

PEMODELAN LOKASI *SHADOW ZONE* KAPAL SELAM DENGAN METODE RAY TRACING DI PERAIRAN SELATAN JAWA

MODELING OF SUBMARINE *SHADOW ZONE* LOCATION USING RAY TRACING METHOD IN THE SOUTHERN WATERS OF JAVA

Bayu Hendra Kusuma¹, Yulianto², Irsan Soemantri Brodjonegoro³

¹Program Studi S1 Hidrografi Sekolah Tinggi Teknologi Angkatan Laut (STTAL), Jakarta, Indonesia.

²Sekolah Tinggi Teknologi Angkatan Laut (STTAL), Jakarta, Indonesia.

³Institut Teknologi Bandung (ITB), Bandung, Indonesia.

e-mail : bayukusuma5858@gmail.com

Diterima tanggal: 06 Maret 2025 ; diterima setelah perbaikan: 10 April 2025 ; Disetujui tanggal: 28 Juli 2025

ABSTRAK

Pemodelan lokasi *shadow zone* kapal selam memiliki peran strategis dalam pertahanan maritim, khususnya dalam operasi penyamaran akustik. Penelitian ini menggunakan metode *ray tracing* untuk menentukan lokasi *shadow zone* di perairan selatan Jawa berdasarkan data suhu dan salinitas dari stasiun pengamatan di Samudera Hindia. Data tersebut dianalisis menggunakan perangkat lunak *Ocean Data View* (ODV) dan Matlab serta dikombinasikan dengan persamaan Leroy, Medwin, dan Mackenzie untuk menentukan profil kecepatan suara dalam laut. Pemodelan dilakukan dengan pendekatan polyfit polinomial pangkat 12, 13, dan 14 guna memperoleh kurva terbaik dalam distribusi kecepatan suara. Hasil simulasi menunjukkan bahwa *shadow zone* terbentuk pada kedalaman tertentu, tergantung pada posisi sumber suara (*transducer*). Jika *transducer* ditempatkan pada kedalaman 40 meter, *shadow zone* berada di kedalaman kurang dari 32 meter dengan jangkauan 16.100 meter. Pada kedalaman *transducer* 160 meter, *shadow zone* terbentuk di kedalaman kurang dari 113 meter dengan jangkauan 100.000 meter, sedangkan pada kedalaman *transducer* 400 meter, *shadow zone* terbentuk di kedalaman kurang dari 185 meter dengan jangkauan 100.000 meter. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai referensi dalam pengembangan strategi operasi kapal selam di perairan selatan Jawa.

Kata kunci: *Shadow zone*, Kapal selam, *Ray tracing*, Kecepatan suara, *Ocean Data View*, Matlab.

ABSTRACT

The modeling of submarine shadow zone locations plays a strategic role in maritime defense, particularly in acoustic stealth operations. This study employs the ray tracing method to determine shadow zone locations in the southern waters of Java, based on temperature and salinity data from observation stations in the Indian Ocean. The data were analyzed using Ocean Data View (ODV) and Matlab software, combined with Leroy, Medwin, and Mackenzie equations to determine underwater sound velocity profiles. The modeling was conducted using a polyfit polynomial approach of orders 12, 13, and 14 to obtain the best curve for sound velocity distribution. Simulation results indicate that shadow zones form at specific depths depending on the position of the sound source (transducer). When the transducer is placed at a depth of 40

meters, the shadow zone is found at depths less than 32 meters with a range of 16,100 meters. At a transducer depth of 160 meters, the shadow zone forms at depths less than 113 meters with a range of 100,000 meters, while at a transducer depth of 400 meters, the shadow zone forms at depths less than 185 meters with a range of 100,000 meters. The findings of this study can serve as a reference for developing submarine operational strategies in the southern waters of Java..

Keywords: Shadow zone, Submarine, Ray tracing, Sound velocity, Ocean Data View, Matlab.

PENDAHULUAN

Indonesia, sebagai negara kepulauan terbesar di dunia, memiliki wilayah perairan yang luas dan kompleks, Wilayah Negara kita berada di antara dua benua, yaitu Benua Asia dan Benua Australia, serta diantara dua samudra, yaitu Samudra Hindia dan Samudra Pasifik (Soemarmi & Diamantina, 2019). Posisi yang sangat strategis ini, menjadikan wilayah perairan Indonesia dilewati oleh jalur utama kapal-kapal laut dari banyak Negara di dunia (Hermawan & Sutanto, 2022). Keamanan maritim di perairan ini menjadi prioritas nasional, mengingat tingginya lalu lintas pelayaran internasional serta potensi ancaman seperti penyelundupan, perompakan, dan aktivitas ilegal lainnya (Sugianto *et al.*, 2021). Dalam menghadapi tantangan ini, kapal selam menjadi salah satu aset strategis pertahanan yang memiliki kemampuan untuk beroperasi secara rahasia dan memberikan efek deterens yang signifikan dan dapat menimbulkan efek penangkalan (*deterrence effect*) bagi negara-negara di sekitar yang ingin melancarkan agresi (Marsetio & Ritonga, 2018).

