



TUGAS AKHIR - TF 141581

**PENJEJAKAN (*TRACKING*)
SUMBER BUNYI BERGERAK BAWAH AIR
BERDASARKAN ESTIMASI WAKTU TUNDA
MENGUNAKAN *HYDROPHONE ARRAY***

FIDIA SHETHIN ANISA
NRP 0231164500013

Dosen Pembimbing
Dr. Dhany Arifianto ST, M.Eng

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - TF 141581

***TRACKING OF UNDERWATER MOVING SOURCE
BASED ON TIME DELAY ESTIMATION
USING HYDROPHONE ARRAY***

*FIDIA SHETHIN ANISA
NRP 02311645000013*

*Supervisor
Dr. Dhany Arifianto ST, M.Eng*

*Department of Engineering Physics
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2018*

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Fidia Shethin Anisa
NRP : 02311645000013
Departemen/Prodi : Teknik Fisika/ S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Penjejakan (*Tracking*) Sumber Bunyi Bergerak Bawah Air Berdasarkan Estimasi Waktu Tunda Menggunakan *Hydrophone Array*” adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar – benarnya.

Surabaya, Juli 2018
Yang membuat pernyataan,



Fidia Shethin Anisa
NRP. 02311645000013

LEMBAR PENGESAHAN

**PENJEJAKAN (*TRACKING*) SUMBER BUNYI
BERGERAK BAWAH AIR BERDASARKAN ESTIMASI
WAKTU TUNDA MENGGUNAKAN HIDROFON *ARRAY***

TUGAS AKHIR

Oleh:

Fidia Shethin Anisa
NRP: 02311645000013

Surabaya, Juli 2018
Mengetahui

Dosen Pembimbing I



Dr. Dhany Arifianto ST, M.Eng
NIP. 19731007 199802 1 001

Menyetujui,
Kepala Departemen Teknik Fisika FTI-ITS



Agus Muhamad Hatta, ST, Msi, Ph.D
NIPN. 19780902 200312 1 002

LEMBAR PENGESAHAN

PENJEJAKAN (*TRACKING*) SUMBER BUNYI BERGERAK BAWAH AIR BERDASARKAN ESTIMASI WAKTU TUNDA MENGGUNAKAN *HIDROFON ARRAY*

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Fisika
pada
Bidang Studi Vibrasi dan Akustik
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

FIDIA SHETHIN ANISA
NRP. 02311645000013

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Dhany Arifianto ST, M.Eng  (Pembimbing I)
2. Ir. Wiratno Argo Asmoro, M.Sc  (Ketua Penguji)
3. Ir. Jerri Susatio, M.T  (Penguji II)
4. Lizda Johar Mawarani, ST, MT  (Penguji III)

SURABAYA
JULI 2018

**PENJEJAKAN (*TRACKING*) SUMBER BUNYI BERGERAK
BAWAH AIR BERDASARKAN ESTIMASI WAKTU TUNDA
MENGUNAKAN HIDROFON ARRAY**

ABSTRAK

Nama Mahasiswa : Fidia Shethin Anisa
NRP : 02311645000013
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Dhany Arifianto ST, M.Eng

Abstrak

Kemajuan dalam teknologi akustik dan instrumentasi sekarang memungkinkan untuk identifikasi objek, terutama objek yang bergerak di air. Emisi sinyal akustik dari target dapat digunakan untuk mendeteksi keberadaannya di dalam air. Perambatan sinyal akustik dalam bentuk tekanan partikel cairan pada medium dalam frekuensi dan variabel *gain* yang dapat dideteksi oleh hidrofon. *Array* hidrofon terdiri dari sejumlah hidrofon mewakili sensor bawah air yang dapat digunakan untuk mendeteksi azimuth target dengan mendapatkan informasi waktu tunda. Kemudian, memanfaatkan perbedaan waktu kedatangan dua hidrofon untuk melokalisasi sumber akustik bawah laut. Dengan menggunakan estimasi arah probabilistik berdasarkan proses Bayesian, informasi arah yang akurat dapat diperoleh. Sudut datang sumber diperoleh dari perhitungan dengan metode *beamforming*. Hasil menunjukkan kapal selam dapat terdeteksi arah gerak (θ) serta jarak (r) sumber suara terhadap sensor dengan menghasilkan error penjejakan sudut datang dengan *range* antara 0–6 derajat error, untuk posisi menghasilkan error 0.01-1.93 meter error.

Kata Kunci : *estimasi waktu tunda, hidrofon array, beamforming, lokalisasi, tracking objek.*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**TRACKING OF UNDERWATER MOVING SOURCE BASED ON
TIME DELAY ESTIMATION USING HYDROPHONE ARRAY**

ABSTRACT

Name : Fidia Shethin Anisa
NRP : 02311645000013
Department : Department of Engineering Physics
Supervisor : Dr. Dhany Arifianto ST, M.Eng

Abstract

Advances in acoustic technology and instrumentation now make it possible to for the identification of objects, especially moving objects in the water. Acoustics signal emission from a target can be used to detect its existence in the water. Propagation of acoustic signal in the form of fluid particles pressure on a medium in frequency and gain variable which can be detected by a hidrofon. A hydrophone array is made up of hidrofons represents underwater sensors that can be used to detect azimuth of target by obtain the time delay information. Then, it utilizes time difference of arrival of two hydrophone to localize the underwater acoustic sources. Using probabilistic direction estimation based on Bayesian process, a reliable directional information can be acquired. The direction angles acquired from beamforming methode. The result shows that the sound source can detect the direction of motion (θ) as well as the distance (r) the source of the sound to the sensor by generating an angle tracking error coming with a range between 0-6 degrees error, for the position of generating error 0.01-1.93 meter error.

Keywords: *time delay estimation, hidrofon array, beamforming, localization, tracking object.*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas rahmat dan ridho-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan penyusunan laporan tugas akhir yang berjudul:

“PENJEJAKAN (*TRACKING*) SUMBER BUNYI BERGERAK BAWAH AIR BERDASARKAN ESTIMASI WAKTU TUNDA MENGGUNAKAN HIDROFON ARRAY”

Tugas akhir ini merupakan salah satu persyaratan akademik yang harus dipenuhi dalam program studi S-1 Teknik Fisika FTI-ITS. Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar – besarnya kepada:

1. Bapak Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D. selaku kepala Departemen Teknik Fisika FTI-ITS.
2. Bapak Dr. Dhany Arifianto ST, M.Eng selaku dosen pembimbing yang dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, dan bimbingan kepada penulis.
3. Ibu Hendra Cordova, S.T., M.T. selaku dosen wali yang telah membantu penulis selama perkuliahan.
4. Segenap Bapak dan Ibu dosen pengajar di departemen Teknik Fisika ITS yang telah memberikan ilmu selama penulis berkuliah di Teknik Fisika ITS.
5. Orang tua dan Keluarga yang selalu memberikan dukungan moral dan finansial selama pengerjaan tugas akhir.
6. Teman – teman Lintas Jalur Teknik Fisika 2016, teman – teman bimbingan tugas akhir dan VibrasticLab yang telah banyak membantu dalam bentuk semangat dan doa.
7. Semua pihak yang telah membantu dalam pengerjaan tugas akhir yang tidak dapat disebutkan satu – persatu.

Penulis menyadari bahwa mungkin masih terdapat kekurangan dalam laporan tugas akhir ini, sehingga kritik dan saran yang membangun sangat diterima oleh penulis. Semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi penulis dan pembaca.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	xi
ABSTRACT	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
BAB II DASAR TEORI	5
2.1 Persamaan Akustik Bawah Air	5
2.2 Intensitas, TTB, Desibel	6
2.3 Faktor dan Indeks Keterarahan	7
2.4 Figure of Merit (FOM)	8
2.5 Hidrofon <i>Array</i>	9
2.6 <i>Beamforming</i>	11
2.7 Respon Impuls	15
2.8 Atenuasi.....	18
2.9 Estimasi Waktu Tunda.....	19
2.10 Algoritma Estimasi Waktu Tunda	20
2.11 Triangulasi.....	23

BAB III METODOLOGI PENELITIAN	25
3.1 Keterarahan <i>Speaker</i>	25
3.2 Keterarahan Hidrofon.....	26
3.3 Pengukuran Kecepatan Suara Bawah Air.....	26
3.4 Pengukuran Respon Impuls	29
3.5 Pengukuran Atenuasi.....	30
3.6 Pencarian Medan Bebas pada Kolam	33
3.7 Pelacakan Sudut Datang Sumber Suara	34
3.8 Penjejakan Posisi Sumber Suara.....	35
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	37
4.1 Keterarahan <i>Speaker</i>	37
4.2 Keterarahan dan Validasi Nilai Hidrofon	39
4.3 Menghitung Kecepatan Suara Bawah Air.....	45
4.4 Respon Impuls Kolam	47
4.5 Atenuasi Kolam.....	50
4.6 Pencarian Medan Bebas.....	51
4.7 Figure of Merit	52
4.8 Pelacakan Sudut Datang Sumber Suara	53
4.9 Penjejakan Sumber Suara	55
BAB V PENUTUP	58
5.1 Kesimpulan	58
5.2 Saran.....	58
DAFTAR PUSTAKA	60
LAMPIRAN A.....	62
LAMPIRAN B	64

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Hidrofon Array.....	10
Gambar 2.2 <i>Beamforming</i>	12
Gambar 2.3 Respon pengaruh sudut datang terhadap <i>gain</i> hidrofon pada <i>beamforming</i>	13
Gambar 2.4 <i>Uniform linear array</i> dengan 4 hidrofon	14
Gambar 2.5 Dasar perhitungan <i>beamforming</i>	14
Gambar 2.6 Sistem linear time invariant.....	16
Gambar 2.7 Proses ekstraksi respon impuls.....	17
Gambar 2.8 Daerah dominan dari proses atenuasi perambatan suara di air laut.....	19
Gambar 2.9 Geometri estimasi waktu tunda	20
Gambar 2.10 Triangulasi hidrofon.....	23
Gambar 3.1 Skema pengukuran keterarahan speaker.....	25
Gambar 3.2 Skema dan ukuran kolam uji	27
Gambar 3.3 Skema pengambilan data kecepatan suara.....	27
Gambar 3.4 Spektrum sinyal ESS	29
Gambar 3.5 Skema pengambilan data respon impuls.....	30
Gambar 3.6 Skema penempatan sensor pada kolam	31
Gambar 3.7 Skema Penempatan Sensor Hidrofon 1	33
Gambar 3.8 Posisi sensor hidrofon tampak atas.....	34
Gambar 3.9 Triangulasi hidrofon.....	35
Gambar 3.10 Kapal selam uji.....	35
Gambar 3.11 Skema pengambilan data objek bergerak	36
Gambar 4.1 Keterarahan speaker dengan frekuensi 500Hz.....	37
Gambar 4.2 Keterarahan speaker dengan frekuensi 1000Hz.....	37
Gambar 4.3 Keterarahan speaker dengan frekuensi 2000Hz.....	38
Gambar 4.4 Keterarahan speaker dengan frekuensi 4000Hz.....	38
Gambar 4.5 Keterarahan speaker dengan frekuensi 8000Hz.....	39
Gambar 4.6 Respon frekuensi 1000 Hz 4 buah hidrofon	42
Gambar 4.7 Posisi empat buah hidrofon	43

Gambar 4.8 Pola sensitivitas hidrofon <i>array</i> dalam air untuk frekuensi 500 Hz	43
Gambar 4.9 Pola sensitivitas hidrofon <i>array</i> dalam air untuk frekuensi 500 Hz	44
Gambar 4.11 Spektrum sinyal ESS (A), spektrum sinyal rekaman (B), Spektrum Sinyal <i>Invers filter</i> (C)...	47
Gambar 4.12 Respon impuls kolam	48
Gambar 4.13 Plot atenuasi dengan <i>software excel</i>	50
Gambar 4.14 Plot atenuasi dengan <i>software Matlab</i>	51
Gambar 4.15 Sudut datang objek diam dari kanan relatif terhadap sensor	54
Gambar 4.16 Sudut datang objek bergerak dari kanan kiri menuju kanan sensor	54

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Persamaan Empiris Kecepatan Suara	6
Tabel 2.2 Variabel Sonar	9
Tabel 3.1 Persamaan Kecepatan Suara	28
Tabel 3.2 Koordinat posisi penempatan sensor	32
Tabel 4.1 Standar deviasi pengukuran tingkat tekanan bunyi pada hidrofon	52
Tabel 4.2 Pengukuran Posisi 1	56
Tabel 4.3 Pengukuran Posisi 2	56
Tabel 4.4 Pengukuran Posisi 3	56

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia adalah negara kepulauan terbesar di dunia yang mempunyai lebih dari 17.000 pulau, serta luas lautan sekitar 5,8 juta kilometer persegi dengan sumber daya alam (SDA) melimpah baik di daratan maupun di lautan yang terdiri dari mineral barang tambang, energi dan hasil laut. Sumber daya ini berpotensi memunculkan konflik dengan negara tetangga di pulau terluar dan daerah perbatasan. Sebagai daya penggentar, Indonesia memerlukan angkatan bersenjata yang kuat dengan didukung peralatan militer yang tangguh sehingga mampu menjaga teritorial negara kesatuan Republik Indonesia. Namun, kemampuan persenjataan Indonesia tidak sebanding dengan luasnya wilayah kepulauan, jika dibandingkan dengan negara tetangga.

Monitoring untuk proteksi dan kemanan dari ancaman kapal maupun obyek bawah air lainnya perlu sekali dilakukan. Telah banyak dimanfaatkan sinyal akustik bawah air untuk identifikasi objek terutama objek yang bergerak di air. Kemampuan sinyal akustik dalam hal perambatan dan atenuasi dalam air lebih baik lebih baik daripada gelombang elektromagnetik. Dibalik kemampuan tersebut, juga muncul kelemahan yang ditimbulkan akibat perambatan sinyal akustik. Seperti contoh yang terjadi pada dunia militer, perambatan sinyal akustik akibat bising mesin suatu objek kapal dapat dijadikan informasi penting untuk mendeteksi posisi objek tersebut. Keuntungan melakukan deteksi sumber bunyi jarak jauh adalah menghindarkan kontak fisik secara langsung dengan objek musuh sehingga informasi dapat diperoleh dengan cara yang lebih aman. Keberadaan suatu benda dalam air dapat dideteksi dari pancaran sinyal akustik akibat benda tersebut. Pancaran yang ditimbulkan mengalir dalam bentuk flow *array* sehingga dapat dideteksi pergerakan gelombangnya dalam variabel frekuensi, *gain*, kecepatan dan tekanan didalamnya. Dalam mendeteksi keberadaan sumber tersebut terdapat berbagai macam metode.

Penentuan sudut datang sumber bunyi bawah air bisa diperoleh berdasarkan estimasi waktu tunda (*Time delay Estimation/ TDE*) menggunakan beberapa sensor hidrofon yang didistribusikan secara spasial (*array*), sehingga mampu menangkap sinyal suara yang datang. *Hidrofon array* terdiri dari beberapa *hidrofon* yang dapat diatur dengan leluasa dimana letak setiap *hidrofon* tersebut memiliki waktu tunda jika terdapat sumber bunyi yang datang, bergantung pada posisi dari sumber suara tersebut. Nilai waktu tunda ini kemudian diproses guna mencari sudut datang sumber suara terhadap posisi *hidrofon*. Permasalahan estimasi dengan menggunakan *time delay* telah banyak digunakan. Pada sistem dinamik dengan *noise*, setelah melakukan pengukuran, seringkali membutuhkan waktu sampai filter dapat bekerja.

