

PEMODELAN POLA RAMBAT GELOMBANG SUARA DARI KOTAK HITAM DENGAN METODE *RAY TRACING* DI PERAIRAN INDONESIA

Ina Annisa Putri¹ dan Irsan Soemantri Brodjonegoro, Ph.D²

Program Studi Teknik Kelautan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, ITB

email: putri.ina93@gmail.com dan irsansb@ocean.itb.ac.id

ABSTRAK

Salah satu bagian dari kotak hitam yang dapat memancarkan sinyal gelombang suara dalam air adalah *underwater locator beacon* (ULB). Untuk mendeteksi keberadaan kotak hitam yang jatuh ke perairan dibutuhkan suatu pemodelan pola rambat gelombang suara yang dipancarkan oleh kotak hitam. Pemodelan ini bertujuan untuk melihat bagaimana pola rambat gelombangnya sehingga dapat ditentukan kedalaman minimal *hydrophone* dari kapal pencari kotak hitam. Dalam tugas akhir ini, akan dilakukan pemodelan gelombang suara dari kotak hitam dengan metode *ray tracing* dengan bantuan MATLAB 7.10 untuk pengolahan data dan perhitungannya. Lokasi tinjau yang diambil adalah Selat Lombok dan Selat Makassar dimana pada masing-masing lokasi dibagi lagi menjadi 3 tempat tinjau sehingga akan ada 6 lokasi tinjau. Data-data yang diperlukan diantaranya adalah data temperatur, salinitas, cepat rambat suara yang diperoleh dari *World Ocean Atlas Database*, serta data kedalaman yang didapatkan dari *Google Earth*. Ada beberapa asumsi yang digunakan dalam pemodelan, yaitu: tidak terjadi kehilangan energi (*transmission loss*) sepanjang perambatan gelombang, dan terjadi pemantulan sempurna ketika gelombang mencapai dasar atau permukaan perairan. Berdasarkan hasil pemodelan, dapat disimpulkan bahwa kedalaman minimal penempatan *hydrophone* untuk lokasi Lombok 1 adalah 153.8 m, Lombok 2 adalah 256.8 m, dan Lombok 3 adalah 328.8 m sedangkan untuk lokasi Makassar 1 adalah 271.3 m, Makassar 2 adalah 243.2 m, dan Makassar 3 adalah 4.5 m.

Kata kunci: kotak hitam, *ray tracing*, akustik

PENDAHULUAN

Kotak hitam atau *black box* adalah alat yang biasanya digunakan dalam bidang transportasi, terutama pada pesawat udara. Fungsi dari *black box* yaitu untuk merekam informasi dan pembicaraan antara pilot dan pemandu lalu lintas udara atau *air traffic control* (ATC) selama perjalanan dan juga untuk mengetahui tekanan udara serta kondisi cuaca selama

penerbangan. Jika pesawat udara mengalami kecelakaan, semua informasi yang terekam di *black box* dapat digunakan untuk menyimpulkan penyebab terjadinya kecelakaan. Untuk menentukan lokasi keberadaan kotak hitam yang jatuh ke wilayah perairan, diperlukan suatu perlengkapan khusus seperti *pinger locator*. *Pinger locator* adalah alat yang digunakan untuk mendeteksi keberadaan objek dengan bantuan

¹ Mahasiswa

² Dosen Pembimbing

suara. Alat ini akan mendengarkan sinyal sonar (*ping*) dari kotak hitam. Untuk itu, dibutuhkan suatu pemodelan pola rambat gelombang suara di setiap titik tinjau untuk melihat propagasi (*detect zone*) dari sinyal yang dihasilkan kotak hitam. Dalam pemodelan pola rambat gelombang dalam air, diperlukan data karakteristik perairan yang ditinjau, seperti temperatur, salinitas, kedalaman, dan cepat rambat gelombang suara dalam air. *National Oceanographic Data Centre* merupakan sebuah database yang memuat temperatur, salinitas, dan cepat rambat gelombang suara untuk seluruh dunia dan database ini dikenal dengan *World Ocean Atlas (WOA) Database* yang didapatkan dari website *Brian's Dushaw Homepage* (2015). Pemodelan pola rambat gelombang dengan metode *ray tracing* sudah banyak dilakukan diantaranya oleh Aji N. Rendragraha (2010) dan Aulia Yoga Maharddika (2013). Dengan data-data yang diperoleh dari database tersebut, pemodelan propagasi (perambatan) akustik bawah air dapat dilakukan sehingga dapat dilihat bagaimana bentuk propagasi gelombang dari *black box*.

