

PENGARUH VARIASI WAKTU ELEKTRODEPOSISI TERHADAP KETAHANAN KOROSI LAPISAN KOMPOSIT Zn-CaCO_3 CANGKANG TELUR PADA BAJA AISI 1018 DI LINGKUNGAN BIODIESEL

*Rio Hadyan Purwanto¹, A. P. Bayuseno², Jamari²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: riohadyanpurwanto@students.undip.ac.id

Abstrak

Penggunaan biodiesel B40 sebagai bagian dari transisi energi nasional meningkatkan risiko korosi pada baja karbon rendah AISI 1018 karena sifatnya yang higroskopis dan mudah terdegradasi secara oksidatif. Salah satu upaya meningkatkan ketahanan korosi adalah melalui pelapisan komposit seng (Zn) dengan penambahan partikel kalsium karbonat (CaCO_3) dari limbah cangkang telur. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi waktu elektrodeposisi (30, 40, dan 50 menit) terhadap karakteristik lapisan Zn-CaCO_3 dan ketahanan korosi baja AISI 1018 dalam biodiesel B40. Pengujian meliputi kekerasan Vickers, kekasaran permukaan, ketebalan lapisan, laju korosi metode weight loss selama 21 hari, serta karakterisasi SEM dan XRD. Hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu deposisi 40 menit menghasilkan performa terbaik dengan ketebalan lapisan 120,00 μm , kekerasan 99,57 HV, dan laju korosi terendah sebesar 0,004553 mm/tahun. Nilai kekasaran meningkat seiring bertambahnya waktu deposisi, sedangkan seluruh spesimen termasuk kategori korosivitas rendah (C_2) berdasarkan ISO 9223. Karakterisasi SEM menunjukkan perubahan morfologi lapisan yang semakin padat, sementara analisis XRD pada spesimen optimum mengonfirmasi terbentuknya fasa Zn (75,6%), CaCO_3 (15,1%), dan Fe (9,3%). Secara keseluruhan, waktu elektrodeposisi 40 menit merupakan kondisi optimum yang menghasilkan kombinasi terbaik antara sifat mekanik, struktur lapisan, dan ketahanan korosi, sehingga berpotensi sebagai metode pelapisan yang efektif dan ramah lingkungan untuk aplikasi berbasis biodiesel.

Kata kunci: baja AISI 1018; biodiesel B40; ketahanan korosi; komposit Zn-CaCO_3 ; waktu elektrodeposisi

Abstract

The implementation of B40 biodiesel as part of Indonesia's energy transition policy increases the corrosion risk of low-carbon steel AISI 1018, due to its hygroscopic nature and susceptibility to oxidative degradation. One approach to improving corrosion resistance is the application of zinc (Zn)-based composite coatings reinforced with calcium carbonate (CaCO_3) particles derived from eggshell waste. This study investigates the effect of electrodeposition time (30, 40, and 50 minutes) on the characteristics of Zn-CaCO_3 composite coatings and their corrosion resistance in a B40 biodiesel environment. The coatings were evaluated through Vickers hardness, surface roughness, coating thickness, 21-day weight-loss corrosion testing, and SEM and XRD characterization. The results indicate that a deposition time of 40 minutes produced the best performance, with the highest coating thickness (120.00 μm), highest hardness (99.57 HV), and lowest corrosion rate (0.004553 mm/year). Surface roughness increased with deposition time, while all specimens were classified as low corrosivity (C_2) according to ISO 9223. SEM analysis showed progressively denser coating morphologies, and XRD confirmed the presence of Zn (75.6%), CaCO_3 (15.1%), and Fe (9.3%) phases in the optimal coating. Overall, a 40-minute electrodeposition time provides the optimum balance of mechanical properties, coating structure, and corrosion resistance for biodiesel-based applications.