Pada penelitian ini akan dilakukan pengestimasi posisi kapal selam dengan menggunakan metode *beamforming*. *Beamforming* merupakan teknik pemrosesan sinyal dari sistem *array*. Metode ini dibuat dengan tujuan membangun beam pattern dari susunan mikrofon *array* yang digunakan. Hasil yang diharapkan adalah didapatkan estimasi posisi dan kecepatan kapal selam dengan tingkat akurasi yang lebih baik. Dari permasalahan diatas diusulkan penelitian yang berjudul “Penjejakan (*Tracking*) Sumber Bunyi Bergerak Bawah Air Berdasarkan Estimasi Waktu Tunda Menggunakan Hidrofon *Array*” sehingga diharapkan mampu diterapkan menjadi teknologi militer untuk mendeteksi objek secara yang bergerak bawah air.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah yang ada, maka rumusan masalah yang akan dibahas pada projek akhir ini adalah:

- Bagaimana melacak sumber bunyi bergerak bawah air berdasarkan estimasi waktu tunda dengan menggunakan sonar?
- Bagaimana performansi estimasi posisi dan sudut datang sumber dengan menggunakan metode *beamforming*?

1.3 Tujuan

Dari permasalahan yang telah disebutkan, maka tujuan yang dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut

- Melacak sumber bunyi bergerak bawah air *time delay* menggunakan hidrofون *array*.
- Menganalisis performansi estimasi posisi dan sudut datang sumber suara menggunakan metode *beamforming*.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut

- Pengambilan data dilakukan di kolam Jurusan Teknik Fisika ITS dengan kedalaman tertentu dan kualitas air kolam dianggap homogen.
- Variabel yang dideteksi adalah variabel sudut sumber bunyi relatif terhadap hidrofون *array*.
- Pengolahan data dibatasi dengan menggunakan metode *Beamforming* menggunakan *software* Matlab.
- Sumber bunyi yang digunakan berada pada daerah free-field sehingga sinyal yang datang ke sensor dianggap sebagai muka gelombang *planar*.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Persamaan Akustik Bawah Air

Persamaan akustik bawah air diturunkan dari persamaan state, persamaan kekekalan massa (persamaan kontinuitas) dan persamaan kekekalan momentum. Adapun persamaan akustik bawah air adalah persamaan gelombang berikut.

$$\frac{\partial^2 p_1}{\partial t^2} = c_o^2 \frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2} \quad (2.1)$$

Dimana:

P_1 = Tekanan (Pa)

C_o = Kecepatan Rambat Gelombang Suara (m/s)

t = Waktu (s)

x = Koordinat Posisi

2.1.1 Kecepatan Rambat Suara di Bawah Air

Pada medium yang nondispersif, dimana perambatan panjang gelombang yang bereda pada kecepatan fasa yang sama, dapat dilihat hubungan antara panjang gelombang dengan frekuensi pada gelombang elektromagnetik:

$$c = \lambda f \quad (2.2)$$

dimana

λ = panjang gelombang, jarak antara dua titik (puncak ke puncak atau lembah ke lembah) pada gelombang

f = frekuensi, banyaknya gelombang tiap satuan waktu

Kecepatan rambat dari gelombang suara lebih rendah daripada kecepatan gelombang elektromagnetik, yaitu sekitar 1500 m/s pada air. Cepat rambat adalah fungsi temperatur lingkungan (T), tekanan (P) dan salinitas (s) air, yang dapat dirumuskan:

$$c = F(T, p, s) \quad (2.3)$$

Kecepatan suara di bawah air menentukan banyak perilaku propagasi suara bawah air. Secara empiris kecepatan suara (c) merupakan fungsi dan temperatur (T), salinitas (s) dan kedalaman (z). Kecepatan suara ini bervariasi tergantung pada lokasi geografisnya. Variasi kecepatan suara terhadap kedalaman dinamakan *Sound Velocity Profile* (SVP). SVP dapat diperoleh dengan observasi hidrografi berupa pengukuran temperatur, salinitas dan kedalaman. Berikut ini adalah tiga persamaan empiris kecepatan suara yang hanya dipengaruhi oleh temperatur, salinitas dan kedalaman, dimana tidak ada faktor lain yang mempengaruhinya baik itu kecepatan arus laut maupun faktor fisik lainnya. (Urick, 1983).

Tabel 2.1 Persamaan Empiris Kecepatan Suara

Persamaan Empiris Kecepatan Suara	Persamaan
Leroy	$c = 1492.9 + 3(T-10) - 6 \cdot 10^{-3}(T-10)^2 + 1.2(S-35) - 10^{-2}(T-18)(S-35) + z/61$
Medwin	$c = 1449.2 + 4.6T - 5.5 \cdot 10^{-2}T^2 + 2.9 \cdot 10^{-4}T^3 + (1.34 \cdot 10^{-2})(S-35) + 1.6 \cdot 10^{-2}z$
Mackenzie	$c = 1448.96 + 4.591 T - 5.304 \cdot 10^{-2}T^2 + 2.374 \cdot 10^{-4} T^3 + 1.34(S-35) + 1.63 \cdot 10^{-2} z + 1.675810^{-7} z^2 - 1.025 \cdot 10^{-2}T(S-35) - 7.139 \cdot 10^{-13}T z^3$

2.2 Intensitas, TTB, Desibel

Aliran energi pada gelombang akustik sama dengan radar dan elektro-optik. Daya per satuan luas pada gelombang akustik merupakan intensitas (I), berubah seiring dengan daya pangkat dua. Hubungan antara I dan p dapat dituliskan:

$$I \propto p^2 \quad (2.4)$$

Untuk Tingkat Tekanan Bunyi (TTB), dapat dirumuskan dengan:

$$\text{TTB: } 20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right) \quad (2.5)$$

dimana p_0 adalah tekanan referensi, yang didefinisikan 1 μPa , pada 1 μbar dan 0.0002 μbar dengan satuan desibel (dB).

Dapat diperhatikan untuk faktor pengali 20 digunakan karena intensitas sebanding dengan kuadrat tekanan dan untuk 10 log dari daya sama dengan desibel. Desibel menunjukkan perbandingan daya, yang sebanding dengan kuadrat tekanan. Untuk mencari nilai TTB sebelumnya harus ada informasi mengenai: (1) tekanan referensi (atau *power density* W/cm^2), (2) *range* frekuensi dari sumber suara, (3) sinyal yang dipancarkan dari sumber referensi (jarak).

Tingkat Tekanan Bunyi (dB SPL) pada sensor hidrofon dihitung dengan menggunakan referensi dari sensitifitas dari hidrofon yaitu -180 dB dengan referensi 1 Volt per 1 Pascal. Untuk dapat menghitung dB SPL yang dideteksi hidrofon, sebelumnya harus mengetahui nilai tegangan atau *transfer factor* yang dihasilkan saat mendapat tekanan 1 Pa (1 Pa sama dengan 93.97 dB SPL) dengan menggunakan **persamaan (2.5)**.

$$S = 20 \log(\text{TF}) \quad (2.6)$$

$$\text{TF} = 10^{S/20}$$

Dimana,

S = sensitivitas

TF = *transfer factor*

Selanjutnya dB SPL didapatkan dengan menggunakan persamaan:

$$\text{dB} = 20 \log \left(\frac{v}{\text{TF}} \right) \quad (2.7)$$

$$\text{dB SPL} = S + \text{dB} + 94$$

dengan,

v = tegangan yang terukur hidrofon

2.3 Faktor dan Indeks Keterarahan

Setiap sumber bunyi menyebarkan gelombang suara ke segala arah disekitarnya. Penyebaran ini tergantung pada pola yang sesuai

dengan karakteristik sumber suara tersebut. Sebuah sumber ideal memiliki pola keterarahan yang berbentuk bola. Keterarahan suatu sumber bunyi biasanya dinyatakan dengan besaran Faktor Keterarahan atau Indeks Keterarahan.

Faktor Keterarahan (Q) didefinisikan sebagai perbandingan antara intensitas bunyi pada suatu arah dengan intensitas rata-rata, keduanya diukur pada jarak tertentu, secara matematis dapat dituliskan dengan **persamaan (2.5)**.

$$Q = \frac{I\theta}{\bar{I}} \quad (2.7)$$

$I\theta$ merupakan intensitas bunyi pada sudut θ pada jarak tertentu, dan \bar{I} merupakan intensitas rata-rata untuk keseluruhan arah. Untuk gelombang spheris (muka gelombang berbentuk bola), intensitas I sebuah titik yang berjarak r dari pusat sumber bunyi dalam ruang bebas ditentukan oleh harga kuadrat tekanan bunyi dan dapat dinyatakan dengan **persamaan (2.6)**.

$$I = \frac{p^2}{\rho oc} \quad (2.8)$$

I merupakan intensitas bunyi pada jarak r dari sumber, p merupakan tekanan bunyi pada jarak r dari sumber, ρo merupakan rapat jenis medium, dan c adalah kecepatan rambat bunyi. Sehingga untuk faktor keterarahan (Q) dapat ditulis dengan:

$$Q(f) = \frac{p\theta^2}{(\bar{p})^2} \quad (2.9)$$

Sehingga untuk menentukan Indeks Keterarahan atau *Directivity Index (DI)* dari **persamaan (2.7)** adalah:

$$DI(f) = 10 \log Q \quad (2.10)$$

2.4 Figure of Merit (FOM)

Istilah "figure of merit" (FOM) sering dijumpai ketika membahas persamaan sonar. Secara sederhana, FOM adalah sejumlah *transmission loss* yang akan menghasilkan kelebihan

signal nol dB. FOM dihitung dengan menyelesaikan persamaan untuk *transmission loss*:

$$\text{FOM} = \text{SL} - \text{NL} + \text{DI} - \text{DT} \quad (2.11)$$

$$\text{FOM} = \text{SL} - \text{NL} + \text{AG} - \text{DT}$$

Tabel 2.2 Variabel Sonar

Variabel	Definisi	Jarak Referensi
<i>Source Level</i> (SL)	10 log (Intensitas pada sumber dibagi intensitas referensi)	Jarak 1m dari sumber
<i>Transmission Loss</i> (TL)	10 log (intensitas sinyal pada jarak referensi dibagi intensitas pada penerima atau target)	Jarak 1m dari sumber
<i>Noise Level</i> (NL)	10 log (intensitas <i>noise</i> dibagi intensitas referensi)	Pada hidrofon
<i>Detection Threshold</i> (DT)	10 log (daya <i>signal to noise</i> pada output array)	Pada output array
<i>Array Gain</i> (AG)	10 log (<i>gain</i> pada <i>signal to noise</i> relatif dengan satu omnidirectional hidrofon)	Pada output array
<i>Directivity Index</i> (DI)	<i>Noise</i> diasumsika sama pada semua arah (omnidirectional)	Pada output array

2.5 Hidrofon Array

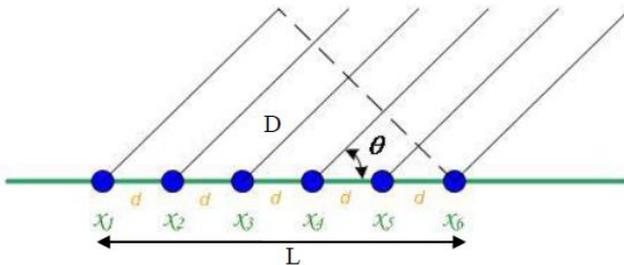
Prinsip hidrofon didasarkan pada transduser *piezoelektrik* yang menghasilkan listrik ketika mengalami perubahan tekanan. Bahan *piezoelektrik* tersebut dapat mengkonversi sinyal suara menjadi sinyal listrik karena suara adalah gelombang tekanan.

Hidrofon adalah suatu transducer yang mendeteksi perubahan tekanan dari suatu sinyal akustik bawah air dan mengubahnya menjadi bentuk tegangan yang nilainya sebanding dengan tekanan

yang diterima (Sherman, 2007). Hidrofon *array* merupakan susunan 2 hidrofon atau lebih yang digunakan untuk menangkap sinyal yang dibawa oleh gelombang suara. Pada teknik penggunaan hidrofon *array*, susunan sejumlah hidrofon pada dasarnya menyuplik medan suara pada titik yang berbeda pada suatu ruang. Sesuai dengan teorema sampling bahwa aliasing juga terjadi pada domain frekuensi jika sinyal sampling tidak memenuhi kriteria nyquist.

Pertimbangan yang sama ketika kita menganalisis spektrum dari frekuensi spasial. Kriteria *nyquist* ekuivalen dengan rata-rata sampling untuk menghindari spatial aliasing secara tidak langsung jarak antar sensor d harus kurang dari atau sama dengan setengah minimum panjang gelombang, dimana minimum panjang gelombang ini berkaitan dengan frekuensi maksimum dari sumber (Sherman, 2007).

$$d \leq \frac{\lambda}{2} \quad (2.12)$$



Gambar 2.1 Hidrofon *Array*

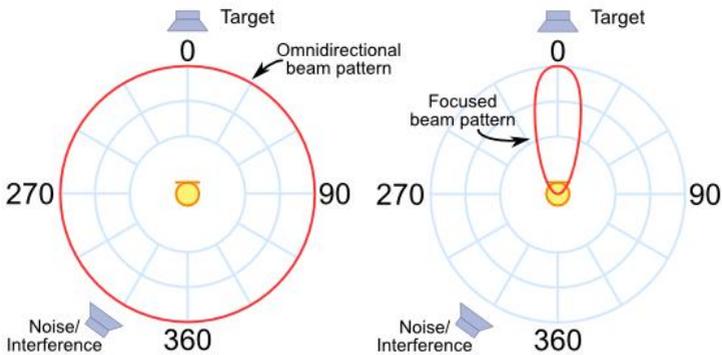
Dimana d adalah jarak antar sensor, λ adalah panjang gelombang, c adalah kecepatan gelombang diudara dan f adalah frekuensimaksimum dari sumber dalam satuan Hz. Sedangkan asumsi gelombang yang datang berupa planewave, hal ini terjadi jika jarak sumber terhadap sensor cukup jauh (far field). Medan jauh didefinisikan sebagai wilayah dimana bentuk sinyal tidak berubah terhadap jarak. Pada medan jauh, tingkat tekanan bunyi

berlaku hukum kuadrat terbalik (tingkat tekanan bunyi berkurang 6 dB pada kelipatan dua kali jarak dari sumber).

Keuntungan menggunakan hidrofona *array* daripada satu hidrofona sebagai penangkap sinyalnya adalah memperbesar *gain* sehingga keterarahan lebih bagus dan *noise* yang diterima lebih diperkecil seperti **Gambar 2.3**. Terdapat pengaruh yang signifikan dari jumlah penyusun hidrofona *array*. Semakin banyak jumlah hidrofona yang dipakai dalam hidrofona *array*, kualitas penangkapan suaranya lebih bagus.

2.6 *Beamforming*

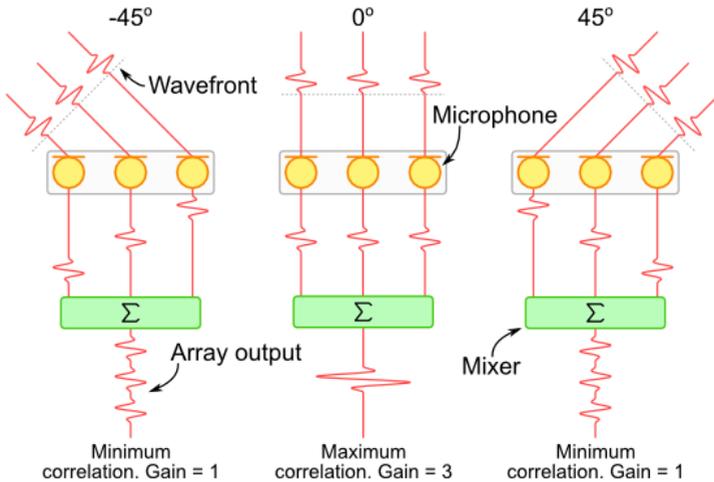
Beamforming merupakan filter spasial dan dapat pula digunakan untuk memperbesar *signal-to-noise ratio* (SNR) dengan cara membuang *noise* di luar arah yang ditentukan. Karakteristik suatu sumber suara yang datang dari sudut tertentu dipengaruhi oleh pola keterarahan suatu hidrofona $H(\omega, \theta)$ filter spasial yang merupakan fungsi sudut dan frekuensi. **Gambar 2.2** dibawah ini menunjukkan pola sensitifitas dari dua buah mikrofon yang berbeda. Pada bagian kiri menunjukkan pola ideal dari hidrofona *omnidirectional*. Sedangkan bagian kanan menunjukkan pola sensitifitas yang difokuskan agar mencapai sensitifitas maksimum pada arah tertentu dan mengurangi sensitifitas pada arah yang lain.



