

PEMODELAN PEMETAAN LOKASI *SHADOW ZONE* DENGAN METODE RAY TRACING DI PERAIRAN INDONESIA

Aulia Yoga Maharddhika¹ dan Irsan Soemantri Brodjonegoro²

Program Studi Teknik Kelautan

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung,

Jl Ganesha 10 Bandung 40132

¹auliayogam@gmail.com dan ²irsansb@ocean.itb.ac.id

PENDAHULUAN

Pemodelan lokasi *shadow zone* pada propagasi akustik bawah air berfungsi untuk menentukan letak kedalaman penempatan *transducer* sebagai sumber gelombang akustik agar menghasilkan luas area deteksi semaksimal mungkin. Dikarenakan adanya variasi kondisi lingkungan pada perairan menyebabkan perambatan gelombang suara ini tidak melingkupi seluruh perairan yang ditinjau.

Shadow zone ini menyebabkan kemungkinan tidak terdeteksinya suatu objek didalam air. Dalam aplikasi bidang militer, pihak militer tidak akan dapat mendeteksi keberadaan objek asing (kapal selam, torpedo, dan lainnya) yang berada pada *shadow zone* karena gelombang suara yang digunakan untuk mendeteksi tidak mengenai objek asing tersebut sehingga dapat menyebabkan kerugian bagi pihak militer.

Oleh karena itu dibutuhkan suatu penelitian yang dapat meminimalisir terjadinya *shadow zone* berupa pemodelan pola rambat gelombang suara pada tiap lokasi tinjau dan analisis luas *shadow zone* yang terbentuk. sehingga menghasilkan kedalaman penempatan *transducer* yang menghasilkan cakupan area deteksi semaksimal mungkin.

Penelitian untuk memodelkan propagasi akustik bawah air telah banyak dilakukan. Pemodelan propagasi akustik bawah air tersebut telah dilakukan dengan metode *normal-mode* (Sulianto, Dedy, 2005; Wen, Tze, 2008), dengan metode *normal-mode* dan *ray tracing* pada perairan Kepulauan Sangihe (Permata, Wiwa, 2004), dengan metode *ray tracing* di perairan Selat Sunda (Johari, Jona, 2003), dengan metode *ray tracing* pada perairan Indonesia menggunakan data karakteristik perairan dari *World Ocean Atlas Database* (Andrianto, Andreas, 2002; Soegiri, Azis P., 2005; Soeprapto, Agus, 2006), dengan metode *ray tracing* pada alur lintas kepulauan Indonesia untuk memetakan *shadow zone* (Rendragaha, Ajie N., 2010), dengan metode *ray tracing* dengan memperhitungkan kehilangan energi transmisi pada Perairan Selatan Jawa (Amalia, Ami, 2007; Friyadi, Danny, 2006), menggunakan metode matriks untuk memperhitungkan kehilangan energi transmisi akibat pantulan pada dasar perairan datar untuk propagasi akustik bawah air dengan metode *ray tracing* (Hastuti, Yulia, 1998), menggunakan metode matriks *cascade* untuk perhitungan koefisien pantul pada dasar perairan miring dengan lebih dari 2 lapisan pada dasar perairan, untuk perhitungan kehilangan energi transmisi akibat pantulan dasar untuk propagasi akustik bawah air dengan metode *ray tracing* (Ondara, Koko, 2011; Friyadi, Danny, 2012), dengan metode persamaan parabolik untuk propagasi akustik bawah air di Samudera Hindia (Poengoet, James NGR., 2008).

Dalam paper ini akan dimodelkan propagasi akustik bawah air secara 2 dimensi dengan metode *ray tracing* pada 3 lokasi tinjau di perairan Indonesia yaitu pada Selat Karimata, Laut Maluku, serta Laut Banda. Pemodelan akan dilakukan dengan penempatan *transducer* pada tiga titik

kedalaman pada tiap lokasinya, dimana tiap titiknya mewakili lapisan *well-mixed*, termoklin, dan isotherm.

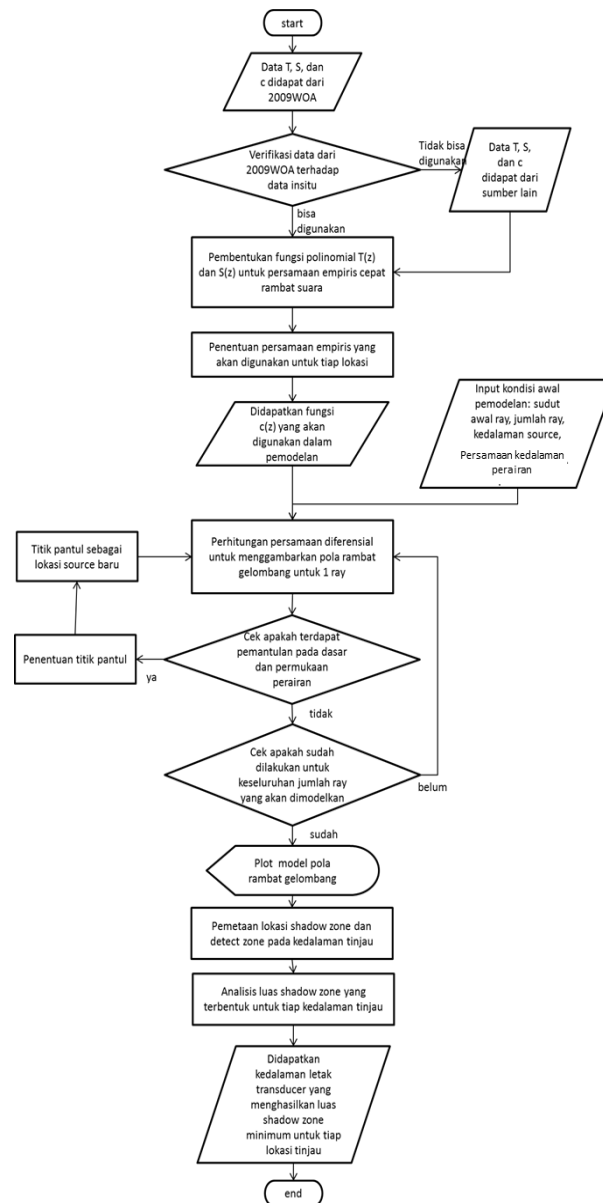
Selanjutnya hasil pemodelan ini akan dianalisis, meliputi pemetaan lokasi dan luas *shadow zone* yang terbentuk pada tiap kedalaman penempatan *transducer*, dengan melihat luas *shadow zone* yang terbentuk pada tiap kedalaman *transducer*, dapat ditentukan penempatan *transducer* yang menghasilkan luas *shadow zone* terkecil pada tiap lokasi tinjaunya.

DAFTAR SIMBOL

$a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$	= Koefisien persamaan polinomial temperatur
$b_1, b_2, b_3, \dots, b_n$	= Koefisien persamaan polinomial salinitas
c	= Cepat rambat suara [m/s]
$c(z)$	= Cepat rambat suara sebagai fungsi kedalaman
$c(T, S, z)$	= Cepat rambat suara sebagai fungsi temperatur, salinitas, dan kedalaman
$c_{2009WOA}$	= Nilai cepat rambat suara berdasarkan World Ocean Atlas Database [m/s]
$c_{empiris}$	= Nilai cepat rambat suara berdasarkan persamaan empiris [m/s]
E	= Rata-rata persentase error [%]
N	= Jumlah data
$p(X, t)$	= Fluktuasi tekanan sebagai fungsi spasial $X=(r, z)$ dan temperatur
r	= Jarak tinjauan [m]
s	= Panjang lintasan ray [m]
S	= Salinitas [ppt]
$S(z)$	= Salinitas sebagai fungsi kedalaman
$S_{2009WOA}$	= Nilai salinitas berdasarkan World Ocean Atlas Database [ppt]
t	= Waktu [s]
T	= Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]
$T(z)$	= Temperatur sebagai fungsi kedalaman
$T_{2009WOA}$	= Nilai temperatur berdasarkan World Ocean Atlas Database [$^{\circ}\text{C}$]
X	= fungsi spasial sebagai fungsi jarak tinjau r dan kedalaman z
X_s	= lokasi titik <i>source</i> pada fungsi spasial X
$X(s)$	= vektor <i>ray</i>
z	= Kedalaman [m]
$z(x)$	= Kedalaman sebagai fungsi jarak [m]
δ	= <i>Dirac's Delta Function</i>
$\tau(X)$	= Waktu sebagai fungsi spasial X

