

Analisis Cacat Retak berdasarkan Umur Operasional *Underwater Craft*: Tinjauan Pustaka

Ata Syifa' Nugraha*, Wahyu Robby Cahyadi, Muayat Khoirun Nafis

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Billfath, 62261 Lamongan, Indonesia

ABSTRAK – *Pressure hull* adalah struktur penahan beban utama di *underwater craft* atau kapal selam angkatan laut. Komponen struktural dasar adalah baja tarik tinggi dibawah beban tekanan hidrostatik. Makalah ini menganalisis cacat retak berdasarkan umur operasi kapal selam. Pada periode pertama dan kedua faktor pemicu retakan adalah desain, fabrikasi, pengerjaan, dan buruknya proses pengelasan. Tiga faktor lain yang pada periode ini adalah, material, dan kecelakaan. Terpapar terlalu lama terhadap iklim yang dingin dengan disertai faktor-faktor lain juga berpotensi menimbulkan retakan pada lambung kapal. Kemudian, pada periode ketiga retakan muncul akibat dari kelelahan struktur kapal dan korosi. Terjadinya retakan akibat korosi umumnya disebabkan oleh penurunan ketebalan struktur badan kapal selam yang mengakibatkan meningkatnya tegangan pada bagian kritis.

HISTORI ARTIKEL

Diterima: 1 Mar 2025

Direvisi: 3 Mar 2025

Diterima: 9 Mar 2025

Diterbitkan: 10 Mar 2025

KATA KUNCI

Pressure Hull,
Kapal Selam,
Fabrikasi,
Retakan,
Korosi.

1.0 PENDAHULUAN

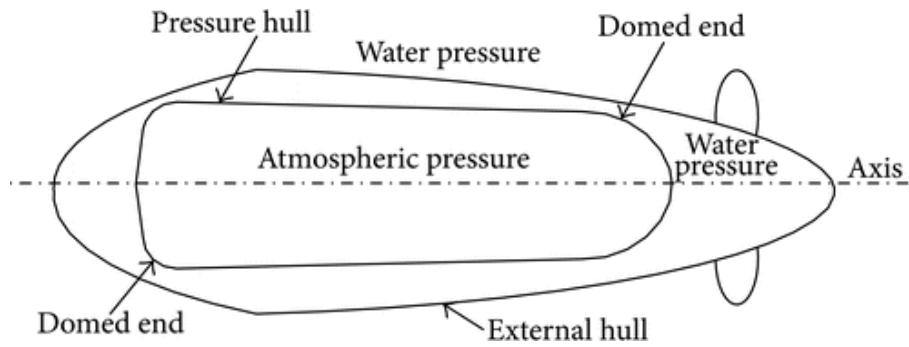
Pressure hull merupakan elemen utama yang mampu membuat sebuah kapal selam mampu menyelam pada kedalaman tertentu dan kemudian mengapung [1]. Elemen tersebut terbuat dari baja tarik tinggi di bawah beban tekanan hidrostatik eksternal yang mampu melindungi peralatan dan nyawa awak yang ada di dalam kapal selam [2]. Pressure hull dirancang sedemikian rupa hingga mampu menahan tekanan dari luar yang sangat tinggi [3]. Kedalaman pengoperasian menjadi salah satu kriteria penting dalam merancang sebuah pressure hull dimana melalui kriteria tersebut dapat diprediksi toleransi atau batasan pengoperasian kapal selam [4]. Bekerja pada kedalaman beberapa kilometer di bawah permukaan lau membutuhkan persepsi yang lebih terkait dengan bagaimana tekanan hidrostatik nantinya akan mempengaruhi struktur dan material lambung [5]. Disamping itu, mengubah berat lambung memungkinkan kapal dapat merubah kedalaman secara terkendali. Sebuah kapal selam tentunya tidak diperbolehkan beroperasi lebih jauh dari Batasan kedalaman yang telah ditentukan [6], [7].

Berbagai teknologi yang sangat canggih dilibatkan saat proses produksi guna memastikan lambung mampu menahan jutaan ton tekanan air dari luar badan kapal selam. Selain itu, juga dilakukan pendeteksian cacat pada seluruh badan kapal untuk meminimalisir biaya perbaikan dan memastikan kapal dapat digunakan pada jangka waktu yang lama [8]. Struktur kapal yang dilas menjadi bagian yang rentan mengalami kerusakan selama masa konstruksi dan operasionalnya. Umumnya, ketidaktepatan desain, pemilihan material, dan kurang tepatnya proses pengerjaan menjadi beberapa kemungkinan yang menyebabkan kerusakan selama konstruksi. Sementara itu, kelelahan bahan dan korosi menjadi beberapa kemungkinan yang menyebabkan kerusakan dari sisi operasional [9].

