

PENGARUH UKURAN PARTIKEL NANO SILIKA TERHADAP KOROSI DAN DEGRADASI PELAPISAN HIBRIDA BIO–NANO PADA MEDIA NATRIUM KLORIDA

Maulidia Hendriani¹⁾, Andoko Andoko^{1)*}, Riduwan Prasetya¹⁾, Yahya Zakaria¹⁾

1) Program Studi Teknik Mesin, Universitas Negeri Malang

email: maulidia.hendriani.2205146@students.um.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi ukuran partikel nano-silika terhadap ketahanan korosi dan degradasi pelapisan hibrida berbasis minyak jarak pada baja struktural untuk aplikasi lingkungan laut. Variasi ukuran partikel nano-silika yang digunakan masing-masing 20 nm, 100 nm, dan 500 nm, yang dikombinasikan dengan minyak jarak sebagai lapisan primer dan epoxy sebagai top coat. Karakterisasi dilakukan melalui uji perendaman dalam larutan NaCl 3,5% selama 21 hari dengan pengukuran kehilangan massa dan laju korosi menggunakan metode gravimetri. Hasil pengujian menunjukkan bahwa baja tanpa pelapis memiliki kehilangan massa tertinggi sebesar 1,29% dengan laju korosi $0,1942 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, sedangkan sampel dengan nano-silika 20 nm memberikan performa terbaik dengan kehilangan massa terendah sebesar 0,33% dan laju korosi paling kecil yaitu $0,0448 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. Sampel dengan ukuran partikel 100 nm dan 500 nm menunjukkan nilai kehilangan massa negatif masing-masing $-0,21\%$ dan $-0,67\%$ akibat terbentuknya produk korosi sekunder yang bersifat rapuh, sehingga perlindungan tidak stabil dalam jangka panjang. Temuan ini menegaskan bahwa ukuran partikel nano-silika yang lebih kecil memberikan dispersi lebih homogen dalam lapisan pelindung, membatasi penetrasi ion klorida, dan direkomendasikan sebagai strategi proteksi korosi yang optimal serta berkelanjutan untuk baja struktural.

Kata Kunci : Minyak Jarak, Nano-Silika, Korosi, Pelapisan Hibrida Bio-Nano

Pendahuluan

Korosi pada baja struktural merupakan permasalahan serius di sektor kelautan, meliputi kapal, pelabuhan, platform lepas pantai, dan fasilitas pendukung industri maritim [1]. Lingkungan laut yang kaya ion klorida mempercepat proses degradasi logam sehingga menurunkan kekuatan mekanik, memperpendek umur pakai komponen, serta meningkatkan biaya perawatan [2]. Situasi ini menjadikan pengendalian korosi pada baja struktural di lingkungan laut sebagai salah satu isu prioritas dalam pemeliharaan infrastruktur maritim dan industri pendukungnya [3]. Menghadapi kondisi tersebut, dibutuhkan sistem pelapisan yang mampu memberikan perlindungan optimal terhadap penetrasi ion klorida sekaligus menjaga integritas mekanik substrat logam. Sistem pelapis yang ideal seharusnya memiliki ketahanan tinggi terhadap lingkungan agresif, sifat adhesi yang baik pada baja, kemampuan membentuk penghalang difusi, serta stabilitas struktural di bawah kondisi siklik [4], [5]. Selain itu, aspek keberlanjutan mulai menjadi pertimbangan penting dalam pengembangan material pelapis [6]. Oleh karena itu, diperlukan formulasi baru yang memadukan ketahanan korosi, ketahanan mekanik, dan keberlanjutan lingkungan untuk menjawab tantangan sektor kelautan.

Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk meningkatkan ketahanan korosi pada logam, terutama melalui modifikasi material pelapis berbasis polimer dan nanopartikel. Alam dkk. [7] melaporkan bahwa kombinasi nanopartikel SiO_2 dan ZnO dalam matriks epoxy dapat meningkatkan kekerasan serta ketahanan korosi pelapis. González-Reyna dkk. [8] menunjukkan bahwa ukuran partikel nano-silika mempengaruhi performa proteksi korosi secara signifikan, di mana ukuran lebih kecil memberikan distribusi partikel yang lebih homogen. Sementara itu, Xu dkk. [9] berhasil meningkatkan performa pelapis melalui penambahan nano-silika hidrofobik ke dalam sistem epoxy. Penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa penambahan nano- SiO_2 pada matriks epoksi dapat mencapai impedansi hingga $10^{12}–10^{21} \Omega \cdot \text{cm}^2$ pada komposisi optimal sekitar 2,5 wt%, meskipun variasi ukuran partikel belum dieksplorasi secara mendalam [10]. Di sisi lain, studi lain mengembangkan pelapis non-isocyanate polyurethane (NIPU) berbasis minyak jarak dengan penambahan nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4+\text{SiO}_2-\text{NH}_2$ yang memberikan sifat biodegradabilitas, antifouling, dan ketahanan korosi awal, namun nilai impedansinya masih relatif

rendah [11]. Dengan demikian, kombinasi minyak jarak dan nano-silika mulai mendapatkan perhatian sebagai kandidat potensial untuk sistem pelapisan hibrida yang lebih berkelanjutan.

Meskipun berbagai studi tersebut menunjukkan kemajuan signifikan, mayoritas masih berfokus pada sistem pelapis berbasis polimer sintetis. Belum banyak kajian yang mengombinasikan *bio-oil* seperti minyak jarak sebagai bahan dasar pelapis dengan nano-SiO₂ dalam konteks analisis pengaruh variasi ukuran nano-SiO₂ terhadap performa pelapisan dalam korosif. Penelitian ini bertujuan mengisi celah tersebut dengan merancang sistem pelapisan hibrida berbasis minyak jarak dan nano-silika untuk mengevaluasi ketahanan korosi. Formulasi ini diharapkan dapat memperpanjang umur pakai komponen logam, mengurangi biaya perawatan, serta mendukung penerapan teknologi pelapisan yang ramah lingkungan di sektor kelautan. Selain memberikan kontribusi terhadap teknologi pelapisan, hasil penelitian ini juga berpotensi mendorong pemanfaatan bahan alam lokal sebagai sumber resin alternatif dan memperkuat arah industrialisasi hijau.

Metodologi Penelitian **Material**

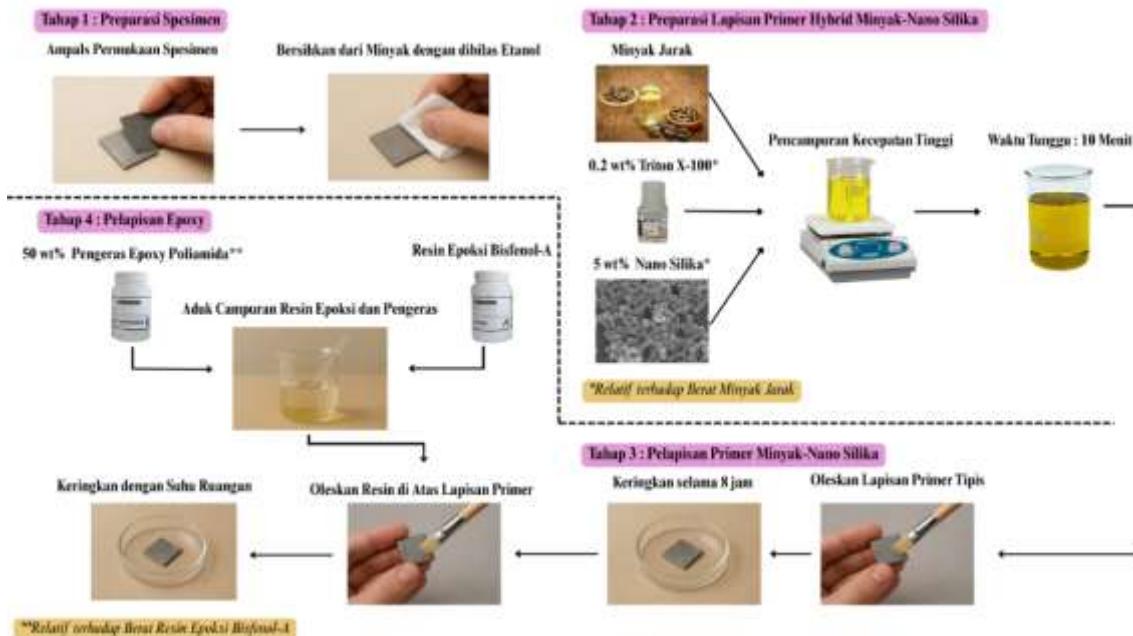
Baja karbon rendah komersial ASTM A36 digunakan sebagai substrat, dipotong menjadi spesimen persegi panjang berukuran 10 mm × 10 mm × 2 mm untuk evaluasi perendaman dan pelapisan. Pelapis dasar disiapkan menggunakan minyak jarak komersial (CV IndoCastor, Indonesia) yang kaya akan gugus hidroksil sehingga memudahkan interaksi polar dengan permukaan baja, sedangkan bubuk nano-silika (SiO₂) (Sigma-Aldrich, kemurnian 99,5%, ukuran partikel rata-rata 20 nm, 100 nm, dan 500 nm) ditambahkan sebagai pengisi anorganik untuk meningkatkan efek penghalang pelapis. Lapisan pelindung teratas dibentuk menggunakan resin epoksi bisfenol-A dua komponen (Epikote 828) dengan pengeras berbasis poliamida (Epikure 3402) pada perbandingan resin-ke-pengeras 2:1 berdasarkan berat. Etanol dan natrium klorida (NaCl) digunakan untuk pembersihan substrat dan persiapan larutan korosi.

