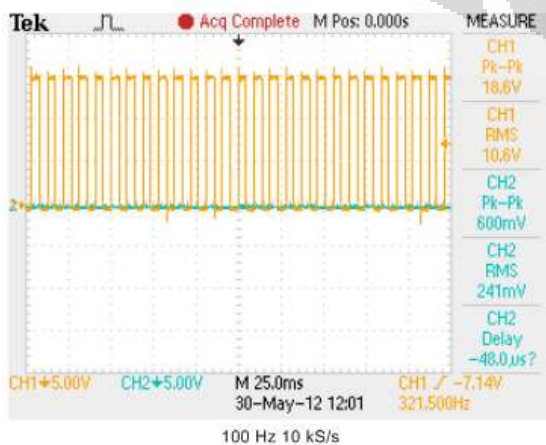
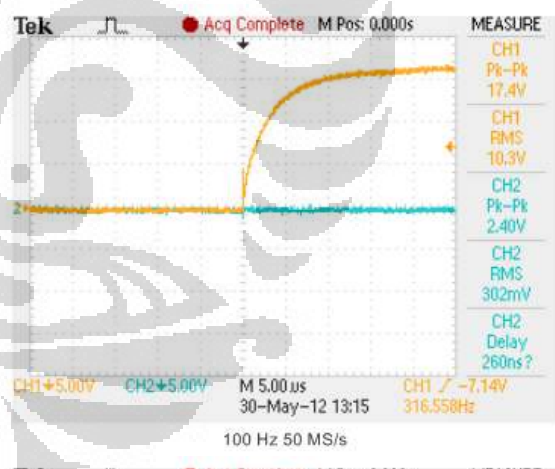
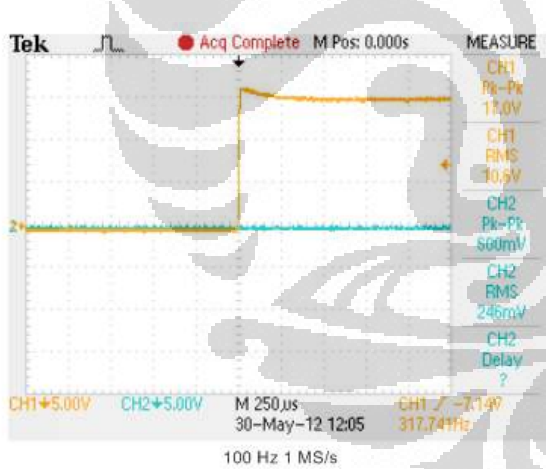
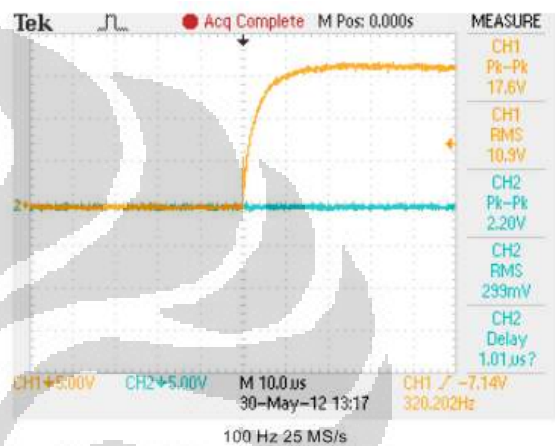
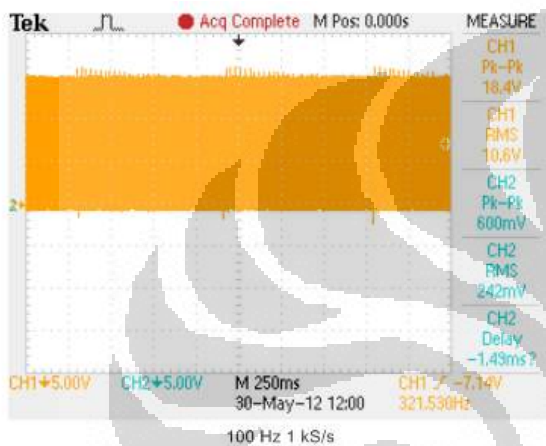
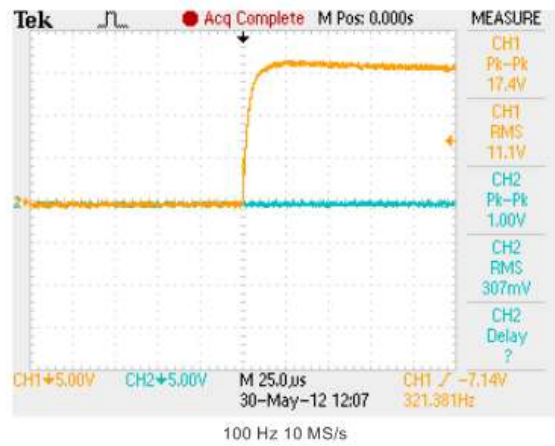
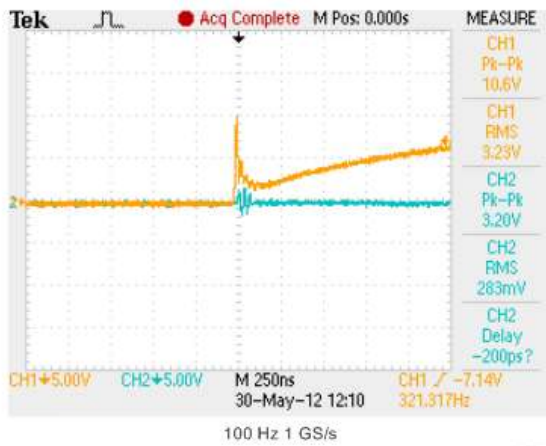


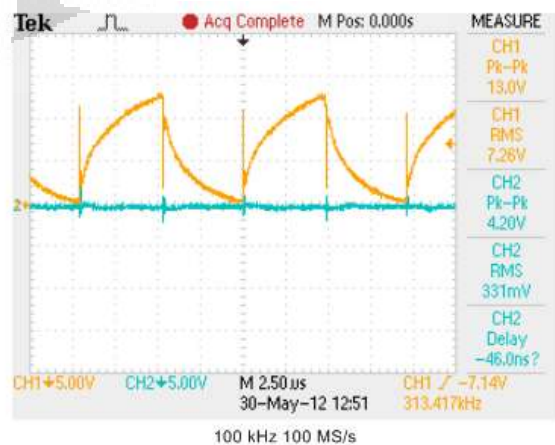
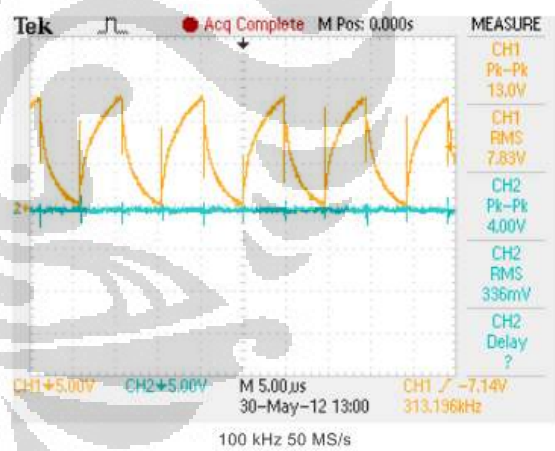
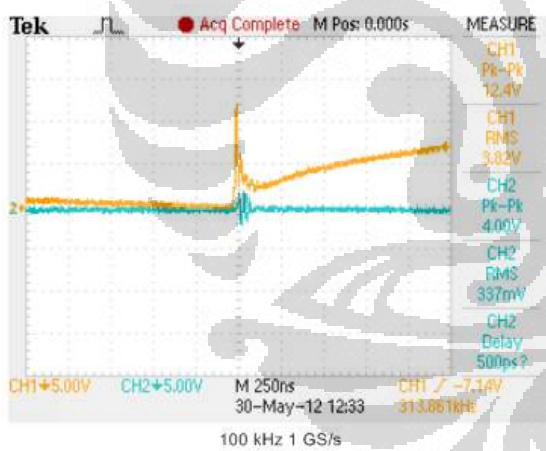
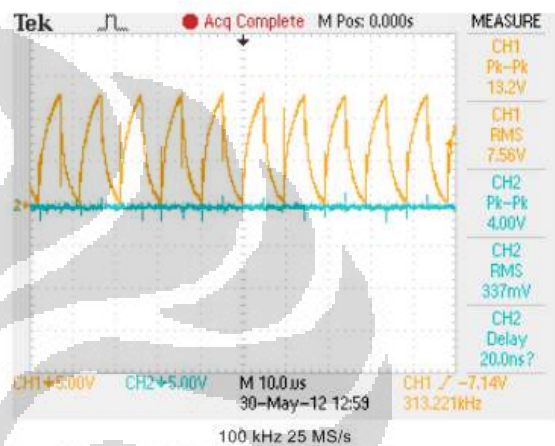
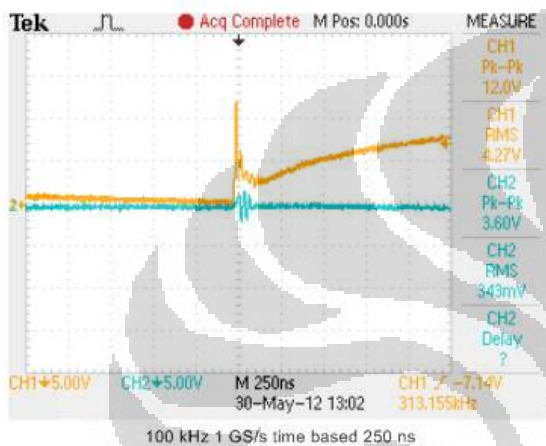
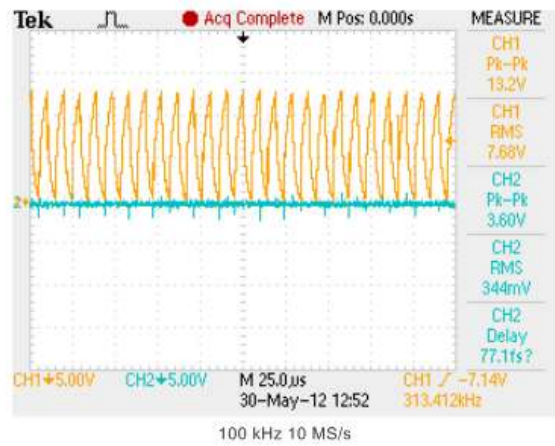
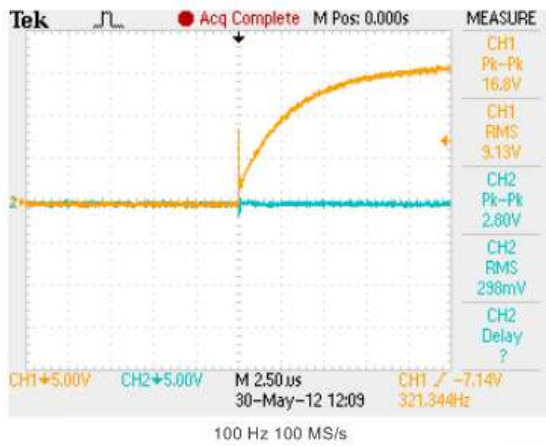








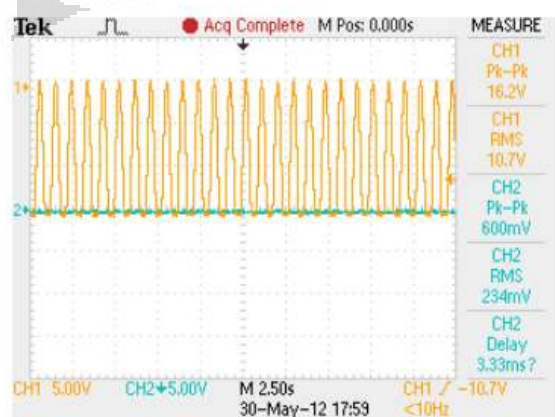
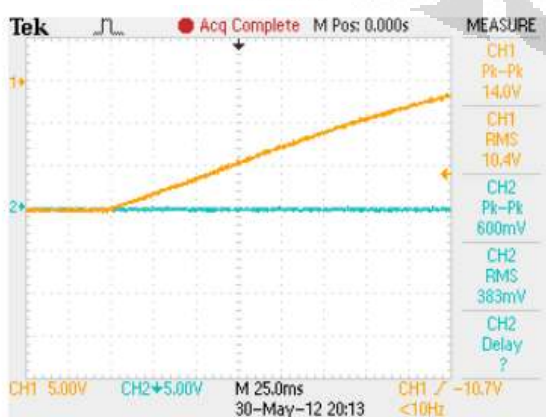
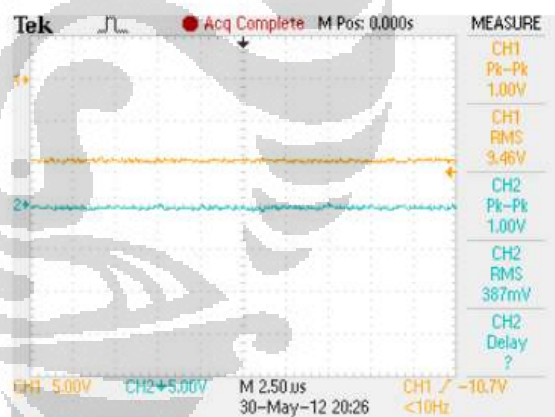
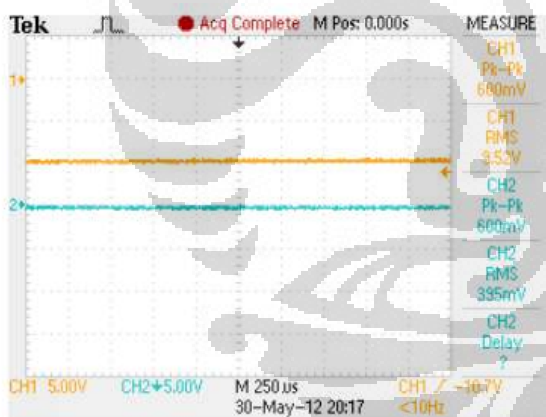
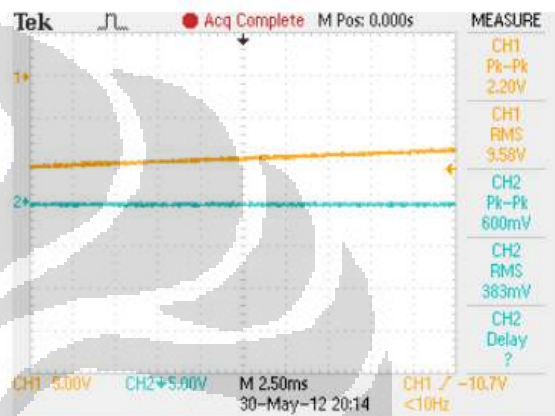
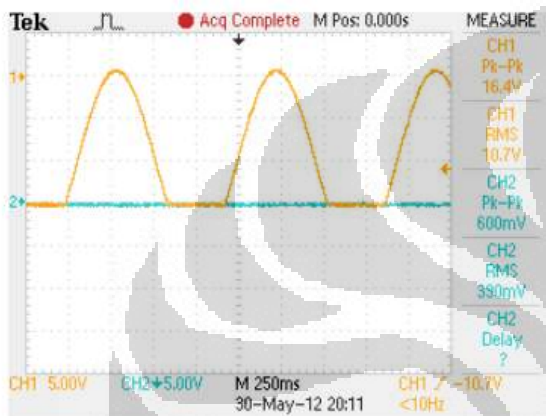
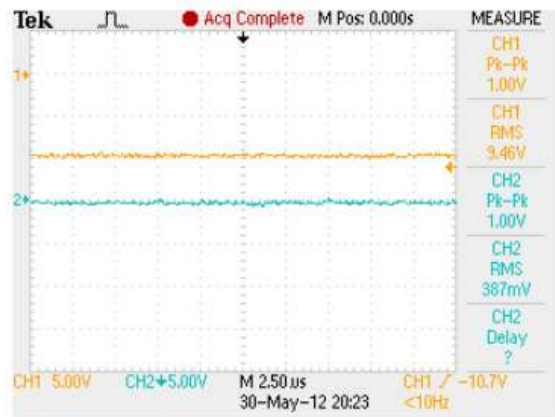
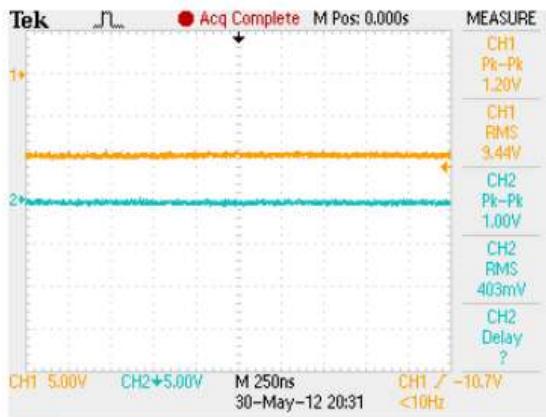


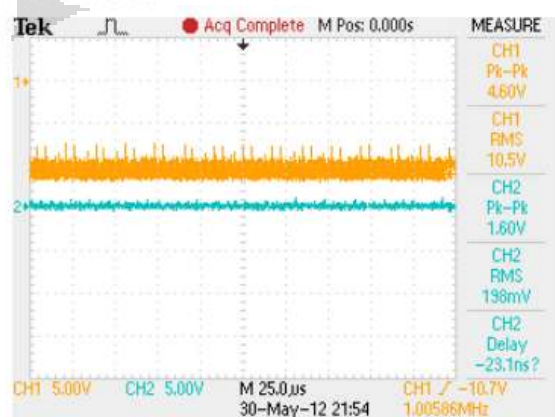
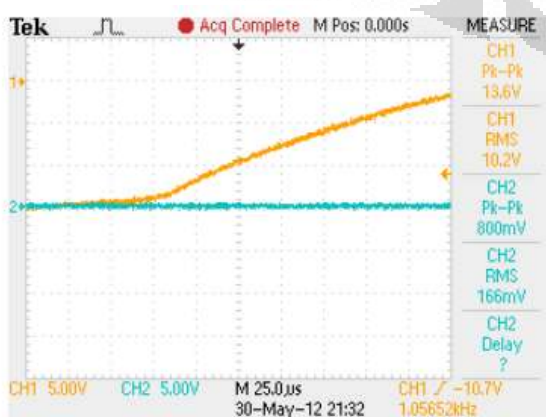
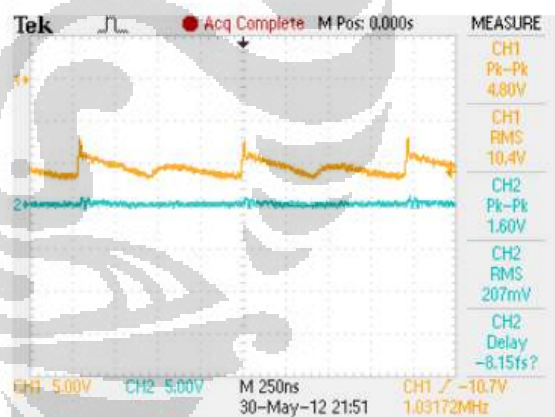
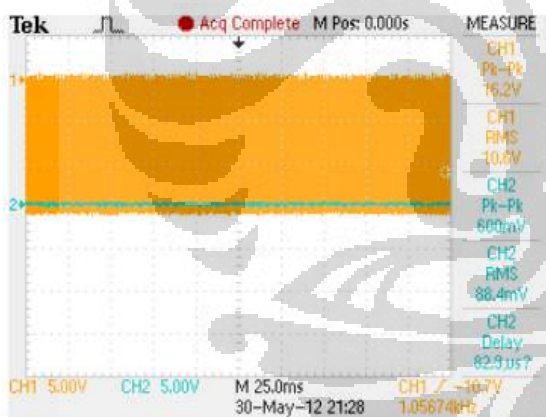
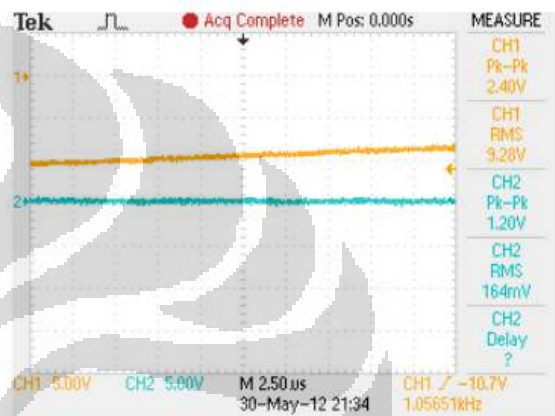
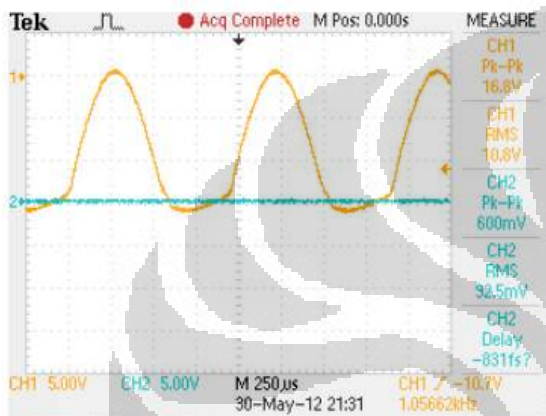
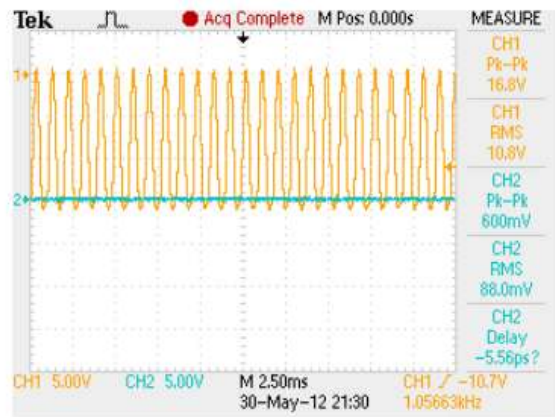
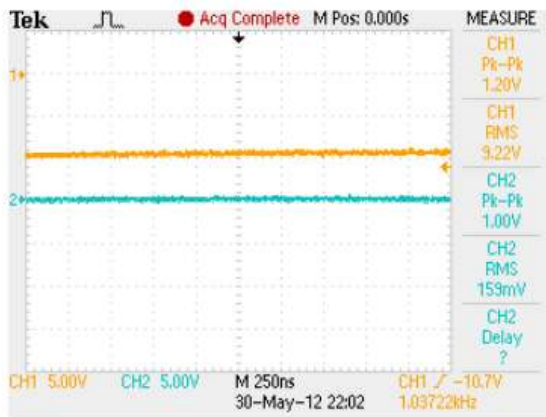




