

Nanokomposit ZIF-8 Berasaskan Titik Kuantum Karbon Terdop Nitrogen daripada Biojisim sebagai Bahan Penghasilan Elektrod Superkapasitor

(ZIF-8 Nanocomposite Based on Nitrogen-Doped Carbon Quantum Dots from Biomass as a Material for the Production of Supercapacitor Electrodes)

NUR IRDINA ATASYA A.H., SITI AISYAH SHAMSUDIN* & NURFATIEAH MOHAMED IDRIS

Jabatan Fizik Gunaan, Fakulti Sains dan Teknologi, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia

Diserahkan: 4 Mei 2026/Diterima: 18 Ogos 2026

ABSTRAK

Kecapaian peranti penyimpanan tenaga, khususnya superkapasitor amat bergantung kepada sifat bahan aktif elektrod. ZIF-8 sebagai kerangka logam-organik (KLO) mempunyai luas permukaan khusus yang tinggi, namun kekonduksian elektrik intrinsiknya yang rendah mengehadkan prestasi elektrokimia. Kajian ini mensintesis nanokomposit ZIF-8/TKK dan ZIF-8/N-TKK melalui penghibridan titik kuantum karbon (TKK) dan titik kuantum karbon terdop nitrogen (N-TKK) daripada biojisim kulit pisang dengan ZIF-8 bagi menilai kesan pendopan nitrogen terhadap sifat bahan dan prestasi elektrokimia. TTK dan N-TKK disediakan secara hidroterma dan dihibridkan dengan ZIF-8 melalui pencampuran larutan. Analisis spektroskopi transformasi Fourier inframerah (FTIR), spektroskopi resonans magnet nuklear proton ($^1\text{H-NMR}$) dan pembelauan sinar-X (XRD) menunjukkan bahawa ciri kimia dan fasa kristal ZIF-8 tidak mengalami perubahan ketara selepas penghibridan dengan N-TKK. ZIF-8/N-TKK menunjukkan peningkatan luas permukaan khusus kepada $2067.28 \text{ m}^2/\text{g}$ berbanding ZIF-8 ($1825.32 \text{ m}^2/\text{g}$), manakala ZIF-8/TKK menurun kepada $1650.10 \text{ m}^2/\text{g}$ akibat pengagregatan. Penghibridan N-TKK turut menghasilkan rintangan setara siri yang lebih rendah (1.74Ω) berbanding ZIF-8 (2.37Ω), di samping peningkatan tindak balas kapasitif dan penahanan kapasiti yang lebih tinggi (39.75%) berbanding ZIF-8 (31.41%). Peningkatan ini dikaitkan dengan sinergi antara struktur berliang ZIF-8 dan sifat konduktif serta tapak elektroaktif N-TKK yang memudahkan pemindahan elektron dan difusi ion. Keputusan ini menunjukkan potensi penghibridan N-TKK sebagai pendekatan mampan untuk meningkatkan prestasi elektrokimia ZIF-8 sebagai bahan elektrod superkapasitor.

Kata kunci: Biojisim kulit pisang; kerangka logam-organik; nanokomposit elektrod; prestasi elektrokimia; titik kuantum karbon terdop nitrogen

ABSTRACT

The performance of energy storage devices, particularly supercapacitors, strongly depends on the properties of electrode active materials. ZIF-8, a metal-organic framework (KLO), possesses a high specific surface area; however, its intrinsically low electrical conductivity limits its electrochemical performance. This study synthesized ZIF-8/TKK and ZIF-8/N-TKK nanocomposites by hybridizing carbon quantum dots (TKK) and nitrogen-doped carbon quantum dots (N-TKK) derived from banana peel biomass with ZIF-8 to investigate the effect of nitrogen doping on material properties and electrochemical performance. TTK and N-TKK were prepared hydrothermally and subsequently hybridized with ZIF-8 via solution mixing. Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), proton nuclear magnetic resonance spectroscopy ($^1\text{H-NMR}$) and X-ray diffraction (XRD) analyses indicated no significant changes in the chemical characteristics and crystalline phase of ZIF-8 after hybridization with N-TKK. ZIF-8/N-TKK exhibited an increased specific surface area of $2067.28 \text{ m}^2/\text{g}$ compared with ZIF-8 ($1825.32 \text{ m}^2/\text{g}$), whereas ZIF-8/TKK decreased to $1650.10 \text{ m}^2/\text{g}$ due to particle aggregation. N-TKK hybridization also resulted in a lower equivalent series resistance (1.74Ω) than ZIF-8 (2.37Ω), together with an enhanced capacitive response and higher capacitance retention (39.75%) than ZIF-8 (31.41%). The enhanced performance is attributed to the synergy between the porous ZIF-8 structure and the conductive properties and electroactive sites of N-TKK, facilitating electron transfer and ion diffusion. These findings demonstrate the potential of N-TKK hybridization as a sustainable approach for enhancing the electrochemical performance of ZIF-8 as a supercapacitor electrode material.

Keywords: Banana peel biomass; electrochemical performance; metal-organic framework; nanocomposite electrode; nitrogen-doped carbon quantum dots

PENGENALAN

Dalam era peralihan tenaga global, pembangunan peranti penyimpanan tenaga berprestasi tinggi seperti superkapasitor semakin mendapat perhatian kerana keupayaannya memberikan ketumpatan kuasa tinggi, kestabilan kitaran yang baik serta masa pengecasan yang pantas. Prestasi superkapasitor amat bergantung kepada sifat intrinsik bahan elektrod, terutamanya luas permukaan khusus, porositi dan kekonduksian elektrik (Dash et al. 2026). Oleh itu, pemilihan serta pengubahsuaian bahan aktif elektrod yang sesuai merupakan faktor penting dalam meningkatkan kecekapan penyimpanan cas dan prestasi elektrokimia keseluruhan.

Dalam konteks ini, bahan tiga dimensi (3D) berasaskan kerangka logam-organik (MOF), khususnya ZIF-8 telah menarik perhatian meluas sebagai bahan aktif elektrod disebabkan oleh luas permukaan khususnya yang tinggi, struktur berliangnya tersusun secara berkala serta kestabilan kimia yang baik. Ciri ini menjadikan matriks ZIF-8 berpotensi untuk penyimpanan cas melalui mekanisme penjerapan ion (Behera, Priyadarshini & Parida 2025; Zheng et al. 2023). Namun demikian, kekonduksian elektrik intrinsiknya yang rendah merupakan kekangan utama yang menghadkan penggunaannya dalam aplikasi elektrokimia (Rabani et al. 2024).

Pelbagai integrasi telah diteroka, termasuklah penggabungan ZIF-8 dengan bahan karbon konduktif seperti grafena dan nanotub karbon (Balakrishnan, Ang & Mahmoudi 2024; Zheng et al. 2022). Pendekatan ini berupaya meningkatkan prestasi elektrokimia melalui pengaliran elektron yang lebih cekap serta pengurangan rintangan dalaman. Walau bagaimanapun, penggunaan bahan karbon konvensional ini sering melibatkan kos sintesis yang tinggi serta penggunaan bahan kimia yang kurang mesra alam (Gowtham et al. 2026).

