Indonesian Journal of Oceanography
November 2026, Vol 8 No 4: 397 - 409
ISSN: 2714-8726

Deteksi dan Karakterisasi Respons Akustik Bola *Sphere* di Bawah Permukaan Air Menggunakan Sonar

Gentio Harsono[1,2]*, Sri Murtiana[3], Tasdik Mustika Alam[1], Bangun P Hutajulu[1], Adhi Kusuma Negara[2,4], Amir Yarkhasy Yuliardi[5]

[1]Fakultas Strategi Pertahanan, Universitas Pertahanan Republik Indonesia
Kawasan IPSC Sukahati, Citeurup, Bogor, Jawa Barat, 16810
[2]Pusat Hidro-Oseanografi TNI Angkatan Laut
Jl. Pantai Kuta V No.1, Ancol Timur, Jakarta Utara, DKI Jakarta, 14430
[3]Fakultas Manajemen Pertahanan, Universitas Pertahanan Republik Indonesia
Kawasan IPSC Sukahati, Citeurup, Bogor, Jawa Barat, 16810
[4]Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, IPB University
Jl. Agatis, Kampus IPB Dramaga, Kabupaten Bogor, Jawa Barat, 16680
[5]Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Jenderal Soedirman
Jl. Dr. Soeparno, Komplek GOR Soesilo Soedarman, Kabupaten Banyumas, Jawa Tengah, 53122
Email: *hgentio1969@gmail.com

Abstrak

Karakterisasi respons akustik target bawah air merupakan aspek penting dalam pengembangan sistem sonar untuk mendukung estimasi jarak dan analisis target strength (TS). Penelitian ini bertujuan mengimplementasikan sistem sonar untuk mendeteksi target bola (sphere) pada jarak berbeda serta menganalisis karakteristik sinyal pantul sebagai dasar bagi pengukuran TS. Pengujian dilakukan menggunakan sinyal akustik dengan frekuensi nominal 30 kHz dan target pada jarak nominal 1 m dan 3 m. Sinyal penerimaan dianalisis menggunakan representasi waktu–frekuensi berupa scalogram untuk mengidentifikasi waktu kedatangan gema dan karakteristik frekuensinya. Pada jarak nominal 1 m, waktu kedatangan gema berkisar antara 1,29–1,51 ms, dengan frekuensi gema 30,2–32,5 kHz dan estimasi jarak berdasarkan rata-rata time of flight (ToF) sebesar 1,02 m. Pada jarak nominal 3 m, waktu kedatangan gema berkisar antara 3,92–4,85 ms, dengan frekuensi gema 30,4–32,2 kHz dan estimasi jarak berdasarkan rata-rata ToF sekitar 3,10 m. Rata-rata amplitudo puncak sinyal gema yang tercatat masing-masing sebesar 0,80 V pada jarak 1 m dan 0,76 V pada jarak 3 m. Hasil menunjukkan bahwa perubahan jarak target dapat diidentifikasi melalui pergeseran waktu kedatangan gema, sedangkan frekuensi gema tetap berada di sekitar frekuensi operasi sonar. Secara teoretis, model sonar monostatik ideal dengan asumsi spherical spreading dan tanpa absorpsi medium menghasilkan tambahan kehilangan geometris dua arah sekitar 19,08 dB ketika jarak meningkat dari 1 m menjadi 3 m. Namun, nilai tersebut belum dapat diuji secara kuantitatif berdasarkan data pengukuran yang tersedia. Nilai TS absolut juga belum dapat ditentukan karena diperlukan kalibrasi sistem, level penerimaan akustik yang terkalibrasi, serta koreksi kehilangan propagasi pada lintasan pemancar–target dan target–penerima. Penelitian ini menunjukkan potensi analisis scalogram untuk mengidentifikasi karakteristik waktu–frekuensi gema dan mengestimasi jarak target, sekaligus memberikan dasar bagi pengukuran TS yang memerlukan kalibrasi dan validasi lebih lanjut.

Kata kunci: Hidroakustik, Intensitas Akustik, *Scalogram*, *Target Strength*

Abstract

On the Detection and Acoustic Response Characterization of an Underwater Sphere Target Using Sonar

Characterization of the acoustic response of underwater targets is an important aspect of sonar system development to support range estimation and target strength (TS) analysis. This study aims to implement a sonar system to detect a spherical target at different ranges and analyze its reflected signal characteristics as a basis for TS measurement. Experiments were conducted using an acoustic signal with a nominal frequency of 30 kHz and a target positioned at nominal ranges of 1 m and 3 m. The received signals were analyzed using a time–frequency representation in the form of scalograms to identify echo arrival times and frequency characteristics. At the nominal range of 1 m, the echo arrival times ranged from 1.29 to 1.51 ms, with echo frequencies of 30.2–32.5 kHz and an estimated range of 1.02 m based on the average time of flight (ToF). At the nominal range of 3 m, the echo arrival times ranged from 3.92 to 4.85 ms, with echo frequencies of 30.4–32.2 kHz and an estimated range of approximately 3.10 m based on the average ToF. The recorded mean peak echo amplitudes were 0.80 V at 1 m and 0.76 V at 3 m. The results indicate that changes in target

https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/ijoce
DOI: 10.14710/ijoce.v8i4.34700
Diterima/Received: 24-09-2026
Disetujui/Accepted: 19-10-2026

 ISSN: 2714-8726

range can be identified through shifts in echo arrival time, while the echo frequencies remain close to the sonar's operating frequency. Theoretically, an ideal monostatic sonar model assuming spherical spreading and neglecting medium absorption predicts an additional two-way geometrical transmission loss of approximately 19.08 dB when the range increases from 1 m to 3 m. However, this value could not be quantitatively validated using the available measurement data. Absolute TS could not be determined because system calibration, calibrated acoustic received levels, and transmission-loss corrections for the transmitter–target and target–receiver paths are required. This study demonstrates the potential of scalogram analysis for identifying the time–frequency characteristics of echoes and estimating target range, while providing a basis for future TS measurements that require further calibration and validation.

Keywords: *Hydroacoustic, Acoustic Intensity, Scalogram, Target Strength*

PENDAHULUAN

Gelombang akustik dapat merambat pada jarak yang relatif jauh di lingkungan laut, meskipun propagasinya dipengaruhi oleh atenuasi, multipath, dan variasi kanal (Stojanovic & Preisig, 2009; Naman & Abdelkareem, 2023; Boyra & Martinez, 2026). Sonar aktif mendeteksi target bawah air dengan cara mentransmisikan sinyal akustik dan memproses gema pantulan dari target tersebut (Liu *et al*., 2021; Matte *et al*., 2024; Wang *et al*., 2024; Dai *et al*., 2025). Sistem ini merupakan implementasi dari *Sound Navigation and Ranging* (SONAR), yang memanfaatkan waktu tempuh dan karakteristik gema untuk memperoleh informasi mengenai keberadaan dan posisi objek di dalam air (Das *et al*., 2026).

Untuk target tunggal, informasi yang dapat diperoleh dari sinyal pantulan antara lain jarak, amplitudo, frekuensi dominan, energi, *signal-to-noise ratio* (SNR), serta *Target Strength* (TS). Dalam terminologi hidroakustik, penyebutan TS digunakan untuk merepresentasikan kemampuan suatu target menghamburkan energi akustik kembali menuju transduser (Beranek & Mellow, 2012). Penelitian (MacLennan *et al*., 2002) menjelaskan bahwa pendekatan kuantitatif terhadap *backscattering* diperlukan agar hasil pengukuran dari target tunggal dapat dibandingkan secara konsisten dalam sistem akustik (Chu *et al*., 2015; Urmy *et al*., 2024). Secara umum, TS didefinisikan berdasarkan backscattering cross-section σ_{bs} dan dinyatakan dalam dB re 1 m² (MacLennan *et al*., 2002).