TEORI DAN METODOLOGI

Metodologi pemodelan lokasi *shadow zone* dapat dilihat pada **Gambar 1**

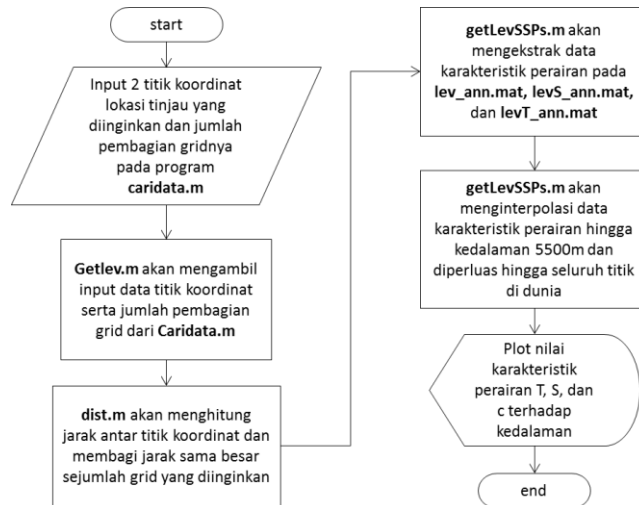


Gambar 1 Metodologi Pemodelan lokasi *shadow zone*

Data-data yang perlu dikumpulkan untuk melakukan pemodelan propagasi akustik diantaranya adalah temperatur, salinitas, cepat rambat suara, dan kedalaman perairan tiap lokasi tinjau. Data-data yang diperlukan ini didapatkan dari *2009 World Ocean Atlas Database* (2009WOA) dan *Google Earth*.

World Ocean Atlas Database merupakan sebuah database yang berisikan data karakteristik perairan yang dimuat dalam bentuk file matlab (MAT file). Data-data ini merupakan data rata-rata tahunan yang diperpanjang nilainya sampai dengan kedalaman 5500 m dan diperluas ke seluruh titik di dunia dengan menggunakan interpolasi.

Untuk mendapatkan data karakteristik perairan pada lokasi tinjau perlu dilakukan pengolahan dengan program MATLAB, metode untuk memperoleh data karakteristik perairan dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar 2 Metode untuk memperoleh data Karakteristik perairan

caridata.m adalah program matlab untuk memasukkan koordinat lokasi tinjau dan jumlah grid pembagi yang diinginkan, serta untuk menghasilkan plot data karakteristik terhadap kedalaman titik tinjau, program ini akan menghasilkan input awal untuk program **getlev.m** berupa koordinat titik tinjau dan jumlah pembagian grid. Selanjutnya **getlev.m** memerintahkan subprogram **dist.m** dan **getLevSSPs.m** untuk menghitung jarak antar titik koordinat dan mengekstrak data-data karakteristik perairan dari kumpulan variabel data MAT file (.MAT) pada koordinat tersebut. **dist.m** merupakan subprogram untuk menghitung jarak antara 2 titik koordinat berdasarkan *World Geodetic System 1984*, dan membagi jarak sama besar antara 2 titik koordinat tersebut menjadi sejumlah grid yang diinginkan. Selanjutnya **getLevSSPs.m** akan mengekstrak variabel data karakteristik perairan dari MAT file serta menginterpolasi data karakteristik perairan yang diinginkan dari **lev_ann.mat**, **levS_ann.mat**, dan **levT_ann.mat** yang merupakan kumpulan variabel data yang berisikan data karakteristik perairan dari 2009WOA.

Program ini diunduh dari <http://staff.washington.edu/dushaw/>. Kemudian setiap titik koordinat tersebut akan menghasilkan satu buah profil temperatur, salinitas dan kecepatan suara yang akan digunakan dalam pemodelan.

Lokasi tinjau pada paper ini berada di perairan Indonesia, yaitu Selat Karimata, Laut Maluku, dan Laut Banda. Selat Karimata ditinjau pada sebuah garis lurus dengan koordinat diantara $0,104^{\circ}\text{LS}$, $106,265^{\circ}\text{BT}$ dan $2,099^{\circ}\text{LS}$, $108,331^{\circ}\text{BT}$ dengan jarak sepanjang 318,69 km. Laut Maluku ditinjau pada sebuah garis lurus dengan koordinat diantara $2,064^{\circ}\text{LU}$, $126,146^{\circ}\text{BT}$ dan $0,894^{\circ}\text{LS}$, $124,785^{\circ}\text{BT}$ dengan jarak sepanjang 360,93 km. dan Laut Banda ditinjau pada sebuah garis lurus dengan koordinat diantara $4,507^{\circ}\text{LS}$, $125,266^{\circ}\text{BT}$ dan $6,329^{\circ}\text{LS}$, $131,809^{\circ}\text{BT}$ dengan jarak sepanjang 752.44 km. Pada tiap lokasi perairan tinjau akan dibagi menjadi 10 titik stasiun tinjauan untuk mendapatkan rata-rata data karakteristik perairan pada tiap lokasi tinjau. Letak lokasi perairan tinjau dan titik-titik stasiun tinjau dapat dilihat pada **Gambar 3** dan untuk keterangan data lokasi setiap stasiun dapat dilihat pada **Tabel 1**.



(1)



(2)



(3)

Gambar 3 Lokasi perairan tinjau dan titik-titik stasiun tinjauan, Selat Karimata (gambar (1)), Laut Maluku (gambar (2)), Laut Banda (gambar (3))

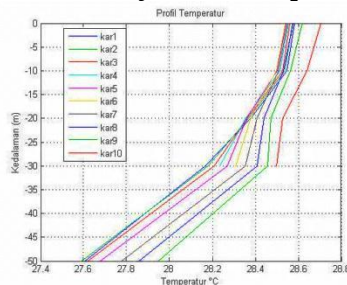
Tabel 1 Keterangan Data Lokasi Tiap Stasiun Tinjau

nama stasiun	garis bujur ($^{\circ}$ BT)	garis lintang ($^{\circ}$ LU)	kedalaman (m)	jarak (m)
kar1	106.265	-0.104	-46	0.00
kar2	106.494	-0.118	-40	35410.04
kar3	106.723	-0.34	-32	70820.08
kar4	106.952	-0.562	-29	106230.13
kar5	107.181	-0.784	-35	141640.17
kar6	107.41	-1.006	-30	177050.21
kar7	107.639	-1.228	-32	212460.25
kar8	107.868	-1.45	-42	247870.29
kar9	108.097	-1.672	-41	283280.33
kar10	108.331	-2.099	-30	318690.38

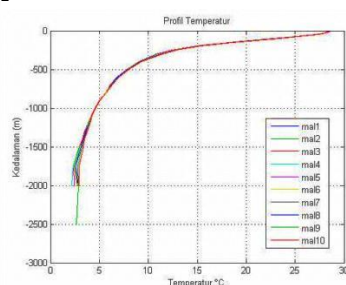
nama stasiun	garis bujur ($^{\circ}$ BT)	garis lintang ($^{\circ}$ LU)	kedalaman (m)	jarak (m)
mal1	126.146	2.064	-1576	0.00
mal2	125.995	1.735	-1938	40103.81
mal3	125.844	1.407	-1517	80207.63
mal4	125.692	1.078	-1948	120311.44
mal5	125.541	0.749	-2310	160415.25
mal6	125.390	0.421	-2382	200519.06
mal7	125.239	0.092	-2388	240622.88
mal8	125.087	-0.237	-2457	280726.69
mal9	124.936	-0.565	-2516	320830.50
mal10	124.785	-0.894	-2155	360934.31

nama stasiun	garis bujur ($^{\circ}$ BT)	garis lintang ($^{\circ}$ LU)	kedalaman (m)	jarak (m)
ban1	125.266	-4.507	-4546	0.00
ban2	125.993	-4.709	-4039	83603.89
ban3	126.720	-4.912	-2650	167207.78
ban4	127.447	-5.114	-4148	250811.67
ban5	128.174	-5.317	-3722	334415.56
ban6	128.901	-5.519	-4451	418019.45
ban7	129.628	-5.722	-4973	501623.34
ban8	130.355	-5.924	-5529	585227.23
ban9	131.082	-6.127	-4341	668831.12
ban10	131.809	-6.329	-89	752435.00

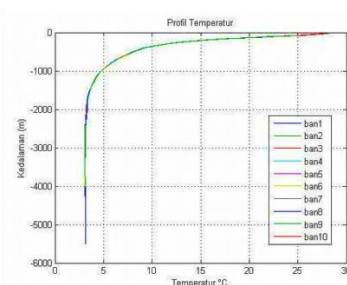
Selanjutnya data-data karakteristik perairan yang telah didapatkan dari 2009WOA untuk tiap titik stasiun tinjauan ditampilkan pada **Gambar 4**, **Gambar 5**, dan **Gambar 6**.



