

Analisa Hasil Pengelasan pada Lambung Kapal dengan Metode Penetrant Test

Krisna Aufa Maqbulah^a, Ir. Mulyono, MT^a, Third Author^a

^a Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Malang
Jl. Raya Tlogomas No. 246 Tegalondo, Lowokwaru, Malang, Jawa Timur, Indonesia, 65144
Telp. (0341) 46439-128 / Fax (0341) 460782
e-mail: krisnaaufa31@gmail.com, xxxx@xxxx.xxx, xxxx@xxxx.xxx

Abstracts

The research is aimed at analyzing the results of welding on the ship's hull using the Penetrant Test method at PT. PAL Indonesia. This method is effective in detecting surface defects such as cracks, porosities, or other defects. The research was conducted using experimental procedures involving surface cleaning, penetrant application, developer use, and non-destructive testing. (NDT). The results showed that no defects were detected in the tested material, giving additional confidence related to the reliability of the material. Nevertheless, negative results from the penetrant test can be considered as confirmation that the preventive maintenance or treatment plan is running well. It represents both quality in the production process of materials or components, as well as compliance with safety standards and industry regulations. The conclusion of this study is that the Penetrant Test method is effective in detecting surface defects on the ship's welding plate results, supporting the operational sustainability of the ship without the risk of structural failure. The recommendation was to organize training on more comprehensive NDT Penetrant Test testing techniques to improve understanding and skills in conducting such tests.

Keywords: NDT; Penetrant; Vessel.

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hasil pengelasan pada lambung kapal menggunakan metode Penetrant Test di PT. PAL Indonesia. Metode ini efektif dalam mendeteksi cacat permukaan seperti retak, porositas, atau cacat lainnya. Penelitian dilakukan dengan prosedur eksperimental yang melibatkan pembersihan permukaan, aplikasi penetrant, penggunaan developer, dan pengujian Non Destructive Test (NDT). Hasil penelitian menunjukkan bahwa tidak ada cacat yang terdeteksi pada material yang diuji, memberikan keyakinan tambahan terkait dengan keandalan material tersebut. Meskipun demikian, hasil negatif dari penetrant test dapat dianggap sebagai konfirmasi bahwa pemeliharaan preventif atau rencana perawatan berjalan dengan baik. Hal ini menggambarkan kualitas baik dalam proses produksi material atau komponen, serta kesesuaian dengan standar keselamatan dan peraturan industri. Kesimpulan dari penelitian ini adalah bahwa metode Penetrant Test efektif dalam mendeteksi cacat permukaan pada hasil pengelasan plat kapal, mendukung keberlanjutan operasional kapal tanpa risiko kegagalan struktural. Rekomendasi yang diberikan adalah mengadakan pelatihan tentang teknik pengujian NDT Penetrant Test yang lebih lengkap untuk meningkatkan pemahaman dan keterampilan dalam melakukan pengujian tersebut.

Kata Kunci : NDT; Penetrant; Lambung Kapal.

1. Pendahuluan

Dalam dunia industri akan didapati bahan material biji besi dan campuran lain untuk membuat suatu bahan material industri seperti plat baja. Seiring kemajuan pelayaran, peningkatan kualitas alat transportasi juga harus dilakukan. Kapal adalah alat transportasi yang digunakan untuk berhubungan dengan daratan[1]. Di era globalisasi saat ini, Indonesia yang merupakan negara kepulauan terbesar, menjadikannya sebagai wilayah strategis dalam mengembangkan usaha industri jasa transportasi laut yang memberikan manfaat sangat besar bagi perpindahan suatu barang melalui perairan[2]

Struktur kapal dihubungkan dengan ratusan kilometer jalur pengelasan. Kehadiran pengelasan dalam struktur berpotensi mengurangi umur kelelahan struktur dengan memperkenalkan ketidakhadiran ke dalam penyelaman selesai / bahan induk ini dapat diperkuat lebih lanjut oleh kehadiran cacat yang melekat pada proses penyelamatan. Aturan, standar, dan pedoman mungkin mengharuskan produsen untuk melakukan prosedur tertentu untuk meningkatkan keandalan pengelasan, seperti penggilingan jaring jari untuk meningkatkan geometri profil welding (dan karenanya peningkatan kelelahan), perawatan panas untuk meningkatkan kekakuan sendi yang dipanaskan, dan pemeriksaan Non-Destructive (NDE) untuk mendeteksi cacat pengalaman.[3]