TEORI DASAR

Persamaan Dasar Akustik Bawah Air

Teori dasar akustik bawah air menggunakan beberapa asumsi yaitu:

1. Kekentalan fluida sama dengan nol atau *invicid* sehingga fluida tidak mengalami gesekan antar partikel.
2. Perhitungan dilakukan dalam skala kecil atau perubahan yang terjadi sangat kecil dibandingkan dengan harga ambienya.
3. Kecepatan fluida diasumsikan sama dengan nol.

Persamaan dasar akustik bawah air diturunkan dari beberapa persamaan, yaitu:

1. Persamaan Kekekalan Massa (Persamaan Kontinuitas)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(\rho U) = 0 \quad (1)$$

2. Persamaan Kekekalan Momentum

$$\frac{\partial p}{\partial z} + \rho \frac{\partial U}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

3. Persamaan State (*State Equation*)

$$\Delta p = c^2 \cdot \Delta \rho \quad (3)$$

Dari persamaan (1), (2), dan (3) akan diperoleh persamaan gelombang, yaitu:

$$\frac{\partial^2 \Delta p}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \Delta p}{\partial z^2} \quad (4)$$

Karakteristik Cepat Rambat Suara Perairan

Profil kecepatan suara dalam air laut menentukan bentuk propagasi gelombang suara di laut. Ada tiga parameter utama yang menentukan besaran kecepatan suara yaitu temperatur (*T*), salinitas (*S*) dan kedalaman (*z*). Profil kecepatan suara biasanya dibagi menjadi 3 lapisan, yaitu:

1. *Mixed Layer* atau *Surface Layer*

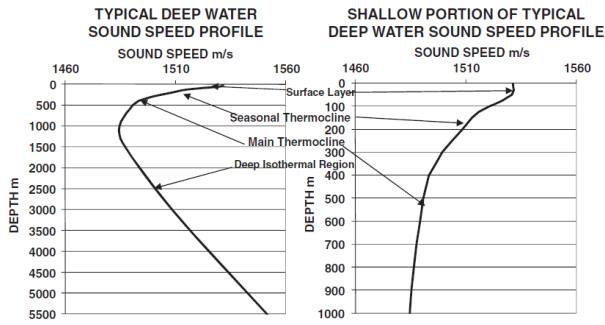
Kecepatan suara pada lapisan ini cenderung meningkat karena ada perubahan tekanan yang mendominasi.

2. *Thermocline Layer*

Pada lapisan ini, kecepatan suara menurun secara drastis dan terdapat titik minimum cepat rambat suara akibat perubahan temperatur yang besar.

3. *Isothermal Layer*

Kecepatan suara pada lapisan ini meningkat kembali akibat bertambahnya tekanan.



Gambar 1 Sound velocity profile untuk laut dalam dan dangkal

(sumber: Hodges, Richard P. 2010. Underwater Acoustics- Analysis, Design and Performance of Sonar. Singapore: Markono Print Media Pte Ltd)

Persamaan Empiris Cepat Rambat Suara Di Laut

Menurut Urick (1983) persamaan empiris cepat rambat suara dibagi menjadi 3, yaitu:

1. Persamaan empiris Leroy

$$c = 1492.9 + 3 \times (T - 10) - 6 \times 10^{-3} \times (T - 10)^2 - 4 \times 10^{-2} \times (T - 18)^2 + 1.2 \times (S - 35) - 10^{-2}(T - 18) \times (S - 35) + z/61 \quad (5)$$

dengan batasan:

- $-2 \leq T \leq 24.5^\circ$ (dalam Celcius)
- $30\text{‰} \leq S \leq 42\text{‰}$
- $0 \leq z \leq 1000$ meter

2. Persamaan empiris Medwin

$$c = 1449.2 + 4.6 \times T - 5.5 \times 10^{-2}T^2 + 2.9 \times 10^{-4}T^3 + (1.34 - 10^{-2}T) \times (S - 35) + 1.6 \times 10^{-2}z \quad (6)$$

dengan batasan:

- $0 \leq T \leq 35^\circ$ (dalam Celcius)
- $0 \leq S \leq 45\text{‰}$
- $0 \leq z \leq 1000$ meter