(1)

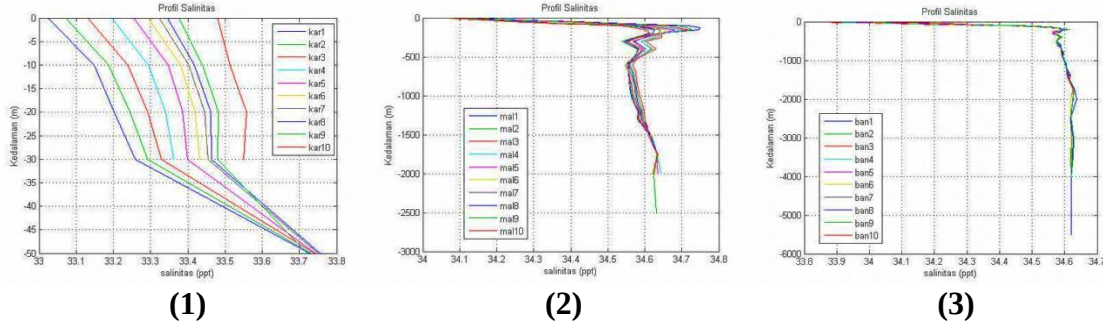


(2)

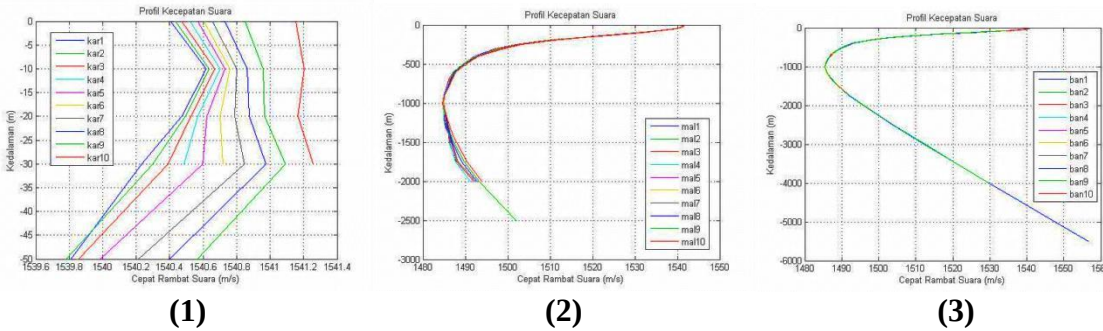


(3)

Gambar 4 Profil data temperatur terhadap kedalaman tiap titik-titik stasiun tinjauan, Selat Karimata (gambar (1)), Laut Maluku (gambar (2)), Laut Banda (gambar (3))



Gambar 5 Profil data salinitas terhadap kedalaman tiap titik-titik stasiun tinjauan, Selat Karimata (gambar (1)), Laut Maluku (gambar (2)), Laut Banda (gambar (3))



Gambar 6 Profil data cepat rambat suara terhadap kedalaman tiap titik-titik stasiun tinjauan, Selat Karimata (gambar (1)), Laut Maluku (gambar (2)), Laut Banda (gambar (3))

Setelah data karakteristik perairan tiap stasiun didapatkan, data tersebut harus diolah untuk menentukan persamaan empiris cepat rambat suara yang cocok untuk tiap lokasi tinjauan, dalam paper ini akan digunakan data karakteristik rata-rata dari 10 stasiun tiap lokasi tinjauan.

Terdapat tiga persamaan empiris untuk mencari nilai Cepat rambat suara yang besarnya hanya dipengaruhi oleh temperatur (T), salinitas (S), dan kedalaman (z). Dimana tidak ada faktor lain yang mempengaruhinya.

Persamaan empiris kecepatan suara yang akan digunakan dalam pemodelan pemetaan lokasi *shadow zone* pada lokasi tinjauan adalah persamaan empiris Leroy (Leroy, C.C. *Development of simple equations for accurate and more realistic calculation of the speed of sound in seawater*, Journal of the Acoustical Society of America **46**, 216-26, 1969), Medwin (Medwin, H. *Speed of sound in water: a simple equation for realistic parameter*. Journal of the Acoustical Society of America **58**, 1318-19, 1975) dan Mackenzie (Mackenzie, Kenneth V. *Discussion of sea-water sound-speed determinations*. Journal of the Acoustical Society of America **70** (3): 801–806, 1981). Berikut ini merupakan bentuk persamaan empiris ketiga persamaan tersebut.

Persamaan Empiris Leroy

$$c(T, S, z) = 1492.9 + 3 \times (T(z) - 10) - 6 \times 10^{-3} \times (T(z) - 10)^2 - 4 \times 10^{-2} \times (T(z) - 18)^2 + 1.2 \times (S(z) - 35) - 10^{-2} \times (T(z) - 18) \times (S(z) - 35) + z/61 \quad (1)$$

Persamaan Empiris Medwin

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

Persamaan Empiris Mackenzie

$$c(T, S, z) = 1448.96 + 4.591 \times T(z) - 5.304 \times 10^{-2} \times T(z)^2 + 2.374 \times 10^{-4} \times T(z)^3 + 1.34 \times (S(z) - 35) + 1.630 \times 10^{-2} \times z + 1.675 \times 10^{-7} \times z^2 - 1.025 \times 10^{-2} \times T(z) \times (S(z) - 35) - 7.139 \times 10^{-13} \times T(z) \times z^3 \quad (3)$$

dimana:

$c(T, S, z)$ = cepat rambat suara sebagai fungsi dari T , S , dan z (m/s)

$T(z)$ = temperatur sebagai fungsi kedalaman ($^{\circ}\text{C}$)

$S(z)$ = salinitas sebagai fungsi kedalaman (ppt)

z = kedalaman perairan (m)

Untuk menyelesaikan persamaan-persamaan tersebut dibutuhkan persamaan salinitas $S(z)$, dan Temperatur $T(z)$ sebagai fungsi terhadap kedalaman. Hal ini dicapai dengan melakukan *polynomial curve fitting* terhadap masing-masing data T dan S . data T dan S ini dihubungkan menjadi sebuah kurva persamaan $T(z)$ dan $S(z)$ berupa fungsi polinomial derajat $N-1$ sebagai berikut,

$$\begin{aligned} T(z) &= a_1 z^{N-1} + a_2 z^{N-2} + \dots + a_{N-1} z + a_N \\ S(z) &= b_1 z^{N-1} + b_2 z^{N-2} + \dots + b_{N-1} z + b_N \end{aligned} \quad (4)$$

dimana,

$a_1, a_2, \dots, a_{N-1}, a_N$ = koefisien polinomial $T(z)$

$b_1, b_2, \dots, b_{N-1}, b_N$ = koefisien persamaan $S(z)$

N = jumlah data

Dalam perhitungannya, untuk mendapatkan kurva yang mendekati nilai data sebenarnya, persentase *error* yang dihasilkan tiap orde polinomial dari selisih antara hasil pendekatan kurva dan data harus didapatkan nilai *error* terkecil.