Gambar 2.2 *Beamforming*

Efek *beamforming* dapat dicapai dengan menggunakan susunan linear dari hidrofons *array*. Seperti pada **Gambar 2.2** dibawah ini yang diilustrasikan oleh 3 buah mikrofon *array*. Dapat dilihat dengan mudah bahwa arah asal gelombang berpengaruh pada waktu sinyal sampai di masing-masing mikrofon. Ketika gelombang datang sudut -45° , sinyal pertama kali sampai pada mikrofon paling kiri, saat sinyal datang dari tegak lurus *array* sinyal mencapai mikrofon secara bersamaan waktunya, demikian pula saat sinyal datang dari arah 45° sinyal pertama kali sampai pada mikrofon paling kanan.

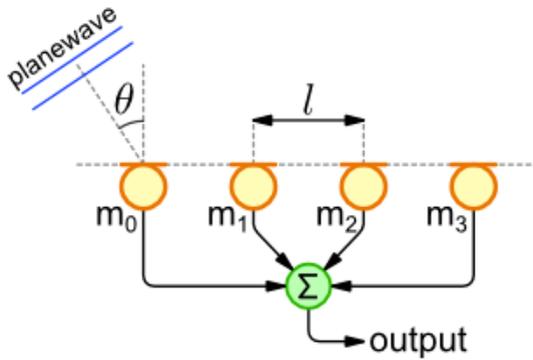
Jika output *array* merupakan penjumlahan dari sinyal-sinyal yang diterima oleh mikrofon, maka output amplitudo maksimum dicapai saat sinyal datang tegak lurus terhadap mikrofon, sehingga jika sinyal berasal dari arah yang tidak tegak lurus, maka sinyal akan tiba pada waktu yang berbeda-beda sehingga akan kurang berkorelasi dan akan menghasilkan amplitudo output yang lebih rendah.



Gambar 2.3 Respon pengaruh sudut datang terhadap *gain* hidrofona pada *beamforming*

A. *Beam Pattern*

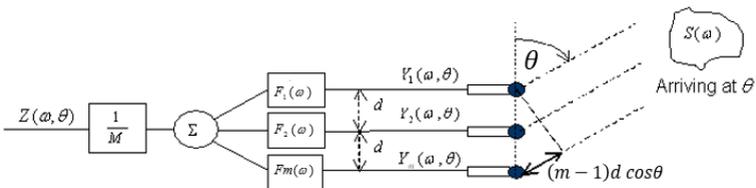
Perhitungan sederhana dapat digunakan untuk menghitung sensitivitas dari hidrofona *array* dari sinyal yang datang dari arah tertentu. **Gambar 2.4** menunjukkan 4 buah sensor hidrofona *array*. Setiap sensor terpisah sejauh l (meter). Sudut datang diukur dari titik tegak lurus dari sensor *array*. Rumus dibawah ini menghitung *gain array* dari satu frekuensi f dan sudut datang θ . c menunjukkan kecepatan suara dan N adalah jumlah hidrofona.



Gambar 2.4 Uniform linear array dengan 4 hidrofون

$$Output = 20 \log_{10} \left(\frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} e^{\frac{j.2\pi.f.i.l.\cos(\theta)}{c}} \right) \quad (2.13)$$

Persamaan diatas menunjukkan *output* dari suatu hidrofون array berdasarkan fungsi θ , jika output semakin besar maka artinya pembacaan hidrofون semakin sensitif. Konsep dasar *beamforming* dapat dilihat pada **Gambar 2.5** yang menunjukkan diagram blok perhitungan.



Gambar 2.5 Dasar perhitungan *beamforming*

Sinyal yang diterima hidrofون disimbolkan dengan $y_m [k]$ yang merupakan sinyal asli $S(\omega)$ yang tertunda akibat pengaruh spasial antara sumber dan sensor.

$$y_m[k] = s[k - \tau_m(\theta)] \quad (2.14)$$

dimana,

$$Y_m(\omega, \theta) = e^{-j\omega\tau_m(\theta)}S(\omega) \quad (2.15)$$

$$\tau_m(\theta) = \frac{(m-1)d \cos \theta}{c} f_s \quad (2.16)$$

Sinyal yang diterima pada masing-masing hidrofons kemudian dijadikan satu pada sebuah vektor.

$$Y_m(\omega, \theta) = d(\omega, \theta)S(\omega) \quad (2.17)$$

$$d(\omega, \theta) = [1 \quad e^{-j\omega\tau_2(\theta)} \quad \dots \quad e^{-j\omega\tau_m(\theta)}]^T$$

d merupakan vektor

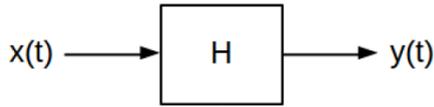
Sehingga keluaran sinyal pada kasus M hidrofons *array* $Z(\omega, \theta)$ adalah seperti berikut.

$$Z(\omega, \theta) = \sum_{m=1}^M F_m(\omega)Y_m(\omega, \theta) \quad (2.18)$$

Pada kasus sumber bunyi bergerak, perubahan nilai θ mempengaruhi besarnya keluaran sinyal $Z(\omega, \theta)$ pada hidrofons *array* yang merupakan fungsi frekuensi dan sudut. Semakin sumber mendekati sensor maka nilai θ semakin besar sehingga sinyal yang ditangkap juga semakin kuat.

2.7 Respon Impuls

Impuls response dari ruang akustik merupakan salah satu karakter penting, *Impuls response* didalam ruangan digambarkan karakteristik *linear time invariant (LTI)* suatu sistem pada semua frekuensi. *Impuls response* menggambarkan perubahan perilaku keluaran terhadap perubahan sinyal masukan. Sebuah waktu kontinyu sistem LTI digambarkan seperti pada **Gambar 2.2**.



Gambar 2.6 Sistem linear time invariant

Respon sistem yang dihasilkan berupa kurva yang menjadi dasar untuk menganalisa karakteristik sistem selain menggunakan persamaan/ model matematika. Bentuk kurva respon sistem dapat dilihat setelah mendapatkan sinyal input. Sinyal input diberikan untuk mengetahui karakteristik sistem disebut sinyal test. Sinyal input yang digunakan adalah sinyal ESS. ESS mempunyai keunggulan jika dibandingkan menggunakan linear sine sweep seperti metode MLS dan IRS. Metode ESS menggunakan sinyal swept sinusoidal yang berubah secara eksponensial untuk eksitasi kondisi ruangan dan dekonvolusi aperiodik untuk mengekstrak impuls respons dari respon ruangan yang terekam (Farina, 2000).

Berikut keuntungan menggunakan metode ESS dibandingkan metode pengukuran IR yang lain, antara lain:

- a. Dapat mengabaikan *noise* dibandingkan metode MLS, dengan memberikan sinyal yang sama panjang.
- b. Pemisahan yang mendekati sempurna dari efek nonlinier dari respon linear yang diinginkan dibandingkan dengan metode MLS. Hal ini disebabkan oleh metode ESS terbebas dari puncak-puncak palsu pada sinyal akibat distorsi ketika menggunakan metode MLS.
- c. Untuk sistem yang memiliki variansi waktu, seperti yang melibatkan propagasi suara di udara dapat menghilangkan kesalahan fase pada frekuensi tinggi.
- d. Menghindari masalah time aliasing yang biasanya dialami oleh metode MLS akibat konvolusi linear yang aperiodik.

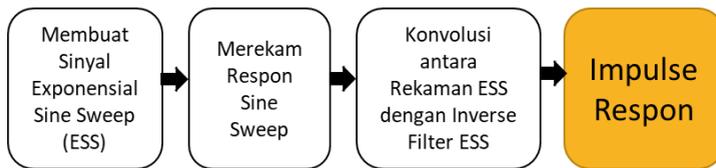
Sinyal ESS yang digunakan untuk eksitasi ruang dapat dinyatakan dalam domain waktu kontinu sebagai berikut:

$$s(t) = \sin [\theta(t)] = \sin [K(e^{-\frac{t}{L}} - 1)] \quad (2.19)$$

dimana,

$$K = \frac{\omega_1 \cdot T}{\ln\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)}, L = \frac{T}{\ln\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)} \quad (2.20)$$

T adalah durasi dari sinyal *sweep*, yang berupa sinyal *sweep* sinusoidal yang terbatas pada frekuensi antara dan. Keuntungan menggunakan batas frekuensi adalah dapat menyesuaikan batas frekuensi kerja dari *speaker* dan hidrofon sehingga didapatkan hasil *impuls response* yang maksimal. Berikut diagram blok yang menjelaskan cara kerja ekstraksi *impuls response* menggunakan teknik ESS:



Gambar 2.7 Proses ekstraksi respon impuls

Respon Impuls $h(t)$ didapatkan dengan melakukan konvolusi antara sinyal rekaman $r(t)$ dengan *invers filter* $f(t)$ yang telah dibuat.

$$h(t) = r(t) * f(t) \quad (2.21)$$

Persamaan diatas menggambarkan respon impuls yang ideal, terlepas dari distorsi sinyal. Masalah terbesar terjadi akibat respon *speaker* yang tidak ideal selama proses pembangkitan suara (seperti distorsi suara pada frekuensi rendah) dan *noise* luar yang masuk selama proses perekaman. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Farina, distorsi harmonik selalu terjadi didepan sinyal *impuls response*, sehingga distorsi tersebut mudah ditemukan dan sinyal tersebut dapat dihilangkan dengan cara

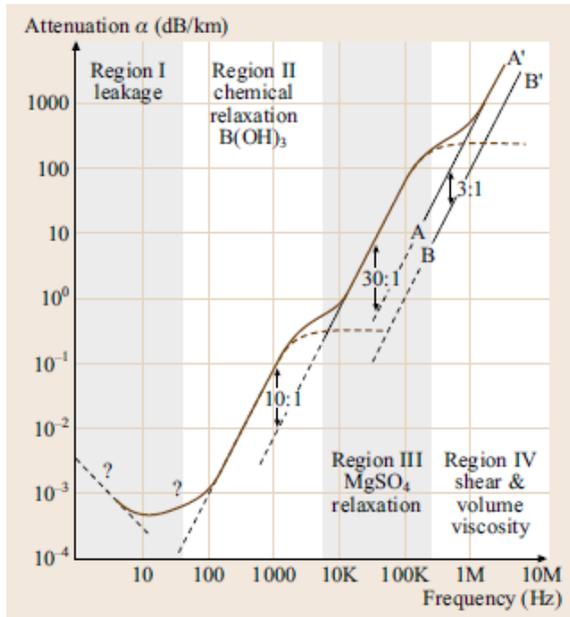
memotongnya tanpa mempengaruhi respon linear sinyal (Farina, 2000).

2.8 Atenuasi

Atenuasi dikarakterisasikan oleh peluruhan secara eksponensial dari sumber suara. Jika Y_0 merupakan amplitudo *root-mean-square* (rms) dari sumber suara pada satuan jarak, maka atenuasi dari sumber suara menyebabkan peluruhan amplitudo seiring penambahan jarak x ,

$$Y = Y_0 \exp(-\alpha x) \quad (2.22)$$

dengan α pada pengukuran ini memiliki satuan rasio (*Nepper*) / jarak. Koefisien atenuasi dinyatakan dengan satuan desibel (dB) dibagi dengan jarak yang didapatkan dari konversi $\alpha' = 8.686\alpha$. (Rossing, 2013) Volume atenuasi akan meningkat seiring dengan peningkatan frekuensi dan hubungan frekuensi terhadap atenuasi dapat dimodelkan seperti pada **Gambar 2.8**. Namun kondisi tersebut digunakan hanya untuk air laut yang sudah diidentifikasi karakteristiknya.



Gambar 2.8 Daerah dominan dari proses atenuasi perambatan suara di air laut. Atenuasi dengan satuan dB per km.

2.9 Estimasi Waktu Tunda

Time delay/ waktu tunda adalah waktu yang dibutuhkan oleh suatu gelombang untuk mencapai titik terjauh dari sumber suara dimana perbedaan waktu dapat digunakan untuk melokalisasi sumber suara (Khaddour, 2011). Terdapat sebuah model sederhana yang menjelaskan penundaan waktu adalah ketika ada dua hidrofons m_1 dan m_2 . Sinyal yang terestimasi dari hidrofons di atas adalah sebagai berikut:

$$x_1(t) = s_1(t) + n_1(t) \quad (2.23)$$

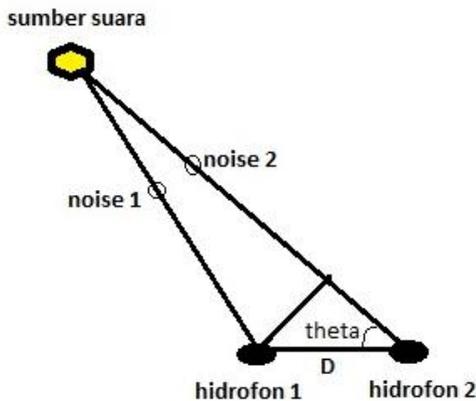
$$x_2(t) = as_1(t + d) + n_2(t)$$

Dimana $x_1(t)$ dan $x_2(t)$ adalah sinyal yang ditangkap oleh sensor m_1 dan m_2 ; $s_1(t)$ adalah sinyal suara yang ditransmisikan; $n_1(t)$, $n_2(t)$ adalah *noise array* yang bersifat uncorrelated Gaussian.

Sinyal sumber $s(t)$ dan $n(t)$ tidak saling berkorelasi sehingga ketika *noise* semakin tinggi maka $s_1(t)$ dan $s_2(t)$ juga semakin tidak berkorelasi. Akibatnya, *noise* yang masuk akan dianggap sebagai suatu sinyal utama sehingga mempengaruhi perhitungan (Yushi, 2005). α adalah faktor atenuasi bunyi yang merambat ke m_2 relatif terhadap m_1 dan d adalah perbedaan waktu tempuh antara m_1 dan m_2 . Ketika terdapat dua hidrofon yang digunakan maka dapat diestimasi waktu tunda berdasarkan perbedaan jarak tempuh propagasi gelombang bunyi. Dimana besarnya θ didapatkan melalui persamaan berikut:

$$\theta = \sin^{-1} \frac{R}{D} = \cos^{-1} \frac{c \cdot \Delta t}{D} \quad (2.24)$$

Dimana theta adalah sudut datang sumber suara, D adalah jarak antara dua hidrofon, c adalah kecepatan suara di dalam air, dan Δt adalah waktu tunda.



Gambar 2.9 Geometri estimasi waktu tunda

2.10 Algoritma Estimasi Waktu Tunda

Algoritma yang dapat digunakan untuk mengestimasi waktu tunda ada beberapa macam, dimana terdapat perbedaan dalam

tingkat akurasi dan kompleksitas komputasi. Misalnya metode LMS *adaptive filter*, *cross power spectrum phase*, *cross correlation* (CC), dan *generalized cross correlation* (GCC) (Khaddour, 2011). Pada penelitian ini digunakan CC dan PHAT untuk mengestimasi waktu tunda.