3. Persamaan empiris Mackenzie

$$c = 1448.96 + 4.591 \times T - 5.304 \times 10^{-2} \times T^2 + 2.374 \times 10^{-4} \times T^3 + 1.340 \times (S - 35) + 1.630 \times 10^{-2}z + 1.67 \times 10^{-7}z^2 - 1.025 \times 10^{-2}T \times (S - 35) - 7.139 \times 10^{-13} \times T \times z^3 \quad (7)$$

dengan batasan:

- $0 \leq T \leq 30^\circ$ (dalam Celcius)
- $30 \leq S \leq 40\text{‰}$
- $0 \leq z \leq 8000$ meter

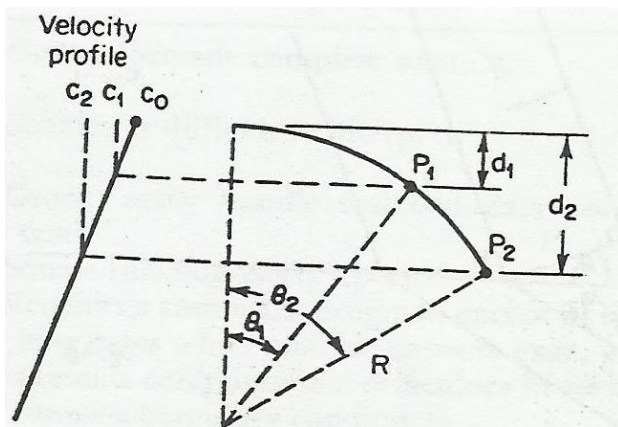
Ray Tracing

Metode *ray tracing* merupakan salah satu metode yang paling banyak digunakan untuk memodelkan propagasi akustik bawah air. *Ray tracing* menggambarkan propagasi gelombang dalam bentuk garis (*rays*) sebagai pembentukan muka gelombang pada setiap titik di suatu medium tertentu. Pembentukan *ray tracing* terpengaruh oleh profil cepat rambat suara. Jika kecepatan suara semakin menurun terhadap kedalaman maka gelombang suara akan cenderung berbelok ke dasar perairan. Jika kecepatan suara semakin meningkat terhadap kedalaman maka gelombang suara cenderung akan berbelok ke permukaan perairan. Selain itu, ada suatu hukum yang perlu diperhatikan juga yaitu Hukum Snellius. Hukum Snellius ini menyatakan bahwa adanya hubungan antara sudut gelombang *rays* dan cepat rambat suara yang dapat dinyatakan dengan persamaan (8):

$$\frac{\cos \theta_1}{c_1} = \dots = \frac{\cos \theta_n}{c_n} = \text{konstan} \quad (8)$$

Lintasan Rays Pada Gradien Linier

Pada suatu medium yang kecepatan suaranya berubah secara linier, lintasan *rays* dapat digambarkan sebagai suatu lengkungan lingkaran seperti pada **Gambar 2**.



Gambar 2 Lingkaran ray dalam medium yang kecepatan suaranya merupakan fungsi linier

(sumber: Urick, Robert J. 1983. Principles of Underwater Sound. 3rd edition. New York: Peninsula Publishing)

R adalah garis ray. Berdasarkan **Gambar 2** didapatkan hubungan dengan persamaan di bawah ini:

$$d_2 - d_1 = R \cos \theta_1 - R \cos \theta_2 \quad (9)$$

Titik P₁ dan P₂ merupakan sebuah ray jika Hukum Snellius terpenuhi.

Untuk menghitung besar jari-jari kelengkungan ray dapat menggunakan persamaan di bawah ini:

$$R = -\frac{c_0}{g} \quad (10)$$

dimana g merupakan gradien cepat rambat suara dan c₀ adalah besar kecepatan suara.

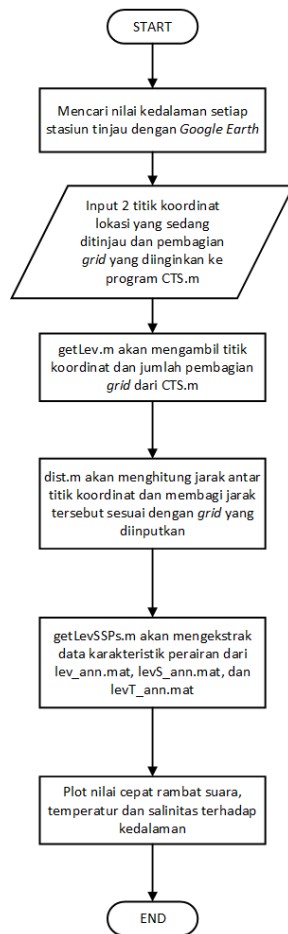
METODOLOGI

Sebelum melakukan pemodelan, diperlukan pengolahan data terlebih dahulu seperti pada **Gambar 3**. Pengolahan data yang dilakukan adalah data cepat rambat suara, salinitas, dan temperatur. Kode program diperoleh dari <http://staff.washington.edu/dushaw> dan diolah menggunakan MATLAB. Hasil dari pengolahan ini adalah nilai dari karakteristik di atas.

