

## PENGEMBANGAN ANODA KOMPOSIT MAGNESIUM–GRAFEN DENGAN PELAPIS NANOKOMPOSIT UNTUK MENINGKATKAN KETAHANAN KOROSI PADA BATERAI AIR LAUT

Hardi Hamzah<sup>1\*</sup>, Khaeriah Dahlan<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Program Studi Fisika, Universitas Cenderawasih, Indonesia  
Email: [hardi@fmipa.uncen.ac.id](mailto:hardi@fmipa.uncen.ac.id)

### Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan anoda komposit magnesium–grafen dengan lapisan pelindung nanokomposit guna meningkatkan ketahanan korosi dan kinerja elektrokimia pada baterai air laut. Anoda disintesis menggunakan metode powder metallurgy dengan variasi komposisi Mg–grafen (95:5, 90:10, dan 85:15 % berat), kemudian dilapisi nanokomposit berbasis ZnO, TiO<sub>2</sub>, dan grafen oksida melalui teknik electrodeposition, dip coating, dan spray coating. Karakterisasi material dilakukan menggunakan FTIR, XRD, SEM, dan EDX. Hasil FTIR menunjukkan keberadaan gugus graphitic dan gugus fungsi oksigen yang meningkatkan interaksi dengan elektrolit. Pola XRD mengindikasikan struktur dominan amorf dengan kristalinitas rendah serta jarak antar-lapis yang lebih besar, yang mendukung transport ion. Analisis SEM memperlihatkan morfologi berpori dan saling terhubung, sedangkan EDX menunjukkan dominasi karbon dengan distribusi oksigen dan fluor yang terkendali. Lapisan nanokomposit terbukti meningkatkan stabilitas permukaan dan ketahanan korosi anoda berbasis magnesium. Sinergi antara grafen dan pelapis pelindung berkontribusi terhadap peningkatan stabilitas struktural dan elektrokimia. Hasil ini menunjukkan bahwa anoda komposit magnesium–grafen berlapis nanokomposit memiliki potensi sebagai material yang efisien dan tahan lama untuk aplikasi baterai air laut.

**Kata kunci:** Komposit Magnesium–Grafen, Pelapis Nanokomposit, Ketahanan Korosi, Baterai Air Laut, Kinerja Elektrokimia, Metalurgi Serbuk.

## DEVELOPMENT OF MAGNESIUM–GRAPHENE COMPOSITE ANODE WITH NANOCOMPOSITE COATING FOR ENHANCED CORROSION RESISTANCE IN SEAWATER BATTERIES

### Abstract

*This study investigates the development of a magnesium–graphene composite anode with nanocomposite protective coatings to enhance corrosion resistance and electrochemical performance in seawater batteries. The composite anodes were synthesized via powder metallurgy using varying Mg–graphene ratios (95:5, 90:10, and 85:15 wt%), followed by the application of ZnO, TiO<sub>2</sub>, and graphene oxide-based coatings through electrodeposition, dip coating, and spray coating techniques. Material characterization was conducted using FTIR, XRD, SEM, and EDX analyses. FTIR results confirmed the presence of graphitic and oxygen-containing functional groups that improve electrolyte interaction. XRD patterns revealed predominantly amorphous structures with low crystallinity and expanded interlayer spacing, which facilitate ion transport. SEM observations showed a porous and interconnected morphology, while EDX analysis indicated a carbon-dominated composition with controlled oxygen and fluorine content. The application of nanocomposite coatings demonstrated improved surface stability and corrosion resistance of the magnesium-based anodes. The synergistic effect of graphene incorporation and protective coating contributes to enhanced structural integrity and electrochemical stability. These findings highlight the potential of magnesium–graphene composite anodes with nanocomposite coatings as promising candidates for durable and efficient seawater battery systems.*

**Keywords:** *Magnesium–Graphene Composite, Nanocomposite Coating, Corrosion Resistance, Seawater Battery, Electrochemical Performance, Powder Metallurgy.*

## PENDAHULUAN

Dalam beberapa dekade terakhir, peningkatan kebutuhan energi global telah mendorong pengembangan teknologi penyimpanan energi yang efisien dan berkelanjutan. Sistem penyimpanan energi menjadi komponen penting dalam mendukung integrasi sumber energi terbarukan seperti tenaga surya dan angin yang bersifat intermiten. Salah satu teknologi yang mulai berkembang adalah baterai air laut (*seawater batteries*, SWBs), yang memanfaatkan air laut sebagai elektrolit alami yang melimpah, ramah lingkungan, dan berbiaya rendah [1].

