

Kajian Sifat Anti-Kakisan Salutan Komposit Grafena/Fosforena-Polyaniline (PANi) pada Keluli Lembut

Abdullah B. Hamat^{1*}, W. M. Rizairie B. W. Md. Noor¹, Normi B. Muhamad¹

¹Department of Mechanical Engineering

Politeknik Sultan Mizan Zainal Abidin, 23000 Dungun, Terengganu

*Corresponding author E-mail: abdullah_hamat@psmza.edu.my

Abstract

Keluli lembut walaupun digunakan secara meluas kerana sifat mekanikal dan pemilihan disebabkan kosnya yang rendah, ia sering terdedah kepada kakisan yang mengesahkan ketahanan dan kebolehpercayaannya. Untuk menangani isu ini, salutan komposit berasaskan Polyaniline (PANi) yang ditambah dengan Fosforena (P) dan Grafena (G) telah dibangunkan. PANi dipilih kerana keupayaannya untuk menghalang pengecasan ionik pada permukaan, manakala Grafena bertujuan untuk meningkatkan kekonduksian elektrik. Walau bagaimanapun, Grafena cenderung untuk menggumpal, mengurangkan keberkesanannya. Fosforena diperkenalkan untuk meningkatkan penyebaran Grafena dan keseragaman salutan. Kajian ini bertujuan untuk menilai kesan penambahan Fosforena pada sifat struktur dan fizikal salutan komposit P:G-PANi pada substrat keluli lembut. Salutan disediakan menggunakan kaedah pengisaran bebola mekanikal planet diikuti dengan sonikasi dan dicirikan menggunakan Mikroskopi Elektron Imbasan Pelepasan Medan (FESEM). Keputusan FESEM menunjukkan bahawa penambahan Fosforena meningkatkan penyebaran dan keseragaman komposit terutamanya pada nisbah P:G 1:1. Dimana Fosforena bertindak sebagai pemisah yang berkesan antara lapisan Grafena. Analisis XRD mengesahkan kehadiran fasa Fosforena dan Grafena yang berasingan dalam matriks PANi, dengan Fosforena mempengaruhi keamatan puncak Grafena, menyokong peranannya dalam mengubah seni bina hablur komposit. Perubahan struktur ini yang disebabkan oleh Fosforena membawa kepada sifat penghalang fizikal yang lebih baik seperti yang ditunjukkan oleh rintangan kakisan yang dipertingkatkan, dimana nisbah P:G 1:1 menunjukkan "Open Circuit Potential" (OCP) yang paling stabil dan baik (-0.6 V). Penemuan ini menekankan peranan penting Fosforena dalam mengoptimumkan mikrostruktur dan seterusnya sifat fizikal dan perlindungan salutan komposit.

Key Words: Fosforena, Grafena, Polyaniline, Salutan Komposit, Sifat Struktur, Sifat Fizikal, Keluli Lembut

1.0 Pengenalan

Pengenalan Keluli lembut adalah bahan asas dalam pelbagai industri kerana kosnya yang rendah, kemudahan fabrikasi, dan sifat mekanikal yang baik. Walau bagaimanapun, kecenderungannya terhadap kakisan boleh menjejaskan integriti struktur dan memendekkan jangka hayatnya. Kakisan adalah masalah yang meluas dengan implikasi ekonomi dan keselamatan yang besar. Oleh itu, pembangunan kaedah perlindungan kakisan yang berkesan adalah amat penting.

Salutan pelindung adalah strategi utama untuk mencegah kakisan. Polyaniline (PANi), sejenis polimer pengkonduksi, telah menunjukkan potensi dalam perlindungan kakisan. Walau bagaimanapun, PANi tulen mungkin mengalami masalah lekatan dan perlindungan yang terhad dalam persekitaran yang teruk. Penambahan bahan nano seperti Grafena boleh meningkatkan sifat salutan. Grafena terkenal dengan sifat penghalang yang sangat baik, tetapi kecenderungannya untuk menggumpal dan kehadiran kecacatan boleh mengesahkan prestasinya dalam aplikasi praktikal.