Preparasi Spesimen

Sebelum proses pelapisan, semua spesimen baja dipoles secara manual menggunakan kertas abrasif silikon karbida (grit 400–600) untuk menghilangkan oksida dan kotoran permukaan. Sampel kemudian dibersihkan dari minyak dengan dibilas etanol. Spesimen yang telah kering disimpan dalam desikator sebelum proses pelapisan dilakukan.

Preparasi Lapisan Primer Hybrid Minyak-Nano Silika

Nano-silika didispersikan ke dalam minyak jarak dengan konsentrasi 5% berat relatif terhadap massa minyak. Campuran tersebut diaduk menggunakan pengaduk magnetik pada kecepatan 500 rpm selama 30 menit pada suhu ruangan untuk mencapai dispersi yang merata. Untuk mencegah agregasi nanopartikel, ditambahkan 0,2% berat Triton X-100 sebagai surfaktan non-ionik. Campuran minyak–nano kemudian dibiarkan istirahat selama 10 menit sebelum diaplikasikan.



Gambar 1. Proses pelapisan baja ASTM A36

Prosedur Pelapisan

Pelapisan Primer Minyak-Nano Silika

Campuran minyak-nano hibrida diaplikasikan pada permukaan baja menggunakan kuas berbulu lembut dalam lapisan tipis tunggal. Sampel-sampel tersebut dikeringkan di udara pada suhu ruangan selama 8 jam untuk memungkinkan penyerapan sebagian dan pengikatan pada permukaan logam.

Pelapisan Epoxy

Setelah lapisan primer mengering, resin epoxy dan pengeras dicampur dengan perbandingan berat 2:1 dan diaplikasikan menggunakan teknik kuas yang sama. Resin epoxy diaplikasikan dalam lapisan tunggal yang merata dengan ketebalan lapisan kering target 100–150 μm . Sampel yang dilapisi dikeringkan dalam kondisi ruangan (25–28°C) selama 24 jam, diikuti dengan pengeringan lanjutan dalam oven pada suhu 60°C selama 2 jam untuk memastikan pengikatan silang antar partikel sempurna.

Desain Eksperimen

Tabel 1. Desain Eksperimen *Bio-Coating*

Kode Sample	Perlakuan
S1	Steel
S2	Steel+ SiO ₂ (20 nm)+Minyak jarak+Epoxy
S3	Steel+ SiO ₂ (100 nm)+Minyak jarak+Epoxy
S4	Steel+ SiO ₂ (500 nm)+Minyak jarak+Epoxy

Uji Degradasi

Spesimen yang dilapisi dan tidak dilapisi direndam sepenuhnya dalam larutan NaCl 3,5% berat pada suhu ruangan selama total 21 hari. Sampel ditempatkan dalam wadah kaca dengan tutup yang kedap udara untuk mencegah penguapan. Setelah direndam, sampel dibilas dengan air deionisasi, dikeringkan, dan disimpan dalam desikator untuk analisis lebih lanjut.