Kemampuan suatu target dalam menghamburkan kembali energi gelombang akustik ke arah sumber. Dalam pengujian dan kalibrasi sistem akustik bawah air, target berbentuk bola (*sphere*) banyak digunakan karena memiliki geometri simetris yang menyebabkan karakteristik hamburan monostatiknya relatif tidak dipengaruhi oleh perubahan orientasi target, berbeda dengan objek yang memiliki bentuk geometris kompleks. Penggunaan bola logam dengan karakteristik hamburan yang telah diketahui merupakan salah satu pendekatan standar dalam kalibrasi scientific *echosounder* (Ona *et al*., 2020; Le Bouffant *et al*., 2025).

Prinsip kalibrasi tersebut dilakukan dengan menempatkan *sphere* pada posisi yang terkontrol di dalam berkas akustik (*acoustic beam*), kemudian membandingkan nilai TS hasil pengukuran dengan nilai TS teoritis yang dihitung berdasarkan diameter, sifat material, frekuensi operasi, dan karakteristik medium perambatan (Ai *et al*., 2023). Namun demikian, akurasi pengukuran tetap dipengaruhi oleh sejumlah faktor, antara lain posisi target terhadap sumbu utama berkas akustik, konfigurasi pemasangan, serta interaksi akustik antara sphere dan material penggantungnya (Renfree *et al*., 2020; Gerb *et al*., 2023). Selain itu, pengukuran pada jarak dekat perlu mempertimbangkan karakteristik medan akustik transduser, khususnya perbedaan distribusi tekanan antara daerah *near-field* dan *far-field*, yang dapat memengaruhi interpretasi amplitudo gema dan penerapan koreksi propagasi (Erbe *et al*., 2022). Oleh karena itu, penggunaan sphere sebagai target referensi tidak secara otomatis menjamin bahwa amplitudo gema yang terukur dapat langsung dikonversi menjadi nilai TS absolut tanpa mempertimbangkan kalibrasi sensitivitas sistem, geometri pengukuran, dan koreksi propagasi akustik yang sesuai.

Pada eksperimen ini, evaluasi tidak hanya dilakukan berdasarkan amplitudo dalam domain waktu tetapi juga menggunakan representasi waktu–frekuensi berupa *magnitudo scalogram*. Pendekatan wavelet bermanfaat karena dapat menunjukkan lokasi suatu komponen frekuensi sekaligus waktu kemunculannya (Katsavrias *et al*., 2022; Shalby *et al*., 2025). Penelitian Torrence & Compo (1998) menjelaskan bahwa analisis wavelet mampu memberikan lokalisasi waktu–frekuensi sehingga sesuai digunakan untuk mengidentifikasi kejadian transien dalam sebuah sinyal. Representasi CWT dalam bentuk *wavelet scalogram* dapat membantu menunjukkan lokasi waktu kedatangan gema dan konsentrasi energi pada rentang frekuensi tertentu. Namun,

 ISSN: 2714-8726

magnitudo koefisien wavelet tidak secara otomatis merepresentasikan intensitas akustik absolut karena interpretasinya bergantung pada skala transformasi, pengolahan sinyal, dan kalibrasi sistem.

Penelitian sebelumnya telah menyelidiki kalibrasi akustik berbasis bola sphere, terutama efek *nearfield* terhadap respons frekuensi dan ketidakpastian kalibrasi. Namun, perhatian masih sedikit pada analisis waktu-frekuensi untuk mengkarakterisasi gema yang diterima dari target berbentuk bola sphere terhadap waktu kedatangan, frekuensi dominan, dan besarnya gema akibat perubahan jarak target. Selain itu, hubungan antara magnitudo scalogram dan TS absolut perlu dievaluasi secara hati-hati karena magnitudo hasil transformasi wavelet belum tentu setara dengan level akustik yang telah dikalibrasi. Perubahan respons gema pada jarak berbeda juga perlu ditafsirkan dengan mempertimbangkan kehilangan propagasi dan kemungkinan pengaruh konfigurasi pengukuran, termasuk kondisi *near-field* dan *far-field*.Tujuan penelitian adalah mendeteksi bola sphere pada jarak berbeda, menentukan jarak berdasarkan waktu kedatangan gema, menganalisis perubahan magnitudo sinyal terhadap jarak, serta membangun dasar penghitungan *Target Strength* setelah pengaruh propagasi dikompensasi. Dengan demikian, penelitian ini mengevaluasi potensi analisis waktu–frekuensi untuk deteksi dan estimasi jarak target, sekaligus sebagai dasar awal bagi pengembangan kuantifikasi TS yang memerlukan kalibrasi lebih lanjut.

MATERI DAN METODE

Rancangan eksperimen dan target akustik

Penelitian dilakukan melalui pengujian deteksi sonar terhadap target bola (*sphere*) berbahan tungsten karbida berdiameter 34 mm. Bentuk bola digunakan untuk mengurangi pengaruh perubahan orientasi target terhadap respons hamburan. Tungsten karbida merupakan salah satu material yang digunakan sebagai target acuan dalam pengukuran akustik. Akan tetapi, respons hamburannya tetap bergantung pada diameter, frekuensi, sifat material, dan kondisi medium (Demer *et al*., 2015). Pemilihan target bola sphere berdiameter 34 mm didasarkan pada ketersediaan target untuk pengujian eksperimental. Pada frekuensi nominal 30 kHz dan asumsi cepat rambat suara sebesar 1500 m/s, panjang gelombang akustik adalah 50 mm sehingga perbandingan diameter target terhadap panjang gelombang sebesar 0,68, dengan parameter ukuran akustik $ka \approx 2.14$

Target ditempatkan pada dua jarak nominal, yaitu 1 m dan 3 m. Pada setiap jarak dilakukan 10 kali pengukuran sehingga diperoleh total 20 rekaman sinyal. Setiap rekaman dianalisis untuk memperoleh waktu tempuh gema (*time of flight*, ToF), frekuensi dominan, magnitudo koefisien *Continuous Wavelet Transform* (CWT), dan estimasi jarak target.

ToF ditentukan dari selisih antara waktu acuan transmisi dan waktu kedatangan gema target. Jika keterlambatan tersebut belum diukur, ToF dilaporkan sebagai nilai yang belum dikoreksi terhadap keterlambatan sistem.

$$c\tau = R_{TX} + R_{RX}$$

dengan R_{TX} merupakan jarak TX–target dan R_{RX} merupakan jarak target–RX. Jarak ekuivalen satu arah dapat dinyatakan sebagai:

$$R_{eq} = \frac{c\tau}{2}$$

Nilai (R_eq) merupakan setengah panjang lintasan total. Nilai ini dapat diperlakukan sebagai pendekatan jarak target apabila pemisahan TX–RX cukup kecil dibandingkan jarak target dan geometri pengukuran mendukung pendekatan tersebut. Untuk konfigurasi lainnya, estimasi jarak dihitung berdasarkan posisi aktual TX, RX, dan target.

Parameter wavelet diperoleh dengan mentransformasikan sinyal tegangan hasil rekaman osiloskop menggunakan *Continuous Wavelet Transform* (CWT). Sebelum transformasi, offset DC dikoreksi dengan mengurangi setiap sampel terhadap rata-rata tegangan seluruh rekaman. Transformasi menghasilkan koefisien kompleks (W(t,f)), yang selanjutnya dinyatakan sebagai magnitudo melalui:

$$M(t,f) = |W(t,f)|$$

dengan $W(t,f)$ merupakan koefisien CWT pada waktu (t) dan frekuensi (f). Dengan masukan tegangan dalam volt dan normalisasi (L_1), magnitudo koefisien dinyatakan dalam volt. Magnitudo tersebut merupakan hasil transformasi sinyal tegangan, bukan pembacaan langsung amplitudo sesaat dari osiloskop.