Fosforena, bahan dua dimensi (2D) yang terdiri daripada lapisan tunggal atau beberapa lapisan fosforus hitam, telah muncul sebagai bahan yang menjanjikan dengan sifat elektronik, haba, dan mekanikal yang luar biasa. Keupayaannya untuk bertindak sebagai pemisah dan meningkatkan penyebaran dalam komposit Grafena menawarkan penyelesaian yang berpotensi kepada batasan Grafena. Walaupun terdapat potensi, penyelidikan mengenai komposit PANi yang ditambah Fosforena/Grafena (P:G-PANi), terutamanya mengenai bagaimana penambahan Fosforena secara sistematik mempengaruhi sifat struktur dan fizikal

salutan tersebut, masih terhad.

Kajian ini bertujuan untuk membangunkan satu siri sistem salutan komposit yang menggabungkan Fosforena/Grafena yang ditambah PANi pada substrat keluli lembut. Fokus utama adalah untuk menilai kesan penambahan Fosforena yang berbeza-beza terhadap sifat struktur (morfologi, kristaliniti) dan fizikal (sifat penghalang, seperti yang ditunjukkan oleh tingkah laku kakisan) salutan. Pemahaman ini penting untuk mengoptimalkan reka bentuk salutan pelindung termaju.

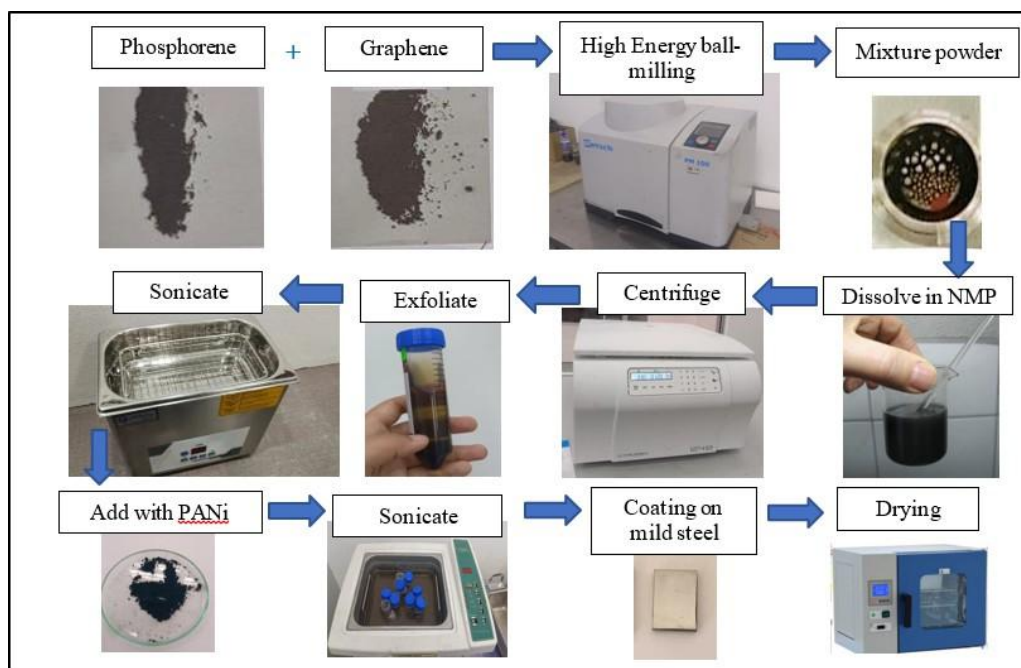
Sorotan Literatur Keluli lembut, walaupun serba boleh, sangat terdedah kepada kakisan apabila terdedah kepada persekitaran yang menghakis. Polyaniline (PANi) telah dikaji sebagai bahan salutan anti-karat kerana kestabilan persekitaran dan kemudahan sintesisnya. Walau bagaimanapun, lekatan yang lemah pada permukaan logam dan sifat penghalang yang tidak mencukupi dalam keadaan tertentu adalah antara batasannya. Grafena telah dimasukkan ke dalam salutan untuk meningkatkan sifat penghalang dan kekonduksian. Namun, penggumpalan kepingan Grafena boleh mewujudkan laluan untuk agen menghakis dan mengurangkan keberkesanan keseluruhan.

