

PENGARUH VARIASI AGITATION SPEED PADA PROSES ELEKTRODEPOSISI TERHADAP KETAHANAN KOROSI LAPISAN KOMPOSIT Zn–CaCO₃ BERBASIS CANGKANG TELUR PADA BAJA AISI 1018 DI LINGKUNGAN BIODIESEL

Alif Sendi Riyananta¹, 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: alifsendi2@gmail.com

Abstrak

Penggunaan biodiesel B40 sebagai bahan bakar campuran nasional menghadirkan tantangan terhadap ketahanan korosi material logam, khususnya baja karbon rendah AISI 1018 yang banyak digunakan pada sistem penyimpanan dan distribusi bahan bakar. Sifat biodiesel yang higroskopis dan mudah teroksidasi dapat mempercepat laju korosi, sehingga diperlukan lapisan pelindung yang efektif. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi agitation speed (400, 600, dan 800 rpm) pada proses elektrodposisi terhadap sifat mekanis, mikrostruktur, dan ketahanan korosi lapisan komposit Zn–CaCO₃ berbasis *Precipitated Calcium Carbonate* (PCC) dari limbah cangkang telur pada baja AISI 1018 di lingkungan biodiesel B40. Metode penelitian meliputi preparasi CaCO₃ melalui kalsinasi dan rekarbonasi, elektrodposisi dengan arus 0,225 A selama 20 menit, serta karakterisasi menggunakan uji kekerasan Vickers, kekasaran permukaan (Ra), ketebalan lapisan, SEM, XRD, dan pengujian weight loss selama 21 hari perendaman. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi 600 rpm memberikan performa optimum, dengan ketebalan lapisan tertinggi (120 µm), kekerasan tertinggi (99,5 HV), kekasaran permukaan relatif rendah (0,590 µm), morfologi permukaan lebih homogen dan kompak, serta laju korosi terendah (4,55 µm/tahun) yang termasuk kategori C₂ (Low Corrosivity) menurut ISO 9223. Analisis XRD pada spesimen optimum mengonfirmasi komposisi fasa Zn (75,6%), CaCO₃ (15,1%), dan Fe (9,3%), membuktikan keberhasilan inkorporasi CaCO₃ ke dalam matriks Zn. Sebaliknya, agitation speed 800 rpm menurunkan kualitas lapisan akibat turbulensi berlebih yang meningkatkan porositas dan kekasaran permukaan. Dengan demikian, agitation speed 600 rpm merupakan kondisi optimum dalam elektrodposisi lapisan komposit Zn–CaCO₃ untuk meningkatkan ketahanan korosi baja AISI 1018 di lingkungan biodiesel B40.

Kata kunci: *agitation speed*; biodiesel B40; elektrodposisi; ketahanan korosi; komposit Zn–CaCO₃

Abstract

The use of B40 biodiesel as a national blended fuel presents challenges to the corrosion resistance of metallic materials, particularly low-carbon steel AISI 1018, which is widely used in fuel storage and distribution systems. The hygroscopic nature of biodiesel and its susceptibility to oxidation can accelerate the corrosion rate, thus requiring an effective protective coating. This research aims to analyze the effect of agitation speed variation (400, 600, and 800 rpm) during the electrodeposition process on the mechanical properties, microstructure, and corrosion resistance of Zn–CaCO₃ composite coatings based on *Precipitated Calcium Carbonate* (PCC) derived from eggshell waste on AISI 1018 steel in a B40 biodiesel environment. The research method involved CaCO₃ preparation through calcination and recarbonation, electrodeposition at a current of 0.225 A for 20 minutes, and characterization using Vickers hardness testing, surface roughness (Ra) measurement, coating thickness measurement, SEM, XRD, and weight loss testing over a 21-day immersion period. The results showed that the 600 rpm variation produced the optimum performance, with the highest coating thickness (120 µm), the highest hardness (99.5 HV), a relatively low surface roughness (0.590 µm), a more homogeneous and compact surface morphology, and the lowest corrosion rate (4.55 µm/year), which falls under category C₂ (Low Corrosivity) according to ISO 9223. XRD analysis of the optimum specimen confirmed a phase composition of Zn (75.6%), CaCO₃ (15.1%), and Fe (9.3%), proving the successful incorporation of CaCO₃ into the Zn matrix. In contrast, an agitation speed of 800 rpm degraded the coating quality due to excessive turbulence, which increased porosity and surface roughness. It can therefore be concluded that an agitation speed of 600 rpm represents the optimum condition for the electrodeposition of Zn–CaCO₃ composite coatings to enhance the corrosion resistance of AISI 1018 steel in a B40 biodiesel environment.