Hasil pengukuran target bola sphere pada kedua jarak kemudian dibandingkan untuk mengevaluasi perubahan karakteristik respons akustik terhadap jarak target. Selanjutnya, data sinyal dianalisis dalam domain

 ISSN: 2714-8726

waktu–frekuensi menggunakan *Continuous Wavelet Transform* (CWT) dan direpresentasikan dalam bentuk *wavelet scalogram* menggunakan MATLAB (Zhang *et al*., 2023). Pendekatan CWT memungkinkan karakteristik temporal dan spektral sinyal dianalisis secara simultan dan telah diterapkan pada pemrosesan sinyal akustik bawah air menggunakan MATLAB (Guerrero-Chilabert *et al*., 2024). Sinyal yang ditransmisikan mempunyai frekuensi 30kHz. Pada data pengujian 3m digunakan pulsa 9 siklus pada frekuensi 30 kHz. Untuk pulsa sembilan siklus, durasi sinyal secara teoritis adalah:

$$\tau = \frac{9}{30000} s = 0.0003 = 0.3ms$$

Dengan asumsi kecepatan suara sebesar 1500 m/s, panjang pulsa akustiknya sekitar:

$$L = c\tau = 1500 \times 0.0003 = 0.45m$$

sedangkan resolusi jarak berdasarkan panjang pulsa secara sederhana sekitar:

$$\Delta R = \frac{c\tau}{2}$$

Sinyal tegangan keluaran transduser penerima yang direkam menggunakan osiloskop dalam satuan volt (V) selanjutnya dikoreksi terhadap offset DC dan dianalisis menggunakan *Continuous Wavelet Transform* (CWT). Hasil transformasi ditampilkan sebagai *wavelet scalogram*, dengan sumbu horizontal merepresentasikan waktu, sumbu vertikal menunjukkan frekuensi, dan skala warna menunjukkan magnitudo koefisien CWT pada setiap lokasi waktu–frekuensi (Ahmed *et al*., 2024). Magnitudo tersebut merupakan hasil transformasi sinyal tegangan, bukan amplitudo sesaat yang dibaca langsung dari osiloskop. Jarak target ditentukan menggunakan *time of flight*:

$$R = \frac{c\Delta t}{2}$$

dengan (R) merupakan jarak target, (c) adalah kecepatan suara di dalam air, dan (Δt) adalah waktu tempuh gelombang pergi-pulang.

Karakteristik Pulsa dan Estimasi Jarak

Sinyal transmisi menggunakan frekuensi nominal 30 kHz. Pada pengujian jarak 3 m, pulsa yang digunakan terdiri atas sembilan siklus. Durasi pulsa secara teoretis dihitung menggunakan persamaan:

$$\tau = \frac{N}{f}$$

dengan (τ) adalah durasi pulsa (s), (N) adalah jumlah siklus, dan (f) adalah frekuensi sinyal (Hz). Untuk pulsa sembilan siklus pada frekuensi 30 kHz, durasi pulsa diperoleh sebesar:

$$\tau = \frac{9}{30000} = 0{,}0003 \text{ s} = 0{,}3 \text{ ms}$$

Dengan asumsi kecepatan suara dalam air sebesar 1500 m/s, panjang pulsa akustik dihitung menggunakan:

$$L = c\tau$$

sehingga:

$$L = 1500 \times 0{,}0003 = 0{,}45 \text{ m}$$

Resolusi jarak berdasarkan pendekatan sederhana terhadap panjang pulsa dinyatakan sebagai:

$$\Delta R = \frac{c\tau}{2}$$

Nilai tersebut merupakan estimasi sederhana berdasarkan durasi pulsa, bukan hasil pengukuran resolusi aktual sistem. Penerapannya juga perlu mempertimbangkan karakteristik transduser, bentuk pulsa, dan kemampuan memisahkan pulsa transmisi dari gema target. Jarak target diestimasi berdasarkan waktu tempuh sinyal akustik. Untuk konfigurasi dengan lintasan pergi dan kembali yang relatif sama, estimasi jarak dinyatakan sebagai:

$$R \approx \frac{c\Delta t}{2}$$

dengan (R) adalah estimasi jarak target (m), (c) adalah kecepatan suara dalam air (m/s), dan (Δt) adalah selang waktu antara pulsa transmisi dan kedatangan gema (s). Dalam penelitian ini, kecepatan suara diasumsikan sebesar 1500 m/s. Karena transduser TX dan RX terpisah, waktu tempuh yang terukur secara fisik merupakan gabungan waktu rambat dari TX menuju target dan dari target menuju RX. Dengan demikian,

 ISSN: 2714-8726

penggunaan persamaan di atas merupakan pendekatan yang mengasumsikan kedua lintasan memiliki panjang yang relatif sama.

Pengolahan sinyal dan analisis wavelet

Sinyal hasil penerimaan dianalisis dalam domain waktu dan frekuensi untuk mengidentifikasi karakteristik gema target. Analisis wavelet digunakan untuk merepresentasikan perubahan karakteristik sinyal terhadap waktu dan frekuensi, sedangkan hasilnya disajikan dalam bentuk scalogram (X. Zhang *et al*., 2023; Guerrero-Chilabert *et al*., 2024). Pada scalogram, sumbu horizontal merepresentasikan waktu dan sumbu vertikal merepresentasikan frekuensi. Intensitas warna menunjukkan besar koefisien wavelet pada setiap lokasi waktu–frekuensi (Ahmed *et al*., 2024). Pola tersebut digunakan untuk mengidentifikasi lokasi puncak koefisien wavelet dan frekuensi yang berkaitan dengan respons gema.

Puncak koefisien wavelet dibedakan dari amplitudo puncak sinyal gema yang dinyatakan dalam volt (V). Scalogram pada setiap pengukuran dinormalisasi secara terpisah terhadap nilai maksimum pengukuran tersebut. Oleh karena itu, scalogram digunakan untuk mengamati pola waktu–frekuensi dalam masing-masing pengukuran dan tidak digunakan secara langsung untuk membandingkan amplitudo absolut antara pengukuran pada jarak 1 m dan 3 m. Apabila analisis energi wavelet dilakukan untuk membandingkan respons gema, energi dihitung pada jendela waktu–frekuensi yang mencakup gema target dengan menggunakan koefisien wavelet hasil pengolahan yang konsisten. Secara umum, energi wavelet pada jendela analisis dapat dirumuskan sebagai:

$$E_W(F,T) = \sum_{f\in F}\sum_{t\in T}|W(t,f)|^2$$

dengan $E_W(F,T)$ adalah jumlah kuadrat magnitudo koefisien wavelet pada jendela analisis, $(W(t,f))$ adalah koefisien wavelet pada waktu (t) dan frekuensi (f), sedangkan (F) dan (T) masing-masing menunjukkan rentang frekuensi dan waktu yang digunakan untuk mengisolasi gema target. Persamaan ini merupakan bentuk penjumlahan energi diskret yang perlu disesuaikan dengan definisi, penskalaan, dan normalisasi koefisien wavelet yang digunakan. Jika energi wavelet dihitung secara konsisten pada kedua jarak, perubahan level energi relatif dapat dinyatakan sebagai:

$$\Delta L_W = 10\log_{10}\left(\frac{E_{W,3\mathrm{m}}}{E_{W,1\mathrm{m}}}\right)$$

dengan $(E_{W,3\mathrm{m}})$ dan $(E_{W,1\mathrm{m}})$ masing-masing merupakan energi wavelet pada jendela gema untuk pengukuran jarak nominal 3 m dan 1 m. Nilai negatif menunjukkan energi wavelet pada pengukuran 3 m lebih rendah daripada pengukuran 1 m, sedangkan nilai positif menunjukkan kondisi sebaliknya. Perbandingan ini merupakan level relatif berbasis energi wavelet dan tidak secara langsung menyatakan perubahan intensitas akustik absolut atau *target strength* (TS). Persamaan energi wavelet dan perubahan level relatif tersebut hanya diterapkan apabila koefisien transformasi, jendela analisis, dan prosedur pengolahan tersedia serta dapat dipastikan konsisten pada seluruh rekaman.