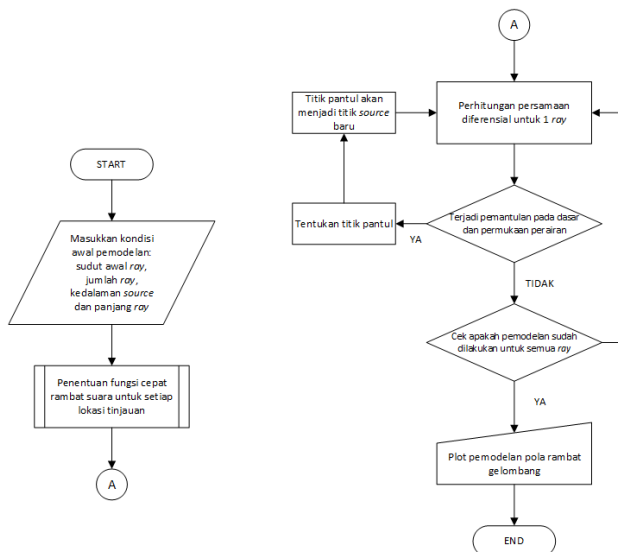
Pemodelan ini terdiri atas program utama dan *subprogram*. Program utama akan menghitung

rays yang terjadi dengan memasukkan sudut awal pemancaran, panjang lintasan rays, kedalaman *source*, dan jumlah rays yang akan dimodelkan. Sedangkan dalam *subprogram* data yang harus diinput adalah persamaan cepat rambat suara $c(z)$. Dalam pemodelan digunakan beberapa asumsi, yaitu:

1. Tidak terjadi *transmission loss* atau kehilangan energi pada saat perambatan gelombang.
2. Terjadi pemantulan sempurna pada saat perambatan gelombang mencapai permukaan ataupun batas dasar laut, tidak ada transmisi.
3. Data kecepatan suara (c) yang digunakan untuk pemodelan adalah profil kecepatan suara di kedalaman yang paling dalam.
4. Pemodelan hanya dilakukan secara 2 dimensi, yaitu terhadap kedalaman perairan (z) dan jarak lintasan rays (x).
5. Batimetri yang digunakan merupakan penyederhanaan dari data batimetri yang sebenarnya.
6. Persamaan cepat rambat suara $c(z)$ yang akan dimasukkan kedalam *subprogram* pemodelan adalah hasil dari *polyfit* cepat rambat suara 2009WOA.



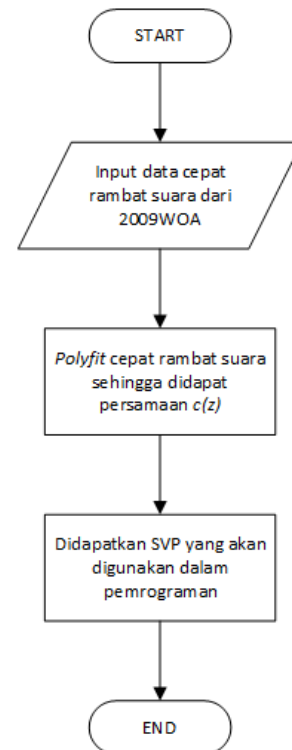
Gambar 3 Diagram alir pengolahan data



Gambar 4 Diagram alir program utama

Setelah data awal dimasukkan ke program utama, perlu dicek apakah *rays* mengalami pemantulan di dasar atau permukaan perairan. Jika terjadi pemantulan sempurna maka sudut datang sama dengan sudut pantul. Kemudian cek apakah sudah untuk keseluruhan jumlah *rays*. Hasil akhir yang didapatkan adalah bentuk propagasi *rays*. Diagram alir dapat dilihat pada **Gambar 4**.