Sehubungan itu, perhatian telah beralih kepada bahan karbon berskala nano yang lebih mampan, khususnya titik kuantum karbon (TKK). TKK merupakan bahan karbon berdimensi sifar (0D) yang mempunyai luas permukaan tinggi, kestabilan kimia yang baik serta kebolehan untuk diubah suai melalui pengubahsuaian permukaan. Penghasilan TKK daripada sumber biojisim seperti kulit pisang menawarkan kelebihan dari segi kos yang rendah, kelestarian sumber serta sifat mesra alam (Biswal & Balasubramanian 2026). Walau bagaimanapun, TKK sering mengalami pengagregatan zarah dan mempunyai laluan pengangkutan ion yang terhad, sekali gus menjejaskan prestasi elektrokimia (Liu, Feng & Zhu 2025).

Pendopan heteroatom, khususnya nitrogen, telah dikenal pasti sebagai strategi berkesan untuk meningkatkan sifat elektrokimia bahan karbon. Titik kuantum karbon terdop nitrogen (N-TKK) bukan sahaja memperkenalkan tapak aktif tambahan, malah meningkatkan kekonduksian elektrik serta kebolehasan permukaan. Selain itu, kehadiran atom nitrogen turut menyumbang kepada pembentukan laluan pengangkutan ion yang lebih cekap,

sekali gus mengurangkan kesan pengagregatan dan meningkatkan kebolehcapaian elektrolit (Mohammed et al. 2025).

Oleh itu, integrasi TKK dan N-TKK kepada ZIF-8 berpotensi menghasilkan nanokomposit dengan sifat sinergistik antara struktur berliang dan sifat konduktif bahan karbon. Struktur berliang ZIF-8 bertindak sebagai rangka sokongan yang membantu meningkatkan penyebaran bahan karbon, manakala N-TKK menyumbang kepada peningkatan kekonduksian elektrik serta laluan pengangkutan ion (Guo et al. 2023). Sinergi ini berpotensi menghasilkan bahan elektrod dengan struktur porositi yang lebih optimum, penyebaran zarah yang lebih homogen serta prestasi elektrokimia yang dipertingkatkan.

Berdasarkan rasional tersebut, kajian ini bertujuan untuk mensintesis nanokomposit ZIF-8/TKK dan ZIF-8/N-TKK melalui penghibridan titik kuantum karbon berasaskan biojisim kulit pisang dengan ZIF-8 serta menilai kesan pendopan nitrogen terhadap sifat kimia, porositi dan morfologi nanokomposit yang dihasilkan. Prestasi elektrokimia elektrod ZIF-8/N-TKK turut dinilai bagi menjelaskan peranan N-TKK dalam meningkatkan kekonduksian elektrik, pemindahan cas dan difusi ion, sekali gus menilai potensinya sebagai bahan elektrod superkapasitor yang mampan.

BAHAN DAN KAEDAH

BAHAN

Kulit pisang dikumpul dan digunakan sebagai sumber karbon untuk sintesis titik kuantum karbon (TKK) dan titik kuantum karbon terdop nitrogen (N-TKK). Etilenediamina (EDA) ($C_2H_8N_2$, Sigma-Aldrich, Malaysia) berfungsi sebagai sumber nitrogen bagi penghasilan N-TKK. ZIF-8 (Zn-KLO) diperolehi daripada Sigma-Aldrich (Malaysia). Karbon teraktif dan karbon hitam (Alfa Aesar) digunakan sebagai bahan tambahan konduktif. Polivinilidena fluorida (PVDF) dan N-metil-2-pirolidon (NMP) masing-masing digunakan sebagai bahan pengikat dan pelarut dalam penyediaan sluri elektrod.

KAEDAH KAJIAN

PENYEDIAAN PREKURSOR KARBON

Kulit pisang (*Musa acuminata* Colla) yang telah dikumpulkan dipotong kepada saiz yang lebih kecil sebelum dikeringkan di dalam ketuhar pada suhu 70 °C selama 24 jam. Selepas proses pengeringan, kulit pisang bertukar menjadi keras, rapuh dan berwarna coklat gelap. Kulit pisang kering kemudiannya dikisar menggunakan pengisar elektrik sehingga menjadi serbuk halus. Serbuk yang terhasil diayak menggunakan ayak bersaiz 106 µm bagi memperoleh serbuk prekursor karbon yang seragam untuk digunakan dalam sintesis seterusnya.

PENYEDIAAN TITIK KUANTUM KARBON (TKK) DAN TITIK KUANTUM KARBON TERDOP NITROGEN (N-TKK)

TKK dan N-TKK disintesis menggunakan kaedah hidroterma yang telah dilaporkan oleh Nur Irdina Atasya et al. (2026), seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1(a). Sebanyak 0.06 g prekursor karbon daripada kulit pisang dilarutkan dalam 80 mL air ternyahion. Bagi sintesis N-TKK, sebanyak 1 mL etilenediamina (EDA) (0.90 g) ditambah ke dalam larutan sebagai sumber nitrogen, bersamaan dengan nisbah jisim EDA kepada prekursor karbon sebanyak 15:1. Larutan tersebut dimasukkan ke dalam autoklaf berlapis Teflon dan dipanaskan pada suhu 200 °C selama 24 jam, kemudian ditapis menggunakan penapis picagari membran 0.22 µm untuk mendapatkan produk akhir. Prosedur yang sama digunakan untuk penyediaan TKK tanpa penambahan EDA.

PENYEDIAAN NANOKOMPOSIT HIBRID ZIF-8/TKK DAN ZIF-8/N-TKK

Nanokomposit ZIF-8/TKK dan ZIF-8/N-TKK disediakan melalui kaedah pencampuran larutan seperti dalam Rajah 1(b). Sebanyak 0.2 g ZIF-8 dicampurkan dengan 40 mL larutan TKK atau N-TKK ($\sim 0.75 \text{ mg mL}^{-1}$, $\approx 0.075 \text{ wt\%}$), lalu dikacau selama 24 jam. Selepas

proses penghibridan, endapan nanokomposit yang terbentuk diasingkan menggunakan kertas turas, lalu dibasuh menggunakan air ternyahion dan aseton bagi menyingkirkan TKK atau N-TKK yang tidak terhibrid serta bendasing yang masih berbaki. Endapan kemudiannya dikeringkan pada suhu 60 °C selama 24 jam sebelum digunakan untuk pencirian dan fabrikasi elektrod.

FABRIKASI ELEKTROD

Proses fabrikasi elektrod ditunjukkan secara ringkas dalam Rajah 1(c). Dua jenis elektrod telah disediakan, iaitu elektrod positif berasaskan ZIF-8 atau nanokomposit ZIF-8/N-TKK serta elektrod negatif berasaskan karbon teraktif (AC). Sluri elektrod positif disediakan menggunakan ZIF-8 atau nanokomposit ZIF-8/N-TKK sebagai bahan aktif, karbon hitam (CB) sebagai bahan pengalir dan poli(vinilidena fluorida) (PVDF) sebagai bahan pengikat dalam pelarut *N*-metil-2-pirolidon (NMP) pada nisbah pecahan jisim 75:15:10 bt%. Bagi elektrod negatif, sluri disediakan menggunakan komposisi yang sama dengan AC sebagai bahan aktif. Sluri kemudiannya disalut pada buih nikel bersaiz 1.0 cm × 1.5 cm dengan jisim pemuatan bahan aktif kira-kira 6 mg cm⁻², sebelum dikeringkan dalam ketuhar pada suhu 60 °C selama 24 jam.