Meskipun menawarkan berbagai keunggulan, implementasi SWBs masih menghadapi tantangan signifikan, terutama terkait dengan korosi material anoda yang bersentuhan langsung dengan lingkungan air laut yang agresif. Korosi ini dapat menyebabkan degradasi struktur material, menurunkan efisiensi elektrokimia, serta memperpendek umur pakai baterai [2]. Oleh karena itu, pengembangan material anoda yang memiliki ketahanan korosi tinggi sekaligus performa elektrokimia yang baik menjadi fokus utama dalam penelitian SWBs.

Magnesium (Mg) merupakan salah satu kandidat material anoda yang menjanjikan karena memiliki kapasitas volumetrik tinggi ( $\sim 3833 \text{ mAh/cm}^3$ ), ketersediaan yang melimpah, serta sifat ramah lingkungan [3]. Namun demikian, reaktivitas magnesium yang tinggi dalam media berair menyebabkan terjadinya korosi diri (*self-corrosion*) yang signifikan, sehingga menghambat kinerja dan stabilitas baterai [4]. Permasalahan ini menjadi kendala utama dalam pemanfaatan magnesium sebagai anoda pada sistem baterai air laut.

Salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah pembentukan material komposit berbasis magnesium dan grafen. Grafen memiliki konduktivitas listrik yang tinggi, luas permukaan besar, serta kekuatan mekanik yang baik, sehingga mampu meningkatkan stabilitas struktural dan memperbaiki jalur transport elektron dalam material anoda [4,5]. Selain itu, keberadaan grafen juga dapat berperan sebagai penghalang

difusi ion korosif, sehingga berpotensi menekan laju korosi magnesium.

Di sisi lain, strategi perlindungan permukaan melalui pelapisan nanokomposit juga telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam meningkatkan ketahanan korosi material di lingkungan laut. Pelapis berbasis ZnO, TiO<sub>2</sub>, dan grafen oksida diketahui mampu memberikan perlindungan secara fisik maupun kimia dengan membentuk lapisan penghalang yang stabil terhadap penetrasi ion korosif [6-8]. Namun, efektivitas kombinasi antara komposit magnesium–grafen dan pelapis nanokomposit dalam konteks baterai air laut, khususnya terkait stabilitas jangka panjang, masih belum banyak dilaporkan.

Beberapa penelitian sebelumnya juga menunjukkan perkembangan teknologi baterai berbasis sumber daya lokal dan sistem elektrolit alternatif, seperti pemanfaatan bahan alami dalam sistem bio-baterai [9,10], serta optimasi komposisi elektrolit untuk meningkatkan performa elektrokimia [11]. Selain itu, pengembangan desain sistem baterai air laut juga telah mencapai kinerja tegangan hingga 4,23 V dengan output daya sebesar 6 Watt [12]. Meskipun demikian, integrasi antara desain material anoda yang tahan korosi dengan performa elektrokimia yang stabil masih menjadi tantangan terbuka.

Berdasarkan uraian tersebut, terdapat kesenjangan penelitian yang signifikan, yaitu belum optimalnya integrasi antara rekayasa material komposit magnesium–grafen dengan strategi pelapisan nanokomposit untuk meningkatkan ketahanan korosi dan stabilitas elektrokimia secara simultan dalam sistem baterai air laut. Selain itu, pemahaman mengenai hubungan antara struktur material, morfologi permukaan, dan kinerja elektrokimia dalam kondisi lingkungan air laut masih perlu diperdalam.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan mengkaraktisasi material anoda komposit magnesium–grafen yang dilapisi nanokomposit berbasis ZnO, TiO<sub>2</sub>, dan grafen oksida. Fokus penelitian diarahkan pada analisis karakteristik struktural, morfologi, serta potensi peningkatan ketahanan korosi dan stabilitas elektrokimia. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan

material anoda yang lebih tahan lama dan efisien untuk aplikasi baterai air laut generasi berikutnya.