Kerusakan pada kapal tentunya hal yang tidak diinginkan oleh para pekerja industri, termasuk industri kapal dan pesawat. Selama ini terjadi kerusakan yang diakibatkan oleh korosi terutama dibidang industri khususnya industri perkapalan bidang kelautan. Ada banyak kerugian karena adanya korosi sehingga perusahaan mau tidak mau harus mengeluarkan biaya lebih untuk perbaikan peralatan. Kerusakan yang terjadi pada kapal, utamanya pada lambung kapal bisa memengaruhi kinerja kapal yang akan mengakibatkan kebocoran. Apabila lambung kapal mengalami keretakan dan kebocoran sehingga laju kapal akan terhambat dikarenakan ada kerak dan kebocoran[4]

Deteksi cacat permukaan dan bawah permukaan yang andal sangat penting sehubungan dengan masa pakai komponen dan keselamatan penerbangan. Struktur mesin pesawat yang dibuat menimbulkan tuntutan tinggi terhadap metode yang akan digunakan untuk inspeksi las dalam produksi dan pemeliharaan. Komponen ringan ini dibuat menggunakan bahan lembaran tipis dan memiliki geometri kompleks, dimensi kecil, dan pengelasan yang perlu diperiksa. Untuk inspeksi pengelasan ini, diperlukan metode NDT baru yang efisien yang dapat mengurangi waktu inspeksi, meningkatkan rasio deteksi, dan mampu mengukur dan mengkarakterisasi berbagai jenis cacat permukaan.[5] Beberapa dari pengelasan ini mungkin, karena lokalisasi pada komponen, sulit diakses untuk pemeriksaan permukaan menggunakan metode NDT konvensional. Teknik konvensional seperti Inspeksi Visual (VT), Inspeksi Penetrant Fluoresen (FPI) dan Radiografi (RT) memiliki keterbatasan dalam penerapan dan deteksi cacat. Untuk inspeksi las menggunakan FPI, persyaratan mengenai persiapan permukaan dan penerapan langkah-langkah proses berbeda harus dipenuhi sebelum inspeksi, serta untuk evaluasi indikasi. Arus Eddy (ET) berpotensi digunakan sebagai metode inspeksi alternatif di area kritis, namun metode ini memiliki keterbatasan dalam hal kekasaran permukaan, geometri permukaan las, pengangkatan dan mungkin sulit diterapkan di area yang sulit diakses.[6]

Pembangunan konstruksi dengan logam pada masa sekarang ini banyak melibatkan unsur pengelasan khususnya bidang rancang bangun karena sambungan las merupakan salah satu pembuatan sambungan yang secara teknis memerlukan ketrampilan yang tinggi bagi pengelasnya agar diperoleh sambungan dengan kualitas baik[7] Teknologi pengelasan pada saat ini mengalami perkembangan yang sangat maju dengan ditemukannya berbagai metode baru baik yang menggunakan metode konvensional maupun otomatis.[8] Dibalik manfaat

proses pengelasan yang begitu banyak, namun dalam proses pengelasan logam hasilnya tidak selalu baik, hal ini dipengaruhi oleh banyak faktor baik disengaja maupun tidak disengaja. Kecacatan tersebut terjadi bukan karena kebetulan, tetapi disebabkan oleh beberapa faktor diantaranya yaitu sumber daya manusia yang kurang ahli, sarana dan prasarana yang kurang mendukung, dan kualitas elektroda yang buruk[9]. Untuk mengatasinya perlu dilakukan pemeriksaan hasil pengelasan agar sesuai dengan keinginan dan aman digunakan. Mempersiapkan pengelasan dengan benar dan memastikan tidak ada pengotor dalam benda kerja. Karena dapat mengakibatkan kurang maksimalnya hasil pengelasan [10]. Metode untuk memeriksa hasil las adalah dengan metode non-destructive test (NDT) berupa pewarna penetran dan ultrasonik.[11] Metode Liquid Penetrant Test (dye penetrant) merupakan metode NDT yang paling sederhana namun memiliki keunggulan dalam kecepatan dan akurasi dalam mendeteksi cacat pada permukaan.[12]

