

Analysis of Remaining Life Assessment of Coating on Continuous Nozzle Using ASTM D7091 Standard and API 581 Calculation Method [Analisis Remaining Life Assessment Coating pada Continuous Nozzle Menggunakan Standar ASTM D7091 dan Metode Perhitungan API 581]

Arya Rizki Rahmadani ¹⁾, Ali Akbar ^{*,2)}

¹⁾Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

²⁾Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

*Email Penulis Korespondensi: aliakbar@umsida.ac.id

Abstract. This study analyzes the Remaining Life Assessment (RLA) of coating on a continuous nozzle by comparing coating application methods (powder coating and spray coating) and substrate types (aluminum and galvanized). The dry film thickness (DFT) was measured non-destructively using a DFT gauge in accordance with ASTM D7091 to obtain the initial thickness and the current thickness. The thinning rate was calculated using $CR=(t_1-t_2)/\Delta t$, while the remaining coating life was determined based on the API 581 approach using $RL=(t_{current}-t_{minimum})/CR$ with a minimum thickness of 10 μm . The results show that the Powder Coating–Galvanized combination has the lowest thinning rate of 1.50 $\mu m/month$ and the longest remaining life of 92.7 months. In contrast, Spray–Aluminum exhibits the highest thinning rate of 3.00 $\mu m/month$ and the shortest remaining life of 40.3 months. These findings confirm that powder coating and galvanized substrates are more effective for long-term protection.

Keywords - Remaining Life Assessment, coating, continuous nozzle, ASTM D7091, API 581, Dry Film Thickness (DFT), thinning rate.

Abstrak. Korosi merupakan mekanisme degradasi utama yang dapat menurunkan keandalan komponen logam pada lingkungan operasi lembap dan korosif, sehingga diperlukan sistem pelapisan (coating) sebagai penghalang antara substrat dan lingkungan. Namun, coating dapat menipis dan kehilangan fungsi proteksi seiring waktu, sehingga diperlukan Remaining Life Assessment (RLA) untuk memprediksi umur sisa dan mendukung keputusan pemeliharaan. Penelitian ini menganalisis Remaining Life Assessment (RLA) coating pada continuous nozzle dengan membandingkan metode pelapisan (powder coating dan spray coating) serta jenis substrat (aluminium dan galvanized). Ketebalan lapisan cat kering (Dry Film Thickness/DFT) diukur secara non-destruktif menggunakan DFT gauge mengacu ASTM D7091 untuk memperoleh ketebalan awal dan ketebalan saat ini. Laju penipisan dihitung menggunakan $CR=(t_1-t_2)/\Delta t$, sedangkan umur sisa coating dihitung berdasarkan pendekatan API 581 melalui $RL=(t_{current}-t_{minimum})/CR$ dengan ketebalan minimum 10 μm . Hasil menunjukkan kombinasi Powder Coating–Galvanized memiliki laju penipisan terendah 1,50 $\mu m/bulan$ dan umur sisa tertinggi 92,7 bulan. Sebaliknya, Spray–Aluminium memiliki laju penipisan tertinggi 3,00 $\mu m/bulan$ dan umur sisa terendah 40,3 bulan. Temuan ini menegaskan powder coating dan substrat galvanized lebih efektif untuk perlindungan jangka panjang.

Kata Kunci - Remaining Life Assessment, coating, continuous nozzle, ASTM D7091, API 581, DFT, laju penipisan.

I. PENDAHULUAN

Korosi merupakan salah satu mekanisme degradasi utama yang menentukan umur layan (*service life*) komponen logam[1], khususnya pada peralatan proses yang beroperasi dalam lingkungan lembap, korosif, dan mengalami fluktuasi temperatur[2]. Untuk mengendalikan laju korosi, sistem pelapisan (*coating*) diaplikasikan sebagai penghalang antara substrat logam dan lingkungan[3]. Pada komponen seperti continuous nozzle berbahan aluminium maupun baja galvanis (*galvanize*), coating berperan ganda: melindungi substrat dari serangan korosi dan mempertahankan integritas dimensi dinding nozzle agar tidak terjadi penipisan yang berujung kebocoran dan unplanned shutdown[4], [5].