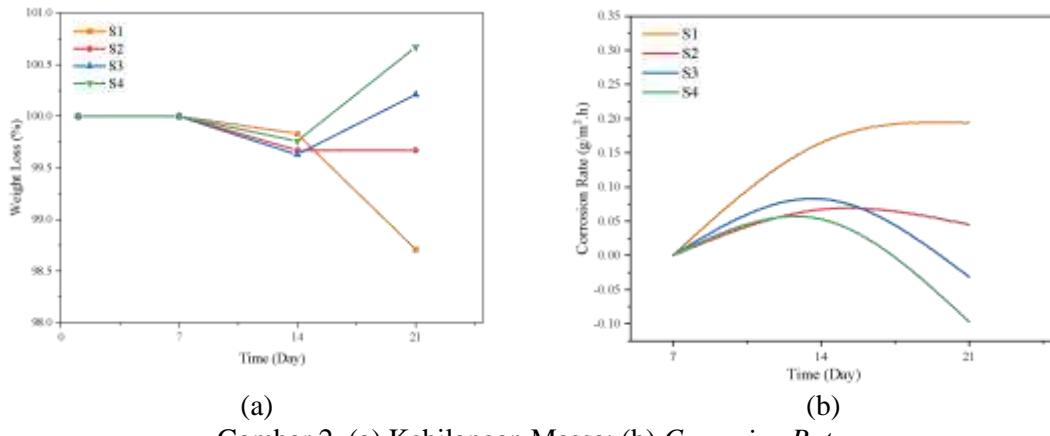
Analisis Permukaan dan Struktur

Penentuan laju korosi dilakukan menggunakan metode analisis gravimetri untuk menentukan kehilangan berat sebelum dan setelah korosi guna memperkirakan degradasi logam. Laju korosi dihitung berdasarkan penurunan massa spesimen menggunakan Persamaan 1.

$$r_{corr} = \frac{\Delta m}{A \cdot t} \quad (1)$$

Dimana r_{corr} adalah laju korosi [$g/(m^2 \cdot h)$], Δ_m adalah kehilangan berat (g), A adalah luas permukaan (m^2), dan t adalah waktu paparan (jam). Persamaan ini memungkinkan perhitungan kuantitatif laju korosi dengan mempertimbangkan luas permukaan sampel dan lamanya waktu paparan sehingga degradasi logam dapat diestimasi secara akurat.

Hasil dan Pembahasan



Gambar 2. (a) Kehilangan Massa; (b) *Corrosion Rate*

Grafik pada Gambar 2a menunjukkan kehilangan massa dan Gambar 2b menunjukkan laju korosi. Baja tanpa pelapis (S1) mengalami kehilangan massa tertinggi sebesar 1,29% setelah tiga minggu perendaman, sekaligus menunjukkan laju korosi tertinggi sebesar $0,1942 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ pada hari ke-21. Sedangkan sampel dengan lapisan nano-silika berukuran 20 nm (S2) menunjukkan kehilangan massa terendah sebesar 0,33% dengan laju korosi paling kecil yaitu $0,0448 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ pada hari ke-21. Sampel dengan ukuran partikel lebih besar, yaitu S3 dan S4, memperlihatkan nilai yang berada di antara keduanya, dengan kehilangan massa masing-masing sebesar -0,21% dan -0,67% serta laju korosi $-0,0315 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ dan $-0,0970 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. Hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa variasi ukuran partikel nano-silika pada lapisan primer berpengaruh langsung terhadap efektivitas pelapisan, di mana ukuran partikel kecil menghasilkan kinerja proteksi paling baik [8]. Perbedaan tren semakin jelas pada durasi perendaman yang lebih panjang, di mana S1 terus mengalami degradasi signifikan, sementara S2, S3, dan S4 memperlihatkan perlambatan korosi dengan efektivitas berbeda. Hasil penelitian ini menegaskan bahwa sistem pelapisan berbasis minyak jarak–nano silika yang diberikan resin epoxy sebagai *top coat* mampu menurunkan kehilangan massa sekaligus menekan laju korosi baja struktural [7], [11].