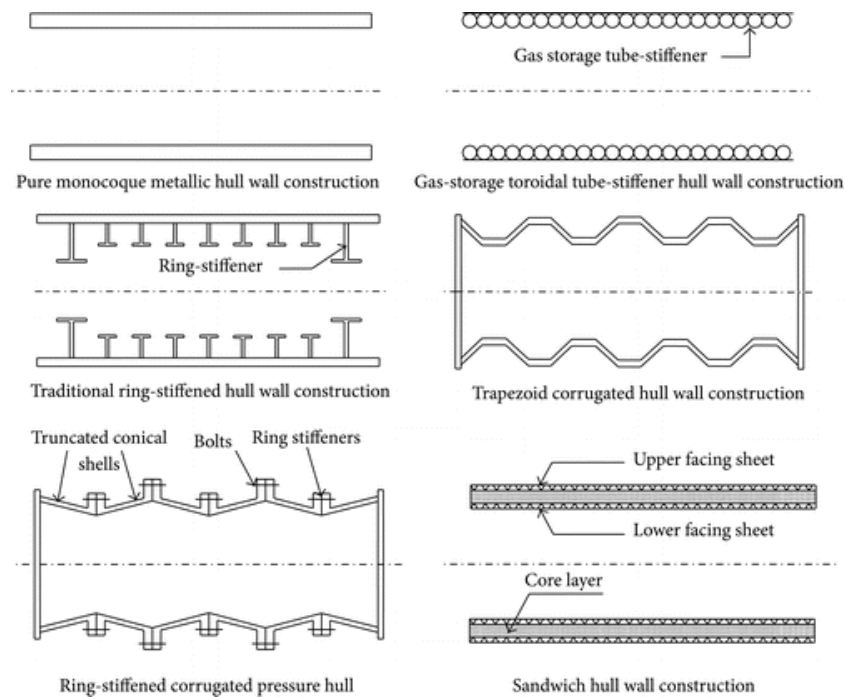
Kerusakan pada lambung kapal bermanifestasi pada timbulnya retakan yang tidak dapat dihindari dan akhirnya beroperasi pada lingkungan yang merugikan. Retak pada lambung kapal dapat merugikan keselamatan kapal karena berpotensi mengurangi kekuatan struktur kapal, menimbulkan kebocoran tangki, dan peningkatan tekanan. Jika diabaikan tentunya hal tersebut dapat berpotensi menyebabkan pecah atau patahnya lambung pada periode waktu tertentu [10]. Tulisan ini bertujuan untuk mengungkap kriteria penilaian retak berdasarkan umur operasional kapal yang berbasis literatur dan hasil penelitian yang relevan dengan topik.

2.0 LAMBUNG TEKANAN KAPAL SELAM

Bentuk struktur pressure hull berbeda sesuai dengan struktur cangkang tekanan submersible dan prinsip pemilihan material. Bentuk biasa dari lambung tekanan bawah laut adalah dalam bentuk silinder melingkar kaku cincin, diblokir oleh tutup ujung, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Ini adalah struktur yang baik untuk menahan efek tekanan hidrostatik eksternal [11]. Gambar 1 menunjukkan berbagai arsitektur dinding yang digunakan untuk lambung bertekanan yang mencakup konstruksi monokok murni, konstruksi dinding lambung tabung pengaku tabung penyimpanan gas, konstruksi dinding lambung dengan pengaku cincin tradisional, konstruksi dinding lambung bergelombang trapesium, konstruksi dinding lambung bertekanan bergelombang dengan cincin, dan konstruksi dinding sandwich hull [12], [13].