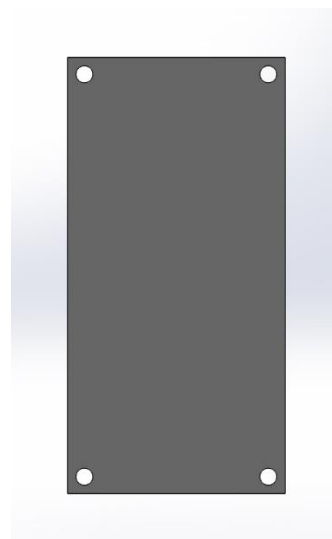
Continuous nozzle merupakan komponen penting dalam sistem industri yang berfungsi menyalurkan fluida secara kontinu pada tekanan dan temperatur tertentu. Kondisi operasi tersebut membuat continuous nozzle rentan mengalami berbagai bentuk degradasi, terutama korosi dan erosi pada permukaan material[6], [7]. Untuk meminimalkan laju kerusakan tersebut, lapisan pelindung (*coating*) diaplikasikan sebagai penghalang antara lingkungan agresif dan substrat logam[8]. Namun demikian, coating tidak bersifat permanen. Lapisan ini dapat mengalami penipisan, retak, blistering, hingga kehilangan adhesi yang seiring waktu mengurangi efektivitas proteksinya[9]. Ketika lapisan coating

tidak lagi mampu memberikan perlindungan optimal, komponen berisiko mengalami kerusakan struktural yang dapat berujung pada penurunan performa, downtime produksi, bahkan kegagalan operasi.

Dalam konteks manajemen aset industri modern, penilaian umur sisa atau *Remaining Life Assessment* (RLA) terhadap coating menjadi aspek penting untuk memastikan keandalan komponen dan menentukan strategi pemeliharaan yang efektif. Perhitungan umur sisa ini sangat bergantung pada data ketebalan coating awal dan ketebalan sisa saat inspeksi[10]. Oleh karena itu, diperlukan metode pengukuran ketebalan coating yang akurat dan terstandarisasi. Pada penelitian ini digunakan alat *Dry Film Thickness* (DFT) gauge, yaitu alat nondestructive yang mampu mengukur ketebalan lapisan coating tanpa merusak permukaan material. Penggunaan alat DFT dipilih karena mampu memberikan pembacaan cepat, presisi tinggi, serta dapat digunakan secara berulang untuk memantau perubahan ketebalan dari waktu ke waktu.

Agar proses pengukuran ketebalan coating memenuhi standar internasional, penelitian ini menggunakan acuan ASTM D7091, yaitu standar yang mengatur secara rinci praktik pengukuran ketebalan coating menggunakan metode induksi magnetik. ASTM D7091 dipilih karena menyediakan panduan lengkap mengenai prosedur kalibrasi alat, jumlah titik pengukuran yang diperlukan, teknik pengambilan data yang benar, serta kriteria validasi hasil pengukuran[11], [12]. Dengan mengikuti standar ini, data ketebalan awal (T_0) dan ketebalan saat ini (T_i) dapat diperoleh secara konsisten, akurat, dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah. Keandalan data tersebut sangat penting dalam menentukan laju penipisan coating yang menjadi parameter utama dalam perhitungan umur sisa[13].

Setelah data ketebalan coating diperoleh menggunakan prosedur ASTM D7091, tahap berikutnya adalah menghitung remaining life atau umur sisa lapisan pelindung tersebut. Untuk keperluan ini digunakan metode perhitungan dari API 581, yaitu standar *Risk-Based Inspection* yang memberikan model kuantitatif dalam menentukan laju penipisan, *minimum allowable thickness*, dan prediksi umur layanan komponen. Meskipun API 581 awalnya dikembangkan untuk analisis ketebalan dinding peralatan proses seperti pipa dan bejana tekan, pendekatan matematisnya sangat relevan diterapkan pada coating, karena coating juga mengalami mekanisme penipisan progresif yang dapat dianalisis secara linier maupun semi-linier. Dengan menggunakan API 581, perhitungan umur sisa coating menjadi lebih sistematis, terukur, dan sesuai praktik industri berbasis manajemen risiko.



