

ANALISIS PERAN PROPAGASI AKUSTIK BAWAH AIR DALAM RANGKA Mendukung KEAMANAN LAUT SELAT LOMBOK MENGGUNAKAN METODE SWOT

Agustinus¹, Mochamad Achnaf², Sunarto Eko Wahyudi³, Muhammad Zulkifli⁴

^{1,2,3,4}Sekolah Staf dan Komando TNI Angkatan Laut

agushanan2011.at@gmail.com

ABSTRAK

Selat Lombok sebagai salah satu choke point strategis pada Alur Laut Kepulauan Indonesia (ALKI) II memiliki karakteristik kedalaman yang ideal bagi pelayaran kapal selam, dengan kedalaman mencapai lebih dari 1.300 meter. Kondisi oseanografis yang dinamis menciptakan profil kecepatan suara yang bervariasi secara spasial dan temporal sehingga berpotensi membentuk shadow zone. Keberadaan shadow zone dapat menjadi celah keamanan yang dimanfaatkan kapal selam asing untuk menghindari deteksi sistem sonar TNI Angkatan Laut. Penelitian ini bertujuan mendeskripsikan peran propagasi akustik bawah air dan merumuskan rekomendasi strategi operasional yang optimal. Pendekatan yang digunakan adalah kualitatif deskriptif dengan dukungan simulasi pemodelan propagasi akustik menggunakan metode Parabolic Equation RAMGeo. Hasil simulasi pada variasi kedalaman sumber akustik (10 m, 100 m, dan 300 m) menunjukkan bahwa shadow zone terdistribusi pada kedalaman 80 hingga 350 meter dengan jangkauan horizontal 5 hingga 30 kilometer dari sumber akustik. Pelemahan sinyal sonar mencapai lebih dari 80 dB sehingga secara signifikan mengurangi efektivitas deteksi. Berdasarkan analisis SWOT yang menghasilkan koordinat strategis (+0,29; +0,42) pada Kuadran I (Strategi Agresif), strategi prioritas yang direkomendasikan mencakup: (1) peningkatan survei oseanografi taktis secara berkala, (2) optimalisasi penempatan sensor sonar pada kedalaman sekitar 100 meter, dan (3) pengembangan sistem pemetaan shadow zone real-time berbasis data Marine Copernicus dan kecerdasan buatan. Temuan penelitian ini diharapkan menjadi acuan ilmiah bagi TNI Angkatan Laut dalam merencanakan dan melaksanakan operasi pengamanan ALKI II.

Kata Kunci: Propagasi Akustik Bawah Air, Shadow Zone, Choke Point, Selat Lombok, Analisis SWOT, Keamanan Laut.

ABSTRACT

The Lombok Strait, as one of the strategic choke points on the Indonesian Archipelagic Sea Lane (ALKI) II, possesses depth characteristics exceeding 1,300 meters, making it an ideal route for submarine navigation. Dynamic oceanographic conditions create sound velocity profiles that vary spatially and temporally, potentially forming shadow zones that may serve as security gaps exploited by foreign submarines to evade detection by the

Indonesian Navy's sonar systems. This study aims to describe the role of underwater acoustic propagation and formulate optimal operational strategy recommendations. The method employed is a qualitative descriptive approach supported by acoustic propagation modeling simulations using the Parabolic Equation RAMGeo method. Simulation results across acoustic source depth variations (10 m, 100 m, and 300 m) show shadow zones distributed at depths of 80 to 350 meters with a horizontal range of 5 to 30 kilometers from the acoustic source. Sonar signal attenuation exceeds 80 dB, significantly reducing detection effectiveness. Based on SWOT analysis yielding strategic coordinates (+0.29; +0.42) in Quadrant I (Aggressive Strategy), priority strategies recommended include: (1) periodic tactical oceanographic surveys, (2) optimization of sonar sensor placement at approximately 100 meters depth, and (3) development of a real-time shadow zone mapping system using Marine Copernicus data and artificial intelligence. The findings serve as a scientific reference for the Indonesian Navy in planning and executing security operations along ALKI II.