A. Cross Correlation

Salah satu metode yang umum digunakan untuk mengestimasi waktu tunda (D) adalah dengan menghitung fungsi *cross correlation* antara sinyal yang diterima pada dua hidrofoni. Kemudian dicari puncak maksimum pada output yang merupakan estimasi waktu tunda (Lin, 2011).

$$x_i = a_i s(t - \tau_i) + n_i \quad (2.25)$$

i menggambarkan hidrofoni, $s(t)$ adalah sinyal suara, $n_i(t)$ adalah *array*, τ_i adalah waktu tunda perambatan pada kedua hidrofoni. Jika **Persamaan 2.10** di transformasi fourier maka akan didapatkan persamaan berikut:

$$x_1(\omega) = a_1 s_1(\omega) e^{j\omega t} + N_1(\omega) \quad (2.26)$$

Fungsi *cross power spectrum density* dihitung melalui persamaan berikut:

$$R_{12}(\tau) = E[x_1(t)x_2(t - \tau)] \quad (2.27)$$

Waktu tunda dapat diestimasi dari $R_{12}(\tau)$:

$$\tau_{12} = \arg \max_{\tau \in D} R_{12}(\tau) \quad (2.28)$$

B. Generalized Cross correlation-Phase transform (GCC-PHAT)

Berdasarkan hubungan antara *cross correlation* dan *cross power spectrum*, dapat diperoleh persamaan berikut:

$$R_{12}(\tau) = \int_0^\pi G_{12}(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2.29)$$

Dimana $G_{12}(\omega)$ adalah cross-spectrum $x_1(t)$, $x_2(t)$ sinyal yang ditangkap oleh sensor m_1 dan m_2 .

$$\begin{aligned} G_{12}(\omega) = & \alpha_1 \alpha_2 S_1(\omega) S_2(\omega) e^{-j\omega t(\tau_2 - \tau_1)} \\ & + \alpha_2 S_2(\omega) N_1(\omega) + \\ & \alpha_1 S_1(\omega) e^{-j\omega t \tau_1} N_2(\omega) + N_1(\omega) N_2(\omega) \end{aligned} \quad (2.30)$$

Dengan melihat *cross-power spectrum* antara 2 sinyal dan kemudian memberikan pembobotan/ *weighting* yang sesuai pada domain frekuensi, metode GCC melakukan proses *whitening* terhadap sinyal dan *array* sehingga meningkatkan komponen frekuensi dengan SNR yang lebih tinggi dan menghambat menghambat efek dari *array*. Terakhir dilakukan invers transform ke domain waktu sehingga didapatkan fungsi GCC dari 2 sinyal:

$$R_{12}^g(\tau) = \int_0^{\pi} \psi_{12}(\omega) G_{12}(\omega) e^{j\omega \tau} d\omega \quad (2.31)$$

Dimana $\Psi_{12}(\omega)$ adalah fungsi pembobot GCC. Pemilihan fungsi pembobot tergantung pada 2 aspek: *array* dan kondisi reflektansi dari sumber suara. Tujuan dari penggunaan fungsi pembobot adalah untuk membuat $R_{12}(\tau)$ memiliki puncak relatif yang tajam sehingga memudahkan estimasi waktu tunda. Puncak $R_{12}(\tau)$ adalah waktu tunda antara 2 sensor. Pembobotan sangat penting dilakukan untuk mendapatkan nilai SNR yang tinggi hal ini didasarkan pada kondisi dilapangan, dimana kehadiran faktor seperti *echo* maupun waktu dengung yang datang dari berbagai sisi dapat menurunkan nilai SNR (Xiaofei, 2012). Fungsi *cross correlation* akan menghitung puncak dari sinyal utama dan sinyal pantulan sehingga estimasi waktu tunda akan sulit untuk dilakukan pada nilai SNR yang rendah. Oleh karena itu dibutuhkan suatu pembobot $\Psi_{12}(\omega)$ untuk menekan efek *array* dan waktu dengung. Terdapat beberapa jenis pembobot antara lain CC, ROTH, SCOT, PHAT. GCC tipe PHAT (Phase transform) adalah jenis pembobot yang paling umum digunakan dengan persamaan berikut (Lin, 2011):

$$\psi_{12}(\omega) = \frac{1}{|G_{12}(\omega)|} \quad (2.32)$$

Kemudian dilakukan invers transform ke domain waktu sehingga didapatkan fungsi GCC PHAT dari 2 sinyal:

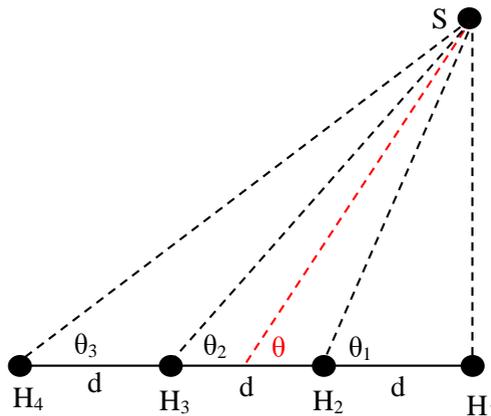
$$R_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{12} G_{12}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \quad (2.33)$$

Waktu tunda dapat diestimasi dari $R_{12}(\tau)$:

$$\tau_{12} = \arg \max_{\tau \in D} R_{12}(\tau) \quad (2.34)$$

2.11 Triangulasi

Triangulasi merupakan pengembangan dari metode trigonometri yang banyak digunakan. Prinsip dari metode ini adalah pengukuran sudut dan jarak untuk menentukan posisi dari suatu titik. Dengan menganggap bahwa berkas suara yang merambat pada medium berupa geometri sehingga berkas yang datang mengenai sensor merupakan garis lurus. Pada **Gambar 2.4** dapat dilihat bahwa terdapat 3 sudut yang terbaca oleh sensor dari propagasi gelombang suara yang dianggap sebagai garis lurus.



Gambar 2.10 Triangulasi hidrofون

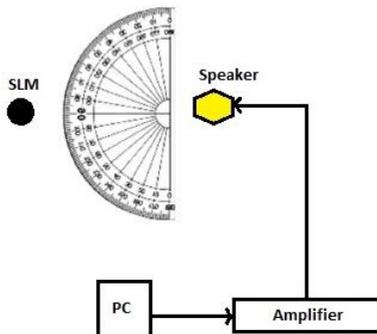
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini membahas mengenai metode yang digunakan dalam menyelesaikan permasalahan yang diangkat. Sistem pada penelitian ini dirancang untuk mengetahui posisi dari sumber bunyi yang relatif terhadap titik nol, dan arah datang sumber yang relatif terhadap sensor.

3.1 Keterarahan *Speaker*

Metode Keterarahan *speaker* ditunjukkan seperti pada **Gambar 3.1**. Pengambilan data keterarahan speaker ini bertujuan untuk mengetahui *directivity* dari speaker dan juga untuk penentuan medan bebas yang digunakan untuk meletakkan sensor. Pengambilan Data dilaksanakan di parkir industri dengan membangkitkan sinyal 500,1000,2000,4000 dan 8000 Hz pada *gain* amplifier sebesar 75%. Variasi jarak 50, 100, 200 cm. Pengambilan data berupa tingkat tekanan bunyi yang diukur menggunakan *Sound Level Meter* (SLM) dengan mengatur SLM pada mode dBA.



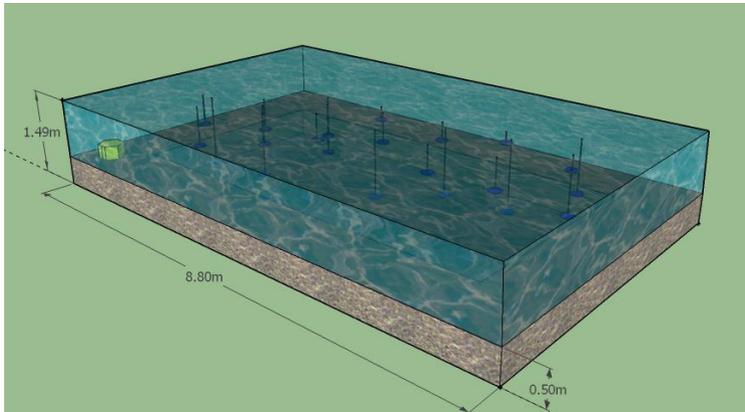
Gambar 3.1 Skema pengukuran keterarahan *speaker*

3.2 Keterarahan Hidrofon

Keterarahan hidrofon dicari dengan skenario pengukuran yang hampir sama dengan cara mencari keterarahan *speaker*. Perbedaan pengambilan data dari keterarahan *speaker* yaitu sensor hidrofon diam pada satu titik sedangkan *speaker* berputar dengan variasi sudut dari 0° sampai dengan 180° . Sinyal tone yang dibangkitkan yaitu 1000 Hz yang merupakan frekuensi rendah dan juga sinyal dengan frekuensi 8000Hz yang merupakan frekuensi tinggi. Selain itu dilakukan pula validasi nilai hidrofon. Validasi nilai hidrofon digunakan untuk mengetahui kesamaan karakteristik dari masing masing hidrofon. Pengukuran dilakukan dengan membangkitkan sinyal suara *pure tone* dengan frekuensi 1000, 2000, dan 3000 Hz. Selain itu dilakukan pula simulasi pola sensitifitas mengetahui pola radiasi dari hidrofon sehingga dapat diketahui sudut kepekaannya.

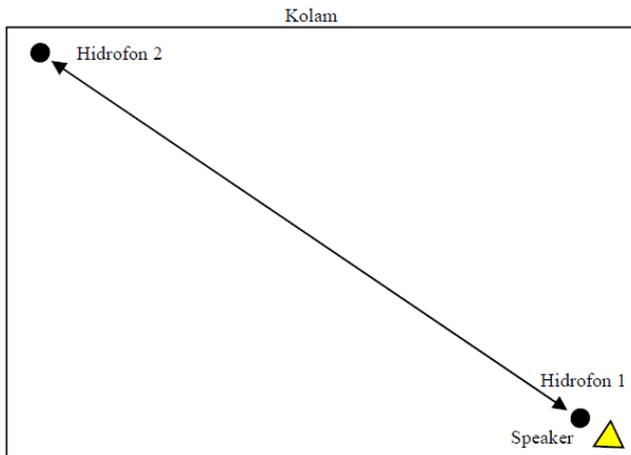
3.3 Pengukuran Kecepatan Suara Bawah Air

Pengukuran kecepatan suara dilakukan pada kolam uji Teknik Fisika yang memiliki dimensi sebesar 1.5 meter, panjang 8.8 m, lebar 5.5 m. Kolam ini memiliki dinding yang terbuat dari beton semen yang terpasang pada sisi-sisi kolam. Dasar kolam berupa lapisan lumpur yang diharapkan dapat mengurangi pantulan bunyi sehingga waktu dengung kolam menjadi lebih kecil. Skema serta ukuran kolam dapat terlihat seperti **Gambar 3.2**



Gambar 3.2 Skema dan ukuran kolam uji

Alat yang digunakan adalah speaker, 2 buah hidrofon, *soundcard* dan 2 buah laptop. Skenario pengukuran kecepatan suara bawah air dilakukan seperti dibawah ini dengan menempatkan hidrofon 1 terpisah jarak sejauh mungkin dengan hidrofon 2. Skema pengambilan data kecepatan suara dapat dilihat pada **Gambar 3.2**.



Gambar 3.3 Skema pengambilan data kecepatan suara

Perhitungan kecepatan suara dalam air menggunakan prinsip *time delay* antara dua buah sinyal dengan prinsip *cross correlation* antar dua buah sinyal. Persamaan yang digunakan dalam perhitungan ini adalah:

$$v = s/t \quad (3.1)$$

Dimana :

v = kecepatan (m/s)

s = jarak antar hidrofon (s)

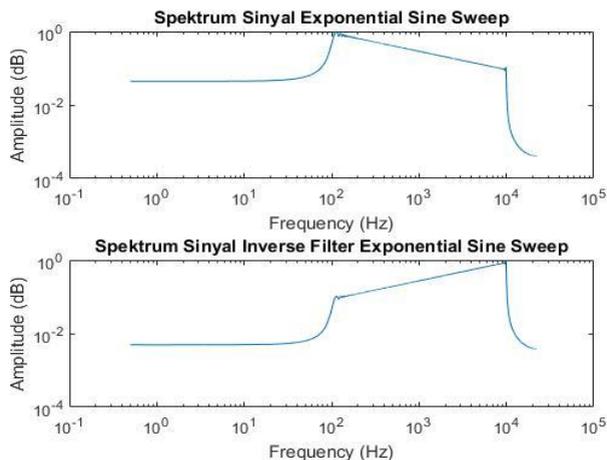
t = beda waktu penerimaan sinyal antar hidrofon (s)

Beda waktu didapatkan dari dua buah hidrofon yang terpisah sejauh 7,4 m dan jarak hidrofon 1 dengan speaker sejauh 50 cm. Kecepatan suara bawah air ini nantinya akan dijadikan sebagai data acuan penghitungan sudut datang sumber bunyi.

Tabel 3.1 Persamaan Kecepatan Suara

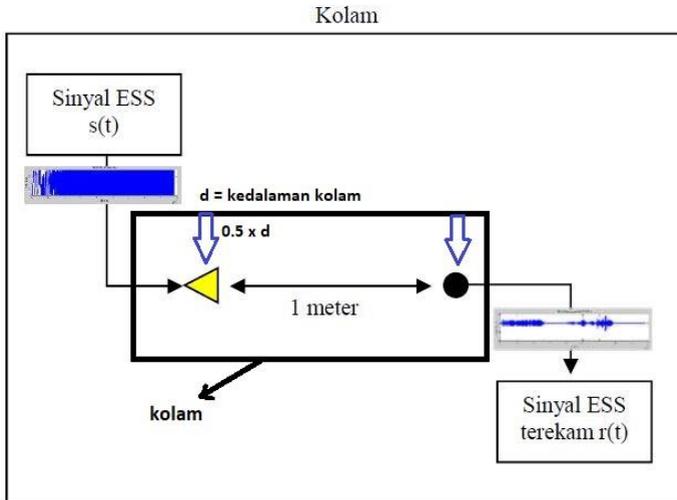
Persamaan Empiris Kecepatan Suara	Persamaan
Leroy	$c = 1492.9 + 3(T-10) - 6 \cdot 10^{-3}(T-10)^2 + 1.2(S-35) - 10^{-2}(T-18)(S-35) + z/61$
Medwin	$c = 1449.2 + 4.6T - 5.5 \cdot 10^{-2}T^2 + 2.9 \cdot 10^{-4}T^3 + (1.34 \cdot 10^{-2})(S-35) + 1.6 \cdot 10^{-2}z$
Mackenzie	$c = 1448.96 + 4.591 T - 5.304 \cdot 10^{-2}T^2 + 2.374 \cdot 10^{-4}T^3 + 1.34(S-35) + 1.63 \cdot 10^{-2}z + 1.675810^{-7}z^2 - 1.025 \cdot 10^{-2}T(S-35) - 7.139 \cdot 10^{-13}Tz^3$

3.4 Pengukuran Respon Impuls



Gambar 3.4 Spektrum sinyal ESS

Pengukuran respon impuls ini digunakan untuk mendapatkan fungsi transfer keseluruhan bagaimana suara berperilaku dalam kolam. Pengukuran Respon Impuls dilakukan dengan membuat sinyal *Exponential Sine Sweep* (ESS) dan *invers filternya* pada *software* Matlab. Sinyal ESS dibuat dengan *range* frekuensi antara 100 – 10 kHz dengan durasi selama 2 detik. Pengambilan data respon impuls dilakukan dengan skenario seperti **Gambar 3.4**.