RAJAH 1. Penyediaan (a) sintesis TKK dan N-TKK daripada biojisim kulit pisang melalui kaedah hidroterma, (b) penghasilan nanokomposit ZIF-8/TKK dan ZIF-8/N-TKK melalui kaedah pencampuran larutan dan (c) fabrikasi elektrod positif menggunakan nanokomposit sebagai bahan aktif

PENCIRIAN

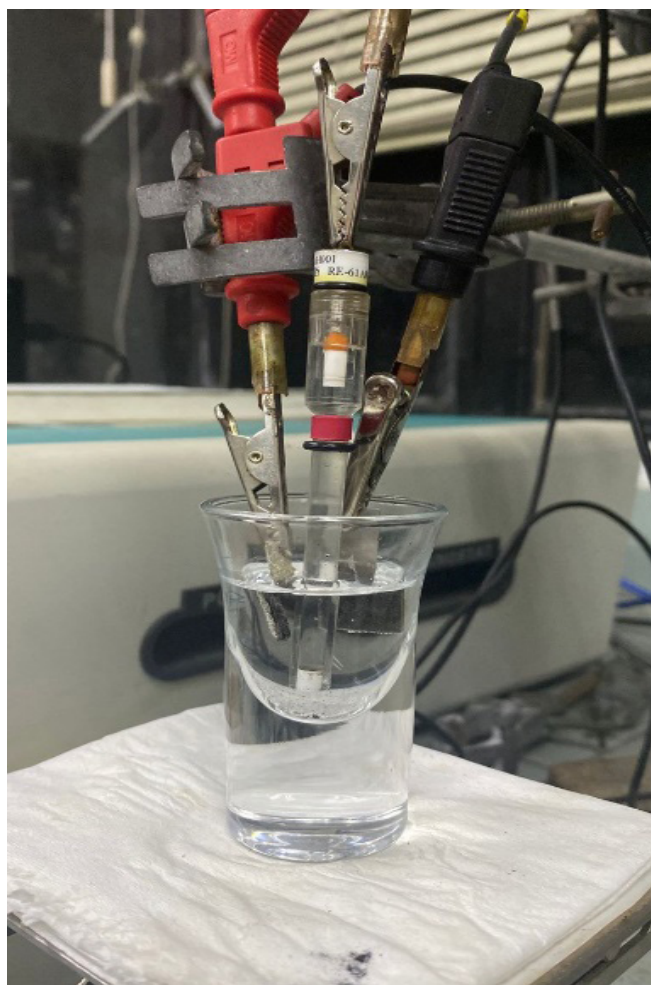
Sifat kimia, luas permukaan dan porositi, morfologi serta prestasi elektrokimia elektrod berasaskan nanokomposit telah dianalisis menggunakan beberapa teknik pencirian. Interaksi kimia telah dikenal pasti melalui spektroskopi inframerah transformasi Fourier (FTIR) dan spektroskopi resonans magnet nuklear proton keadaan cecair ($^1\text{H-NMR}$) menggunakan dimetil sulfoksida terdeuterium (DMSO-d_6) sebagai pelarut. Morfologi permukaan diperhatikan menggunakan mikroskopi elektron pancaran medan (FESEM), manakala luas permukaan khusus dan ciri porositi telah ditentukan melalui analisis Brunauer–Emmett–Teller (BET), manakala struktur kristal dianalisis menggunakan pembelauan sinar-X (XRD). Prestasi elektrokimia menggunakan sistem tiga elektrod seperti Rajah 2 pula telah dinilai menggunakan spektroskopi impedans elektrokimia (EIS), voltametri kitaran (CV) dan pengecasan–nyahcas galvanostatik (GCD).

HASIL DAN PERBINCANGAN

ANALISIS SIFAT KIMIA

Rajah 3(a) menunjukkan spektrum FTIR bagi ZIF-8, nanokomposit ZIF-8/TKK dan ZIF-8/N-TKK dalam julat $3500\text{--}500\text{ cm}^{-1}$ bagi mengenal pasti kumpulan berfungsi dan perubahan kimia selepas penghibridan. Bagi ZIF-8, beberapa puncak dapat diperhatikan termasuk pada 760 cm^{-1} yang dikaitkan dengan getaran C-H cincin aromatik imidazol, 1145 cm^{-1} yang mewakili regangan C-N dan 1581 cm^{-1} yang dikaitkan dengan regangan C=N dalam cincin imidazol. Selepas penghibridan dengan TKK atau N-TKK, nanokomposit ZIF-8/TKK dan ZIF-8/N-TKK menunjukkan semua puncak ciri ZIF-8 tanpa puncak baharu dan sebarang peralihan yang ketara (Sharma & Chand 2022).

Spektrum $^1\text{H NMR}$ (Rajah 3(b)) digunakan untuk mengenal pasti persekitaran kimia ligan dalam nanokomposit yang dihasilkan. ZIF-8 menunjukkan



RAJAH 2. Konfigurasi sistem tiga elektrod bagi pengukuran elektrokimia yang terdiri daripada elektrod kerja, elektrod rujukan dan elektrod lawan dalam larutan elektrolit 1M KOH

dua puncak resonans utama pada sekitar δ 6.9 ppm dan 2.2-2.5 ppm, masing-masing dikaitkan dengan proton aromatik cincin imidazol dan proton metil ($-\text{CH}_3$) daripada ligan 2-metylimidazol. Kehadiran puncak resonans yang sepadan dengan ligan 2-metylimidazol dalam kedua-dua nanokomposit turut menunjukkan bahawa persekitaran kimia ligan ZIF-8 masih dikekalkan selepas proses penghibridan (Rastogi et al. 2024).

ANALISIS POROSITI

Rajah 4 menunjukkan isoterma penjerapan-nyahjerapan nitrogen pada 77 K serta luas permukaan BET bagi ZIF-8, nanokomposit ZIF-8/TKK dan ZIF-8/N-TKK. Berdasarkan pengelasan IUPAC, kesemua sampel menunjukkan isoterma Jenis I: mikroporos. ZIF-8 mencatatkan luas permukaan khusus yang tinggi, iaitu $1825.32 \text{ m}^2/\text{g}$. Selepas penghibridan dengan TKK, nilai ini menurun kepada $1650.10 \text{ m}^2/\text{g}$ akibat pengagregatan zarah TKK yang menyekat sebahagian liang mikroporos ZIF-8 (Liu et al. 2023; Siva Kumar, Shamsudin & Ahmad Azian 2024). Sebaliknya, nanokomposit ZIF-8/N-TKK menunjukkan peningkatan luas permukaan kepada $2067.28 \text{ m}^2/\text{g}$. Peningkatan ini dikaitkan dengan saiz zarah N-TKK yang lebih kecil berbanding TKK (Nur Irdina Atasya et al. 2026; Siva Kumar, Shamsudin & Ahmad Azian 2024), sekali gus menghasilkan penyebaran yang lebih seragam pada permukaan ZIF-8 tanpa penyumbatan liang yang ketara. Ciri luas permukaan dan porositi yang lebih tinggi membolehkan elektrod menyediakan lebih banyak tapak aktif untuk penyimpanan cas. Hal ini sekali gus meningkatkan kebolehcapaian elektrolit ke dalam liang serta memendekkan laluan resapan ion (Rabani et al. 2024).