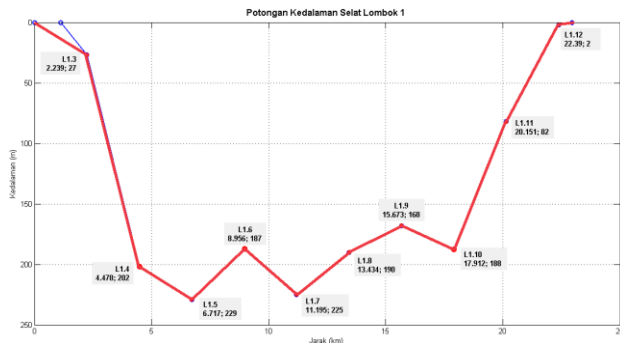
Untuk *subprogram* dibutuhkan data cepat rambat suara yang sebelumnya sudah diolah sehingga didapatkan besaran cepat rambat suara pada setiap kedalaman. Setelah itu, dilakukan *polynomial curve fitting* terhadap data cepat rambat suara tersebut sehingga diperoleh persamaan cepat rambat suara terhadap kedalaman $c(z)$ yang akan digunakan dalam pemodelan. Diagram alir dapat dilihat pada **Gambar 5**.



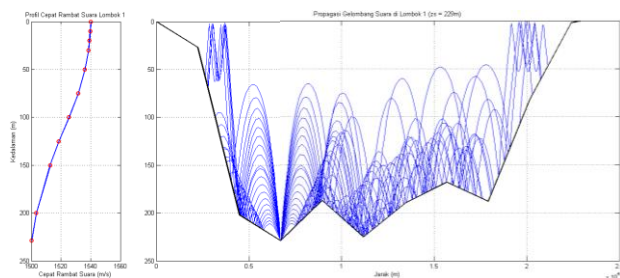
Gambar 5 Diagram alir subprogram

HASIL DAN ANALISA

Pada Lombok 1 *source* diletakkan pada kedalaman 229 m dengan sudut awal pemancaran -2.0° sampai -12.0° untuk *rays* yang berpropagasi ke arah kanan dan -168.0° sampai -178.0° untuk *rays* yang berpropagasi ke arah kiri. Bentuk batimetri yang digunakan seperti pada **Gambar 6** yang ditunjukkan dengan garis merah.



Gambar 6 Batimetri Lombok 1 yang digunakan dalam pemodelan

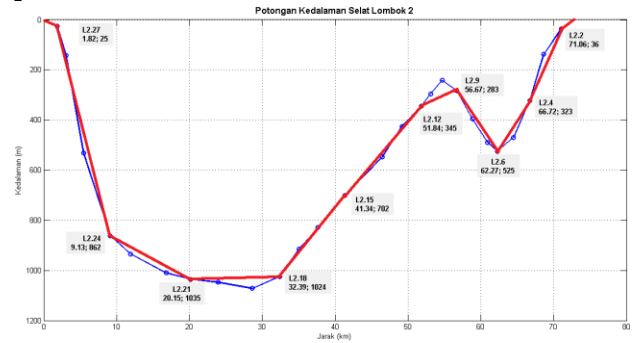


Gambar 7 Bentuk perambatan gelombang suara Lombok 1

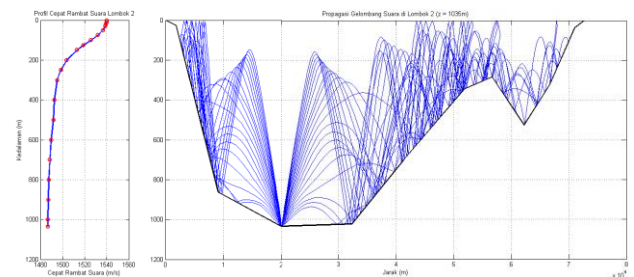
Berdasarkan **Gambar 7**, *hydrophone* kapal pencari sebaiknya diletakkan pada kedalaman 153.8 m karena ketika *hydrophone* melintasi kedalaman tersebut, frekuensi propagasi gelombang suara (*detect zone*) yang dihasilkan lebih sering terdengar. Tetapi sebaiknya *hydrophone* jangan diletakkan pada kedalaman kurang dari 65.53 m karena ada wilayah *shadow zone*.

Pada Lombok 2 *source* diletakkan pada kedalaman 1035 m dengan sudut awal

pemancaran -0.5° sampai -10.5° untuk *rays* yang berpropagasi ke arah kanan dan -169.1° sampai -179.1° untuk *rays* yang berpropagasi ke arah kiri. Bentuk batimetri yang digunakan seperti pada **Gambar 8**.