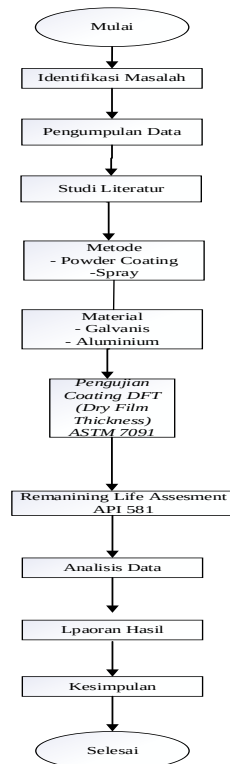
Gambar 1. Obyek Penelitian

Dengan menggabungkan pengukuran ketebalan coating menggunakan alat DFT berdasarkan standar ASTM D7091 dan perhitungan umur sisa berdasarkan API 581, penelitian ini menghadirkan pendekatan komprehensif untuk memahami tingkat degradasi coating pada continuous nozzle. Hasil analisis tidak hanya menunjukkan kondisi aktual lapisan pelindung, tetapi juga memberikan prediksi umur pakai yang tersisa sehingga dapat dijadikan dasar dalam perencanaan pemeliharaan, recoating, maupun penggantian komponen. Penelitian ini diharapkan mampu berkontribusi pada peningkatan keandalan operasi, efisiensi biaya perawatan, dan penguatan manajemen integritas aset pada industri yang mengoperasikan komponen continuous nozzle.

II. METODE

A. Diagram Alir Penelitian

Dalam penelitian ini, langkah-langkah proses penelitian akan dijelaskan dalam diagram alir (*flow chart*), Diagram alir (*flow chart*) dapat dilihat gambar tersebut.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

B. Teknik Pengumpulan Data

Perhitungan laju penipisan coating dan umur sisa dilakukan setelah seluruh data ketebalan awal dan ketebalan saat ini diperoleh melalui pengukuran menggunakan alat DFT Gauge berdasarkan prosedur ASTM D7091.



Gambar 3. Dry Film Thickness

Selama periode pemaparan, kondisi lingkungan menunjukkan suhu rata-rata sebesar 38 °C dengan intensitas cahaya rata-rata 20.250 lux, yang mencerminkan lingkungan terbuka dengan variasi paparan sinar matahari dan pencahayaan buatan sesuai waktu pengukuran.

Data ketebalan awal (t_1) dan ketebalan saat ini (t_2) kemudian digunakan untuk menghitung laju penipisan atau *Corrosion Rate* (CR) sesuai pendekatan API 581. Laju penipisan dihitung berdasarkan selisih ketebalan coating sebelum dan sesudah paparan terhadap waktu pengoperasian (Δt), yang dirumuskan sebagai berikut:

$$CR \text{ (Corosion Rate)} = \left(\frac{t_1 - t_2}{\Delta t} \right)$$

Nilai ketebalan dalam satuan mm tersebut kemudian digunakan untuk menghitung *remaining life* atau umur layan coating berdasarkan laju penipisan per tahun (mm/tahun) melalui persamaan:

Rumus tersebut memberikan nilai laju penipisan dalam satuan mm/tahun atau μm /bulan, tergantung konversi satuan yang digunakan. Nilai CR selanjutnya dipakai untuk menentukan Remaining Life (RL) atau umur sisa coating hingga mencapai batas ketebalan minimum yang masih dianggap aman. Ketebalan minimum ($t_{\min}$) ditetapkan berdasarkan standar ketahanan coating atau ketentuan teknis pabrik. Perhitungan umur sisa dilakukan menggunakan persamaan:

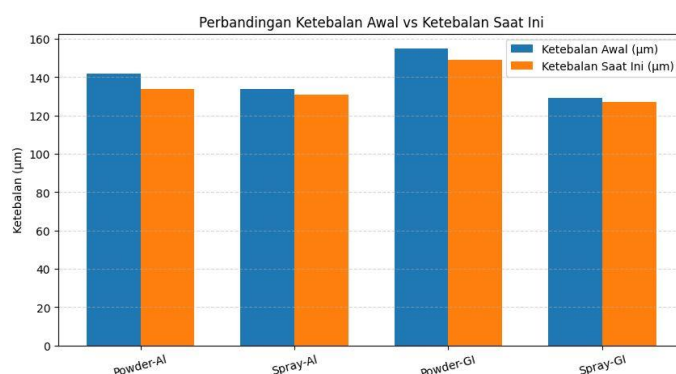
$$\text{Remaining Life Assesment} = \left(\frac{t_{\text{current}} - t_{\min}}{CR} \right)$$

di mana t_{current} merupakan ketebalan coating aktual hasil pengukuran DFT. Hasil perhitungan RL menunjukkan berapa lama coating tersebut masih mampu memberikan proteksi sebelum mencapai batas kegagalan secara fungsional. Semua hasil perhitungan laju penipisan dan umur sisa kemudian direkap dalam tabel untuk dianalisis lebih lanjut guna melihat pengaruh perbedaan metode coating dan jenis substrat terhadap tingkat degradasi coating pada continuous nozzle.