$$\begin{aligned} \epsilon_T &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{T_i - T(z)_i}{T_i} \right| \times 100\% \\ \epsilon_S &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{S_i - S(z)_i}{S_i} \right| \times 100\% \end{aligned} \quad (5)$$

dimana,

ϵ_T = persentase error temperatur (%)

ϵ_S = persentase error salinitas (%)

T_i = data temperatur dari 2009WOA ($^{\circ}\text{C}$)

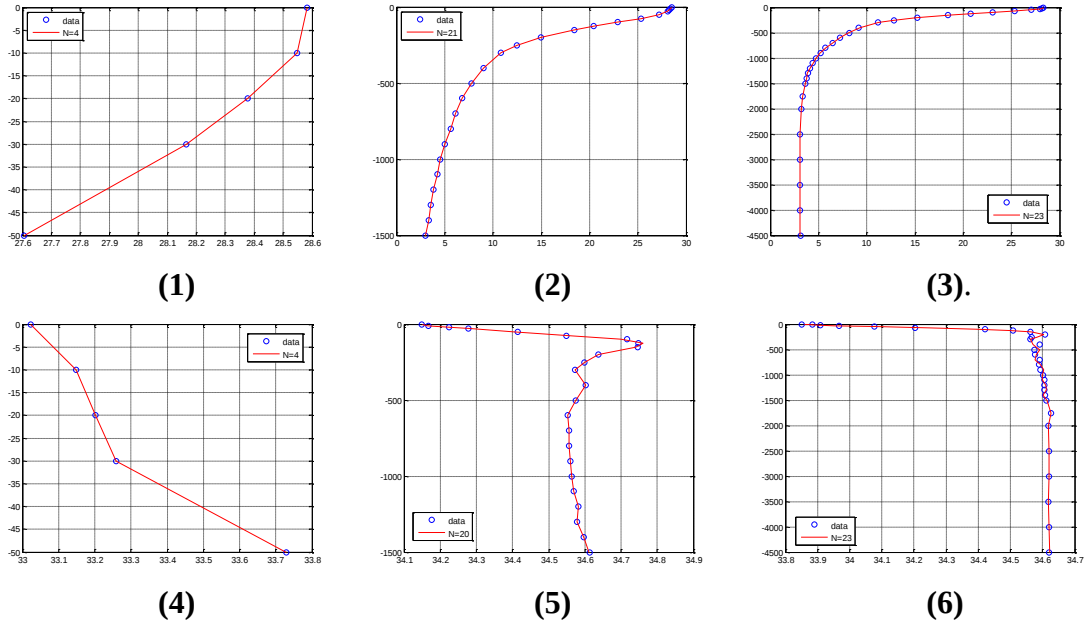
$T(z)_i$ = data temperatur hasil pendekatan polinomial ($^{\circ}\text{C}$)

S_i = data salinitas dari 2009WOA (ppt)

$S(z)_i$ = data salinitas hasil pendekatan polinomial (ppt)

N = jumlah data

Untuk data temperatur dalam paper ini digunakan persamaan polinomial orde 4 untuk lokasi tinjau Selat Karimata, orde 21 untuk lokasi tinjau Laut Maluku, dan orde 23 untuk lokasi tinjau Laut Banda. Untuk data salinitas dalam paper ini digunakan persamaan polinomial orde 4 untuk lokasi tinjau Selat Karimata, orde 20 untuk lokasi tinjau Laut Maluku, dan orde 23 untuk lokasi tinjau Laut Banda. Hasil plot data temperatur dan salinitas hasil pendekatan polinomial untuk masing-masing lokasi tinjauan dapat dilihat pada **Gambar 7**



Gambar 7 Hasil plot data temperatur dan salinitas hasil pendekatan polinomial untuk masing-masing lokasi tinjauan, Selat Karimata (gambar (1) untuk temperatur dan gambar (4) untuk salinitas), Laut Maluku (gambar (2) untuk temperatur dan gambar (5) untuk salinitas), Laut Banda (gambar (3) untuk temperatur dan gambar (6) untuk salinitas)

Selanjutnya fungsi temperatur $T(z)$ dan salinitas $S(z)$ dimasukkan kedalam 3 persamaan empiris cepat rambat suara (1), (2), dan (3), Sehingga persamaan empiris cepat rambat suara dapat dituliskan sebagai berikut,

Persamaan empiris Medwin

$$c(z) = 1492.9 + 3 \times ((a_1 z^{N-1} + a_2 z^{N-2} + \dots + a_{N-1} z + a_N) - 10) - 6 \times 10^{-3} \times ((a_1 z^{N-1} + a_2 z^{N-2} + \dots + a_{N-1} z + a_N) - 10)^2 - 4 \times 10^{-2} \times ((a_1 z^{N-1} + a_2 z^{N-2} + \dots + a_{N-1} z + a_N) - 18)^2 + 1.2 \times ((b_1 z^{N-1} + b_2 z^{N-2} + \dots + b_{N-1} z + b_N) - 35) - 10^{-2} \times ((a_1 z^{N-1} + a_2 z^{N-2} + \dots + a_{N-1} z + a_N) - 18) \times ((b_1 z^{N-1} + b_2 z^{N-2} + \dots + b_{N-1} z + b_N) - 35) + z/61 \quad (6)$$

Persamaan empiris Leroy

$$c(z) = 1449.2 + 4.6 \times (a_1 z^{N-1} + a_2 z^{N-2} + \dots + a_{N-1} z + a_N) - 5.5 \times 10^{-2} \times (a_1 z^{N-1} + a_2 z^{N-2} + \dots + a_{N-1} z + a_N)^2 + 2.9 \times 10^{-4} \times (a_1 z^{N-1} + a_2 z^{N-2} + \dots + a_{N-1} z + a_N)^3 + (1.34 - 10^{-2} \times (a_1 z^{N-1} + a_2 z^{N-2} + \dots + a_{N-1} z + a_N)) \times ((b_1 z^{N-1} + b_2 z^{N-2} + \dots + b_{N-1} z + b_N) - 35) + 1.6z \times 10^{-2} \quad (7)$$

Persamaan empiris Mackenzie

$$c(z) = 1448.96 + 4.591 \times (a_1 z^{N-1} + a_2 z^{N-2} + \dots + a_{N-1} z + a_N) - 5.304 \times 10^{-2} \times (a_1 z^{N-1} + a_2 z^{N-2} + \dots + a_{N-1} z + a_N)^2 + 2.374 \times 10^{-4} \times (a_1 z^{N-1} + a_2 z^{N-2} + \dots + a_{N-1} z + a_N)^3 + 1.34 \times ((b_1 z^{N-1} + b_2 z^{N-2} + \dots + b_{N-1} z + b_N) - 35) + 1.630 \times 10^{-2} \times z + 1.675 \times 10^{-7} \times z^2 - 1.025 \times 10^{-2} \times (a_1 z^{N-1} + a_2 z^{N-2} + \dots + a_{N-1} z + a_N) \times ((b_1 z^{N-1} + b_2 z^{N-2} + \dots + b_{N-1} z + b_N) - 35) - 7.139 \times 10^{-13} \times (a_1 z^{N-1} + a_2 z^{N-2} + \dots + a_{N-1} z + a_N) \times z^3 \quad (8)$$

dimana,

$c(z)$ = fungsi cepat rambat suara terhadap kedalaman

z = kedalaman perairan tinjauan (m)

$a_1, a_2, a_3, \dots, a_{N-1}, a_N$ = koefisien polinomial $T(z)$

$b_1, b_2, b_3, \dots, b_{N-1}, b_N$ = koefisien polinomial $S(z)$

N = jumlah data

Setelah didapatkan persamaan empiris cepat rambat suara $c(z)$, kemudian $c(z)$ akan diplot terhadap kedalaman tiap lokasi, kemudian nilai c hasil dari ketiga persamaan empiris kecepatan suara dibandingkan dengan kecepatan suara dari 2009WOA. Selanjutnya akan dipilih satu persamaan empiris yang menghasilkan *error* terkecil untuk tiap lokasi.