## METODE PENELITIAN

### 2.1 Desain Penelitian

Penelitian ini merupakan studi eksperimental yang meliputi sintesis material, karakterisasi fisik dan kimia, serta evaluasi kinerja elektrokimia anoda komposit magnesium-grafen dengan pelapis nanokomposit. Variasi utama yang dikaji adalah rasio komposisi magnesium-grafen serta jenis pelapis nanokomposit yang digunakan.

### 2.2 Bahan dan Peralatan

Bahan utama yang digunakan meliputi serbuk magnesium (Mg, kemurnian  $\geq 99\%$ ), grafen (ketebalan  $< 10$  lapisan), serta prekursor pelapis nanokomposit berupa ZnO, TiO<sub>2</sub>, dan grafen oksida (GO). Larutan elektrolit untuk pengujian korosi dan elektrokimia menggunakan larutan air laut sintetis sesuai standar ASTM D1141.

Peralatan utama meliputi:

- Ball mill untuk pencampuran serbuk,
- Furnace dengan kontrol atmosfer untuk proses sintering,
- Alat electrodeposition,
- Serta instrumen karakterisasi seperti XRD, FTIR, SEM-EDX, dan potensiostat/galvanostat.

### 2.3 Sintesis Komposit Magnesium–Grafen

Serbuk magnesium dan grafen dicampur dengan variasi komposisi 95:5, 90:10, dan 85:15 (% berat). Proses pencampuran dilakukan menggunakan ball milling pada kecepatan 300 rpm selama 6 jam dengan rasio bola terhadap serbuk 10:1.

Campuran serbuk kemudian dikompaksi menggunakan tekanan 300 MPa hingga membentuk pelet silinder. Proses sintering dilakukan pada suhu 450°C selama 3 jam dalam atmosfer argon dengan laju pemanasan 5°C/menit untuk mencegah oksidasi. Setelah sintering, sampel didinginkan secara alami hingga suhu ruang dalam kondisi inert.

### 2.4 Aplikasi Pelapis Nanokomposit

Pelapis nanokomposit diaplikasikan pada permukaan anoda menggunakan tiga metode, yaitu:

- Electrodeposition: dilakukan pada tegangan 5 V selama 15 menit dalam larutan prekursor ZnO atau TiO<sub>2</sub>.
- Dip coating: sampel dicelupkan dalam larutan grafen oksida selama 10 menit, kemudian dikeringkan pada suhu 80°C selama 2 jam.
- Spray coating: larutan nanokomposit disemprotkan secara merata pada permukaan sampel, kemudian dikeringkan pada suhu 100°C selama 1 jam.

Ketebalan lapisan dikontrol dalam rentang 5–20  $\mu\text{m}$  dengan mengatur waktu deposisi dan konsentrasi larutan.

### 2.5 Karakterisasi Material

Karakterisasi material dilakukan untuk menganalisis struktur, komposisi, dan morfologi anoda:

- X-ray Diffraction (XRD) digunakan untuk mengidentifikasi fase kristal dan tingkat kristalinitas.
- Fourier Transform Infrared (FTIR) untuk mengidentifikasi gugus fungsi kimia.
- Scanning Electron Microscopy (SEM) untuk mengamati morfologi permukaan dan porositas.
- Energy Dispersive X-ray (EDX) untuk menentukan komposisi unsur.

### 2.6 Pengujian Ketahanan Korosi

Ketahanan korosi diuji menggunakan:

- Potentiodynamic polarization untuk menentukan laju korosi (Icorr dan Ecorr),
- Salt spray test selama 72 jam sesuai standar ASTM B117,
- Immersion test dalam larutan air laut sintetis selama 7 hari.

Analisis dilakukan dengan membandingkan perubahan massa, morfologi permukaan, dan parameter elektrokimia sebelum dan sesudah pengujian.

### 2.7 Pengujian Elektrokimia

Kinerja elektrokimia diuji menggunakan sistem sel tiga elektroda dengan:

- Anoda sebagai elektroda kerja,
- Ag/AgCl sebagai elektroda referensi,
- Platina sebagai elektroda pembantu.