Parameter respons dan analisis statistik

Parameter yang dianalisis meliputi waktu kedatangan gema (ToF), estimasi jarak target, frekuensi gema, dan amplitudo puncak sinyal gema. Estimasi jarak dihitung dari ToF menggunakan kecepatan suara yang diasumsikan sebesar 1500 m/s dan pendekatan lintasan pergi–kembali dengan panjang yang relatif sama. Untuk setiap jarak nominal, hasil dari 10 pengukuran diringkas menggunakan nilai rata-rata dan simpangan baku. Rata-rata dihitung menggunakan:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

sedangkan simpangan baku sampel dihitung menggunakan:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

dengan (x_i) adalah nilai pada pengukuran ke-(i), $(\bar{x})$ adalah nilai rata-rata, dan (n) adalah jumlah pengukuran. Dalam penelitian ini, setiap kelompok jarak terdiri atas 10 pengukuran. Analisis statistik pada tahap ini bersifat

 ISSN: 2714-8726

deskriptif. Perbedaan nilai rata-rata antara kedua jarak digunakan untuk menggambarkan perubahan parameter pengukuran, bukan sebagai bukti signifikansi statistik.

Dasar Teoretis Kehilangan Propagasi dan *Target strength*

Kehilangan propagasi akustik terdiri atas kehilangan akibat penyebaran geometris gelombang dan absorpsi oleh medium. Pada pendekatan *spherical spreading*, kehilangan transmisi satu arah dapat dinyatakan sebagai (Lurton, 2010):

$$TL(R) = 20\log_{10}\left(\frac{R}{R_0}\right) + \alpha(R - R_0)$$

dengan (R) adalah jarak rambat, (R_0) adalah jarak referensi, dan (α) adalah koefisien absorpsi akustik dalam satuan dB per satuan jarak. Untuk $(R_0 = 1)$ m, persamaan tersebut dapat disederhanakan menjadi $TL(R) = 20\log_{10}(R) + \alpha R$, dengan asumsi bahwa koefisien absorpsi dinyatakan dalam dB/m dan R dinyatakan dalam meter. Pada model sonar monostatik, posisi transduser pemancar (*transmitter*, TX) dan penerima (*receiver*, RX) dianggap berimpit sehingga lintasan transmisi dan penerimaan memiliki panjang yang sama. Oleh karena itu, kehilangan propagasi dua arah dapat dinyatakan sebagai $2TL$. Model ini digunakan sebagai acuan teoretis ideal dalam penelitian, bukan sebagai representasi langsung konfigurasi eksperimen, karena transduser TX dan RX yang digunakan ditempatkan secara terpisah. Pada konfigurasi bistatik tersebut, kehilangan propagasi total dihitung dengan mempertimbangkan lintasan TX–target dan target–RX secara terpisah, sehingga kehilangan transmisi total dapat dinyatakan sebagai penjumlahan kehilangan transmisi pada kedua lintasan. Untuk konfigurasi bistatik, kehilangan propagasi perlu dihitung berdasarkan lintasan TX–target dan target–RX secara terpisah. Dengan mengabaikan absorpsi medium, kehilangan geometris dua arah pada model monostatik ideal dapat dibandingkan untuk jarak 1 m dan 3 m:

$$\Delta(2TL) = 40\log_{10}\left(\frac{R_2}{R_1}\right)$$

Untuk $(R_1 = 1)$ m dan $(R_2 = 3)$ m:

$$\Delta(2TL) = 40\log_{10}(3) \approx 19{,}08 \text{ dB}$$

Dalam pendekatan ideal tersebut, intensitas gema berbanding terbalik dengan pangkat empat jarak:

$$I_{\text{echo}} \propto \frac{1}{R^4}$$

sehingga:

$$\frac{I_{3,\text{m}}}{I_{1,\text{m}}} = \left(\frac{1}{3}\right)^4 = \frac{1}{81}$$

Hasil tersebut merupakan prediksi ideal untuk model penyebaran geometris dua arah dengan asumsi yang dinyatakan di atas, bukan besaran yang diukur langsung dalam penelitian ini. *Target strength* (TS) merupakan parameter hamburan akustik target yang berbeda dari amplitudo gema yang diterima. Dalam formulasi sonar aktif monostatik, menurut Urick, 1983 dan Lurton, 2010 persamaan sonar dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$RL = SL - 2TL + TS$$

sehingga:

$$TS = RL - SL + 2TL$$

dengan (RL) adalah *received level*, (SL) adalah *source level*, dan (TL) adalah *transmission loss*. Dengan mengasumsikan spherical spreading dan absorpsi akustik selama propagasi, kehilangan transmisi dua arah dapat dinyatakan sebagai:

$$2TL = 40\log_{10}\left(\frac{R}{R_0}\right) + 2\alpha R$$

Dengan demikian, persamaan TS menjadi:

$$TS = RL - SL + 40log_{10}(R) + 2_{\propto}R$$

dengan (R) merupakan jarak antara transduser dan target, $(R_0 = 1\,\text{m})$ merupakan jarak referensi, dan (α)merupakan koefisien absorpsi akustik. Apabila parameter sistem, kondisi propagasi, dan karakteristik target tetap, nilai TS yang diperoleh melalui pengukuran terkalibrasi secara ideal relatif tidak bergantung pada jarak pengukuran, sesuai dengan (Urick, 1983); (Lurton, 2010). Oleh karena itu, persamaan ini digunakan sebagai landasan teoretis untuk mengestimasi TS berdasarkan pengukuran akustik. Namun, penerapannya pada

 ISSN: 2714-8726

konfigurasi bistatik, yaitu ketika transduser pemancar (transmitter, TX) dan penerima (*receiver*, RX) berada pada posisi terpisah, memerlukan perhitungan kehilangan transmisi secara terpisah untuk lintasan TX–target dan target–RX. Dengan demikian, estimasi TS harus memperhitungkan kehilangan propagasi pada kedua lintasan serta menggunakan nilai SL dan RL yang telah dikalibrasi agar hasil pengukuran dapat diinterpretasikan secara kuantitatif.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Deteksi dan Karakterisasi Respons Akustik Target Sphere

Hasil pengukuran target pada jarak nominal 1 m disajikan pada Tabel 1. Dari 10 pengukuran, waktu kedatangan gema (*time of flight*, ToF) berkisar antara 1,29–1,51 ms, dengan rata-rata 1,36 ms dan simpangan baku 0,06 ms. Estimasi jarak berdasarkan rata-rata ToF adalah 1,02 m, dengan simpangan baku 0,05 m. Nilai tersebut mendekati jarak nominal target sebesar 1 m, dengan selisih rata-rata sekitar 0,02 m atau 2%. Frekuensi gema pada pengukuran 1 m berkisar antara 30,2–32,5 kHz, dengan rata-rata 31,42 kHz. Amplitudo puncak sinyal gema yang tercatat pada tabel berkisar antara 0,68–0,91 V, dengan rata-rata 0,80 V. Nilai-nilai tersebut menggambarkan variasi parameter sinyal pada sepuluh pengukuran.

Konsentrasi magnitudo koefisien wavelet tertinggi pada pengukuran target sphere di jarak nominal 1 m teridentifikasi pada rentang frekuensi 30,2–32,5 kHz (Gambar 1). Rentang tersebut menunjukkan sebaran frekuensi tempat puncak respons gema teramati pada hasil pengukuran, bukan berarti seluruh frekuensi di dalam rentang tersebut memiliki energi maksimum yang sama. Area berwarna kuning pada scalogram menunjukkan magnitudo koefisien wavelet yang relatif lebih tinggi dibandingkan area lainnya. Temuan ini menunjukkan bahwa respons gema dominan berada di sekitar frekuensi nominal transmisi sonar, yaitu 30 kHz.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa estimasi jarak berdasarkan rata-rata ToF adalah 1,02 m, mendekati jarak nominal target sebesar 1 m, dengan selisih sekitar 0,02 m atau 2%.