Keywords: *agitation speed*; biodiesel B40; corrosion resistance; electrodeposition; Zn–CaCO₃ composite

1. Pendahuluan

Perkembangan sektor energi di Indonesia beberapa tahun terakhir semakin menekankan penggunaan bahan bakar nabati seperti biodiesel. Implementasi B40 sebagai standar nasional mendorong meningkatnya penggunaan baja sebagai material komponen mesin, tangki, dan sistem aliran bahan bakar. Namun, biodiesel memiliki sifat kimia yang berbeda dari solar konvensional—lebih polar, higroskopis, dan mengandung senyawa ester yang dapat mempercepat reaksi korosi [1]. Kondisi ini menuntut adanya material dengan ketahanan korosi yang lebih baik agar keandalan peralatan tetap terjamin selama operasi.

Salah satu metode yang banyak digunakan untuk meningkatkan ketahanan korosi baja adalah pelapisan (coating) berbasis seng (Zn), karena mampu memberikan perlindungan katodik pada baja. Meski demikian, lapisan Zn konvensional masih memiliki kelemahan pada aspek mekanik akibat kekerasannya yang relatif rendah. Penambahan CaCO_3 terbukti mampu meningkatkan stabilitas dan sifat mekanik lapisan, sekaligus memberikan perlindungan lingkungan yang lebih baik [2][3]. CaCO_3 dari bahan alam seperti cangkang telur banyak diteliti karena bersifat ramah lingkungan dan dapat meningkatkan karakteristik lapisan terhadap pengaruh lingkungan eksternal.

Metode elektrodposisi menjadi salah satu teknik paling efektif untuk menghasilkan lapisan komposit tersebut karena prosesnya sederhana, biaya relatif rendah, dan mampu menghasilkan lapisan yang seragam. Proses ini memungkinkan pengendalian komposisi dan struktur lapisan melalui pengaturan parameter seperti rapat arus, tegangan, waktu, dan kecepatan pengadukan [4]. Mekanisme perpindahan massa, distribusi ion logam, dan homogenitas partikel penguat dalam larutan elektrolit dipengaruhi oleh agitation speed. Perubahan kecepatan pengadukan berpengaruh terhadap laju deposisi, ukuran butir, tingkat porositas, serta kerapatan struktur mikro lapisan yang terbentuk [5].

Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji pengaruh komposisi dan waktu deposisi terhadap lapisan Zn- CaCO_3 [2][6], kajian mengenai pengaruh variasi agitation speed pada sistem komposit berbasis CaCO_3 dari cangkang telur, khususnya pada substrat baja AISI 1018 [7] dalam lingkungan biodiesel B40, masih terbatas. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi agitation speed pada proses elektrodposisi terhadap sifat mekanis, mikrostruktur, dan ketahanan korosi lapisan komposit Zn- CaCO_3 berbahan dasar cangkang telur pada baja AISI 1018 dalam lingkungan biodiesel B40 [8].

2. Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental yang dilaksanakan di Laboratorium Material, Departemen Teknik Mesin, Universitas Diponegoro, dengan pendekatan kuantitatif dan rancangan eksperimen murni (true experimental design). Objek penelitian berupa spesimen baja AISI 1018 yang dilapisi menggunakan metode elektrodposisi komposit Zn- CaCO_3 , dengan variabel bebas berupa agitation speed pada tiga tingkat, yaitu 400, 600, dan 800 rpm.

2.1 Preparasi CaCO_3 Cangkang Telur

Cangkang telur dibersihkan, dikeringkan, dihancurkan (crushing), dan diayak menggunakan ayakan 100 mesh. Serbuk hasil pengayakan kemudian dikalsinasi pada suhu 900°C selama 2 jam sehingga CaCO_3 terdekomposisi menjadi CaO. Tahap rekarbonasi dilakukan dengan melarutkan CaO dalam HNO_3 , menaikkan pH larutan menggunakan NH_4OH hingga mencapai pH 12, kemudian mengalirkan gas CO_2 untuk mengendapkan kembali CaCO_3 . Endapan yang diperoleh disaring, dicuci hingga netral, dan dikeringkan pada suhu 110°C selama 2 jam sebelum digunakan sebagai partikel penguat.