ANALISIS STRUKTUR KRISTAL

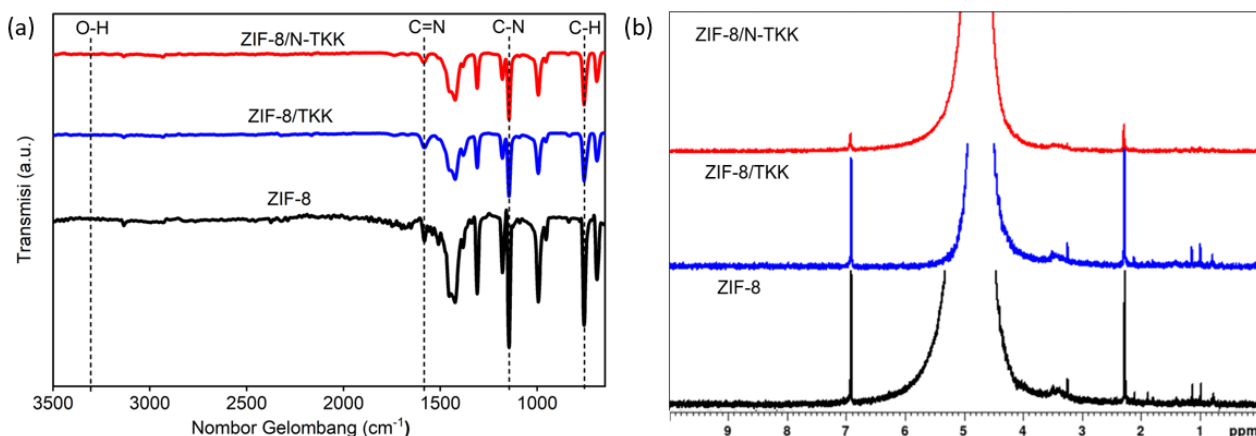
Corak XRD bagi ZIF-8 dan ZIF-8/N-TKK ditunjukkan dalam Rajah 5 bagi menilai fasa kristal ZIF-8 selepas

penghibridan dengan N-TKK. ZIF-8 menunjukkan puncak pembelauan utama pada $2\theta = 7.30^\circ, 10.35^\circ, 12.70^\circ$ dan 17.87° , yang masing-masing diindeks kepada satah (110), (200), (211) dan (222). Kedudukan puncak utama tersebut masih dikekalkan selepas penghibridan dengan N-TKK tanpa kemunculan fasa kristal baharu. Pengkelan corak pembelauan ini menunjukkan bahawa penghibridan N-TKK tidak menyebabkan perubahan ketara terhadap fasa kristal ZIF-8, selaras dengan pemerhatian yang dilaporkan bagi nanokomposit KLO jenis UiO-66/N-CQDs (Nur Irdina Atasya et al. 2026).

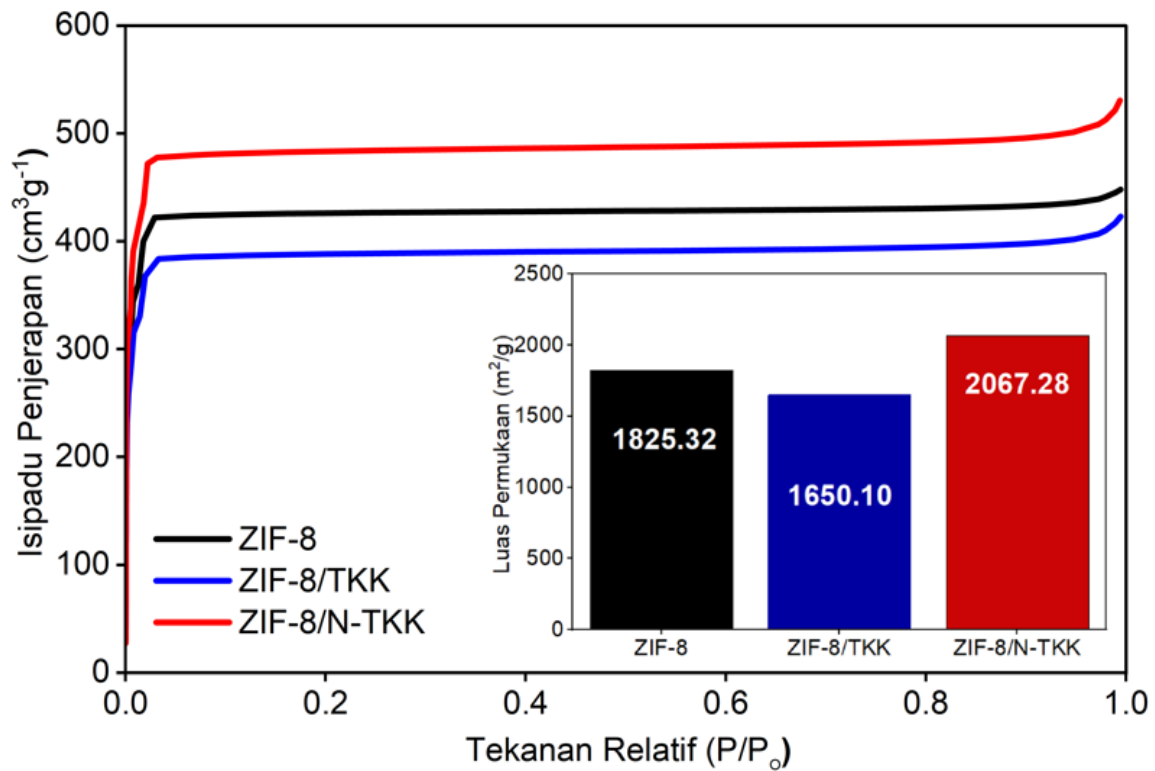
ANALISIS MORFOLOGI PERMUKAAN

Rajah 6 menunjukkan imej FESEM dan analisis EDX bagi ZIF-8 dan nanokomposit ZIF-8/N-TKK untuk mengenal pasti morfologi permukaan serta komposisi unsur. Berdasarkan imej FESEM (Rajah 6(a)), ZIF-8 menunjukkan morfologi hablur berbentuk kubik dengan permukaan yang licin dan tersusun, selaras dengan struktur tipikal ZIF-8 (Lan et al. 2025). Selepas penghibridan dengan N-TKK (Rajah 6(b)), permukaan hablur menjadi lebih kasar akibat kehadiran N-TKK pada permukaan ZIF-8. Perubahan morfologi ini menunjukkan bahawa proses penghibridan telah mengubah ciri permukaan ZIF-8 tanpa menjejaskan morfologi hablurnya. Permukaan yang lebih kasar dapat meningkatkan sentuhan antara bahan aktif dan elektrolit serta menyediakan laluan penghantaran cas yang lebih berkesan, lalu berpotensi menyumbang kepada penurunan rintangan dalaman dan peningkatan prestasi elektrokimia (Tanaka & Tanaka 2019).