Gambar 8 Batimetri Lombok 2 yang digunakan dalam pemodelan

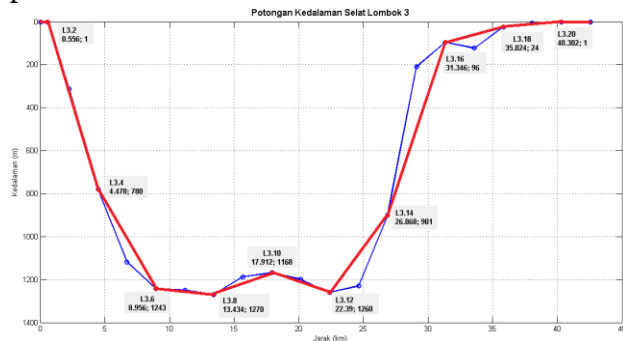


Gambar 9 Bentuk perambatan gelombang suara Lombok 2

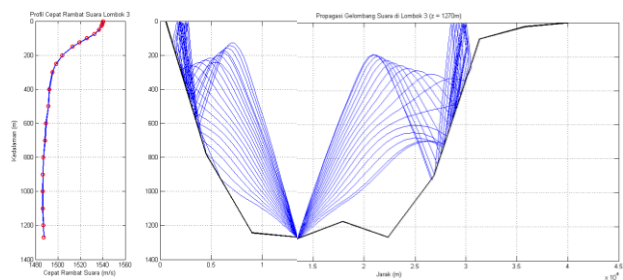
Berdasarkan **Gambar 9**, *hydrophone* kapal pencari sebaiknya diletakkan pada kedalaman 256.8 m karena ketika *hydrophone* melintasi kedalaman tersebut, frekuensi propagasi gelombang suara (*detect zone*) yang dihasilkan lebih sering terdengar. Tetapi sebaiknya *hydrophone* jangan diletakkan pada kedalaman kurang dari 362.6 m karena ada wilayah *shadow zone*.

Pada Lombok 3 *source* diletakkan pada kedalaman 1270 m dengan sudut awal pemancaran -1.5° sampai -11.5° untuk *rays* yang berpropagasi ke arah kanan dan -169.5° sampai -179.5° untuk *rays* yang berpropagasi ke arah

kiri. Bentuk batimetri yang digunakan seperti pada **Gambar 10**.



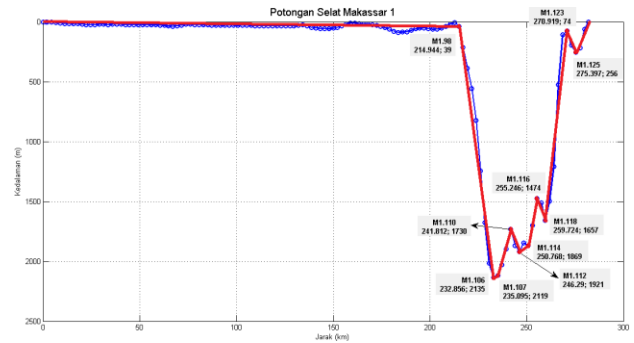
Gambar 10 Batimetri Lombok 3 yang digunakan dalam pemodelan



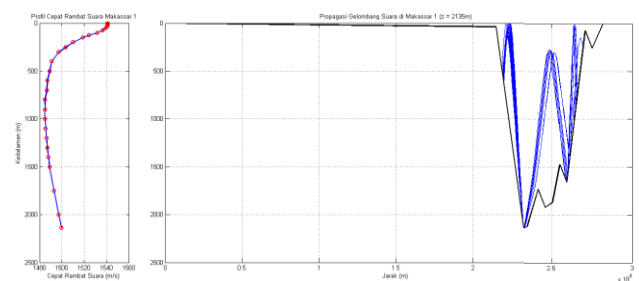
Gambar 11 Bentuk perambatan gelombang suara Lombok 3

Berdasarkan **Gambar 11**, *hydrophone* kapal pencari sebaiknya diletakkan pada kedalaman 328.8 m karena ketika *hydrophone* melintasi kedalaman tersebut, frekuensi propagasi gelombang suara (*detect zone*) yang dihasilkan lebih sering terdengar. Tetapi sebaiknya *hydrophone* jangan diletakkan pada kedalaman kurang dari 165.9 m karena ada wilayah *shadow zone*.