2.2 Preparasi Spesimen dan Proses Elektrodposisi

Spesimen baja AISI 1018 dipotong dengan ketebalan 5 mm, diampas bertahap (grit 240–1200), dipoles, kemudian di-pickling menggunakan larutan HCl : akuades (1:10). Proses elektrodposisi dilakukan menggunakan sistem dua elektroda, dengan baja AISI 1018 sebagai katoda dan pelat Zn sebagai anoda, di dalam bath elektrolit yang mengandung K_2SO_4 , H_3BO_3 , thiourea, glycine, ZnSO_4 , dan partikel CaCO_3 hasil sintesis. Parameter proses elektrodposisi yang digunakan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Proses Elektrodposisi

Parameter	Kondisi
pH Larutan	4–5
Arus	0,225 A
Waktu Deposisi	20 menit
Suhu Larutan	30°C
Agitation Speed	400 / 600 / 800 rpm

2.3 Karakterisasi dan Pengujian

Karakterisasi lapisan meliputi pengujian kekerasan permukaan menggunakan metode Vickers, kekasaran permukaan (Ra) menggunakan surface roughness tester, serta ketebalan lapisan menggunakan coating thickness gauge. Morfologi permukaan diamati menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM), sedangkan identifikasi fasa kristal dilakukan menggunakan X-Ray Diffraction (XRD) dan dianalisis secara kuantitatif dengan metode Rietveld Refinement. Ketahanan korosi dievaluasi menggunakan metode weight loss dengan media biodiesel B40 selama 21 hari perendaman, mengacu pada persamaan ASTM G1:

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

dengan Cr adalah laju korosi (mm/tahun), W adalah kehilangan massa (gram), K adalah konstanta, A adalah luas permukaan spesimen (cm²), T adalah waktu perendaman (jam), dan D adalah densitas spesimen (g/cm³). Klasifikasi tingkat korosivitas hasil pengujian mengacu pada standar ISO 9223.

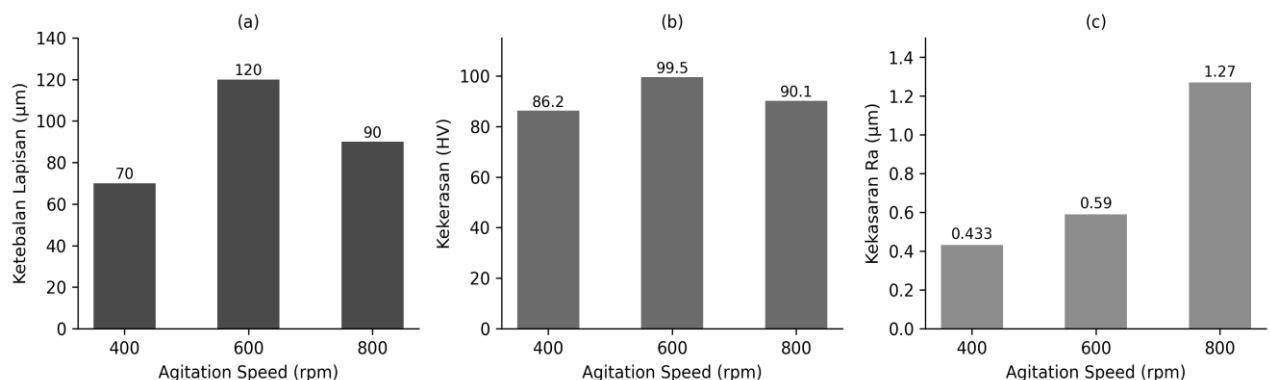
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Ketebalan Lapisan, Kekerasan, dan Kekasaran Permukaan

Hasil pengukuran ketebalan lapisan, kekerasan Vickers, dan kekasaran permukaan (Ra) untuk masing-masing variasi agitation speed disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Ketebalan, Kekerasan, dan Kekasaran Lapisan Zn–CaCO₃

Agitation Speed (rpm)	Ketebalan (μm)	Kekerasan (HV)	Kekasaran Ra (μm)
400	70,00	86,2	0,433
600	120,00	99,5	0,590
800	90,00	90,1	1,270