Variabel dalam penelitian ini terdiri atas metode coating dan jenis material sebagai variabel bebas, di mana metode coating meliputi powder coating dan spray coating, sedangkan jenis material yang digunakan adalah aluminium dan galvanized. Variabel terikat meliputi ketebalan awal coating, ketebalan saat ini, waktu paparan, laju penipisan coating, dan sisa umur coating yang diperoleh dari hasil pengukuran dan perhitungan Remaining Life Assessment. Adapun ketebalan minimum coating sebesar 10 μm ditetapkan berdasarkan standar internal/peraturan perusahaan, sehingga digunakan sebagai variabel kontrol dan batas acuan dalam perhitungan umur sisa coating.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Ketebalan Coating

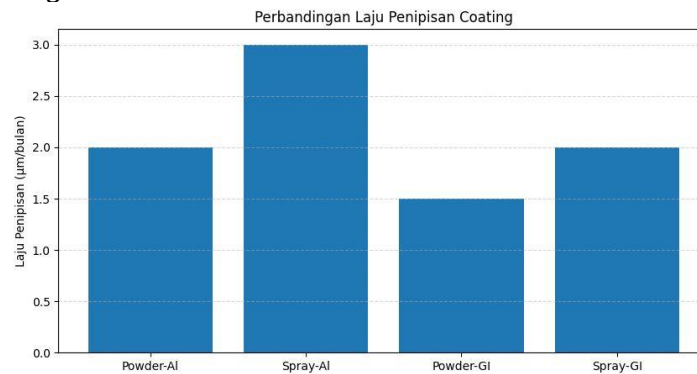


Gambar 4. Perbandingan Ketebalan Coating

Berdasarkan grafik perbandingan ketebalan awal dan ketebalan saat ini, terlihat bahwa seluruh sampel mengalami penurunan ketebalan coating setelah periode paparan, yang menunjukkan terjadinya degradasi/penipisan lapisan pelindung. Pada metode powder coating, ketebalan awal cenderung lebih tinggi dibanding spray, baik pada substrat aluminium maupun galvanized. Hal ini tampak pada Powder-Aluminium yang turun dari sekitar 142 μm menjadi 134 μm serta Powder-Galvanized yang turun dari sekitar 155 μm menjadi 149 μm , namun tetap mempertahankan ketebalan akhir yang relatif besar. Sementara itu, pada metode spray, ketebalan awal lebih rendah

dan penurunannya relatif kecil secara absolut, yaitu Spray–Aluminium dari 134 μm menjadi 131 μm dan Spray–Galvanized dari 129 μm menjadi 127 μm , yang mencerminkan lapisan awal yang memang lebih tipis. Secara keseluruhan, grafik ini menunjukkan bahwa powder coating memberikan “*build thickness*” yang lebih tinggi sehingga ketebalan residual setelah paparan tetap lebih besar, sedangkan spray coating menghasilkan ketebalan awal lebih rendah. Kombinasi dengan ketebalan awal dan ketebalan saat ini tertinggi terdapat pada Powder–Galvanized, mengindikasikan konfigurasi ini paling unggul dalam mempertahankan ketebalan lapisan pelindung dibanding variasi lainnya.

B. Laju Penipisan Coating



Gambar 5. Laju Penipisan Coating

Berdasarkan grafik perbandingan laju penipisan coating, terlihat adanya perbedaan yang cukup jelas antara metode pelapisan dan jenis substrat terhadap kecepatan degradasi lapisan. Spray–Aluminium menunjukkan laju penipisan tertinggi, yaitu sekitar 3,0 $\mu\text{m}/\text{bulan}$, yang mengindikasikan bahwa lapisan hasil spray pada aluminium paling cepat mengalami penurunan ketebalan. Hal ini umumnya berkaitan dengan karakter spray coating yang cenderung memiliki ketebalan lebih tipis, potensi porositas lebih tinggi, serta adhesi yang lebih sensitif terhadap kualitas persiapan permukaan. Sebaliknya, kombinasi Powder–Galvanized memiliki laju penipisan terendah, yaitu sekitar 1,5 $\mu\text{m}/\text{bulan}$, yang menunjukkan ketahanan lapisan paling baik terhadap penipisan selama paparan. Sementara itu, Powder–Aluminium dan Spray–Galvanized berada pada nilai menengah yang relatif sama, yakni sekitar 2,0 $\mu\text{m}/\text{bulan}$, menandakan bahwa pada kondisi data ini penurunan ketebalan terjadi lebih moderat. Secara keseluruhan, grafik menegaskan bahwa powder coating cenderung lebih tahan dibanding spray, dan substrat galvanized memberikan performa lebih baik dalam menekan laju penipisan dibanding aluminium, terutama ketika dikombinasikan dengan powder coating.