Pada Makassar 1 *source* diletakkan pada kedalaman 1270 m dengan sudut awal pemancaran -0.5° sampai -10.5° untuk *rays* yang berpropagasi ke arah kanan dan -160.5° sampai -170.5° untuk *rays* yang berpropagasi ke arah kiri. Bentuk batimetri yang digunakan seperti pada **Gambar 12**.



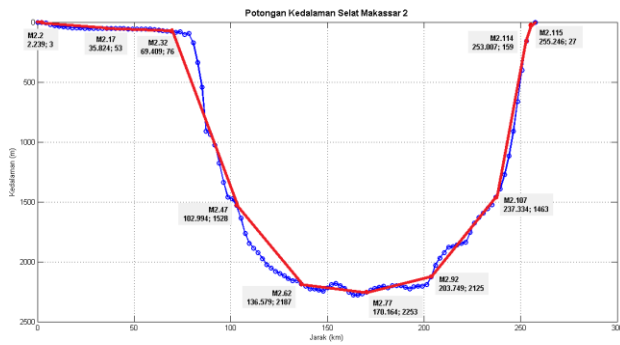
Gambar 12 Batimetri Makassar 1 yang digunakan dalam pemodelan



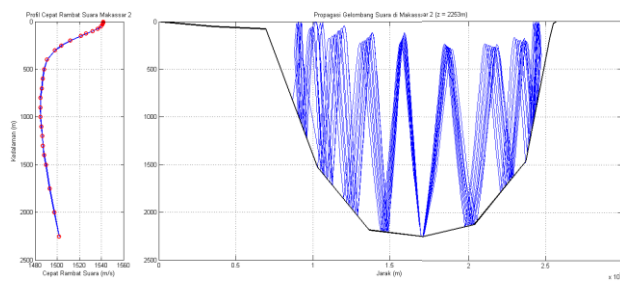
Gambar 13 Bentuk perambatan gelombang suara Makassar 1

Berdasarkan **Gambar 13**, *hydrophone* kapal pencari sebaiknya diletakkan pada kedalaman 271.3 m karena ketika *hydrophone* melintasi kedalaman tersebut, frekuensi propagasi gelombang suara (*detect zone*) yang dihasilkan lebih sering terdengar. Tetapi sebaiknya *hydrophone* jangan diletakkan pada kedalaman kurang dari 19.98 m karena ada wilayah *shadow zone*.

Pada Makassar 2 *source* diletakkan pada kedalaman 2253 m dengan sudut awal pemancaran -0.5° sampai -10.5° untuk *rays* yang berpropagasi ke arah kanan dan -169.5° sampai -179.5° untuk *rays* yang berpropagasi ke arah kiri. Bentuk batimetri yang digunakan seperti pada **Gambar 14**.



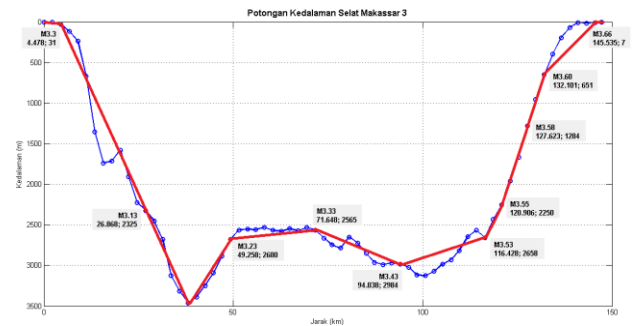
Gambar 14 Batimetri Makassar 2 yang digunakan dalam pemodelan



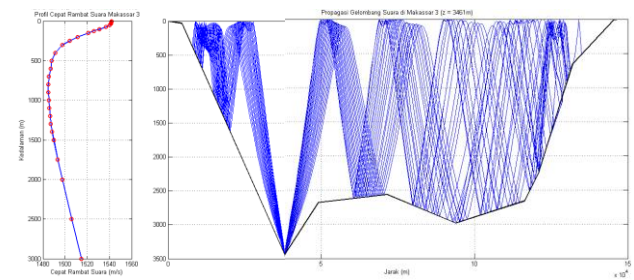
Gambar 15 Bentuk perambatan gelombang suara Makassar 2

Berdasarkan **Gambar 15**, *hydrophone* kapal pencari sebaiknya diletakkan pada kedalaman 243.2 m sampai 841.8 m karena ketika *hydrophone* melintasi kedalaman tersebut, frekuensi propagasi gelombang suara (*detect zone*) yang dihasilkan lebih sering terdengar. Terlihat pada gambar bahwa propagasi menyebar hampir ke seluruh batimetri sehingga *hydrophone* dapat ditempatkan di setiap kedalaman.