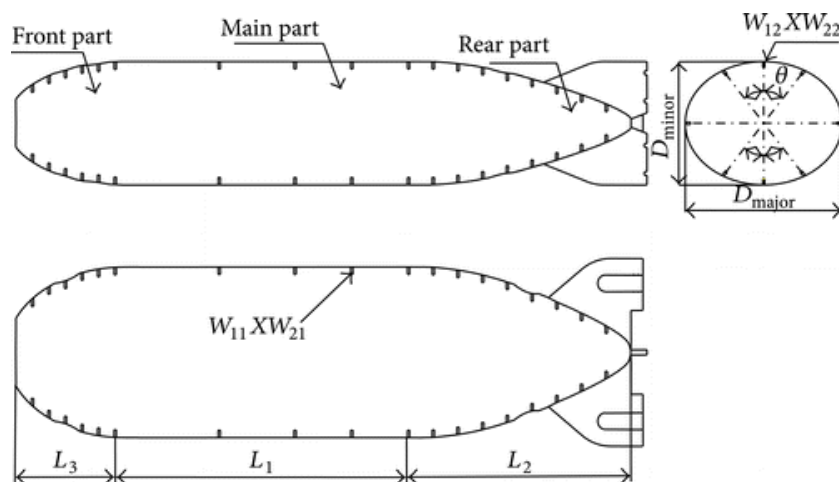


Gambar 1. Bentuk Biasa dari Lambung Kapal Selam

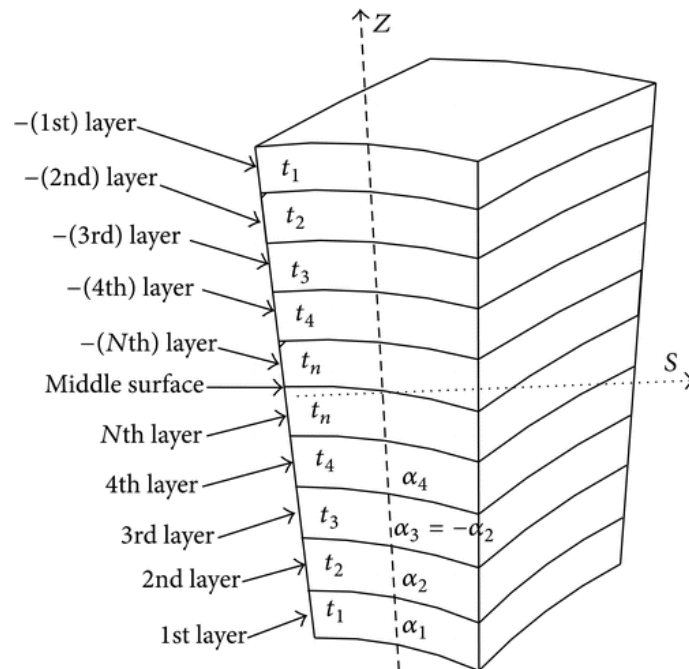


Gambar 2. Bentuk Berbagai Arsitektur Dinding yang Digunakan untuk Lambung Bertekanan

Lambung tekanan elips seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 diusulkan untuk pemanfaatan ruang yang lebih baik, bentuk hidrodinamika yang baik, dan stabilitas; ini lebih baik daripada bentuk bola dengan volume yang sama dan mudah dibuat. Urutan susun penampang shell ditunjukkan pada Gambar 4. Lapisan diberi nomor dari bagian bawah laminasi ke atas.



Gambar 3. Geometri lambung kapal bertekanan elips



Gambar 4. Urutan susun penampang cangkang

3.0 KRITERIA PENILAIAN RETAK BERDASARKAN UMUR OPERASIONAL

3.1 Kriteria penilaian retak selama periode pertama (0–5 tahun)

Kapal yang baru diproduksi idealnya bebas retak dan tidak mungkin mengalami permasalahan operasional seperti korosi dan kelelahan bahan. Pada periode awal penggunaan, adanya retakan umumnya dianggap terjadi karena kesalahan desain dan struktur lambung kapal. Retakan dengan ukuran kecil seharusnya dapat dideteksi dan diidentifikasi oleh pembuat kapal pada saat melakukan tahapan konstruksi. Namun, kapal memiliki struktur las yang kompleks dan besar sehingga tentunya akan sangat sulit memproduksinya jika disyaratkan tanpa adanya cacat struktur, takik, diskontinuitas, dan konsentrasi tegangan. Selain itu, proses pemeriksaan tidak bisa dilakukan secara menyeluruh karena dihadapkan dengan biaya yang relatif lebih tinggi dalam waktu yang cukup lama. Dengan demikian, pengalaman dalam mendeteksi retakan lebih diutamakan yang kemudian diperkuat dengan komitmen untuk memproduksi kapal yang berkualitas. Saat terdeteksi adanya retakan, prosedur normal yang dilakukan adalah dengan mencungkil dan melakukan las ulang pada bagian yang retak diikuti dengan metode *non destructive evaluation* (NDE) apabila diperlukan.