Keywords: AISI 1018 steel; B40 biodiesel; corrosion resistance; composite Zn-CaCO_3 ; electrodeposition time

1. Pendahuluan

Transisi energi nasional Indonesia yang mengarah pada penerapan biodiesel B40 berimplikasi pada meningkatnya penggunaan baja pada komponen tangki penyimpanan, permesinan, dan sistem penyaluran bahan bakar. Dibandingkan solar fosil, biodiesel memiliki sifat higroskopis, kandungan air, dan senyawa ester yang lebih tinggi sehingga berpotensi mempercepat degradasi oksidatif dan proses korosi pada baja karbon rendah seperti AISI 1018 [1].

Salah satu pendekatan untuk meningkatkan ketahanan korosi baja adalah pelapisan berbasis seng (Zn), yang mampu memberikan perlindungan katodik sakrifisial karena potensial elektrodanya yang lebih negatif dibandingkan besi. Akan tetapi, lapisan Zn konvensional memiliki keterbatasan pada sifat mekanik, terutama kekerasan yang relatif rendah, sehingga mempengaruhi ketahanan aus dan umur layanan lapisan [2]. Penambahan partikel kalsium karbonat (CaCO_3) yang berasal dari limbah cangkang telur ke dalam matriks Zn terbukti mampu meningkatkan kerapatan lapisan melalui mekanisme penguatan dispersi sekaligus memperbaiki performa ketahanan korosi dibandingkan lapisan Zn murni [2].

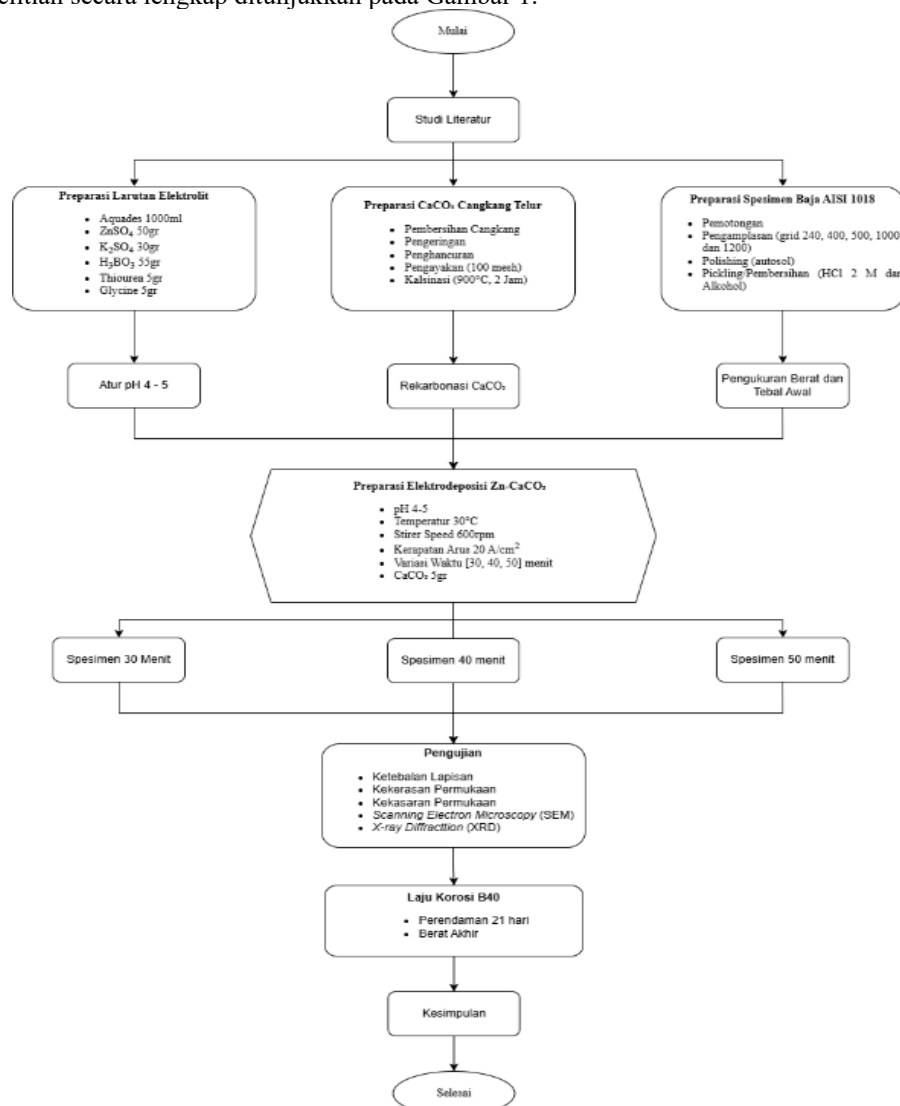
Metode elektrodeposisi dipilih sebagai teknik pelapisan karena prosedurnya relatif sederhana, ekonomis, serta mampu menghasilkan lapisan yang homogen dengan komposisi dan struktur yang dapat dikontrol melalui pengaturan parameter proses seperti rapat arus, tegangan, dan waktu deposisi [3]. Waktu elektrodeposisi merupakan salah satu parameter yang paling fundamental dan mudah dikontrol. Berdasarkan persamaan Hamaker, massa dan ketebalan lapisan yang terendapkan berbanding lurus dengan waktu deposisi selama proses berlangsung dalam kondisi ideal tanpa reaksi samping [4]. Namun demikian, pada waktu deposisi yang terlalu lama dapat terjadi reaksi samping seperti evolusi gas hidrogen atau perubahan mekanisme pertumbuhan kristal yang justru menurunkan kualitas lapisan.