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{c_{2009WOAi} - c_{\text{empiris}}}{c_{2009WOAi}} \right| \times 100\% \quad (9)$$

dimana,

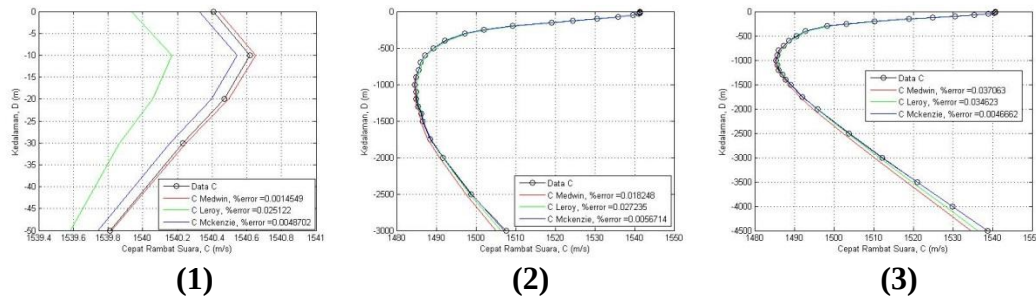
E = persentase error (%)

$c_{2009WOA}$ = data cepat rambat suara dari 2009WOA

c_{empiris} = data cepat rambat suara hasil persamaan empiris

N = jumlah data

Hasil plot perbandingan kecepatan suara dari *World Ocean Atlas* dan ketiga persamaan empiris pada lokasi tinjau dapat dilihat pada **Gambar 8**.



Gambar 8 grafik perbandingan hasil kecepatan suara dari *World Ocean Atlas* dan ketiga persamaan empiris pada lokasi tinjau, Selat Karimata (gambar (1)), Laut Maluku (gambar (2)), Laut Banda (gambar (3))

Persamaan empiris Medwin memiliki error terkecil pada lokasi tinjauan Selat Karimata yaitu menghasilkan *error* sebesar 0.0015%, sedangkan Persamaan empiris McKenzie memiliki error terkecil pada lokasi tinjauan Laut Maluku dengan persentase *error* sebesar 0.006% dan pada lokasi tinjauan Laut Banda dengan persentase *error* sebesar 0.004%. Maka persamaan ini dipilih untuk digunakan dalam pemodelan pemetaan lokasi *shadow zone*.

Setelah didapatkan persamaan empiris cepat rambat suara untuk tiap lokasi tinjauan, fungsi $c(z)$ ini akan digunakan dalam pemodelan propagasi akustik bawah air menggunakan program MATLAB. Dalam pemodelan ini, akan digunakan Transducer TC3021 dan TC2003 sebagai source. Pada **Gambar 9** dan **Tabel 2** dapat dilihat mengenai bentuk dari Transducer TC3021, dan TC2003 serta spesifikasinya.



(1)

(2)

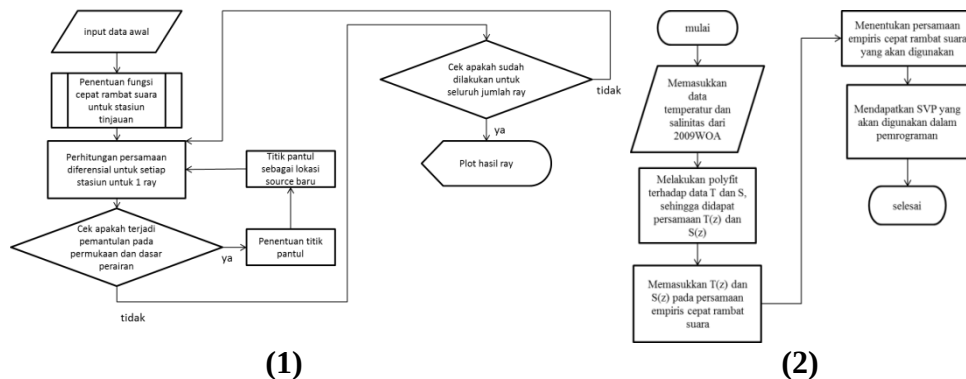
Gambar 9 Transducer TC3021 (gambar (1)), TC2003 (gambar (2))

Sumber: <http://www.teledyne-reson.com>

Tabel 2 Spesifikasi Transducer TC3021, dan TC2003

Technical Specification TC 2003		Technical Specification TC 3021	
Resonant Frequency	200 kHz $\pm$ 10kHz	Resonant Frequency	2MHz
Directivity Pattern	2.6°	Directivity Pattern	2.2°
Operating Depth	30 m	Operating Depth	700 m
Survival Depth	50 m	Survival Depth	1000 m
Operating Temperature Range	-2°C to +35°C	Operating Temperature Range	+2°C to +35°C

Dalam memodelkan propagasi akustik bawah air digunakan program MATLAB dengan alur pengerjaan seperti pada **Gambar 10**.



(1)

(2)

Gambar 10 alur kerja program (1) dan subprogram (2) pemodelan lokasi *shadow zone*

Pada program pemodelan ini, input data yang dibutuhkan berupa panjang lintasan *ray*, jumlah *ray* yang akan dimodelkan, sudut awal *ray*, kedalaman *source* dan persamaan kedalaman perairan $z(x)$, selanjutnya dibutuhkan persamaan cepat rambat suara untuk tiap lokasi tinjauan, persamaan ini didapatkan dari subprogram di luar program utama, subprogram ini akan melakukan pengolahan data T dan S yaitu *polyfit* terhadap data T dan S sehingga didapatkan persamaan $T(z)$ dan $S(z)$, selanjutnya subprogram ini juga akan menentukan persamaan empiris cepat rambat suara yang menghasilkan *error* terkecil untuk lokasi tinjau, hasil dari subprogram ini berupa $c(z)$ yang akan digunakan dalam pemodelan. Dalam pemodelan ini, perhitungan *ray tracing* menggunakan metode Runge-Kutta orde 4 dan 5, dimana dalam perhitungannya juga diperhitungkan adanya pemantulan pada dasar perairan dan permukaan air. Program ini melakukan perhitungan untuk 1 buah *ray* tiap program ini berjalan, sehingga jika *ray* telah mencapai akhir lintasan, program ini akan mengulang perhitungan untuk *ray* lainnya sebanyak jumlah *ray* yang akan dimodelkan. Program ini berakhir jika seluruh *ray* telah mencapai akhir lintasan, dan kemudian program ini akan menghasilkan plot hasil *ray tracing*.

Berdasarkan **Jensen** (Jensen, Finn B, *Computational Ocean Acoustics*, American Institute of Physics, 1994.) Dalam perhitungannya, *ray tracing* sebagai suatu persamaan diferensial yang didapatkan dari persamaan awal *wave equation* hingga didapatkan suatu persamaan euler-lagrangian seperti dijelaskan berikut.

Wave equation dituliskan sebagai berikut,

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) p(X, t) = 0 \quad (10)$$

Dimana,

$p(X, t)$ = Tekanan sebagai fungsi dari spasial $X=f(r, z)$ dan waktu

c = Cepat rambat suara (m/s)

t = waktu (s)

z = kedalaman (m)

untuk menyelesaikannya, dilakukan metode *variable separation* untuk menghilangkan variabel t pada $p(X, t)$ dengan asumsi gelombang harmonik,

$$\begin{aligned} p(X, t) &= p(X) \cdot p(t) \\ p(X, t) &= p(X) \cdot e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (11)$$

sehingga dihasilkan suatu persamaan baru dengan 1 variabel saja yang disebut dengan *Helmholtz Equation*

$$\nabla^2 p(X) + \frac{\omega^2}{c^2} p(X) = 0 \quad (12)$$

Dimana ω adalah frekuensi sudut dari *source* yang berada pada X_s .