Fenomena kenaikan massa yang terlihat pada S3 dan S4 di minggu ke 3 memperlihatkan adanya mekanisme pembentukan produk korosi yang lebih dominan dibandingkan degradasi substrat logam. Nilai kehilangan massa negatif pada S3 (-0,21%) dan S4 (-0,67%) mengindikasikan terjadinya pertambahan massa. Hal tersebut diduga karena terbentuknya senyawa korosi yang menempel di permukaan, sehingga perhitungan gravimetri menghasilkan laju korosi negatif, yaitu $-0,0315 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ pada S3 dan $-0,0970 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ pada S4. Kondisi ini sejalan dengan laporan Oshin dkk. [12], yang menjelaskan bahwa akumulasi produk korosi seperti Fe(OH)_2 dan Fe(OH)_3 dapat meningkatkan berat spesimen meskipun reaksi degradasi tetap berlangsung. Akumulasi produk korosi yang terbentuk di pori-pori lapisan primer dan tertahan oleh epoxy memberikan penghalang sementara terhadap difusi ion klorida [13].

Variasi ukuran partikel nano-silika pada lapisan primer memberikan pengaruh yang signifikan terhadap perlindungan baja terhadap korosi. S2, dengan partikel 20 nm, menunjukkan perlindungan terbaik karena ukuran partikel yang kecil memungkinkan penyebaran lebih merata di permukaan, sehingga penetrasi ion klorida dapat dibatasi secara efektif dan membantu memperlambat degradasi logam secara signifikan [7]. S3 dan S4 memperlihatkan perlindungan yang paling rendah, di mana akumulasi produk korosi sekunder lebih dominan dibanding perlindungan lapisan. Ukuran partikel ini secara langsung memengaruhi kemampuan lapisan primer untuk menahan laju korosi. Fenomena ini menunjukkan bahwa ukuran partikel

menentukan seberapa baik lapisan primer dapat mencegah penetrasi ion korosif. Semakin kecil partikel, semakin sulit ion klorida menembus lapisan, sehingga laju korosi lebih rendah. Partikel besar cenderung meninggalkan jalur penetrasi, yang mempercepat degradasi logam atau memicu akumulasi korosi sekunder. Perbedaan ini menegaskan bahwa variasi ukuran partikel nano-silika merupakan faktor kunci dalam efektivitas pelapisan [14]. Temuan ini memberikan bukti eksperimental bahwa variasi ukuran partikel nano-silika berpengaruh langsung terhadap ketahanan lapisan, dan ukuran kecil lebih direkomendasikan untuk memperoleh perlindungan jangka panjang terhadap baja struktural.

Kesimpulan

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem pelapisan hibrida berbasis minyak jarak dengan penambahan nano-silika serta resin epoxy sebagai *top coat* mampu menekan laju korosi baja struktural secara signifikan dibandingkan baja tanpa pelapis. Variasi ukuran partikel nano-silika terbukti memengaruhi efektivitas proteksi, di mana partikel berukuran kecil (20 nm) memberikan performa terbaik dengan kehilangan massa terendah sebesar 0,33% dan laju korosi paling kecil yaitu 0,0448 g/(m²·h) setelah 21 hari perendaman. Sebaliknya, penggunaan partikel berukuran lebih besar (100 nm dan 500 nm) menunjukkan fenomena penambahan massa akibat terbentuknya produk korosi sekunder, sehingga nilai kehilangan massa dan laju korosi yang dihasilkan cenderung negatif. Secara keseluruhan, ukuran partikel nano-silika yang lebih kecil mampu terdispersi lebih merata dalam lapisan primer sehingga efektif membatasi penetrasi ion klorida, sedangkan partikel berukuran lebih besar cenderung meninggalkan jalur difusi yang mempercepat degradasi logam. Penggunaan nano-silika berukuran kecil direkomendasikan sebagai strategi proteksi korosi yang lebih optimal dan berkelanjutan bagi baja struktural di lingkungan laut.