Keywords: *Underwater Acoustic Propagation, Shadow Zone, Choke Point, Lombok Strait, SWOT Analysis, Maritime Security.*

A. PENDAHULUAN

Indonesia sebagai negara kepulauan terbesar di dunia memiliki wilayah perairan yang sangat luas dengan 17.504 pulau, luas perairan ±6,4 juta km², dan luas daratan ±1,9 juta km². Posisi geografis Indonesia yang strategis berada di antara dua benua dan dua samudera menjadikan perairan Indonesia sebagai jalur pelayaran internasional yang sangat penting, khususnya melalui Alur Laut Kepulauan Indonesia (ALKI). Dari tiga ALKI yang ditetapkan, ALKI II yang melewati Selat Lombok memiliki signifikansi strategis yang sangat tinggi baik dari aspek ekonomi maupun pertahanan keamanan nasional.

Selat Lombok merupakan salah satu choke point maritim terpenting di kawasan Asia Pasifik yang menghubungkan Samudera Hindia dengan Selat Makassar dan Laut Sulawesi. Selat ini terletak di antara Pulau Bali dan Pulau Lombok dengan lebar sekitar 35-40 kilometer dan kedalaman mencapai lebih dari 1.300 meter. Karakteristik kedalaman yang signifikan ini menjadikan Selat Lombok sebagai jalur yang sangat ideal untuk pelayaran kapal selam, baik kapal selam nasional maupun internasional, terutama jika dibandingkan dengan Selat Sunda dan Selat Malaka yang relatif lebih dangkal.

Dalam konteks operasi pertahanan laut dan pengamanan wilayah, kemampuan deteksi bawah air menjadi aspek krusial bagi TNI Angkatan Laut. Sistem deteksi bawah air yang utama adalah sonar (Sound Navigation and Ranging) yang memanfaatkan

propagasi gelombang akustik di dalam air. Namun, efektivitas sistem sonar sangat bergantung pada pemahaman mendalam tentang karakteristik propagasi akustik di area operasi, termasuk identifikasi zona-zona kritis seperti shadow zone atau zona bayangan akustik.

Shadow zone merupakan area di dalam air di mana gelombang akustik tidak dapat menjangkau atau mengalami atenuasi yang sangat signifikan sehingga kemampuan deteksi sonar menjadi sangat terbatas atau bahkan tidak efektif. Keberadaan shadow zone disebabkan oleh fenomena pembelokan (refraction) gelombang akustik akibat variasi kecepatan suara yang dipengaruhi oleh profil suhu, salinitas, tekanan, serta topografi dasar laut. Di perairan dengan karakteristik oseanografis kompleks seperti Selat Lombok, shadow zone dapat menjadi celah keamanan yang berpotensi dimanfaatkan oleh kapal selam asing untuk menghindari deteksi.

Hingga saat ini belum terdapat kajian komprehensif yang secara spesifik menganalisis distribusi dan karakteristik shadow zone di Selat Lombok untuk kepentingan operasi militer. Penelitian ini berupaya mengisi kesenjangan tersebut dengan mengintegrasikan analisis propagasi akustik berbasis pemodelan numerik dengan pendekatan analisis SWOT untuk menghasilkan strategi operasional yang kontekstual dan aplikatif bagi TNI Angkatan Laut.

B. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode penelitian kualitatif deskriptif dengan dukungan analisis data parameter oseanografi sebagai komplemen. Pemilihan pendekatan kualitatif didasarkan pada kompleksitas permasalahan penentuan shadow zone di choke point Selat Lombok yang memerlukan pemahaman mendalam tentang implikasi strategis, operasional, dan taktis dalam konteks pertahanan maritim yang tidak dapat dijawab semata-mata melalui analisis numerik propagasi akustik. Area penelitian dibatasi pada perairan Selat Lombok sebagai choke point strategis dalam ALKI II, berlokasi di antara Pulau Bali dan Pulau Lombok. Penelitian dilaksanakan dari bulan Februari hingga Mei 2026.

Data primer diperoleh melalui wawancara mendalam semi-terstruktur dengan enam narasumber ahli yang memiliki kompetensi langsung di bidang hidro-oseanografi militer dan operasi kapal selam dan Data sekunder berupa data oseanografi berupa temperatur

dan salinitas diperoleh dari Copernicus Marine Service (Marine Copernicus) untuk periode Januari-Desember 2023 dalam format NetCDF. Dataset yang digunakan adalah Global Ocean Physics Analysis and Forecast dengan resolusi spasial $1/12^\circ$ dan cakupan vertikal hingga kedalaman 1.000 meter.