Fosforena, alotrop fosforus 2D, mempunyai struktur 'puckered honeycomb' yang unik dan jurang jalur boleh tala yang bergantung kepada bilangan lapisan (0.3 hingga 2.0 eV). Sifat-sifat ini, bersama-sama dengan potensinya sebagai bahan semikonduktor jenis-p, menjadikannya calon yang menarik untuk pelbagai aplikasi, termasuk sebagai komponen dalam bahan komposit termaju. Dalam komposit berasaskan Grafena, Fosforena dijangka bertindak sebagai pemisah fizikal antara kepingan Grafena, dengan itu mengurangkan penggumpalan dan meningkatkan penyebaran. Kesan ini boleh membawa kepada pembentukan salutan yang lebih seragam dan padat dengan sifat penghalang yang dipertingkatkan. Kajian sistematik mengenai kesan kepekatan Fosforena yang berbeza-beza terhadap mikrostruktur dan sifat fizikal seterusnya bagi salutan P:G-PANi adalah penting untuk merealisasikan potensi penuhnya.

2.0 Metodologi

Metodologi bahan-bahan yang digunakan dalam kajian ini termasuk spesimen keluli lembut, serbuk Grafena, serbuk Fosforena, dan Polyaniline (PANi) dan N-Methylpyrrolidone (NMP) digunakan sebagai pelarut.

Penyediaan Sampel Campuran Fosforena dan Grafena disediakan pada nisbah kepekatan P:G yang berbeza: 0.2:1, 0.4:1, 0.6:1, 0.8:1, dan 1:1 (berat/berat). Sejumlah 1 gram serbuk campuran diproses menggunakan pengisar bebola mekanikal planet pada 450 rpm selama 2 jam, dengan 500 gram bebola pengisar. Serbuk yang telah dikisar kemudiannya dilarutkan dalam NMP. Campuran tersebut kemudiannya dikelupas menggunakan mesin putaran empar selama 1 jam, diikuti dengan sonikasi dalam rendaman ultrasonik selama 3 hingga 7 jam pada suhu terkawal 20°C hingga 40°C untuk memastikan penyebaran yang seragam. Campuran Fosforena dan Grafena yang telah tersebar kemudiannya dicampur dengan PANi pada komposisi 15% berat dan disonikasi semula di bawah keadaan yang sama. Larutan komposit yang terhasil disalut pada panel keluli lembut (dimensi: 5 cm x 4 cm x 0.5 cm) yang telah disediakan (dibersihkan dengan kertas kasar silikon karbida) menggunakan teknik salutan berus untuk mencapai ketebalan 0.1 hingga 0.5 mm. Sampel yang telah disalut dikeringkan dalam ketuhar pada 150°C selama 12 jam untuk ujian struktur, manakala untuk ujian kakisan, sampel dikeringkan pada suhu bilik.



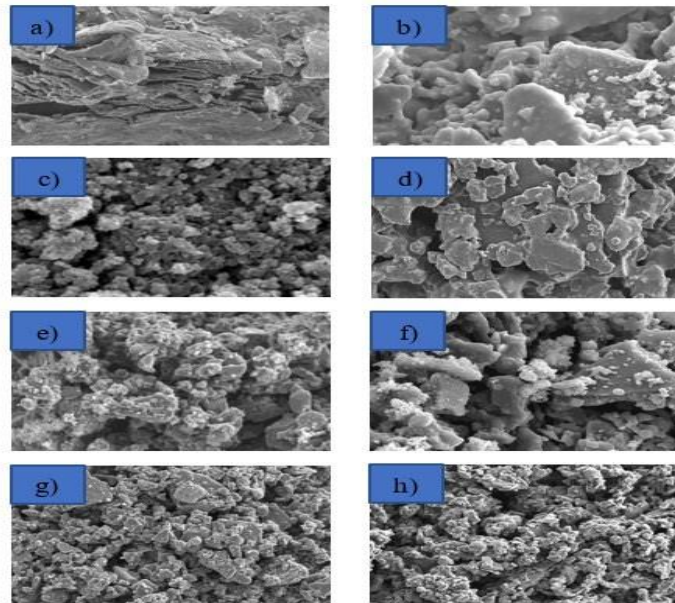
Rajah 1: Contoh penyediaan keluli lembut yang disalut dengan salutan Polyaniline ditambah fosforena/grafena.