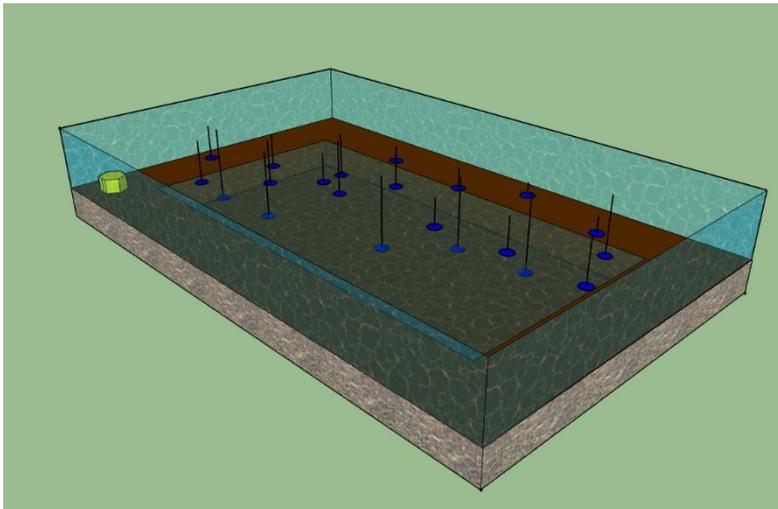
Gambar 3.5 Skema pengambilan data respon impuls

Pengambilan data dilakukan dengan menempatkan speaker underwater dan hidrofون terpisah sejauh 1 meter dengan pertimbangan jarak 1 meter tersebut adalah merupakan medan bebas. Speaker dan hidrofون dipasang dengan kedalaman yang sama yaitu setengah dari kedalaman kolam uji. Pengambilan data dilakukan dengan membangkitkan sinyal ESS yang berdurasi 2 detik dengan speaker kemudian sinyal akan direkam oleh sensor hidrofون. Setelah sinyal rekaman didapatkan dilanjutkan dengan pengolahan data agar respon impuls dapat diketahui. Ekstraksi dilakukan dengan mengkonvolusi sinyal rekaman dengan *invers filter* ESS.

3.5 Pengukuran Atenuasi

Pengukuran atenuasi kolam dilakukan bertujuan agar diketahui berapa konstanta peluruhan tingkat tekanan bunyi pada kolam. Pengukuran atenuasi kolam dilakukan dengan menempatkan sensor seperti pada **Gambar 3.5**. Penempatan posisi hidrofون berdasarkan pada perhitungan jari-jari bola. Setiap ukuran

selimut bola diberikan 3 buah hidrofon. Pengambilan data dilakukan sebanyak 3 kali. Dapat dilihat pada **Gambar 3.5** merupakan tampak 3D dari peletakan sensor pada kolam terhadap speaker yang berwarna kuning. Warna cokelat menunjukkan bahwa kedalaman kolam sejauh 1 meter dari tepi masih dangkal sehingga titik pengukuran seharusnya tidak pada daerah tersebut untuk menghindari efek pantulan. Titik-titik biru menunjukkan titik dimana hidrofon diposisikan.



Gambar 3.6 Skema penempatan sensor pada kolam

Dalam menentukan posisi sensor hidrofon, terutama sensor medan dekat (*near field*) memakai rumus perhitungan sistem komponen perhitungan bola sebagai berikut.

$$X = r \sin \theta \cos \varphi \quad (3.2)$$

$$Y = r \sin \theta \sin \varphi$$

$$Z = r \cos \theta$$

Dimana, variabel X dan Y adalah koordianat permukaan akuarium dan variabel Z adalah variabel yang menentukan

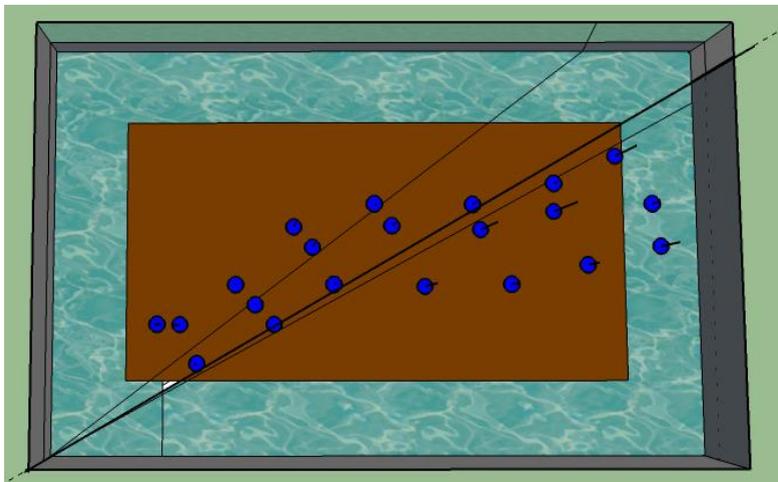
kedalaman sensor, r adalah jari-jari bola dan untuk *speaker underwater* ditempatkan pada pojok kolam yang menghadap ke diagonal ruang kolam.

Tabel 3.2 Koordinat posisi penempatan sensor

R	X	Y	Z
250	200	125	83
250	175	175	35
250	150	175	97
350	300	175	43
350	275	200	83
350	250	225	97
450	375	225	106
450	350	275	66
450	325	300	83
550	500	225	43
550	450	300	100
550	425	325	127
650	600	225	109
650	575	300	43
650	550	325	120
750	700	250	100
750	675	325	35
750	650	350	132
850	800	275	83
850	775	325	127
850	750	395	63

Data posisi koordinat posisi pada **Tabel 3.2** kemudian diplot untuk dijadikan acuan dalam penempatan sensor hidrofona. Pada

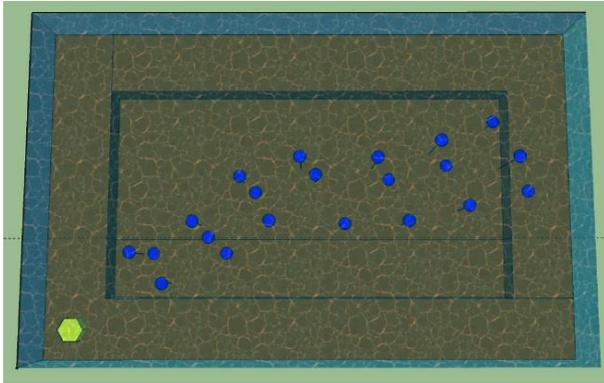
Gambar 3.6 diambil contoh penunjukkan posisi penempatan 1 hidrofon tampak atas pada kolam. Atenuasi diperoleh dengan membuat grafik peluruhan TTB berdasarkan penambahan jarak *speaker* dengan hidrofon.



Gambar 3.7 Skema Penempatan Sensor Hidrofon 1

3.6 Pencarian Medan Bebas pada Kolam

Pencarian medan bebas pada kolam uji dilakukan dengan menempatkan 3 buah hidrofon pada jari-jari bola yang sama. *Speaker* Medan bebas diperoleh dari nilai standar deviasi dari nilai pembacaan hidrofon pada 3 posisi berbeda. Apabila nilai standar deviasi kurang dari 3 dB maka pada jarak tersebut merupakan medan bebas (*free field*). Sensor ditempatkan seperti pada **Gambar 3.7** dengan posisi koordinat x , y , dan z sama seperti skenario pengambilan data atenuasi kolam pada subbab sebelumnya.



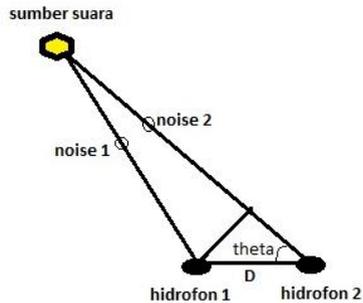
Gambar 3.8 Posisi sensor hidrofون tampak atas

3.7 Pelacakan Sudut Datang Sumber Suara

Pelacakan sudut datang sumber suara dilakukan dengan terlebih dahulu mendapatkan data medan bebas dan juga besar tingkat tekanan bunyi yang harus dibangkitkan. Digunakan 4 buah hidrofون sebagai pelacak dan bumber suara yang berupa kapal selam mainan.

Setelah didapatkan jarak minimal dan besar tingkat tekanan bunyi yang harus dibangkitkan, kemudian dilakukan pengambilan data dengan skenario pada **Gambar 3.7**. Digunakan kombinasi 4 hidrofون sebagai pelacak dan 1 *speaker* sebagai target. Sebelum melakukan pengambilan data, terlebih dahulu mengukur jarak minimum antar hidrofون dengan menggunakan **persamaan (2.2)**. Pengambilan data dilakukan dengan menggerakkan kapal dari kanan ke kiri dan juga sebaliknya.

Pengambilan data dilakukan dengan menggerakkan kapal dari kanan ke kiri dan juga sebaliknya. Sudut datang dihasilkan dengan menggunakan prinsip *beamforming*. Pada **Gambar 10** menunjukkan sinyal diproses oleh 2 hidrofون dengan menggunakan metode *cross correlation* antara duah sinyal sehingga diperoleh *time delay* yang kemudian diolah menjadi sudut datang sumber suara.



Gambar 3.9 Triangulasi hidrofon

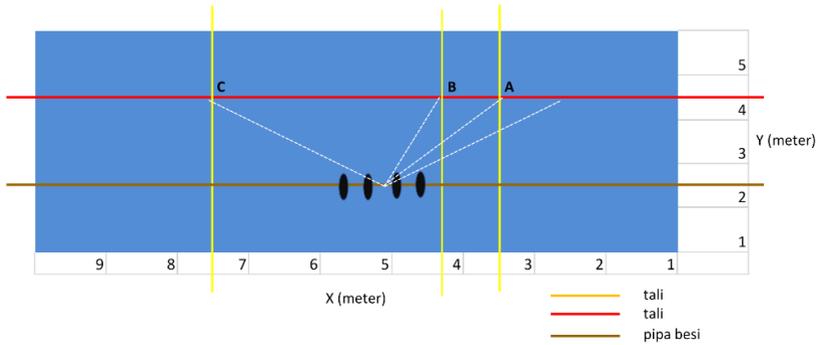
3.8 Penjejakan Posisi Sumber Suara

Pelacakan posisi sumber suara dilakukan bersamaan dengan pelacakan sudut datang sumber suara. Kapal uji digerakkan dari arah kanan menuju kiri dan juga sebaliknya. Validasi dari nilai estimasi posisi dilakukan dengan melakukan pengambilan data sinyal suara kapal pada titik-titik tertentu yang sudah ditentukan. Kapal diposisikan pada tiga posisi titik uji A, B, dan C seperti pada **Gambar 3.8**.



Gambar 3.10 Kapal selam uji

Kapal selam mainan pada **Gambar 3.7** digunakan sebagai sumber suara bergerak pada air. Namun, digunakan pula sumber suara dari *speaker* untuk membandingkan hasil pembacaan. Penjejukan posisi dilakukan dengan menggerakkan kapal pada lintasan warna merah. Lintasan ditentukan dari awal agar memudahkan dalam memvalidasi nilai posisi yang diestimasi. Posisi kapal ditentukan dengan mengukur jarak (r).



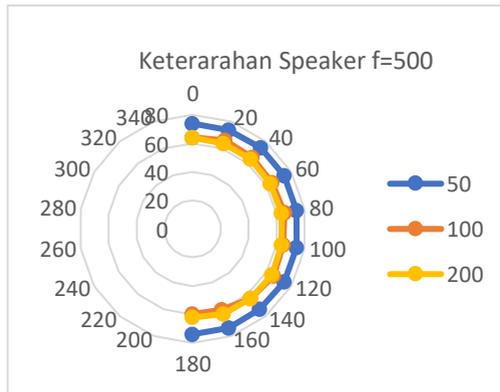
Gambar 3.11 Skema pengambilan data objek bergerak

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

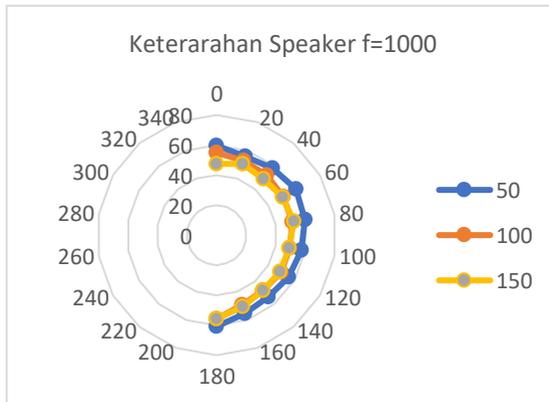
Bab ini membahas mengenai hasil dari pengambilan data yang telah dilakukan.

4.1 Keterarahan *Speaker*

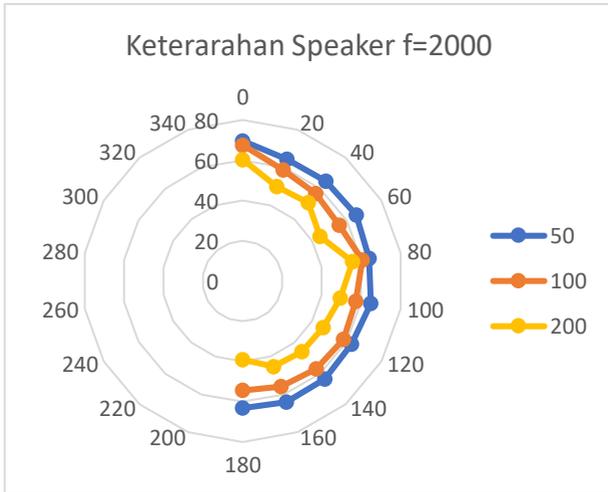
Hasil keterarahan *speaker* diperoleh dengan membangkitkan puretone dengan variasi frekuensi 500, 1000, 2000, 4000, dan 8000 Hz, sehingga diperoleh hasil seperti berikut.



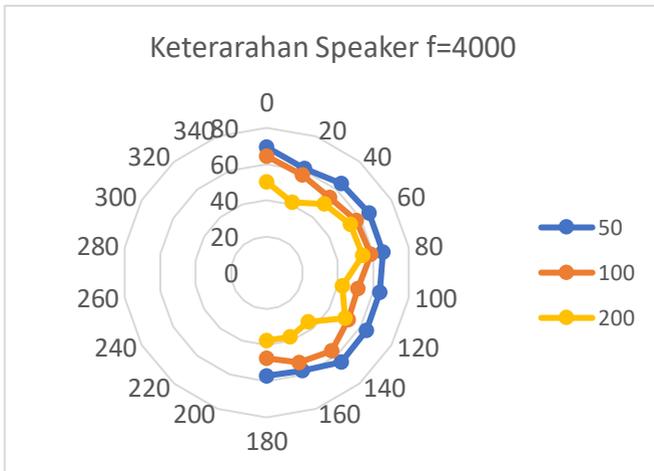
Gambar 4.1 Keterarahan *speaker* dengan frekuensi 500Hz



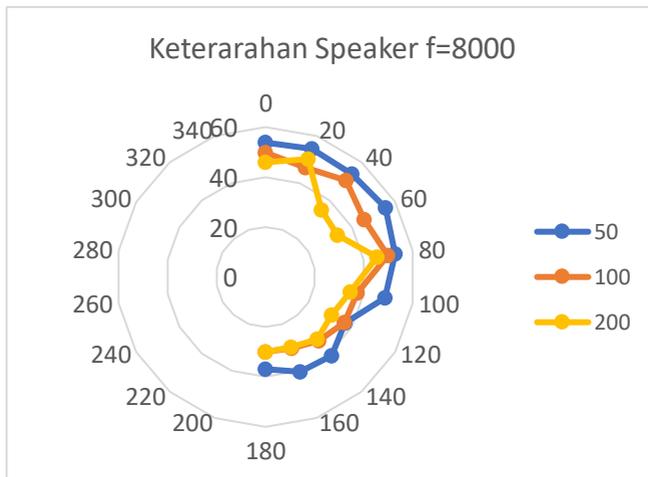
Gambar 4.2 Keterarahan *speaker* dengan frekuensi 1000Hz



Gambar 4.3 Keterarahan *speaker* dengan frekuensi 2000Hz



Gambar 4.4 Keterarahan *speaker* dengan frekuensi 4000Hz



Gambar 4.5 Keterarahan *speaker* dengan frekuensi 8000Hz

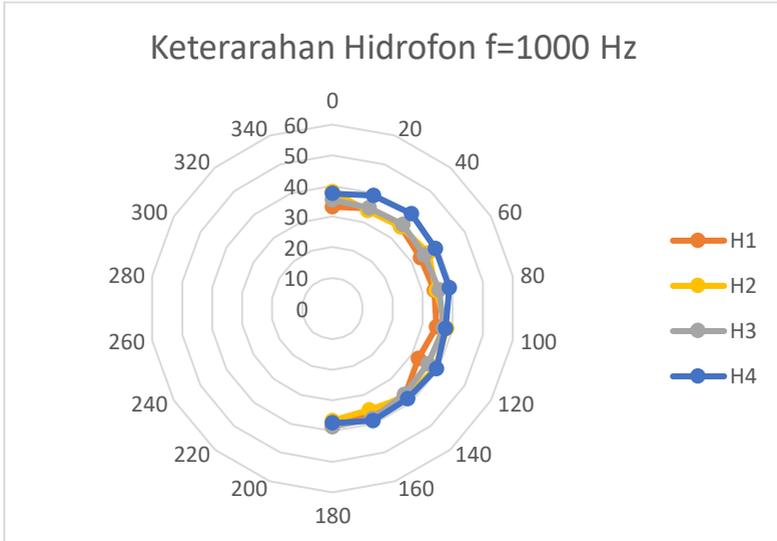
Hasil keterarahan *speaker* pada **Gambar 4.1**, **Gambar 4.2**, **Gambar 4.3**, **Gambar 4.4**, dan **Gambar 4.5**, menunjukkan bahwa semakin tinggi frekuensi yang dibangkitkan maka semakin berkurang keterarahannya. Hal tersebut ditunjukkan dengan tidak sempurnanya bentuk setengah lingkaran yang merepresentasikan bagaimana keseragaman nilai TTB yang dipancarkan *speaker*. Berdasarkan hasil yang didapatkan semakin tinggi frekuensi yang dibangkitkan maka akan semakin terhambur untuk pola persebaran TTBnya, maka pada penelitian ini digunakan frekuensi rendah.