Kapal selam mengandalkan teknologi akustik bawah air untuk mendeteksi, bernavigasi, dan berkomunikasi dalam lingkungan bawah laut. Teknologi ini meliputi: sonar aktif dan pasif, sonar aktif mengirimkan sinyal suara dan menerima pantulan dari objek di sekitarnya, sedangkan sonar pasif mendengarkan kebisingan lingkungan untuk mendeteksi keberadaan kapal musuh tanpa

mengungkapkan posisi sendiri (Brodjonegoro, 2024b). Sistem navigasi akustik digunakan untuk menentukan posisi dan arah pergerakan kapal selam dengan memanfaatkan propagasi suara di dalam air. Komunikasi bawah air memungkinkan kapal selam berkomunikasi dengan unit lain tanpa harus muncul ke permukaan, meningkatkan aspek operasional yang rahasia dan aman (Suharyo *et al.*, 2018).

Ray tracing akustik bawah air merupakan metode yang digunakan untuk memahami propagasi gelombang suara di dalam lautan (Romauli, 2016). Metode ini sangat penting dalam berbagai aplikasi, seperti komunikasi bawah air, navigasi sonar, dan deteksi kapal selam. Salah satu fenomena penting dalam propagasi akustik bawah air adalah *shadow zone*, yaitu daerah di mana intensitas gelombang suara sangat rendah atau bahkan tidak terdeteksi akibat pembelokan gelombang suara oleh gradien kecepatan suara dalam air (Keninggan *et al.*, 2023). Menurut teori propagasi suara dalam medium berlapis, kecepatan suara dalam air dapat dihitung menggunakan persamaan empiris seperti: $c(z)=c_0+aT+bS+dP$. Gelombang suara akan mengalami pembelokan (*refraction*) saat melewati medium dengan perubahan kecepatan suara. Prinsip dasar yang digunakan adalah Hukum Snell, yang dinyatakan sebagai: $\sin\theta_1/c_1=\sin\theta_2/c_2$. Dengan prinsip ini, gelombang suara yang merambat di lautan tidak selalu bergerak dalam garis lurus tetapi melengkung akibat variasi kecepatan suara dengan kedalaman (Urlick, 1983).

Operasi kapal selam di perairan selatan Jawa menghadapi tantangan tersendiri akibat fenomena *shadow zone*, yaitu area di mana gelombang suara mengalami anomali propagasi, sehingga sonar kesulitan dalam mendeteksi objek di dalamnya (Brodjonegoro, 2024a); Andrianto, 2002; Brodjonegoro, 2024b). *Shadow zone* terbentuk akibat variasi kecepatan suara dalam air yang dipengaruhi oleh parameter oseanografi seperti suhu, salinitas, dan tekanan. Identifikasi lokasi *shadow zone* sangat penting untuk meningkatkan efektivitas operasional kapal selam serta strategi pertahanan bawah laut (Suharyo *et al.*, 2018).

Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan lokasi *shadow zone* di perairan selatan Jawa menggunakan metode *ray tracing*, berdasarkan data suhu dan salinitas dari satu titik pengamatan di Samudera Hindia. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan dalam pengembangan taktik operasional kapal selam, optimasi sistem sonar, serta peningkatan efektivitas deteksi bawah laut di wilayah perairan strategis Indonesia.

BAHAN DAN METODE

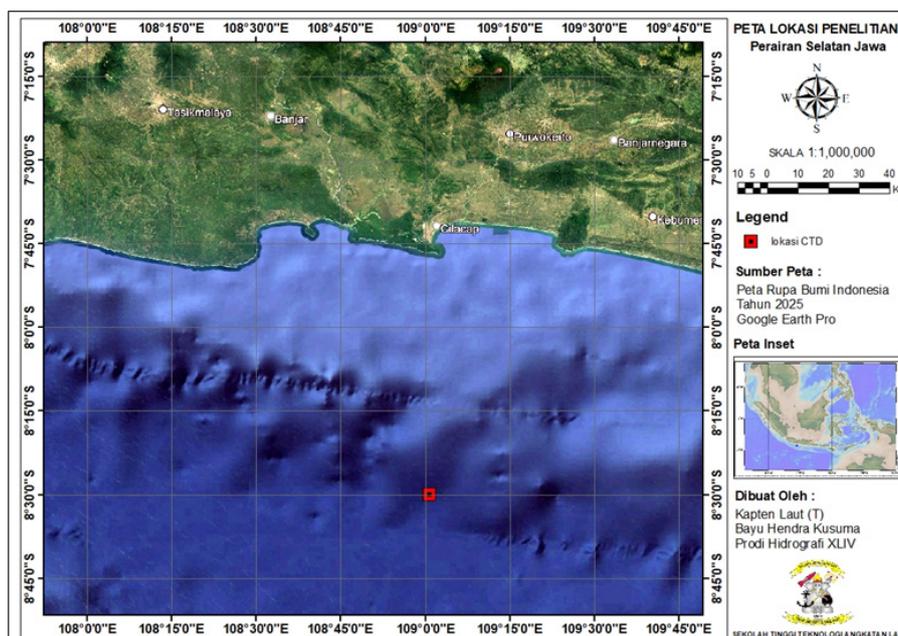
Data Lapangan

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data survey lapangan menggunakan alat CTD (*Conductivity, Temperature, Depth*) suhu dan salinitas di satu titik pada perairan selatan Jawa pada tanggal 28 Agustus 2005 dengan titik stasiun 1 pada posisi 109.014 BT - 8.5 LS dengan kedalaman 3330.79 meter. Data tersebut selanjutnya di plotting dengan menggunakan *software Ocean Data View (ODV)* mp -version 5.3.0 – 64 bit (Windows) – 2020 Reiner Schlitzer. Hasil plotting disajikan pada Gambar 1.