Pencerian Sifat Struktur Sifat struktur salutan dikaji menggunakan Mikroskopi Elektron Imbasan Pelepasan Medan (FESEM). FESEM digunakan untuk memerhatikan mikrostruktur, morfologi permukaan, dan penyebaran Fosforena dan Grafena dalam matriks PANi.

Penilaian Sifat Fizikal (Rintangan Kakisan) Rintangan kakisan salutan, sebagai penunjuk sifat penghalang fizikalnya, dinilai melalui pengukuran OCP. Ujian OCP dijalankan dalam larutan natrium klorida (NaCl) 3.5% selama 72 jam menggunakan elektrod Ag/AgCl sebagai elektrod rujukan. Variasi Keupayaan OCP keluli lembut bersalut telah dianalisis berdasarkan konsep potensi penurunan merentasi salutan. Perbezaan potensi di tapak anodik dan katodik berfungsi sebagai penunjuk untuk menentukan potensi kakisan spesimen yang diuji.

3.0 Dapatan Dan Analisa

Keputusan dan Perbincangan Analisis Mikroskopi Elektron Imbasan Pelepasan Medan (FESEM) Analisis FESEM mendedahkan ciri-ciri mikrostruktur yang berbeza bagi salutan komposit Fosforena-Grafena-PANi. Imej Grafena dan Fosforena tulen menunjukkan morfologi masing-masing. Penambahan Fosforena jelas mempengaruhi penyebaran dan keseragaman komposit. Pada nisbah P:G 0.4:1, pemerhatian menunjukkan peningkatan taburan antara komponen Fosforena dan Grafena berbanding dengan sampel tanpa Fosforena atau dengan kandungan Fosforena yang sangat rendah. Kesan ini lebih ketara pada nisbah P:G 1:1, yang mempamerkan keseragaman dan ciri-ciri penyebaran yang unggul. Pada nisbah optimum ini, Fosforena kelihatan bertindak sebagai pemisah yang berkesan, menghalang penggumpalan kepingan Grafena dan menggalakkan taburan yang lebih sekata bagi kedua-dua bahan nano dalam matriks PANi. Apabila kandungan Fosforena meningkat, struktur Fosforena menjadi lebih dominan dalam morfologi permukaan.



Rajah 2: Imej FESEM bagi (a) graphene, (b) phosphorene, (c) PANI dan phosphorene / graphene menambah salutan nanokomposit PANi dengan P:G berbeza, (d) 0.2:1, (e) 0.4:1, (f) 0.6:1.

Rajah 2 menunjukkan analisis FESEM mendedahkan ciri mikrostruktur yang berbeza bagi salutan komposit phosphorene-graphene melalui pengimejan resolusi tinggi. Rajah (a) dan (b) mempamerkan dua struktur mikro yang berbeza pada pembesaran yang berbeza, di mana fosforena kelihatan sebagai pembentukan tidak teratur dan berlapis, memaparkan kurang keseragaman berbanding dengan struktur graphene. Imej awal ini membantu mewujudkan morfologi garis dasar bahan komposit.

Dalam sampel dengan nisbah P:G 0.4:1, ditunjukkan dalam Rajah (c) dan (d), analisis menunjukkan pengagihan yang lebih baik antara komponen fosforen dan graphene. Mikrograf mendedahkan bagaimana bahan-bahan ini berintegrasi dalam matriks salutan, dengan struktur fosforen menjadi lebih sekata di antara lapisan graphene. Ini mencadangkan interaksi yang berkesan antara kedua-dua bahan pada nisbah ini.

Keputusan yang paling ketara diperhatikan dalam sampel dengan nisbah P:G 1:1, seperti yang digambarkan dalam Rajah (e). Sampel ini memaparkan ciri keseragaman dan penyebaran yang unggul, dengan pengagihan yang sekata bagi kedua-dua bahan di seluruh matriks salutan. Struktur mikro pada nisbah ini menunjukkan susunan optimum bagi komponen phosphorene dan graphene, mencadangkan keadaan ideal untuk pembentukan komposit.