Selama periode pertama, kapal selam dioperasikan pada kemampuan maksimalnya. Perancang kapal tentunya tidak dapat memprediksi secara akurat respon yang akan diberikan oleh lambung kapal akibat dioperasikan pada kemampuan maksimalnya dengan tuntutan beban yang bervariasi selama periode pelajaran tertentu [14]. Ketidakefektifan desain dan konstruksi kapal cenderung mendominasi yang umumnya diterjemahkan dengan adanya retakan yang terlihat. Retakan terbentuk selama proses produksi namun tidak terdeteksi mulai tumbuh dalam ukuran yang dapat terdeteksi. Tanda-tanda yang sebelumnya sulit untuk dipastikan mulai muncul dalam struktur diantara sambungan las. Selain desain, faktor munculnya retakan pada lambung kapal juga dapat terjadi selama proses pengelasan, fabrikasi, dan pengerjaan. Proses pengelasan dapat menjadi salah satu akar permasalahan yang menimbulkan tiga faktor risiko retakan. Pertama, struktur mikro yang rentan sebagai akibat penerapan pada dan pendinginan. Kedua, munculnya tegangan sisa akibat dari pengelasan pasca pendinginan [15]. Ketiga, diskontinuitas struktural akibat dari adanya masalah perakitan atau pengerjaan yang buruk selama proses fabrikasi dapat berkontribusi pada inisiasi retakan akibat dari tegangan internal yang tinggi [16].

Tiga faktor lain yang dipertimbangan pada periode ini adalah suhu [17], material, dan kecelakaan. Terpapar terlalu lama terhadap iklim yang dingin dengan disertai faktor-faktor lain juga berpotensi menimbulkan retakan pada lambung kapal. Pemilihan material yang tepat menjadi bagian penting dalam memproduksi kapal selam, hal ini dilakukan untuk mencegah terjadinya kegagalan jenis patah getas [18]. Sementara beberapa kecelakaan yang menimbulkan penyok dan deformasi struktur pada lambung kapal dapat meningkatkan konsentrasi tegangan pada sambungan las, sehingga menciptakan kondisi yang berpotensi menimbulkan retakan. Selain itu, adanya hentakan dan green sea force juga memungkinkan menimbulkan kerusakan serupa. Semua faktor yang telah disebutkan diatas memiliki kontribusi baik secara individual maupun gabungan dibawah kondisi yang menguntungkan untuk memicu adanya retakan atau bahkan memperburuk kondisi retakan yang sudah ada. Dari beberapa alasan tersebut, penilaian retakan menjadi proses yang

sangat kompleks karena terjadi setelah retakan diidentifikasi dan diperbaiki. Retakan tersebut bisa saja muncul kembali dalam jangka waktu tertentu sebagai akibat dari penanganan retakan yang kurang tepat. Oleh karena itu, agar terhindar dari pengulangan retakan yang sama, inspektur harus mampu menyadari kemungkinan dan efek cascading yang ada dan berkontribusi menimbulkan retakan baru.

3.2 Kriteria penilaian retak selama periode kedua (6–10 tahun)

Faktor yang dipertimbangkan selama periode pertama umur operasional kapan dianggap relevan dan berlaku juga selama periode kedua. Selain itu, ada kemungkinan retakan yang sebelumnya terdeteksi muncul kembali dan kemudian diperbaiki karena akar penyebab munculnya retakan menjadi pekerjaan perbaikan pada tahap berikutnya. Klasifikasi penggunaan kapal pada periode kedua (6-10 tahun) telah diperkenalkan untuk mengakomodir faktor pemicu yang diakibatkan oleh kelelahan untuk dianalisis. Kapal-kapal yang digunakan terus-menerus mengalami kondisi lingkungan yang kurang menguntungkan. Penilaian kelelahan struktur lambung kapal harus dilakukan secara ketat sehingga umur operasional kapal bisa lebih Panjang [19]. Berdasarkan pertimbangan di atas, kelelahan masuk sebagai faktor pemicu atau penyebab adanya retakan pada periode kedua.