Penelitian terdahulu telah membuktikan efektivitas penambahan CaCO_3 dari cangkang telur pada sistem pelapisan Zn. Nnaji dkk. melaporkan bahwa lapisan Zn-ZnO- CaCO_3 dengan aditif cangkang telur menghasilkan laju korosi serendah 0,01 mm/tahun dan efisiensi pelapisan 97% pada media NaCl 3,5% [5]. Atikpo dkk. juga melaporkan efisiensi perlindungan korosi hingga 99,08% pada lapisan Zn dengan penambahan serbuk cangkang telur (ESP) untuk aplikasi tangki penyimpanan biodiesel [6]. Meskipun demikian, kajian sistematis mengenai pengaruh variasi waktu elektrodeposisi terhadap karakteristik lapisan komposit Zn- CaCO_3 berbasis cangkang telur secara spesifik dalam media biodiesel B40 sebagai standar nasional Indonesia masih sangat terbatas.

2. Metode Penelitian

2.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui tahapan studi literatur, persiapan alat dan bahan, preparasi CaCO_3 dari cangkang telur, preparasi spesimen baja AISI 1018, proses elektrodeposisi dengan variasi waktu, perendaman dalam biodiesel B40 selama 21 hari, pengujian karakterisasi dan korosi, hingga pengolahan data dan penarikan kesimpulan. Diagram alir penelitian secara lengkap ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.2 Alat dan Bahan

Substrat yang digunakan adalah baja karbon rendah AISI 1018 berbentuk silinder berdiameter 25 mm dan tebal 5 mm. Partikel penguat CaCO_3 diperoleh dari limbah cangkang telur ayam melalui tahapan pembersihan, perebusan, pengeringan, crushing, pengayakan 1000 mesh, kalsinasi pada 900°C selama 2 jam, serta rekarbonasi menggunakan HNO_3 dan larutan NH_4OH hingga pH 12, dilanjutkan injeksi gas CO_2 hingga terbentuk endapan CaCO_3 yang kemudian disaring dan dikeringkan pada 110°C selama 2 jam.

Sebelum dielektrodeposisi, spesimen baja diamplas bertahap (grit 240, 400, 500, 1000, dan 1200), dipoles menggunakan autosol, kemudian di-pickling dengan larutan HCl : akuades (1:10) selama 10 detik untuk menghilangkan oksida permukaan. Bath elektrolit disiapkan dari akuades 1000 mL yang ditambahkan ZnSO_4 50gr, K_2SO_4 30 g, H_3BO_3 55 g, thiourea 5 g, glycine 5 g, dan serbuk CaCO_3 dengan konsentrasi 5 g/L, kemudian diaduk selama 120 menit pada pH 4–5.