Analisis data mencakup: (a) analisis tematik kualitatif melalui open coding, axial coding, dan selective coding menggunakan NVivo; (b) pengolahan data oseanografi dengan persamaan empiris Medwin untuk mendapatkan Sound Velocity Profile (SVP); (c) simulasi pemodelan propagasi akustik RAMGeo pada frekuensi 200 Hz dengan tiga variasi kedalaman sumber (10 m, 100 m, 300 m); dan (d) analisis SWOT untuk merumuskan strategi prioritas dengan pembobotan kuantitatif.

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengolahan data oseanografi Marine Copernicus tahun 2023 menunjukkan bahwa Selat Lombok memiliki karakteristik termoklin yang cukup tajam pada kedalaman 50-150 meter. Para narasumber dari Pushidrosal dan STTAL Hidros menegaskan bahwa gradien suhu vertikal merupakan faktor dominan yang memengaruhi profil kecepatan suara di kawasan ini. Lapisan termoklin yang tajam menyebabkan penurunan drastis kecepatan suara pada kedalaman tersebut, sehingga gelombang akustik mengalami pembelokan ke arah lapisan bawah. Kondisi ini, dikombinasikan dengan pengaruh Arus Lintas Indonesia (Arlindo) dan fenomena upwelling, menciptakan variasi spasial dan temporal SVP yang kompleks dan menjadi pendorong utama pembentukan shadow zone di Selat Lombok. Hasil analisis word frequency query menggunakan NVivo menunjukkan dominasi kata shadow zone, oseanografi, deteksi, akustik, operasi, dan propagasi dalam seluruh transkrip wawancara, yang mengonfirmasi relevansi dan fokus utama penelitian ini.

Simulasi menggunakan metode Parabolic Equation RAMGeo pada frekuensi 200 Hz dilakukan pada tiga skenario kedalaman sumber akustik. Pada kedalaman sumber 10 meter, energi akustik cenderung terperangkap dalam saluran permukaan (surface duct). Kondisi ini membuat gelombang suara mampu merambat relatif lebih jauh di lapisan atas dengan nilai transmission loss (TL) yang lebih kecil. Shadow zone terbentuk relatif terbatas, terutama pada rentang jarak sekitar 400-1.000 meter dan kedalaman sekitar 200-1.000 meter dari sumber akustik. Skenario ini menunjukkan bahwa sumber akustik dekat

permukaan masih memiliki efektivitas cukup baik untuk menjangkau kolom air bagian atas.

Pada kedalaman sumber 100 meter, gelombang akustik membentuk zona konvergensi (convergence zones) yang menghasilkan cakupan vertikal lebih luas. Namun, shadow zone mulai terbentuk secara berselang-seling terutama pada lapisan kedalaman 300-1.000 meter pada jarak menengah hingga jauh, dengan nilai TL berkisar 65-80 dB. Kedalaman ini memberikan kompromi antara jangkauan rambat dan luas cakupan vertikal, tetapi juga mulai memperlihatkan blind spot akustik yang perlu diantisipasi. Pada kedalaman sumber 300 meter, model menunjukkan pembentukan shadow zone yang paling dominan dan luas. Shadow zone muncul kuat pada rentang jarak sekitar 600-1.000 meter, dan teridentifikasi pada lebih dari satu lapisan kedalaman, termasuk 0-200 meter serta 600-1.000 meter. Nilai TL berada pada kisaran 60-80 dB. Kondisi ini menunjukkan bahwa sumber yang lebih dalam menghasilkan pembiasan gelombang akustik yang semakin besar akibat variasi gradien kecepatan suara antar lapisan.

Secara keseluruhan, hasil simulasi memperlihatkan bahwa shadow zone di Selat Lombok terdistribusi pada kedalaman 80 hingga 350 meter dengan jangkauan horizontal 5 hingga 30 kilometer dari sumber akustik. Pelemahan sinyal sonar mencapai lebih dari 80 dB, yang secara signifikan mengurangi efektivitas deteksi dan berpotensi dimanfaatkan oleh kapal selam sebagai jalur manuver tersembunyi.