Pengujian meliputi:

- Cyclic Voltammetry (CV) pada rentang tegangan -1,5 hingga 0,5 V dengan laju pindai 10 mV/s,
- Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) pada frekuensi 100 kHz–0,01 Hz,

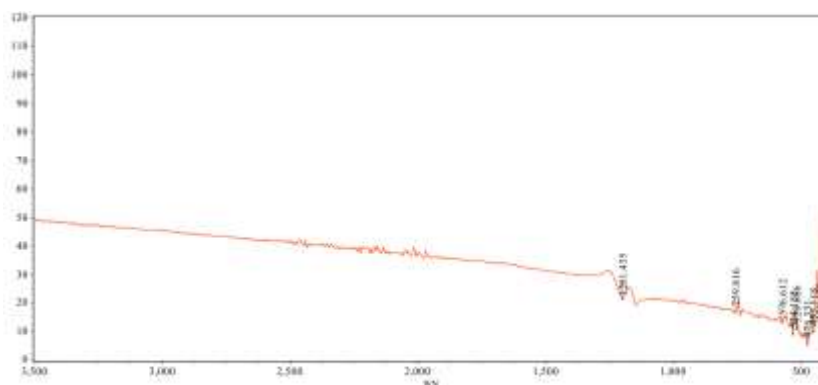
- Galvanostatic charge–discharge (GCD) untuk menentukan kapasitas spesifik dan stabilitas siklus.

### 2.8 Analisis Data

Data hasil pengujian dianalisis menggunakan metode statistik berupa Analysis of Variance (ANOVA) untuk menentukan pengaruh variasi komposisi dan jenis pelapis terhadap kinerja material. Optimasi parameter dilakukan menggunakan pendekatan Response Surface Methodology (RSM).

### 2.9 Karakterisasi Pasca-Pengujian

Analisis post-mortem dilakukan menggunakan SEM, XRD, dan EDX untuk mengidentifikasi perubahan struktur dan mekanisme degradasi setelah pengujian elektrokimia dan korosi.



**Gambar 1.** Hasil FTIR menunjukkan tiga wilayah utama puncak yang penting untuk karakterisasi elektroda membran karbon untuk aplikasi baterai.

Puncak pada  $1201,44\text{ cm}^{-1}$  yang diidentifikasi sebagai regangan C–O menunjukkan adanya gugus fungsi oksigen pada permukaan material. Keberadaan gugus ini berperan penting dalam meningkatkan sifat hidrofilik serta interaksi antara elektroda dan elektrolit air laut, yang pada akhirnya dapat mempercepat kinetika transfer muatan.

Secara keseluruhan, spektrum FTIR mengonfirmasi keberhasilan integrasi grafen dalam matriks magnesium serta terbentuknya gugus fungsi aktif yang mendukung proses elektrokimia. Hal ini sejalan dengan laporan sebelumnya yang menyatakan bahwa gugus oksigen pada material berbasis karbon dapat

## HASIL DAN PEMBAHASAN

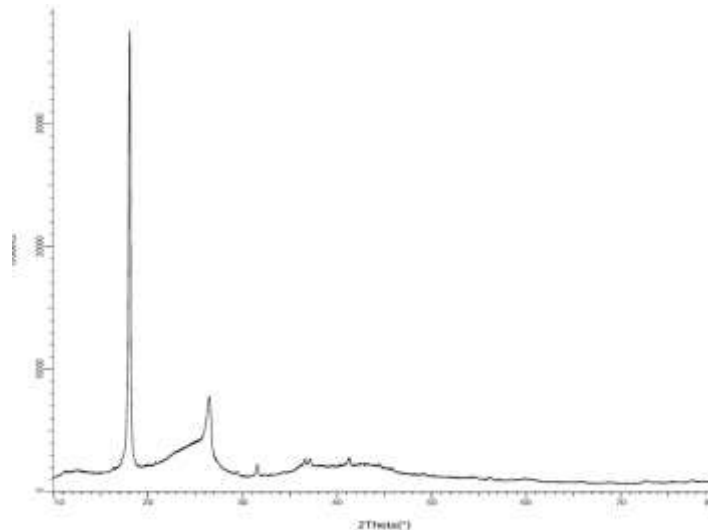
### 3.1 Karakterisasi Struktur dan Gugus Fungsi (FTIR)

Hasil analisis FTIR (Gambar 1) menunjukkan keberadaan beberapa puncak utama yang berkaitan dengan struktur kimia komposit magnesium–grafen. Puncak pada rentang  $400\text{--}600\text{ cm}^{-1}$  mengindikasikan adanya getaran ikatan logam–oksigen yang kemungkinan berasal dari interaksi antara magnesium dengan oksida atau komponen pelapis nanokomposit. Selain itu, puncak pada  $759,82\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan keberadaan struktur aromatik C–H yang berkaitan dengan domain grafitik dari grafen.

meningkatkan performa elektrokimia melalui peningkatan interaksi elektroda–elektrolit [13,14].

