Tinjauan Literatur: *Anechoic tile* sebagai Teknologi Anti-Sonar dalam Mendukung Penyamaran Kapal Selam KRI Nagapasa-403

Moh. Hisni Alfan Baarik[1*], M. Zuhnir Piliang[2], Rudi Lazuardi[3]
[1,2,3] Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Militer
*e-mail: alfanhisni@gmail.com

ABSTRAK

Indonesia sebagai negara kepulauan terbesar di dunia memiliki kepentingan strategis untuk menjaga kedaulatan maritim, dimana kapal selam berperan vital dalam pertahanan bawah laut. Salah satu kapal selam andalan TNI AL, KRI Nagapasa-403, dilengkapi *anechoic tile* untuk mengurangi jejak akustik dan menghindari deteksi sonar. Penelitian ini bertujuan meninjau secara komprehensif teknologi *anechoic tile* pada KRI Nagapasa-403, meliputi prinsip kerja, desain, perkembangan teknologi, dan relevansinya terhadap sistem sonar modern. Pendekatan yang digunakan adalah tinjauan literatur terhadap artikel ilmiah, prosiding, laporan teknis, dan dokumen resmi dengan kriteria relevansi, keterbaruan, dan kredibilitas. Analisis menunjukkan bahwa kinerja *anechoic tile* dipengaruhi oleh desain dan dimensi rongga, sifat viskoelastik material, integrasi teknologi aktif atau *metasurface*, serta strategi optimasi area pelapisan. Studi simulasi *Finite Element Method* menunjukkan bahwa pengaturan fraksi volume rongga udara 40–50% dan diameter kecil dapat meningkatkan koefisien penyerapan hingga >0,8 pada pita 1–5 kHz, sedangkan uji eksperimental desain *Alberich* modern memberikan *transmission loss* +24 dB pada 20 kHz. Kesimpulan kajian ini merekomendasikan kombinasi lapisan pasif berperforma tinggi dengan teknologi pelengkap untuk memperluas pita penyerapan, disertai validasi numerik dan uji lapangan pada pita 100 Hz–20 kHz guna meningkatkan kemampuan siluman kapal selam Indonesia.

Kata kunci : *Anechoic tile;* Anti-Sonar; Kapal Selam; Keamanan Maritim

ABSTRACT

As the world's largest archipelagic nation, Indonesia has a strategic interest in maintaining maritime sovereignty, where submarines play a vital role in underwater defense. One of the Indonesian Navy's flagship submarines, the KRI Nagapasa-403, is equipped with anechoic tiles to reduce its acoustic signature and avoid sonar detection. This study aims to comprehensively review the anechoic tile technology on the KRI Nagapasa-403, covering its operating principles, design, technological developments, and relevance to modern sonar systems. The approach used was a literature review of scientific articles, proceedings, technical reports, and official documents, with criteria of relevance, recency, and credibility. The analysis shows that anechoic tile performance is influenced by cavity design and dimensions, material viscoelastic properties, integration of active technology or metasurfaces, and coating area optimization strategies. Finite Element Method simulation studies indicate that adjusting the air cavity volume fraction to 40–50% and a small diameter can increase the absorption coefficient to >0.8 in the 1–5 kHz band, while experimental tests of a modern Alberich design yield a transmission loss of +24 dB at 20 kHz. The conclusion of this study recommends a combination of high-performance passive coatings with complementary technologies to broaden the absorption band, accompanied by numerical validation and field testing in the 100 Hz–20 kHz band to enhance the stealth capabilities of Indonesian submarines.

Keywords **:** *Anechoic tile; Anti-Sonar; Maritime Security; Submarine.*

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara kepulauan terbesar di dunia dengan sekitar 17.499 pulau yang membentang dari Sabang hingga Merauke, menyimpan kekayaan bawah laut yang luar biasa (Allim & Gultom, 2020). Wilayah laut Indonesia tidak hanya menampilkan keragaman ekosistem yang mengagumkan, tetapi juga memiliki peran strategis dalam perdagangan internasional serta menyimpan sumber daya alam melimpah, khususnya sumber daya ikan yang menjadi tulang punggung industri perikanan nasional (Sabir & Mokodompit, 2023). Namun, di balik potensi tersebut, Indonesia menghadapi

tantangan serius dalam menjaga keamanan dan kedaulatan maritim, mengingat posisi geografisnya yang strategis dan rawan menjadi jalur lalu lintas internasional.