3.3 Kriteria penilaian retak selama periode ketiga (11–20 tahun)

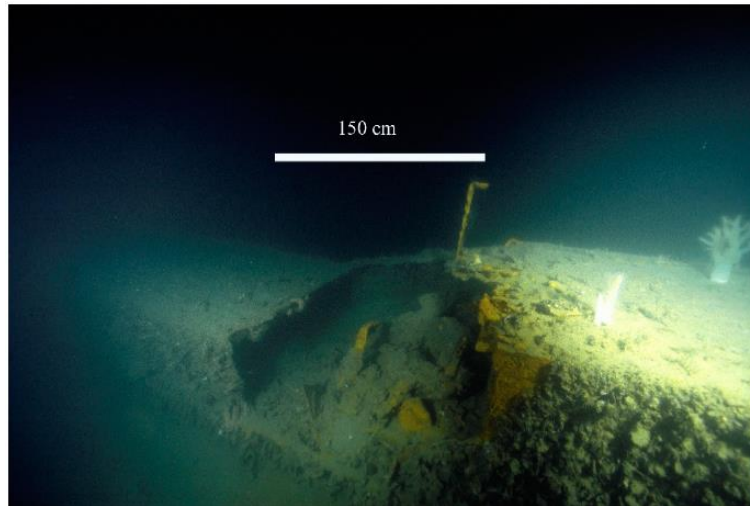
Selama periode ketiga, kapal telah beroperasi pada masa yang cukup lama dan kekurangan yang berkaitan dengan desain dan konstruksi mungkin telah teridentifikasi dan terselesaikan. Tututan operasional kapal pada kondisi lingkungan yang korosif menjadi salah satu pemicu dominan adanya retakan pada periode ini. Jika pada periode pertama dan kedua faktor pemicu retakan adalah desain, fabrikasi, pengerjaan, dan buruknya proses pengelasan, maka pada periode ketiga retakan muncul akibat dari kelelahan struktur kapal dan korosi.

Terjadinya retakan akibat korosi umumnya disebabkan oleh penurunan ketebalan struktur badan kapal selama yang mengakibatkan meningkatnya tegangan pada bagian kritis [20]. Garbatov dan Soares [21] membagi mekanisme korosi dalam tiga fase. Fase pertama tidak melibatkan korosi karena struktur baja dilapisi oleh cat pelindung. Korosi muncul pada saat lapisan pelindung mulai terkikis atau rusak. MacLeod et al. [22] menemukan bahwa terjadi pengurangan $\pm 0,9$ mm pada besi kosong tangki ballast dimana sebelumnya setebal 6,35 mm kemudian berkurang menjadi 4,6 mm. Berkurangnya logam sebesar 1,55 mm terjadi dalam kurun waktu 92,4 tahun perendaman dimana hal tersebut setara dengan $0,017 \pm 0,003$ mm/tahun. Data perbandingan menunjukkan bahwa interior turret, yang berada di lingkungan mikro anaerobik seperti AE2, memiliki laju korosi yang sama yaitu 0,016 mm/tahun. Sementara itu, MacLeod [23] menunjukkan bahwa pada kedalaman 71 m, diprediksi terjadi laju korosi sebesar 0,018 (3) mm/tahun yang sama dengan laju pengamatan $0,017 \pm 0,003$ mm/tahun. Lingkungan mikro berlumpur dari kapal selama secara alami akan menghasilkan tingkat korosi yang lebih rendah secara keseluruhan dibandingkan dengan bangkai kapal yang terletak di dasar laut dalam kondisi teroksigenasi dengan baik. Berdasarkan laju korosi per tahun yang terjadi, maka masuk akal untuk mempertimbangkan korosi sebagai faktor pemicu timbulnya retakan pada struktur kapal selama [24].