Diasumsikan untuk kedalaman laut yang paling dalam yang dapat diselami oleh kapal selam adalah 1000 meter. Oleh karena itu daerah yang memungkinkan terjadinya *shadow zone* di analisa antara kedalaman 30 – 1000 meter. Tahapan pengolahan data yang dilaksanadisajikan pada Gambar 2.

Ocean Data View (ODV)

Ocean Data View (ODV) perangkat lunak yang dikembangkan oleh Reiner Schlitzer Jerman yang digunakan dalam pengolahan maupun visualisasi data oseanografi, profil



Gambar 1. Posisi stasiun penelitian.
Figure 1. Research Station Position.

atmosfer dan lainnya geo-referensi atau data *time-series*. Raw data dari CTD yang didapat diolah dahulu dalam Microsoft Excel untuk mengatur agar data tersebut dapat dibaca pada *software* ODV, kemudian diubah dalam bentuk .txt agar dapat dibaca oleh ODV untuk melihat profil suhu, salinitas dan kecepatan suara terhadap kedalaman pada setiap stasiun pengamatan.

Permodelan kecepatan suara dengan Matlab

Untuk data kecepatan suara, kemudian akan memodelkannya dengan menggunakan tiga persamaan yaitu persamaan Leroy, persamaan Medwin, dan persamaan Mackenzie. Berikut ini merupakan bentuk persamaan empiris ketiga persamaan tersebut.

Persamaan Empiris Leroy

$$c = 1492,9 + 3(T - 10) - 6 \cdot 10^{-3} \cdot (T - 10)^2 - 4 \times 10^{-2} \times (T - 18)^2 + 1,2 \times (S - 35) - 10^{-2}(T - 18) \times (S - 35) + z/61.$$

Persamaan Empiris Medwin

$$c = 1449,2 + 4,6T - 5,5 \times 10^{-2}T^2 + 2,9 \times 10^{-4}T^3 + (1,34 - 10^{-2}T) \times (S - 35) + 1,6 \times 10^{-2}D$$

Persamaan Empiris Mackenzie

$$c = 1448,96 + 4,591 \times T - 5,304 \times 10^{-2} \times T^2 + 2,374 \times 10^{-4} \times T^3 + 1,340 \times (S - 35) + 1,630 \times 10^{-2}D + 1,67 \times 10^{-7}D^2 - 1,025 \times 10^{-7}T \times (S - 35) - 7,139 \times 10^{-13} \times T \times z^3.$$

dimana,

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

T(z) = temperatur sebagai fungsi kedalaman (°C)

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

z = kedalaman perairan (m)

Selanjutnya akan menggunakan *software* Matlab dengan menggunakan skrip *empiris equation* untuk permodelan ini. Tujuan dari permodelan ini adalah untuk

melihat persamaan mana yang memberikan nilai RMSE (*Root Mean Square Error*) terkecil dengan data lapangan. Selanjutnya akan menggunakan *software* Matlab dengan menggunakan skrip empiris equation untuk permodelan ini.

Polinomial fitting

Setelah memilih persamaan dengan RMSE terkecil, Selanjutnya akan menggunakan Matlab untuk melakukan polinomial fitting. Selanjutnya berdasarkan hasil Run skrip SVP (*Sound Velocity Profile*), persamaan yang mempunyai nilai RMSE yang kecil kemudian didekatkan menggunakan *polyfit polynomial* pangkat 12, 13, dan 14. Dari *polyfit* tersebut akan didapatkan kembali polynomial mana yang RMSE nya terkecil (Leroy, 1969; Medwin, 1975)(Leroy, 1969; Mackenzie, 1981; Medwin, 1975). 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.

$$T(z) = a_1 z^{N-1} + a_2 z^{N-2} + \dots + a_{N-1} z + a_N$$

$$S(z) = b_1 z^{N-1} + b_2 z^{N-2} + \dots + b_{N-1} z + b_N$$

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.

$$\epsilon_T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{T_1 - T(z)_1}{T_1} \right| \times 100\%$$

$$\epsilon_S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{S_1 - S(z)_1}{S_1} \right| \times 100\%$$

dimana,

$\mathcal{E}T$ = persentase *error temperatur* (%)

$\mathcal{E}S$ = persentase *error salinitas* (%)

T_i = data temperatur ($^{\circ}C$)

$T(z)_1$ = data *temperatur* hasil pendekatan polinomial ($^{\circ}C$)