Pertahanan bawah laut menjadi salah satu pilar utama sistem pertahanan maritim Indonesia. Dengan wilayah perairan yang luas dan kompleks, menjaga kedaulatan wilayah perairan merupakan aspek krusial. Kapal selam hadir sebagai elemen vital dalam hal ini karena kemampuannya beroperasi secara rahasia di kedalaman laut, memantau aktivitas lawan, serta merespons ancaman secara cepat dan efektif (Kementerian Koordinator Bidang Kemaritiman, 2017). Keunggulan strategis kapal selam yang sulit dideteksi menciptakan efek penggentar (*deterrence effect*) yang kuat, sekaligus memperkuat stabilitas dan kepercayaan di tingkat internasional. Dalam era geopolitik yang dinamis, pentingnya pertahanan bawah laut dan peran kapal selam semakin meningkat, terutama untuk melindungi keamanan nasional dan kepentingan ekonomi yang bertumpu pada industri perikanan serta perdagangan internasional.

Salah satu kapal selam andalan TNI Angkatan Laut adalah KRI Nagapasa-403, yang dilengkapi teknologi canggih dan material khusus untuk mendukung operasi bawah laut dalam berbagai kondisi (Yongshua et al., 2022). Salah satu komponen pentingnya adalah *anechoic tile*, material pelapis yang dirancang untuk mengurangi jejak akustik dengan cara menyerap dan meminimalkan pantulan gelombang sonar (Daniels & Perera, 2022). Teknologi ini memungkinkan kapal selam mendekati target secara senyap tanpa terdeteksi, sehingga meningkatkan efektivitas misi. Seiring perkembangan teknologi sonar yang semakin presisi dan sensitif, peran *anechoic tile* sebagai bagian dari sistem siluman kapal selam menjadi semakin krusial dalam mendukung keberhasilan operasi dan menjaga kedaulatan wilayah laut Indonesia.

Meskipun teknologi *anechoic tile* telah banyak digunakan pada kapal selam modern, kajian literatur terkait penerapannya pada kapal selam Indonesia, khususnya KRI Nagapasa-403, masih terbatas. Belum banyak penelitian yang memaparkan secara komprehensif karakteristik material, mekanisme kerja, dan relevansinya terhadap perkembangan teknologi sonar terkini. Hal ini menimbulkan kebutuhan akan penelitian yang dapat memperdalam pemahaman mengenai efektivitas *anechoic tile* sebagai teknologi anti-sonar dalam mendukung kemampuan siluman kapal selam Indonesia.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk meninjau secara menyeluruh teknologi *anechoic tile* pada KRI Nagapasa-403, mulai dari fungsi dan prinsip kerjanya, perkembangan teknologi, hingga perannya dalam mendukung strategi pertahanan laut nasional. Hasil kajian ini diharapkan dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan di bidang teknologi pertahanan bawah laut, mendukung peningkatan kapabilitas industri pertahanan nasional, serta memperkuat strategi keamanan maritim Indonesia.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan tinjauan literatur (*literature review*) untuk mengkaji peran teknologi *anechoic tile* sebagai sistem anti-sonar dalam mendukung kemampuan penyamaran kapal selam KRI Nagapasa-403. Seluruh data yang dianalisis berasal dari sumber sekunder berupa artikel jurnal ilmiah, prosiding konferensi, laporan penelitian, dan dokumen teknis yang relevan dengan topik. Kriteria pemilihan literatur meliputi tingkat relevansi terhadap *anechoic tile* dan teknologi siluman kapal selam, keterbaruan publikasi (minimal sepuluh tahun terakhir, kecuali untuk literatur historis penting), dan kredibilitas sumber.