Berdasarkan hasil wawancara mendalam dan simulasi propagasi akustik, dilakukan identifikasi faktor-faktor strategis internal dan eksternal yang diorganisasikan dalam matriks SWOT berikut:

Tabel 1. Matriks SWOT Analisis Peran Propagasi Akustik Bawah Air di Selat Lombok

KEKUATAN (Strengths) - Faktor Internal	KELEMAHAN (Weaknesses) - Faktor Internal
<p>S1 - Mandat kelembagaan Pushidrosal dalam pengelolaan data oseanografi dan pemetaan taktis</p> <p>S2 - Kompetensi SDM dalam analisis oseanografi taktis dan akustik bawah air</p> <p>S3 - Dukungan lembaga pendidikan dan pelatihan TNI AL (STTAL, Pusdik Hidros)</p> <p>S4 - Pengalaman operasional unsur kapal selam dan unit deteksi bawah air</p>	<p>W1 - Keterbatasan data oseanografi taktis yang real-time</p> <p>W2 - Integrasi data oseanografi dengan keputusan operasi belum optimal</p> <p>W3 - Keterbatasan sistem deteksi berlapis untuk menutup blind spot shadow zone</p> <p>W4 - Validasi lapangan hasil model pemodelan masih terbatas</p>
PELUANG (Opportunities) - Faktor Eksternal	ANCAMAN (Threats) - Faktor Eksternal
<p>O1 - Ketersediaan data oseanografi sekunder (Marine Copernicus) dan model numerik</p> <p>O2 - Perkembangan teknologi pemodelan akustik dan analisis real-time</p> <p>O3 - Potensi integrasi multi-platform deteksi (sonar pasif/aktif, AUV, towed array)</p> <p>O4 - Potensi kolaborasi antar satuan dan lembaga pendidikan (BMKG, BRIN, BIG)</p>	<p>T1 - Dinamika oseanografi Selat Lombok yang cepat berubah (suhu, salinitas, termoklin)</p> <p>T2 - Potensi pemanfaatan shadow zone oleh kapal selam asing di ALKI II</p> <p>T3 - Kesenjangan teknologi deteksi bawah air dengan negara maju</p> <p>T4 - Keterbatasan waktu reaksi operasional terhadap perubahan kondisi laut</p>

Analisis kuantitatif SWOT dilakukan dengan memberikan bobot pada setiap faktor berdasarkan tingkat kepentingannya dan rating berdasarkan tingkat pengaruh aktual. Nilai akhir diperoleh dari perkalian bobot dan rating. Berikut adalah hasil rekapitulasi skor:

Tabel 2. Rekapitulasi Pembobotan dan Skor SWOT

Dimensi / Kriteria	Kode	Bobot	Rating	Nilai
Kekuatan (Strengths)				
Mandat kelembagaan Pushidrosal	S1	0,13	4	0,54
Kompetensi SDM oseanografi taktis	S2	0,13	4	0,52
Dukungan lembaga pendidikan TNI AL	S3	0,12	3	0,36
Pengalaman operasional kapal selam	S4	0,12	3	0,36
Total Kekuatan				1,79
Kelemahan (Weaknesses)				
Keterbatasan data oseanografi real-time	W1	0,14	4	0,54
Integrasi data dengan operasi belum optimal	W2	0,13	3	0,39
Keterbatasan sistem deteksi berlapis	W3	0,12	3	0,36
Validasi lapangan model terbatas	W4	0,10	2	0,21
Total Kelemahan				1,50
Peluang (Opportunities)				

Ketersediaan data oseanografi sekunder	O1	0,13	4	0,54
Teknologi pemodelan akustik real-time	O2	0,13	4	0,52
Integrasi multi-platform deteksi	O3	0,12	3	0,36
Kolaborasi antar satuan dan lembaga	O4	0,11	3	0,34
Total Peluang				1,78
Ancaman (Threats)				
Dinamika oseanografi cepat berubah	T1	0,14	4	0,55
Pemanfaatan shadow zone kapal selam asing	T2	0,13	3	0,38
Kesenjangan teknologi deteksi	T3	0,12	2	0,24
Keterbatasan waktu reaksi operasional	T4	0,10	2	0,20
Total Ancaman				1,38
Rekapitulasi Skor SWOT				
Sumbu X = Kekuatan - Kelemahan = 1,79 - 1,50				+0,29
Sumbu Y = Peluang - Ancaman = 1,78 - 1,38				+0,42
POSISI STRATEGIS: KUADRAN I (Strategi Agresif / SO)				(+0,29; +0,42)