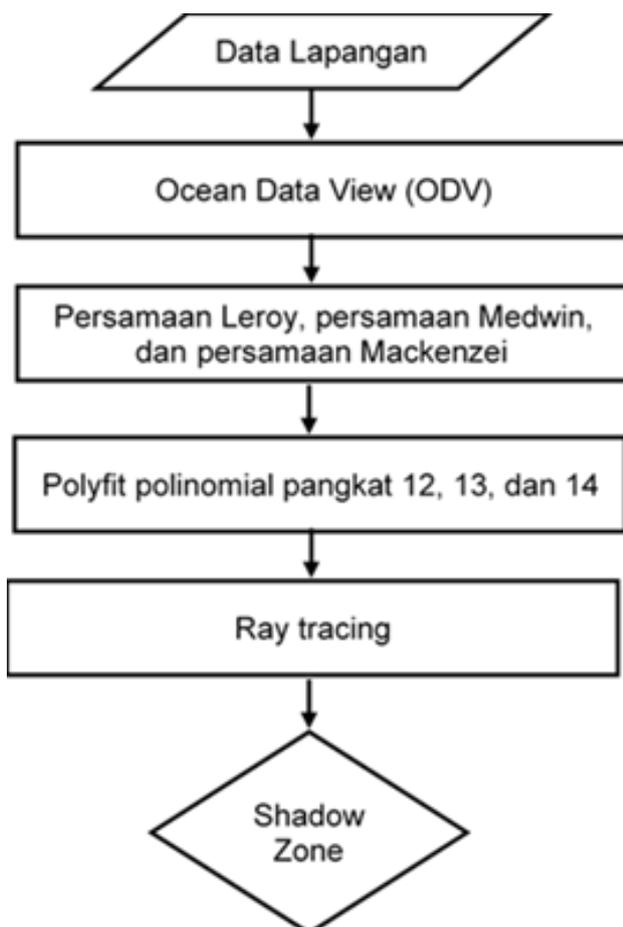
S_i = data salinitas (ppt)

$S(z)_1$ = data *salinitas* hasil pendekatan polinomial (ppt)

N = jumlah data

Ray tracing

Dengan menggunakan polinomial yang memiliki RMSE terkecil, Selanjutnya akan melakukan simulasi perambatan akustik (*Ray tracing*) pada kolom air di setiap stasiun pengamatan. Hasil dari *Ray tracing* ini akan digunakan untuk menentukan wilayah *Shadow zone* yang dapat digunakan oleh kapal selam untuk bersembunyi. Dengan melalui tahapan-tahapan tersebut, maka akan

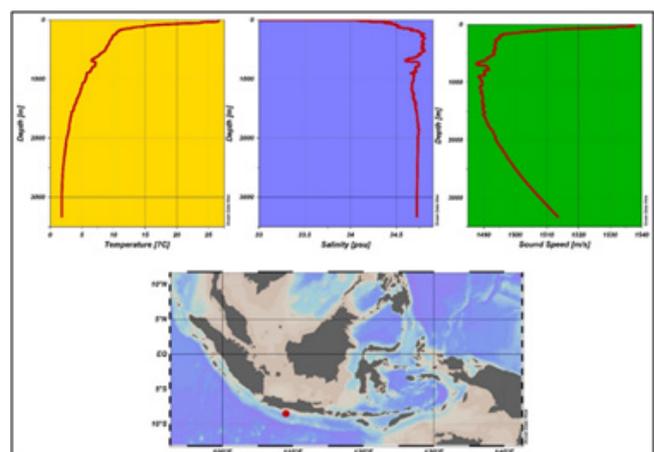


Gambar 2. Diagram alir penelitian.
Figure 2. Research Flowchart.

dapat menganalisis data dan menentukan wilayah *Shadow zone* yang potensial untuk kapal selam bersembunyi berdasarkan profil suhu, salinitas, dan kecepatan suara terhadap kedalaman pada setiap stasiun pengamatan.

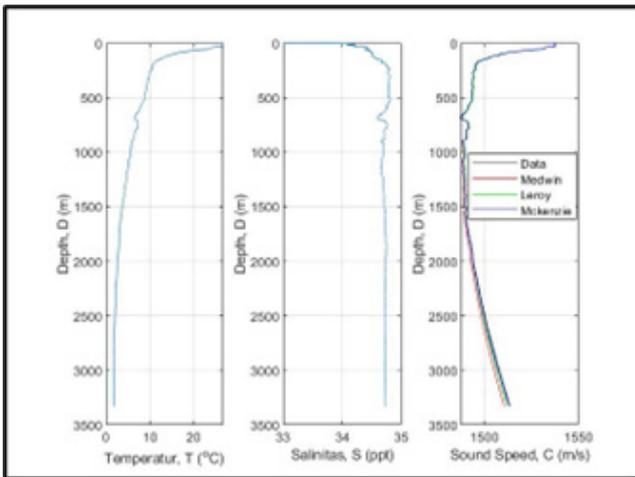
HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari stasiun 1 yang diamati untuk mencari daerah *shadow zone*, data pada stasiun 1 diolah dengan menggunakan ODV didapatkan pola profil suhu, salinitas dan kecepatan suara yang berubah secara signifikan terhadap kedalaman, dilapisan permukaan suhu relatif hangat karena terkena radiasi matahari dan di bawah lapisan termoklin suhu turun drastis hingga mendekati nilai konstan di kedalaman >1000 m. pada profi salinitas menunjukkan fluktuasi ringan di lapisan permukaan, kemungkinan dipengaruhi oleh proses penguapan dan curah hujan. Seiring bertambahnya kedalaman, salinitas cenderung meningkat stabil, menunjukkan air laut dalam yang lebih padat dan lebih asin. Pada profil kecepatan suara menunjukkan perubahan signifikan kecepatan suara terhadap kedalaman, di lapisan permukaan kecepatan suara tinggi karena suhu lebih tinggi. Setelah melewati lapisan termoklin kecepatan suara menurun drastic kemudian



Gambar 3. Profil suhu, salinitas dan kecepatan suara terhadap kedalaman.