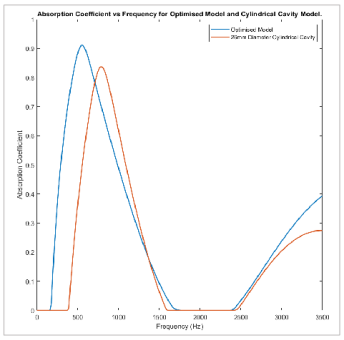
Tahapan penelitian dimulai dengan identifikasi literatur, yaitu pencarian publikasi menggunakan kata kunci seperti *anechoic tile*, *submarine stealth*, *anti-sonar technology*, dan *KRI Nagapasa-403*. Literatur yang terkumpul kemudian diklasifikasikan berdasarkan fokus pembahasannya, misalnya desain dan material *anechoic tile*, karakteristik akustik, metode analisis, serta penerapan pada kapal selam.

Proses selanjutnya adalah sintesis informasi, yaitu merangkum dan menggabungkan temuan-temuan penting dari berbagai studi untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai prinsip kerja, performa, dan tantangan penggunaan *anechoic tile*. Analisis dilakukan dengan membandingkan berbagai metode yang digunakan dalam studi terdahulu, seperti pemodelan analitik, simulasi numerik (misalnya metode elemen hingga/FEM), metode komputasi lainnya (misalnya *Locally Matched Surface*), dan metode eksperimental yang menguji kinerja material terhadap deteksi sonar. Hasil analisis kemudian digunakan untuk

merumuskan kesimpulan terkait efektivitas *anechoic tile* dalam meningkatkan kemampuan siluman kapal selam dan rekomendasi untuk pengembangan teknologi tersebut pada KRI Nagapasa-403 di masa depan.

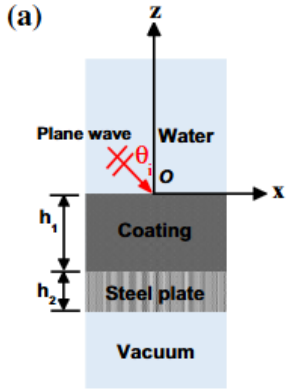
HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian oleh Daniels dan Perera (2022) mengembangkan model unit-cell lapisan *Alberich* menggunakan *Finite Element Method* untuk mengoptimalkan parameter geometris, yaitu diameter rongga, panjang rongga, ketebalan lapisan karet, dan ketebalan pelat baja belakang. Optimasi dilakukan untuk memaksimalkan koefisien penyerapan pada pita frekuensi sonar pasif (100–1000 Hz). Hasil simulasi menunjukkan peningkatan nilai puncak koefisien penyerapan dari 0,83689 menjadi 0,91129, serta penurunan area "zona mati" (frekuensi dengan penyerapan rendah) sebesar 26%. Temuan ini mengindikasikan bahwa kombinasi desain rongga yang tepat dapat secara signifikan meningkatkan performa siluman akustik kapal selam pada frekuensi rendah. Gambar 1 memperlihatkan pergeseran puncak penyerapan dari sekitar 800 Hz menjadi 550 Hz setelah optimasi, bersamaan dengan peningkatan amplitudo maksimum (Daniels & Perera, 2022).



Gambar 1. Perbandingan penyerapan vs frekuensi untuk model yang dioptimalkan dan model lain (Daniels & Perera, 2022)

Pada Analisis koefisien penyerapan dengan teori resonansi pelat elastis yang dilakukan Zhou et al. (2018) menunjukkan penyerapan gelombang akustik pada lapisan *anechoic* yang dipasang pada pelat baja dengan sudut datang miring (*oblique incidence*). Analisis menggunakan model resonansi pelat elastis menunjukkan bahwa pada frekuensi rendah mekanisme penyerapan didominasi resonansi permukaan (*surface resonance*), sedangkan pada frekuensi tinggi dipengaruhi oleh resonansi rongga (*cavity resonance*). Faktor rugi material (*loss factor*) dan sudut datang gelombang mempengaruhi lebar pita (*bandwidth*) penyerapan. Studi ini menekankan pentingnya desain yang mempertimbangkan kondisi operasional nyata, termasuk variasi sudut datang sonar di laut (Zhou et al., 2018).