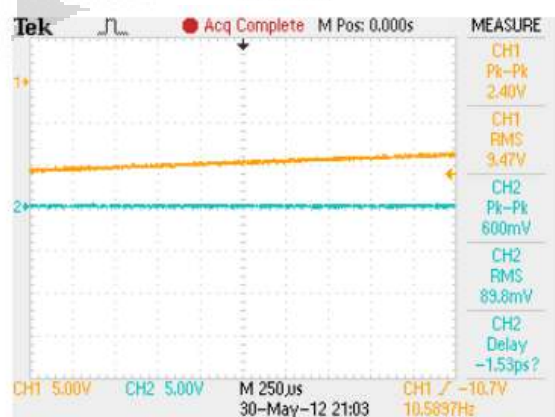
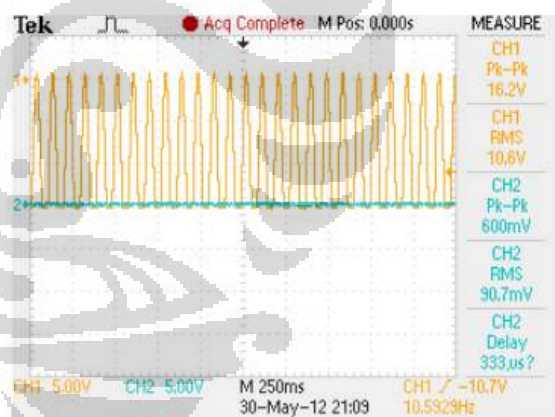
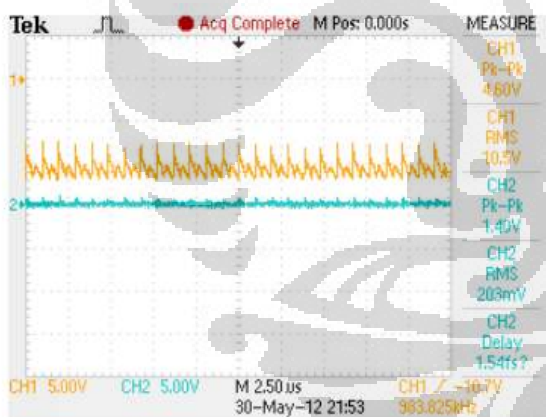
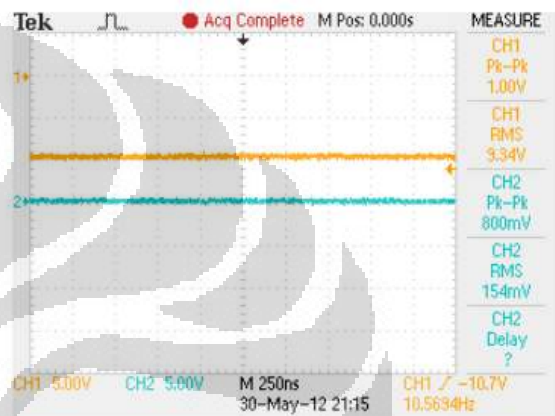
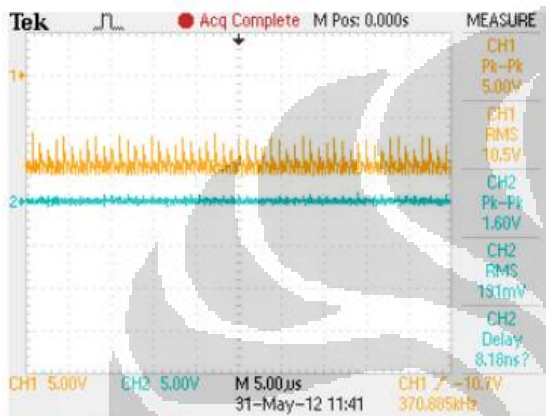
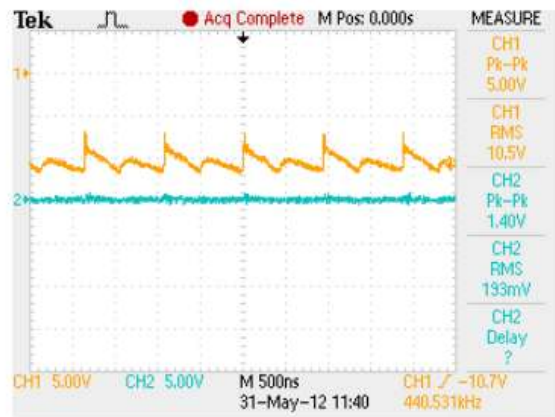
**LAMPIRAN B**  
**DATA SINYAL DENGAN**  
**PEMBEBANAN FUNGSI SINUS**



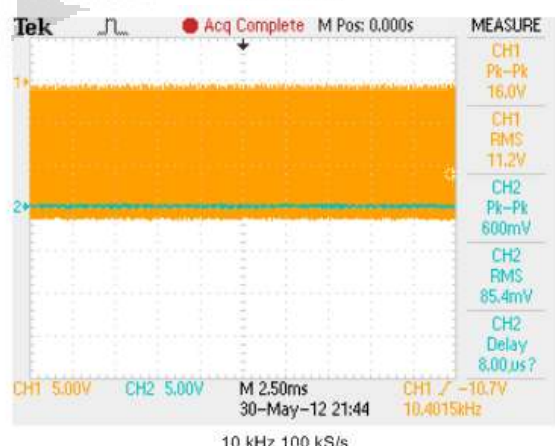
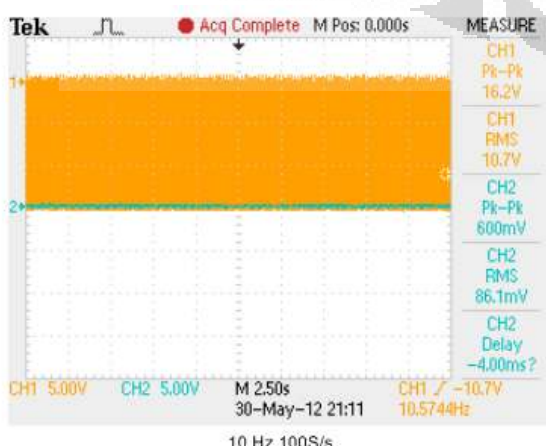
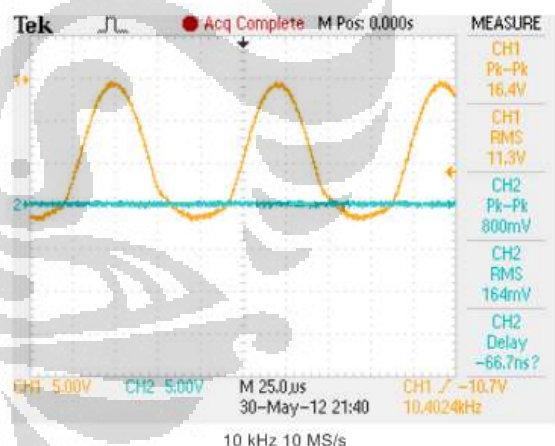
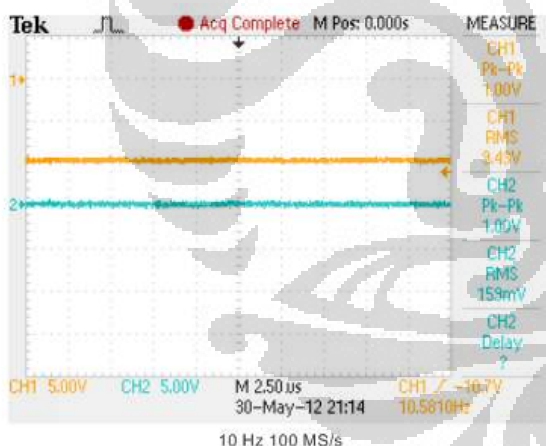
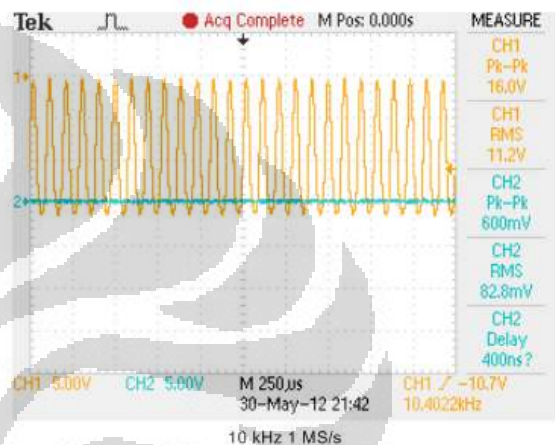
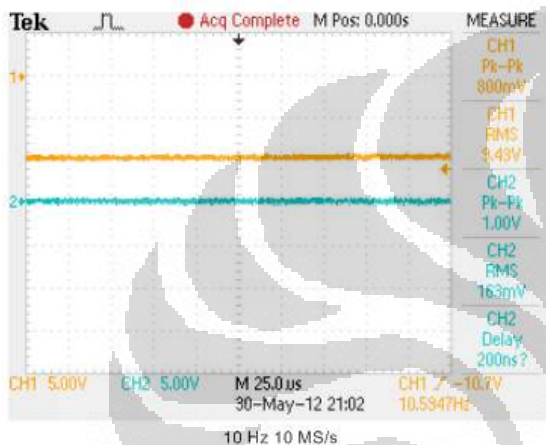
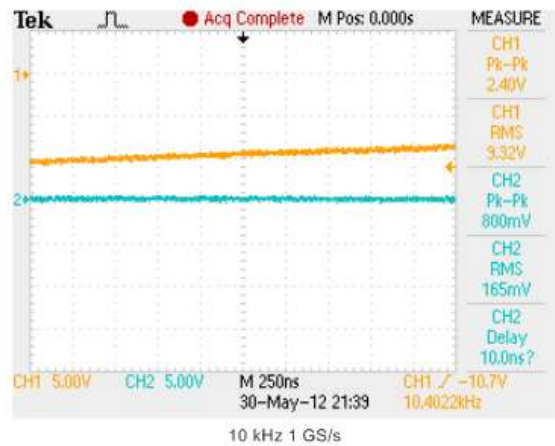
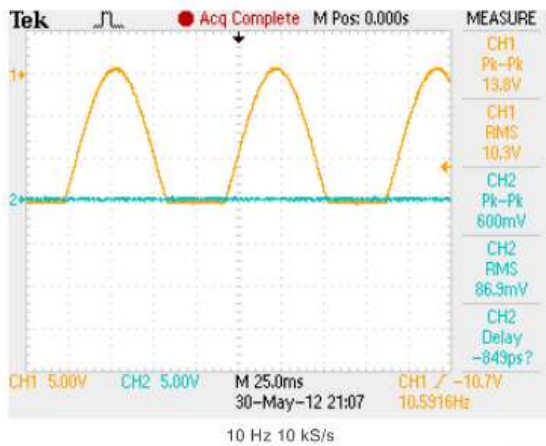


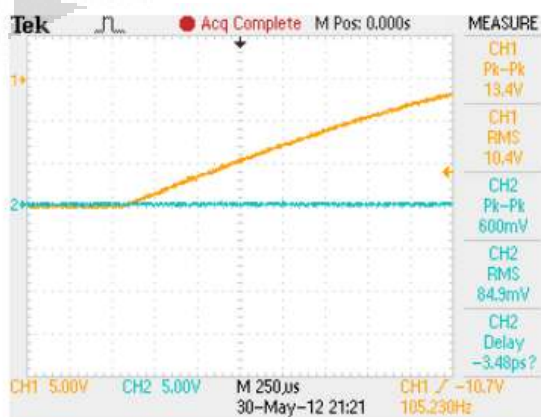
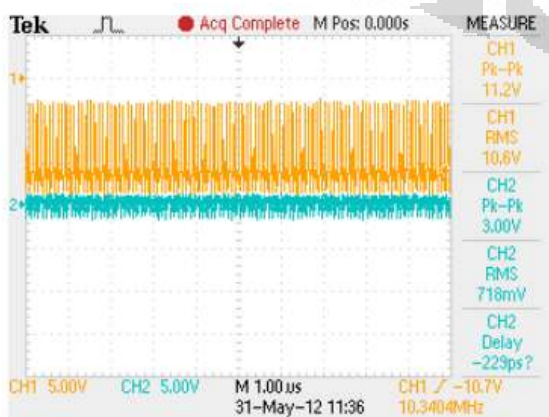
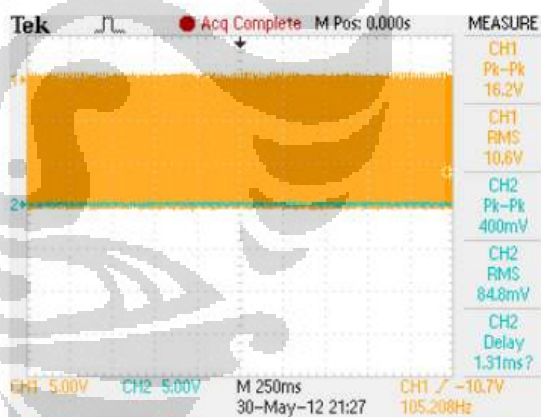
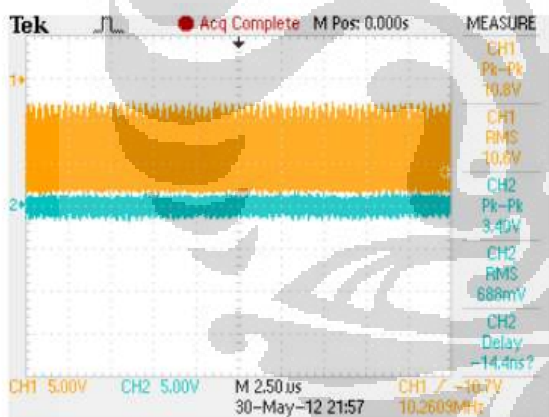
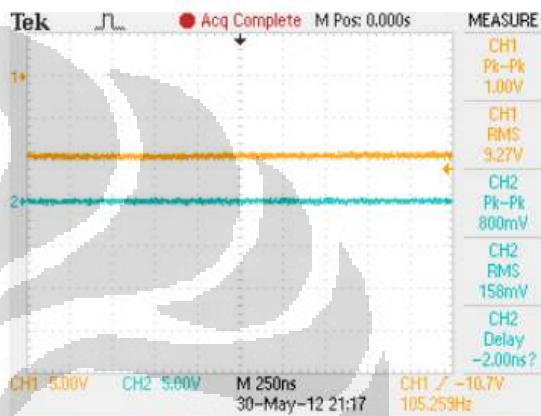
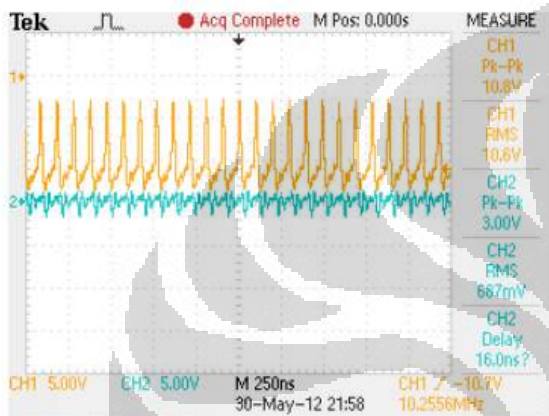
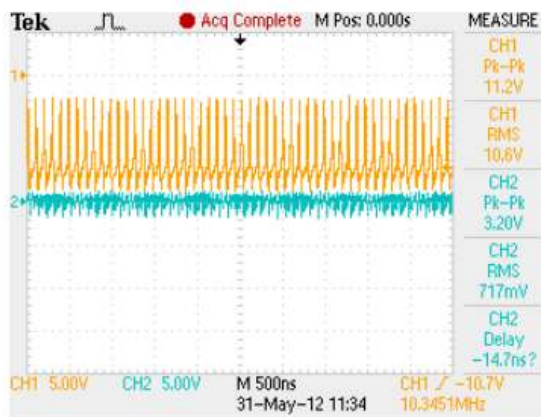
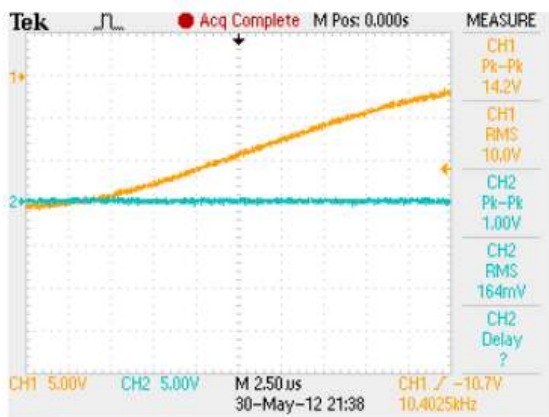




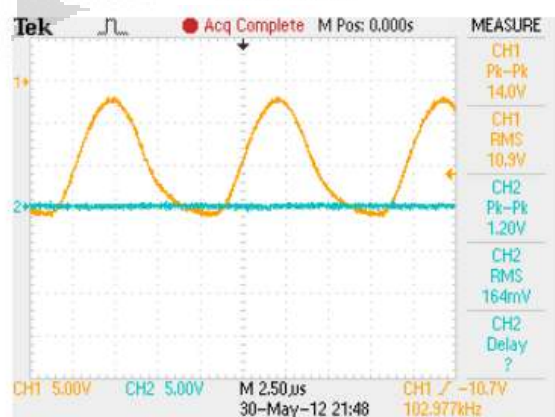
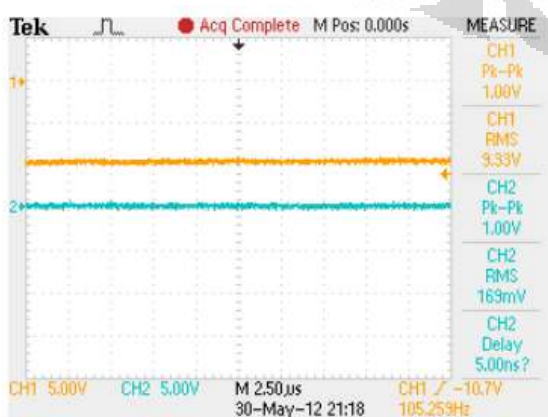
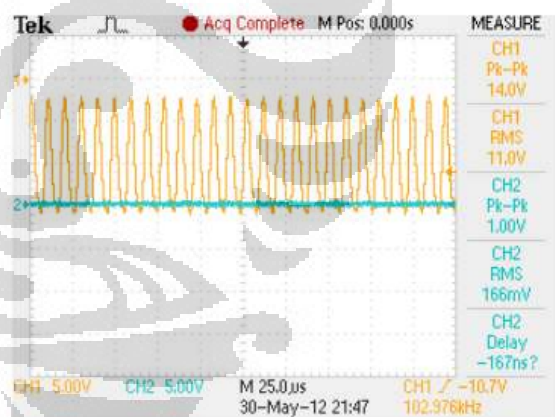
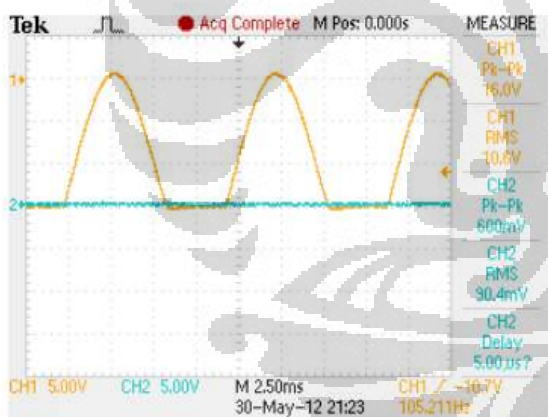
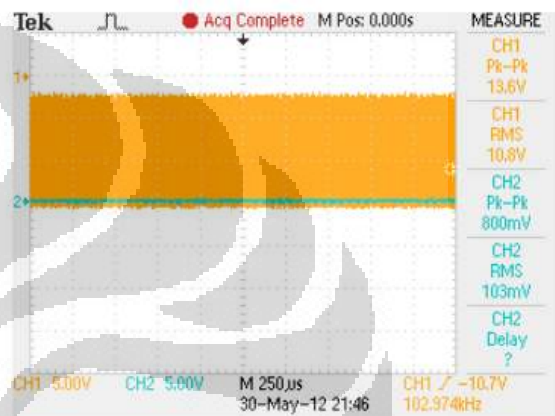
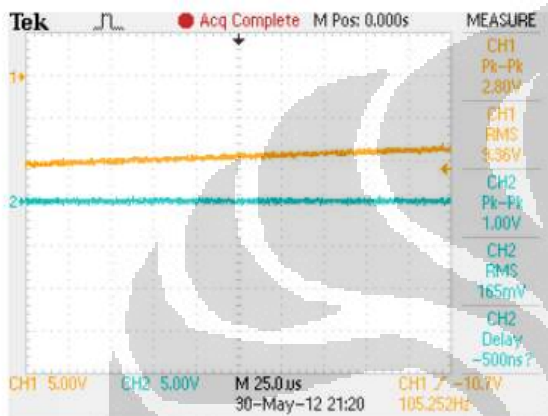
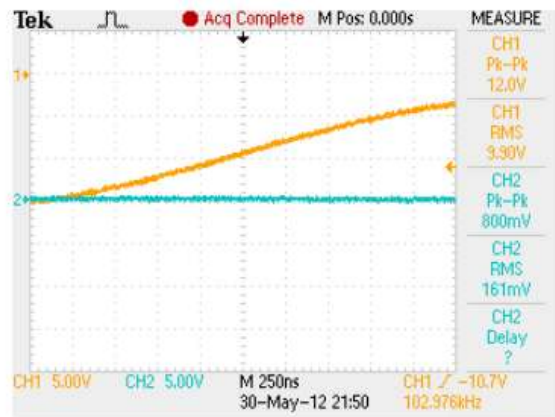
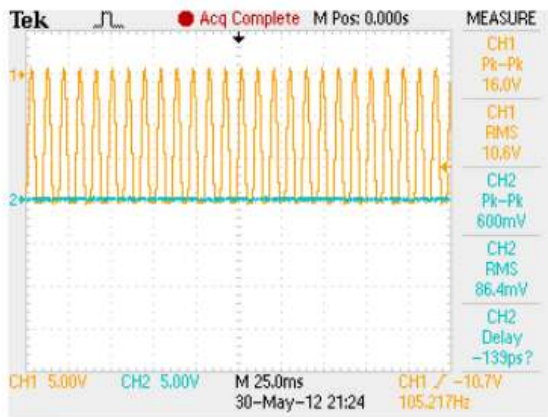