Figure 3. Temperature, Salinity, and Sound Speed Profile with Depth.



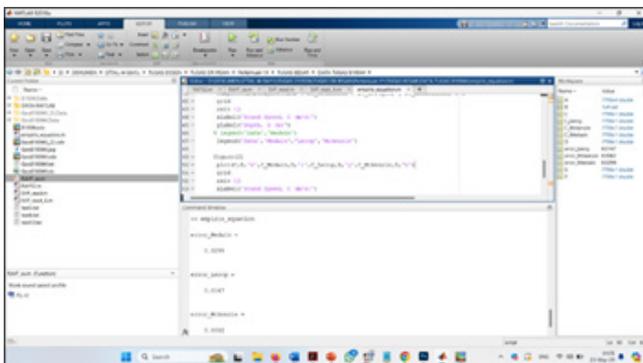
Gambar 4. Profil suhu, salinitas dan kecepatan suara terhadap kedalaman.

Figure 4. Temperature, Salinity, and Sound Speed Profile with Depth.

Kembali meningkat perlahan di kedalaman karena pengaruh tekanan yang dominan, profil tersebut terlihat pada Gambar 3.

Pola kecepatan suara yang didapat terlihat belum smooth oleh karena itu, profil kecepatan suara kemudian di dekatkan secara empiris dengan persamaan Leroy, persamaan Medwin, dan persamaan Mackenzie menggunakan Software Matlab dengan skrip empiris equation.m, didapatkan hasil berupa grafik (Gambar 4).

Berdasarkan grafik ketiga persamaan menunjukkan hasil yang identik, namun secara perhitungan persamaan yang memiliki nilai RMSE terkecil adalah persamaan Mckenzie



Gambar 5. Hasil Run Empiris Equation.
Figure 5. Empirical Equation Run Results.

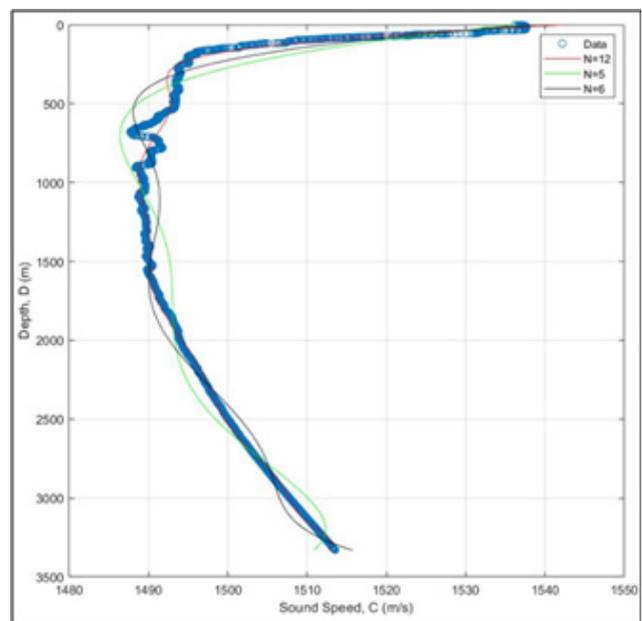
Tabel 1. Hasil Analisa Error Persamaan
Table 1. Error Analysis Results of the Equation

No	Persamaan	Nilai RMSE
1	Persamaan Medwin	0,0299
2	Persamaan Leroy	0,0147
3	Persamaan Mckenzie	0,0082

diperoleh nilai *error* 0,0082, sedangkan *error* persamaan Leroy didapatkan nilai 0,0147 dan nilai *error* persamaan Medwin adalah 0,0299. Oleh karena itu nilai kecepatan suara pada persamaan Mckenzie yang akan digunakan pada tahap perhitungan (Gambar 5).

Secara grafik ketiga persamaan menunjukkan hasil yang cukup identik namun secara perhitungan persamaan yang mendekati dengan kondisi yang sebenarnya ditandai dengan nilai RMSE yang kecil. Hasil Analisa *error* disajikan pada Tabel 1.

Tahapan selanjutnya nilai kecepatan suara yang didapat dari persamaan Mckenzie kembali didekatkan dengan persamaan *polynomial* orde 5, orde 6, dan orde 12 dengan menggunakan skrip SVP (*Sound Velocity*



Gambar 6 Grafik polynomial kecepatan suara terhadap kedalaman.
Figure 6. Polynomial Graph of Sound Speed with Depth.