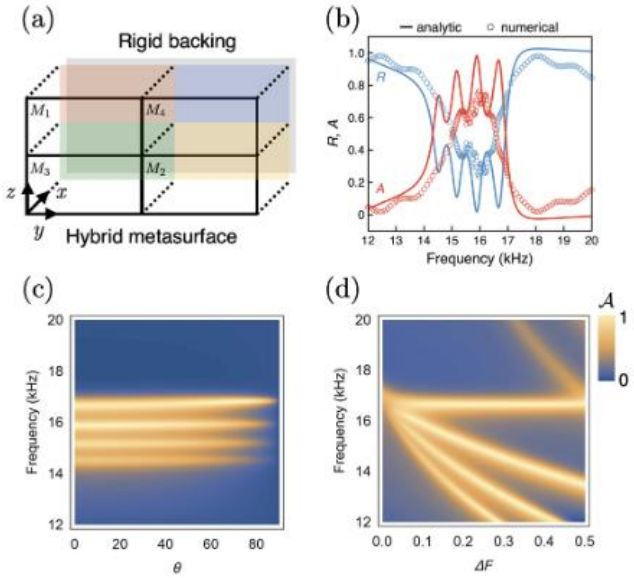


Gambar 2. Model Analitik 2D Penyerapan Gelombang oleh Lapisan Anechoic pada Pelat Baja dengan Sudut Datang θ_i (Zhou et al., 2018)

Penelitian Lane (1981), mengkaji hubungan antara resonansi, anti-resonansi, dan pengurangan gema (*echo reduction*) pada lapisan *Alberich*. Hasil analisisnya menunjukkan bahwa pengurangan gema maksimum tidak selalu bertepatan dengan frekuensi resonansi material, tetapi dapat terjadi pada frekuensi

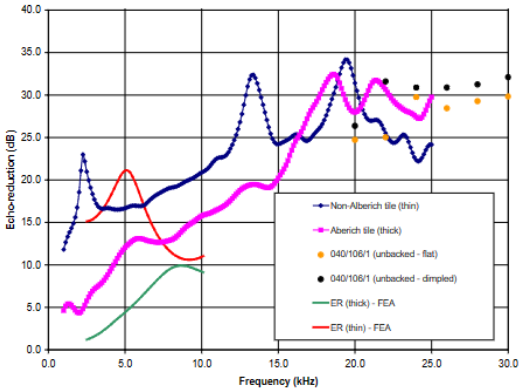
anti-resonansi, yaitu titik di mana hamburan akustik minimum meskipun energi resonansi tinggi. Konsep ini penting untuk desain lapisan yang menargetkan frekuensi operasi sonar tertentu.

Lee et al. (2021) mengusulkan *metasurface* hibrid yang menggabungkan resonator dengan karakteristik berbeda untuk menghasilkan penyerapan lebar pita (*broadband absorption*) yang stabil terhadap perubahan suhu, salinitas, dan tekanan air. Hasil simulasi dan eksperimen menunjukkan bahwa desain ini mampu mempertahankan koefisien penyerapan tinggi pada berbagai kondisi lingkungan dan sudut datang. Pendekatan ini berpotensi diaplikasikan pada kapal selam yang beroperasi di perairan tropis dengan variabilitas lingkungan yang tinggi.



Gambar 3. Desain dan Kinerja Metasurface Hibrid untuk Penyerapan Lebar Pita pada *Anechoic tile* Modern (Lee et al., 2021)

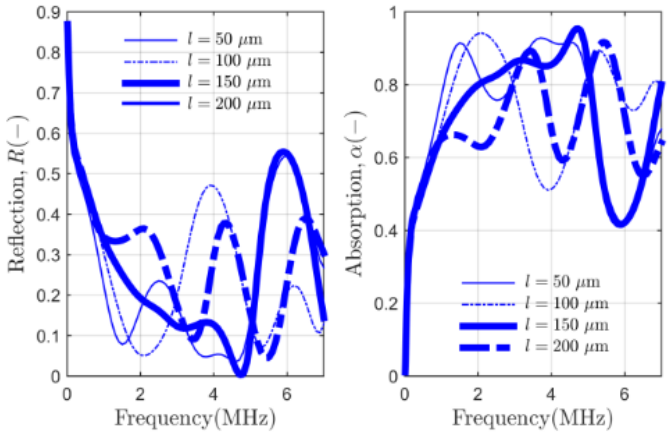
Zeqiri et al. (2010) melakukan pengujian eksperimental terhadap desain *Alberich* baru menggunakan fasilitas kolam akustik skala penuh. Pengujian ini menunjukkan peningkatan *transmission loss* (TL) yang signifikan di pita frekuensi menengah-tinggi, yaitu +24 dB pada 20 kHz, +15,5 dB pada 10 kHz, dan +13 dB pada 5 kHz dibandingkan desain konvensional. Namun, pada frekuensi sangat rendah (<1 kHz), efektivitas penyerapan menurun, sehingga memerlukan kombinasi strategi lain untuk menutup kelemahan di pita rendah. Gambar 4 memperlihatkan kesesuaian antara hasil simulasi (garis) dan pengukuran (titik) pada frekuensi di atas 5 kHz, dengan deviasi kecil di bawah 1 kHz.