C. Sisa Umur Coating (*Remaining Life Assesment*)



Gambar 6. Grafik *Remaining Life Assesment*

Berdasarkan grafik perbandingan sisa umur coating (*remaining life*), terlihat bahwa kombinasi metode pelapisan dan jenis substrat sangat memengaruhi prediksi umur layanan lapisan pelindung. Powder–Galvanized memiliki sisa umur tertinggi, yaitu sekitar 92,7 bulan, yang menunjukkan bahwa coating pada substrat galvanized dengan metode powder coating mampu mempertahankan ketebalan dan memberikan proteksi paling lama. Selanjutnya, Powder–Aluminium berada pada urutan berikutnya dengan sisa umur sekitar 62 bulan, menandakan bahwa powder coating

juga relatif efektif pada aluminium meskipun umur layan masih lebih rendah dibanding galvanized. Untuk metode spray, nilai sisa umur lebih rendah, terutama pada Spray–Aluminium yang memiliki sisa umur terendah yaitu sekitar 40,3 bulan, yang konsisten dengan laju penipisan tertinggi pada kondisi ini. Sementara itu, Spray–Galvanized memiliki sisa umur sekitar 58,5 bulan, lebih baik daripada spray pada aluminium, yang mengindikasikan kontribusi substrat galvanized dalam meningkatkan ketahanan sistem pelapisan. Secara keseluruhan, grafik menegaskan bahwa powder coating memberikan umur layan lebih panjang dibanding spray, dan penggunaan substrat galvanized cenderung meningkatkan sisa umur coating karena laju penipisan yang lebih rendah, sehingga kombinasi Powder–Galvanized menjadi konfigurasi yang paling direkomendasikan untuk proteksi jangka panjang.

Pada hasil perhitungan *Remaining Life Assessment (RLA)* coating pada continuous nozzle berdasarkan data ketebalan awal dan ketebalan saat ini dari pengukuran DFT. Hasil pengolahan data yang meliputi laju penipisan dan estimasi sisa umur coating untuk setiap variasi metode pelapisan serta jenis substrat dirangkum dan dapat dilihat pada Tabel 2 di bawah ini.

Tabel 1 Hasil *Remaining Life Assesment*

No	Metode Coating	Jenis Material	Ketebalan Awal (μm)	Ketebalan Saat Ini (μm)	Waktu Paparan (bulan)	Laju Penipisan ($\mu\text{m}/\text{bln}$)	Ketebalan Minimum (μm)	Sisa Umur (bulan)
1	Powder Coating	Aluminium	142	134	4	2.00	10	62
2	Spray	Aluminium	134	131	1	3.00	10	40.3
3	Powder Coating	Galvanized	155	149	4	1.50	10	92.7
4	Spray	Galvanized	129	127	1	2.00	10	58.5

IV. SIMPULAN

Metode pelapisan dan jenis substrat sangat memengaruhi ketahanan coating pada continuous nozzle. Powder coating menunjukkan performa proteksi yang lebih baik dibanding spray coating, ditunjukkan oleh laju penipisan yang lebih rendah dan umur sisa yang lebih panjang. Kombinasi terbaik diperoleh pada Powder Coating–Galvanized, dengan ketebalan awal 155 μm , laju penipisan terendah 1,50 $\mu\text{m}/\text{bulan}$, serta sisa umur tertinggi sekitar 92,7 bulan, yang mengindikasikan sistem pelapisan ini paling efektif dalam menahan degradasi. Sebaliknya, konfigurasi Spray–Aluminium memiliki laju penipisan tertinggi 3,00 $\mu\text{m}/\text{bulan}$ dengan sisa umur terpendek sekitar 40,3 bulan, sehingga dinilai paling rentan mengalami penurunan proteksi. Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa penerapan powder coating terutama pada substrat galvanized lebih direkomendasikan untuk penggunaan jangka panjang karena memberikan perlindungan lebih stabil terhadap penipisan coating dan berpotensi menurunkan risiko kerusakan serta downtime operasional.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada orang tua saya karna telah mensupport dalam pengerjaan skripsi dan terimakasih kepada teman teman Mesin A2 yang selalu membantu dan memotivasi untuk mengerjakan skripsi.