Pada Makassar 3 *source* diletakkan pada kedalaman 3461 m dengan sudut awal pemancaran -4.0° sampai -14.0° untuk *rays* yang berpropagasi ke arah kanan dan -166.0° sampai -176.0° untuk *rays* yang berpropagasi ke arah kiri. Bentuk batimetri yang digunakan seperti pada **Gambar 16**.



Gambar 16 Batimetri Makassar 3 yang digunakan dalam pemodelan



Gambar 17 Bentuk perambatan gelombang suara Makassar 3

Berdasarkan **Gambar 17**, *hydrophone* kapal pencari sebaiknya diletakkan pada kedalaman 4.5 m sampai 582.7 m karena ketika *hydrophone* melintasi kedalaman tersebut, frekuensi propagasi gelombang suara (*detect zone*) yang dihasilkan lebih sering terdengar. Seperti yang terlihat pada gambar, propagasi di Makassar 3 hampir menyebar ke seluruh batimetri sehingga *hydrophone* tetap akan mendeteksi sinyal pada kedalaman berapa pun.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan dari hasil pengolahan data dan pemodelan adalah:

1. Pemodelan ini dilakukan karena propagasi akustik bawah air memiliki pola rambat yang bergantung pada temperatur, salinitas, dan kedalaman. Berdasarkan hasil pemodelan pola rambat gelombang dari *black box*

nantinya akan didapatkan kedalaman minimal untuk meletakkan *pinger locator* atau *hydrophone* dari kapal pencari *black box*.

2. Penempatan kedalaman minimal *hydrophone* berbeda-beda untuk setiap lokasi tinjau. Untuk Lombok 1, sebaiknya *hydrophone* diletakkan pada kedalaman 153.8 m; Lombok 2, sebaiknya *hydrophone* diletakkan pada kedalaman 256.8 m; dan Lombok 3, sebaiknya *hydrophone* diletakkan pada kedalaman 328.8 m. Untuk Makassar 1, sebaiknya *hydrophone* diletakkan pada kedalaman 271.3 m; Makassar 2, sebaiknya *hydrophone* diletakkan pada kedalaman 243.2 m; dan Makassar 3, sebaiknya *hydrophone* diletakkan pada kedalaman 4.5 m.
3. Untuk lokasi tinjau Selat Lombok, *hydrophone* dapat diletakkan dari kedalaman 153 m sampai 710 m karena masih ada propagasi dari *black box* hingga kedalaman tersebut tetapi bergantung pada bentuk batimetrimya.
4. Untuk lokasi tinjau Selat Makassar, *hydrophone* dapat diletakkan dari kedalaman 4.5 m sampai 1430 m karena masih ada propagasi dari *black box* hingga kedalaman tersebut tetapi bergantung pada bentuk batimetrimya.

Saran:

1. Pemodelan sebaiknya dilakukan dengan memperhitungkan kehilangan energi transmisi dan absorpsi akibat dari pemantulan pada dasar maupun permukaan perairan.
2. Batimetri juga sebaiknya menggunakan batimetri yang tidak disederhanakan agar

pemodelan yang dihasilkan dapat mendekati kondisi aslinya.

3. Profil cepat rambat suara yang digunakan dalam pemodelan sebaiknya tidak diwakilkan oleh satu persamaan cepat rambat suara saja, tetapi dibuat suatu fungsi cepat rambat suara yang bergantung pada variabel kedalaman dan jarak.

DAFTAR PUSTAKA

Hodges, Richard P. 2010. *Underwater Acoustics-Analysis, Design and Performance of Sonar*. Singapore: Markono Print Media Pte Ltd

Maharddika, Aulia Yoga. 2013. *Pemodelan Pemetaan Lokasi Shadow Zone Dengan Metode Ray Tracing Di Perairan Indonesia*. Teknik Kelautan ITB

Rendragraha, Aji N. 2010. *Pemodelan Pemetaan Lokasi Shadow Zone Dengan Metode Ray Tracing*. Teknik Kelautan ITB

Stewart, Robert H. 2006. *Introduction To Physical Oceanography*. Texas: Texas A & M University

Urlick, Robert J. 1983. *Principles of Underwater Sound*. 3rd edition. New York: Peninsula Publishing

Dushaw, Brian. 2015. *Brian's Dushaw Homepage*.

(<http://staff.washington.edu/dushaw>, diakses tanggal 6 Juli 2015)