Gambar 4. Hasil Pengukuran dan Simulasi Echo Reduction untuk Berbagai Material *Anechoic tile* (Zeqiri et al., 2010)

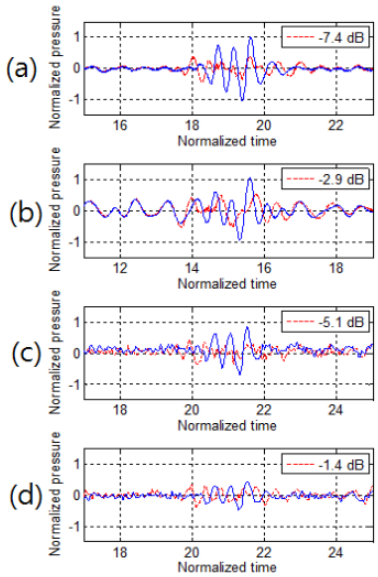
Penelitian oleh Trinh Van Hai (2016) melakukan simulasi numerik menggunakan metode *Finite Element Method* (FEM) untuk menganalisis pengaruh parameter mikrostruktur pada lapisan anechoic tipe *double-cavity*. Penelitian ini memfokuskan pada variasi fraksi volume rongga udara dan diameter rongga

terhadap koefisien penyerapan gelombang akustik dalam medium air. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan fraksi rongga udara dapat memperluas pita frekuensi penyerapan, sementara diameter rongga yang lebih kecil cenderung meningkatkan penyerapan pada frekuensi rendah. Pada konfigurasi optimum (*double-cavity* dengan fraksi rongga udara sekitar 40–50%), koefisien penyerapan melebihi 0,8 pada pita 1–5 kHz, yang merupakan rentang frekuensi kritis untuk sonar aktif jarak menengah. Temuan ini mengindikasikan bahwa pengaturan geometri mikrostruktur merupakan faktor penting dalam desain *anechoic tile* untuk memaksimalkan performa siluman akustik kapal selam.



Gambar 5. Pengaruh jarak antar rongga terhadap kinerja akustik ubin anechoic: refleksi (kiri) dan absorpsi (kanan)
(Trinh, 2016)

Penelitian oleh Lee et al. (2014) mengembangkan *tile projector* berbasis *active impedance matching* yang mampu menurunkan amplitudo gema sonar aktif pada frekuensi rendah secara real-time. Hasil uji di kolam akustik menunjukkan penurunan signifikan pada amplitudo puncak sinyal pantulan dibandingkan konfigurasi tanpa penggerak aktif. Pendekatan ini menunjukkan bahwa sistem aktif dapat menjadi pelengkap efektif bagi lapisan pasif dalam menghadapi ancaman sonar aktif frekuensi rendah.

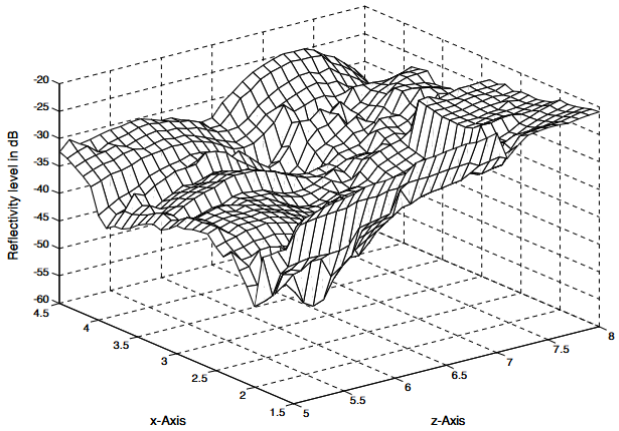


Gambar 6. Gelombang waktu tekanan (*pressure-time waveforms*) dari gelombang yang dipantulkan pada berbagai kondisi, yaitu tanpa dan dengan pencocokan impedansi aktif
(Lee et al., 2014)