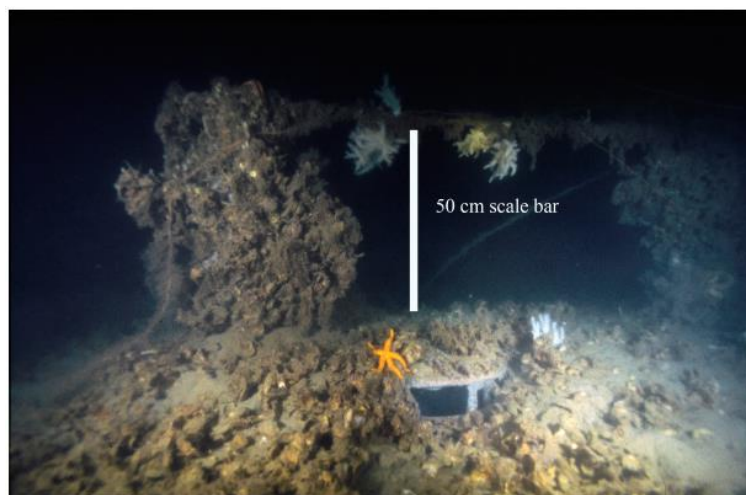
Gambar bangkai kapal di www.submarineinstitute.com menunjukkan bahwa kombinasi korosi dan kerusakan jaring pukat telah melubangi bagian pelat tipis di haluan dan pada sisir (struktur yang mencakup berbagai alat kelengkapan untuk merampingkan aliran air) di belakang conning menara, membiarkan rangka struktural terbuka (Gambar 5 dan 6). Berdasarkan studi kamera, kemungkinan penutup palka dapat dibuka, karena perlindungan katodik dari lambung akan mencegah serangan korosi besar pada mekanisme engsel. pembukaan palka utama untuk memungkinkan ROV memasuki kapal selam tertunda di bawah air ketika penyelam menemukan bahwa ada beton setebal 25-35 mm pada mekanisme palka, sekitar 15 kali lebih tebal dari yang diperkirakan. karena lingkungan salinitas yang lebih tinggi memiliki kandungan mineral total yang lebih tinggi, alkalisasi engsel menghasilkan deposit beton yang masif (Gambar 7).



Gambar 5. Kerusakan jaring trawl pada kapal selam AE2 [23]



Gambar 6. Kerusakan korosi pada casing AE2; kuning menunjukkan korosi aktif [23]



Gambar 7. Lubang palka utama yang dibeton menunjukkan celah 10 cm untuk pemasangan drop camera dan endapan beton laut yang sangat tebal [23]

Struktur kapal mengikuti tekanan siklik karena tekanan gelombang, gerakan kapal, dan kondisi pembebanan selama operasi dan karena hal tersebut faktor kelelahan bahan menjadi salah satu kriteria yang perlu diperhatikan saat merancang dan membangun kapal selam. Tegangan yang berfluktuasi akibat adanya beban induksi berpotensi mengakibatkan retakan (kelelahan bahan) pada struktur kapal yang dilas. Faktor-faktor yang mendasari seperti cacat pengelasan [20], desain yang tidak tepat [25], pengerjaan yang buruk juga berkontribusi untuk pembentukan retak lelah [16]. Sambungan longitudinal pada cangkang samping yang melintang ke rangka badan paling rentan terhadap timbulnya retak Lelah. Inisiasi retakan tersebut disebabkan oleh tekanan hidrodinamik yang berdenyut pada lambung kapal karena gelombang dan gerakan kapal [26].

4.0 DISKUSI

Pembentukan retakan pada lambung kapal selam nampaknya tak terhindarkan mengingat banyaknya variabel-variabel yang tidak dapat dikendalikan terlibat dalam proses produksi kapal dan adanya paparan dari lingkungan operasi. Sangat sulit mendeteksi semua retakan secara maksimal selama proses produksi kapal. Selain itu, terjadinya kecelakaan tabrakan juga menyajikan kondisi pembebanan yang berdampak pada terbentuknya retakan atau perambatan retakan. Hasil penelitian yang mengacu pada kelelahan mungkin menjadi tidak valid karena retakan merambat lebih cepat sehingga memicu kerusakan parah pada lambung kapal. Beberapa upaya dilakukan untuk mengatasi kerusakan lambung akibat retakan dengan mengembangkan kriteria penilaian retakan. Hal tersebut bisa saja memberika pedoman tentang cara mengidentifikasi pemicu retakan yang benar setelah retakan terdeteksi selama inspeksi. Sejumlah perbaikan yang

dilakukan diharapkan mampu mengatasi faktor pemicu keretakan yang teridentifikasi sehingga retakan yang sama tidak muncul Kembali dan menimbulkan ancaman pada struktur lambung kapal.