2.3 Proses Elektrodeposisi

Elektrodeposisi dilakukan menggunakan lempeng seng (Zn) sebagai anoda dan baja AISI 1018 sebagai katoda yang dihubungkan pada sumber arus searah (DC power supply). Rapat arus, tegangan, suhu larutan, dan kecepatan pengadukan dijaga konstan pada seluruh variasi, sedangkan waktu deposisi divariasikan pada 30, 40, dan 50 menit sesuai variabel bebas penelitian. Parameter proses elektrodeposisi yang digunakan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Proses Elektrodeposisi

Parameter	Kondisi
pH Larutan	4–5
Tegangan	2,5 V
Rapat Arus	20 A/cm ²
Waktu Deposisi	30 / 40 / 50 menit
Kecepatan Pengadukan	600 rpm
Suhu Larutan	30°C

2.4 Prosedur Pengujian

Ketebalan lapisan diukur menggunakan coating thickness gauge mengacu ASTM B499, kekasaran permukaan (R_a) diukur menggunakan surface roughness tester, dan kekerasan mikro diuji dengan metode Vickers menggunakan indenter piramida berlian (beban 500 gf, waktu penekanan 15 detik). Ketahanan korosi dievaluasi melalui metode kehilangan berat (*weight loss*) mengacu ASTM G31-72 (2025), yaitu perendaman spesimen dalam biodiesel B40 selama 21 hari pada suhu ruang, dengan laju korosi dihitung menggunakan persamaan:

$$Cr = (W \times K) / (A \times T \times D)$$

dengan Cr adalah laju korosi (mpy), W adalah kehilangan massa (gram), K adalah konstanta ($8,76 \times 10^4$), A adalah luas permukaan spesimen yang direndam (cm²), T adalah waktu perendaman (jam), dan D adalah densitas spesimen (g/cm³). Karakterisasi morfologi dan komposisi unsur permukaan lapisan dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscopy*–Energy (SEM) tipe PHENOM-WORLD dengan perbesaran hingga 5000x, sedangkan analisis fasa kristal dilakukan menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) pada rentang sudut 2θ 5° – 90° dengan kecepatan pemindaian $2^\circ/\text{menit}$, dan dianalisis kuantitatif menggunakan metode *Rietveld Refinement* melalui perangkat lunak *Match!* dan *Xpert HighScore Plus*.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Karakteristik Fisik Lapisan

Hasil pengukuran ketebalan, kekasaran permukaan, dan kekerasan lapisan komposit Zn– CaCO_3 pada variasi waktu elektrodeposisi disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik Fisik Lapisan Zn– CaCO_3 pada Variasi Waktu Deposisi

Waktu (menit)	Tebal (μm)	R_a (μm)	Kekerasan (HV)
30	$73,67 \pm 10,97$	$0,498 \pm 0,060$	$76,57 \pm 13,29$
40	$120,00 \pm 17,32$	$0,590 \pm 0,010$	$99,57 \pm 9,23$
50	$46,67 \pm 11,55$	$0,832 \pm 0,133$	$85,03 \pm 8,81$

Ketebalan lapisan meningkat dari 73,67 μm pada 30 menit menjadi 120,00 μm pada 40 menit, sesuai dengan persamaan Hamaker yang menyatakan bahwa massa dan ketebalan lapisan berbanding lurus dengan waktu deposisi [4]. Namun, pada 50 menit ketebalan justru menurun menjadi 46,67 μm , diduga akibat ketidakstabilan proses seperti meningkatnya evolusi gas hidrogen pada katoda atau berkurangnya efisiensi deposisi akibat penurunan konsentrasi ion logam di sekitar permukaan substrat. Nilai kekasaran permukaan (R_a) justru meningkat konsisten seiring bertambahnya waktu deposisi, dari 0,498 μm menjadi 0,832 μm , sejalan dengan pertumbuhan butir yang lebih besar dan kecenderungan aglomerasi partikel CaCO_3 pada durasi deposisi yang lebih panjang [7]. Kekerasan tertinggi diperoleh pada 40 menit (99,57 HV) melalui mekanisme penguatan dispersi (dispersion strengthening), di mana partikel CaCO_3 yang terperangkap dalam matriks Zn menghambat pergerakan dislokasi [7], sedangkan penurunan kekerasan pada 50 menit mengindikasikan mulai terbentuknya struktur butir yang lebih kasar akibat pertumbuhan kristal berlebih [8].