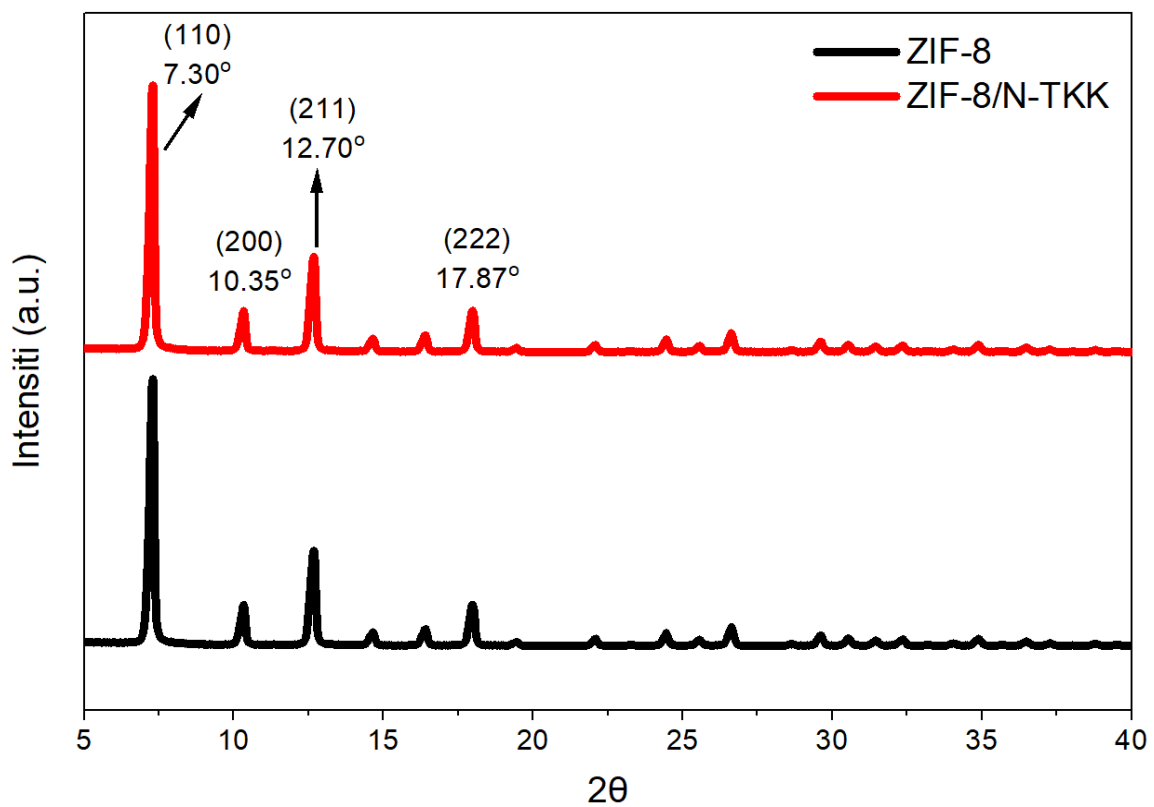
FESEM-EDX bagi ZIF-8 (Rajah 6(c)) menunjukkan kehadiran unsur karbon (C), nitrogen (N) dan zink (Zn) yang mencerminkan komposisi asas rangka logam-organik ZIF-8. Bagi nanokomposit ZIF-8/N-TKK (Rajah 6(d)), kandungan nitrogen meningkat daripada 4.28 bt% kepada 5.56 bt%, selaras dengan penghibridan N-TKK pada permukaan ZIF-8. Peningkatan kandungan



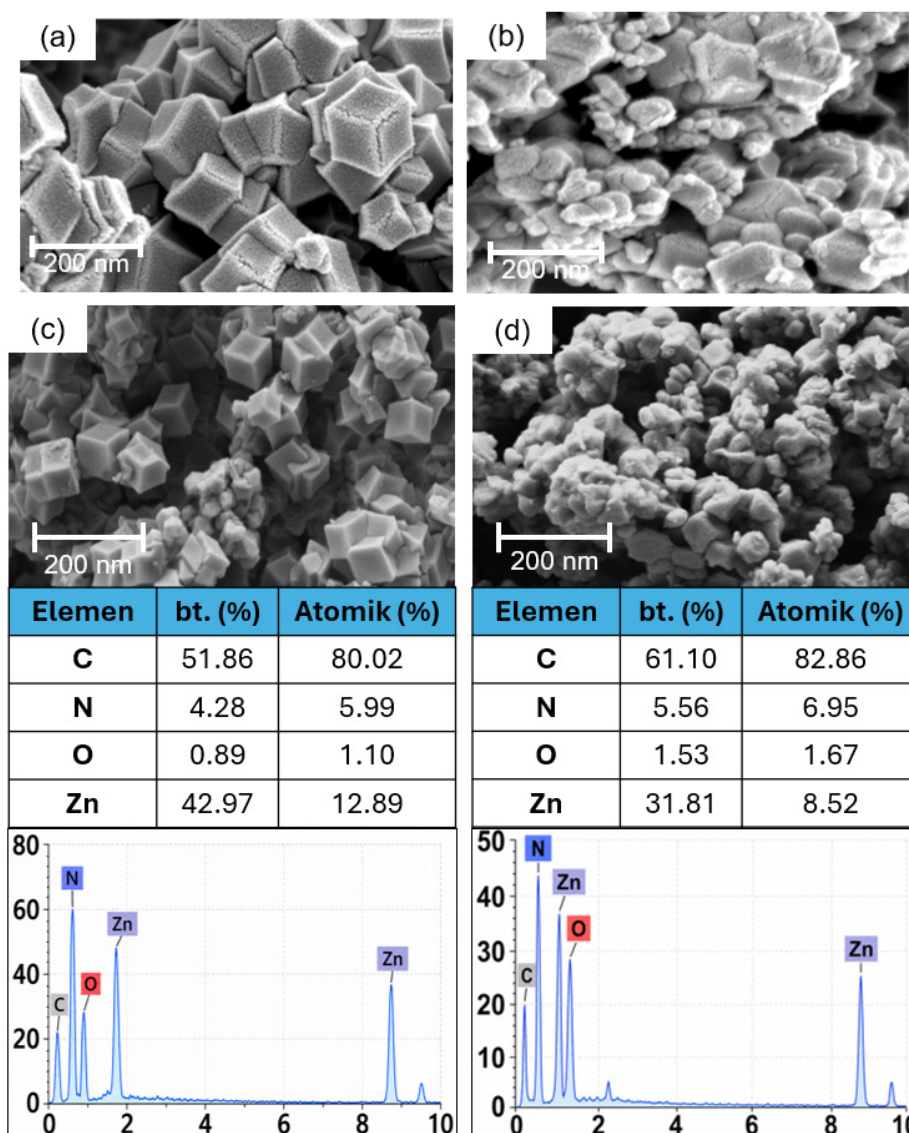
RAJAH 3. Spektrum (a) FTIR dalam julat $3500\text{--}650 \text{ cm}^{-1}$ dan (b) ^1H -NMR bagi ZIF-8, nanokomposit ZIF-8/TKK dan ZIF-8/N-TKK