### 3.2 Analisis Struktur Kristal (XRD)

Pola difraksi XRD pada Gambar 2 menunjukkan bahwa material anoda komposit memiliki struktur dominan amorf dengan kristalinitas rendah. Puncak lebar pada sudut  $2\theta$  sekitar  $18,07^\circ$  dengan jarak antar bidang (d-spacing) sebesar  $4,91\text{ \AA}$  mengindikasikan adanya struktur tidak teratur (*disordered structure*) yang umumnya ditemukan pada material berbasis karbon terdispersi dalam matriks logam.



**Gambar 2.** Hasil XRD elektroda membran karbon

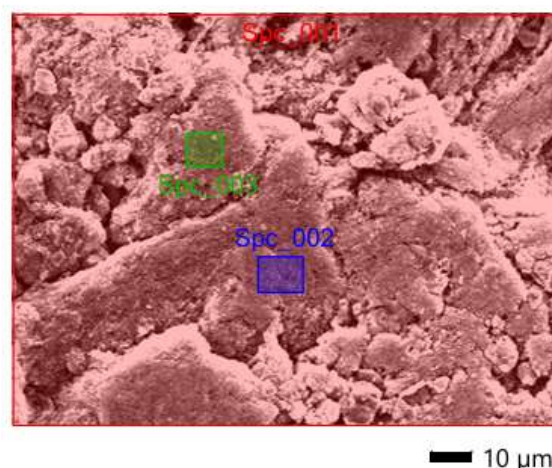
Sementara itu, puncak lemah di sekitar  $26,50^\circ$  yang berkaitan dengan bidang (002) grafit menunjukkan keberadaan domain grafitik dalam jumlah terbatas. Struktur amorf dengan d-spacing yang relatif besar ini menguntungkan bagi aplikasi baterai air laut karena dapat memfasilitasi difusi ion yang lebih cepat, terutama ion-ion besar seperti  $\text{Na}^+$  dalam elektrolit air laut.

Struktur dengan kristalinitas rendah juga berkontribusi terhadap peningkatan jumlah situs aktif reaksi, sehingga berpotensi meningkatkan kapasitas penyimpanan muatan. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan

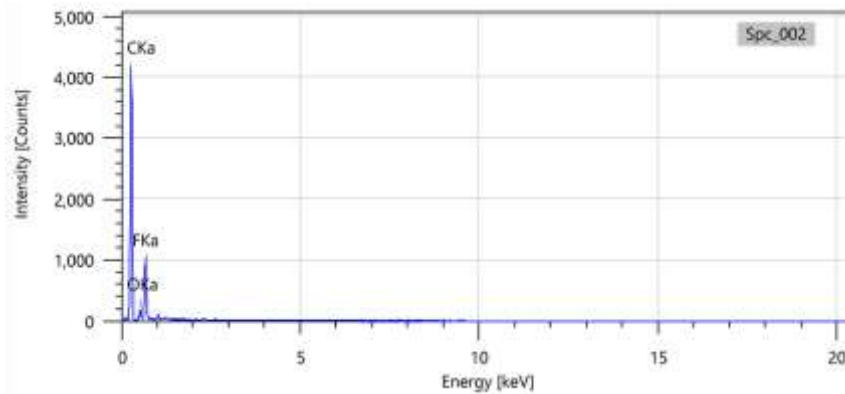
grafen dan proses sintesis yang digunakan berhasil menghasilkan struktur komposit yang sesuai untuk aplikasi elektrokimia [15,16].