Akhir sekali, Rajah (f) menunjukkan kesan peningkatan kandungan fosforen dalam komposit. Pada kepekatan yang lebih tinggi, struktur phosphorene menjadi dominan, dengan berkesan menutup lapisan graphene yang mendasari. Mikrograf FESEM ini jelas menunjukkan bagaimana liputan fosforen padat mengubah komposisi struktur keseluruhan salutan, menjadikan lapisan graphene hampir tidak dapat dikesan.

Penambahan Fosforena didapati mempengaruhi puncak Grafena. Sebagai contoh, keamatan puncak Grafena yang lebih rendah diperhatikan dalam sampel dengan nisbah P:G 0.4:1 dan 0.8:1 (sebelum peningkatan pada 0.8:1 dan 1:1), yang mungkin menunjukkan bahawa Fosforena mengganggu penghabluran Grafena atau penyepaduannya yang lebih baik mengurangkan penyusunan sendiri Grafena. Sebaliknya, peningkatan keamatan puncak Grafena dalam sampel dengan nisbah P:G 0.8:1 dan 1:1 menunjukkan peningkatan struktur lapisan Grafena, kemungkinan disebabkan oleh penyebaran yang lebih baik atau pembentukan

lapisan yang lebih teratur hasil daripada kesan pemisahan Fosforena.

Kehadiran struktur antara lapisan yang berbeza menyokong hipotesis bahawa Fosforena bertindak sebagai pemisah antara lapisan Grafena, dengan itu mengubah seni bina kristal keseluruhan komposit.

Hubungan antara Sifat Struktur dan Sifat Fizikal (Rintangan Kakisan) Kesan penambahan Fosforena terhadap sifat struktur, seperti yang dibincangkan di atas (penyebaran yang lebih baik, pemisahan lapisan Grafena), dijangka meningkatkan sifat penghalang fizikal salutan. Ini disokong oleh keputusan ujian OCP. Sampel keluli lembut tanpa salutan menunjukkan potensi yang paling negatif (kira-kira -0.7 V) dan tingkah laku yang tidak stabil, menunjukkan kerentanan yang tinggi terhadap kakisan. Sebaliknya, sampel yang disalut dengan komposit P:G-PANi menunjukkan potensi yang lebih mulia. Terutamanya, salutan dengan nisbah P:G 1:1, yang menunjukkan keseragaman dan penyebaran struktur terbaik dalam analisis FESEM dan XRD, mempamerkan potensi yang paling mulia (sekitar -0.6 V) dan kestabilan yang luar biasa sepanjang tempoh ujian 72 jam. Ini menunjukkan bahawa struktur yang dioptimumkan, yang difasilitasi oleh penambahan Fosforena, menghasilkan lapisan pelindung fizikal yang teguh dan stabil.

Jadual 1: Morfologi sampel keluli lembut bersalut selepas OCP

No.	Samples	Sample image	
		Before OCP	After OCP
1.	Mild Steel		
2.	Graphene		
3.	Posphorene		
4.	PANi		

Nisbah P:G pertengahan seperti 0.2:1 dan 0.8:1 menunjukkan turun naik potensi yang lebih tinggi menunjukkan bahawa walaupun salutan ini memberikan perlindungan yang lebih baik daripada keluli lembut kosong, ia mungkin membentuk lapisan pelindung yang kurang stabil atau seragam. Ini menggariskan kepentingan mencapai keseimbangan optimum Fosforena untuk memaksimumkan integriti struktur dan seterusnya sifat penghalang fizikal salutan. Struktur komposit yang tersebar dengan baik, dimana Fosforena meningkatkan kesan

perlindungan dengan bertindak sebagai pemisah antara lapisan Grafena menyumbang kepada kadar kakisan yang berkurangan dan sifat penghalang yang lebih baik.