Razavi et al. (2010) mengusulkan metode optimasi penempatan ferrite tiles di ruang anechoic menggunakan ray-tracing berbasis optika geometris. Ruang dibagi grid, dan hanya area dengan nilai cost matrix tinggi yang dilapisi ferrite tiles. Simulasi CST menunjukkan bahwa menutupi 80–90% area kritis

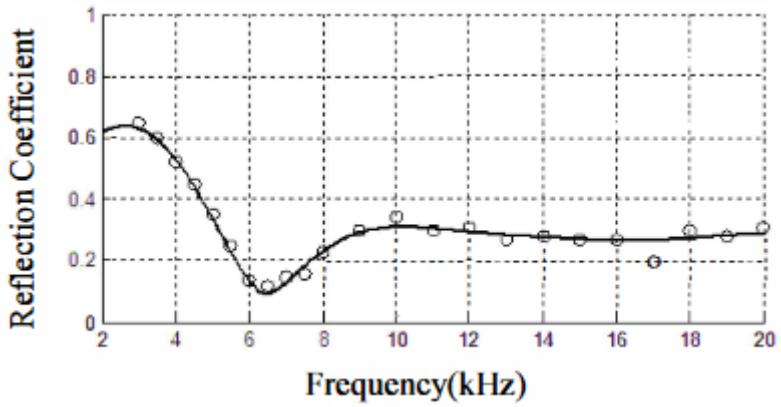
sudah cukup untuk menjaga uniformitas medan di quiet zone. Metode ini menghemat ferrite tiles dan mempercepat desain hingga 24 kali dibandingkan algoritma genetika. Area dinding depan dan belakang paling berpengaruh, sehingga fokus pemasangan di bagian tersebut. Prinsip ini dapat diadaptasi untuk desain lapisan akustik kapal selam seperti KRI Nagapasa-403 agar distribusi penyerap suara di lambung kapal lebih efisien tanpa mengurangi performa siluman.

Penelitian Razavi & Khalaj-Amirhosseini (2008) menggabungkan metode ray-tracing dan algoritma genetika untuk mengoptimalkan penempatan ferrite tile absorber pada anechoic chamber pengujian EMC/EMI. Dengan melapisi hanya 80% permukaan chamber, performa zona tenang tetap hampir setara dengan pelapisan penuh, dengan deviasi pengukuran kurang dari 3%. Pendekatan ini menghemat biaya, mengurangi berat chamber, dan mempercepat proses desain. Prinsip optimasi serupa dapat diterapkan pada desain lapisan anechoic kapal selam seperti KRI Nagapasa-403, dengan fokus pada area kritis lambung untuk meminimalkan bobot dan biaya tanpa mengorbankan performa siluman akustik.



Gambar 7. Tingkat reflektivitas *enclosure* dengan pelapis absorber parsial pada frekuensi 100 MHz (Razavi & Khalaj-Amirhosseini 2008).

Sun et al. (2016) mengembangkan metode prediksi hamburan akustik frekuensi rendah untuk target elastis berlapis anechoic. Struktur lapisan dimodelkan sebagai lapisan viskoelastik ekuivalen, kemudian dianalisis dengan kombinasi metode *Finite Element* dan *Boundary Element*. Pendekatan ini menunjukkan penurunan koefisien refleksi yang signifikan pada frekuensi kritis deteksi sonar, yang menegaskan efektivitas lapisan anechoic dalam mengurangi jejak akustik target elastis seperti kapal selam.



Gambar 8. Koefisien refleksi lapisan berstruktur berdasarkan hasil pengukuran (o) dan metode *parameter matching* (-) (Sun et al., 2016).