### 3.3 Komposisi Unsur (EDX)

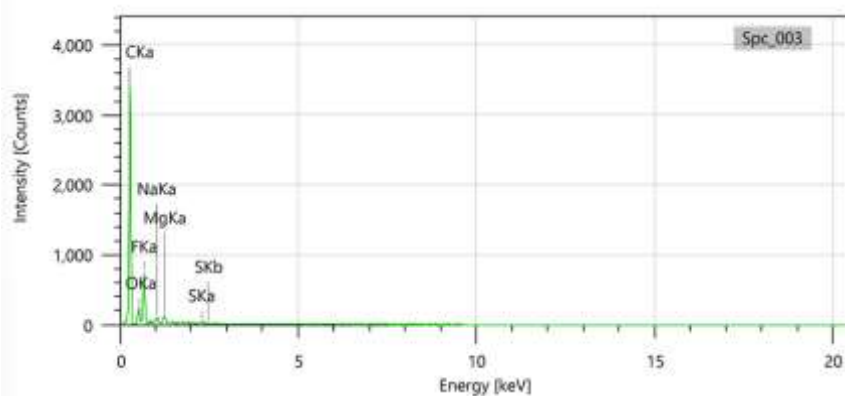
Hasil analisis EDX pada Gambar 3–5 menunjukkan bahwa komposit didominasi oleh unsur karbon dengan fraksi massa sekitar 74–76%, yang berasal dari kontribusi grafen dan kemungkinan komponen pelapis. Kandungan oksigen terdeteksi dalam kisaran 4–7%, yang menunjukkan keberadaan gugus fungsi oksigen pada permukaan material.



**Gambar 3.** Hasil EDX elektroda membran karbon kondisi analisis: Landing Voltage: 10.0 kV, Working Distance: 9.8 mm, Magnification: x1,000, dan Vacuum Mode: High-Vacuum.



**Gambar 4.** Intensitas dan energi yang teramati dari hasil EDX elektroda membran karbon (Sample Spc\_002)



**Gambar 5.** Intensitas dan energi yang teramati dari hasil EDX elektroda membran karbon (Sample Spc\_003)

Selain itu, terdeteksi unsur fluor dalam jumlah signifikan (sekitar 15–20%), yang berpotensi berasal dari proses sintesis atau modifikasi permukaan. Kehadiran fluor diketahui dapat meningkatkan ketahanan kimia dan sifat hidrofobik material, yang menguntungkan dalam lingkungan air laut yang korosif.

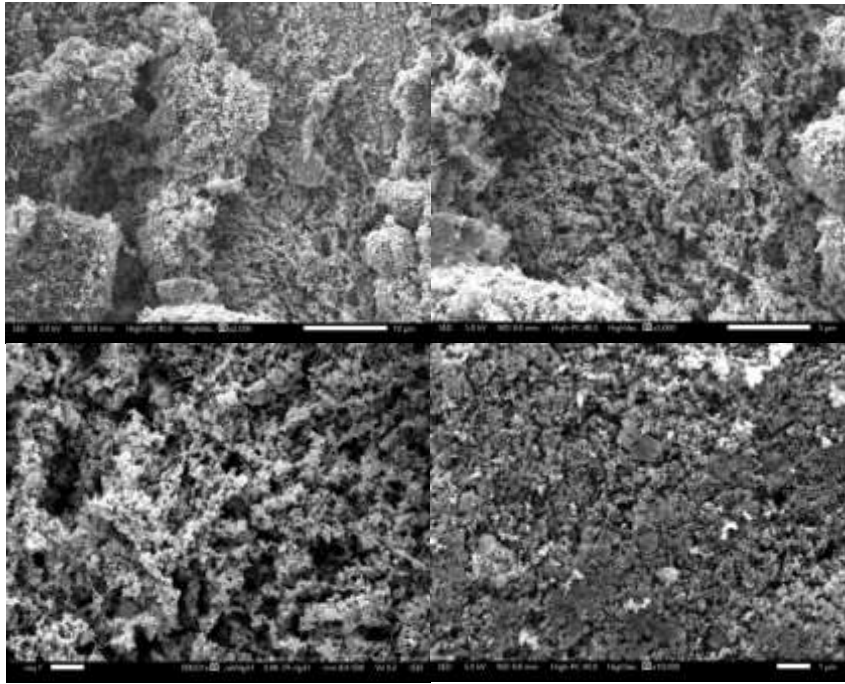
Perbedaan komposisi antara sampel menunjukkan bahwa variasi proses dan pelapisan mempengaruhi distribusi unsur. Sampel dengan kandungan oksigen yang lebih tinggi cenderung memiliki interaksi elektrolit yang lebih baik, namun berpotensi menurunkan konduktivitas listrik jika jumlahnya berlebihan. Sebaliknya, kandungan fluor yang tinggi dapat

meningkatkan stabilitas tetapi perlu dikontrol agar tidak menghambat transport elektron.