Tabel 2. Hasil polyfit dengan polynomial
Table 2. Polyfit Results with Polynomial

No	Persamaan	Nilai RMSE
1	Orde 5	0,0082
2	Orde 6	0,0147
3	Orde 12	0,0299

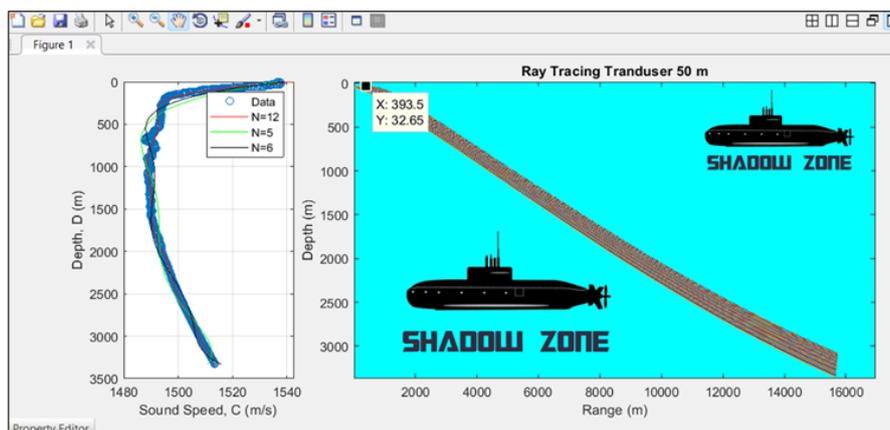
Profile) memakai matlab diperoleh grafik seperti disajikan pada Gambar 6.

Dari hasil *polyfit* dengan *polynomial* didapatkan hasil *error* orde 5 *error* 0,0082, orde 6 *error* 0,0147 dan orde 12 *error* 0,0299. Berdasarkan nilai *error* pada *polyfit polynomial* tersebut *error* yang paling kecil merupakan permodelan yang paling dekat dengan data raw, selanjutnya *polyfit polynomial* orde 12 digunakan untuk penggambaran *Ray tracing*

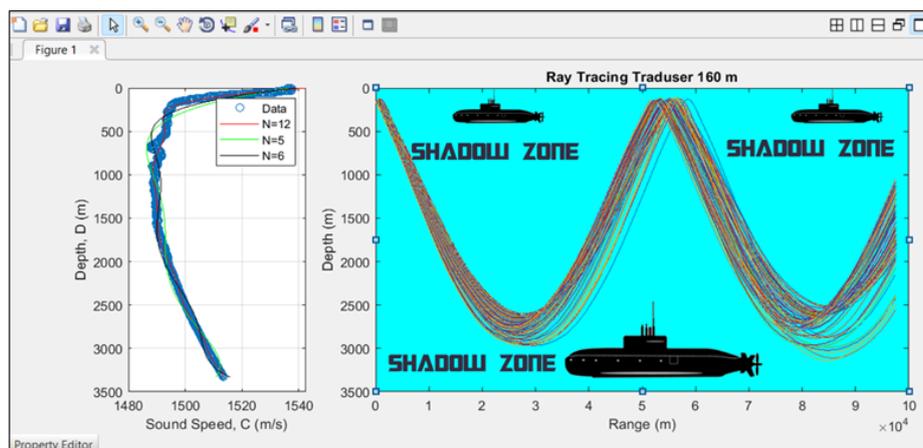
gelombang akustik di stasiun 1. Dari hasil *polyfit* dengan *polynomial* didapatkan hasil *error* orde 5, orde 6 dan orde 12 disajikan pada Tabel 2.

Untuk simulasi *ray tracing* gelombang akustik di stasiun 1 dengan posisi transduser sonar pada kedalaman 50 m, 160 m, dan 400 m menggunakan data kecepatan suara dari *polynomial* orde 12. Kemudian data tersebut di Run RAYS2.m pada Matlab dari data *zs* dan *c0* pada setiap kedalaman secara satu persatu. Dengan hasil pada Gambar 7.

Pada gambar 7. Simulasi *ray tracing* gelombang akustik dengan posisi transduser di kedalaman 50 meter dan range pancaran 16.100 meter dapat diketahui daerah *shadow*



Gambar 7. *Ray Tracing* posisi transduser di kedalaman 50 m.
Figure 7. *Ray Tracing of Transducer Position at 50 m Depth.*



Gambar 8. *Ray Tracing* posisi transduser di kedalaman 160 m
Figure 8. *Ray Tracing of Transducer Position at 160 m Depth.*

zone untuk persembunyian kapal selam aman dari deteksi sonar baik itu kapal permukaan ataupun kapal selam lain. Arah gelombang akustik yang dipancarkan dari kedalaman transduser 50 meter cenderung lurus 450 ke bawah sampai kedalaman lebih dari 3.000 meter. *Shadow zone* yang aman di permukaan pada kedalaman < 32 meter dan pada area yang berwarna biru. Karena posisi transduser yang relatif dangkal dan jangkauan pancaran yang lebih pendek dibandingkan simulasi lainnya, pola perambatan lebih sederhana dan minim pantulan atau pembiasan berulang, sehingga energi akustik langsung terfokus ke lapisan bawah laut.