RAJAH 4. Isoterma penjerapan-nyahjerapan nitrogen dan luas permukaan khusus BET bagi ZIF-8 dan nanokomposit berasaskan ZIF-8



RAJAH 5. Corak XRD bagi ZIF-8 dan ZIF-8/N-TKK



RAJAH 6. Imej FESEM bagi (a) ZIF-8, (b) ZIF-8/N-TKK serta analisis EDX bagi (c) ZIF-8 dan (d) ZIF-8/N-TKK

nitrogen ini berpotensi menyediakan lebih banyak tapak aktif dan meningkatkan kekonduksian elektrik, yang menyokong penambahbaikan prestasi elektrokimia nanokomposit.

ANALISIS SIFAT ELEKTROKIMIA

Sifat elektrokimia bagi elektrod ZIF-8 dan nanokomposit ZIF-8/N-TKK telah dijalankan menggunakan sistem tiga elektrod bagi meneliti mekanisme intrinsik penyimpanan cas. Plot Nyquist (Rajah 7(a)) menunjukkan perbezaan impedans antara elektrod ZIF-8 dan ZIF-8/N-TKK. Dalam spektrum ini, rintangan setara siri (ESR atau R_s) dikenal pasti sebagai pintasan lengkung pada paksi nyata (Z') di kawasan berfrekuensi tinggi. Seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 1, elektrod ZIF-8/N-TKK

menunjukkan nilai ESR yang lebih rendah (1.74Ω) berbanding ZIF-8 (2.37Ω), iaitu pengurangan sebanyak 26.6%. Nilai jumlah rintangan (R) turut menurun daripada 36.17Ω kepada 35.74Ω kerana berlakunya pengurangan rintangan dalaman dan penambahbaikan laluan penghantaran cas. Penambahbaikan ini dikaitkan dengan kehadiran kumpulan berfungsi yang mengandungi nitrogen seperti nitrogen piridin dan grafitik dalam N-TKK yang meningkatkan ketumpatan tapak aktif serta menyediakan laluan penghantaran elektron yang lebih berkesan. Di samping itu, saiz zarah N-TKK yang lebih kecil dan penyebarannya yang lebih seragam pada permukaan ZIF-8 telah mengurangkan pengagregatan dan memudahkan difusi ion elektrolit, selari dengan peningkatan luas permukaan tapak aktif berdasarkan analisis BET (Siva Kumar, Shamsudin &

Ahmad Azian 2024). Selain itu, cerun Warburg yang lebih curam bagi elektrod ZIF-8/N-TKK menunjukkan proses difusi ion yang lebih cekap, sekali gus menyokong peningkatan kinetik pemindahan cas dalam elektrod tersebut (Huang 2018).

Seterusnya, analisis voltametri kitaran (CV) dijalankan dalam julat voltan 0-0.7 V pada kadar imbasan 3 mV s⁻¹ bagi menilai mekanisme penyimpanan cas, kebolehbalian elektrokimia serta sifat kapasitif bahan elektrod ZIF-8 dan ZIF-8/N-TKK, seperti yang ditunjukkan pada Rajah 7(b). Kedua-dua elektrod menunjukkan ciri pseudokapasitan dengan puncak redoks yang jelas, menandakan penyimpanan cas berlaku melalui proses faradik (Kanthasamy et al. 2025). Luas lengkung CV yang lebih besar bagi elektrod ZIF-8/N-TKK menunjukkan kapasiti penyimpanan cas yang lebih tinggi. Peningkatan luas permukaan BET (13.3%) yang selari dengan pertambahan luas lengkung CV (19%) menunjukkan bahawa pertambahan porositi dan tapak elektroaktif meningkatkan kebolehcapaian elektrolit ke permukaan elektrod, sekali gus memudahkan penjerapan ion dan tindak balas redoks. Kehadiran kumpulan berfungsi yang mengandungi nitrogen turut meningkatkan kebolehbasaan permukaan elektrod, membolehkan penghijrahan ion OH⁻ ke tapak elektroaktif berlaku dengan lebih berkesan (Siva Kumar, Shamsudin & Ahmad Azian 2024).

Rajah 7(c) menunjukkan lengkung CV bagi elektrod ZIF-8/N-TKK pada kadar imbasan antara 3 hingga 50 mV s⁻¹. Anjakan puncak redoks dengan peningkatan kadar imbasan menunjukkan kewujudan rintangan kinetik, khususnya dalam proses difusi ion. Pada kadar imbasan yang lebih tinggi, masa interaksi antara elektrolit dan elektrod menjadi lebih singkat, sekali gus mengehadkan penembusan ion ke dalam liang elektrod. Pemerhatian ini menunjukkan bahawa proses penyimpanan cas pada kadar imbasan tinggi semakin dipengaruhi oleh kekangan kinetik resapan ion (Nur Irdina Atasya et al. 2026).

Rajah 7(d) pula menunjukkan profil cas-nyahcas galvanostatik (GCD) bagi kedua-dua elektrod pada ketumpatan arus 1.0 A g⁻¹ pada julat voltan 0-0.7 V. Lengkung yang diperoleh menunjukkan ciri faradik yang selaras dengan lengkung CV. Elektrod ZIF-8/N-TKK menunjukkan masa cas dan nyahcas yang