Hasil pengukuran target pada jarak nominal 3 m disajikan pada Tabel 2. Waktu kedatangan gema berkisar antara 3,92–4,85 ms, dengan rata-rata berdasarkan data mentah sebesar 4,12 dan simpangan baku sekitar 0,29 ms. Estimasi jarak berdasarkan rata-rata ToF adalah sekitar 3,10 m, atau 3,11 m jika menggunakan nilai rata-rata jarak estimasi pada masing-masing pengukuran. Hasil ini relatif dekat dengan jarak nominal 3 m, dengan selisih sekitar 0,10–0,11 m. Frekuensi gema berkisar antara 30,4–32,2 kHz, dengan rata-rata 31,38 kHz. Amplitudo puncak sinyal gema yang tercantum pada Tabel 2 berkisar antara 0,66–0,83 V, dengan rata-rata 0,76 V.

Hasil analisis *Continuous Wavelet Transform* (CWT) pada Gambar 2 memperlihatkan adanya konsentrasi magnitudo gema yang dominan pada waktu 4,1210 ms dengan frekuensi puncak 31,606 kHz. Distribusi magnitudo pada scalogram menunjukkan bahwa komponen gema utama terlokalisasi pada frekuensi sekitar 30–32 kHz, yang berdekatan dengan frekuensi operasi sonar sebesar 30 kHz. Berdasarkan skala warna yang ditampilkan, magnitudo koefisien CWT berada pada rentang sekitar 0–0,95 V, dengan daerah puncak gema diperkirakan memiliki magnitudo sekitar 0,8–0,95 V. Berdasarkan perhitungan time of flight menggunakan asumsi kecepatan suara 1.500 m/s dan pendekatan propagasi dua arah, waktu puncak tersebut menghasilkan estimasi jarak target sebesar 3,09 m, dengan selisih sekitar 0,09 m terhadap jarak nominal 3 m. Hasil ini menunjukkan bahwa metode CWT mampu mengidentifikasi waktu kedatangan, frekuensi dominan, dan distribusi magnitudo gema target bola (sphere) dalam domain waktu–frekuensi. Meskipun demikian, magnitudo koefisien CWT yang ditampilkan dalam satuan V masih memerlukan verifikasi normalisasi transformasi sebelum dapat digunakan sebagai representasi tegangan fisik atau dasar perhitungan intensitas akustik dan *target strength* secara absolut. Terlihat pada Gambar 2. Posisi sinyal gema bergeser dari posisi sebelumnya, dengan nilai rata - rata sekitar 3,92–4,85 ms:

Dengan demikian estimasi berdasarkan sinyal menghasilkan jarak sekitar 3,09 m**,** cukup dekat dengan jarak nominal target 3 m. Ringkasan hasil dapat dinyatakan sebagai berikut (Tabel 3). Perbedaan waktu kedatangan antara kedua pengukuran menunjukkan bahwa sistem mampu membedakan perubahan jarak target melalui parameter *time of flight*. Penurunan magnitudo *scalogram* pada target yang lebih jauh juga menunjukkan kecenderungan pelemahan respons gema akibat peningkatan jarak propagasi. Namun, karena magnitudo *scalogram* belum dikalibrasi terhadap parameter akustik absolut, perbedaan magnitudo tersebut digunakan sebagai indikator respons relatif sistem dan belum dapat secara langsung diinterpretasikan sebagai perbedaan TS.

 ISSN: 2714-8726

Tabel 1. Hasi Pengukuran Target Pada Jarak 1m

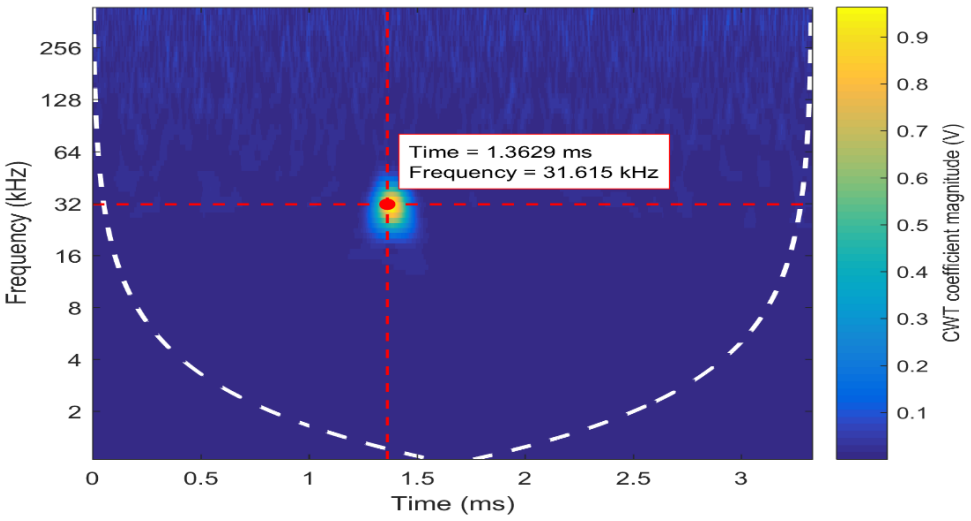
No	Jarak Aktual (m)	ToF (ms)	Jarak Estimasi (m)	Frek (kHz)	Gema (V)
1	1	1.34	1.01	30.9	0.86
2	1	1.51**	1.13	31.7	0.82
3	1	1.36	1.02	30.5	0.91**
4	1	1.33	1.00	32.1	0.79
5	1	1.38	1.04	31.3	0.68*
6	1	1.29*	0.97	32.5**	0.83
7	1	1.35	1.01	30.8	0.72
8	1	1.32	0.99	31.9	0.88
9	1	1.42	1.07	30.2*	0.78
10	1	1.3	0.98	32.3	0.77
Mean	1	1.36	1.02	31.42	0.80
SD	0	0.06	0.05	0.80	0.07

Keterangan: nilai minimum = *, nilai maksimum = **

Tabel 2. Hasil Pengukuran Target Pada Jarak 3m

No	Jarak Aktual (m)	ToF (ms)	Jarak Estimasi (m)	Frek Gema (kHz)	Gema (v)
1	3	3,92*	2,94	31,4	0,82
2	3	3,96	2,97	30,8	0,79
3	3	4,2	3,15	32,1	0,82
4	3	4,04	3,03	31	0,73
5	3	4,08	3,06	31,6	0,69
6	3	4,42	3,32	30,4*	0,71
7	3	3,98	2,99	32,1	0,75
8	3	4,85**	3,64	32,2**	0,66*
9	3	4	3,00	30,6	0,83**
10	3	3,94	2,96	31,5	0,8
Mean	3	4,12	3,11	31,38	0,76
SD	0	0,29	0,22	0,66	0,06