Hasil ini menunjukkan adanya keseimbangan antara stabilitas kimia dan konduktivitas listrik, yang menjadi faktor penting dalam menentukan performa anoda [17,18].

### 3.4 Morfologi Permukaan (SEM)

Citra SEM pada Gambar 6 menunjukkan bahwa permukaan anoda komposit memiliki struktur berpori dengan morfologi kasar dan tidak homogen. Struktur ini terdiri dari aglomerasi partikel yang membentuk jaringan tiga dimensi yang saling terhubung.



**Gambar 6.** Hasil SEM menunjukkan struktur berpori dan sangat kasar dari elektroda membran karbon

Keberadaan pori dengan ukuran mikro hingga sub-mikron memberikan jalur difusi ion yang lebih efisien, sehingga meningkatkan aksesibilitas elektrolit ke dalam material. Selain itu, permukaan yang kasar meningkatkan luas permukaan spesifik, yang berkontribusi terhadap peningkatan jumlah situs aktif reaksi elektrokimia.

Struktur hierarkis yang terbentuk juga berperan dalam menjaga keseimbangan antara transport ion dan konduktivitas elektron. Jaringan tiga dimensi yang terhubung memungkinkan distribusi arus yang lebih merata serta meningkatkan stabilitas mekanik selama proses siklus pengisian dan pengosongan.

Dengan demikian, morfologi yang dihasilkan mendukung peningkatan kinerja elektrokimia serta ketahanan terhadap degradasi struktur dalam lingkungan air laut (Akin & Zhou, 2022; Gong et al., 2024).

### 3.5 Hubungan Struktur, Komposisi, dan Potensi Kinerja Elektrokimia

Berdasarkan hasil karakterisasi FTIR, XRD, EDX, dan SEM, dapat disusun hubungan antara struktur material dan potensi kinerjanya dalam aplikasi baterai air laut.

Keberadaan domain grafitik dan gugus fungsi oksigen (FTIR) meningkatkan interaksi dengan elektrolit, sementara struktur amorf

dengan d-spacing besar (XRD) memfasilitasi difusi ion yang lebih cepat. Komposisi unsur yang didominasi karbon dengan distribusi oksigen dan fluor yang terkendali (EDX) memberikan keseimbangan antara konduktivitas listrik dan stabilitas kimia.

Di sisi lain, morfologi berpori dan struktur tiga dimensi (SEM) meningkatkan luas permukaan aktif serta mempercepat transport ion dan elektron. Kombinasi faktor-faktor ini secara sinergis berkontribusi terhadap peningkatan stabilitas elektrokimia dan ketahanan korosi anoda.

Selain itu, keberadaan pelapis nanokomposit berperan sebagai lapisan pelindung yang menghambat penetrasi ion korosif dari air laut, sehingga mengurangi laju degradasi material. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan kombinasi antara komposit magnesium-grafen dan pelapisan nanokomposit merupakan strategi yang efektif untuk meningkatkan performa anoda pada sistem baterai air laut.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Chen, J., Sun, L., Wang, K., & Zhang, Y. (2024). Research and applications of rechargeable seawater battery. *Journal of Energy Storage*, 76, 109659. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109659>