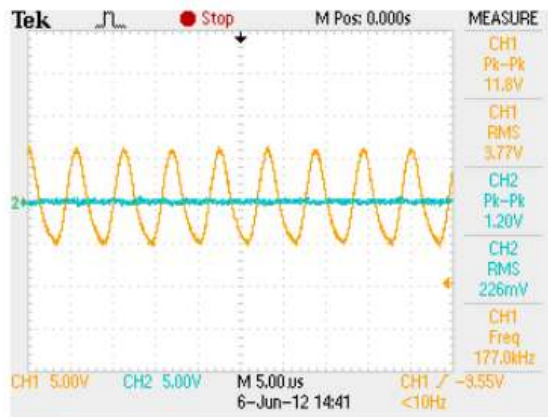




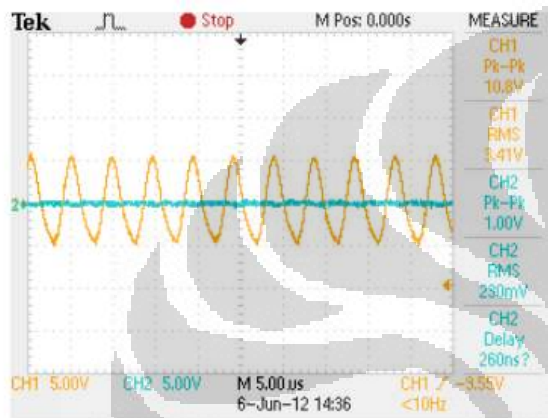








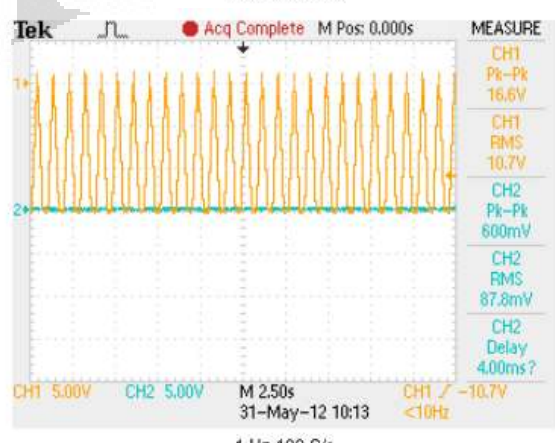
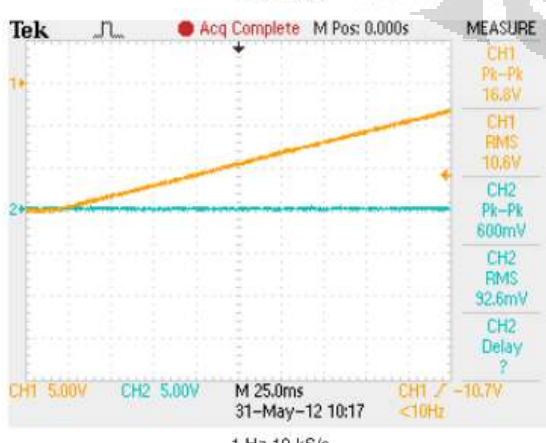
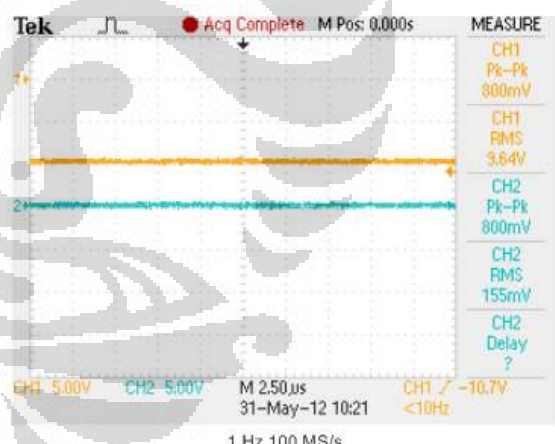
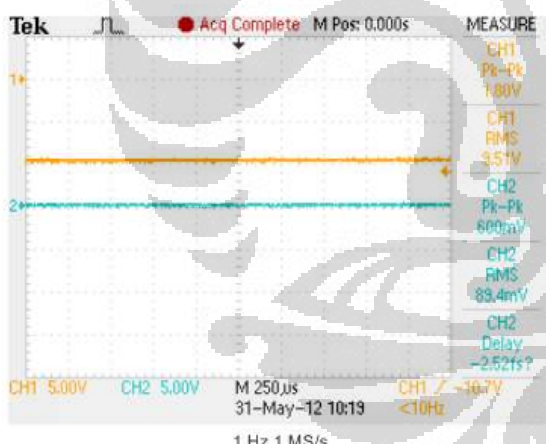
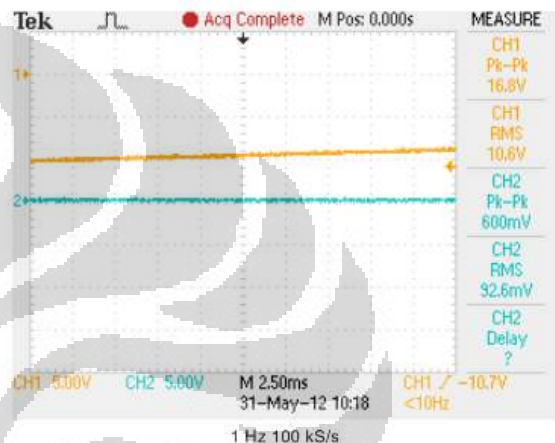
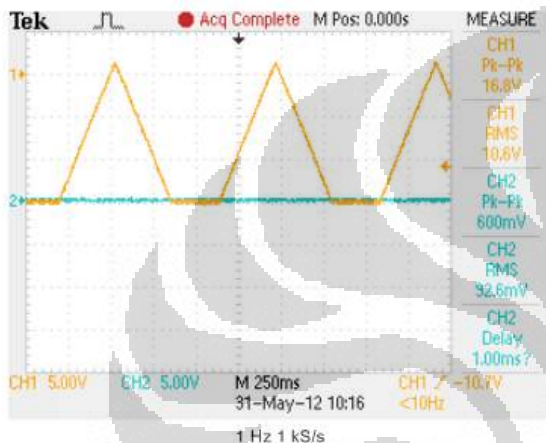
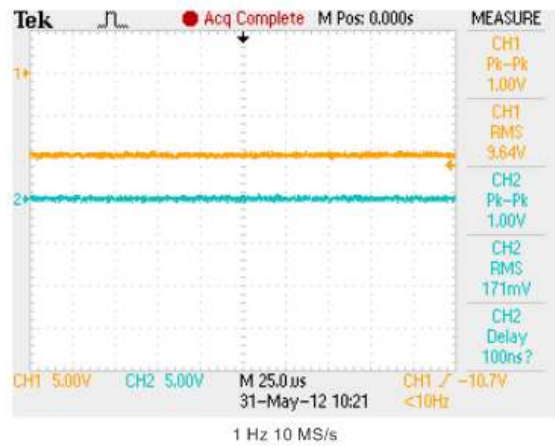
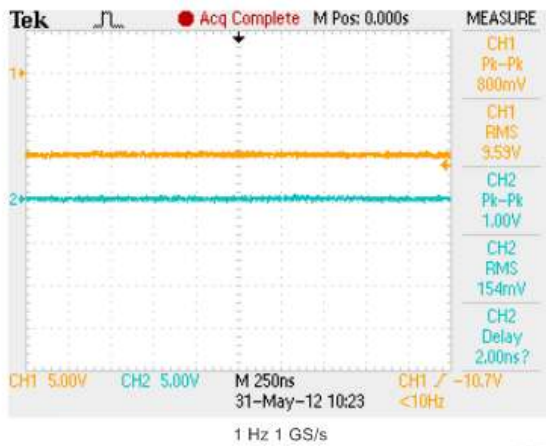
Frekuensi 180 kHz 50 MS/s



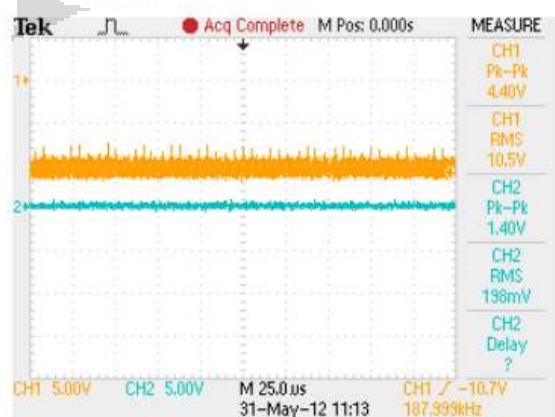
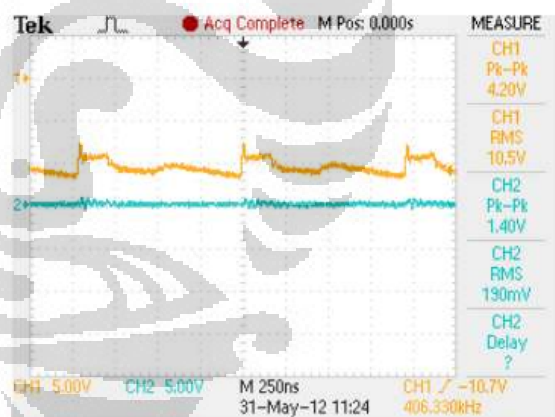
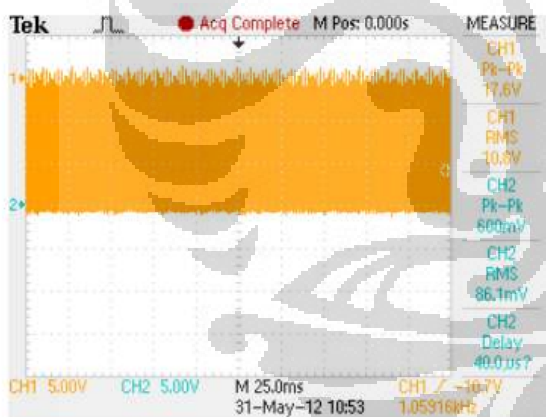
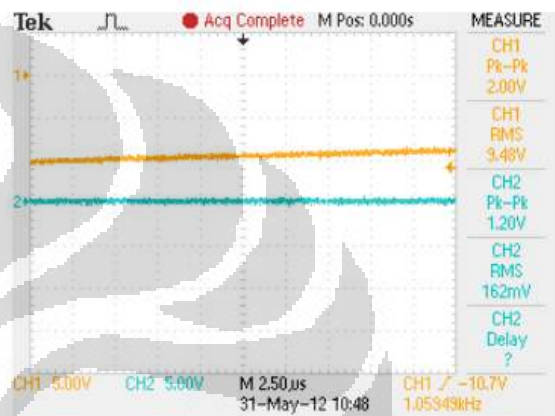
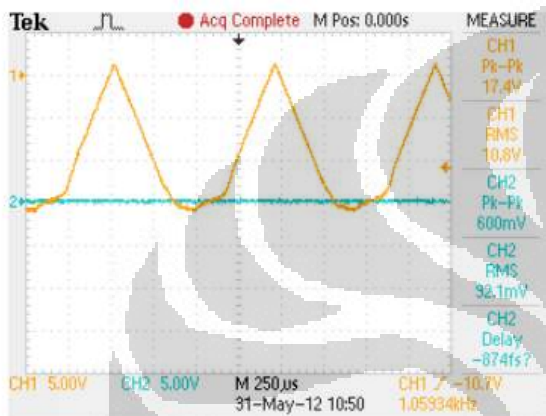
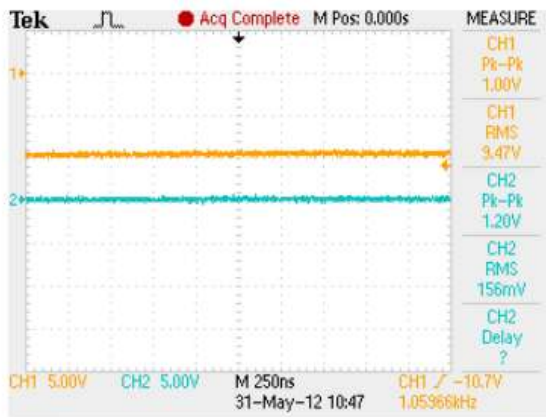
Frekuensi 200 kHz 50 MS/s

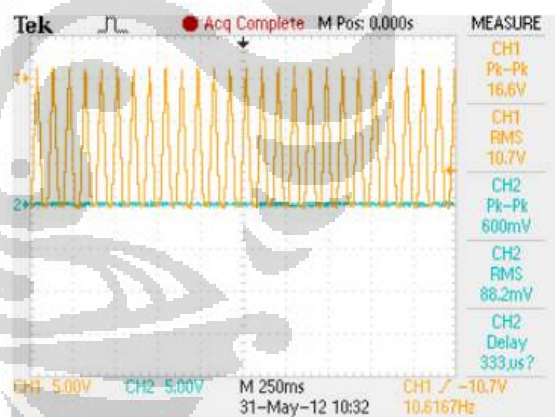
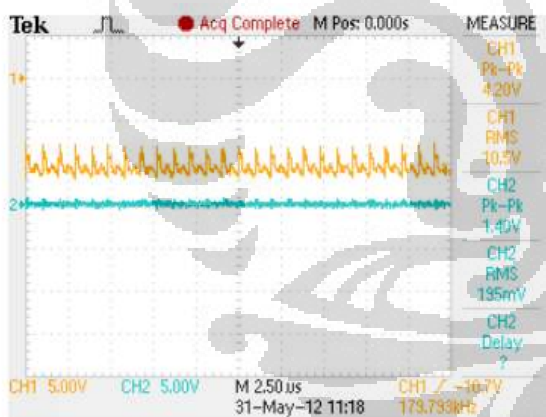
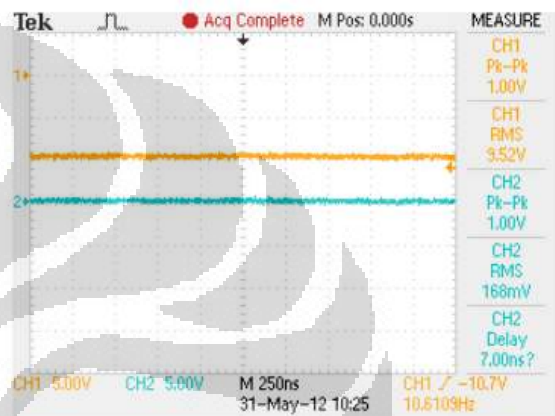
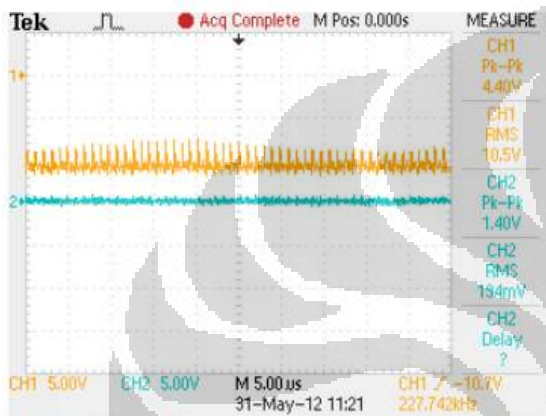
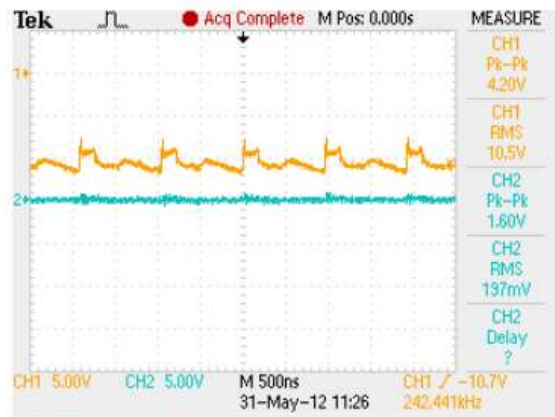
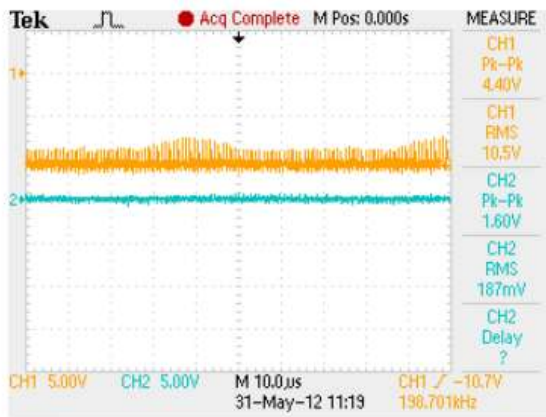