Keterangan: nilai minimum = * , nilai maksimum = **

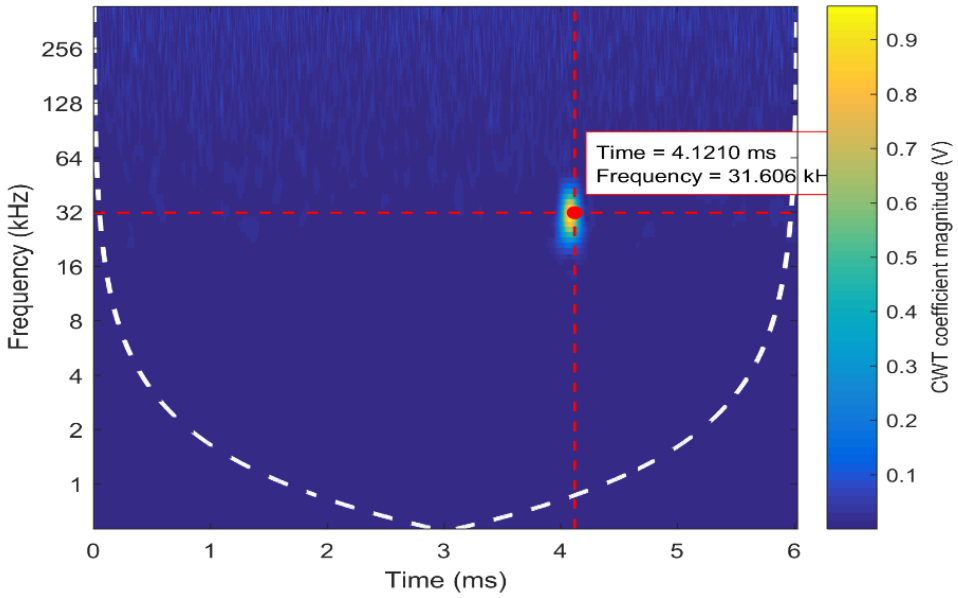


Gambar 1. Magnitudo scalogram pantulan target sphere pada jarak sekitar 1 m.

 ISSN: 2714-8726

Tabel 3. Ringkasan Hasil

Parameter	Pengukuran 1 m	Pengukuran 3 m
Waktu puncak sinyal gema	≈ 1,36 ms	≈ 4,12 ms
Rentang waktu sinyal gema	1,29-1,51 ms	3,92-4,85 ms
Estimasi jarak sonar	≈ 1,02 m	≈ 3,09 m
Frekuensi dominan	≈ 31,6 kHz	≈ 31,6 kHz
Magnitudo scalogram	≈ 0.8	≈ 0,76
Karakter gema	Sangat kuat dan terlokalisasi	Tetap jelas tetapi relatif lebih lemah



Gambar 2. Magnitudo scalogram pantulan target sphere pada jarak nominal 3 m.

Analisis *Scalogram* dan *Cone of Influence*

Garis putih putus-putus yang terlihat pada kedua *scalogram* dapat diinterpretasikan sebagai *cone of influence* atau batas daerah yang berpotensi mengalami *edge effect* pada analisis wavelet. Dalam analisis wavelet, hasil yang berada terlalu dekat dengan bagian awal atau akhir rekaman harus dianalisis lebih hati-hati karena keterbatasan panjang data dapat memengaruhi nilai transformasi. Konsep tersebut merupakan aspek penting dalam interpretasi *scalogram* menurut (Torrence & Compo, 1998). Pada kedua hasil pengukuran, konsentrasi utama energi sekitar 30 kHz tidak berada tepat pada ujung rekaman. Karena itu, puncak yang digunakan untuk identifikasi target memiliki dasar yang lebih kuat dibandingkan apabila sinyal muncul pada wilayah yang sangat dekat dengan batas waktu pengamatan.

Penelitian mengenai optimasi matching layer transduser akustik bawah air juga menunjukkan bahwa jenis sinyal eksitasi, khususnya pulsa pendek, memengaruhi karakteristik bandwidth dan sensitivitas transduser (Optimization of the Matching Layer for High-Frequency Underwater Acoustic Transducers, 2023). Selanjutnya, Kurdila *et al*. (2022) membuktikan bahwa fenomena ringdown pada objek elastis dapat menghasilkan respons akustik berkepanjangan yang dapat dipisahkan dari komponen sinyal berdurasi pendek melalui analisis pemrosesan sinyal. Zhang *et al*. (2023b) menjelaskan bahwa propagasi multipath dan reverberasi dapat mengubah karakteristik temporal maupun spektral sinyal sonar yang diterima.

Penelitian Ji *et al*. (2024) juga memperlihatkan bahwa karakteristik respons elektroakustik transduser bergantung pada rentang frekuensi operasinya. Lebih lanjut, Gou *et al*. (2026) menunjukkan bahwa reverberasi merupakan komponen penting dalam pengolahan sinyal sonar aktif dan dapat dibedakan dari echo target melalui analisis domain waktu-frekuensi. Dengan demikian, keberadaan energi berintensitas rendah pada rentang 4–16 kHz dapat dipandang sebagai komponen sekunder yang tidak secara langsung menggeser

 ISSN: 2714-8726

identifikasi puncak energi utama pada sekitar 30 kHz. Namun, penentuan sumber fisik komponen tersebut masih memerlukan verifikasi melalui pengukuran respons transduser, pengamatan sinyal tanpa target, serta evaluasi kondisi propagasi dan refleksi lingkungan (Deng *et al*., 2014).

Pengaruh Jarak terhadap Magnitudo dan Intensitas

Rata-rata amplitudo puncak sinyal gema pada jarak nominal 1 m adalah 0,80 V, sedangkan pada jarak nominal 3 m adalah 0,76 V. Secara deskriptif, nilai rata-rata tersebut menunjukkan respons tegangan puncak yang lebih rendah pada pengukuran jarak 3 m. Meskipun demikian, rentang nilai kedua kelompok masih saling tumpang tindih, yaitu 0,68–0,91 V pada jarak 1 m dan 0,66–0,83 V pada jarak 3 m. Perbedaan tersebut belum dapat diatribusikan secara kuantitatif hanya kepada kehilangan propagasi. Interpretasinya perlu mempertimbangkan konsistensi tegangan transmisi, pengaturan receiver dan osiloskop, sensitivitas transduser, posisi target terhadap sumbu akustik, kondisi lingkungan, dan kemungkinan perubahan respons sistem selama pengukuran.

Selain itu, scalogram setiap pengukuran dinormalisasi secara terpisah. Oleh karena itu, perbandingan amplitudo antarkelompok tidak dilakukan berdasarkan intensitas warna atau nilai koefisien wavelet pada scalogram. Perbandingan tersebut menggunakan nilai amplitudo puncak sinyal gema pada tabel, dengan catatan bahwa asal dan prosedur penentuan amplitudo tersebut harus dipastikan konsisten. Perbedaan rata-rata amplitudo puncak yang teramati menunjukkan kecenderungan respons tegangan yang lebih rendah pada jarak 3 m, tetapi belum cukup untuk menyimpulkan besarnya pelemahan gema akibat jarak. Kesimpulan tersebut memerlukan pengukuran dengan pengaturan akuisisi yang konsisten serta definisi amplitudo yang dapat dibandingkan secara langsung.

Energi wavelet dapat digunakan sebagai parameter tambahan untuk membandingkan respons gema apabila koefisien transformasi dan prosedur pengolahan yang konsisten tersedia. Namun, energi wavelet dan perubahan level relatifnya belum dilaporkan sebagai hasil penelitian ini karena nilai koefisien yang diperlukan dan rincian pengolahannya belum dapat diverifikasi. Perbandingan respons gema pada jarak 1 m dan 3 m memerlukan konsistensi pengaturan akuisisi, termasuk tegangan transmisi, pengaturan gain penerima, sensitivitas sistem, dan prosedur pengolahan sinyal. Penggunaan automatic gain control (AGC), jika ada, juga perlu diperhitungkan karena dapat mengubah hubungan antara amplitudo sinyal yang diterima dan tegangan keluaran. Selain itu, normalisasi yang dilakukan secara terpisah pada masing-masing scalogram membatasi penggunaannya untuk perbandingan amplitudo absolut. Oleh karena itu, interpretasi pengaruh jarak pada penelitian ini dibatasi pada perbedaan deskriptif amplitudo puncak yang tercatat, bukan pada besarnya kehilangan intensitas akustik secara absolut.