Solusi dari *Helmholtz Equation* dalam koordinat kartesian $X=(r, z)$ serta penurunannya sebagai berikut,

$$p(X) = e^{i\omega\tau(X)} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A_j(X)}{(i\omega)^j} \quad (13)$$

persamaan ini disebut dengan *ray series* dengan $\tau(X)$ merupakan fungsi waktu, kemudian dengan menurunkan *ray series* diatas maka akan didapatkan

$$p_X = e^{i\omega\tau} \left[i\omega\tau_X \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A_j}{(i\omega)^j} + \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A_{jX}}{(i\omega)^j} \right] \quad (14)$$

$$p_{XX} = e^{i\omega\tau} \left\{ \left[-\omega^2 |\tau_X|^2 + i\omega\tau_{XX} \right] \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A_j}{(i\omega)^j} + 2i\omega\tau_X \cdot \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A_{jX}}{(i\omega)^j} + \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A_{jXX}}{(i\omega)^j} \right\} \quad (15)$$

Persamaan (16) dapat dituliskan,

$$\nabla^2 p = e^{i\omega\tau} \left\{ \left[-\omega^2 |\nabla\tau|^2 + i\omega\tau_{XX} \right] \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A_j}{(i\omega)^j} + 2i\omega\nabla\tau \cdot \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\nabla A_j}{(i\omega)^j} + \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\nabla^2 A_j}{(i\omega)^j} \right\} \quad (16)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (16) kedalam persamaan (12) dan dengan pemisahan komponen ω^2 akan didapatkan *eikonal equation*,

$$|\nabla\tau|^2 = \frac{1}{c^2} \quad (17)$$

yang diselesaikan dengan menggunakan *characteristic method*.

ray trajectory $X(s)$ dapat didefinisikan sebagai berikut

$$\frac{dX(s)}{ds} = c \nabla \tau \quad (18)$$

Berikutnya dapat dituliskan persamaan (18) dalam komponen r saja dan diturunkan terhadap s

$$\begin{aligned} \text{menggunakan chain rules } \frac{d}{ds} &= \frac{d}{dr} \frac{dr}{ds} + \frac{d}{dz} \frac{dz}{ds} \\ \frac{1}{c} \frac{dr(s)}{ds} &= \frac{\partial \tau}{\partial r} \\ \frac{d}{ds} \left(\frac{1}{c} \frac{dr}{ds} \right) &= \frac{d}{ds} \left(\frac{\partial \tau}{\partial r} \right) \\ \frac{d}{ds} \left(\frac{1}{c} \frac{dr}{ds} \right) &= \frac{\partial^2 \tau}{\partial r^2} \frac{dr}{ds} + \frac{\partial^2 \tau}{\partial r \partial z} \frac{dz}{ds} \end{aligned} \quad (19)$$

Berdasarkan persamaan (18), Maka persamaan (19) dapat dituliskan sebagai berikut,

$$\begin{aligned} \frac{d}{ds} \left(\frac{1}{c} \frac{dr}{ds} \right) &= \left(\frac{\partial^2 \tau}{\partial r^2} c \frac{\partial \tau}{\partial r} + \frac{\partial^2 \tau}{\partial r \partial z} c \frac{\partial \tau}{\partial z} \right) \\ \frac{d}{ds} \left(\frac{1}{c} \frac{dr}{ds} \right) &= c \left(\frac{\partial^2 \tau}{\partial r^2} \frac{\partial \tau}{\partial r} + \frac{\partial^2 \tau}{\partial r \partial z} \frac{\partial \tau}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

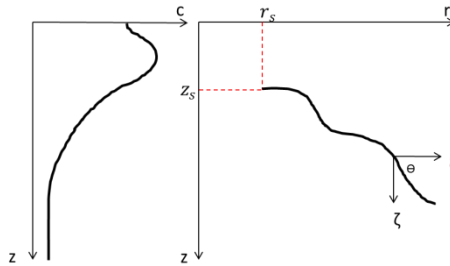
Dengan mengeluarkan komponen $\frac{\partial}{\partial r}$ dan dengan menggunakan *eikonal equation* pada persamaan (17) maka persamaan (20) menjadi,

$$\frac{d}{ds} \left(\frac{1}{c} \frac{dr}{ds} \right) = - \frac{1}{c^2} \frac{\partial c}{\partial r} \quad (21)$$

Persamaan (21) diterapkan pada koordinat kartesian $X=(r,z)$, maka persamaan (21) dapat dituliskan sebagai persamaan Euler-Lagrangian sebagai berikut,

$$\frac{d}{ds} \left(\frac{1}{c} \frac{dX}{ds} \right) = - \frac{\nabla C}{c^2} \quad (22)$$

Dalam pemodelan ini, *ray tracing* dilakukan secara 2 dimensi dalam komponen panjang lintasan *ray* r dan kedalaman z , seperti pada **Gambar 11**



Gambar 11 penggambaran *ray tracing*

dimana,

$$X(s) = r(s)\hat{r} + z(s)\hat{z}$$

$$\frac{dX(s)}{ds} = \frac{dr(s)}{ds} \hat{r} + \frac{dz(s)}{ds} \hat{z}$$

$$\nabla C = \frac{\partial C}{\partial r} \hat{r} + \frac{\partial C}{\partial z} \hat{z}$$

r = jarak tinjau perairan (m)

z = kedalaman perairan tinjau (m)

s = panjang lintasan *ray* (m)

Sehingga persamaan (22) dapat dituliskan sebagai berikut

$$\frac{d}{ds} \left(\frac{1}{C} \frac{dr}{ds} \hat{r} + \frac{1}{C} \frac{dz}{ds} \hat{z} \right) + \frac{\partial C / \partial r}{C^2} \hat{r} + \frac{\partial C / \partial z}{C^2} \hat{z} = 0 \quad (23)$$

Dengan mengasumsikan $\xi = \frac{1}{C} \frac{dr}{ds}$ dan $\zeta = \frac{1}{C} \frac{dz}{ds}$, sehingga persamaan (23) dapat dituliskan sebagai berikut

$$\frac{d}{ds} \xi \hat{r} + \frac{d}{ds} \zeta \hat{z} = - \frac{\partial C / \partial r}{C^2} \hat{r} - \frac{\partial C / \partial z}{C^2} \hat{z} \quad (24)$$

Dengan memisahkan komponen r dan z pada persamaan (24) didapatkan persamaan diferensial sebagai berikut,

$$\xi' = \frac{d}{ds} (\xi) = - \frac{\partial C / \partial r}{C^2} \quad (25)$$

$$\zeta' = \frac{d}{ds} (\zeta) = - \frac{\partial C / \partial z}{C^2} \quad (26)$$

Langkah selanjutnya adalah mencari solusi persamaan diferensial menggunakan metode Runge-Kutta dari Initial Value Problem persamaan (25) yaitu

$$\xi' = f(\xi, \zeta); \quad \xi(\zeta_0) = \xi_0 \quad (27)$$

Metode ini bertujuan untuk mendapatkan pendekatan nilai ξ_{n+1} pada ζ_{n+1} , Dalam metode ini perhitungan nilai ξ_{n+1} dinyatakan sebagai berikut

$$\xi_{n+1} = \xi_n + \frac{h}{6} (f_1 + 2f_2 + 2f_3 + f_4) \quad (30)$$

Dimana

$$f_1 = f(\zeta_n, \xi_n)$$

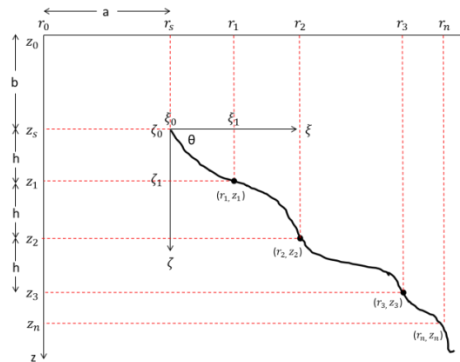
$$f_2 = f\left(\zeta_n + \frac{h}{2}, \xi_n + \frac{h}{2} f_1\right)$$

$$f_3 = f\left(\zeta_n + \frac{h}{2}, \xi_n + \frac{h}{2} f_2\right)$$

$$f_4 = f(\zeta_n + h, \xi_n + h f_3)$$

$$h = \zeta_{n+1} - \zeta_n$$

Setelah mendapatkan nilai ξ_{n+1} dan ζ_{n+1} , nilai r_{n+1} dan z_{n+1} didapatkan melalui ilustrasi berikut,



Gambar 12 ilustrasi penggambaran *ray tracing*

Pada ilustrasi diatas, h merupakan selisih antara ζ_{n+1} dan ζ_n , dan a dan b adalah jarak sumber suara dari r_0 dan z_0 , untuk mendapatkan nilai r_n dan z_n perhitungannya sebagai berikut

$$z_n = b + nh \quad (31)$$

$$r_n = a + (\xi_n - \xi_0) \quad (32)$$

dimana,

$$a = r_s - r_0$$

$$b = z_s - z_0$$

$$h = \zeta_{n+1} - \zeta_n$$

r_s = letak sumber (m)

z_s = kedalaman sumber (m)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam paper ini dimodelkan propagasi akustik untuk tiga lokasi tinjauan, untuk tiap lokasi tinjauan akan dimodelkan dengan 3 kedalaman *transducer* yang berbeda, untuk lebih jelasnya, skenario pemodelan yang akan dilakukan akan ditampilkan dalam **Tabel 3**.