Proses Lambung adalah bagian kapal yang mempengaruhi daya apung kapal. Daya apung berperan sebagai kekuatan yang menopang beban penumpang dan isi muatan kapal. Nilai daya apung menentukan berat muatan yang dibawa oleh kapal (Satoto et al., 2013). Struktur lambung kapal, seperti halnya lambung kapal, merupakan bagian dari keseluruhan sistem rangka kapal, yang dirancang untuk menahan gaya tekan air laut dan membawa beban selama peluncuran atau tabrakan dengan objek di sekitarnya[13]

Magang ini dilaksanakan dengan tujuan utama untuk melakukan analisis mendalam terhadap korosi dan deformasi pada lambung kapal dengan menggunakan proses Non Destructive Test. Non Destructive Test (NDT) merupakan tes fisik suatu material yang digunakan untuk benda uji, untuk mencari cacat pada benda yang bersifat tidak merusak ataupun menghancurkan benda tersebut tujuan dari pengujian NDT digunakan untuk mendeteksi cacat dengan menggunakan suatu prosedur tertentu, benda yang dilakukan oleh seorang operator inspeksi Non Destructive Test (Tito 2017) [14]. Pengendalian korosi adalah tujuan terpenting dalam pembuatan kapal. Sejumlah besar kapal laut dan bangunan lepas pantai hancur karena patahan akibat korosi. Tingkat keparahan masalah ini meningkat karena tingkat pertumbuhan kerugian akibat korosi melebihi tingkat pertumbuhan produksi logam. Hilangnya logam tidak menentukan dalam hal ini koneksi[15]. Jika integritas tangki kapal laut dan tangki berisi minyak, gas hidrat atau bahan baku sumber energi lainnya rusak, maka akan timbul ancaman pencemaran lingkungan. Kontaminasi permukaan air dengan produk minyak menimbulkan dampak buruk yang besar terhadap ekosistem. Minyak yang tumpah di permukaan air dengan cepat mulai menyebar, sebagian besarnya mengendap di dasar laut, mencemari wilayah pesisir dan dasar badan air[16]

Pengujian terdiri dari semua teknik bahan atau produk di bawah berbagai jenis pembebanan. Dengan cara ini, keandalan produk kepada pengguna terjamin dan proses pemilihan material dilakukan dengan sangat mudah. Pengujian tidak boleh mempengaruhi properti material dan orang yang akan melakukan prosedur tersebut [17]. Itulah sebabnya metode Pengujian Non-Destruktif diperkenalkan dan dengan menggunakan metode ini, bahkan kekurangan kecil pada berbagai bahan dapat diketahui. Hal ini juga meningkatkan keandalan pelanggan dan kualitas produk [18]. Prinsip dari pengujian Liquid Penetrant Test merupakan metode NDT yang paling sederhana namun mempunyai keunggulan berupa kecepatan dan keakuratan dalam mendeteksi diskontinuitas yang ada di permukaan[19]

Dengan menggunakan NDT (Non Destructive Test) banyak manfaat yang didapat, diantaranya adalah biaya dan waktu. Hal itu disebabkan karena pengujian dengan metode NDT tidak merusak material yang diuji. Sehingga perusahaan yang melakukan pengujian tersebut tidak mengeluarkan biaya tambahan untuk mengganti material yang rusak. Selain itu, pengujian tidak memerlukan banyak waktu. Sehingga kegiatan produksi akan semakin optimal[20]

Dalam beberapa tahun terakhir, berbagai metode NDT telah dikembangkan dan diaplikasikan untuk inspeksi lambung kapal. Sebagai contoh, Cartz mengkaji penggunaan teknik radiografi untuk mendeteksi cacat pada sambungan las lambung kapal, serta membandingkan efektivitasnya dengan metode NDT lainnya seperti ultrasonik dan eddy current

[21]. Mikulic et al. melakukan penelitian tentang aplikasi teknik ultrasonik phased array untuk inspeksi lambung kapal baja. Ia mengeksplorasi penggunaan termografi inframerah untuk inspeksi lambung kapal. [22]