Pada gambar 8. Pola perambatan gelombang akustik yang dipancarkan dari kedalaman 160 meter menunjukkan pola gelombang yang berfluktuasi atau bergelombang, akibat pembiasan (*refraction*) karena perubahan kecepatan suara secara vertikal terhadap kedalaman. Pola ini menunjukkan bahwa gelombang tidak hanya merambat secara lurus, tetapi mengalami pembelokan naik dan turun, menciptakan lintasan kompleks di kolom air. Simulasi *ray tracing* gelombang akustik dengan posisi transduser di kedalaman 160 meter dan range pancaran 100.000 meter dapat diketahui daerah *shadow zone* untuk persembunyian kapal selam aman dari deteksi sonar baik itu kapal permukaan ataupun kapal selam lain.

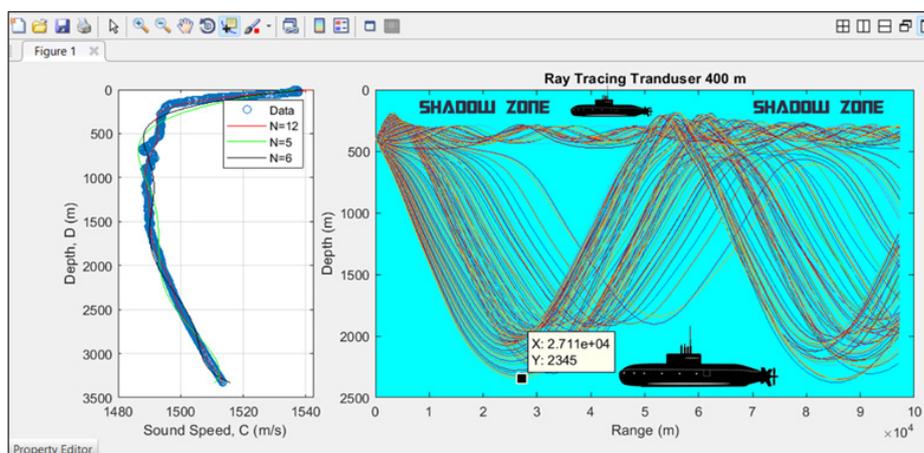
Arah gelombang akustik yang dipancarkan dari kedalaman transduser 160 meter bergelombang *Shadow zone* yang aman untuk persembunyian kapal selam pada kedalaman < 113 atau >3.141 meter dan di area yang berwarna biru.

Pada Gambar 9. Pola perambatan gelombang akustik yang dipancarkan dari kedalaman 400 meter menunjukkan adanya dua lintasan utama (dua gelombang) yang terbentuk, sebagai akibat dari perubahan kecepatan suara terhadap kedalaman yang mempengaruhi arah rambat sinyal. Pola perambatan ini menunjukkan pembelokan (*refraction*) gelombang ke arah bawah maupun ke atas, menciptakan jalur-jalur propagasi yang kompleks. Simulasi *ray tracing* gelombang akustik dengan posisi transduser di kedalaman 400 meter dan range pancaran 100.000 meter dapat diketahui daerah *shadow zone* untuk persembunyian kapal

Tabel 3. Hasil simulasi ray tracing per kedalaman transduser

Table 3. Ray Tracing Simulation Results per Transducer Depth

No	Kedalaman Source (transduser)/pancari kapal selam	shadow zone	Range (m)
1	40 m	< 32 m	16.100
2	160 m	< 113 m	100.000
3	400 m	< 185 m	100.000



Gambar 9. Ray Tracing posisi transduser di kedalaman 400 m.
Figure 9. Ray Tracing of Transducer Position at 400 m Depth.

selam aman dari deteksi sonar baik itu kapal permukaan ataupun kapal selam lain. Arah gelombang akustik yang dipancarkan dari kedalaman transduser 160 meter mempunyai 2 gelombang, *Shadow zone* yang aman untuk persembunyian kapal selam di pada kedalaman < 185 atau >2.345 meter dan di area yang berwarna biru. Dari hasil simulasi *ray tracing* di atas diperoleh wilayah *shadow zone* seperti dalam Tabel 3.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis data profil suhu, salinitas, dan kecepatan suara serta simulasi *ray tracing* gelombang akustik yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal penting terkait posisi dan kedalaman *shadow zone* yang berpotensi digunakan sebagai tempat persembunyian kapal selam di perairan Selatan Jawa. Jika sumber suara (transduser) diletakkan pada kedalaman 50 meter, maka gelombang akustik cenderung merambat lurus ke bawah hingga lebih dari 3.000 meter. *Shadow zone* yang terbentuk teridentifikasi pada kedalaman kurang dari 32 meter, dengan jangkauan pancaran sejauh 16.100 meter. Area ini berada di dekat permukaan laut dan dapat dimanfaatkan kapal selam untuk menghindari deteksi sonar permukaan. Jika transduser diletakkan pada kedalaman 160 meter, maka gelombang akustik menunjukkan pola perambatan bergelombang dengan jangkauan pancaran sejauh 100.000 meter. *Shadow zone* teridentifikasi pada dua area, yaitu pada kedalaman kurang dari 113 meter dan lebih dari 3.141 meter, yang memberikan keleluasaan bagi kapal selam untuk memilih kedalaman persembunyian berdasarkan kebutuhan operasional. Jika transduser diletakkan pada kedalaman 400 meter, maka gelombang akustik memperlihatkan pola perambatan kompleks dengan dua gelombang utama. *Shadow zone* yang terbentuk terdeteksi pada kedalaman kurang dari 185 meter dan lebih dari 2.345 meter, dengan jangkauan pancaran tetap sebesar 100.000 meter. Kedalaman

ini memberikan ruang persembunyian yang aman di kedalaman menengah maupun dalam.