**LAMPIRAN C**  
**DATA SINYAL DENGAN**  
**PEMBEBANAN FUNGSI *TRIANGLE***

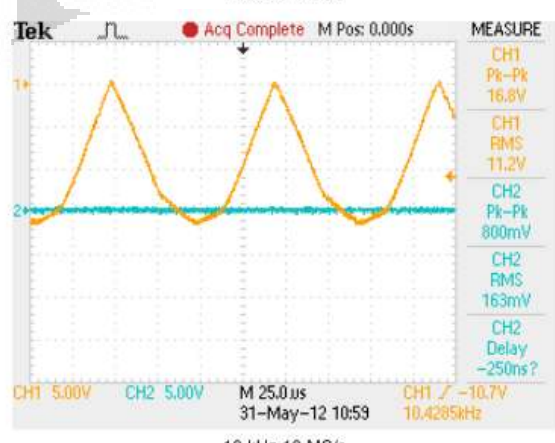
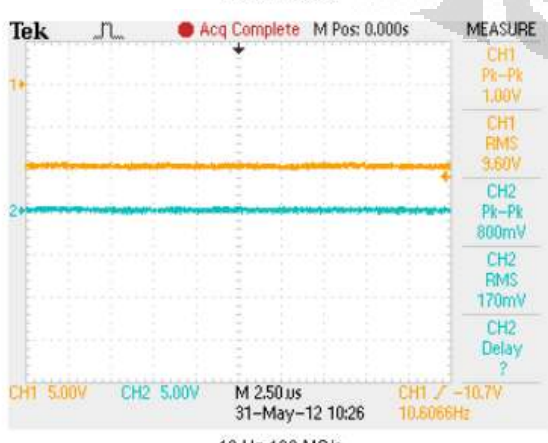
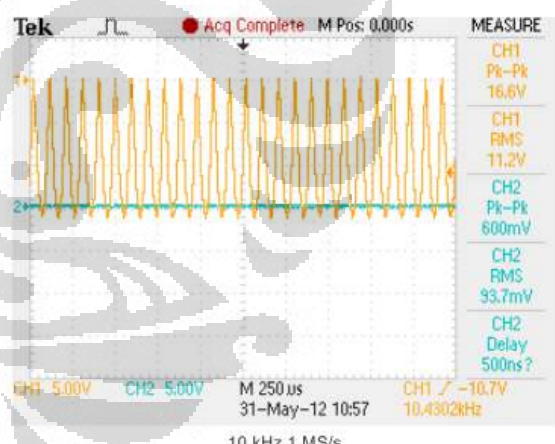
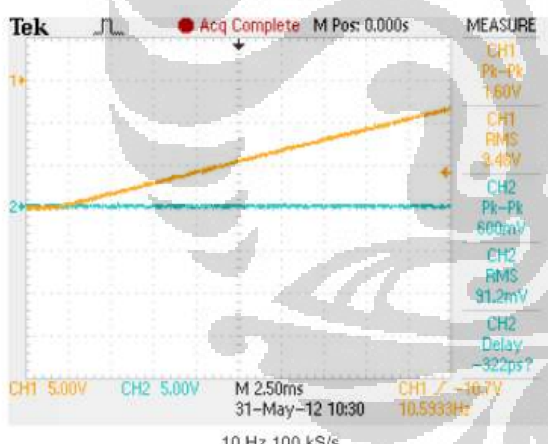
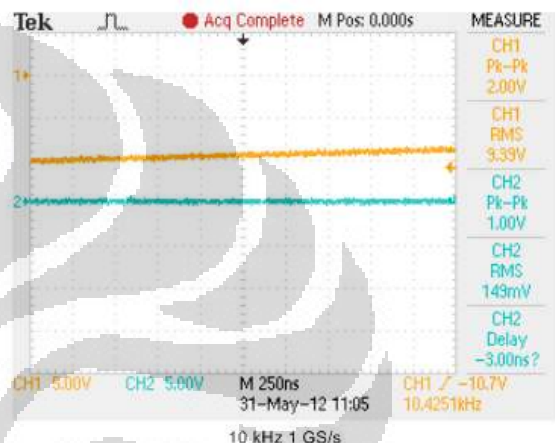
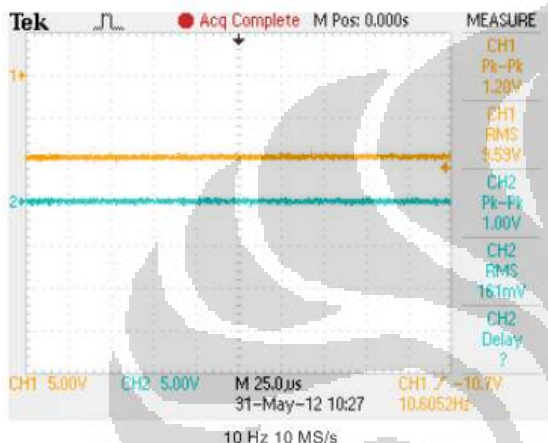
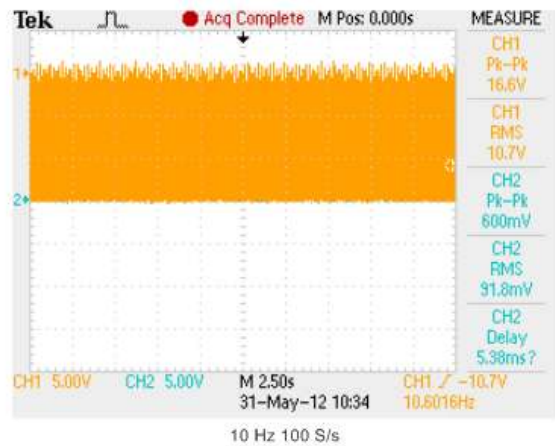
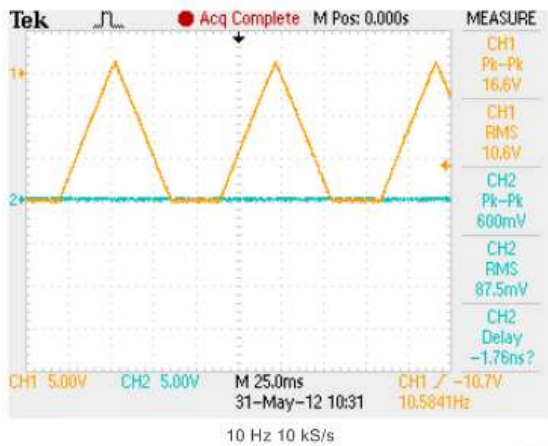


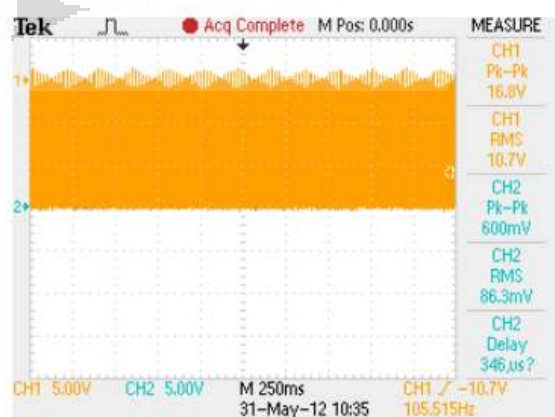
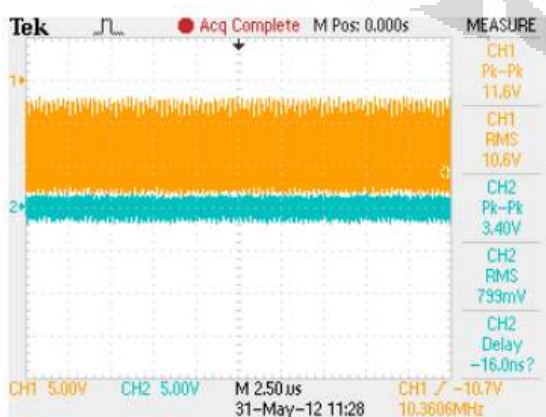
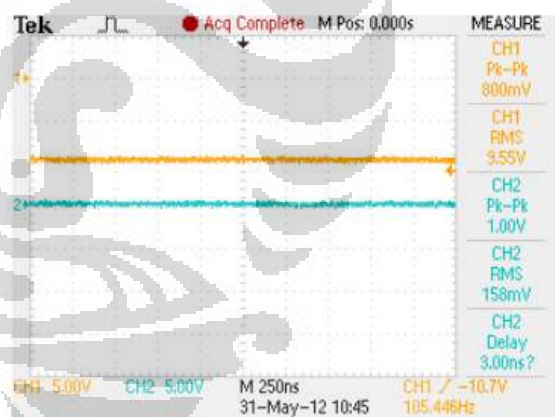
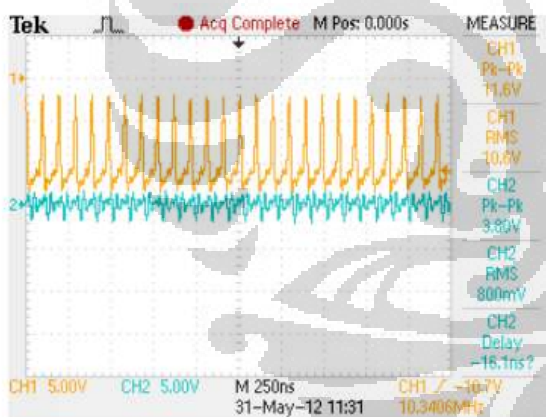
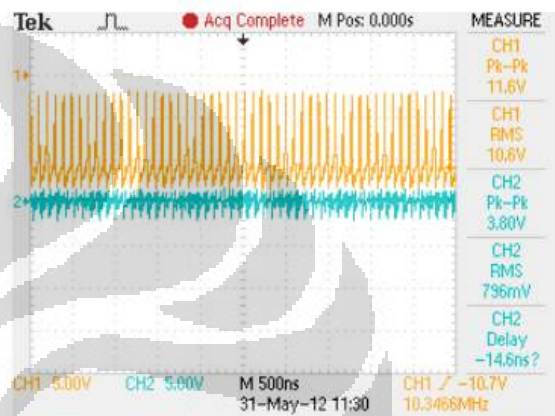
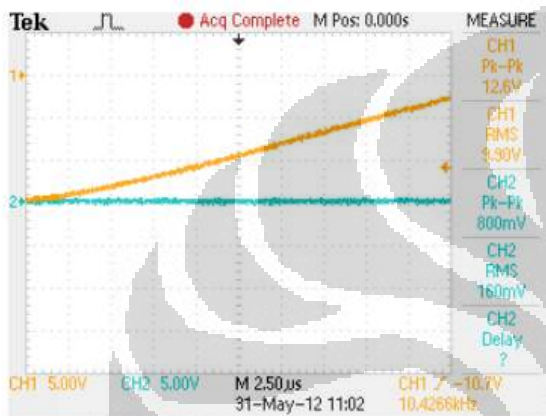
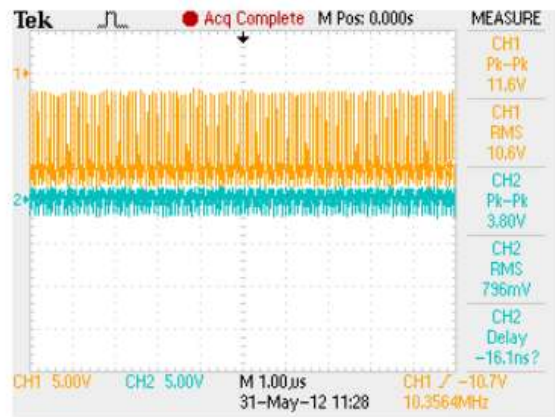
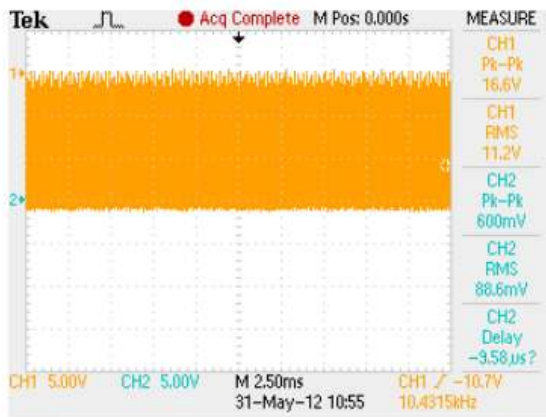




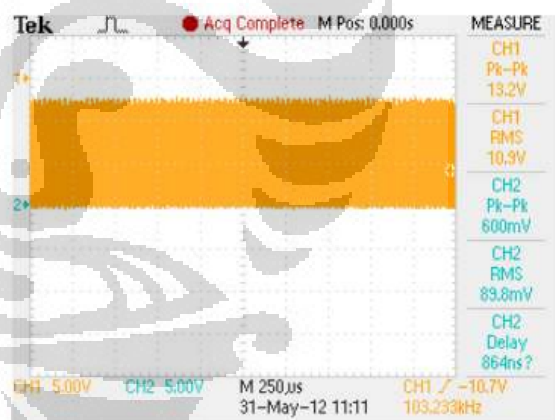
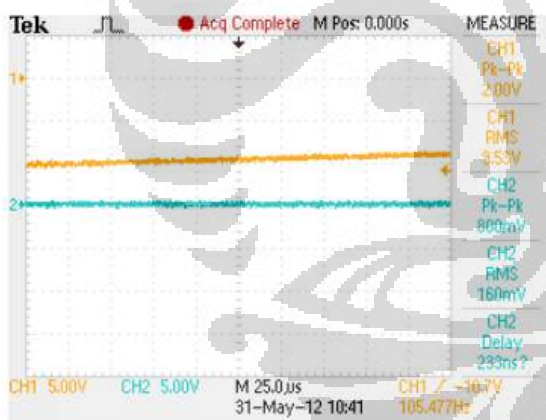
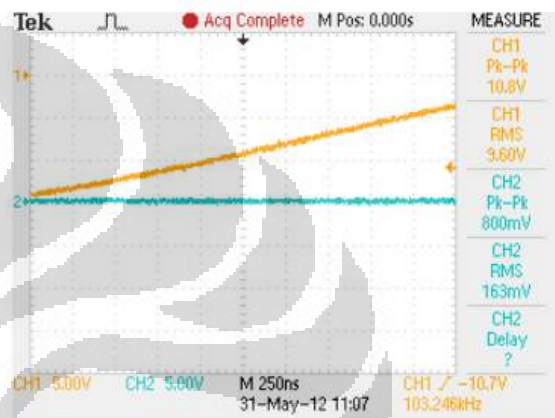
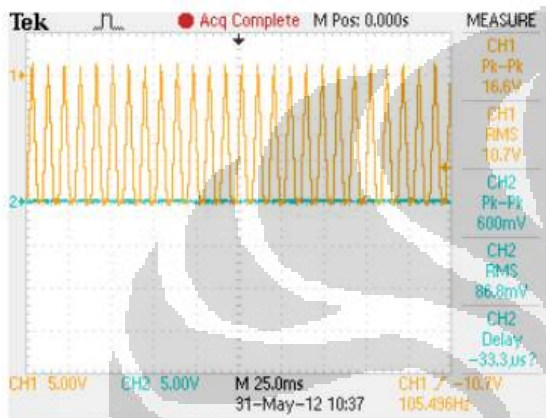
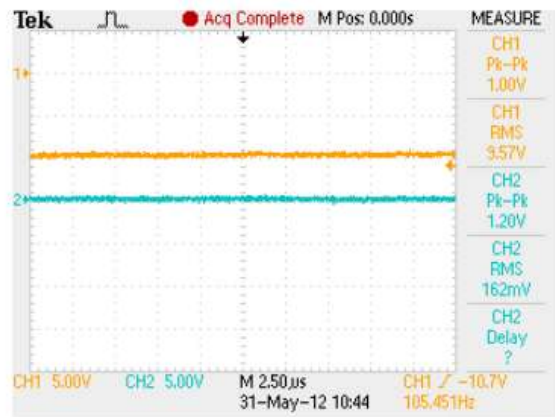
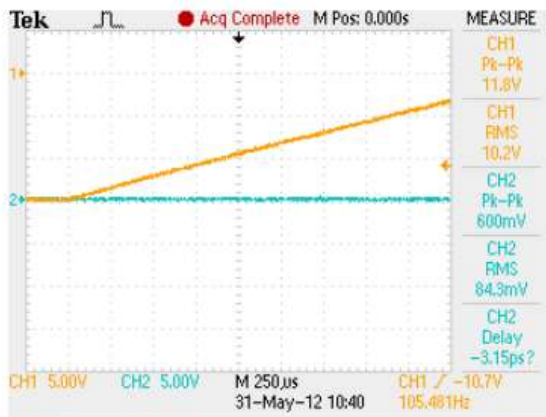


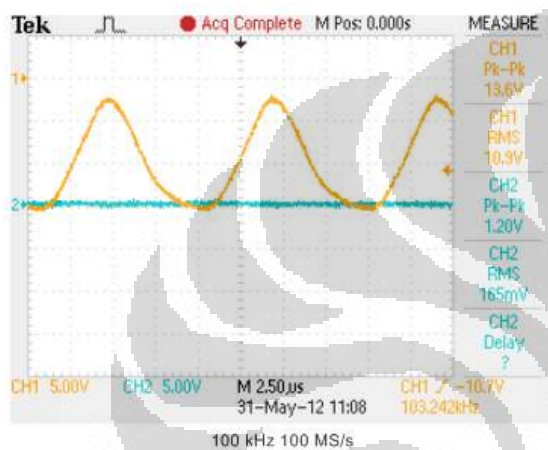
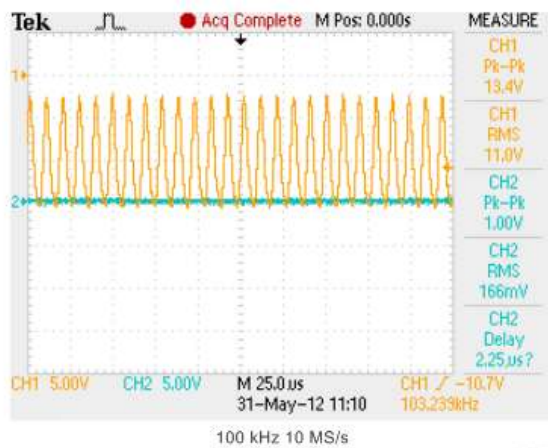


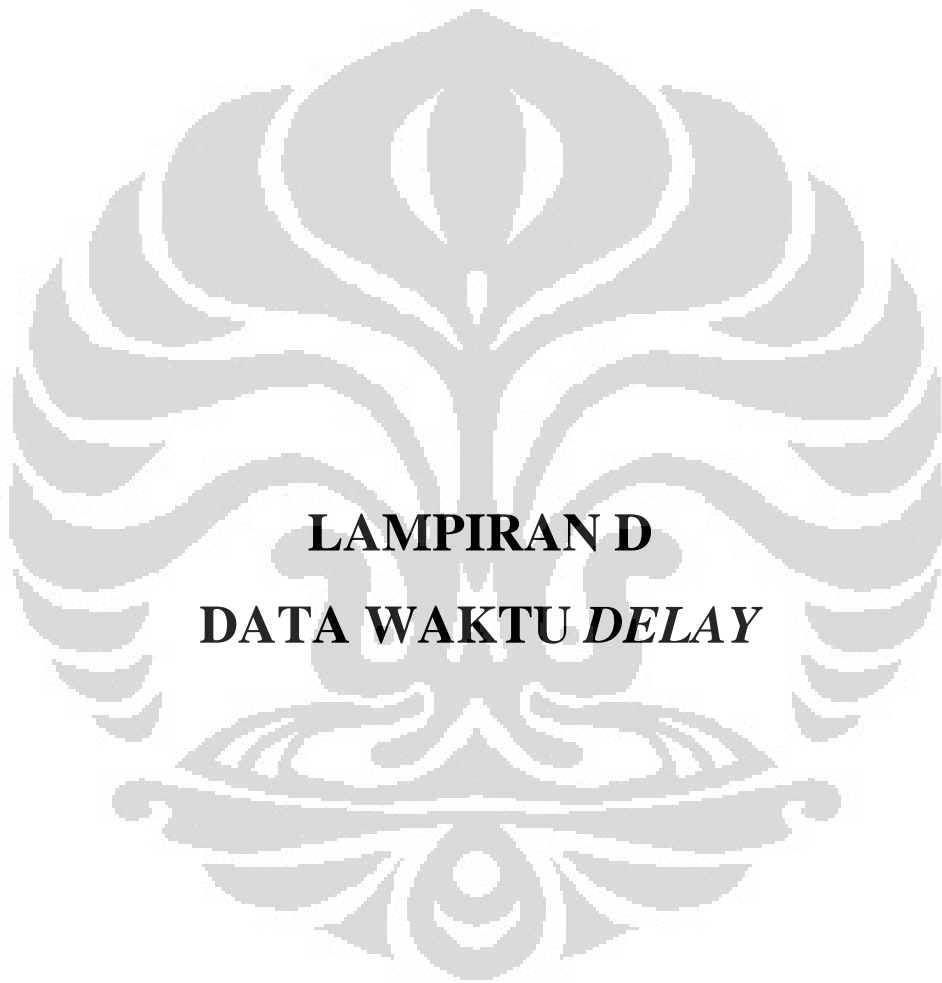


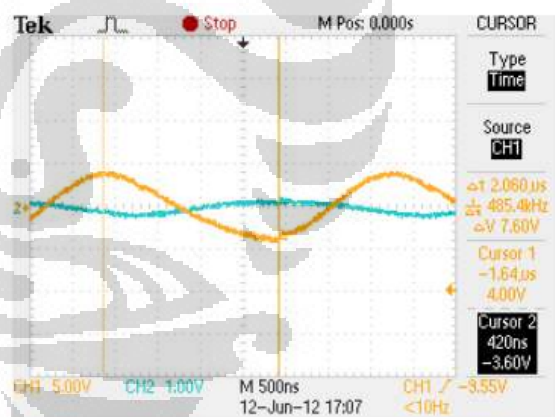
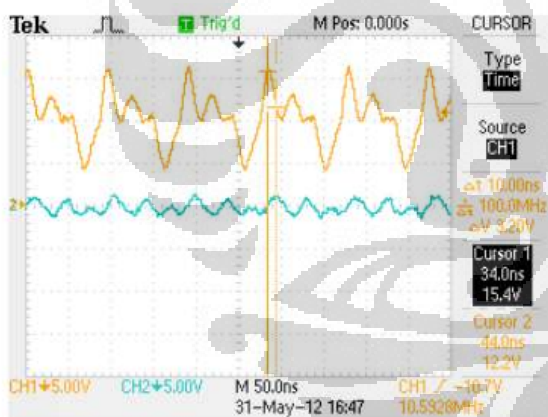
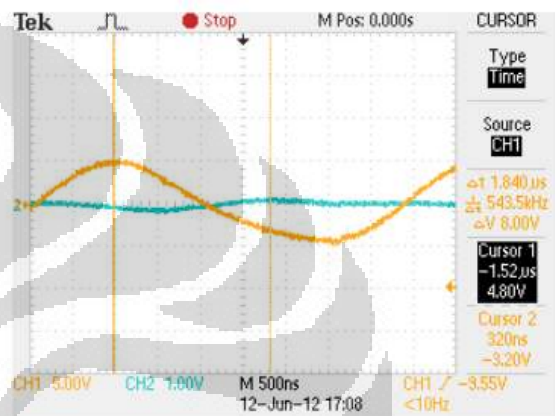
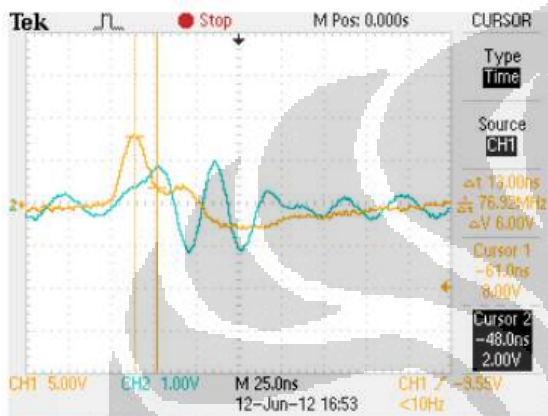
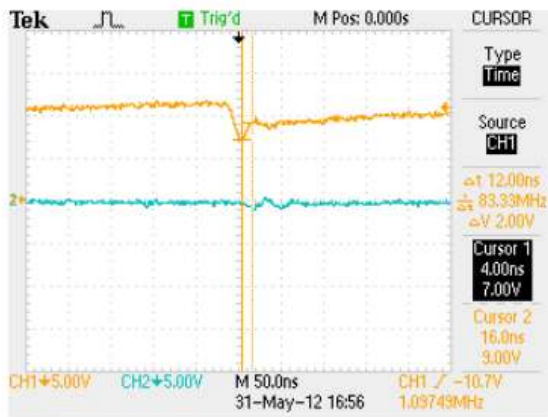