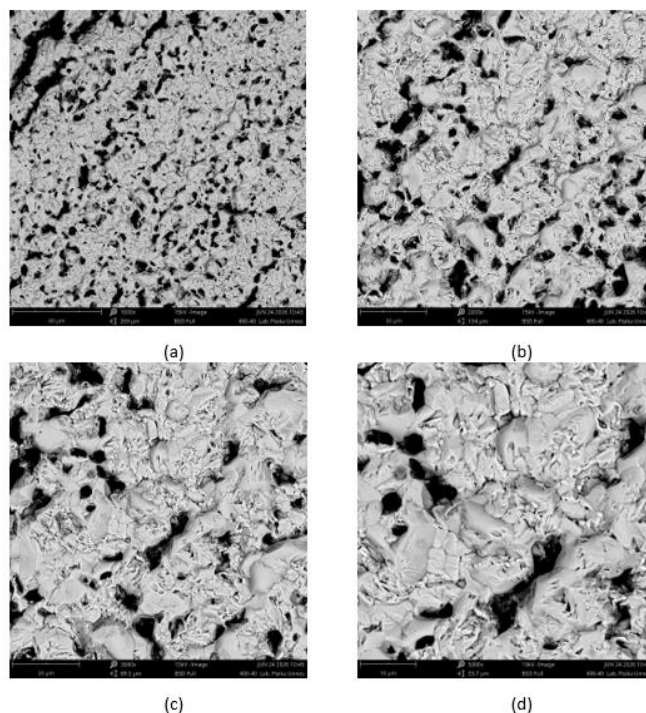
Gambar 1. Grafik (a) Ketebalan Lapisan, (b) Kekerasan Permukaan, dan (c) Kekasaran Permukaan (Ra) pada Berbagai Variasi Agitation Speed

Peningkatan agitation speed dari 400 rpm ke 600 rpm meningkatkan ketebalan lapisan secara signifikan dari 70 μm menjadi 120 μm, sejalan dengan peningkatan nilai kekerasan dari 86,2 HV menjadi 99,5 HV. Kondisi ini menunjukkan bahwa agitasi pada kecepatan tersebut mampu menipiskan lapisan difusi (diffusion layer) di sekitar katoda sehingga transport massa ion Zn²⁺ dan partikel CaCO₃ menuju permukaan katoda berlangsung lebih optimal, menghasilkan laju deposisi yang lebih tinggi serta struktur lapisan yang lebih rapat melalui mekanisme dispersion strengthening. Nilai kekerasan yang diperoleh pada penelitian ini sebanding dengan lapisan Zn–Ni alloy hasil elektrodposisi yang dilaporkan sebesar 97 HV, dan jauh lebih tinggi dibandingkan lapisan Zn murni tanpa partikel penguat sebesar 47,6 HV [9].

Peningkatan lebih lanjut hingga 800 rpm justru menurunkan ketebalan menjadi 90 μm dan kekerasan menjadi 90,1 HV, disertai peningkatan kekasaran permukaan yang signifikan menjadi 1,270 μm. Penurunan ini diduga disebabkan oleh turbulensi berlebih yang menimbulkan gaya hidrodinamik kuat dalam elektrolit, sehingga melepaskan kembali partikel CaCO₃ dari permukaan katoda sebelum sempat terperangkap secara permanen dalam deposit logam yang sedang tumbuh (particle detachment) [10]. Berdasarkan hasil tersebut, agitation speed 600 rpm merupakan kondisi optimum yang menghasilkan kombinasi sifat mekanik terbaik.

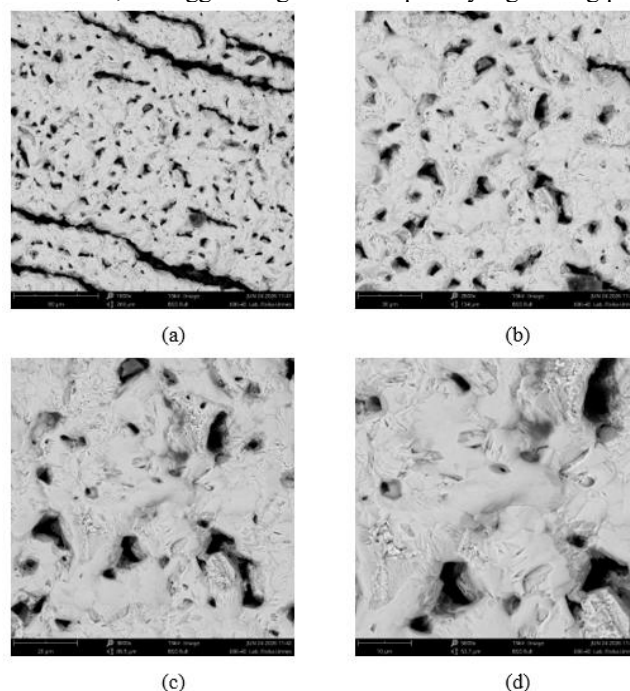
3.2 Morfologi Permukaan (SEM)

Pengamatan morfologi permukaan menggunakan SEM dilakukan pada perbesaran 1000×, 2000×, 3000×, dan 5000× untuk setiap variasi agitation speed, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2, Gambar 3, dan Gambar 4.