Tabel 3 Skenario pemodelan yang akan dilakukan

perairan tinjau	jenis transducer	panjang lintasan (m)	kedalaman source (m)
Selat Karimata	TC2003	318.69	5
			20
Laut Maluku	TC2003	360.93	20
	TC3021		500
			1000
Laut Banda	TC2003	752.44	20
	TC3021		300
			1000

Dari hasil pemodelan pemetaan lokasi *shadow zone*, akan dilakukan analisa untuk menentukan lokasi kedalaman transducer yang paling efisien. Efisien yang dimaksud adalah dengan menggunakan kedalaman transducer tersebut akan mendapatkan *shadow zone* yang paling sedikit dibandingkan dengan area *detect zone* dibandingkan dengan kedalaman lain pada lokasi yang sama. Persentase area *detect zone* pada setiap perairan tinjau dapat dilihat pada **Tabel 4** sampai dengan **Tabel 6**

Tabel 4 Persentase area *Detect Zone* Selat Karimata

perairan tinjau	jenis transducer	panjang lintasan (m)	kedalaman source (m)	kedalaman tinjauan (m)	persentase area detect zone (%)	persentase area shadow zone (%)
Selat Karimata	TC2003	318.69	5	3	84.7	15.3
				25	73.8	26.2
			20	3	74.2	25.8
				25	76.4	23.6

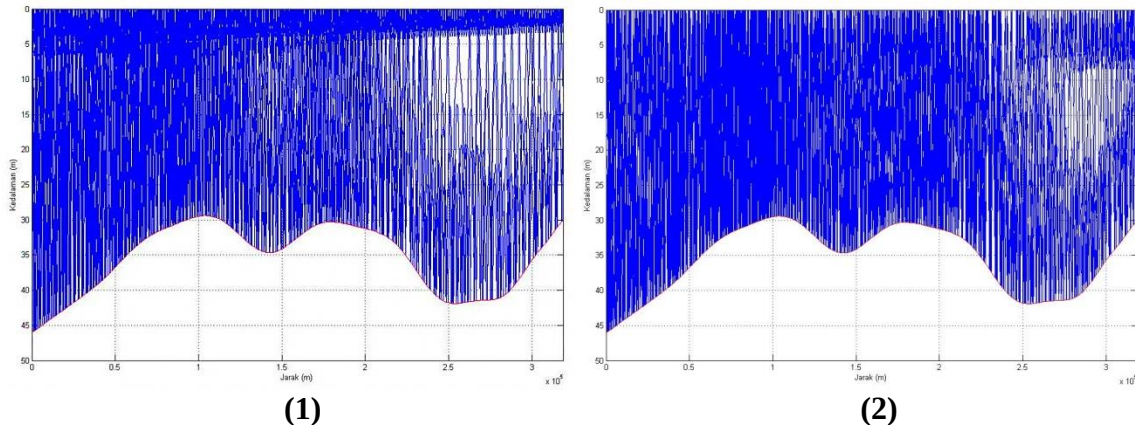
Tabel 5 Persentase area *Detect Zone* Laut Maluku

perairan tinjau	jenis transducer	panjang lintasan (m)	kedalaman source (m)	kedalaman tinjauan (m)	persentase area detect zone (%)	persentase area shadow zone (%)
Laut Maluku	TC2003	360.93	20	100	16.6	83.4
				500	38.8	61.2
				1000	52.6	47.4
			500	100	0	100
				500	8.3	91.7
				1000	37.4	62.6
	TC3021		1000	100	0	100
				500	0	100
				1000	19.3	80.7

Tabel 6 Persentase area *Detect Zone* Laut Banda

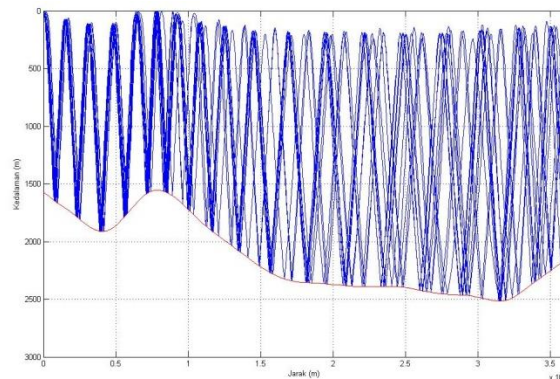
perairan tinjau	jenis transducer	panjang lintasan (m)	kedalaman source (m)	kedalaman tinjauan (m)	persentase area detect zone (%)	persentase area shadow zone (%)
Laut Banda	TC2003	752.44	20	100	45.2	54.8
				1000	47.8	52.2
				2500	53.2	46.8
			300	100	2.7	97.3
				1000	25.3	74.7
				2500	3.3	96.7
	TC3021		1000	100	1.9	98.1
				1500	0	100
				2500	0	100

Pada Selat Karimata, ditinjau untuk kedalaman transducer 5m dan 20m. Dari hasil **Tabel 4** dapat dilihat bahwa dengan menggunakan transducer pada kedalaman 5m ataupun 20m, menghasilkan luas *detect zone* lebih besar dari 70%, Sehingga pada Selat Karimata penempatan transducer ini dapat diletakkan pada kedalaman *well mixed*. Bentuk propagasi akustik pada Selat Karimata dengan kedalaman transducer 5m dan 20m dapat dilihat pada **Gambar 13**, daerah yang tidak terkena garis *ray* berwarna biru merupakan *shadow zone*.



Gambar 13 Bentuk Propagasi Akustik Selat Karimata dengan Kedalaman Source 5m (1) dan 20m (2)

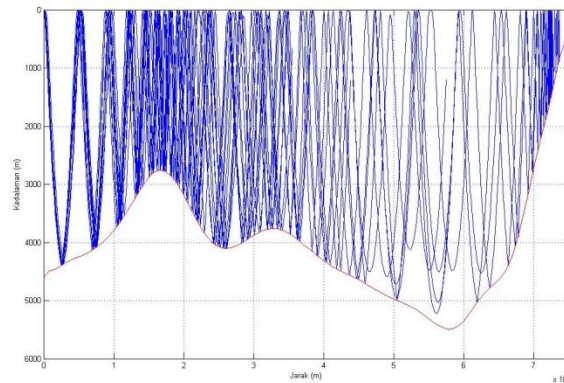
Pada Laut Maluku, ditinjau untuk kedalaman transducer 20m, 500m, dan 1000m. Dari hasil **Tabel 5** dapat dilihat bahwa dengan menggunakan transducer pada kedalaman 20m, akan menghasilkan nilai persentase area *detect zone* lebih besar dibandingkan dengan persentase area *detect zone* dengan penempatan pada kedalaman 500m maupun 1000m yaitu sekitar 52%. Sehingga pada Laut Maluku penempatan transducer paling efektif dapat diletakkan pada daerah *well-mixed* (0-30m). Bentuk propagasi akustik pada Laut Maluku dengan kedalaman transducer 20m dapat dilihat pada **Gambar 14**, daerah yang tidak terkena garis *ray* berwarna biru merupakan *shadow zone*.