3.2 Laju Korosi

Hasil pengujian *weight loss* selama 21 hari dalam media biodiesel B40 disajikan pada Tabel 3.

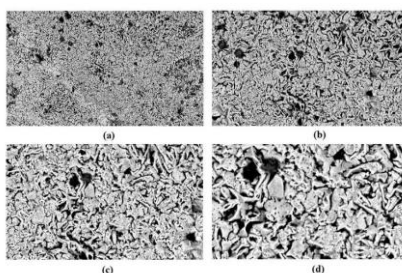
Tabel 3. Hasil Pengujian Laju Korosi Metode *Weight Loss* (21 Hari, Biodiesel B40)

Waktu (menit)	Kehilangan Massa (g)	Laju Korosi (mm/tahun)
30	0,0038	0,008110
40	0,0021	0,004553
50	0,0032	0,006821

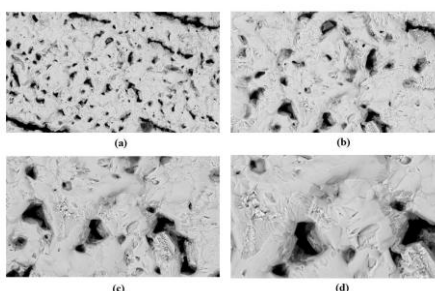
Laju korosi terendah diperoleh pada waktu deposisi 40 menit, yaitu 0,004553 mm/tahun, dibandingkan 30 menit (0,008110 mm/tahun) dan 50 menit (0,006821 mm/tahun). Rendahnya laju korosi pada 40 menit sejalan dengan hasil karakterisasi fisik pada Tabel 2, di mana lapisan pada waktu tersebut memiliki ketebalan dan kekerasan tertinggi sehingga lebih efektif menghambat difusi oksigen, air, dan senyawa asam organik dari biodiesel menuju permukaan substrat. Berdasarkan klasifikasi ISO 9223, seluruh spesimen tergolong kategori C_2 (*Low Corrosivity*) dengan laju korosi berkisar 4,55–8,11 $\mu\text{m}/\text{tahun}$. Hasil ini menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan penelitian Nnaji dkk. yang melaporkan laju korosi 0,01 mm/tahun pada sistem Zn- CaCO_3 cangkang telur dalam media NaCl 3,5% [5], serta konsisten dengan temuan Atikpo dkk. yang melaporkan efisiensi proteksi tinggi pada lapisan Zn dengan penambahan CaCO_3 cangkang telur untuk aplikasi biodiesel [6]. Rendahnya ketahanan korosi baja karbon rendah tanpa pelapisan yang telah dilaporkan sebelumnya [9], [10] semakin menegaskan pentingnya lapisan komposit Zn- CaCO_3 sebagai proteksi tambahan pada aplikasi berbasis biodiesel.

3.3 Morfologi Permukaan (SEM)

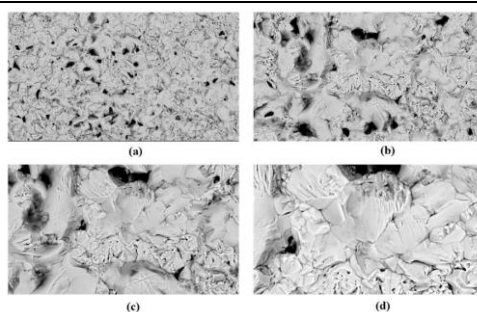
Morfologi permukaan lapisan komposit Zn- CaCO_3 pada tiga variasi waktu deposisi ditunjukkan pada Gambar 2, Gambar 3, dan Gambar 4.