Daftar Pustaka

- [1] G.-X. Li, B. Jing, Z.-Q. Wang, and S.-Q. Hu, “Study on the Corrosion Mechanism and Coating Protection of Q235 Steel for Offshore Platform,” *Cailiao Baochu/Materials Protection*, vol. 55, no. 8, pp. 43-50 and 108, 2022, doi: 10.16577/j.issn.1001-1560.2022.0213.
- [2] S. Salleh, N. M. S. Mortadha, and A. Alzakri, “Three-Dimensional Model of Ionic Species Concentration and Flux During Localised Corrosion of Steel in Marine Environment,” *Journal of Advanced Research in Micro and Nano Engineering*, vol. 25, no. 1, pp. 27–38, 2024, doi: 10.37934/armne.25.1.2738.
- [3] G. P. V Dalmora, E. P. Borges Filho, A. A. Maraschin Conterato, W. S. Roso, C. E. Pereira, and A. Dettmer, “Methods of corrosion prevention for steel in marine environments: A review,” *Results in Surfaces and Interfaces*, vol. 18, 2025, doi: 10.1016/j.rsurfi.2025.100430.
- [4] A. J. Maskavizan, J. P. Quintana, E. L. Dalibón, A. B. Márquez, S. P. Brühl, and S. B. Farina, “Evaluation of wear and corrosion resistance in acidic and chloride solutions of Cathodic Arc PVD chromium nitride coatings on untreated and plasma nitrided AISI 4140 steel,” *Surf Coat Technol*, vol. 494, 2024, doi: 10.1016/j.surfcoat.2024.131476.
- [5] L. Zhang *et al.*, “Comprehensively evaluating and unraveling the electrical conductivity, corrosion resistance and mechanical properties of metal carbide coatings for metal bipolar plates,” *Mater Today Commun*, vol. 46, 2025, doi: 10.1016/j.mtcomm.2025.112713.
- [6] M. F. De Riccardis, “Green Coatings: Materials, Deposition Processes, and Applications,” in *Handbook of Green and Sustainable Nanotechnology: Fundamentals, Developments and Applications: Volume 1-4*, vol. 3, Springer International Publishing, 2023, pp. 1627–1654. doi: 10.1007/978-3-031-16101-8_41.

- [7] M. A. Alam, U. A. Samad, A. Anis, M. Alam, M. Ubaidullah, and S. M. Al-Zahrani, “Effects of SiO₂ and ZnO nanoparticles on epoxy coatings and its performance investigation using thermal and nanoindentation technique,” *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 9, May 2021, doi: 10.3390/polym13091490.
- [8] M. A. González-Reyna, M. A. Espinosa-Medina, R. Esparza, A. R. Hernández-Martínez, J. Maya-Cornejo, and M. Estévez, “Anticorrosive Effect of the Size of Silica Nanoparticles on PMMA-Based Hybrid Coatings,” *J Mater Eng Perform*, vol. 30, no. 2, pp. 1054–1065, Feb. 2021, doi: 10.1007/s11665-020-05437-x.
- [9] Y. Xu *et al.*, “Anticorrosive behavior of epoxy coating modified with hydrophobic nano-silica on phosphatized carbon steel,” *Prog Org Coat*, vol. 151, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.porgcoat.2020.106051.
- [10] Z. Hussain, Z. Lin, H. Pan, Y. Huang, F. Tang, and L. Jiang, “Synergizing empirical and AI methods to examine nano-silica’s microscale contribution to epoxy coating corrosion resistance,” *Ceram Int*, vol. 50, no. 22, pp. 47172–47191, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.ceramint.2024.09.067.
- [11] Y. R. Sulthana, D. K. Chelike, and S. A. Gurusamy Thangavelu, “Biorenewable vegetable oil based nonisocyanate polyurethanes and nanocomposites; formulation, characterisation, biodegradation, anticorrosion and antifouling coatings,” *New Journal of Chemistry*, vol. 48, no. 12, pp. 5173–5185, Feb. 2024, doi: 10.1039/d3nj05862j.
- [12] T. A. Oshin, B. S. Fakinle, and O. Oyewole, “Corrosion of Mild Steel and Galvanized Steel in SO₂ Enclosures: The Incidence of Negative Gravimetric Corrosion Rates,” *The Open Chemical Engineering Journal*, vol. 18, no. 1, Aug. 2024, doi: 10.2174/0118741231279844231228071455.
- [13] C. X. Wang, Y. Y. Han, W. Wang, J. Liu, N. Wang, and B. R. Hou, “Polyvinyl chloride/epoxy double layer powder coating enhances coating adhesion and anticorrosion protection of substrate,” *Prog Org Coat*, vol. 158, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.porgcoat.2021.106335.
- [14] E. Kontou, A. Christopoulos, P. Koralli, and D. E. Mouzakis, “The Effect of Silica Particle Size on the Mechanical Enhancement of Polymer Nanocomposites,” *Nanomaterials*, vol. 13, no. 6, Mar. 2023, doi: 10.3390/nano13061095.