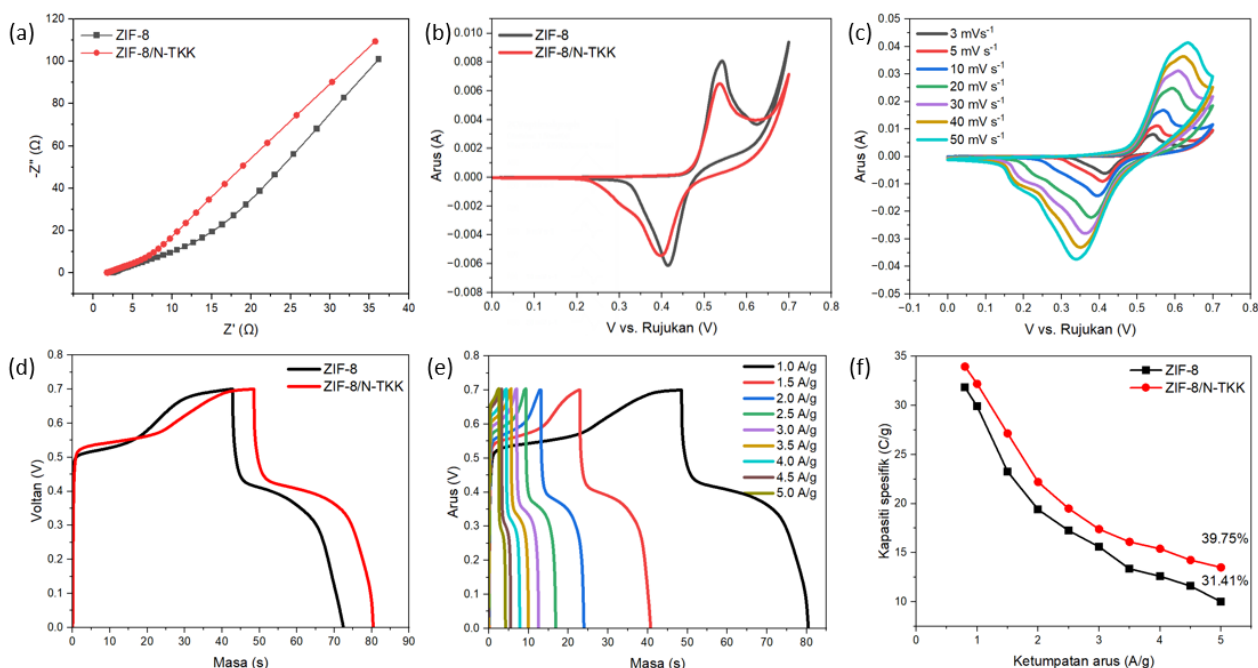
lebih panjang berbanding ZIF-8, menandakan kapasiti penyimpanan cas yang lebih tinggi. Di samping itu, nilai perbezaan voltan di antara hujung cas dan permulaan nyahcas (*iR drop*) yang lebih rendah bagi elektrod ZIF-8/N-TKK berbanding ZIF-8 adalah selaras dengan keputusan EIS yang menunjukkan penurunan nilai ESR. Keputusan ini mengesahkan bahawa penghibridan N-TKK mengurangkan rintangan dalaman dan meningkatkan kecekapan pemindahan cas semasa proses cas-nyahcas (Jiang et al. 2022).

Rajah 7(e) menunjukkan lengkung GCD bagi elektrod ZIF-8/N-TKK pada julat ketumpatan arus 1.0 hingga 5.0 A g⁻¹. Bentuk lengkung GCD yang kekal stabil walaupun pada ketumpatan arus yang lebih tinggi menggambarkan kebolehbalian elektrokimia yang baik serta kestabilan prestasi elektrod. Rajah 7(f) menunjukkan bahawa apabila ketumpatan arus meningkat, elektrod ZIF-8/N-TKK mengekalkan penahanan kapasiti yang lebih tinggi iaitu 39.75%, berbanding 31.41% bagi ZIF-8. Secara keseluruhannya, penghibridan N-TKK meningkatkan prestasi elektrokimia ZIF-8 melalui pengurangan rintangan dalaman, peningkatan kinetik pemindahan cas dan difusi ion, sekali gus menunjukkan potensinya sebagai bahan elektrod untuk aplikasi superkapasitor (Rasal et al. 2021).

Jadual 2 menunjukkan perbandingan kapasiti khusus elektrod ZIF-8 dan ZIF-8/N-TKK dengan beberapa elektrod berasaskan KLO yang telah dilaporkan sebelum ini. Elektrod ZIF-8/N-TKK menunjukkan kapasiti khusus sebanyak 34.85 C g⁻¹, lebih tinggi berbanding ZIF-8 tulen (30.51 C g⁻¹), Adenine-MOF (28.0 C g⁻¹) (Vanaraj et al. 2022) dan ZIF-67 (16.0 C g⁻¹) (Manavalan et al. 2025), serta menghampiri prestasi UiO-66 (39.0 C g⁻¹) (Nur Irdina Atasya et al. 2026). Walau bagaimanapun, Co-MOF (55.0 C g⁻¹) (Sarac, Yücer & Ciftci 2025) dan Fe-MOF (44.3 C g⁻¹) (Wu et al. 2022) mencatatkan kapasiti khusus yang lebih tinggi. Perbezaan prestasi ini berkemungkinan dipengaruhi oleh variasi komposisi bahan aktif, struktur liang, luas permukaan khusus, kaedah sintesis serta keadaan ujian elektrokimia. Secara keseluruhannya, penghibridan ZIF-8 dengan N-TKK yang disintesis daripada prekursor berasaskan biojisim berjaya meningkatkan prestasi elektrokimia ZIF-8.

JADUAL 1. Nilai parameter elektrokimia daripada analisis impedans (EIS) bagi elektrod ZIF-8 dan ZIF-8/N-TKK

Sel elektrod	ESR (Ω)	R (Ω)
ZIF-8	2.37	36.17
ZIF-8/N-TKK	1.74	35.74



RAJAH 7. (a) Plot Nyquist daripada analisis EIS, (b) lengkung voltametri kitaran (CV) pada kadar imbasan 3 mV s^{-1} bagi ZIF-8 dan ZIF-8/N-TKK, (c) lengkung CV bagi elektrod ZIF-8/N-TKK pada kadar imbasan $3\text{-}50 \text{ mV s}^{-1}$, (d) profil GCD bagi ZIF-8 dan ZIF-8/N-TKK pada ketumpatan arus 1.0 A g^{-1} , (e) lengkung GCD bagi ZIF-8/N-TKK pada julat ketumpatan arus $1.0\text{-}5.0 \text{ A g}^{-1}$ dan (f) kapasiti khusus bagi ZIF-8 dan ZIF-8/N-TKK

JADUAL 2. Perbandingan kapasiti khusus elektrod ZIF-8/N-TKK dengan beberapa elektrod berasaskan KLO

Bahan elektrod	Kapasiti spesifik (C/g)	Rujukan
Adenine-MOF	28	Vanaraj et al. (2022)
UiO-66	39	Nur Irdina Atasya et al. (2026)
Co-MOF	55	Sarac, Yücer & Ciftci (2025)
ZIF-67	16	Manavalan et al. (2025)
Fe-MOF	44.3	Wu et al. (2022)
ZIF-8	30.51	
ZIF-8/N-TKK	34.85	

KESIMPULAN

Penghibridan N-TKK mengekalkan ciri kimia dan fasa kristal ZIF-8, di samping meningkatkan luas permukaan khusus dan menghasilkan morfologi permukaan yang lebih sesuai untuk kebolehcapaian elektrolit. Ciri tersebut menyumbang kepada pemindahan cas dan difusi ion yang lebih baik, sekali gus meningkatkan prestasi elektrokimia elektrod ZIF-8/N-TKK berbanding ZIF-8 tulen. Keputusan ini menunjukkan potensi penghibridan N-TKK sebagai pendekatan mampan

untuk membangunkan bahan elektrod bagi aplikasi superkapasitor.

PENGHARGAAN

Kami mengucapkan terima kasih kepada Universiti Kebangsaan Malaysia atas sokongan teknikal yang diberikan. Kajian ini dibiayai oleh Kementerian Pengajian Tinggi Malaysia melalui geran FRGS/1/2024/STG05/UKM/02/7 serta Geran Universiti Penyelidikan (GUP-2022-045).