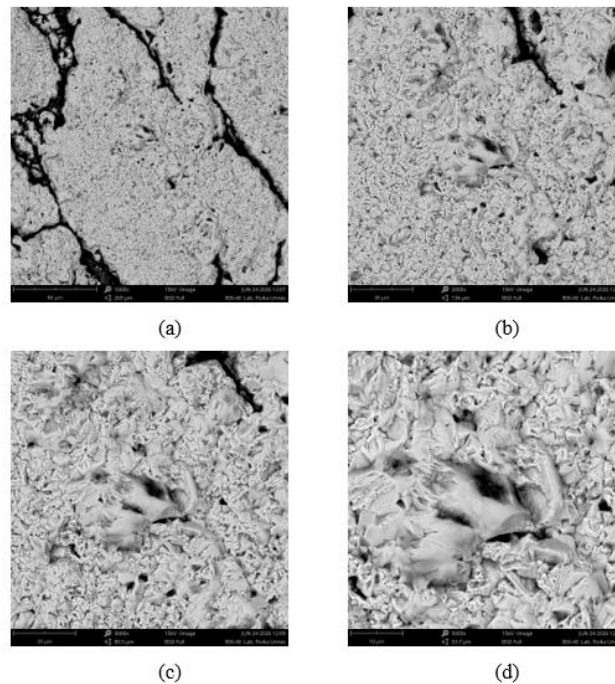
Gambar 2. Morfologi Permukaan Lapisan Zn–CaCO₃ pada Agitation Speed 400 rpm dengan Perbesaran (a) 1000×, (b) 2000×, (c) 3000×, dan (d) 5000×

Pada variasi 400 rpm, permukaan lapisan menunjukkan struktur nodular (cauliflower-like morphology) dengan pori-pori yang tersebar cukup banyak dan tidak seragam pada seluruh tingkat perbesaran. Hal ini mengindikasikan bahwa transport massa ion Zn²⁺ dan partikel CaCO₃ menuju permukaan katoda belum berlangsung secara optimal pada kecepatan pengadukan yang relatif rendah tersebut, sehingga menghasilkan lapisan yang kurang padat.



Gambar 3. Morfologi Permukaan Lapisan Zn–CaCO₃ pada Agitation Speed 600 rpm dengan Perbesaran (a) 1000×, (b) 2000×, (c) 3000×, dan (d) 5000×

Pada variasi 600 rpm, permukaan lapisan tampak lebih homogen dengan struktur butiran yang lebih seragam dan porositas yang lebih terkontrol dibandingkan variasi 400 rpm, menunjukkan kondisi transport massa yang lebih efektif sehingga nukleasi dan pertumbuhan kristal berlangsung lebih stabil.