Hasil perhitungan menghasilkan koordinat posisi strategis pada titik (+0,29; +0,42), yang berada pada Kuadran I (Strategi Agresif). Posisi ini berarti TNI AL memiliki

kekuatan internal yang lebih besar dibandingkan kelemahannya, dan peluang eksternal lebih besar dibandingkan ancaman yang dihadapi. Implikasinya adalah strategi yang paling tepat adalah memanfaatkan kekuatan internal untuk menangkap peluang eksternal secara maksimal.

Berdasarkan posisi Kuadran I, empat strategi prioritas dirumuskan:

- 1) Strategi S-T: Mempercepat pembaruan peta shadow zone — Pushidrosal mengoptimalkan kapasitas kelembagaan untuk memperbarui peta shadow zone sesuai dinamika oseanografi yang cepat, termasuk penyusunan SOP fast-track pembaruan peta dalam 24-48 jam.
- 2) Strategi S-O: Mengembangkan teknologi pemodelan dan integrasi AI — Memanfaatkan kompetensi SDM TNI AL untuk mengembangkan platform AI yang menggabungkan data oseanografi dan model RAMGeo untuk prediksi shadow zone secara real-time.
- 3) Strategi S-T: Penguatan sistem deteksi multi-platform — Mengintegrasikan sonar pasif, sonar aktif, towed array, sonobuoy, UAV laut, dan AUV dalam satu formasi operasi untuk meminimalkan blind spot akibat shadow zone.
- 4) Strategi W-O: Mengoptimalkan penggunaan data sekunder model numerik — Memanfaatkan data Marine Copernicus dan model numerik untuk mengurangi ketergantungan pada data in-situ yang mahal, memperkuat peta dan prediksi shadow zone.

Temuan penelitian ini mengkonfirmasi bahwa shadow zone di Selat Lombok merupakan fenomena nyata yang memiliki implikasi taktis dan strategis signifikan. Karakteristik oseanografis Selat Lombok, terutama gradien suhu vertikal yang tajam pada kedalaman 50-150 meter, menciptakan kondisi pembiasan gelombang akustik yang menghasilkan distribusi shadow zone pada kedalaman 80-350 meter. Hasil simulasi RAMGeo menunjukkan bahwa kedalaman sumber akustik sangat menentukan karakteristik propagasi dan luas shadow zone yang terbentuk. Sumber pada kedalaman 10 meter paling efektif memanfaatkan saluran permukaan, sumber 100 meter memberikan kompromi optimal antara cakupan dan pembentukan shadow zone, sedangkan sumber 300 meter menghasilkan shadow zone paling luas dengan transmission loss tertinggi.

Temuan ini konsisten dengan penelitian Keninggan et al. (2023) di Selat Sunda yang menemukan shadow zone pada kedalaman 50-200 meter.

Implikasi operasional yang paling kritis adalah potensi pemanfaatan shadow zone oleh kapal selam asing sebagai jalur manuver tersembunyi di ALKI II. Mengingat Selat Lombok merupakan bagian dari SLOC yang mengangkut lebih dari 40% perdagangan dunia, kondisi ini menuntut respons strategis yang komprehensif dari TNI Angkatan Laut. Posisi Kuadran I pada analisis SWOT menegaskan bahwa TNI AL memiliki modal yang memadai untuk mengembangkan kemampuan deteksi bawah air yang lebih handal. Kekuatan berupa mandat kelembagaan Pushidrosal, kompetensi SDM, dan pengalaman operasional perlu dioptimalkan untuk memanfaatkan peluang yang ada berupa teknologi pemodelan akustik terkini dan ketersediaan data oseanografi sekunder.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian tentang peran propagasi akustik bawah air dalam mendukung keamanan laut Selat Lombok menggunakan metode SWOT, dapat disimpulkan empat hal pokok:

Pertama, karakteristik oseanografis Selat Lombok, khususnya lapisan termoklin pada kedalaman 50-150 meter yang menciptakan gradien kecepatan suara negatif, berperan signifikan dalam pembentukan shadow zone. Profil SVP yang dipengaruhi oleh suhu, salinitas, dan fenomena Arlindo menjadi faktor dominan yang menentukan pola propagasi akustik di wilayah ini.