Klasifikasi berdasarkan usia operasi diusulkan guna mengklasifikasi faktor-faktor penyebab atau pemicu yang relevan terhadap umur operasional kapal. Dengan demikian proses perbaikan terhadap retakan yang timbul bisa lebih disederhanakan. Klasifikasi seperti hal tersebut membahas tentang hubungan antara faktor-faktor yang berpengaruh sebagai pemicu dengan umur operasional kapal selam. Faktor tambahan juga dapat diidentifikasi dan disubklasifikasi lebih lanjut dari umur operasi kapal. Pemeliharaan dan perbaikan kapal menjadi salah satu alternatif guna menjaga performa kapal selam. Namun, kegiatan tersebut tentunya membutuhkan biaya yang relatif tinggi dengan waktu pengerjaan yang tidak sebentar. Selain itu, jumlah pekerja yang nantinya terlibat juga harus diperhatikan dengan baik. Kegiatan ini menjadi semakin rumit dan kurang praktis seiring bertambahnya usia kapal. Sama mahalnnya ketika kapal selam mengalami kecelakaan dan mengakibatkan korban jiwa atau pencemaran terhadap lingkungan. Klasifikasi yang diusulkan juga diharapkan mampu menjadi dasar yang akurat bagi pemeriksa guna memastikan perbaikan yang perlu dilakukan jauh sebelumnya. Metode pemeriksaan yang sesuai biasanya diusulkan untuk memvalidasi temuan-temuan dari pemeriksa. Metode ini berkisar dari indikasi visual sederhana dari retakan hingga alat yang lebih akurat seperti NDE tergantung pada usia kapal, lokasi dimana retakan telah terdeteksi dan kemungkinan keadaan yang menyebabkannya.

4.0 SIMPULAN

Kriteria penilaian retak yang dikembangkan di sini mengidentifikasi berbagai faktor pemicu bersama dengan penyebab serta alasan yang mendasari timbulnya retakan pada lambung kapal berdasarkan umur operasional kapal selam. Pemahaman tentang retakan terutama didasarkan pada kegagalan struktural yang diamati di lokasi dan menafsirkan peristiwa yang mengarah pada proses fisik yang kompleks. sehingga tindakan korektif yang diambil pada retakan yang terdeteksi akan memastikan bahwa retakan tersebut tidak muncul kembali dan meningkatkan kerusakan struktural pada lambung kapal jika terjadi tabrakan

5.0 REFERENCES

- [1] M. Helal, H. Huang, D. Wang, and E. Fathallah, "Numerical Analysis of Sandwich Composite Deep Submarine Pressure Hull Considering Failure Criteria," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 7, no. 10, p. 377, Oct. 2019, doi: 10.3390/jmse7100377.
- [2] J. R. MacKay, M. J. Smith, F. van Keulen, T. N. Bosman, and N. G. Pegg, "Experimental investigation of the strength and stability of submarine pressure hulls with and without artificial corrosion damage," *Mar. Struct.*, vol. 23, no. 3, pp. 339–359, Jul. 2010, doi: 10.1016/j.marstruc.2010.06.001.
- [3] M. Jung, B. Park, C. Lim, J. Lee, and S. Shin, "Selection of PAUT probes for submarine pressure hull integrity assessment," *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, vol. 12, pp. 578–595, 2020, doi: 10.1016/j.ijnaoe.2020.04.001.
- [4] D. Pattison, "Design of Submarine Structures," in *Defence Procurement Agency Sea Technology Group*, UK, 2001.
- [5] P. Davies, "Behavior of marine composite materials under deep submergence," in *Marine Applications of Advanced Fibre-Reinforced Composites*, Elsevier, 2016, pp. 125–145. doi: 10.1016/B978-1-78242-250-1.00006-5.
- [6] J. Zhang, M. Zhang, W. Tang, W. Wang, and M. Wang, "Buckling of spherical shells subjected to external pressure: A comparison of experimental and theoretical data," *Thin-Walled Struct.*, vol. 111, pp. 58–64, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.tws.2016.11.012.
- [7] M. Zhang, W. Tang, F. Wang, J. Zhang, W. Cui, and Y. Chen, "Buckling of bi-segment spherical shells under hydrostatic external pressure," *Thin-Walled Struct.*, vol. 120, pp. 1–8, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.tws.2017.08.017.
- [8] M. Jung, B. Park, J. Bae, and S. Shin, "PAUT-based defect detection method for submarine pressure hulls," *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, vol. 10, no. 2, pp. 153–169, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.ijnaoe.2017.06.002.
- [9] X. Gao, Y. Shao, L. Xie, Y. Wang, and D. Yang, "Prediction of Corrosive Fatigue Life of Submarine Pipelines of API 5L X56 Steel Materials," *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 7, p. 1031, Mar. 2019, doi: 10.3390/ma12071031.
- [10] H. N. Mahmoud and R. J. Dexter, "Propagation rate of large cracks in stiffened panels under tension loading," *Mar. Struct.*, vol. 18, no. 3, pp. 265–288, Mar. 2005, doi: 10.1016/j.marstruc.2005.09.001.
- [11] C. T. F. Ross, "A conceptual design of an underwater missile launcher," *Ocean Eng.*, vol. 32, no. 1, pp. 85–99, Jan. 2005, doi: 10.1016/j.oceaneng.2004.04.008.
- [12] C.-C. Liang, H.-W. Chen, and C.-Y. Jen, "Optimum design of filament-wound multilayer-sandwich submersible pressure hulls," *Ocean Eng.*, vol. 30, no. 15, pp. 1941–1967, Oct. 2003, doi: 10.1016/S0029-8018(03)00044-1.
- [13] C. T. F. Ross, *Pressure vessels*. Woodhead Publishing Limited, 2011. doi: 10.1533/9780857092496.
- [14] A. Mansour and L. Donald, *The Principles of Naval Architecture Series: Strength of Ships and Ocean Structures*. 2010.
- [15] A. Mann, "Cracks in steel structures," *Proc. Inst. Civ. Eng. - Forensic Eng.*, vol. 164, no. 1, pp. 15–23, Feb. 2011, doi: 10.1680/feng.2011.164.1.15.