4.2 Keterarahan dan Validasi Nilai Hidrofon

• Keterarahan

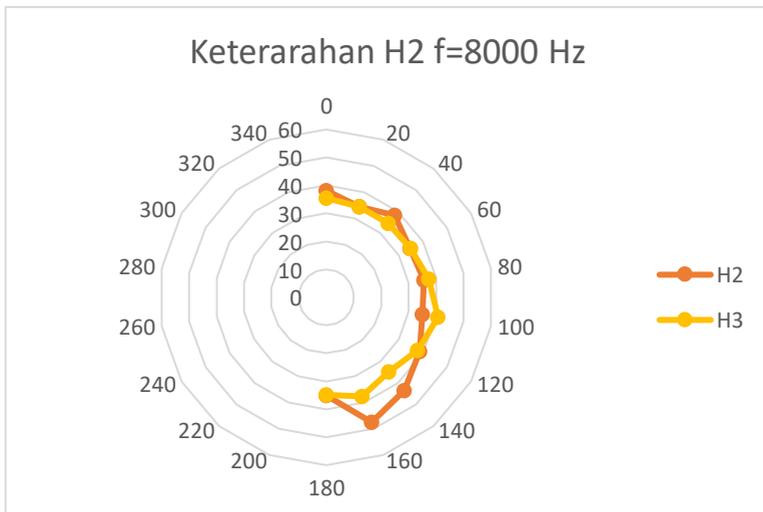
Keterarahan sensor hidrofon dilakukan dengan membangkitkan sinyal suara *pure tone* dengan frekuensi 1000 Hz dan 8000 Hz dengan *gain* amplifier yaitu sebesar 50%. Keterarahan dicari dengan menghitung TTB pada variasi sudut 0° sampai 180°, lalu di plot sehingga menghasilkan grafik keterarahan hidrofon. Validasi nilai hidrofon digunakan untuk mengetahui kesamaan karakteristik dari masing masing hidrofon. Pengukuran dilakukan dengan membangkitkan sinyal suara *pure tone* dengan frekuensi

1000, 2000, dan 3000 Hz. Hasil pengambilan data menunjukkan dari ke-empat hidrofon mendeteksi frekuensi yang sesuai dengan frekuensi yang dibangkitkan.



Gambar 4.6 Keterarahan hidrofon pada $f=1000\text{Hz}$

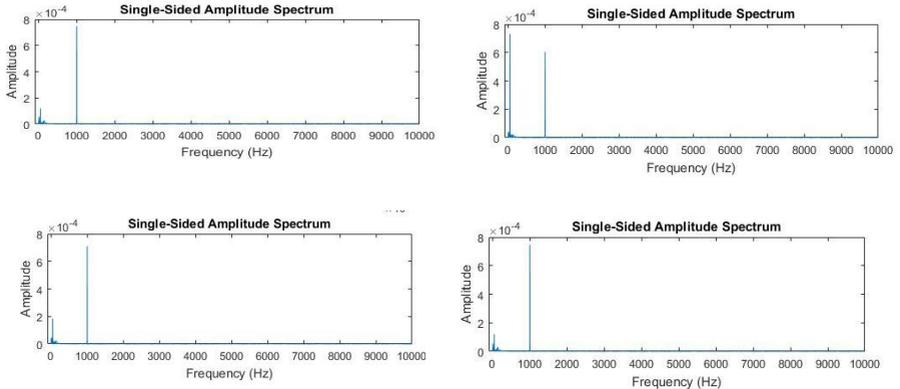
Keterarahan sensor hidrofon ditunjukkan dengan grafik pada **Gambar 4.6**. Berdasarkan grafik yang diperoleh dapat dilihat bahwa pola persebaran tingkat tekanan bunyi berbentuk setengah lingkaran yang menunjukkan bahwa sensor tersebut *omnidirectional*. Bentuk pola keterarahan yang hampir sama menunjukkan bahwa hidrofon memiliki tipe yang sama dengan sensitivitas yang sama Selanjutnya untuk mengetahui pengaruh frekuensi terhadap pola keterarahan maka dibangkitkan sinyal *pure tone* 8000 Hz.



Gambar 4.7 Keterarahan hidrofona pada $f=8000\text{Hz}$

Keterarahan hidrofona 2 dan 4 untuk frekuensi 8000 dapat ditunjukkan pada **Gambar 4.7** yang apabila dibandingkan dengan pola keterarahan untuk frekuensi 1000 Hz maka dapat dilihat semakin tinggi frekuensi semakin tidak membentuk lingkaran pola keterarahannya. Hal tersebut menunjukkan bahwa sensor hidrofona akan lebih akurat dalam pembacaan data pada seluruh variasi sudut hanya pada frekuensi rendah.

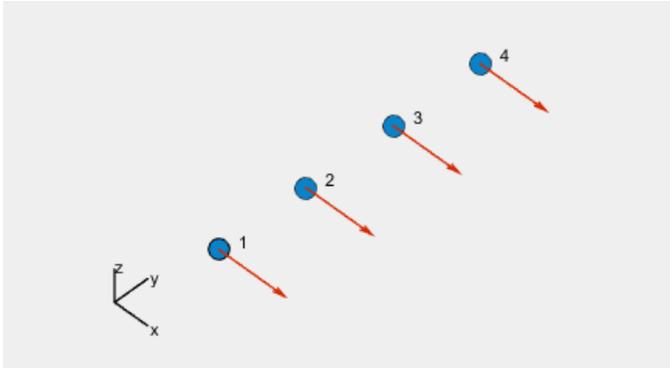
- **Validasi Nilai Frekuensi**



Gambar 4.8 Respon frekuensi 1000 Hz 4 buah hidrofon

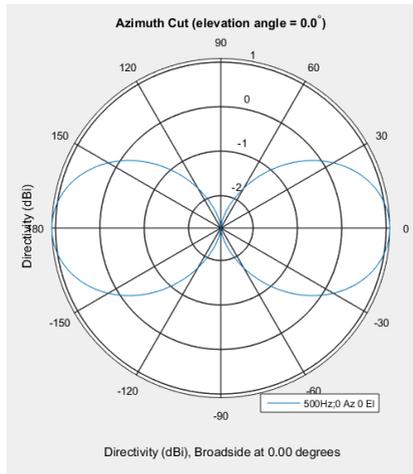
Hasil respon frekuensi pada **Gambar 4.12** menunjukkan dari keempat buah hidrofon mendeteksi frekuensi yang sesuai dengan yang dibangkitkan. Selisih amplitudo dimungkinkan terjadi karena posisi hidrofon saat pengambilan data tidak pada satu posisi yang sama, yaitu 4 buah hidrofon ditempatkan secara terpisah sejarak 10 cm tiap hidrofon. Respon frekuensi untuk 2000 Hz dan 3000 Hz dapat dilihat pada **LAMPIRAN A**.

Selanjutnya adalah mensimulasikan hidrofon *array* sehingga didapatkan bagaimana pola sensitifitas dari sensor *array* tersebut. Sensor disimulasikan dengan posisi seperti pada **Gambar 4.13**. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software* Matlab.

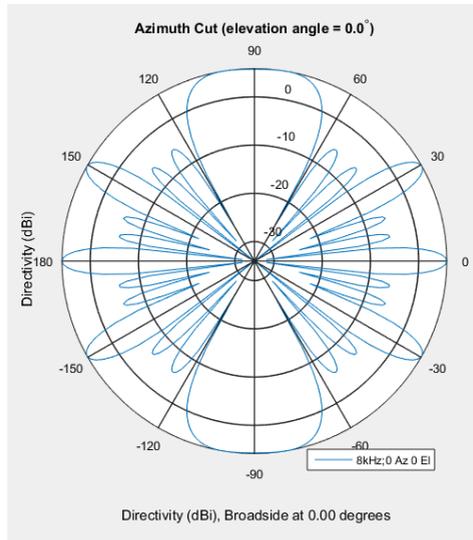


Gambar 4.9 Posisi empat buah hidrofون

Posisi empat buah hidrofون yang disusun secara linear seperti pada **Gambar 4.7**. Sensor satu dengan sensor dua terpisah sejauh d (meter) yang dalam simulasi ini nilai d adalah 0,38 meter sesuai dengan perhitungan jarak minimum dua buah hidrofون. Hasil plot sensitivitas hidrofون adalah seperti **Gambar 4.8**.

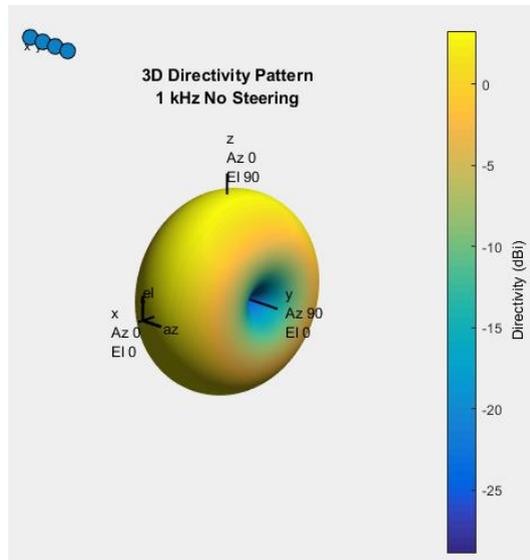


Gambar 4.10 Pola sensitivitas hidrofون *array* dalam air untuk frekuensi 500 Hz



Gambar 4.11 Pola sensitivitas hidrofon *array* dalam air untuk frekuensi 8000 Hz

Pola sensitivitas didapatkan dengan mengatur frekuensi sebesar 500 Hz dan 8000 Hz. Variasi nilai dilakukan agar dapat dibandingkan respon hidrofon terhadap frekuensi. Kecepatan rambat suara diatur sesuai dengan hasil pengukuran di kolam yaitu sebesar 1529,73 m/s. Hasil yang didapatkan dari simulasi sensitivitas hidrofon dengan frekuensi 500 Hz menunjukkan nilai sensitivitas terbesar terjadi pada sudut 0° yang merupakan titik 90° relatif terhadap sensor, sedangkan simulasi dengan frekuensi 8000 Hz pola sensitivitas yang dihasilkan jauh lebih menyebar daripada frekuensi 500 Hz. Pola sensitivitas ini berpengaruh terhadap keakuratan pembacaan sensor. Dapat pula dilihat bagaimana pola keterarahan dari hidrofon *array* pada 3D seperti pada **Gambar 4.12** yang artinya gain terbesar akan dihasilkan saat target pada posisi di depan sensor array, yaitu pada sudut 90° terhadap sensor.

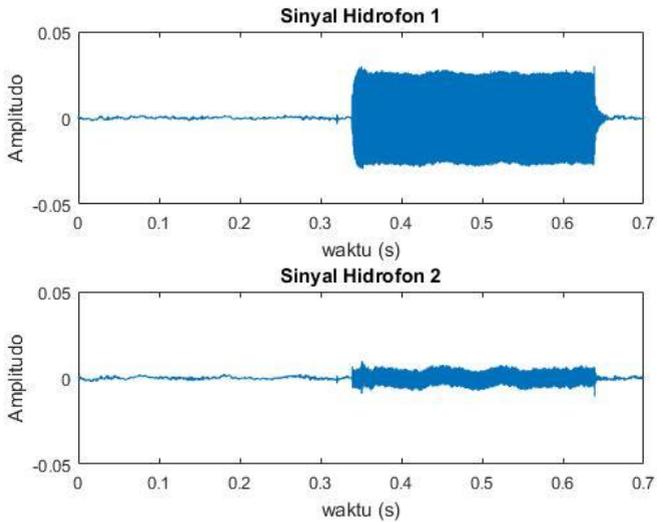


Gambar 4.12 Pola keterarahan 3D

- **Perhitungan Ketidakpastian Hidrofon**

4.3 Menghitung Kecepatan Suara Bawah Air

Penghitungan kecepatan rambat suara di bawah air penting dilakukan untuk mempermudah penghitungan variabel lain yang lebih lanjut. Tidak digunakan persamaan kecepatan suara bawah air untuk menghitung kecepatan air dalam kolam, karena kondisi air disetiap lingkungan berbeda-beda sehingga perlu dilakukan pengukuran secara empirik. Percobaan ini dilakukan seperti prosedur yang dilakukan oleh (Yuwono, 2012) pada akuarium *semi-anechoic*. Pengukuran dilakukan seperti skema pada **Gambar 3.2** dimana sumber yang dibunyikan memiliki durasi sebesar 0,3 dan 0,5 detik.



Gambar 4.13 Sinyal hidrofon 1 dan hidrofon 2

Hasil perhitungan kecepatan rambat suara dalam air dihitung dengan mengestimasi terlebih dahulu waktu tunda antar dua buah hidrofon. Waktu tunda diperoleh dengan proses *Cross Correlation* dua buah sinyal sehingga waktu tunda dari dua buah sinyal tersebut dapat diketahui. Sehingga kecepatan rambat suara dalam air didapatkan hasil pada **Tabel 4.1**.

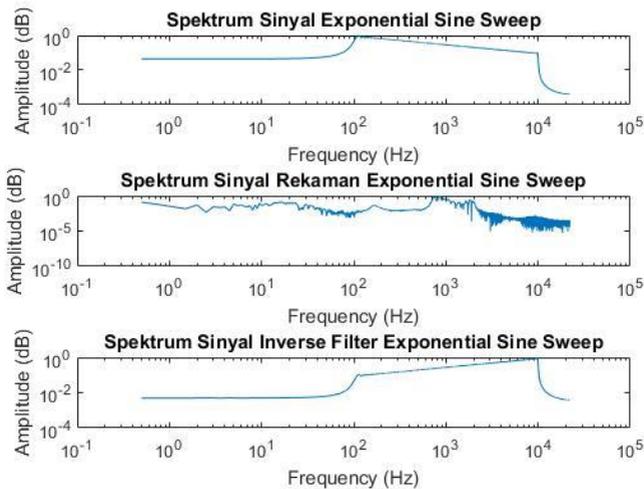
Tabel 4. 1 Estimasi Kecepatan Suara di Air

durasi (s)	waktu delay (s)	kecepatan (m/s)
0.3	0.0054	1554
0.5	0.0053	1560

Estimasi kecepatan suara dalam kolam dihitung dengan menggunakan **persamaan (3.1)**. Jarak sumber suara dengan sensor sebesar 8,4 meter. Validasi dilakukan dengan perhitungan menggunakan persamaan pada **Tabel 3.1** yang menghasilkan nilai kecepatan sebesar 1529.73 m/s.