Gambar 2. Morfologi Permukaan Coating Zn- CaCO_3 Elektrodeposisi 30 Menit



Gambar 3. Morfologi Permukaan Coating Zn- CaCO_3 Elektrodeposisi 40 Menit

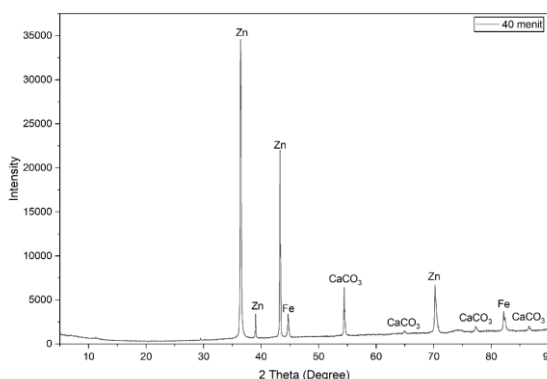


Gambar 4. Morfologi Permukaan Coating Zn–CaCO₃ Elektrodeposisi 50 Menit

Pada waktu deposisi 30 menit, lapisan menunjukkan struktur dendritik/koral (*coral-like*) yang khas pada tahap nukleasi awal deposit Zn, dengan porositas tinggi dan celah antar-dendrit yang mengindikasikan lapisan belum sepenuhnya rapat (Gambar 2). Pada 40 menit, butiran tumbuh lebih besar dan lebih kristalin, namun masih menyisakan pori dan retakan mikro yang diduga akibat tegangan internal dari akumulasi deposit (Gambar 3). Pada 50 menit, struktur berkembang menjadi polihedral dengan butiran pipih yang saling mengunci (*interlocking grains*), menghasilkan permukaan yang paling rapat di antara ketiga variasi meskipun ketebalannya lebih kecil dibandingkan 40 menit (Gambar 4). Tren perubahan morfologi ini konsisten dengan hasil penelitian Nnaji dkk., yang melaporkan bahwa penambahan partikel CaCO₃ mampu mengisi rongga antar-butir sehingga meningkatkan kerapatan lapisan pada durasi deposisi yang lebih lama [5].

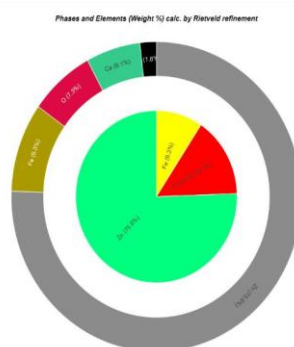
3.4 Analisis Fasa (XRD)

Analisis XRD dilakukan pada spesimen dengan waktu deposisi optimum (40 menit). Difraktogram hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Difraktogram Elektrodeposisi Zn–CaCO₃ 40 Menit

Puncak dominan terdeteksi pada sudut 2θ sebesar $36,3^\circ$; $43,4^\circ$; dan $70,3^\circ$. Pencocokan dengan data Powder Diffraction File (PDF) mengidentifikasi fasa Zn heksagonal (PDF 01-087-0713), CaCO₃/kalsit heksagonal (PDF 01-072-1651), dan Fe dari substrat baja (PDF 01-087-0721). Analisis kuantitatif menggunakan metode *Rietveld Refinement*, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6, menghasilkan komposisi kristalinitas sebesar 75,6% Zn, 15,1% CaCO₃, dan 9,3% Fe.



Gambar 6. Komposisi Fasa Hasil *Rietveld Refinement* Elektrodeposisi 40 Menit

Dominasi fasa Zn menunjukkan bahwa elektrodposisi berhasil membentuk lapisan seng sebagai matriks utama, sedangkan keberadaan fasa CaCO_3 mengonfirmasi bahwa partikel penguat dari limbah cangkang telur berhasil terinkorporasi ke dalam lapisan selama proses ko-deposisi. Tidak terdeteksinya fasa intermetalik baru antara Zn dan CaCO_3 menunjukkan bahwa CaCO_3 berperan sebagai partikel penguat inert yang terdispersi secara fisik dalam matriks logam, bukan membentuk senyawa kimia baru, sejalan dengan mekanisme yang dilaporkan pada penelitian sebelumnya mengenai lapisan komposit berbasis Zn [2], [5].