4.0 Kesimpulan

Kesimpulan Kajian ini berjaya menilai kesan penambahan Fosforena terhadap sifat struktur dan fizikal salutan komposit Fosforena/Grafena-PANi pada keluli lembut. Penambahan Fosforena secara signifikan mempengaruhi morfologi dan kristaliniti salutan. Analisis FESEM menunjukkan bahawa Fosforena meningkatkan penyebaran dan keseragaman Grafena dalam matriks PANi, dengan nisbah P:G 1:1 menghasilkan mikrostruktur yang paling optimum dan bersepadu. Fosforena bertindak sebagai pemisah yang berkesan menghalang penggumpalan kepingan Grafena. Keputusan XRD mengesahkan kewujudan fasa Fosforena dan Grafena yang berbeza dan menunjukkan bahawa Fosforena mempengaruhi kehadiran hablur Grafena yang menyokong peranannya sebagai pemisah dan penyumbang kepada seni bina komposit yang lebih teratur pada nisbah yang optimum.

Peningkatan sifat struktur ini yang disebabkan oleh penggabungan Fosforena secara langsung membawa kepada sifat penghalang fizikal yang lebih baik. Ini dibuktikan dengan peningkatan ketara dalam rintangan kakisan seperti yang ditunjukkan oleh pengukuran melalui OCP yang lebih baik dan stabil untuk salutan dengan nisbah P:G 1:1. Oleh itu, Fosforena memainkan peranan penting dalam mengoptimumkan struktur salutan komposit yang seterusnya meningkatkan sifat fizikal dan prestasi perlindungannya. Kajian ini menekankan kepentingan komposisi yang dioptimumkan terutamanya peranan Fosforena dalam membangunkan salutan berasaskan Grafena-PANi berprestasi tinggi untuk perlindungan kakisan keluli lembut.

Rujukan

- Amin, H.M.A., & Galal, A. (Eds.). (2021). *Corrosion Protection of Metals and Alloys Using Graphene and Biopolymer Based Nanocomposites* (1st ed.). CRC Press.
- Batmunkh, M., Bat, Erdene, M., & Shapter, J. G. (2016). Phosphorene and Phosphorene, Based Materials, Prospects for future applications. *Advanced Materials*, 28(39), 8586–8617.
- Cho, K., Yang, J., & Lu, Y. (2017). *Phosphorene: An emerging 2D material*. *Journal of Materials Research*, 32(15), 2839–2847.
- Deyab, M. A., Mele, G., Bloise, E., & Mohsen, Q. (2021). Novel nanocomposites of Ni-Pc/polyaniline for the corrosion safety of the aluminum current collector in the Li-ion battery electrolyte. *Scientific Reports*, 11(1).
- Kim, S., Le, TH., Park, C.S. et al. (2017). A Solution-Processable, Nanostructured, and Conductive Graphene/Polyaniline Hybrid Coating for Metal-Corrosion Protection and Monitoring. *Sci Rep* 7, 15184.
- Mahato, N., & Cho, M. H. (2016). Graphene integrated polyaniline nanostructured composite coating for protecting steels from corrosion: Synthesis, characterization, and protection mechanism of the coating material in acidic environment. *Construction & Building Materials*, 115, 618–633.
- Ollik, K., & Lieder, M. (2020). Review of the application of Graphene-Based Coatings as Anticorrosion Layers. *Coatings*, 10(9), 883.
- Putri, N. P., Suaebah, E., Islami, D. N., Rohmawati, L., Kusumawati, D. H., Fitriana, F., & Supardi,
- Sathiyanarayanan, S., Muthukrishnan, S., Venkatachari, G., & Trivedi, D. (2005). Corrosion protection of steel by polyaniline (PANI) pigmented paint coating. *Progress in Organic Coatings*, 53(4), 297–301.

- Sultana, N., Degg, A., Upadhyaya, S., Nilges, T., & Sarma, N. S. (2022). Synthesis, modification, and application of black phosphorus, few-layer black phosphorus (FLBP), and phosphorene: a detailed review. *Materials Advances*, 3(14), 5557–5574.
- Zang, X., Li, P., Chen, Q., Wang, K., Wei, J., Wu, D., & Zhu, H. (2014). Evaluation of layer-by-layer graphene structures as supercapacitor electrode materials. *Journal of Applied Physics*, 115(2).
- Z. a. I. (2024). Synthesis and characterization of PVA/PANI nanofiber as active material for humidity sensors. *Trends in Sciences*, 21(6), 7551.
- Zhang, R., Yu, X., Yang, Q., Cui, G., & Li, Z. (2021). The role of graphene in anti- corrosion coatings: A review. *Construction and Building Materials*, 294, 123613.