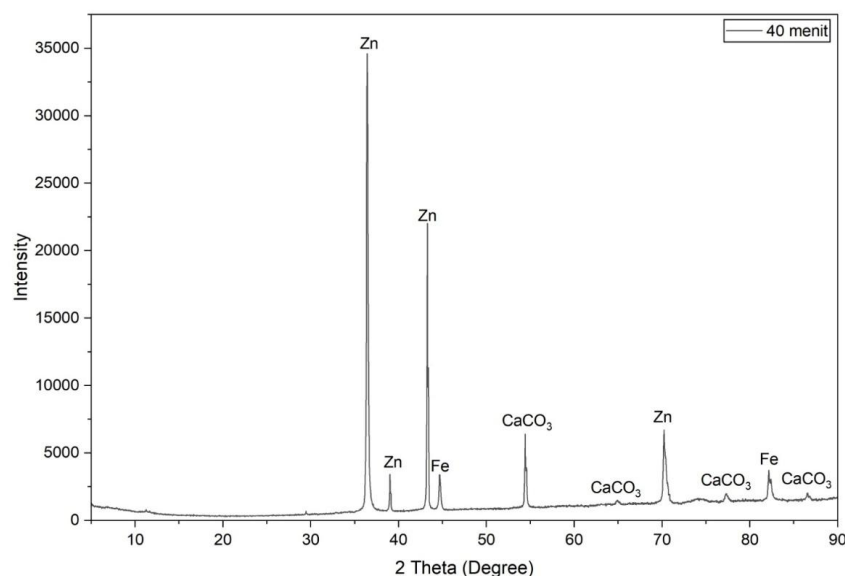


Gambar 4. Morfologi Permukaan Lapisan Zn–CaCO₃ pada Agitation Speed 800 rpm dengan Perbesaran (a) 1000×, (b) 2000×, (c) 3000×, dan (d) 5000×

Pada variasi 800 rpm, tampak retakan (microcrack) yang memanjang pada permukaan serta rongga berukuran lebih besar dibandingkan variasi 600 rpm. Kondisi ini mengindikasikan bahwa turbulensi berlebih pada kecepatan pengadukan tinggi mengganggu kestabilan proses deposisi, sehingga menurunkan homogenitas lapisan dan meningkatkan cacat mikro pada permukaan, konsisten dengan penurunan nilai kekerasan dan peningkatan kekasaran yang diperoleh pada pengujian sebelumnya.

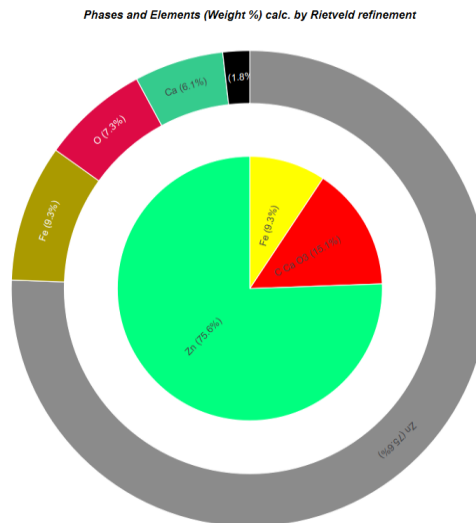
3.3 Analisis Fasa (XRD)

Pengujian XRD dilakukan pada spesimen dengan agitation speed 600 rpm karena menunjukkan performa terbaik berdasarkan hasil karakterisasi sebelumnya. Pola difraktogram hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Difraktogram Elektrodposisi Zn–CaCO₃ pada Agitation Speed 600 rpm

Puncak dominan terdeteksi pada sudut 2θ sebesar $36,3^\circ$; $43,4^\circ$; dan $70,3^\circ$, yang setelah dibandingkan dengan data Powder Diffraction File (PDF) mengonfirmasi keberadaan fasa Zn (heksagonal), CaCO_3 (kalsit, heksagonal), dan Fe (substrat baja). Analisis kuantitatif menggunakan metode Rietveld Refinement menunjukkan komposisi fasa berupa Zn sebesar 75,6%, CaCO_3 sebesar 15,1%, dan Fe sebesar 9,3%, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Diagram Komposisi Fasa dan Unsur (% Berat) Lapisan Zn– CaCO_3 Berdasarkan Hasil Rietveld Refinement pada Agitation Speed 600 rpm

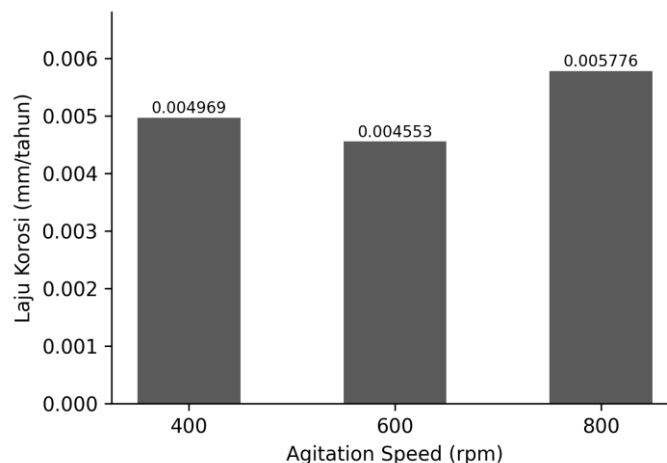
Dominasi fasa Zn menunjukkan bahwa proses elektrodeposisi berhasil membentuk lapisan seng sebagai matriks utama, sedangkan keberadaan fasa CaCO_3 membuktikan bahwa partikel PCC dari limbah cangkang telur berhasil terinkorporasi ke dalam lapisan selama proses ko-deposisi. Terdeteksinya fasa Fe berasal dari substrat baja AISI 1018 yang masih dapat dideteksi oleh sinar-X karena ketebalan lapisan belum sepenuhnya menghalangi penetrasi sinar difraksi.