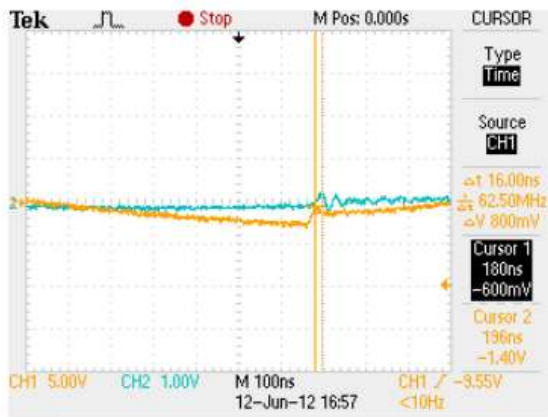




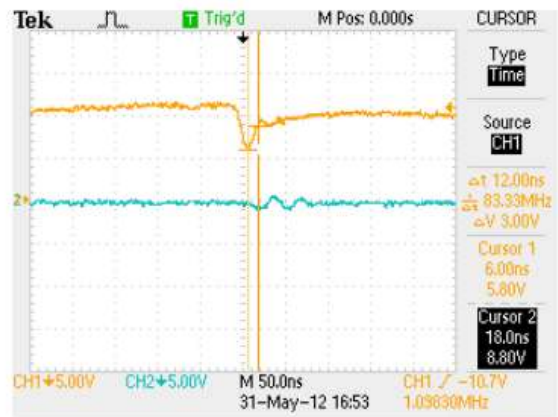




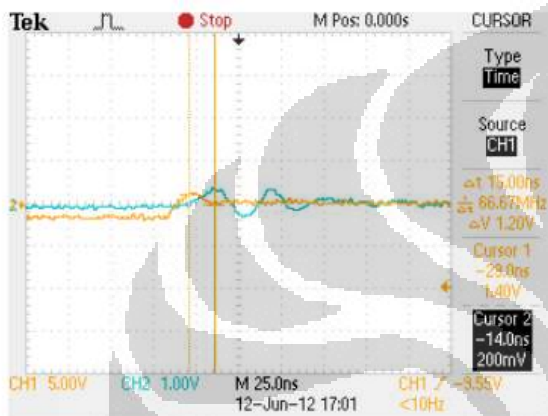




Delay Time Sinus 500 kHz



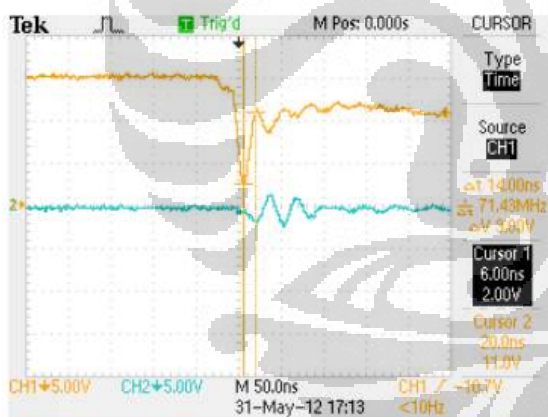
Delay Time Square 1 MHz



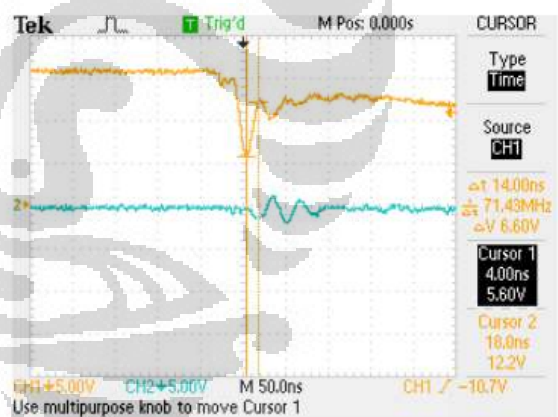
Delay Time Sinus 750 kHz



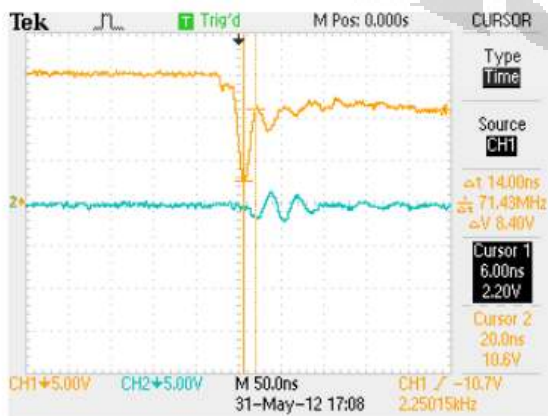
Delay Time Square 10 kHz



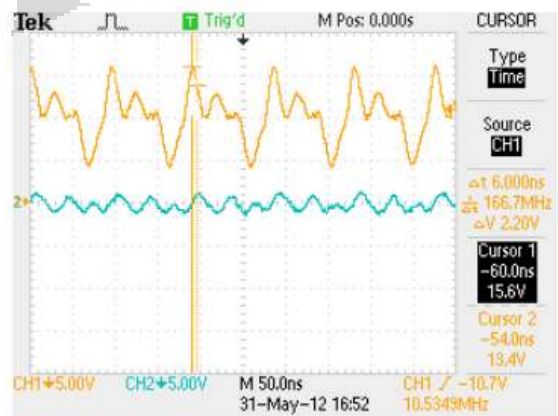
Delay Time Square 1 Hz



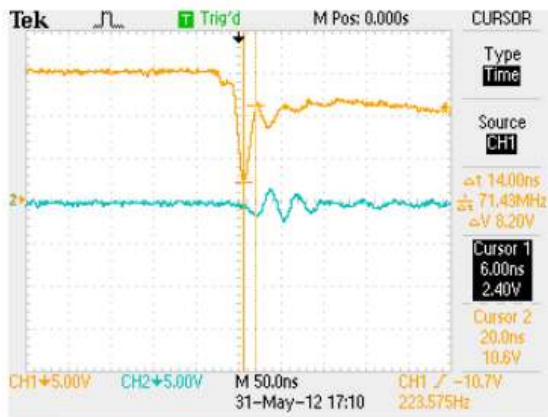
Delay Time Square 10 kHz



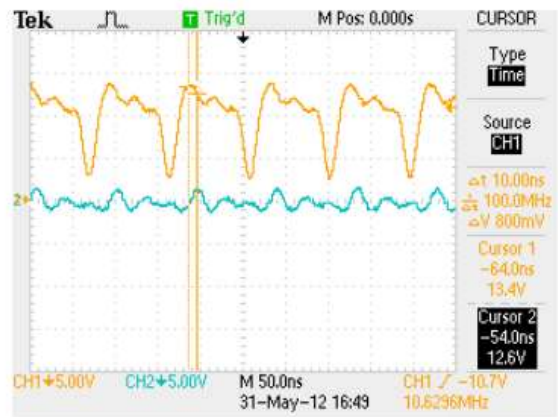
Delay Time Square 1 kHz



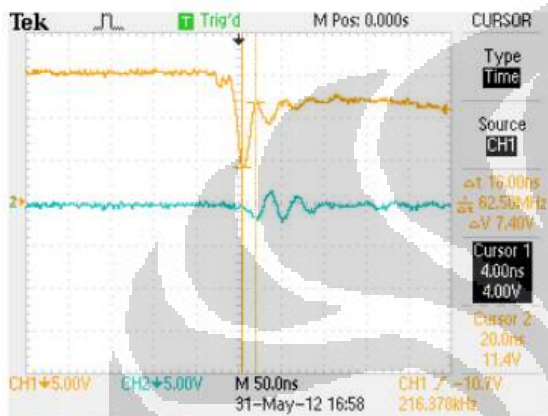
Delay Time Square 10 MHz



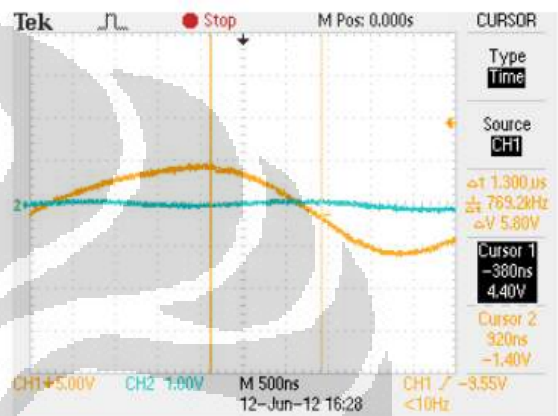
Delay Time Square 100 Hz



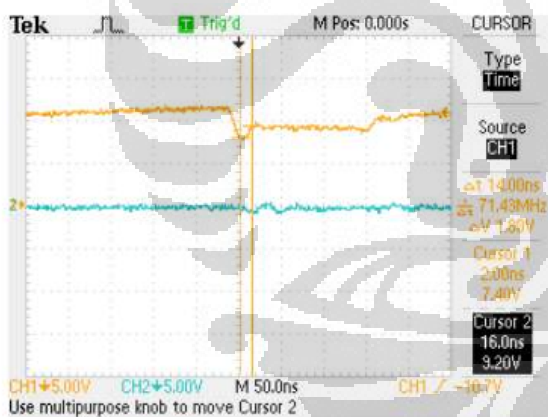
Delay Time Triangle 10 MHz



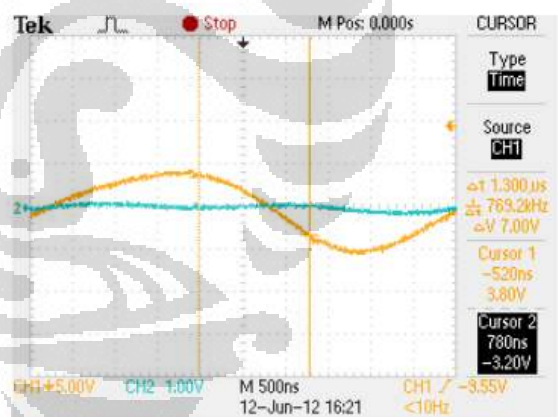
Delay Time Square 100 kHz



Delay Time Triangle 180 kHz



Delay Time Triangle 1 MHz



Delay Time Triangle 200 kHz

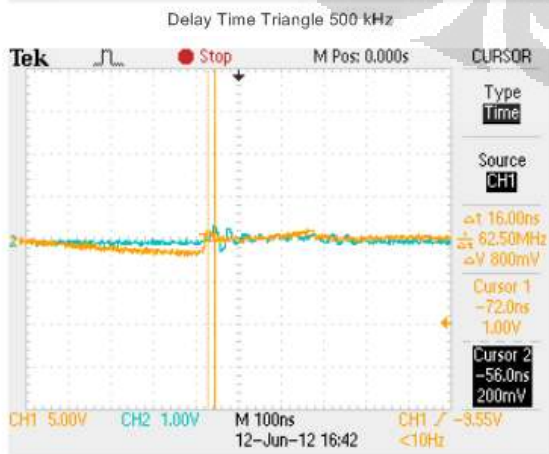
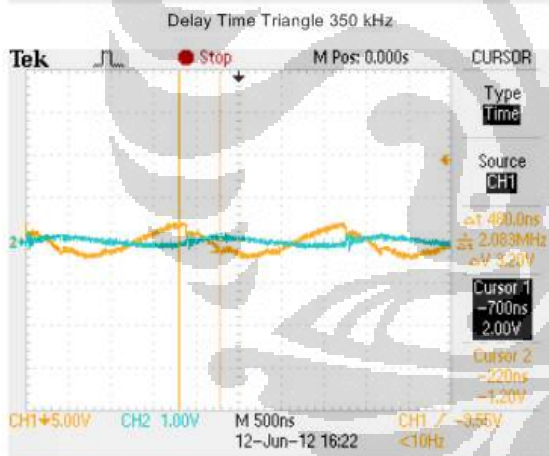
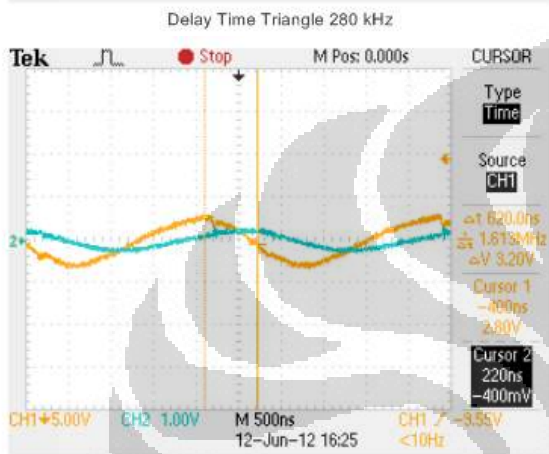
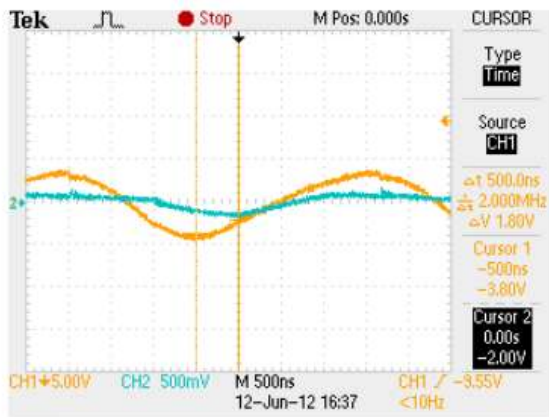


Delay Time Triangle 5 MHz



Delay Time Triangle 220 kHz



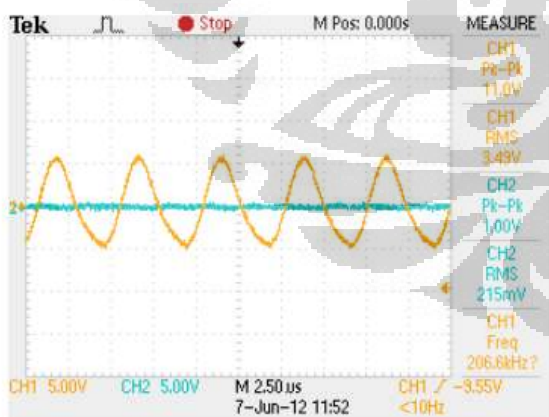
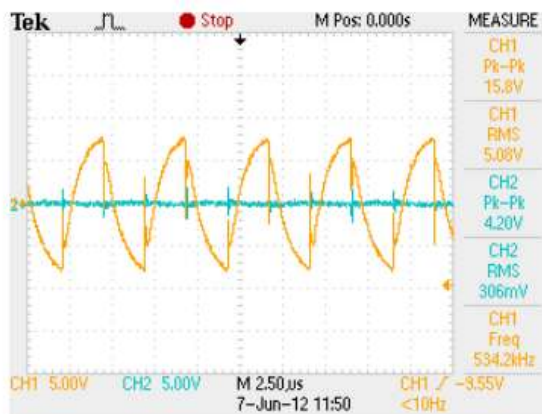




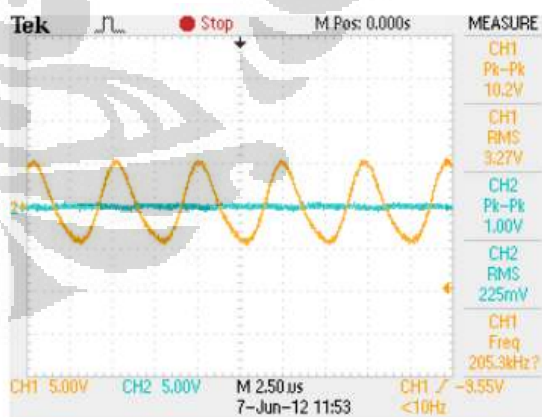
**LAMPIRAN E**  
**DATA SINYAL THRESHOLD**



Threshold



F 200 kHz 100 MS/s



F 200 kHz 100 MS/s



**LAMPIRAN F**  
**PROGRAM KOMPUTASI MATLAB**

## 1. Program Simulasi Sinyal

```

clc
clear all
%%Simulasi Sinyal yang Dibangkitkan
%Sampling time = 100 ms
%Sampling rate = 0.00005 ms
%Amplitudo beda potensial awal = 10 V
%Jenis sinyal = sawtooth
%Frekuensi = 5200 Hz
Sampling_Step=0.00000005;
t=0:0.00000005:0.1;
V=5*sawtooth(200000*2*pi*t,0.5);

%%Displacement Piezoceramic Aktuator
%Koefisien displacement elektromekanik d33 = 0.0000000000005
m/V
THgen=V*0.0000000000005;
dP=0.01; %Luasan intensitas pembebanan aktuator

%%Geometri Pelat
panjang=450;
lebar=30;
tinggi=300;
A=panjang*tinggi/1000000;
I=panjang/1000*((tinggi/1000)^3)/12;

%%Lokasi Sumber
xsumber=30;
ysumber=0;

%%Lokasi Sensor 1
x=450;
y=30;
L=sqrt((x-xsumber)^2+(y-ysumber)^2)/1000;

%%Lokasi Sensor 2
% x2=400;
% y2=0;
% L2=sqrt((x2-xsumber)^2+(y2-ysumber)^2)/1000;

%%Lokasi Sensor 3
% x3=300;
% y3=0;
% L3=sqrt((x3-xsumber)^2+(y3-ysumber)^2)/1000;

%%Lokasi Sensor 4
% x4=200;
% y4=0;
% L4=sqrt((x4-xsumber)^2+(y4-ysumber)^2)/1000;

%%Properti Mekanik Pelat
E=2000000000000;
rho=7900;
G=800000000000;
v=0.3;

```

```

%%Perhitungan Kecepatan Penjalaran Gelombang
Eef=(1-v)*E/((1+v)*(1-2*v));
cp=sqrt(Eef/rho);
cs=2*pi*sqrt(5*G*1000000/(rho*panjang*tinggi));
cr=(0.862+1.14*v)/(1+v)*cs;
cbody=sqrt(cs^2+cp^2);
tdelay=L/cbody;
tdelayR=(x-xsumber)/cr/1000;
% tdelay2=L2/cbody;
% tdelayR2=(x2-xsumber)/cr/1000;
% tdelay3=L3/cbody;
% tdelayR3=(x3-xsumber)/cr/1000;
% tdelay4=L4/cbody;
% tdelayR4=(x4-xsumber)/cr/1000;

%%Perhitungan Frekuensi Pribadi Pelat
k1=E*A*1000/lebar;
k2=192*E*I*1000/lebar;
m=(panjang/1000)*(lebar/1000)*(tinggi/1000)*rho;
np1=sqrt(k1/m);
np2=sqrt(k2/m);
r1=(5200*2*pi)/np1;
r2=(5200*2*pi)/np2;
X1=10*0.0000000005/sqrt(((1-r1^2)^2));
X2=10*0.0000000005/sqrt(((1-r2^2)^2));

%%Perhitungan Displacement Piezoceramic Sensor
% b=0.002; %Setengah siklus pada pelat
% chi=0.0003; %Nilai koefisien peredaman
Rasio=(L/dP); %Lokasi Sensor 1 relatif terhadap luasan
intensitas pembebanan
% RasioR=sqrt(L/dP); %Lokasi Sensor 1 relatif terhadap luasan
intensitas pembebanan Rayleigh
% Rasio2=(L2/dP)^2; %Lokasi Sensor 2 relatif terhadap luasan
intensitas pembebanan
% RasioR2=sqrt(L2/dP); %Lokasi Sensor 2 relatif terhadap
luasan intensitas pembebanan Rayleigh
% Rasio3=(L3/dP)^2; %Lokasi Sensor 3 relatif terhadap luasan
intensitas pembebanan
% RasioR3=sqrt(L3/dP); %Lokasi Sensor 3 relatif terhadap
luasan intensitas pembebanan Rayleigh
% Rasio4=(L4/dP)^2; %Lokasi Sensor 1 relatif terhadap luasan
intensitas pembebanan
% RasioR4=sqrt(L4/dP); %Lokasi Sensor 1 relatif terhadap
luasan intensitas pembebanan Rayleigh
THacq1B=THgen/Rasio; %Displacement Sensor 1 akibat penjalaran
body wave
% THacq1R=THgen/RasioR; %Displacement Sensor 1 akibat
penjalaran Rayleigh wave
% THacq2B=THgen/Rasio2; %Displacement Sensor 2 akibat
penjalaran body wave
% THacq2R=THgen/RasioR2; %Displacement Sensor 2 akibat
penjalaran Rayleigh wave
% THacq3B=THgen/Rasio3; %Displacement Sensor 3 akibat
penjalaran body wave
% THacq3R=THgen/RasioR3; %Displacement Sensor 3 akibat
penjalaran Rayleigh wave