Selain itu, Paik, J.K., et al. (2004) meneliti pemanfaatan teknik Acoustic Emission (AE) untuk memantau kondisi lambung kapal selama operasi. Mereka mengembangkan sebuah sistem inspeksi lambung kapal yang mengombinasikan beberapa metode NDT, seperti ultrasonik, eddy current, dan visual yang diintegrasikan dengan robot bergerak otonom. Pentingnya inspeksi lambung kapal secara teratur tidak dapat dipungkiri [23]. Lambung kapal merupakan bagian utama yang menopang seluruh struktur kapal dan berinteraksi langsung dengan lingkungan laut yang korosif. Kerusakan atau cacat pada lambung kapal dapat menyebabkan masalah serius seperti kebocoran, penurunan kekuatan struktural, hingga risiko tenggelam. Oleh karena itu, pemantauan kondisi lambung kapal secara berkala menjadi sangat penting untuk memastikan keamanan dan keandalan operasi kapal. Namun, inspeksi lambung kapal secara konvensional seringkali memakan waktu dan biaya yang besar. Kapal harus ditarik dari operasi dan dibawa ke galangan untuk dilakukan pembongkaran sebagian struktur agar inspeksi dapat dilakukan. Prosedur ini tidak hanya mengganggu jadwal operasi kapal, tetapi juga memerlukan biaya yang signifikan untuk tenaga kerja dan fasilitas galangan. Oleh karena itu, penggunaan metode NDT menawarkan solusi yang lebih efisien dan ekonomis untuk inspeksi lambung kapal. Dengan teknik-teknik canggih seperti ultrasonik, radiografi, termografi, dan acoustic emission, cacat atau kerusakan pada lambung kapal dapat dideteksi secara dini tanpa perlu membongkar struktur. Hal ini memungkinkan inspeksi dilakukan secara lebih sering dan dengan biaya yang lebih rendah, sehingga meningkatkan keamanan operasi kapal secara keseluruhan[24].

2. Metodologi

Sistem elektronika dan senjata untuk kapal angkatan laut pada dasarnya memiliki kebutuhan sendiri dan lebih spesifik dari pada jenis yang sama lainnya untuk di darat atau di udara, karena tugas, misi dan lapangan. Interpretasi mahasiswa dapat memahami pentingnya memiliki panduan tertulis yang menetapkan parameter menganalisis dan mengevaluasi hasil pencapaian mutu produksi perusahaan dan Melaksanakan pengujian baik merusak maupun tidak merusak untuk material hasil produksi.

Melaksanakan pemeriksaan dan pengujian guna pengendalian dan jaminan mutu seluruh hasil produksi perusahaan. Interpretasi mahasiswa dapat mengidentifikasi dan mengetahui jenis-jenis kerusakan pada material plat kapal dari pada hasil pengelasan dan cara memperbaiki (repair) lambung kapal dengan sesuai SOP (standar oprasional prosedur) dan mengetahui cacat casting dan tempa cacat, retak, dan kebocoran dalam produk baru, dan retakan komponen.

Pemeriksaan pasca-mengetahui jenis-jenis kerusakan pada material kapal pada lambung kapal kegiatan yang dilakukan adalah melakukan pemeriksaan visual dan pengujian NDT dengan penetran test untuk memastikan terhadap standar kualitas pada material . Interpretasi mahasiswa dapat mengaitkan hasil cacat material dengan kriteria kualitas yang dipelajari selama perkuliahan, serta memahami tahap-tahap pemeriksaan pasca-analisa kerusakan pada material lambung.

2.1 Alat dan Bahan

Penetrant Test (PT) adalah salah satu metode non-destruktif yang digunakan untuk mendeteksi retakan, cacat, atau porositas pada permukaan logam dan beberapa jenis bahan non-logam. Berikut adalah bahan dan alat yang digunakan dalam proses pengaplikasian Penetrant Test pada material :

- a. Varnier caliper

- b. Penggaris mistar
- c. Senter
- d. cleaner, red penetrant dan developer
- e. Lap atau majun