3.4 Ketahanan Korosi dalam Lingkungan Biodiesel B40

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

Tabel 3. Hasil Pengujian Weight Loss dan Laju Korosi Lapisan Zn– CaCO_3 dalam Biodiesel B40

Agitation Speed (rpm)	Kehilangan Massa (gram)	Laju Korosi (mm/tahun)	Klasifikasi ISO 9223
400	0,0023	0,004969	C ₂ (Low)
600	0,0021	0,004553	C ₂ (Low)
800	0,0027	0,005776	C ₂ (Low)



Gambar 7. Grafik Laju Korosi Lapisan Zn– CaCO_3 pada Berbagai Variasi Agitation Speed

Spesimen dengan agitation speed 600 rpm menunjukkan laju korosi paling rendah, yaitu 0,004553 mm/tahun (4,55 μm /tahun), lebih rendah dibandingkan variasi 400 rpm (4,97 μm /tahun) dan 800 rpm (5,78 μm /tahun). Seluruh spesimen termasuk dalam kategori C₂ (Low Corrosivity) menurut klasifikasi ISO 9223, namun variasi 600 rpm memberikan ketahanan korosi terbaik. Hasil ini konsisten dengan karakterisasi sebelumnya, di mana variasi 600 rpm menghasilkan ketebalan lapisan tertinggi, kekerasan tertinggi, serta morfologi permukaan yang paling homogen dan kompak, sehingga mampu menghambat penetrasi media korosif biodiesel B40 menuju substrat baja secara lebih efektif dibandingkan variasi 400 rpm dan 800 rpm.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menganalisis pengaruh variasi agitation speed (400, 600, dan 800 rpm) pada proses elektrodposisi terhadap sifat mekanis, mikrostruktur, dan ketahanan korosi lapisan komposit Zn–CaCO₃ berbasis cangkang telur pada baja AISI 1018 di lingkungan biodiesel B40. Berikut merupakan kesimpulan dari penelitian ini:

1. Peningkatan *agitation speed* dari 400 rpm menjadi 600 rpm mampu meningkatkan kualitas lapisan dengan menghasilkan ketebalan rata-rata tertinggi sebesar 120 μm dan nilai kekerasan permukaan tertinggi sebesar 99,5 HV. Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi tersebut transport massa ion Zn²⁺ dan partikel CaCO₃ menuju permukaan katoda berlangsung secara optimal sehingga laju deposisi meningkat dan menghasilkan lapisan yang lebih tebal serta lebih kuat. Namun, peningkatan *agitation speed* menjadi 800 rpm menyebabkan ketebalan lapisan menurun menjadi 90 μm dan kekerasan menjadi 90,1 HV akibat turbulensi yang berlebihan sehingga mengganggu proses deposisi. Hasil pengujian kekasaran permukaan menunjukkan nilai 0,433 μm , 0,590 μm , dan 1,270 μm masing-masing untuk variasi 400 rpm, 600 rpm, dan 800 rpm. Nilai kekasaran yang meningkat pada 800 rpm menunjukkan bahwa pengadukan yang terlalu tinggi menyebabkan permukaan lapisan menjadi lebih kasar akibat terbentuknya pori dan ketidakaturan pertumbuhan kristal.
2. Hasil pengamatan SEM memperlihatkan morfologi permukaan berupa struktur cauliflower-like morphology yang merupakan karakteristik khas lapisan Zn hasil elektrodposisi. Variasi *agitation speed* 600 rpm menghasilkan morfologi yang lebih homogen dan relatif kompak dibandingkan variasi lainnya, sedangkan variasi 800 rpm menunjukkan adanya pori yang lebih besar, aglomerasi, dan retakan mikro akibat pengadukan yang terlalu tinggi. Hasil analisis XRD pada spesimen optimum (600 rpm) menunjukkan bahwa lapisan didominasi oleh fasa Zn sebesar 75,6%, disertai fasa CaCO₃ sebesar 15,1% dan Fe sebesar 9,3%. Keberadaan fasa CaCO₃ serta unsur Ca, C, dan O membuktikan bahwa partikel PCC dari limbah cangkang telur berhasil terinkorporasi ke dalam matriks Zn selama proses elektrodposisi, sehingga membentuk lapisan komposit pada permukaan baja AISI 1018.
3. Hasil pengujian *weight loss* menunjukkan bahwa spesimen dengan *agitation speed* 600 rpm memiliki kehilangan massa paling rendah sebesar 0,0021 gram dengan laju korosi 0,00455319 mm/tahun (4,55 μm /tahun). Nilai tersebut lebih rendah dibandingkan variasi 400 rpm (0,00496885 mm/tahun) dan 800 rpm (0,00577630 mm/tahun). Berdasarkan klasifikasi ISO 9223, seluruh spesimen termasuk dalam kategori C₂ (Low Corrosivity), namun variasi 600 rpm memberikan ketahanan korosi terbaik. Hal ini menunjukkan bahwa lapisan yang lebih tebal, lebih homogen, dan memiliki struktur mikro yang lebih kompak mampu menghambat penetrasi media korosif secara lebih efektif, sehingga *agitation speed* 600 rpm dapat dinyatakan sebagai kondisi optimum dalam proses elektrodposisi lapisan komposit Zn–CaCO₃ berbasis PCC limbah cangkang telur pada baja AISI 1018.