RUJUKAN

- Balakrishnan, T., Ang, W.L. & Mahmoudi, E. 2024. Highly sensitive fluorescent nitrobenzene gas sensing by nitrogen-doped graphene quantum dots embedded in ZIF-8 nanocomposite. *Materials Science and Engineering: B* 304: 117377.
- Behera, D., Priyadarshini, P. & Parida, K. 2025. ZIF-8 metal-organic frameworks and their hybrid materials: emerging photocatalysts for energy and environmental applications. *Dalton Transactions* 54(7): 2681-2708.
- Biswal, B.K. & Balasubramanian, R. 2026. Biomass-derived carbon as sustainable materials for application in clean energy storage technologies: Progress and outlook. *Carbon* 246: 120931.
- Dash, S.R., Yadav, M.S., Sahoo, R.K. & Sharma, A.L. 2026. Recent advances in supercapacitor electrode materials based on MOF-derived transition metal sulfides. *Applied Energy* 408: 127349.
- Gowtham, M., Gayathri, V., Pratheeb, N.P., Prabha, D., Elango, M., Lin, X. & Sangaraju, S. 2026. Progress and challenges in carbon nanomaterial-based supercapacitors: Towards sustainable high-energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 235: 116930.
- Guo, C., Li, G., Wu, Y., Wang, X., Niu, Y. & Wu, J. 2023. P-doped modified porous carbon derived from ZIF-8 for enhanced capacitive performance. *Energies* 16(21): 7232.
- Huang, J. 2018. Diffusion impedance of electroactive materials, electrolytic solutions and porous electrodes: Warburg impedance and beyond. *Electrochimica Acta* 281: 170-188.
- Jiang, Z., Guan, L., Xu, X., Wang, E. & Wang, C. 2022. Applications of carbon dots in electrochemical energy storage. *ACS Applied Electronic Materials* 4(11): 5144-5164.
- Kanthasamy, S., Doulassiramane, T., Padmanaban, R. & Thangavelu, S. 2025. Controlled reversible redox behavior at zeolitic imidazolate framework-8 coupled iron-metal organic framework for high-performance planar hybrid capacitor. *Energy & Fuels* 39(48): 22806-22818.
- Lan, T., Ding, X., Xiao, S., Yuan, Z., Yan, T., Chen, Q., Li, T. & Zheng, W. 2025. Adsorption behavior and structural transformation mechanism of ZIF-8 material on iodine vapor with varying particle sizes. *Discover Applied Sciences* 7: 728.
- Liu, Q., Gao, X., Liu, Z., Gai, L., Yue, Y. & Ma, H. 2023. Sensitive and selective electrochemical detection of lead(II) based on waste-biomass-derived carbon quantum dots@zeolitic imidazolate framework-8. *Materials* 16(9): 3378.
- Liu, Y., Feng, S. & Zhu, Q. 2025. The effect of CQDs' particle size on its fluorescence behavior and Cu²⁺ detection. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 341: 126408.
- Manavalan, V., Asif, S., Najdanovic-Visak, V. & Worrall, S.D. 2025. Green synthesis of zeolitic imidazolate framework-67 (ZIF-67) coatings for high-performance supercapacitors using bio-derived solvents. *Next Sustainability* 6: 100224.
- Mohammed, S.J., Mohammed, A.S., Abdalla, K.K., Hamad, D.S., Mustafa, F.S., Kader, D.A., Kayani, K.F., Abdalla, K.K., Ahmed, H.R. & Aziz, S.B. 2025. Advances in nitrogen-doped carbon dots for electrochemical energy storage: From synthesis to applications. *Materials Advances* 6(23): 8740-8773.
- Nur Irdina Atasya Abu Hassanisazin, Harivalagan Siva Kumar, Siti Aisyah Shamsudin, Fatin Saiha Omar & Manfo, T.A. 2026. Banana peel biomass-derived carbon and nitrogen-doped quantum dot/Uio-66 hybrid nanocomposites for high-performance asymmetric supercapacitors. *Journal of Power Sources* 691: 240975.
- Rabani, I., Lee, J.W., Lim, T., Truong, H.B., Nisar, S., Afzal, S. & Seo, Y.S. 2024. Construction of a uniform zeolitic imidazole framework (ZIF-8) nanocrystal through a wet chemical route towards supercapacitor application. *RSC Advances* 14(1): 118-130.
- Rasal, A.S., Yadav, S., Yadav, A., Kashale, A.A., Manjunatha, S.T., Altaee, A. & Chang, J.Y. 2021. Carbon quantum dots for energy applications: A review. *ACS Applied Nano Materials* 4(7): 6515-6541.
- Rastogi, P., Negi, P., Rawat, B.S., Joshi, N.C., Ahmad, W., Kumar, N. & Khatri, P.S. 2024. Optical and electrochemical analysis of nitrogen-doped carbon quantum dots from *Moosa balbeesiaana* peels for advanced supercapacitor applications. *Carbon Trends* 16: 100381.
- Sarac, B., Yücer, S. & Ciftci, F. 2025. MOF-based bioelectronic supercapacitors. *Small* 21(15): 2412846.
- Sharma, S. & Chand, P. 2022. Electrochemical behavior of solvothermally grown ZIF-8 as electrode material for supercapacitor applications. *Materials Today: Proceedings*. 76: 125-131.
- Siva Kumar, H., Shamsudin, S.A. & Ahmad Azian, M.N. 2024. Optimized nitrogen-doping of carbon quantum dots from banana peel waste: A highly selective Fe²⁺ sensor probe. *Diamond and Related Materials* 148: 111351.
- Tanaka, S. & Tanaka, Y. 2019. A simple step toward enhancing hydrothermal stability of ZIF-8. *ACS Omega* 4(22): 19905-19912.
- Vanaraj, R., Vinodh, R., Periyasamy, T., Madhappan, S., Babu, C.M., Asrafali, S.P., Haldhar, R., Jayprakash Raorane, C., Hwang, H., Kim, H.-J., Yi, M. & Kim, S.-C. 2022. Capacitance enhancement of metal-organic framework (MOF) materials by their morphology and structural formation. *Energy & Fuels* 36(9): 4978-4991.

- Wu, Y-F., Kuo, T-R., Lin, L-Y., Kubendhiran, S., Lai, K-C., Chen, T-Y. & Youghare, S. 2022. Investigating energy storage ability of MIL101-(Fe) derivatives prepared using successive carbonization and oxidation for supercapacitors. *Journal of Energy Storage* 55: 105420.
- Zheng, S.Q., Lim, S.S., Foo, C.Y., Haw, C.Y., Chiu, W.S., Chia, C.H. & Khiew, P.S. 2023. Solvothermal synthesis of nanostructured nickel-based metal-organic frameworks (Ni-MOFs) with enhanced electrochemical performance for symmetric supercapacitors. *Journal of Materials Science* 58(29): 11894-11913.
- Zheng, S.Q., Lim, S.S., Foo, C.Y., Haw, C.Y., Chiu, W.S., Chia, C.H. & Khiew, P.S. 2022. Probing the effect of solvents on the electrochemical performance of graphene incorporated nickel-based metal organic frameworks. *Journal of Electroanalytical Chemistry* 925: 116860.

*Pengarang untuk surat-menyurat; email: aisayah@ukm.edu.my