REFERENSI

- [1] A. Baxevani, E. Lamprou, A. Mavropoulos, F. Stergioudi, N. Michailidis, and I. Tsoulfaidis, “Investigation of Corrosion Resistance in Powder-Coated Aluminum Alloy: Effects of Powder Coating and Pre-Anodizing Followed by Powder Coating,” *Metals (Basel)*, vol. 15, no. 10, Oct. 2025, doi: 10.3390/met15101062.
- [2] M. K. Bhadu, A. K. Guin, V. Singh, and S. K. Choudhary, “Corrosion Study of Powder-Coated Galvanised Steel,” *ISRN Corrosion*, vol. 2013, pp. 1–9, Mar. 2013, doi: 10.1155/2013/464710.
- [3] R. Galiotto, S. Zanetti, R. Traini, and L. Pezzato, “Physical–Mechanical and Corrosion Resistance Characterization of a Water-Based Epoxy Primer Applied to Galvanized Steel,” *Metals (Basel)*, vol. 15, no. 11, Nov. 2025, doi: 10.3390/met15111196.
- [4] E. K. Karaxi, I. A. Kartsonakis, and C. A. Charitidis, “Assessment of Self-Healing Epoxy-Based Coatings Containing Microcapsules Applied on Hot Dipped Galvanized Steel,” *Front Mater*, vol. 6, Sep. 2019, doi: 10.3389/fmats.2019.00222.

- [5] A. Teurupun, B. S. Nugroho, A. Nurrahmana, and K. Alfarizi, "Risk-Based Inspection Analysis of Api 581 Pressure Safety Valve and Stripper Acid Gas Removal Unit at PT. XY," *Scientific Contributions Oil and Gas*, vol. 47, no. 3, pp. 313–325, Oct. 2024, doi: 10.29017/SCOG.47.3.1645.
- [6] I. Kunce, A. Królikowska, and L. Komorowski, "Accelerated corrosion tests in quality labels for powder coatings on galvanized steel—comparison of requirements and experimental evaluation," *Materials*, vol. 14, no. 21, Nov. 2021, doi: 10.3390/ma14216547.
- [7] J. Zhang *et al.*, "Non-Destructive Evaluation of Coating Thickness Using Water Immersion Ultrasonic Testing," *Coatings*, vol. 11, no. 11, Nov. 2021, doi: 10.3390/COATINGS11111421.
- [8] M. S. Jarić, S. Z. Petronić, N. J. Budimir, K. G. Čolić, and L. D. Jeremić, "Analysis Of The Estimated Remaining Service Life Of Gas Rectification Columns," *Thermal Science*, vol. 25, no. 5 Part B, pp. 3813–3823, 2021, doi: 10.2298/TSCI201214083J.
- [9] X. Meng, M. Lu, W. Yin, A. Bennecer, and K. J. Kirk, "Evaluation of coating thickness using lift-off insensitivity of eddy current sensor," *Sensors (Switzerland)*, vol. 21, no. 2, pp. 1–18, Jan. 2021, doi: 10.3390/s21020419.
- [10] M. Arifullah and I. Widyastuti, "LAJU KOROSI BAJA KARBON HASIL POWDER COATING DAN PENGECATAN CAIR," 2015.
- [11] J. T. Perkapalan, H. P. Sumintono, P. Manik, U. Budiarto, J. Soedarto, and U. Tembalang, "Analisis Pengaruh Ketebalan Coating Terhadap Laju Korosi Pada Baja ST42 Sebagai Material Daun Kemudi Pada Perairan Dengan Tingkat Salinitas Yang Bervariasi," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 12, no. 4, p. 1, 2024, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>
- [12] G. D. Haryadi, H. K. Kustomo, and S. J. Kim, "Penilaian Risiko Dan Perencanaan Inspeksi Pipa Transmisi Gas Alam Cepu-Semarang Menggunakan Metode Risk Based Inspection Semi-Kuantitatif Api 581," *MESIN*, vol. 25, no. 1, pp. 18–28, 2016.
- [13] A. Abdou, T. Bouchala, B. Abdelhadi, A. Guettafi, and A. Benoudjit, "Nondestructive eddy current measurement of coating thickness of aeronautical construction materials," *Instrumentation Mesure Metrologie*, vol. 18, no. 5, pp. 451–457, Oct. 2019, doi: 10.18280/i2m.180504.

Conflict of Interest Statement:

The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.