-
- [16] A. Nair, K. Sivaprasad, and C. G. Nandakumar, "Crack assessment criteria for ship hull structure based on ship operational life," *Cogent Eng.*, vol. 4, no. 1, p. 1345044, Jan. 2017, doi: 10.1080/23311916.2017.1345044.
 - [17] S. Bhutani, I. Khan, A. Nasser, and C. S. Saxena, "Thermal stress inside a disabled submarine," *Med. J. Armed Forces India*, vol. 76, no. 3, pp. 333–337, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.mjafi.2018.03.001.
 - [18] J. Barsom and S. Rolfe, *Fracture and Fatigue Control in Structures: Applications of Fracture Mechanics, Third Edition*. ASTM International, 1999. doi: 10.1520/MNL41-3RD-EB.
 - [19] D. N. V. G. L. As, *Rules for Classification Ships Part 3 Hull Chapter 5 Hull girder strength*, no. July. 2016.
 - [20] J. Parunov, I. Gledić, Y. Garbatov, and C. Guedes Soares, "Fatigue assessment of corroded deck longitudinals of tankers," *Trans. R. Inst. Nav. Archit. Part A Int. J. Marit. Eng.*, vol. 155, no. PART A1, 2013, doi: 10.3940/rina.ijme.2013.a1.246.
 - [21] Y. Garbatov and C. Guedes Soares, "Fatigue Reliability Assessment of Welded Joints of Very Fast Ferry," in *Proceeding of the IXth HSMV 2011 Symposium on High Speed Marine Vehicles*, 2011, vol. 153, pp. 231–242.
 - [22] I. D. MacLeod, D. Cook, and E. Schindelholz, "Corrosion and conservation of three elements of the American Civil War ironclad USS Monitor (1862)," *15th Trienn. Conf. New Delhi, 22-26 Sept. 2008 Prepr. (ICOM Comm. Conserv.*, no. February 2016, pp. 427–433, 2008.
 - [23] I. MacLeod, "Corrosion and Conservation Management of the Submarine HMAS AE2 (1915) in the Sea of Marmara, Turkey," *Heritage*, vol. 2, no. 1, pp. 868–883, Mar. 2019, doi: 10.3390/heritage2010058.
 - [24] P. Wang and Q. Quan, "Prediction of Corrosion Rate in Submarine Multiphase Flow Pipeline Based on PSO-SVM Model," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 688, p. 044015, Dec. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/688/4/044015.
 - [25] B. Blagojevic, Ž. Domazet, and K. Žiha, "Productional, Operational, and Theoretical Sensitivities of Fatigue Damage Assessment in Shipbuilding," *J. Sh. Prod.*, vol. 18, no. 04, pp. 185–194, Nov. 2002, doi: 10.5957/jsp.2002.18.4.185.
 - [26] H. A. Ibrahim, W. H. Ahmed, S. Abdou, and V. Blagojevic, "Experimental and numerical investigations of flow through catalytic converters," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 127, pp. 546–560, 2018, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.052.