```

```

% THAcq4B=THgen/Rasio4; %Displacement Sensor 4 akibat
penjalaran body wave
% THAcq4R=THgen/RasioR4; %Displacement Sensor 4 akibat
penjalaran Rayleigh wave
%
%%Perhitungan Delay Sensor 1
delay=tdelay*1/Sampling_Step; %Elemen vektor delay sensor 1
Body Wave
% delayR=tdelayR*1/Sampling_Step; %Elemen vektor delay sensor
1 Rayleigh Wave

for t1=1:77
    THAcq01B(t1)=0;
end
% for t2=1:83
%     THAcq01R(t2)=0;
% end
THAcqB=[THAcq01B THAcq1B];
% THAcqR=[THAcq01R THAcq1R(1:1999995)];
THAcq1=THAcqB;
%+THAcqR; %Respon Dinamik Sensor 1
%
%%Perhitungan Delay Sensor 2
% delay2=tdelay2*1/Sampling_Step; %Elemen vektor delay sensor
2 Body Wave
% delayR2=tdelayR2*1/Sampling_Step;%Elemen vektor delay sensor
2 Rayleigh Wave
%
% for t1=1:66
%     THAcq02B(t1)=0;
% end
% for t2=1:71
%     THAcq02R(t2)=0;
% end
% THAcqB2=[THAcq02B THAcq2B];
% THAcqR2=[THAcq02R THAcq2R(1:1999996)];
% THAcq2=THAcqB2+THAcqR2; %Respon Dinamik Sensor 2
%
%%Perhitungan Delay Sensor 3
% delay3=tdelay3*1/Sampling_Step; %Elemen vektor delay sensor
3 Body Wave
% delayR3=tdelayR3*1/Sampling_Step; %Elemen vektor delay
sensor 3 Rayleigh Wave
%
% for t1=1:66
%     THAcq03B(t1)=0;
% end
% for t2=1:71
%     THAcq03R(t2)=0;
% end
% THAcqB3=[THAcq03B THAcq3B];
% THAcqR3=[THAcq03R THAcq3R(1:1999996)];
% THAcq3=THAcqB3+THAcqR3; %Respon Dinamik Sensor 3
%
%%Perhitungan Delay Sensor 4
% delay4=tdelay4*1/Sampling_Step; %Elemen vektor delay sensor
4 Body Wave
% delayR4=tdelayR4*1/Sampling_Step; %Elemen vektor delay
sensor 4 Rayleigh Wave

```

```

%
% for t1=1:66
%     THacq04B(t1)=0;
% end
% for t2=1:71
%     THacq04R(t2)=0;
% end
% THacqB4=[THacq04B THacq4B];
% THacqR4=[THacq04R THacq4R(1:1999996)];
% THacq4=THacqB4+THacqR4; %Respon Dinamik Sensor 4
% % ts=0:0.00000005:0.00025;
% % figure
% % plot(ts,THacqB(1:5001),'-r'), hold on
% % plot(ts,THacqB2(1:5001),'-b'), hold on
% % plot(ts,THacqB3(1:5001),'-g'), hold on
% % plot(ts,THacqB4(1:5001),'-y'), hold on
% % figure
% % plot(ts,THacqR(1:5001),'-r'), hold on
% % plot(ts,THacqR2(1:5001),'-b'), hold on
% % plot(ts,THacqR3(1:5001),'-g'), hold on
% % plot(ts,THacqR4(1:5001),'-y'), hold on
%% Beda Potensial yang Didapat dari Sensor 1
g33=0.022; %Koefisien Elektromekanik g33=0.022 Vm/N
E=100000000000; %Modulus Elastisitas Piezoceramic E= 100 GPa
Vacq1=THacq1*g33*E;
%
% %%Beda Potensial yang Didapat dari Sensor 2
g33=0.022; %Koefisien Elektromekanik g33=0.022 Vm/N
E=100000000000; %Modulus Elastisitas Piezoceramic E= 100 GPa
Vacq2=THacq2*g33*E;
%
% %%Beda Potensial yang Didapat dari Sensor 3
g33=0.022; %Koefisien Elektromekanik g33=0.022 Vm/N
E=100000000000; %Modulus Elastisitas Piezoceramic E= 100 GPa
Vacq3=THacq3*g33*E;
%
% %%Beda Potensial yang Didapat dari Sensor 4
g33=0.022; %Koefisien Elektromekanik g33=0.022 Vm/N
E=100000000000; %Modulus Elastisitas Piezoceramic E= 100 GPa
Vacq4=THacq4*g33*E;
%
t3=0:0.00000005:0.10000385;
Vgen=5*sawtooth(20000*2*pi*t3,0.5); %Revisi Waktu Kerja Beda
Potensial yang dibangkitkan akibat delay
THgen=Vgen*0.000000000005; %Revisi Displacement Piezoceramic
Aktuator yang dibangkitkan akibat delay
%
% t4=0:0.00000005:0.1000033;
Noise=0.01*sin(50*2*pi*t3); %Noise Akibat Elektrostatik
% Noise2=0.01*sin(50*2*pi*t4); %Noise Akibat Elektrostatik
Vacq1N=Vacq1; %Beda Potensial Sensor 1 dengan tambahan noise
dari elektrostatik
Vacq1WN=awgn(Vacq1N,100); %Beda Potensial Sensor 1 dengan
tambahan White Gaussian noise dengan SNR 100
% Vacq2N=Vacq2+Noise2; %Beda Potensial Sensor 2 dengan
tambahan noise dari elektrostatik
% Vacq2WN=awgn(Vacq2N,100); %Beda Potensial Sensor 2 dengan
tambahan White Gaussian noise dengan SNR 100

```



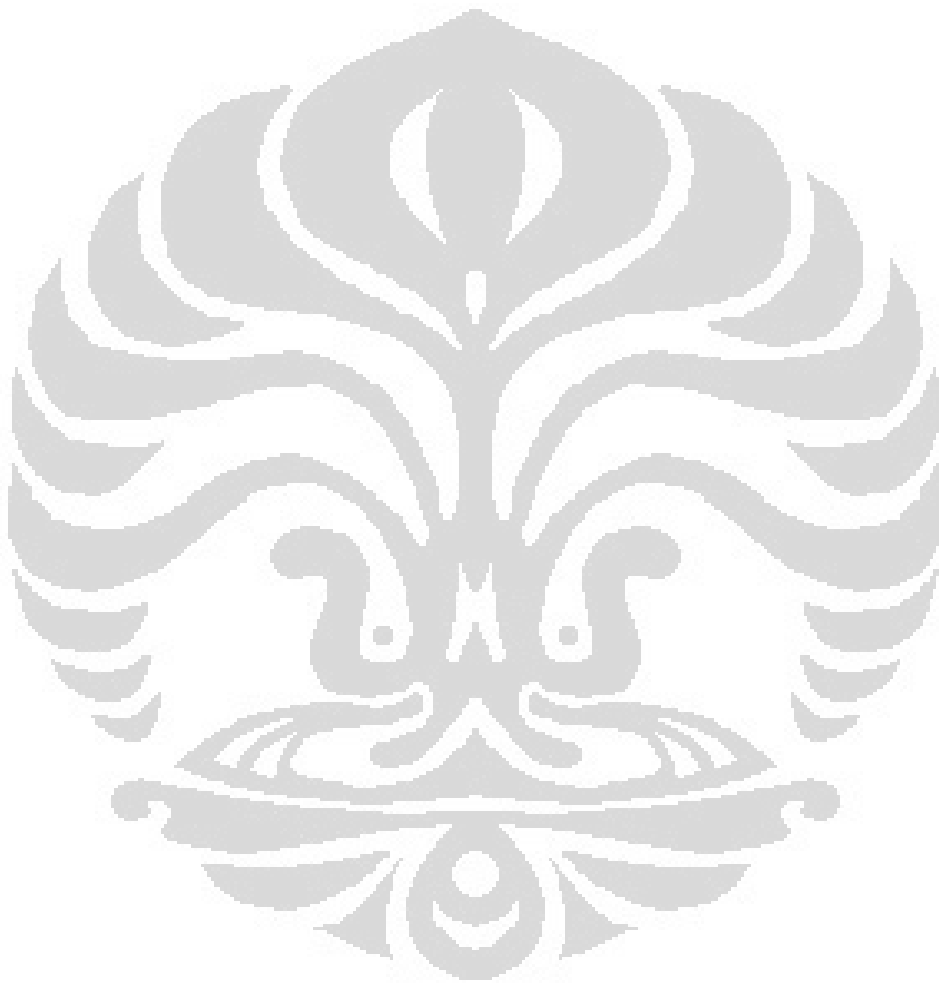
```

% Vacq3N=Vacq3+Noise2; %Beda Potensial Sensor 3 dengan
tambahan noise dari elektrostatik
% Vacq3WN=awgn(Vacq3N,100); %Beda Potensial Sensor 3 dengan
tambahan White Gaussian noise dengan SNR 100
% Vacq4N=Vacq4+Noise2; %Beda Potensial Sensor 4 dengan
tambahan noise dari elektrostatik
% Vacq4WN=awgn(Vacq4N,100); %Beda Potensial Sensor 4 dengan
tambahan White Gaussian noise dengan SNR 100
%
%Plot Grafik
ts=0:0.00000005:0.00005; %Sampling Time untuk Grafik
% Vgen_Grafik=Vgen(1:5001);
% Vacq1_Grafik=Vacq1WN(1:5001);
% Vacq2_Grafik=Vacq2WN(1:5001);
% Vacq3_Grafik=Vacq3WN(1:5001);
% Vacq4_Grafik=Vacq4WN(1:5001);
%
% % figure
% % plot(ts,Vgen_Grafik,'k','LineWidth',2), axis([0 0.00025 -
12 12]), title('Beda Potensial yang Dibangkitkan');
% figure
% plot(ts,Vacq1_Grafik,'-r','LineWidth',2), title('Beda
Potensial yang Ditangkap Sensor (S1=Merah, S2=Biru, S3=Hijau,
S4=Kuning)'), hold on
% plot(ts,Vacq2_Grafik,'-b','LineWidth',2), hold on
% plot(ts,Vacq3_Grafik,'-g','LineWidth',2), hold on
% plot(ts,Vacq4_Grafik,'-y','LineWidth',2), hold on

% subplot(5,1,1), plot(ts,Vgen_Grafik,'k'), title('Beda
Potensial yang Dibangkitkan');
% subplot(5,1,2), plot(ts,Vacq1_Grafik,'-r','LineWidth',1),
title('Beda Potensial yang Ditangkap Sensor 1');
% subplot(5,1,3), plot(ts,Vacq2_Grafik,'--b','LineWidth',1),
title('Beda Potensial yang Ditangkap Sensor 2');
% subplot(5,1,4), plot(ts,Vacq3_Grafik,':g','LineWidth',1),
title('Beda Potensial yang Ditangkap Sensor 3');
% subplot(5,1,5), plot(ts,Vacq4_Grafik,'-.y','LineWidth',1),
title('Beda Potensial yang Ditangkap Sensor 4');
Vgen1_grafik=Vgen(1:1001);
% THgen1_grafik=THgen(1:5001);
% THacq1_grafik=THacq1(1:5001);
Vacq1_grafik=Vacq1WN(1:1001);
figure
subplot(2,1,1), plot(ts,Vgen1_grafik),xlabel('Waktu (detik)'),
ylabel('Amplitudo (V)'), title('Beda Potensial yang
Dibangkitkan'), axis([0 0.00005 -6 6]);
% subplot(2,2,2), plot(ts,THgen1_grafik),xlabel('Waktu
(detik)'), ylabel('Amplitudo (m)'), title('Gerak Mekanik
Aktuator'),axis([0 0.0003 -0.000000000003 0.000000000003]);
% subplot(2,2,4), plot(ts,THacq1_grafik),xlabel('Waktu
(detik)'), ylabel('Amplitudo (V)'),title('Gerak Mekanik
Sensor'), axis([0 0.0003 -0.000000000003 0.000000000003]);
subplot(2,1,2), plot(ts,Vacq1_grafik),xlabel('Waktu (detik)'),
ylabel('Amplitudo (V)'), title('Beda Potensial yang
Ditangkap'), axis([0 0.00005 -6 6]);
figure
plot(ts,Vacq1_grafik),xlabel('Waktu (detik)'),
ylabel('Amplitudo (V)'), title('Beda Potensial yang
Ditangkap'), axis([0 0.00005 -0.0002 0.0002]);

```

```
% figure
% plot(t3,Vacq1WN), axis([0 0.1 -0.1 0.1]), title('Beda
Potensial yang Ditangkap Fungsi Sawtooth');
% figure
% subplot(2,1,1), plot(ts,THacqB(1:5001)), title('Body Wave')
% subplot(2,1,2), plot(ts, THacqR(1:5001)), title('Rayleigh
Wave')
```



## 2. Program Curve Fitting Atenuasi Amplitudo

```

V=5;
THgen=V*0.00000000000005;
THacq1Bpermukaan=zeros(1,100);
THacq1R=zeros(1,100);
THacq1Blawan=zeros(1,100);
for baris=1:100
    L=baris/200;
    dp=0.01;
    Rasiopermukaan=(L/dp)^2;
    RasioR=sqrt(L/dp);
    Rasiolawan=(L/dp);
    THacq1Bpermukaan(baris)=THgen*(1/Rasiopermukaan);
    %Displacement Sensor 1 akibat penjalaran body wave
    THacq1R(baris)=THgen*(1/RasioR); %Displacement Sensor 1 akibat
    penjalaran Rayleigh wave
    THacq1Blawan(baris)=THgen*(1/Rasiolawan);
end
g=0.022;
E=1000000000000;
x=0.005:0.005:0.5;
THacqpermukaan=THacq1Bpermukaan+THacq1R;
THacqlawan=THacq1Blawan;
THacqlawan1=THacq1Blawan+THacq1R;
Vacqpermukaan=THacqpermukaan*g*E;
Vacqlawan=THacqlawan*g*E;
% Vacqlawan1=THacqlawan1*g*E;
% figure
% plot(x,Vacqpermukaan,'or',x,Vacqlawan,'xb'), title('Pelat
Tebal'), xlabel('Jarak ke Sumber (m)'), ylabel('Amplitudo
(V)'), axis([0 0.5 -0.002 0.035])
% figure
% plot(x,Vacqpermukaan,'or',x,Vacqlawan1,'xb'), title('Pelat
Tipis'), xlabel('Jarak ke Sumber (m)'), ylabel('Amplitudo
(V)'), axis([0 0.5 -0.002 0.035])
% linregr(x,log10(Vacqlawan))
for baris=1:100
    Vacqpermukaan1(baris)=0.0005*(x(baris)^-0.6242);
    Vacqpermukaan2(baris)=(exp(-3.3276*x(baris)-5.7871));
end
residu11=Vacqpermukaan-Vacqpermukaan1;
residu22=Vacqpermukaan-Vacqpermukaan2;
for baris=1:100
    residu1(baris)=residu11(baris)^2;
    residu2(baris)=residu22(baris)^2;
end
sum1=0;
sum2=0;
for baris=1:100
    sum1=sum1+residu1(baris);
    sum2=sum2+residu2(baris);
end
syx1=sqrt(sum1/98)
syx2=sqrt(sum2/98)
figure

```

```

plot(x,Vacqpermukaan,'o',x,Vacqpermukaan1,'-
r',x,Vacqpermukaan2,'--k'), xlabel('Waktu (detik)'),
ylabel('Amplitudo(V)'),...
    axis([0 0.5 -0.002 0.03]), title('Curve Fitting Atenuasi
Amplitudo pada Permukaan yang Sama dengan Sumber')
for baris=1:100
Vacqlawan1(baris)=0.00006*(x(baris)^-1);
Vacqlawan2(baris)=(exp(-5.7315*x(baris)-6.7));
end
residu1=Vacqlawan-Vacqlawan1;
residu2=Vacqlawan-Vacqlawan2;
for baris=1:100
    residu1(baris)=residu1(baris)^2;
    residu2(baris)=residu2(baris)^2;
end
sum1=0;
sum2=0;
for baris=1:100
    sum1=sum1+residu1(baris);
    sum2=sum2+residu2(baris);
end
syxlawan1=sqrt(sum1/98)
syxlawan2=sqrt(sum2/98)
figure
plot(x,Vacqlawan,'o',x,Vacqlawan1,'-r',x,Vacqlawan2,'--k'),
xlabel('Waktu (detik)'), ylabel('Amplitudo(V)'),...
    axis([0 0.5 -0.002 0.03]), title('Curve Fitting Atenuasi
Amplitudo pada Permukaan yang Berlawanan dengan Sumber')

```

### 3. Program Regresi Linear

```

function [a, r2] = linregr(x,y)
% linregr: linear regression curve fitting
% [a, r2] = linregr(x,y): Least squares fit of straight
% line to data by solving the normal equations
% input:
% x = independent variable
% y = dependent variable
% output:
% a = vector of slope, a(1), and intercept, a(2)
% r2 = coefficient of determination
n = length(x);
if length(y)~=n, error('x and y must be same length'); end
x = x(:); y = y(:); % convert to column vectors
sx = sum(x); sy = sum(y);
sx2 = sum(x.*x); sxy = sum(x.*y); sy2 = sum(y.*y);
a(1) = (n*sxy-sx*sy)/(n*sx2-sx^2);
a(2) = sy/n-a(1)*sx/n;
r2 = ((n*sxy-sx*sy)/sqrt(n*sx2-sx^2)/sqrt(n*sy2-sy^2))^2;
% create plot of data and best fit line
xp = linspace(min(x),max(x),2);
yp = a(1)*xp+a(2);
plot(x,y,'o',xp,yp)
grid on

```

#### 4. Program Laju Perubahan Tegangan terhadap Waktu

```
function hit_grad(t, f1, f2, f3)
n=length(t);
dt=t(2)-t(1);
grad_f1(1)=f1(1);
grad_f2(1)=f2(1);
grad_f3(1)=f3(1);
for baris=2:n
    grad_f1(baris)=(f1(baris)-f1(baris-1))/dt;
    grad_f2(baris)=(f2(baris)-f2(baris-1))/dt;
    grad_f3(baris)=(f3(baris)-f3(baris-1))/dt;
end
figure
plot(t,grad_f1,'-r',t,grad_f2,'-b',t,grad_f3,'-g'),
xlabel('Waktu (detik)'), ylabel('dV/dt (V/detik)'),
title('Gradien Tegangan terhadap Waktu'), axis([0 0.000025 -
10000000000 10000000000])
```



## 5. Program *Threshold* Sinyal [*Threshold* (1)]

```
function sinyal_threshold=ambang_batas_sinyal(x,f,f1)
n=length(f);
g=f;
for i=1:n
    g(i)=f1(i)-f(i);
end
sinyal_threshold=g;
figure
subplot(3,1,1), plot(x,f,'-r'), axis([0 0.000025 -3 3]),
title('Sinyal Asli'), xlabel('Waktu (detik)'),
ylabel('Amplitudo (V)')
subplot(3,1,2), plot(x,f1,'-g'), axis([0 0.000025 -3 3]),
title('Threshold'), xlabel('Waktu (detik)'), ylabel('Amplitudo
(V)')
subplot(3,1,3), plot(x,g,'-b'), axis([0 0.000025 -3 3]),
title('Sinyal Setelah Dibersihkan'), xlabel('Waktu (detik)'),
ylabel('Amplitudo (V)')
```



## 6. Program *Threshold Minimax* dan RMS [*Threshold (2)* dan (3)]

```
function sinyal_threshold=ambang_batas(x,f,a,b)
n=length(f);
g=f;
for i=1:n
    if f(i)<a&&f(i)>b
        g(i)=0;
    end
end
for i=1:n
    if f(i)>a
        g(i)=f(i)-a;
    end
    if f(i)<b
        g(i)=f(i)-b;
    end
end
sinyal_threshold=g;
figure
subplot(2,1,1), plot(x,f,'-r'), axis([0 0.000025 -3 3]),
title('Sinyal Asli'), xlabel('Waktu (detik)'),
ylabel('Amplitudo (V)')
subplot(2,1,2), plot(x,g,'-b'), axis([0 0.000025 -3 3]),
title('Sinyal Setelah Dibersihkan'), xlabel('Waktu (detik)'),
ylabel('Amplitudo (V)')
```

## 7. Program Perhitungan Energi dengan Metode Numerik Aturan Simpson

1/3

```
function hit_energi(b,a,f1,f2,f3)
n=length(f1)
g1=f1;
g2=f2;
g3=f3;
for nilai=1:n
    if f1(nilai)<0
        g1(nilai)=g1(nilai)*-1;
    end
    if f2(nilai)<0
        g2(nilai)=g2(nilai)*-1;
    end
    if f3(nilai)<0
        g3(nilai)=g3(nilai)*-1;
    end
end
sum1=0;
for baris=2:2:n-2
    sum1=sum1+g1(baris);
end
sum1g=0;
for baris=3:2:n-1
    sum1g=sum1g+g1(baris);
end
sum2=0;
for baris=2:2:n-2
    sum2=sum2+g2(baris);
end
sum2g=0;
for baris=3:2:n-1
    sum2g=sum2g+g2(baris);
end
sum3=0;
for baris=2:2:n-2
    sum3=sum3+g3(baris);
end
sum3g=0;
for baris=3:2:n-1
    sum3g=sum3g+g3(baris);
end
Energi_Akhir_Simpson_1=(b-
a)*((4*sum1g)+(2*sum1)+g1(1)+g1(n))/(3*n)
Energi_Akhir_Simpson_2=(b-
a)*((4*sum2g)+(2*sum2)+g2(1)+g2(n))/(3*n)
Energi_Akhir_Simpson_3=(b-
a)*((4*sum3g)+(2*sum3)+g3(1)+g3(n))/(3*n)
```



**LAMPIRAN G**  
**SPEKIFIKASI INSTRUMEN PENELITIAN**

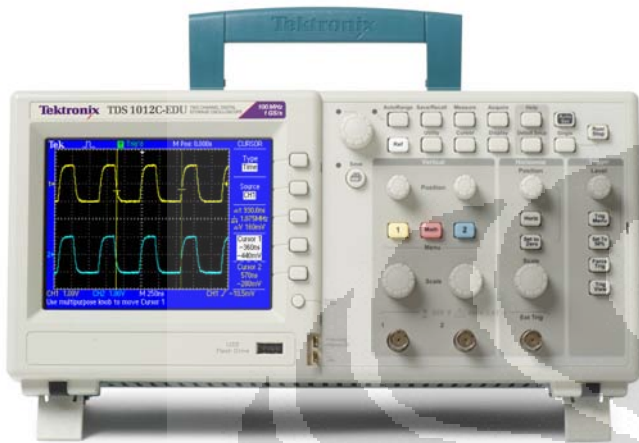
# Digital Storage Oscilloscopes

## TDS1000C-EDU Series Data Sheet

**Test Equipment  
Depot**  
1-800-517-8431

99 Washington Street  
Melrose, MA 02176  
Phone 781-665-1400  
Toll Free 1-800-517-8431

Visit us at [www.TestEquipmentDepot.com](http://www.TestEquipmentDepot.com)



## Features & Benefits

### Key Performance Specifications

- 100 MHz, 60 MHz, 40 MHz Bandwidth Models
- 2 Channels
- Up to 1 GS/s Sample Rate on All Channels
- 2.5k Point Record Length on All Channels
- Advanced Triggers including Pulse Width Trigger and Line-selectable Video Trigger

### Ease-of-Use Features

- 16 Automated Measurements, and FFT Analysis for Simplified Waveform Analysis
- Autoselect and Signal Auto-ranging
- Probe Check Wizard
- 11-Language User Interface and Context-sensitive Help
- 5.7 in. (144 mm) Active TFT Color Display
- Small Footprint and Lightweight – Only 4.9 in. (124 mm) Deep and 4.4 lb. (2 kg)

### Connectivity

- USB 2.0 Host Port on the Front Panel for Quick and Easy Data Storage
- USB 2.0 Device Port on Rear Panel for Easy Connection to a PC or Direct Printing to a PictBridge®-compatible Printer

### 3-year Warranty

## Performance You Need at a Price You Can Afford

The TDS1000C-EDU Digital Oscilloscope Series is designed specifically to meet the needs of today's schools and universities. Packed with features and built-in tools, the TDS1000C-EDU is easy to learn and simple to operate – ideal for first-time oscilloscope users and students. Featuring the same user interface as other members of the Tektronix TDS Oscilloscope Family, your students will learn to operate the world's most popular oscilloscope platform, with over 500,000 oscilloscopes in operation worldwide.