2.2 Rancangan Penelitian

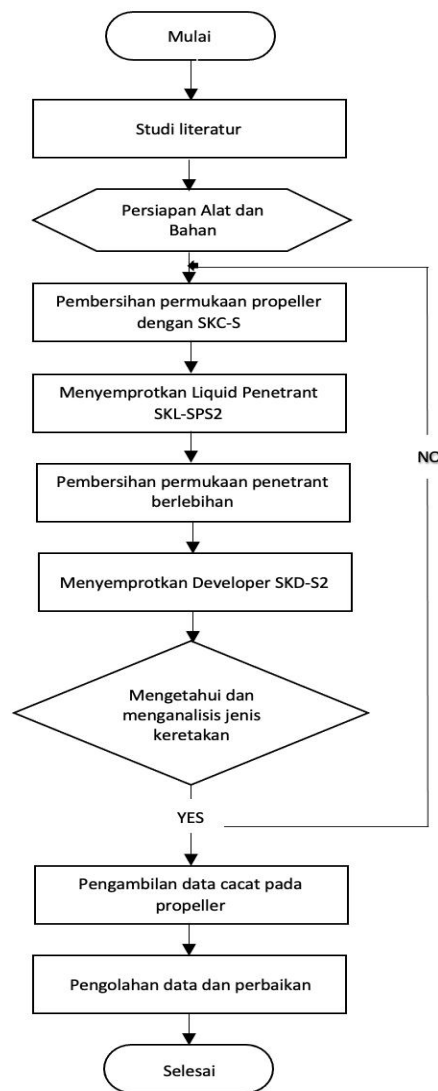
Pelaksanaan penelitian di mulai pada bulan November 2023. Pelaksanaan penelitian yang dilakukan adalah: 1) Membersihkan permukaan hasil pengelasan dari kotoran minyak dan pastikan permukaan dalam keadaan kering. 2) Menyemprotkan red penetrant lalu tunggu hingga meresap. 3) Bersihkan permukaan dengan lap atau majun yang sudah diberikan cleaner. 4) Setelah dibersihkan semprotkan SKD-S2 pada permukaan hasil las pada propoller dan tunggu selama 7 menit. 5). Pengujian Non Destructive Test menggunakan metode penetrant test.

Penelitian ini bertujuan untuk mendeteksi cacat permukaan pada material atau komponen. Tujuan dari pergantian plat ini adalah untuk memastikan keamanan, kekuatan, dan keandalan struktural kapal serta untuk memperpanjang umur pakai kapal tersebut.

Plat-plat pada bagian yang terkena air sering kali mengalami korosi, abrasi, atau kerusakan struktural lainnya akibat paparan air laut, tekanan hidrostatik, atau gesekan dengan pantai dan objek lainnya di dalam air. Pelaksanaan penetrant test pada hasil pengelasan sambungan plat baru bagian bawah kapal yang sudah rusak bertujuan untuk upaya mendeteksi cacat dan memastikan kualitas struktur kapal.

2.3 Prosedur Penelitian

- a) Studi Literatur
Melakukan kajian literatur untuk memahami penelitian terdahulu terkait proses Non Destructive Test dengan metode Penetrant testing
- b) Perencanaan Eksperimen
Menentukan desain eksperimen, termasuk pemilihan metode Non Destructive Test, pemilihan metode yang sesuai, dan analisis data untuk mengevaluasi hasil pengujian.
- c) Pelaksanaan pengujian Non Destructive test propeller
Melaksanakan proses pengujian pada satu kelompok dengan parameter yang telah ditetapkan. Mencatat data operasional selama proses pengujian dan hasil pengujian.
- d) Persiapan Propeller
Persiapkan propeller untuk pengujian dengan membersihkan permukaan hasil pengelasan dari kotoran minyak dan pastikan permukaan dalam keadaan kering
- e) Penetrant Test
Menyemprotkan red penetrant lalu tunggu hingga meresap selama 15 menit
- f) Developer
Setelah dibersihkan semprotkan SKD-S2 pada permukaan hasil las pada propoller dan tunggu selama 7 menit.
- g) Pengukuran dan Analisis
Melakukan observasi hasil pengujian Non Destructive Test dengan metode Penetrant Test
- h) Penyusunan Laporan Penelitian
Menyusun laporan penelitian yang mencakup semua langkah penelitian, hasil, interpretasi, dan rekomendasi untuk penelitian lebih lanjut atau penerapan industri.



1.

Gambar 1. Diagram Alur Metode Penelitian

2.4 Metode Analisis Data

Analisis Deskriptif:

Analisis deskriptif dari pengujian non-destructive test dengan menggunakan penetrant test (Dye Penetrant Testing - DPT) pada propeller kapal melibatkan penyajian dan interpretasi data secara statistik dan kualitatif. Dengan menggunakan metode ini memudahkan Identifikasi dan klasifikasi jenis cacat yang terdeteksi, seperti retakan, pori-pori, atau cacat permukaan lainnya.