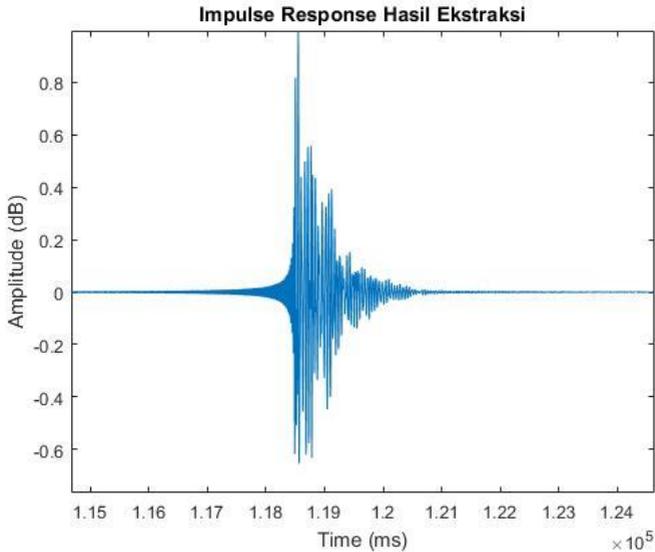
4.4 Respon Impuls Kolam

Pengukuran *impuls response* mengacu kepada metode yang dikembangkan oleh (Farina, 2000). Pada penelitian ini, *impuls response* digunakan untuk mensimulasikan kondisi kolam untuk mengetahui performa waktu tunda. Pengukuran dilakukan seperti skema pada **Gambar 3.7** dan diperoleh hasil sinyal rekaman ESS seperti pada **Gambar 4.7**.



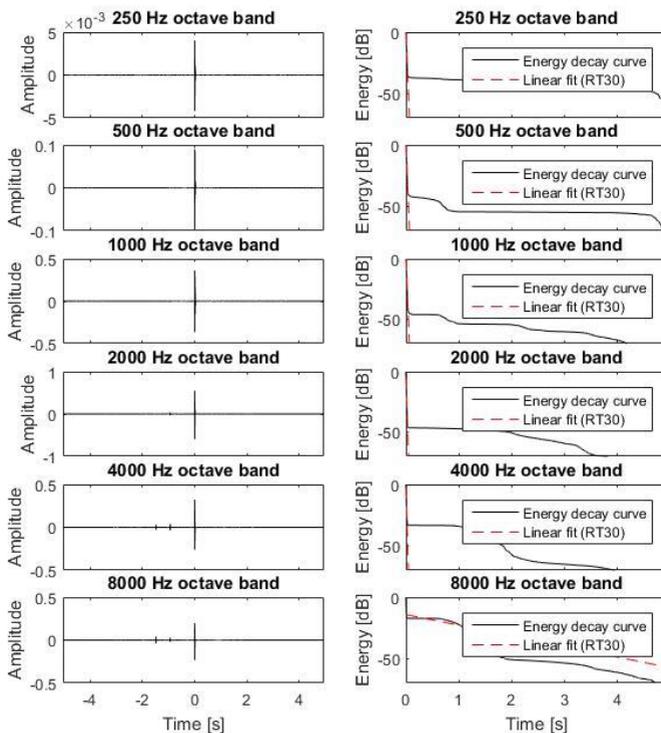
Gambar 4.14 Spektrum sinyal ESS (A), spektrum sinyal rekaman (B), Spektrum Sinyal *Invers filter* (C)

Proses ekstraksi dilakukn dengan cara mengkonvolusikan sinyal rekaman ESS $r(t)$ dengan *invers filter* ESS $f(t)$ yang sudah dibuat sehingga didapatkan Respon Impuls $h(t)$ seperti pada **Gambar 4.15**.



Gambar 4.15 Respon impuls kolam

Untuk mengetahui apakah metode pengambilan data respon impuls sudah benar adalah dengan melihat hasil spektrum respon impulsnya. Sinyal suara hasil rekaman terdapat karakteristik *direct sound*, *early reflection* dan reverberance sinyal yang terekam pada medan bebas akan menunjukkan karakteristik *direct sound* (peak pertama) akan lebih tinggi daripada *early reflection* (peak kedua) dan *reverberant* (peak selanjutnya). Hasil respon impuls pada **Gambar 4.15** menunjukkan bahwa saat pengambilan data berada pada medan bebas. Untuk memvalidasi nilai impuls respon apakah sudah mewakili karakteristik kolam adalah dengan melakukan korelasi dengan sinyal suara yang dibangkitkan dikolam. Kuat atau lemahnya korelasi antara dua buah sinyal ditunjukkan dengan nilai korelasi yang mendekati 1.

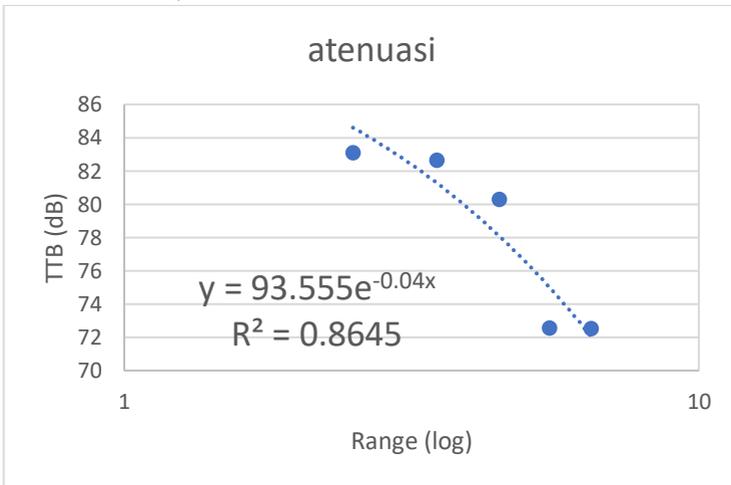


Gambar 4.16 RT dari impuls

Hasil respon impuls pada **Gambar 4.15** dapat pula diproses untuk mendapatkan nilai *reverberant time* (RT) dari kolom pada variasi frekuensi antara 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Hz. Hasil RT sebesar 0.028 berdasarkan perhitungan rata-rata antara 500 dan 1000 Hz yang dianggap frekuensi yang stabil untuk menghasilkan *tone*. Semakin kecil RT atau mendekati nilai 0, maka karakteristik ruang atau dalam hal ini kolam uji. tersebut dianggap memiliki *absorbsifitas* tinggi.

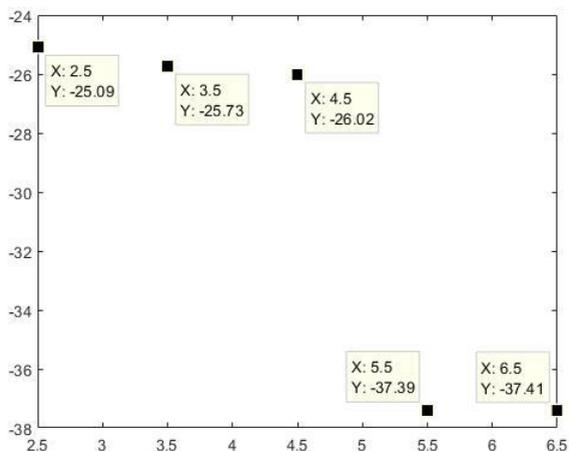
4.5 Atenuasi Kolam

Atenuasi kolam didapatkan dengan menempatkan 3 buah sensor hidrofon pada setiap selimut jari-jari bola seperti pada **Gambar 3.6**. Plot atenuasi diperoleh dari nilai yang dihasilkan hidrofon yang menyinggung garis bantu yang dibuat pada skema penempatan sensor **Gambar 3.7**. Data diolah dengan menggunakan 2 *software* yang berbeda yang selanjutnya dibandingkan tingkat koefisien determinasinya (R^2) yang paling kuat atau mendekati nilai 1. R^2 dapat dipakai untuk memprediksi seberapa besar kontribusi pengaruh variabel bebas (x) terhadap variabel terikat (y).



Gambar 4.17 Plot atenuasi dengan *software* excel

Hasil plotting atenuasi pada *software* excel dapat dilihat pada **Gambar 4.17** yang menunjukkan nilai α sebesar 0,04 dan R^2 sebesar 0,864. Sebagai pembandingan, data diolah pada *software* yang berbeda yaitu Matlab yang ditunjukkan pada **Gambar 4.18**.



Gambar 4.18 Plot atenuasi dengan *software* Matlab

Persamaan yang dihasilkan dari plot atenuasi pada **Gambar 4.18** menggunakan *software* matlab adalah dengan nilai α sebesar 0,07 dan R^2 sebesar 0,8807. Nilai α yang dipilih adalah yang dihasilkan dengan menggunakan perhitungan *software* Matlab karena nilai R^2 yang lebih besar, sehingga didapatkan nilai koefisien atenuasi (α') sebesar 0,608 desibel/meter yang didapatkan dari hasil perkalian dengan konstanta 8,686.

4.6 Pencarian Medan Bebas

Pencarian medan bebas dilakukan sesuai dengan skema **Gambar 3.6**. Medan bebas adalah didapatkan dengan menghitung selisih dari 3 posisi yang berbeda namun tetap pada jari-jari yang sama. Syarat medan bebas adalah selisih dari 3 buah sensor kurang dari 3 dB. Medan bebas yang berarti sinyal suara yang terdeteksi tidak ada pengaruh pantulan yang menyebabkan ketidakakuratan

penunjukkan nilai. Pencarian medan bebas diukur dari posisi 2m sampai 7 meter.

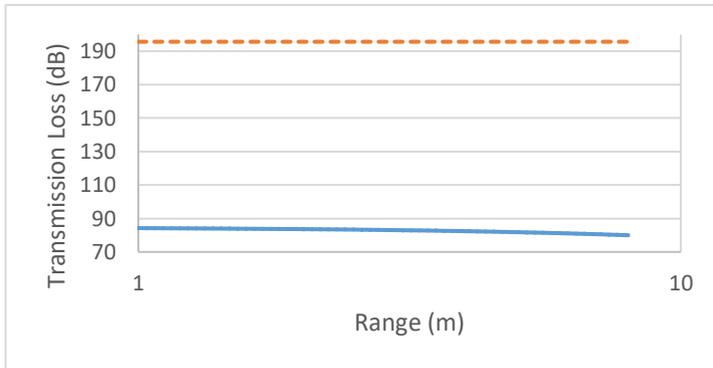
Tabel 4.1 Standar deviasi pengukuran tingkat tekanan bunyi pada hidrofon

	standar deviasi					
	2m	3m	4m	5m	6m	7m
pengukuran 1	1.5761	6.94	4.63	5.78	6.38	7.5
pengukuran 2	3.615	6.75	5.23	5.93	6.9	8.78
pengukuran 3	1.958	6.4	6.59	7.91	6.43	9.39

Tabel 4.1 menunjukkan nilai TTB pada 3 kali pengambilan data. Hasil menunjukkan medan bebas terjadi pada jarak 2m dari sumber suara yang ditandai dengan standar deviasi kurang dari atau sama dengan 3 dB. Pada pengukuran kedua diperoleh nilai standar deviasi lebih dari 3 yang dimungkinkan karena adanya *noise*.

4.7 Figure of Merit

Figure of Merit (FOM) dari sensor hidrofon dicari agar kita dapat melihat nilai pelemahan atau *propagation loss* terhadap jangkauan sensor dan kita dapat memperkirakan dimana kita harus memposisikan untuk mendeteksi target. FOM sangat bermanfaat untuk sistem perhitungan sonar pasif karena sonar pasif sangat tergantung dengan jangkauan sensor terhadap target. Untuk aktif sonar, FOM pada sonar aktif tidak terlalu berpengaruh karena bergantung pada pantulan dari target. FOM dari sensor hidrofon pada penelitian ini adalah yang ditunjukkan pada **Gambar 4.19**. Jika dibandingkan dengan teori, yang mana nilai FOM akan berpotongan dengan grafik *transmission loss* (TL). Pada perpotongan itulah sebagai titik probabilitas 50%.



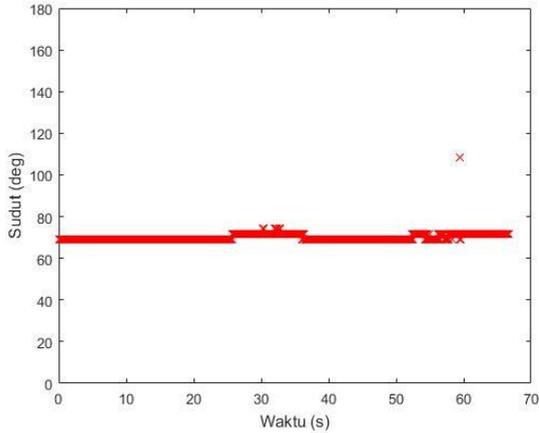
Gambar 4.19 Figure of Merit (FOM) hidrofون

Detection Threshold (DT) biasanya didefinisikan untuk probabilitas 50 % yang artinya, bahwa pada titik perotongan tersebut adalah jarak dimana suatu sensor menerima sinyal dari sumber hanya 50% dari sinyal asli atau setengah energi dari sinyal sumber suara. Pada penghitungan FOM ada beberapa parameter yang harus diperhatikan seperti *source level* (SL), bising lingkungan (NL), gain dari array dan *detection threshold* (DT). Error kemungkinan terjadi pada perhitungan variabel-variabel pada FOM, contohnya *Array gain* yang didapatkan pada perhitungan FOM ini masih dihitung dari simulasi sensor *array*. Selain itu variabel yang lain yaitu *detection threshold* (DT) yang harus dicari yang bergantung pula pada kemampuan operator sonar dalam membuat keputusan tentang penentuan DT.

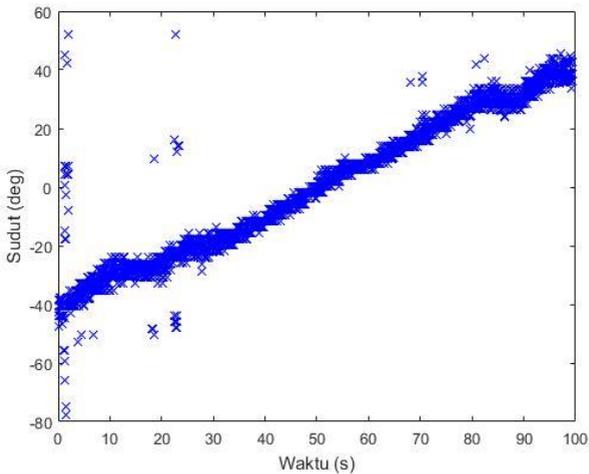
4.8 Pelacakan Sudut Datang Sumber Suara

Pelacakan sudut datang sumber suara menggunakan metode *beamforming*, dengan prinsip pemrosesan sinyal dari sensor *array*. Pengolahan data dilakukan dengan metode *cross correlation* antara dua buah sinyal sehingga didapatkan estimasi *time delay* yang kemudian dikonversi menjadi besaran sudut. Hasil menunjukkan objek bergerak dari sudut negatif ke arah sudut positif seiring bertambahnya waktu, yaitu dari sudut datang -40 menuju sudut

datang 40. Sehingga dapat dilacak bahwa sumber bergerak dari kiri sensor menuju kanan sensor.