Berdasarkan tinjauan berbagai studi, performa lapisan anechoic dipengaruhi oleh empat faktor utama: (1) desain dan dimensi rongga, (2) sifat viskoelastik material, (3) integrasi teknologi aktif atau *metasurface* untuk memperluas bandwidth penyerapan, dan (4) strategi optimasi area pelapisan untuk efisiensi material dan bobot. Untuk aplikasi pada KRI Nagapasa-403, prioritas penelitian selanjutnya adalah validasi desain

optimum melalui simulasi numerik (*FEM*) yang mempertimbangkan variasi sudut datang dan kedalaman operasi, diikuti pengujian di kolam akustik atau laut terbuka pada pita 100 Hz–20 kHz untuk memverifikasi performa *transmission loss* dan *echo reduction* secara nyata.

SIMPULAN

Tinjauan ini menegaskan bahwa kinerja *anechoic tile* pada kapal selam dipengaruhi oleh desain dan dimensi rongga, sifat viskoelastik material, integrasi teknologi aktif atau *metasurface*, serta strategi optimasi area pelapisan. Simulasi dan pengujian menunjukkan bahwa pengaturan geometri rongga, khususnya fraksi volume dan diameter, dapat memperluas pita penyerapan dan meningkatkan performa pada frekuensi rendah, sedangkan desain modern *Alberich* mampu memberikan *transmission loss* signifikan pada pita menengah-tinggi. Untuk aplikasi pada KRI Nagapasa-403, kombinasi lapisan pasif berperforma tinggi dengan teknologi pelengkap direkomendasikan, disertai validasi numerik dan uji lapangan pada pita 100 Hz–20 kHz.

DAFTAR PUSTAKA

Allim, T. Y., Supartono, S., & Gultom, R. A. (2020). Desain konseptual sistem pengawasan kapal selam asing berbasis teknologi akustik tomografi untuk mendukung sistem pertahanan negara. *Teknologi Penginderaan*, *1*(2).

Sabir, M., & Mokodompit, E. (2023). Analisis potensi maritim indonesia.

Indonesia, K. K. B. K. R. (2017). Kebijakan kelautan indonesia. *PERPRES-RI Nomor*, *16*.

Youngshua, Y. A. Y. A., Nurul, N. M., Umi, U. S., & Ari, A. T. (2022). Analisis pemilihan submarine rescue ship guna meningkatkan keselamatan personel kapal selam. *Saintek: Jurnal Sains Teknologi dan Profesi Akademi Angkatan Laut*, *14*(1), 1303-1328.

Daniels, C., & Perera, N. (2022). *Investigation of Alberich Coating to Optimise Acoustic Stealth of Submarines. Acoustics 2022, 4, 362–381*.

Zhou, F., Fan, J., Wang, B., & Peng, Z. (2018). Absorption performance of an anechoic layer with a steel plate backing at oblique incidence. *Acoustics Australia*, *46*(3), 317-327.

Lane, R. (1981). Absorption mechanisms for waterborne sound in Alberich anechoic layers. *Ultrasonics*, *19*(1), 28-30.

Zeqiri, B., Gélat, P., Norris, M., Robinson, S., Beamiss, G., & Hayman, G. (2010, June). Design and testing of a novel alberich anechoic acoustic tile. In *Proceedings of the 39th International Congress on Noise Control Engineering* (Vol. 8, pp. 6480-6487).

Trinh, V. H. (2019). Numerical investigation of microstructure effect on acoustic properties of underwater anechoic coatings. Journal of Science and Technique, 14(05).

Lee, J. W., Woo, S., Jang, H., Lee, K., Kim, W. G., Kang, H. S., ... & Seo, Y. (2014). Low-frequency active echo reduction using a tile projector. *The Journal of the Acoustical Society of Korea*, *33*(6), 366-374.

Razavi, S., Khalaj-Amirhosseini, M., & Cheldavi, A. (2010). Minimum usage of ferrite tiles in anechoic chambers. Progress In Electromagnetics Research B, 19, 367-383.

Razavi, S., & Khalaj-Amirhosseini, M. (2008). Optimization an anechoic chamber with ray-tracing and genetic algorithms. Progress In Electromagnetics Research B, 9, 53-68.

Sun, Y., An, J., Ci, G., & Xu, H. (2016, January). Prediction method of acoustic scattering from elastic target with structure anechoic coating layer at low frequency. In 2016 IEEE/OES China Ocean Acoustics (COA) (pp. 1-6). IEEE.