Analisis Visual:

Menciptakan hasil visual dalam konteks keseluruhan pengujian seperti area-area yang memerlukan perhatian khusus atau tindakan lebih lanjut

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penetrant tidak menunjukkan adanya cacat pada material (negatif). Hasil negatif menunjukkan bahwa pada saat pengujian, tidak ada indikasi retak, cacat tidak relevan, atau ketidaksempurnaan permukaan yang dapat mempengaruhi integritas struktural komponen. Ini memberikan keyakinan tambahan terkait dengan keandalan material. Meskipun tidak ada cacat yang terdeteksi, hasil negatif dari penetrant test dapat dianggap sebagai konfirmasi bahwa pemeliharaan preventif yang telah dilakukan atau rencana perawatan berjalan dengan baik.



Gambar 2. Hasil Pengujian Penetrant Test

Hasil negatif dapat mencerminkan kualitas baik dalam proses produksi material atau komponen. Analisis hasil negatif juga dapat dihubungkan dengan kepatuhan terhadap standar keselamatan dan peraturan industri. Kesesuaian dengan standar ini merupakan faktor penting dalam memastikan keselamatan dan keandalan system.

4. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian dengan judul “Analisa Hasil Pengelasan Pada Lambung Kapal Dengan Metode Penetrant Test PT. PAL INDONESIA”, Dapat diketahui bahwa metode pengujian penetrant efektif dalam mendeteksi cacat permukaan seperti retak, porositas, atau cacat lainnya pada hasil pengelasan plat kapal. Rekomendasi yang dapat diberikan yaitu mengadakan pelatihan tentang teknik pengujian NDT (Non Destructive Test) Penetrant Test yang lengkap. Kesimpulan ini mendukung keberlanjutan operasional kapal tanpa risiko kegagalan struktural.

Daftar Pustaka

- [1] R. P. Pratama and T. Sitepu, "Hidrogen Pada Sel Bahan Bakar Polymer Electrolyte Membrane Kapasitas 20 W," *J. Din.*, vol. 1, no. 11, pp. 51–59, 2012.
- [2] A. S. Dwiono, A. Hendrawan, and S. Pramono, "Perbaikan Lambung Kapal KM. Harima PT. CSFI-Cilacap," *Din. Bahari*, vol. 2, no. 1, pp. 56–61, 2021, doi: 10.46484/db.v2i1.261.
- [3] P. Amirafshari, "Optimising Non-destructive Examination of newbuilding ship hull structures by developing a data-centric risk and reliability framework based on fracture mechanics Department of Naval Architecture, Ocean and Marine Engineering," no. May, 2019.
- [4] A. A. F. Amrullah and R. B. Prihandanu, "Analisa perbandingan efektivitas man power pada reparasi lambung kapal tongkang r-937di pt. x," *JUSTI J. Sist. dan Tek. Ind.*, vol. 4, no. 1, 2023.
- [5] X. Guirong, G. Xuesong, Q. Yuliang, and G. Yan, "Analysis and Innovation for Penetrant Testing for Airplane Parts," *Procedia Eng.*, vol. 99, pp. 1438–1442, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2014.12.681.
- [6] N. I. Sumardani, N. I. Setiawan, B. W. Nuryadin, and D. Sumardani, "Defect Analysis of Carbonsteel Pipe Welding Connections Using Non-Destructive Testing with the Penetrant Test Method," *Risenologi*, vol. 5, no. 1, pp. 38–47, 2020, doi: 10.47028/j.risenologi.2020.51.72.
- [7] M. Jakubowski, "Corrosion Fatigue Crack Propagation Rate Characteristics for Weldable Ship and Offshore Steels with Regard to the Influence of Loading Frequency and Saltwater Temperature," *Polish Marit. Res.*, vol. 24, no. 1, pp. 88–99, 2017, doi: 10.1515/pomr-2017-0011.
- [8] R. A. Sudrajat and A. Akbar, "SMAW Welding Detection In Ss400 Steel Materials Using The Liquid Penetrant Test Method [Deteksi Cacat Las SMAW Pada Material Baja SS400 Menggunakan Metode Liquid Penetrant Test]," pp. 1–6, 2023, doi: 10.21070/ups.1890.
- [9] Z. A. Zaenal Abidin, S. A. Wisnu Wibowo, T. Mulyono, E. Y. T. Adesta, and A. G. E. Sutjipto, "Effect of Temperature on Penetration of Test Liquid into Boiler Pipe," *Int. J. Eng. Mater. Manuf.*, vol. 8, no. 4, pp. 88–94, 2023, doi: 10.26776/ijemm.08.04.2023.01.
- [10] R. Safrul, E. Septe, and Universitas Bung Hatta, "Surface Crack Inspection of Welding SMAW Tank and Piping Joint on Pertashop by Using Dye Penetrant Test with Acceptance Criteria ASME Standard," *E-Jurnal Univ. Bung Hatta*, vol. 0, no. 0, pp. 1–9, 2022.
- [11] A. Runnemalm *et al.*, "Automatic thermography inspection of welded components with limited access," *6th Int. Symp. NDT Aerosp.*, no. November, pp. 12–14, 2014.
- [12] M. Shaloo, M. Schnall, T. Klein, N. Huber, and B. Reitingner, "A Review of Non-Destructive Testing (NDT) Techniques for Defect Detection: Application to Fusion Welding and Future Wire Arc Additive Manufacturing Processes," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 10, 2022, doi: 10.3390/ma15103697.
- [13] F. D. Suryadi, M. I. Safiq, F. I. Mumtaz, M. B. Hartawan, and S. Sahara, "Analisis Spesifikasi Kerusakan Lambung Kapal yang Melakukan Perbaikan di PT Dok dan Perkapalan Kodja Bahari Galangan II," *J. Ilm. Wahana Pendidik.*, vol. 9, no. 13, pp. 264–271, 2017, doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8151071>.
- [14] C. Chris Roshan, H. Vasanth Ram, and J. Solomon, "Non-destructive testing by liquid penetrant testing and ultrasonic testing-A review," *Int. J. Adv. Res. Ideas Innov. Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 694–697, 2019.