- [2] Zhao, L., Li, X., Yu, J., & Zhou, W. (2023). Design Strategy of Corrosion-Resistant Electrodes for Seawater Electrolysis. *Materials (Basel, Switzerland)*, *16*(7), 2709. <https://doi.org/10.3390/ma16072709>
- [3] Mensing, J. P., Lomas, T., & Tuantranont, A. (2022). Advances in rechargeable magnesium batteries employing graphene-based materials. *Carbon*, *197*, 264-281. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.06.062>
- [4] Wu, C., Meng, X., & Wang, W. (2020). High-Performance Mg–Al–Bi Alloy Anode for Seawater Batteries and Related Mechanisms. *Processes*, *8*(11), 1362. <https://doi.org/10.3390/pr8111362>
- [5] Park, S., Yoon, N., Ullah, Z., Tarus, B. K., Choi, B., Kim, H. H., & Son, M. (2023). Energy storage capability of seawater batteries for intermittent power generation systems: Conceptualization and modeling. *Journal of Power Sources*, *580*, 233322. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233322>
- [6] Son, M., Park, S., Kim, N., Angeles, A. T., Kim, Y., & Cho, K. H. (2021). Simultaneous Energy Storage and Seawater Desalination using Rechargeable Seawater Battery: Feasibility and Future Directions. *Advanced science (Weinheim, Baden-Wuerttemberg, Germany)*, *8*(18), e2101289. <https://doi.org/10.1002/advs.202101289>
- [7] Elangovan, N., Srinivasan, A., Pugalmani, S., Kalaiyarasan, M., Rajendran, N., Seikh, A. H., & Rajendiran, N. (2024). Development and electrochemical investigations of enhanced corrosion-resistant Polyvinylcarbazole-TiO<sub>2</sub> hybrid nanocomposite coatings on 316L SS for marine applications. *Surface and Coatings Technology*, *481*, 130628.
- [8] Bogatu, N., Buruiana, D. L., Muresan, A. C., Ghisman, V., Lupu, A., Mardare, L., Herbei, E. E., Basliu, V., Ceoromila, A., & Florescu, S. (2025). Assessment of the Effectiveness of Protective Coatings in Preventing Steel Corrosion in the Marine Environment. *Polymers*, *17*(3), 378. <https://doi.org/10.3390/polym17030378>
- [9] Togibasa, O., Haryati, E., Dahlan, K., Ansanay, Y., Siregar, T., & Liling, M. N. (2019, April). Characterization of bio-battery from tropical almond paste. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1204, No. 1, p. 012036). IOP Publishing.
- [10] Ansanay, Y. O., Walilo, A., & Togibasa, O. (2019). Novelty potency of utilizing local betel nut (areca catechu) of Papua as a bio-battery to produce electricity. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, *9*(2), 667-672.
- [11] Rumbino, G., Maniambo, L., Soll, M., Dirgantari, G., & Togibasa, O. (2023). Performance enhancement of biobattery from tropical almond paste using acetic acid addition. *INDONESIAN JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, *13*(1), 99-105.
- [12] Kadir, M. R., Arsyad, N. A., Alaydrus, S. N., Puspita, W., Sahrul, S., Agriawan, M. N., & Hamzah, H. (2023). Seawater Lamp: Utilization of Seawater as an Alternative Energy Source to Generate Electricity. *Indonesian Review of Physics*, *6*(1), 17-23. <https://doi.org/10.12928/irip.v6i1.7070>
- [13] Peng, Y., Chen, Z., Zhang, R., Zhou, W., Gao, P., Wu, J., Liu, H., Liu, J., Hu, A., & Chen, X. (2021). Oxygen-Containing Functional Groups Regulating the Carbon/Electrolyte Interfacial Properties Toward Enhanced K<sup>+</sup> Storage. *Nano-micro letters*, *13*(1), 192. <https://doi.org/10.1007/s40820-021-00722-3>
- [14] Xia, G., Shen, S., Zhu, F., Xie, J., Hu, Y., Zhu, K., & Zhang, J. (2015). Effect of oxygen-containing functional groups of carbon materials on the performance of Li–O<sub>2</sub> batteries. *Electrochemistry Communications*, *60*, 26-29.
- [15] Li, W., & Shi, J. (2023). Lignin-derived carbon material for electrochemical energy storage applications: Insight into the process-structure-properties-performance correlations. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, *11*, 1121027.
- [16] Shrestha, D. (2024). Structural and electrochemical evaluation of renewable carbons and their composites on different carbonization temperatures for supercapacitor applications. *Heliyon*, *10*(4).
- [17] Qiu, C., Jiang, L., Gao, Y., & Sheng, L. (2023). Effects of oxygen-containing functional groups on carbon materials in

- supercapacitors: A review. *Materials & Design*, 230, 111952.
- [18] Lobato-Peralta, D. R., Lázaro, M. J., & Alegre, C. (2025). Carbon-based materials in metal-ion hybrid supercapacitors: Advances, challenges, and future directions. *Journal of Energy Storage*, 131, 117568.