4. Kesimpulan

1. Waktu elektrodposisi berpengaruh signifikan terhadap karakteristik fisik lapisan komposit Zn- CaCO_3 . Waktu deposisi 40 menit menghasilkan ketebalan tertinggi (120,00 μm) dan kekerasan tertinggi (99,57 HV), sedangkan kekasaran permukaan meningkat secara konsisten seiring bertambahnya waktu deposisi.
2. Karakterisasi SEM dan XRD menunjukkan morfologi lapisan berkembang dari struktur dendritik berongga (30 menit) menjadi struktur polihedral yang lebih rapat (50 menit), dengan komposisi fasa optimum pada 40 menit terdiri atas Zn (75,6%), CaCO_3 (15,1%), dan Fe (9,3%), tanpa terbentuknya fasa intermetalik baru.
3. Waktu deposisi 40 menit memberikan ketahanan korosi terbaik dengan laju korosi terendah sebesar 0,004553 mm/tahun dalam media biodiesel B40, dan seluruh spesimen tergolong kategori korosivitas rendah (C_2) berdasarkan ISO 9223, sehingga lapisan komposit Zn- CaCO_3 berbasis cangkang telur berpotensi sebagai metode proteksi korosi yang efektif dan ramah lingkungan untuk aplikasi berbasis biodiesel.

5. Daftar Pustaka

- [1] D. M. Fernandes, A. L. Squizzato, A. F. Lima, E. M. Richter, and R. A. A. Munoz, "Corrosive character of Moringa oleifera Lam biodiesel exposed to carbon steel under simulated storage conditions," *Renewable Energy*, vol. 139, pp. 1263–1271, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.03.034.
- [2] V. A. Fardilah et al., "Microstructure examination of the biocorrosion susceptibility of mild steel coated with Zn and Zn- CaCO_3 in a biodiesel environment," *Next Materials*, vol. 9, 2025, doi: 10.1016/j.nxmate.2025.101075.
- [3] W. M. Ramírez-Santander et al., "Anti-corrosion performance of Zn-Co alloy electrodeposited onto mild steel surfaces from its precursor ions dissolved in reline deep eutectic solvent," *J. Solid State Electrochem.*, 2025, doi: 10.1007/s10008-025-06360-8.
- [4] E. Mohammadi, M. Aliofkhazraei, and A. S. Rouhaghdam, "In-situ study of electrophoretic deposition of zinc oxide nanosheets and nanorods," *Ceram. Int.*, vol. 44, no. 2, pp. 1471–1482, 2018, doi: 10.1016/j.ceramint.2017.10.053.
- [5] R. N. Nnaji, M. A. Bodude, and D. E. Esezobor, "Electrolytic Co-deposition of Zn-ZnO and Zn-ZnO- CaCO_3 Composite Substrates on Low-Carbon Steel," *Nigerian J. Technol. Dev.*, vol. 20, no. 2, pp. 53–61, 2023.
- [6] E. Atikpo, V. S. Aigbodion, and D. V. Von Kallon, " CaCO_3 -derived from eggshell waste for improving the corrosion resistance of zinc composite coating on mild steel for biodiesel storage tank," *Chem. Data Collections*, vol. 37, 2022, doi: 10.1016/j.cdc.2021.100794.
- [7] Y. Chen et al., "Effects of deposition current density, time and scanning velocity on scanning jet electrodeposition of Ni-Co alloy coating," *J. Manuf. Process.*, vol. 101, pp. 458–468, 2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2023.06.020.
- [8] X. Qiao, H. Li, W. Zhao, and D. Li, "Effects of deposition temperature on electrodeposition of zinc-nickel alloy coatings," *Electrochim. Acta*, vol. 89, pp. 771–777, 2013, doi: 10.1016/j.electacta.2012.11.006.
- [9] O. D. Adigun et al., "Effects of Austempering on the Microstructure, Corrosion and Mechanical Properties of AISI 1018 Steel," 2021, doi: 10.21203/rs.3.rs-861196/v1.
- [10] G. Qi, X. Qin, J. Xie, P. Han, and B. He, "Electrochemical corrosion behaviour of four low-carbon steels in saline soil," *RSC Adv.*, vol. 12, no. 32, pp. 20929–20945, 2022, doi: 10.1039/d2ra03200g.