Gambar 4.20 Sudut datang objek diam dari kanan relatif terhadap sensor

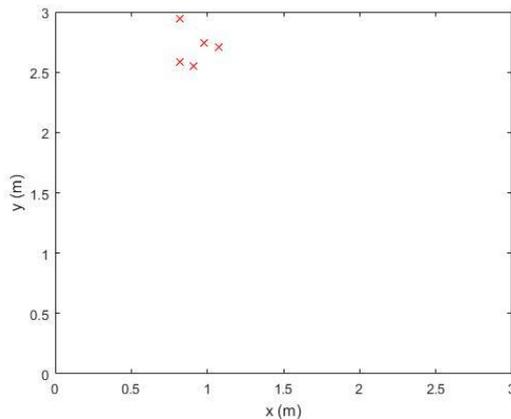


Gambar 4.21 Sudut datang objek bergerak dari kanan kiri menuju kanan sensor

Hasil pada **Gambar 4.20** menunjukkan sumber suara yang diam pada titik tertentu dengan sudut estimasi yang didapatkan adalah sebesar 75° yang sesuai dengan nilai sebenarnya yang dicari dari pengukuran manual untuk validasi nilai. Sedangkan **Gambar 4.21** menunjukkan sumber suara bergerak dari sudut -40° yaitu dari arah sebelah kiri relatif terhadap sumber menuju sebelah kanan yaitu ke arah sudut 40° .

4.9 Penjejakan Sumber Suara

Informasi arah datang sumber suara sudah diketahui, selanjutnya adalah estimasi posisi dari sumber suara. Posisi dari sumber suara yang dideteksi adalah posisi kapal selam dengan mendeteksi jarak sumber suara yang relatif terhadap sensor. Jarak sumber suara diperoleh dengan menggunakan informasi atenuasi yang telah didapatkan dari pengukuran karakteristik kolam. Atenuasi (dB/m) adalah sebagai konstanta pembagi dari selisih TTB sumber suara dengan TTB pada penerima atau sensor hidrofona, sehingga didapatkan nilai estimasi jarak.



Gambar 4.12 Estimasi Posisi (x,y)

Pada **Gambar 4.12** menunjukkan ada titik-titik merah yang merepresentasikan posisi dari kapal pada sumbu x,y yang relatif terhadap sensor hidrofona *array*. Estimasi yang dihasilkan dari nilai

jari-jari (r) yang dihasilkan. Validasi dilakukan untuk mengetahui seberapa akurat program estimator yang dibuat dengan cara membandingkan nilai aktual variabel-variabel dibawah ini dengan eksperimen yang dilakukan. Untuk memvalidasi nilai yang dihasilkan dari sensor array, selain melihat grafik FOM yang menunjukkan kemampuan sensor array dalam menangkap sinyal suara relatif terhadap jarak, dapat pula dilihat ketidakpastian dari alat ukur apakah masih dalam bentang spesifikasi awal dari alat ataukah sudah bergeser. Setelah dilakukan percobaan dan perhitungna mengenai ketidakpastian alat ukur yaitu 4 buah hidrofona, diperoleh nilai ketidakpastian *expanded* sebesar ± 1.649 ,

Tabel 4.2 Pengukuran Posisi 1

Kapal Posisi A			
	Aktual	Eksperimen	Error
R (m)	2.78	1.55	1.23
Theta (deg)	50.00	44.00	6.00

Tabel 4.3 Pengukuran Posisi 2

Kapal Posisi B			
	Aktual	Eksperimen	Error
R (m)	2.24	2.20	0.04
Theta (deg)	75.00	75.00	0.00

Tabel 4.4 Pengukuran Posisi 3

Kapal Posisi C			
	Aktual	Eksperimen	Error
R (m)	2.98	2.53	0.45
Theta (deg)	135.00	130.00	5.00

Data pada **Tabel 4.3** sampai **Tabel 4.5** menunjukkan *error* yang didapatkan oleh pembacaan pada masing-masing posisi sesuai pada **Gambar 3.8**. Berdasarkan *error* yang didapatkan dari posisi uji sumber suara yang ditempatkan di sebelah kanan, kiri dan depan sensor relatif terhadap sensor hidrofon yang diasumsikan mewakili pembacaan sensor.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang telah didapatkan serta meninjau kembali permasalahan beserta batasannya dan tujuan dapat dirumuskan beberapa kesimpulan yang diperoleh dalam pengerjaan tugas akhir ini, yaitu:

1. Hasil menunjukkan sumber suara dapat terdeteksi arah gerak (θ) serta jarak (r) sumber suara terhadap sensor.
2. Metode *beamforming* menghasilkan *error* penjejakan sudut datang dengan *range* antara 0 – 6 derajat error, untuk posisi menghasilkan error 0.01- 1.93 meter error.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk pengembangan tugas akhir selanjutnya adalah:

1. Menggunakan metode kalman filter untuk mengestimasi nilai sudut datang sumber yang lebih akurat.
2. Susunan hidrofون dibuat variasi selain disusun secara linear, yaitu disusun secara *planar* dengan konfigurasi (x,y)
3. Deteksi kedalaman objek perlu dilakukan untuk menentukan posisi sumbu (z) dari sumber suara.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

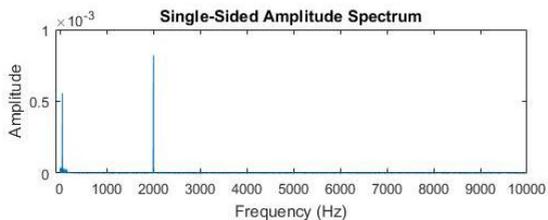
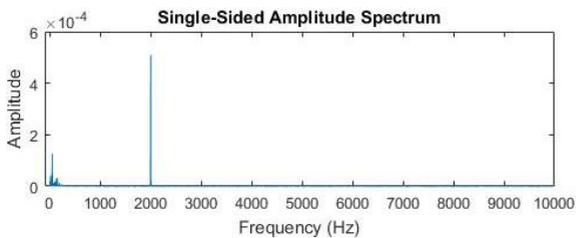
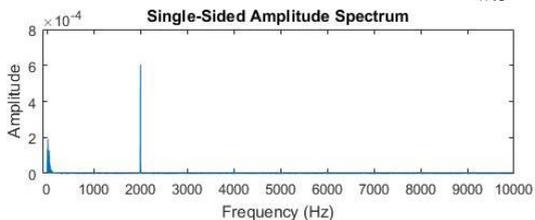
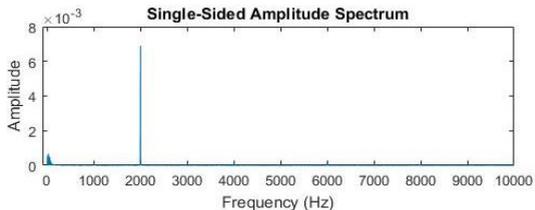
DAFTAR PUSTAKA

- Chen, J. 2012. “**Detection and Tracking of Underwater Object Based on Forward-Scan Sonar**” USA.
- Cochard, N., Lacoume, J.L., Arzelies, P., and Gabillet, Y. “**Underwater acoustic Noise Measurement in Test Tank.**” IEEE Journal of Oceanic Engineering, October 2000 vol.25, no.4
- Farina. 2000. “**Simultaneous Measurement Of Impuls Response And Distorsion With A Swept-Sine Technique,**” Presented at the 108th AES Convention, Paris, France, 2000.
- H. Khaddour. 2011. “**A Comparison of Algorithms of Sound Source Localization Based on Time Delay Estimation,**” Elektrovrevue, ISSN 1213-1539, vol. 2, p. 1, April 2011.
- H. Sherman, L. Butler. 2007. “**Transducers and Arrays for Underwater Sound,**” New York: Springer, 2007.
- Lin, L. Yongchun, K. Fancheng. 2011. “**Acoustic Source Localization Based on Generalized Crosscorrelation Time-delay Estimation,**” Procedia Engineering, vol. 15, pp. 4912-4919, 2011.
- Lurton, X., 2002, “**An Introduction to Underwater Acoustics:Principles and Applications**” (Springer Praxis Publishing, London, UK).
- R. J. Urick. 1983. “**Principles of Underwater Sound 3rd Edition,**” New York: Mc Graw Hill, 1983.
- Richard P. Hodges. 2010. “**Underwater Acoustics Analysis, Design, and Performance of Sonar**”. United Kingdom.
- Thomas D. Rossing. 2013. “**Springer Handbook of Acoustics**” New York: Springer, 2013.
- Waite AD. 2002. “**Sonar for Practising Engineers**”. Third Edition, Chichester , West Sussex, England. John Wiley & Sons Ltd.

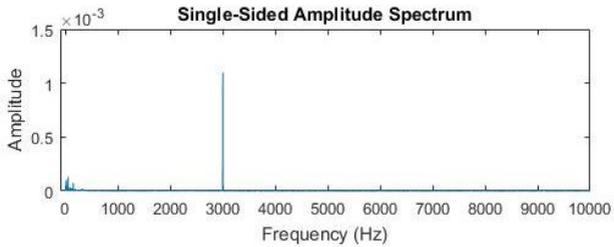
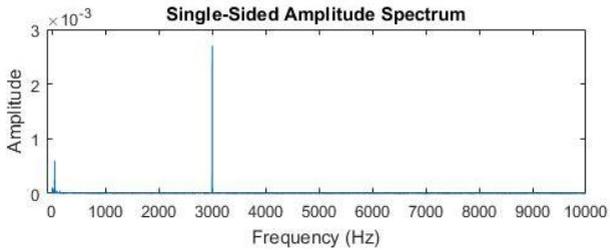
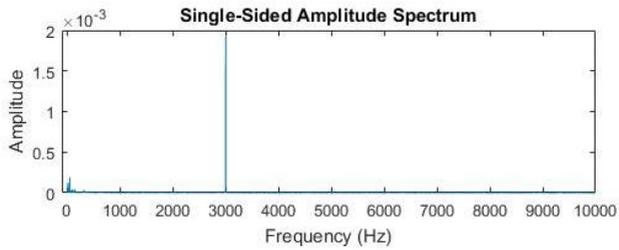
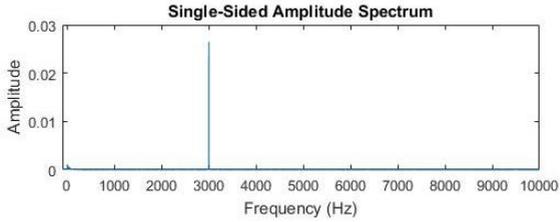
- Xiaofei, S. Miao, W. Wenmin dan L. Hong. 2012. “**Real-time Sound Source Localization for a Mobile Robot Based on the Guided Spectral-Temporal Position Method,**” International Journal of Advanced Robotic Systems, ISSN 1729-8806, vol. 9, no. DOI: 10.5772/51307, p. 78, 2012.
- Yuwono, N. 2012. “**Analisa Perambatan Suara Bawah Air Sebagai Fungsi Kadar Garam dan Suhu Pada Akuarium Anechoic,**” Tugas Akhir, Jurusan Teknik Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Ziomek, L. J. 1995. “**Fundamentals of acoustic field theory and space-time signal processing.**” Boca Raton: CRC Press.

LAMPIRAN A

Respon Hidrofon Terhadap Frekuensi 2000 Hz



Respon Hidrofon Terhadap Frekuensi 2000 Hz



LAMPIRAN B



A-D Dynamic Range	109 dB A-weighted (all inputs)
D-A Dynamic Range	108 dB A-weighted (line outputs)
Supported sample rates	44.1 kHz, 48 kHz, 88.2 kHz A 96 kHz
Clock jitter	<250 ps
Frequency Response	20 Hz ± 0.5 dB, 20 kHz ± 0.1 dB (min. gain) THD+N -96 dB (1 kHz, -1dBFS, 20 kHz BW) Noise EIN -122 dBu CCIR-RMS (measured at 60 dB of gain with 150 ohm termination)
Maximum input level	+9 dBu (without pad)

Line Inputs (Front Panel)

Frequency Response	20 Hz ± 0.5 dB, 20 kHz ± 0.2 dB (min. gain)
THD+N	-83 dB (1 kHz, -1dBFS, 20 kHz BW)
Noise (NiPoS)	-105 dBFS CCIR-RMS (measured at min. gain with 50 ohm termination)

> +28 dBu

Maximum input level

Line Inputs (Rear Panel)

Frequency Response	20 Hz \pm 0.5 dB, 20 kHz \pm 0.1 dB (min. <i>gain</i>)
THD+N	-96dB (1 kHz, -1dBFS, 20 kHz BW) -110dBFS CCIR-RMS
Noise (NiPoS)	(measured at min. <i>gain</i> with 50 ohm termination)

Instrument Inputs

Frequency Response	20 Hz \pm 0.3 dB, 20 kHz \pm 0.1 dB (min. <i>gain</i>)
THD+N	-83 dB (1 kHz, -1dBFS, 20 kHz BW) -103 dBFS CCIR-RMS
Noise (NiPoS)	(measured at min. <i>gain</i>)
Maximum input level	+8 dBu (without pad)

Line Outputs 1 & 2

Maximum Output Level (0 dBFS)	+16 dBu, balanced
THD+N	-99 dB (1 kHz, -1dBFS, 20 kHz BW)

Weight and Dimensions

Weight:1.64Kg

Height:66 mm

Width:227 mm

Depth: 180 mm

Data Spesifikasi *Hidrofon Aquarian H2a-XLR*



Sensitivity	: -180dB re: 1V/mPa (+/- 4dB 20Hz-4.5KHz)
Useful range	: <10 Hz to >100KHz (not measured above 100KHz, approximate sensitivity @100KHz = -220dB re: 1V/mPa)
Polar Response	: Omnidirectional (horizontal)
Operating depth	: <80 meters x
Output impedance	: 1 KW (typical)
Power	: 0.6 mA (typical)
Physical	: (cable and output plug excluded)
Dimensions	: 25mm x 46mm
Mass	: 105 grams
Specific Gravity	: 5.3

Data Spesifikasi *Underwater Speaker Daravoc MA001*



Specifications:

- Cable: UL2464 AWG22/2C
- Cable length: 33.3 feet.
- For MA001A, the cable length is 14.5 feet, extended to 29 feet
- Frequency Response: 100 - 10,000 Hz
- Impedance: 4 Ohms/8 Ohms
- Temperature Resistant: up to 176 0F
- Model MA001 & MA001A Max. Input Power: 20 Watts

Data Spesifikasi Kapal Selam Remote Control



- Product Name: US Remote Control Nuclear Submarine
- Product Dimensions: 35X9X9CM, Diving Depth: 1 meter

- Packaging: Color Gifts Window Box
- Product Accessories: Submarines + Remote control + Color box + Instructions
- Product Material: ABS + Electronic Devices
- Battery: Submarines four AA batteries (own), Remote Control Working with sections one 9V block battery
- Weight: 1.6KG

BIODATA PENULIS



Nama lengkap penulis adalah Fidia Shethin Anisa, lahir di Karanganyar pada tanggal 13 Januari 1995. Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Pada tahun 2007 penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Dasar di SDN 4 Matesih, pada tahun 2010 menyelesaikan pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 1 Karanganyar, pada tahun 2013 menyelesaikan pendidikan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 1 Surakarta. Pada tahun yang sama, penulis terdaftar sebagai mahasiswa di Jurusan D3 Metrologi dan Instrumentasi Institut Teknologi Bandung. Pada tahun 2016 menyelesaikan studi D3 di Institut Teknologi Bandung. Dan pada tahun yang sama, penulis terdaftar sebagai mahasiswa di Departemen Teknik Fisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Konsentrasi tugas akhir yang didalami adalah bidang vibrasi dan akustik. Pada bulan Juli 2018 penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **PENJEJAKAN (*TRACKING*) SUMBER BUNYI BERGERAK BAWAH AIR BERDASARKAN ESTIMASI WAKTU TUNDA MENGGUNAKAN HIDROFON ARRAY.**

Apabila pembaca ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir, serta memberikan kritik dan saran maka dapat menghubungi penulis melalui *email* : emailfidia4@gmail.com