To simplify integration with your existing curriculum, the TDS1000C-EDU also includes an Education Resource CD filled with tools to help your students master the use of an oscilloscope. The TDS1000C-EDU offers the tools and performance you need at a price you can afford.

**Tektronix**<sup>®</sup>

## Digital Precision for Accurate Measurements

With up to 100 MHz bandwidth and 1 GS/s maximum sample rate, no other digital storage oscilloscope offers as much bandwidth and sample rate for the price. Tektronix proprietary sampling technology provides real-time sampling with a minimum of 10X oversampling on all channels, all the time to accurately capture your signals. Sampling performance is not reduced when using multiple channels.

## Critical Tools for Troubleshooting Your Device

Advanced triggers – rising/falling edge, pulse width, and video – help you quickly isolate your signals of interest. Once you've captured a signal, advanced math capabilities and automated measurements can speed your analysis. Quickly perform an FFT or add, subtract, or multiply waveforms. Sixteen automated measurements quickly and reliably calculate important signal characteristics such as frequency or rise time, while the built-in Limit Test function enables you to easily identify problems in your signal.

## Designed to Make Your Work Easy

The TDS1000C-EDU Series oscilloscopes are designed with the ease of use and familiar operation you have come to expect from Tektronix.

### Intuitive Operation

The intuitive user interface with dedicated per-channel vertical controls, auto-setup, and auto-ranging makes these instruments easy to use, reducing learning time and increasing efficiency.

### Help When You Need It, Where You Need It

The built-in Help menu provides you with important information on your oscilloscope's features and functions. Help is provided in the same language as the user interface.

## Probe Check Wizard

Check out your probe compensation before making measurements with just one button that starts a fast, easy procedure.

## Flexible Data Transfer

The USB host port on the front panel enables you to save your instrument settings, screenshots, and waveform data in a flash.

## Easy PC Connectivity

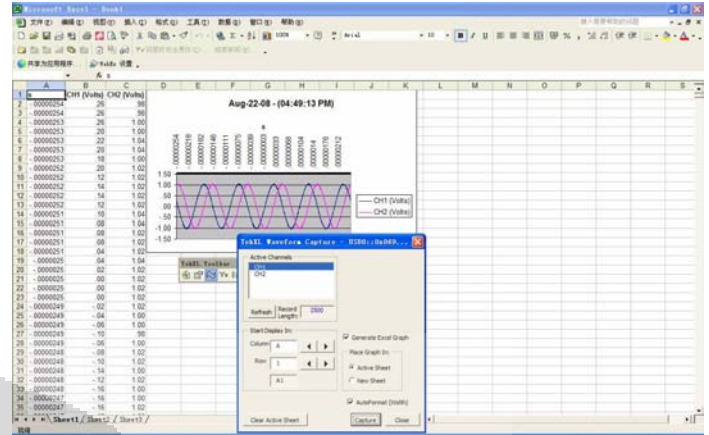
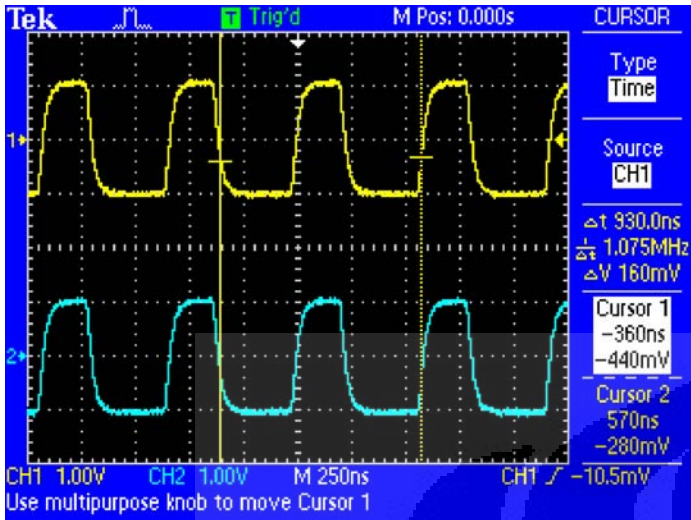
Easily capture, save, and analyze measurement results by connecting to your PC with the rear-panel USB device port and the included copy of OpenChoice® PC Communications Software. Simply pull screen images and waveform data into the stand-alone desktop application or directly into Microsoft Word and Excel. Alternatively, if you prefer not to use your PC, you can simply print your image directly to any PictBridge®-compatible printer.

## Performance You Can Count On

In addition to industry-leading service and support, every TDS1000C-EDU Series oscilloscope comes backed with a 3-year warranty as standard.

## Education Resources

Every TDS1000C-EDU model includes an Education Resource CD filled with tools to help your students master the use of an oscilloscope. The Education Resource CD includes two Student Labs and Instructor's Guides, and two Primers. The *Introduction to Oscilloscopes* Student Lab and Instructor's Guide explains the basics of oscilloscope operation complete with hands-on exercises for your students. The *Introduction to Oscilloscope Probes* Student Lab and Instructor's Guide explains the fundamentals of probing and how probes can affect measurement quality. The two Primers included are the most popular and widely-used from Tektronix – the *XYZs of Oscilloscopes* and *ABCs of Probes*.



Easily capture, save and analyze measurement results with OpenChoice™ PC Communications Software.

Quickly and easily capture waveforms.



Included Education Resource CD is filled with tools to help your students master the use of an oscilloscope.

## Characteristics

### TDS1000C-EDU Series Digital Storage Oscilloscopes

Characteristic	TDS1001C-EDU	TDS1002C-EDU	TDS1012C-EDU
Display (QVGA)	Color TFT	Color TFT	Color TFT
Bandwidth* <sup>1</sup>	40 MHz	60 MHz	100 MHz
Channels	2	2	2
External Trigger Input	Included on all models		
Sample Rate on each Channel	500 MS/s	1.0 GS/s	1.0 GS/s
Record Length	2.5k points at all time bases on all models		
Vertical Resolution	8 bits		
Vertical Sensitivity	2 mV to 5 V/div on all models with calibrated fine adjustment		
DC Vertical Accuracy	±3% on all models		
Vertical Zoom	Vertically expand or compress a live or stopped waveform		
Maximum Input Voltage	300 V <sub>RMS</sub> CAT II; derated at 20 dB/decade above 100 kHz to 13 V <sub>p-p</sub> AC at 3 MHz		
Position Range	2 mV to 200 mV/div +2 V; >200 mV to 5 V/div +50 V		
Bandwidth Limit	20 MHz for all models		
Input Coupling	AC, DC, GND on all models		
Input Impedance	1 MΩ in parallel with 20 pF		
Time Base Range	5 ns to 50 s/div	5 ns to 50 s/div	5 ns to 50 s/div
Time Base Accuracy	50 ppm		
Horizontal Zoom	Horizontally expand or compress a live or stopped waveform		

\*1 Bandwidth is 20 MHz at 2 mV/div, all models.

Characteristic	TDS1001C-EDU	TDS1002C-EDU	TDS1012C-EDU
----------------	--------------	--------------	--------------

#### I/O Interfaces

USB Ports	Included on all models: 2 USB 2.0 ports USB host port on front panel supports USB flash drives USB device port on back of instrument supports connection to PC and all PictBridge-compatible printers		
GPIB	Optional		

#### Nonvolatile Storage

Reference Waveform Display	(2) 2.5k point reference waveforms		
Waveform Storage without USB Flash Drive	(2) 2.5k point	(2) 2.5k point	(2) 2.5k point
Waveform Storage with USB Flash Drive	96 or more reference waveforms per 8 MB		
Setups without USB Flash Drive	10 front-panel setups		
Setups with USB Flash Drive	4000 or more front-panel setups per 8 MB		
Screen Images with USB Flash Drive	128 or more screen images per 8 MB (the number of images depends on file format selected)		
Save All with USB Flash Drive	12 or more Save All operations per 8 MB A single Save All operation creates 3 to 9 files (setup, image, plus one file for each displayed waveform)		

## Acquisition Modes

Characteristic	Description
Peak Detect	High-frequency and random glitch capture. Captures glitches as narrow as 12 ns (typical) using acquisition hardware at all time-base settings from 5 μs/div to 50 s/div
Sample	Sample data only
Average	Waveform averaged, selectable: 4, 16, 64, 128
Single Sequence	Use the Single Sequence button to capture a single triggered acquisition sequence at a time
Roll Mode	At acquisition time base settings of >100 ms/div

## Trigger System

Characteristic	Description
Trigger Modes	Auto, Normal, Single Sequence

## Trigger Types

Characteristic	Description
Edge (Rising/Falling)	Conventional level-driven trigger. Positive or negative slope on any channel. Coupling selections: AC, DC, Noise Reject, HF Reject, LF Reject
Video	Trigger on all lines or individual lines, odd/even or all fields from composite video, or broadcast standards (NTSC, PAL, SECAM)
Pulse Width (or Glitch)	Trigger on a pulse width less than, greater than, equal to, or not equal to, a selectable time limit ranging from 33 ns to 10 s

## Trigger Source

CH1, CH2, Ext, Ext/5, AC Line.

## Trigger View

Displays trigger signal while trigger view button is depressed.

## Trigger Signal Frequency Readout

Provides a frequency readout of the trigger source.

## Cursors

Characteristic	Description
Types	Amplitude, Time
Measurements	[Δ]T, 1[Δ]T (frequency), [Δ]V

## Automatic Waveform Measurements

Period, Frequency, +Width, -Width, Rise Time, Fall Time, Max, Min, Peak-to-Peak, Mean, Cycle RMS, RMS, Cursor RMS, Duty Cycle, Phase, Delay.

## Waveform Math

Characteristic	Description
Operators	Add, Subtract, Multiply, FFT
FFT	Windows, Hanning, Flat Top, Rectangular, 2048 sample points
Sources	CH1 - CH2, CH2 - CH1, CH1 + CH2, CH1 × CH2

## Autoset Menu

Single-button, automatic setup of all channels for vertical, horizontal, and trigger systems, with undo Autoset.

Signal Type	Autoset Menu Choices
Square Wave	Single-cycle, Multi-cycle, Rising or Falling Edge
Sine Wave	Single-cycle, Multi-cycle, FFT Spectrum
Video (NTSC, PAL, SECAM)	Field: All, Odd, or Even Line: All or Selectable Line Number



**Autorange**

Automatically adjust vertical and/or horizontal oscilloscope settings when probe is moved from point to point, or when the signal exhibits large changes.

**Display Characteristics**

Characteristic	Description
Display	QVGA color TFT
Interpolation	Sin (x)/x
Display Types	Dots, vectors
Persistence	Off, 1 s, 2 s, 5 s, infinite
Format	YT and XY

**Environmental**

Characteristic	Description
Temperature	
Operating	0 °C to +50 °C
Nonoperating	-40 °C to +71 °C
Humidity	
Operating and Nonoperating	Up to 80% RH at or below +40 °C. Up to 45% RH up to +50 °C

**Regulatory**

Characteristic	Description
Electromagnetic Compatibility	Meets EMC Directive 2004/108/EC, meets EN61326 Class A; meets Australian EMC Framework
Safety	UL61010-1:2004 CSA, C22.2 No. 61010-1:2004, EN61010-1:2001, IEC61010-1:2001. EU Low Voltage Directive 2006/95/EC

**Physical Characteristics**

Instrument		
Dimension	mm	in.
Height	158.0	6.2
Width	326.3	12.8
Depth	124.2	4.9
Weight		
	kg	lb.
Instrument Only	2.0	4.4
with Accessories	2.2	4.9

**Instrument Shipping**

Package Dimensions		
	mm	in.
Height	266.7	10.5
Width	476.2	18.7
Depth	228.6	9.0
RM2000B Rackmount		
	mm	in.
Height	482.6	19.0
Width	177.8	7.0
Depth	108.0	4.3

**Ordering Information**

Model	Description
TDS1001C-EDU	40 MHz, 2 Ch, 500 MS/s, Color Digital Storage Oscilloscope
TDS1002C-EDU	60 MHz, 2 Ch, 1 GS/s, Color Digital Storage Oscilloscope
TDS1012C-EDU	100 MHz, 2 Ch, 1 GS/s, Color Digital Storage Oscilloscope

**Standard Accessories**

Accessory	Description
TPP0101	Two (2) 100 MHz 10X passive probes
Power Cord	(Please specify plug option)
NIM/NIST	Traceable Certificate of Calibration
Documentation	(Please specify preferred language option)
Educator Classroom and Lab Resource CD	Contains lab experiments for oscilloscopes and probes, and <i>XYZs of Oscilloscopes</i> and <i>ABCs of Probes</i> Primers
OpenChoice® PC Communications Software	Enables fast and easy communication between a Windows PC and the TDS1000C-EDU Series through USB. Transfer and save settings, waveforms, measurements, and screen images
3-year Warranty	Covering labor and parts for defects in materials and workmanship for a minimum of 3 years, excluding probes and accessories*2

\*2 Probes and accessories are not covered by the oscilloscope warranty and Service Offerings. Refer to the data sheet of each probe and accessory model for its unique warranty and calibration terms.

**Recommended Accessories**

Accessory	Description
TEK-USB-488	GPIB to USB converter
AC2100	Soft Carrying Case for Instrument
HCTEK4321	Hard Plastic Carrying Case for Instrument (requires AC2100)
RM2000B	Rackmount Kit
077-0444-xx	Programmer Manual – English Only
077-0446-xx	Service Manual – English Only
174-4401-00	USB host to device cable, 3 feet long

**Power Plug Options**

Option	Description
A0	North America power
A1	Universal Euro power
A2	United Kingdom power
A3	Australia power
A5	Switzerland power
A6	Japan power
A10	China power
A11	India power
A12	Brazil power
A99	No power cord or AC adapter

**User Manual Options**

Translated front-panel overlays included with their respective user manuals.

Option	Description
L0	English manual
L1	French manual
L2	Italian manual
L3	German manual
L4	Spanish manual
L5	Japanese manual
L6	Portuguese manual
L8	Standard Chinese manual
L9	Korean manual
L10	Russian manual

**Recommended Probes**

Probe	Description
TPP0101	100 MHz 10X passive probes
TPP0201	200 MHz 10X passive probes
P2220	10X-1X switchable passive probe (200 MHz when 10X is selected)
P6101B	1X passive probe (15 MHz, 300 V <sub>RMS</sub> CAT II rating)
P6015A	1000X high-voltage passive probe (75 MHz)
P5100	100X high-voltage passive probe (250 MHz)
P5200	High-voltage active differential probe (25 MHz)
P6021	15 A, 60 MHz AC current probe
P6022	6 A, 120 MHz AC current probe
A621	2000 A, 5 to 50 kHz AC current probe
A622	100 A, 100 kHz AC/DC current probe/BNC
TCP303/TCPA300	150 A, 15 MHz AC/DC current probe/amplifier
TCP305/TCPA300	50 A, 50 MHz AC/DC current probe/amplifier
TCP312/TCPA300	30 A, 100 MHz AC/DC current probe/amplifier
TCP404XL/TCPA400	500 A, 2 MHz AC/DC current probe/amplifier

**Service Options\*2**

Option	Description
Opt. C3	Calibration Service 3 Years
Opt. C5	Calibration Service 5 Years
Opt. D1	Calibration Data Report
Opt. D3	Calibration Data Report 3 Years (with Option C3)
Opt. D5	Calibration Data Report 5 Years (with Option C5)
Opt. R5	Repair Service 5 Years

\*2 Probes and accessories are not covered by the oscilloscope warranty and Service Offerings. Refer to the data sheet of each probe and accessory model for its unique warranty and calibration terms.

**Service Offerings (Available after purchase)**

Option	Description
TDS10xxC-EDU-R1PW	Repair Service Coverage, 1 Year Post Warranty
TDS10xxC-EDU-R2PW	Repair Service Coverage, 2 Years Post Warranty
TDS10xxC-EDU-R5DW	Repair Service Coverage, 5 Years (includes product warranty period). 5-year period starts at time of customer instrument purchase

**The Tektronix Customer Service Advantage**

You can trust Tektronix to offer unequalled engineering expertise and a customer-centric approach to ensure the optimal performance of your Tektronix products and maximize the lifetime value of your Tektronix investment. With service from Tektronix you get:

- Access to the source of product knowledge; unsurpassed technical expertise
- Your challenges solved by front-line technical experts, design engineering reinforcement, and online support tools
- Comprehensive and thorough support provided worldwide, including software and firmware updates, data reports, and adjustments
- Efficiency and convenience; no-hassle service from initial service call to turnaround and delivery
- Flexible repair and calibration service with access to the best on-call technical trouble shooting staff in the industry, with over 20 years of training per support engineer
- Customer-centric approach dedicated to serving your needs everyday with services designed to optimize your product performance, increase productivity and ROI by delivering a fixed cost of ownership, and efficient management of service



Product(s) are manufactured in ISO registered facilities.



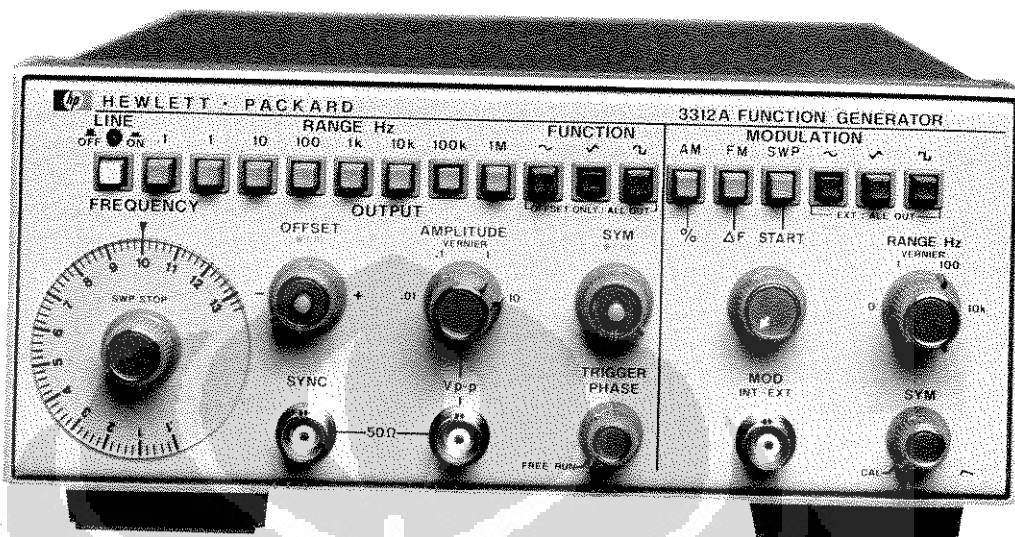
Product(s) complies with IEEE Standard 488.1-1987, RS-232-C, and with Tektronix Standard Codes and Formats.

# FREQUENCY, FUNCTION & WAVEFORM SYNTHESIZERS

Function Generator

Model 3312A

- Two function generators in one instrument
- AM-FM, sweep, trigger, gate and burst



HP 3312A

## Description

Hewlett-Packard's 3312 A Function Generator combines two separate, independent function generators with a modulator section in one compact instrument.

The main generator can—via pushbutton control—be triggered by the modulation generator to provide sweep functions, AM, FM or tone burst.

Ten V p-p into 50  $\Omega$  provides adequate power for most applications. The output attenuator has a range of more than 10,000:1 so clean low-level signals from 10 V to 1 mV p-p into 50  $\Omega$  can be obtained. The main generator includes dc offset up to 10 volts p-p into 50  $\Omega$ .