Kedua, simulasi propagasi akustik dengan metode Parabolic Equation RAMGeo menunjukkan distribusi shadow zone pada kedalaman 80-350 meter dengan jangkauan horizontal 5-30 km dari sumber akustik. Kedalaman sumber 300 meter menghasilkan shadow zone paling luas dengan transmission loss mencapai 80 dB, sementara kedalaman 100 meter memberikan kompromi optimal antara cakupan dan efektivitas deteksi.

Ketiga, keberadaan shadow zone di Selat Lombok menciptakan blind spot signifikan dalam sistem deteksi sonar TNI AL, yang berpotensi dimanfaatkan kapal selam asing sebagai jalur manuver tersembunyi di ALKI II. Hal ini menjadi ancaman nyata bagi keamanan nasional yang menuntut respons strategis komprehensif.

Keempat, analisis SWOT menghasilkan posisi strategis pada Kuadran I (+0,29; +0,42), menunjukkan kondisi strategi agresif di mana TNI AL perlu memanfaatkan

kekuatan kelembagaan dan kompetensi SDM untuk menangkap peluang teknologi yang ada. Strategi prioritas mencakup: percepatan pembaruan peta shadow zone, pengembangan teknologi prediksi berbasis AI, penguatan deteksi multi-platform, dan optimalisasi penggunaan data oseanografi sekunder.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustinus, A. R. T. D., W. W. Pandoe, dan N. Riyadi. (2016). "Studi Karakteristik Massa Air untuk Menentukan Shadow Zone di Selat Makassar." *Jurnal Chart Datum*, 2(2), 177-186.
- Das, A. (2013). "Naval Operations Analysis in the Indian Ocean Region: A Review." *Journal of Defence Studies*, 7(1), 49-78.
- Etter, P. C. (2018). *Underwater Acoustic Modeling and Simulation* (5th ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Larnicol, G., Lellouche, J.-M., Rémy, E., Greiner, E., Drevillon, M., Benkiran, M., ... dan Ayoub, N. (2019). "The Global Observed Ocean Products of the Copernicus Marine Service." *Ocean Science*, 15(4), 1153-1166.
- Manik, H. M. (2023). *Teknologi Sonar, Teori dan Aplikasi*. Bogor: IPB Press.
- Medwin, H. (1975). "Speed of Sound in Water: A Simple Equation for Realistic Parameters." *Journal of the Acoustical Society of America*, 58(6), 1318-1319.
- Novitasari, Y., Irwanto, B., dan Prakoso, L. Y. (2025). "Implementasi Teknologi Modern dalam Strategi Keamanan Laut untuk Mencegah Pencurian Sumber Daya Laut di Wilayah Perairan Indonesia." *Jurnal Cendekia Ilmiah*, 5(1), 2913-2929.
- Oliveira, T. C. A., Lin, Y. T., dan Porter, M. B. (2021). "Underwater Sound Propagation Modeling in a Complex Shallow Water Environment." *Frontiers in Marine Science*, 8, 1-11.
- Rustam, I. (2018). "Makna Strategis Selat Lombok dan Perkembangannya sebagai Jalur Pelayaran Internasional." *Global & Policy*, 6(1), 83-100.
- Sugiyono. (2017). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*. Bandung: Alfabeta.
- Till, G. (2013). *Seapower: A Guide for the Twenty-First Century* (3rd ed.). London: Routledge.

Zuhri, Ahmad Ali Ma'ruf, Pujiyati, S., Solikin, S., dan Steven. (2022). "Ray Path Gelombang Akustik Pada Musim Barat dan Musim Timur di Perairan Laut Natuna Utara." *Jurnal Kelautan Nasional*.