Gambar 14 Bentuk Propagasi Akustik Laut Maluku dengan Kedalaman Source 20m

Pada Laut Banda, ditinjau untuk kedalaman transducer 20m, 300m dan 1000m. Dari hasil **Tabel 6** dapat dilihat bahwa dengan menggunakan transducer pada kedalaman 20m, akan menghasilkan nilai persentase area *detect zone* lebih besar dibandingkan dengan persentase area *detect zone* dengan penempatan pada kedalaman 300m maupun 1000m yaitu sekitar 53%. Sehingga pada Laut Banda penempatan transducer paling efektif dapat diletakkan pada daerah *well-mixed* (0-100m). Bentuk propagasi akustik pada Laut Banda dengan kedalaman transducer

20m dapat dilihat pada **Gambar 15**, daerah yang tidak terkena garis *ray* berwarna biru merupakan *shadow zone*.



Gambar 15 Bentuk Propagasi Akustik Laut Banda dengan Kedalaman Source 20m

SIMPULAN DAN SARAN

Dari hasil pemodelan, didapatkan simpulan berupa:

1. Pemodelan propagasi akustik bawah air dengan menggunakan metode ray tracing pada Selat Karimata menggunakan persamaan empiris Medwin sebagai persamaan profil kecepatan suara. Hal ini dikarenakan persamaan Medwin memiliki nilai error lebih kecil dibandingkan dengan persamaan empiris yang lain. Dari hasil pengujian, fungsi temperatur $T(z)$ dan salinitas $S(z)$ digunakan pendekatan dengan persamaan polinomial orde-4 untuk Selat Karimata
2. Pemodelan propagasi akustik bawah air dengan menggunakan metode ray tracing pada Laut Maluku dan Laut Banda menggunakan persamaan empiris MacKenzie sebagai persamaan profil kecepatan suara. Hal ini dikarenakan persamaan Mackenzie memiliki nilai error lebih kecil dibandingkan dengan persamaan empiris yang lain. Dari hasil pengujian, fungsi temperatur $T(z)$ menggunakan pendekatan dengan persamaan polinomial orde-21 untuk Laut Maluku, dan salinitas $S(z)$ menggunakan pendekatan dengan persamaan polinomial orde-20 untuk Laut Maluku. Sedangkan pada Laut Banda, $T(z)$ dan $S(z)$ menggunakan pendekatan persamaan polinomial orde-23.
3. Dari hasil pemodelan pemetaan lokasi *shadow zone*, dapat ditentukan letak kedalaman Transducer yang paling efektif untuk menghasilkan daerah lokasi *shadow zone* terkecil atau lokasi *detect zone* terbesar. Pada Selat Karimata, ditinjau untuk kedalaman transducer 5m dan 20m. Dari hasil **Tabel 4** dapat dilihat bahwa dengan menggunakan transducer pada kedalaman 5m ataupun 20m, menghasilkan luas *detect zone* lebih besar dari 70%, Sehingga pada Selat Karimata penempatan transducer ini dapat diletakkan pada kedalaman *well mixed*. Pada Laut Maluku, ditinjau untuk kedalaman transducer 20m, 500m, dan 1000m. Dari hasil **Tabel 5** dapat dilihat bahwa dengan menggunakan transducer pada kedalaman 20m, akan menghasilkan nilai persentase area *detect zone* terbesar dibandingkan dengan persentase area *detect zone* dengan penempatan pada kedalaman 500m maupun 1000m. Sehingga pada Laut Maluku penempatan transducer paling efektif dapat diletakkan pada daerah *well-mixed* (0-30m). Pada Laut Banda, ditinjau untuk kedalaman transducer 20m, 300m

dan 1000m. Dari hasil **Tabel 6** dapat dilihat bahwa dengan menggunakan transducer pada kedalaman 20m, akan menghasilkan nilai persentase area *detect zone* terbesar dibandingkan dengan persentase area *detect zone* dengan penempatan pada kedalaman 300m maupun 1000m. Sehingga pada Laut Banda penempatan transducer paling efektif dapat diletakkan pada daerah *well-mixed* (0-100m).

Saran untuk pengembangan berupa:

Pemodelan propagasi akustik bawah air dengan menggunakan metode *ray tracing* sebaiknya memperhitungkan kehilangan energi transmisi dan absorpsi akibat penalaran pada perairan, pembelokan, dan pemantulan pada dasar maupun permukaan perairan. Agar didapatkan model propagasi yang lebih mendekati keadaan nyata sehingga analisis dan hasil yang didapat berupa kedalaman penempatan *transducer* dapat lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Amalia, Ami, *Pemodelan Numerik Kehilangan Energi Transmisi di Permukaan Laut dengan Model Empiris pada Propagasi Akustik Bawah Air*, Teknik Kelautan ITB, 2006.
- Andrianto, Andreas. *Propagasi Akustik di Bawah Laut dengan Menggunakan Metode Ray Tracing*, Teknik Kelautan ITB, 2002.
- Friyadi, Danny., *Aplikasi Pengurangan Energi pada Propagasi Akustik Bawah Air pada Metode Ray Tracing di Perairan Indonesia*, Teknik Kelautan ITB, 2006.
- Friyadi, Danny., *Pemodelan Koefisien Pantul Pada Gelombang Suara Bawah Air Laut dengan Metode Matrik Cascade*, Magister Teknik Kelautan ITB, 2012.
- Hastuti, Y., *Analisis Refleksi dan Transmisi Gelombang Suara di Dasar Laut dengan Menggunakan Metode Matrik*, Teknik Kelautan ITB, 1998.
- Jensen, Finn B, *Computational ocean acoustics*, American Institute of Physics, 1994.
- Johari, Jona. *Aplikasi Model Propagasi Akustik Bawah Air di Perairan Selat Sunda*, Teknik Kelautan ITB, 2003.
- Leroy, C.C. *Development of simple equations for accurate and more realistic calculation of the speed of sound in seawater*, Journal of the Acoustical Society of America **46**, 216-26, 1969.
- Mackenzie, Kenneth V. *Discussion of sea-water sound-speed determinations*. Journal of the Acoustical Society of America **70** (3): 801–806, 1981.
- Medwin, H. *Speed of sound in water: a simple equation for realistic parameter*. Journal of the Acoustical Society of America **58**, 1318-19, 1975.
- Ondara, Koko. *Pemodelan Numerik Kehilangan Energi Transmisi Gelombang Suara pada Propagasi Akustik Bawah Air*, Magister Teknik Kelautan ITB, 2011.
- Permata, Wiwa. *Aplikasi Metode Ray Tracing dan Metode Normal Mode dalam Pemodelan Propagasi Akustik di Perairan Kepulauan Sangihe*, Teknik Kelautan ITB, 2004.
- Poengoet, James NGR. *Aplikasi Metode Parabolic Equation pada Propagasi Akustik Bawah Air*. Magister Teknik Kelautan ITB, 2008.
- Rendragraha, Aji N., *Pemodelan Pemetaan Lokasi Shadow zone dengan Metode Ray Tracing*, Teknik Kelautan ITB, 2010.
- Soegiri, Azis P., *Aplikasi Metode Ray Tracing Dan Atlas Samudera Dunia Pada Pemodelan Propagasi Akustik Bawah Air Di Perairan Indonesia*, Teknik Kelautan ITB, 2005.
- Sulianto, Dedy. *Aplikasi Metode Normal Mode pada Propagasi Akustik Bawah Air di Perairan Selat Sunda*, Teknik Kelautan ITB, 2005.

- Suprpto, Agus., *Pengembangan Metode Ray Tracing Tiga Dimensi Dengan Atlas Samudra Dunia Pada Pemodelan Tiga Dimensi Propagasi Akustik Bawah Air Di Perairan Indonesia*, Teknik Kelautan ITB, 2006.
- Urick, Robert J., *Principles Of Underwater Sound*, 3rd Edition, McGraw-Hill, Inc., New York, 1983.
- Wen, Tze., *Aplikasi Metode Normal-Mode pada Propagasi Akustik Bawah Air di Samudera Hindia*, Teknik Kelautan ITB, 2008.
- <http://staff.washington.edu/dushaw/>
- <http://www.teledyne-reson.com>