The HP 3312A is an effective low cost solution for generating a multitude of functions.

## Specifications

**Output waveforms:** sine, square, triangle,  $\pm$  ramp, pulse, AM, FM, sweep, triggered and gated.

**Frequency Characteristics**  
**Range:** 0.1 Hz to 13 MHz in 8 decades ranges.

**Dial accuracy:**  $\pm 5\%$  of full scale. Unspecified in Uncal Mode.

**Square wave rise or fall time (10% to 90%):** <20 ns.

**Aberrations:** <10%.

**Triangle linearity error:** <1% at 100 Hz.

**Variable symmetry:** 80:20:80 to 1 MHz.

**Sine wave distortion:** <0.5% (-46 dB) THD from 10 Hz to 50 kHz. (10 kHz range maximum). >30 dB below fundamental from 50 kHz to 13 MHz, at full-rated output.

### Output Characteristics

**Impedance:** 50  $\Omega$   $\pm$  10%.

**Level:** 20 V p-p into open circuit, >10 V p-p into 50  $\Omega$  at 1 kHz.

**Level flatness (sine wave):**  $\pm 3\%$  from 10 Hz to 100 kHz at full rated output (1 kHz reference).  $\pm 10\%$  from 100 kHz to 10 MHz.

**Attenuator:** 1:1, 10:1, 100:1, 1000:1 and >10:1 continuous control.

**Attenuator error:** <5%.

**Sync output:** impedance: 50  $\Omega$   $\pm$  10%, >1 V p-p square wave into open circuit. Duty cycle varies with symmetry control.

**DC offset:** variable up to  $\pm$  10 volts. Instantaneous ac voltage + Vdc offset cannot exceed  $\pm$  10 V (open circuit) or  $\pm$  5 V (terminated 50 ohm).

### Modulation Characteristics

**Types:** internal AM, FM, sweep, trigger, gate or burst; external AM, FM, sweep, trigger, gate or burst.

**Waveforms:** sine, square, triangle, ramp or variable symmetry pulse.

**Frequency range:** 0.01 Hz to 10 kHz.

**Output level:** >1.0 V p-p into 10 k $\Omega$ .

### Amplitude Modulation

**Depth:** 0 to 100%.

**Modulation frequency:** 0.01 Hz to 10 kHz (internal). DC to >1 MHz (external).

**Carrier 3 dB bandwidth:** <100 Hz to >5 MHz.

**Carrier envelope distortion:** <2% at 70% sine wave modulation with  $f_c = 1$  MHz,  $f_m = 1$  kHz.

**External sensitivity:** <10 V p-p for 100% modulation.

### Frequency Modulation

**Deviation:** 0 to  $\pm 5\%$  (internal).

**Modulation frequency:** internal: 0.01 Hz to 10 kHz; external: DC to >50 kHz.

**Distortion:** <-35 dB at  $f_c = 10$  MHz,  $f_m = 1$  kHz, 10% modulation.

### Sweep Characteristics

**Sweep width:** >100:1 on any range.

**Sweep rate:** 0.01 Hz to 10 kHz, 90:10 ramp, and 0 Hz Range (provides manual setting of "Sweep Start" without modulation generator oscillating).

**Sweep mode:** repetitive linear sweep between start and stop frequency settings. Retrace time can be increased with symmetry control.

**Ramp output:** 0 to >-4 p-p into 5 k $\Omega$ .

### Gate Characteristics

**Start/stop phase range:** +90° to -80°.

**Frequency range:** 0.1 Hz to 1 MHz (useful to 10 MHz).

**Gating signal frequency range (external):** dc to 1 MHz, TTL compatible.

### External Frequency Control

**Range:** 1000:1 on any range.

**Input requirement:** with dial set at 10, 0 to -2 V  $\pm$  20% will linearly decrease frequency >1000:1. An ac voltage will FM the frequency about a dial setting within the limits (0.1 < f < 10) x range setting.

**Linearity:** 0.5% of Fmax for Fmax  $\leq$  1 MHz 5.0% of Fmax for Fmax > 1 MHz. Deviation is from a best fit straight line. VCO frequency span  $\leq$  100:1.

**Input impedance:** 2.8 k $\Omega$   $\pm$  5%.

### General

**Operating temperature:** 0°C to +55°C; specifications apply from 0°C to 40°C.

**Storage temperature:** -40°C to +75°C.

**Power:** 100 V, 120 V, 220 V, 240 V  $\pm$  5%, -10%, switchable; 48 W to 440 Hz;  $\leq$  25 VA.

**Size:** 102 mm H x 213 mm W x 377 mm D (4" x 8.4" x 14.8").

**Weight:** net, 3.8 kg (8.4 lb). Shipping, 5.9 kg (13 lb).

HP 3312A Function Generator

\$1,450



**LAMPIRAN H**  
**SPESIFIKASI PROPERTI MATERIAL**



**Contact Us**  
**AISI Type 304 Stainless Steel**

**Subcategory:** Ferrous Metal; Heat Resisting; Metal; Stainless Steel; T 300 Series Stainless Steel

**Close Analogs:** UNS S30400; AMS 5501, 5513, 5560, 5565; ASME SA182, SA194 (8), SA213, SA240; ASTM A167, A182, A193, A194

**Key Words:** aisi304, aisi 304, T304, T 304, SUS304, SS304, 304SS, 304 SS, UNS S30400, AMS 5501, AMS 5513, AMS 5560, AMS 5565, AMS 5566, AMS 5567, AMS 5639, AMS 5697, ASME SA182, ASME SA194 (8), ASME SA213, ASME SA240, ASME SA249, ASME SA312, ASME SA320 (B8), ASME SA358, ASME SA376, ASME SA403, ASME SA409, ASME SA430, ASME SA479, ASME SA688, ASTM A167, ASTM A182, ASTM A193, ASTM A194, ASTM A666, FED QQ-S-763, MILSPEC MIL-S-5059, SAE 30304, DIN 1.4301, X5CrNi189, B.S. 304 S 15, EN 58E, PN 86020 (Poland), OH18N9, ISO 4954 X5CrNi189E, ISO 683/13 11, 18-8

Component	Wt. %
C	Max 0.08
Cr	18 - 20
Fe	66.345 - 74
Mn	Max 2
Ni	8 - 10.5
P	Max 0.045
S	Max 0.03
Si	Max 1

**Material Notes:**

Austenitic Cr-Ni stainless steel. Better corrosion resistance than Type 302. High ductility, excellent drawing, forming, and spinning properties. Essentially non-magnetic, becomes slightly magnetic when cold worked. Low carbon content means less carbide precipitation in the heat-affected zone during welding and a lower susceptibility to intergranular corrosion.

**Applications:** beer kegs, bellows, chemical equipment, coal hopper linings, cooking equipment, cooling coils, cryogenic vessels, dairy equipment, evaporators, flatware utensils, feedwater tubing, flexible metal hose, food processing equipment, hospital surgical equipment, hypodermic needles, kitchen sinks, marine equipment and fasteners, nuclear vessels, oil well filter screens, refrigeration equipment, paper industry, pots and pans, pressure vessels, sanitary fittings, valves, shipping drums, spinning, still tubes, textile dyeing equipment, tubing.

**Corrosion Resistance:** resists most oxidizing acids and salt spray.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	8 g/cc	0.289 lb/in <sup>3</sup>	

**Mechanical Properties**

Hardness, Brinell	123	123	Converted from Rockwell B hardness.
Hardness, Knoop	138	138	Converted from Rockwell B hardness.
Hardness, Rockwell B	70	70	
Hardness, Vickers	129	129	Converted from Rockwell B hardness.
Tensile Strength, Ultimate	505 MPa	73200 psi	
Tensile Strength, Yield	215 MPa	31200 psi	at 0.2% offset
Elongation at Break	70 %	70 %	in 50 mm
Modulus of Elasticity	193 - 200 GPa	28000 - 29000 ksi	
Poisson's Ratio	0.29	0.29	
Charpy Impact	325 J	240 ft-lb	
Shear Modulus	86 GPa	12500 ksi	

**Electrical Properties**


Electrical Resistivity	7.2e-005 ohm-cm	7.2e-005 ohm-cm	at 20°C (68°F); 1.16E-04 at 650°C (1200°F)
Magnetic Permeability	1.008	1.008	at RT

**Thermal Properties**

CTE, linear 20°C	17.3 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{°C}$	9.61 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot\text{°F}$	from from 0-100°C
CTE, linear 250°C	17.8 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{°C}$	9.89 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot\text{°F}$	at 0-315°C (32-600°F)
CTE, linear 500°C	18.7 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{°C}$	10.4 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot\text{°F}$	at 0-650°C
Specific Heat Capacity	0.5 J/g·°C	0.12 BTU/lb·°F	from 0-100°C (32-212°F)
Thermal Conductivity	16.2 W/m·K	112 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> ·°F	at 0-100°C, 21.5 W/m°C at 500°C
Melting Point	1400 - 1455 °C	2550 - 2650 °F	
Solidus	1400 °C	2550 °F	
Liquidus	1455 °C	2650 °F	

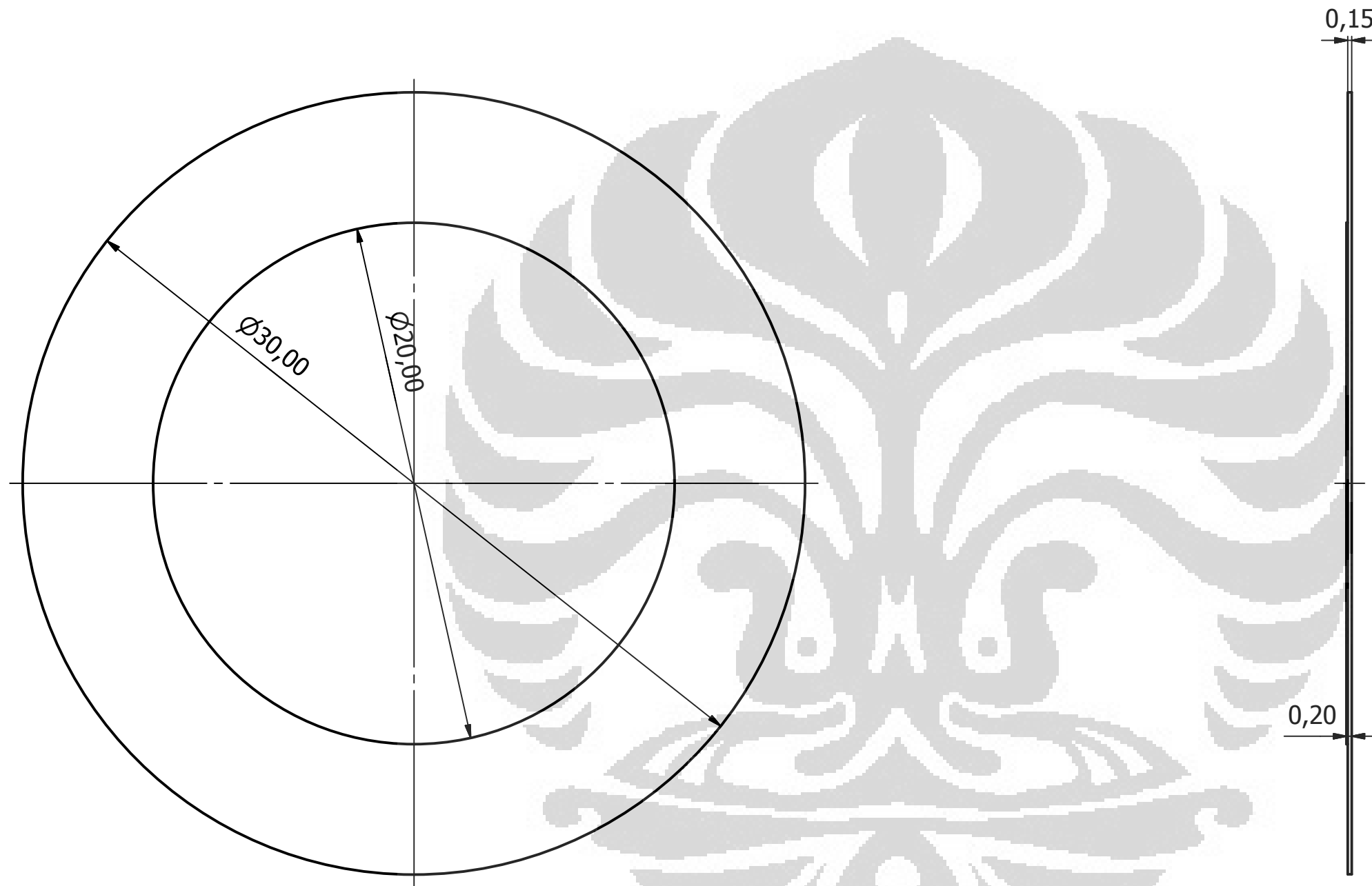
**References** for this datasheet.

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's disclaimer and terms of use regarding this information. MatWeb data and tools provided by MatWeb, LLC.

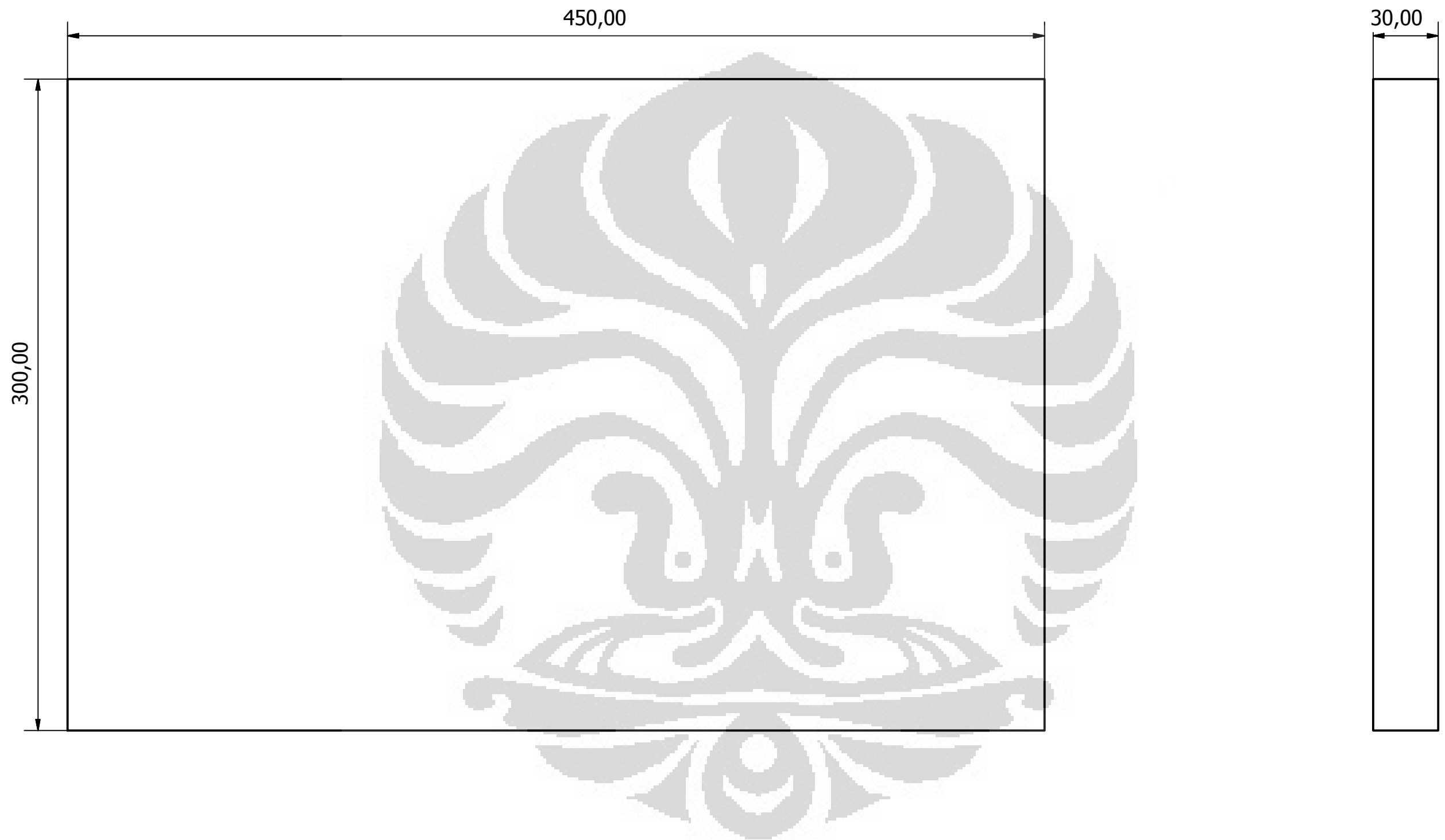


**LAMPIRAN I**  
**GAMBAR TEKNIK**

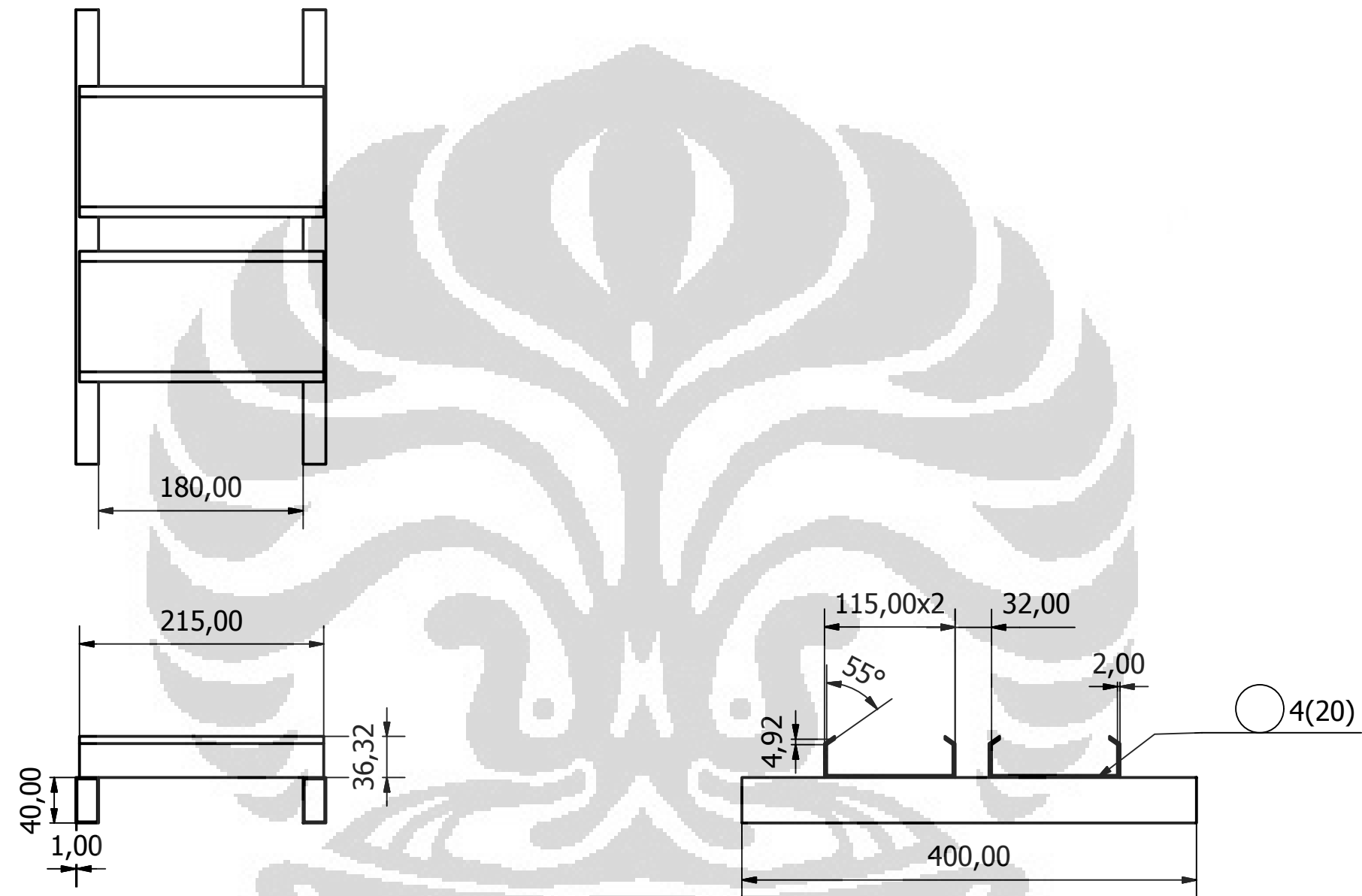




	SKALA : 5:1	NAMA : RAKA CAHYA P	PERINGATAN
	SATUAN : mm	NPM : 0806315793	
	TANGGAL : 20/6/2012	DIPERIKSA : DR. IR. WAHYU NIRBITO, MSME	
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN UNIVERSITAS INDONESIA	PIEZOCERAMIC PZT		1/3   A4



	SKALA : 1 : 2	NAMA : RAKA CAHYA P	PERINGATAN
	SATUAN : mm	NPM : 0806315793	
	TANGGAL : 20/6/2012	DIPERIKSA : DR. IR. WAHYU NIRBITO, MSME	
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN UNIVERSITAS INDONESIA		PELAT BAJA TAHAN KARAT	2/3   A4



	SKALA : 1 : 5	NAMA : RAKA CAHYA P	PERINGATAN
	SATUAN : mm	NPM : 0806315793	
	TANGGAL : 20/6/2012	DIPERIKSA : DR. IR. WAHYU NIRBITO, MSME	
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN UNIVERSITAS INDONESIA		<b>DUDUKAN PELAT</b>	<b>3/3   A4</b>