UCAPAN TERIMA KASIH

Seluruh penulis adalah kontributor utama. Artikel ini adalah bagian dari skripsi penulis pertama yang dibimbing teknis dan penulisan oleh penulis kedua, ketiga. Kami mengucapkan terima kasih kepada Dosen akustik bawah air Bapak Irsan Soemantri Brodjonegoro, Ph.D atas bimbingan, saran dan masukan dalam penyusunan penelitian ini. Kami juga mengucapkan terima kasih kepada Kaprodi S1 beserta seluruh Staf Prodi Hidrografi STTAL yang telah memberikan fasilitas belajar, dan kepada rekan-rekan Mahasiswa S1 Prodi Hidrografi STTAL angkatan XLIV serta semua pihak yang telah berperan membantu dalam proses penyusunan penelitian dan penulisan naskah ilmiah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Andrianto, A. (2002). Propagasi Akustik Di Bawah Laut Dengan Menggunakan Metode *Ray tracing*. Program Studi teknik Kelautan, Institut Teknologi Bandung.
- Brodjonegoro, I. S. (2024a). *Ray tracing* Program. In Underwater Acoustics Modul (9th ed.). <https://classroom.google.com/u/0/c/NjUwNTE4NzE1ODU3/m/Njc1NzcxMDMwMDM2/details>
- Brodjonegoro, I. S. (2024b). Underwater acoustics propagation (12th–13th ed.). <https://doc-0c-98-prod-03-apps-viewer.googleusercontent.com/viewer2/prod-03/pdf/>
- Hermawan, T., & Sutanto, R. (2022). Strategi Pertahanan Laut Indonesia Dalam Analisa Ancaman Dan Kekuatan Laut. *Jurnal Education and Development*,

10(2), 363–371.

- Keninggan, K., Helmi, M., & Rifai, A. (2023). Studi Karakteristik Geospasial Daerah Senyap (*Shadow zone*) Menggunakan Pendekatan MMPE (Monterrey-Miami Parabolic Equation) di Perairan Selat Sunda Bagian Selatan. *Indonesian Journal of Oceanography*, 5(1), 100–107. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v5i1.16235>
- Leroy, C. C. (1969). Development of simple equations for accurate and more realistic calculation of the speed of sound in seawater. *J. Acoust. Soc., Am.* 46, 216–226. <https://doi.org/https://doi.org/10.1121/1.1911673>
- Mackenzie, K. V. (1981). Nine-Term Equation for Sound Velocity in the Oceans. *Journal of Acoustics Society of America*, 70, 807–812. <https://doi.org/https://doi.org/10.1121/1.386920>
- Marsetio, & Ritonga, R. (2018). Representasi Kapal Selam Indonesia dalam Perspektif Pertahanan Regional. *Jurnal Kajian Stratejik Ketahanan Nasional*, 1(2), 87–155. <https://doi.org/10.7454/jkskn.v1i2.10008>
- Medwin, H. (1975). Speed of sound in water: A simple equation for realistic parameters. *J. Acoust. Soc. Am.*, 58, 1318–1319. <https://doi.org/https://doi.org/10.1121/1.380790>
- Romauli, S. dan N. (2016). Perambatan Suara dalam Air di Perairan Laut Bengkulu Menggunakan Model ODE (Ordinary Differential Equation). *SIMETRI, Jurnal Ilmu Fisika Indonesia*, 2, 63–67.
- Sugianto, A., Agussalim, D., & Armaidly Armawi. (2021). Penanganan Keamanan Maritim Perbatasan Wilayah Laut dan Dampaknya pada Aspek Pertahanan Keamanan. *Jurnal Lemhannas RI*, 9(2), 113–126. <https://doi.org/10.55960/jlri.v9i2.395>
- Soemarmi, A., & Diamantina, A. (2019). Konsep Negara Kepulauan Dalam Upaya Perlindungan Wilayah Pengelolaan Perikanan Indonesia. *Masalah-Masalah Hukum*, 48(3), 241. <https://doi.org/10.14710/mmh.48.3.2019.241-248>
- Suharyo, O. S., Adrianto, D., & Hidayah, Z. (2018). Pengaruh Pergerakan Massa Air Dan Distribusi Parameter Temperatur, Salinitas Dan Kecepatan Suara Pada Komunikasi Kapal Selam. *Jurnal Kelautan: Indonesian Journal of Marine Science and Technology*, 11(2), 104. <https://doi.org/10.21107/jk.v11i2.4521>
- Urlick, R. J. (1983). Principles Of Underwater Sound. In Peninsula Publishing (3rd ed.).