- [15] N. P. Migoun and N. V Delenkovsky, "The Ways of Penetrant Testing Applicability for Rough Surfaces," *17th World Conf. Nondestruct. Test.*, 2008.
- [16] A. Rodkina *et al.*, "Simulation and Selection of a Protection Types in the Design Stage of Ships and Offshore Structures," *Brodogradnja*, vol. 73, no. 2, pp. 59–77, 2022, doi: 10.21278/brod73204.
- [17] T. Endramawan and A. Sifa, "Non Destructive Test Dye Penetrant and Ultrasonic on Welding SMAW Butt Joint with Acceptance Criteria ASME Standard," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 306, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/306/1/012122.
- [18] R. Martínez-Oña, A. García, M. C. Pérez, G. Pirola, A. Dans, and Á. Bayón, "Ultrasonic inspections in the fabrication of the ITER vacuum vessel sectors," *Fusion Eng. Des.*, vol. 88, no. 9–10, pp. 2155–2159, 2013, doi: 10.1016/j.fusengdes.2013.04.030.
- [19] C. T. DOTTER, "Non-destructive testing.," *Circulation*, vol. 18, no. 2, pp. 161–164, 1958, doi: 10.1161/01.CIR.18.2.161.
- [20] A. Akundi, T. L. B. Tseng, M. F. Rahman, and E. D. Smith, "Non-Destructive Testing (NDT) and evaluation using ultrasonic testing equipment to enhance workforce skillset for modern manufacturing," *ASEE Annu. Conf. Expo. Conf. Proc.*, vol. 2018-June, 2018, doi: 10.18260/1-2--30842.
- [21] A. A. Muhsen, "Non-Destructive Testing Methods and their Application in Technology," 2022, doi: 10.6084/m9.figshare.16926127.
- [22] M. Mittelstaedt, "Non-Destructive Testing.," *Photonics Spectra*, vol. 21, no. 10, 1987, doi: 10.1016/0041-624x(64)90146-5.
- [23] J. Mikulić and D. Prebežac, "Prioritizing improvement of service attributes using impact range-performance analysis and impact-asymmetry analysis," *Manag. Serv. Qual.*, vol. 18, no. 6, pp. 559–576, 2008, doi: 10.1108/09604520810920068.
- [24] J. K. Paik, A. K. Thayamballi, Y. Il Park, and J. S. Hwang, "A time-dependent corrosion wastage model for seawater ballast tank structures of ships," *Corros. Sci.*, vol. 46, no. 2, pp. 471–486, 2004, doi: 10.1016/S0010-938X(03)00145-8.