5. Daftar Pustaka

- [1] Fernandes DM, Squizzato AL, Lima AF, Richter EM, Munoz RAA. Corrosive character of Moringa oleifera Lam biodiesel exposed to carbon steel under simulated storage conditions. *Renewable Energy* 2019;139:1263–71. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.034>.
- [2] Fardilah VA, Alkian I, Pusparizkita YM, Aslan C, Tauviquirrahman M, Jamari J, Bayuseno AP. Microstructure examination of the biocorrosion susceptibility of mild steel coated with Zn and Zn-CaCO₃ in a biodiesel environment. *Next Materials* 2025;9:101075. <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2025.101075>.
- [3] Atikpo E, Aigbodion VS, Von Kallon DV. CaCO₃-derived from eggshell waste for improving the corrosion resistance of zinc composite coating on mild steel for biodiesel storage tank. *Chemical Data Collections* 2022;37:100794. <https://doi.org/10.1016/j.cdc.2021.100794>.
- [4] Ramírez-Santander WM, Arce-Estrada EM, Romero-Romo M, Aldana-González J, de Oca-Yemha MGM, Palomar-Pardavé M. Anti-corrosion performance of Zn-Co alloy electrodeposited onto mild steel surfaces from its precursor ions dissolved in reline deep eutectic solvent. *Journal of Solid State Electrochemistry* 2025. <https://doi.org/10.1007/s10008-025-06360-8>.
- [5] Feng Z, Li Q, Zhang J, Yang P, Song H, An M. Electrodeposition of nanocrystalline Zn-Ni coatings with single gamma phase from an alkaline bath. *Surface and Coatings Technology* 2015;270:47–56. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.03.020>.

-
- [6] Fardilah VA, Schmahl WW, Pusparizkita YM, Aslan C, Tauviquirrahman M, Jamari J, Bayuseno AP. Electrodeposited Zn and Zn–CaCO₃ composite on mild steel for biodiesel storage tanks: Corrosion resistance evaluation. *Results in Surfaces and Interfaces* 2025;18:100426. <https://doi.org/10.1016/j.rsufi.2025.100426>.
 - [7] Gan YX. Hydrothermal carbonization coating on AISI 1018 steel for seawater corrosion protection. *Coatings* 2025;15(11):1346. <https://doi.org/10.3390/coatings15111346>.
 - [8] Adama KK, Onyeachu IB, Modebe LU, Chukwuike VI, Oghuma PO, Akhabue CE. Comparative evaluation of corrosion behaviour of carbon steel (C1020) in different biodiesels: Synthesis, characterization and electrochemical investigations. *Results in Engineering* 2024;21:101695. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101695>.
 - [9] Lelevic A, Walsh FC. Electrodeposition of Ni-P composite coatings: A review. *Surface & Coatings Technology* 2019;378:124803. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.07.027>.
 - [10] Kumar CMP, Lakshmikanthan A, Chandrashekarappa MPG, Pimenov DY, Giasin K. The effect of Zn and Zn–WO₃ composites nano-coatings deposition on hardness and corrosion resistance in steel substrate. *Materials* 2021;14(9):2253. <https://doi.org/10.3390/ma14092253>.