Perbandingan Hasil Pengukuran dengan Teori Propagasi

Pada model propagasi akustik ideal dengan *spherical spreading*, peningkatan jarak rambat menyebabkan kehilangan geometris yang lebih besar. Untuk model sonar monostatik dengan jarak 1 m dan 3 m, perbedaan kehilangan geometris dua arah secara teoretis sebesar sekitar 19,08 dB apabila absorpsi medium diabaikan. Nilai tersebut merupakan prediksi teoretis yang mengasumsikan karakteristik sistem dan target tetap (Urick, 1983; Lurton, 2010). Pada penelitian ini, transduser pemancar (TX) dan penerima (RX) merupakan komponen terpisah. Oleh sebab itu, nilai 19,08 dB digunakan sebagai pembanding teoretis ideal, bukan prediksi kuantitatif langsung untuk geometri eksperimen. Kehilangan propagasi aktual perlu memperhitungkan panjang lintasan TX–target dan target–RX secara terpisah.

Hasil analisis scalogram menunjukkan bahwa puncak respons gema pada jarak nominal 1 m teridentifikasi pada waktu 1,3629 ms dengan frekuensi sekitar 31,615 kHz, sedangkan pada jarak nominal 3 m puncak teridentifikasi pada waktu 4,1210 ms dengan frekuensi sekitar 31,606 kHz. Waktu tersebut merupakan waktu kemunculan puncak respons yang teridentifikasi pada scalogram dan perlu dibedakan dari nilai rata-rata *time of flight* (ToF) yang diperoleh berdasarkan sepuluh kali pengukuran, yaitu sekitar 1,36 ms pada jarak 1 m dan 4,12 ms pada jarak 3 m. Konsentrasi respons pada kedua scalogram berada di sekitar frekuensi 31 kHz, yang berdekatan dengan frekuensi nominal transmisi sonar sebesar 30 kHz. Hasil pengukuran pada tabel menunjukkan rata-rata amplitudo puncak sinyal gema sebesar 0,80 V pada jarak 1 m dan 0,76 V pada jarak 3 m. Secara deskriptif, nilai tersebut menunjukkan respons tegangan puncak yang lebih rendah pada jarak 3 m. Namun, perbedaan ini belum cukup untuk menyimpulkan besarnya kehilangan propagasi akibat peningkatan jarak.

 ISSN: 2714-8726

Keterbatasan Estimasi *Target strength* dan Faktor Eksperimental

Target strength (TS) merupakan karakteristik hamburan akustik target yang berbeda dari amplitudo gema yang diterima. Amplitudo gema dipengaruhi oleh karakteristik target, jarak dan geometri propagasi, respons transduser, serta pengaturan sistem akuisisi. Sebaliknya, estimasi TS memerlukan koreksi kehilangan propagasi dan informasi level akustik yang terkalibrasi (MacLennan *et al*., 2002); (Foote *et al*., 2007). Nilai TS absolut dalam dB belum dapat dihitung secara valid hanya berdasarkan tabel amplitudo dan gambar scalogram pada penelitian ini. Data yang tersedia belum memberikan informasi yang cukup untuk menentukan *source level*, sensitivitas transduser, dan level penerimaan terkalibrasi secara lengkap. Selain itu, konfigurasi TX–RX terpisah mengharuskan kehilangan propagasi pada lintasan pemancar–target dan target–penerima diperhitungkan secara terpisah.

Faktor eksperimental lain yang dapat memengaruhi respons gema meliputi posisi sphere terhadap sumbu akustik, material dan diameter tali penggantung, karakteristik transduser, serta kondisi lingkungan. Posisi target yang tidak konsisten terhadap *acoustic beam* dapat mengubah amplitudo gema. Tali penggantung juga berpotensi menghasilkan pantulan atau hamburan tambahan yang memengaruhi sinyal penerimaan (Renfree *et al*., 2020). Oleh karena itu, posisi target, konfigurasi penggantungan, dan kondisi pengukuran perlu dikendalikan dan didokumentasikan. Pengukuran pada jarak dekat juga perlu mempertimbangkan karakteristik medan akustik transduser. Pendekatan jarak Rayleigh dapat digunakan sebagai pemeriksaan awal:

$$R_N = \frac{D^2}{4\lambda}$$

dengan (D) adalah diameter aperture aktif transduser dan (λ) adalah panjang gelombang. Untuk $D = 0{,}05$ m dan frekuensi 30 kHz, panjang gelombang dengan asumsi kecepatan suara 1500 m/s adalah sekitar 0,05 m. Berdasarkan persamaan tersebut, diperoleh:

$$R_N = \frac{0{,}05^2}{4(0{,}05)} = 0{,}0125 \text{ m}$$

Sebagai pemeriksaan tambahan, kriteria Fraunhofer dapat dinyatakan sebagai:

$$R_F = \frac{2D^2}{\lambda}$$

yang menghasilkan $(R_F = 0{,}10)$ m untuk parameter tersebut. Kedua nilai ini merupakan estimasi geometris awal dan tidak dengan sendirinya membuktikan bahwa sistem bebas dari pengaruh medan dekat atau efek transien. Penentuan wilayah medan akustik yang sesuai juga bergantung pada karakteristik aperture aktif dan respons transduser. Dengan mempertimbangkan keterbatasan tersebut, hasil penelitian ini digunakan untuk menunjukkan kemampuan mendeteksi gema sphere, mengestimasi jarak target secara pendekatan, dan mengidentifikasi karakteristik frekuensi gema. Pengukuran TS absolut dan evaluasi kuantitatif kehilangan propagasi memerlukan kalibrasi sistem, dokumentasi geometri TX–RX, serta pengukuran dan pengolahan sinyal yang konsisten.

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem sonar dengan frekuensi operasi nominal 30 kHz mampu mendeteksi target bola (*sphere*) berbahan tungsten karbida pada dua jarak pengujian, yaitu 1 m dan 3 m. Berdasarkan pengukuran *time of flight* (ToF), rata-rata waktu kedatangan gema masing-masing adalah 1,36 ms dan sekitar 4,12 ms, dengan estimasi jarak berdasarkan asumsi kecepatan suara 1.500 m/s sebesar 1,02 m dan sekitar 3,10 m. Hasil ini menunjukkan bahwa perubahan jarak target dapat diidentifikasi melalui perubahan waktu kedatangan gema, sedangkan frekuensi gema tetap berada di sekitar frekuensi operasi nominal sonar. Analisis waktu–frekuensi yang disajikan dalam bentuk *scalogram* menunjukkan konsentrasi respons gema pada rentang frekuensi sekitar 30–32 kHz. Puncak respons pada *scalogram* teridentifikasi pada waktu 1,3629 ms dengan frekuensi 31,615 kHz untuk jarak nominal 1 m, serta pada waktu 4,1210 ms dengan frekuensi 31,606 kHz untuk jarak nominal 3 m. Hasil ini menunjukkan bahwa analisis wavelet dan representasi *scalogram* dapat digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik waktu–frekuensi gema target pada kedua jarak pengujian. Namun, efektivitasnya belum dapat dinyatakan lebih unggul daripada metode pengolahan sinyal lainnya karena penelitian ini tidak melakukan perbandingan dengan metode alternatif, seperti deteksi *envelope* atau *matched filtering*. Pengaruh jarak terhadap amplitudo puncak sinyal gema terlihat secara deskriptif dari nilai rata-rata 0,80 V pada jarak 1 m dan 0,76 V pada jarak 3 m. Akan tetapi, perbedaan tersebut

 ISSN: 2714-8726

belum dapat digunakan untuk mengukur secara kuantitatif kehilangan propagasi akustik karena kalibrasi level penerimaan dan konsistensi pengolahan sinyal belum sepenuhnya terverifikasi. Selain itu, normalisasi *scalogram* secara terpisah membatasi penggunaan magnitudo koefisien wavelet untuk membandingkan amplitudo absolut antarpengukuran. Penentuan *target strength* (TS) absolut belum dapat dilakukan berdasarkan data yang tersedia. Pengukuran TS memerlukan sistem akustik yang terkalibrasi, data level penerimaan (*received level*) yang tidak dinormalisasi dan memiliki acuan kalibrasi, informasi level sumber (*source level*), serta koreksi kehilangan propagasi pada lintasan TX–target dan target–RX. Setelah koreksi propagasi dan kalibrasi dilakukan secara tepat, nilai TS untuk target yang sama diharapkan relatif konsisten pada kondisi pengukuran yang sebanding. Dengan demikian, pengujian pada jarak 1 m dan 3 m memberikan dasar untuk mengevaluasi kemampuan deteksi dan estimasi jarak sonar, sekaligus menjadi tahap awal bagi evaluasi kuantitatif respons akustik dan kalibrasi sistem pada penelitian selanjutnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai dengan anggaran penelitian dosen Lembaga Penelitian dan Pengabdian Pada Masyarakat (LPPM) Universitas Pertahanan Republik Indonesia berdasarkan Perjanjian Kerja Penelitian Dosen UNHAN RI TA. 2026 No. 06/PK/VII/2026/LPPM Unhan RI.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmed, N., Al Numan, M. O., Kabir, R., Islam, M. R., & Watanobe, Y. 2024. A Robust Deep Feature Extraction Method for Human Activity Recognition Using a Wavelet Based Spectral Visualisation Technique. *Sensors*, 24(13): 4343. https://doi.org/10.3390/s24134343

Das, S., Malik, P. K., & Pandey, A. 2026. Challenges and Advances in Underwater Sonar Systems and AI-Driven Signal Processing for Modern Naval Operations: A Systematic Review. *Journal of Field Robotics*, 43(2): 899–931. https://doi.org/10.1002/rob.70077

Demer, D. A., Berger, L., Bernasconi, M., Bethke, E., Boswell, K., Chu, D., Domokos, R., Dunford, A., Fässler, S., Gauthier, S., Hufnagle, L. T., Jech, J. M., Le Bouffant, N., Lebourges-Dhaussy, A., Lurton, X., Macaulay, G. J., Perrot, Y., Ryan, T., Parker-Stetter, S., & Williamson, N. 2015. Calibration of Acoustic Instruments. *ICES Cooperative Research Report*. International Council for the Exploration of the Sea (ICES). https://doi.org/10.17895/ices.pub.5494

Deng, Z. D., Southall, B. L., Carlson, T. J., Xu, J., Martinez, J. J., Weiland, M. A., & Ingraham, J. M. 2014. 200 kHz Commercial Sonar Systems Generate Lower Frequency Side Lobes Audible to Some Marine Mammals. *PLOS ONE*, 9(4): e95315. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0095315

Erbe, C., Duncan, A., & Vigness-Raposa, K. J. 2022. Introduction to Sound Propagation Under Water. In C. Erbe & J. A. Thomas (Eds.), *Exploring Animal Behavior Through Sound: Volume 1* (pp. 185–216). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97540-1_6

Foote, K. G., Francis, D. T. I., & Atkins, P. R. 2007. Calibration Sphere for Low-Frequency Parametric Sonars. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 121(3): 1482–1490. https://doi.org/10.1121/1.2434244

Gou, W., Liang, H., Li, H., Dai, Z., & Zhu, W. 2026. Shallow Water Reverberation Suppression Based on a Time-Frequency Patch Tensor Model for Broadband Active Sonar Systems. *Applied Acoustics*, 243: 111144. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2025.111144

Guerrero-Chilabert, G. S., Moreno-Salinas, D., & Sánchez-Moreno, J. 2024. Design and Development of an SVM-Powered Underwater Acoustic Modem. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(5): 773. https://doi.org/10.3390/jmse12050773

Ji, B., Lan, Y., Qiao, G., & Shao, S. 2024. Experimental Investigation of a Tonpilz Transducer Operating in the Frequency Band of 20–80 kHz (L). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 155(6): 3600–3603. https://doi.org/10.1121/10.0026222

Katsavrias, C., Papadimitriou, C., Hillaris, A., & Balasis, G. 2022. Application of Wavelet Methods in the Investigation of Geospace Disturbances: A Review and an Evaluation of the Approach for Quantifying Wavelet Power. *Atmosphere*, 13(3): 499. https://doi.org/10.3390/atmos13030499

Kurdila, H. R., Goehle, G., & Brown, D. C. 2022. Morphological Component Analysis of Long-Duration Ringdown from Elastic Objects Imaged with the Sediment Volume Search Sonar. *OCEANS 2022 Hampton Roads*. https://doi.org/10.1109/OCEANS47191.2022.9977385

 ISSN: 2714-8726

Le Bouffant, N., Berger, L., & Fezzani, R. 2025. Using Seafloor Echo-Integrated Backscatter for Monitoring Single Beam Echosounder Calibration. *Frontiers in Remote Sensing*, 6: 1549238. https://doi.org/10.3389/frsen.2025.1549238

Liu, D., Zhao, X., & Lu, Y. 2021. Detection Performance Analysis of Sub-Band Processing Continuous Active Sonar. *Applied Acoustics*, 174: 107700. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107700

Lurton, X. 2010. An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications (2nd ed.). Springer.

MacLennan, D. N., Fernandes, P. G., & Dalen, J. 2002. A Consistent Approach to Definitions and Symbols in Fisheries Acoustics. *ICES Journal of Marine Science*, 59(2): 365–369. https://doi.org/10.1006/jmsc.2001.1158

Naman, H. A., & Abdelkareem, A. E. 2023. Multipath Geometry Channel Model in Shallow Water Acoustic Communication. *Journal of Marine Science and Application*, 22(2): 359–369. https://doi.org/10.1007/s1180 4-023-00339-5

Renfree, J. S., Andersen, L. N., Macaulay, G., Sessions, T. S., & Demer, D. A. 2020. Effects of Sphere Suspension on Echosounder Calibrations. *ICES Journal of Marine Science*, 77(7–8): 2945–2953. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaa171

Shalby, E. M., Abdelaziz, A. Y., Ahmed, E. S., & Rashad, B. A.-E. 2025. A Comprehensive Guide to Selecting Suitable Wavelet Decomposition Level and Functions in Discrete Wavelet Transform for Fault Detection in Distribution Networks. *Scientific Reports*, 15: 1160. https://doi.org/10.1038/s41598-024-82025-2

Stojanovic, M., & Preisig, J. C. 2009. Underwater Acoustic Communication Channels: Propagation Models and Statistical Characterization. *IEEE Communications Magazine*, 47(1): 84–89. https://doi.org/10.1109/MCOM.2009.4752682

Torrence, C., & Compo, G. P. 1998. A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(1): 61–78. https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2

Urick, R. J. 1983. Principles of Underwater Sound (3rd ed.). McGraw-Hill.

Urmy, S. S., De Robertis, A., & Bassett, C. 2024. A Bayesian Inverse Approach to Identify and Quantify Organisms from Fisheries Acoustic Data. *ICES Journal of Marine Science*, 81(7): 1461–1477. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsad102

Wang, S., Hu, B., Zhang, H., Chen, C., & Chen, F. 2024. Underwater Sound Absorption of an Acoustic Material Embedded with Coated Cylindrical Cavities. *Journal of Vibration and Shock*, 43(14): 103–111.

Zhang, S., Wu, J., & Yin, T. 2023. Simulation of Sonar Reverberation Signal Considering the Ocean Multipath and Doppler Effect. *Frontiers in Marine Science*, 10: 1279693. https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1279693

Zhang, X., Lu, B., & Qiao, L. 2023. A Wavelet Selection Scheme in Underwater Discharge Signal Analysis. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2023(1): 106. https://doi.org/10.1186/s13634-023-01065-4