

Karbon Aktif Berbasis *Chitin* Turunan Kulit Udang Windu (*Penaeus Monodon*) dengan *Self-doping* Nitrogen-Oksigen untuk Material Superkapasitor

Activated Carbon Based on Chitin Derived from Tiger Shrimp Shell (*Penaeus Monodon*) with *Self-doping* Nitrogen-Oxygen for Supercapacitor Material

Received 19 Juny 2023

Accepted 23 August 2023

Published September 2023

Rakhmawati Farma^{1*}, Indira Valensia¹, Irma Apriyani¹, Awitdrus¹, Erman Taer¹

¹ Department of Physics, University of Riau, 28293 Simpang Baru, Riau, Indonesia

Abstrak.

Material karbon berbasis biopolimer *chitin* yang tersedia secara alami mendapat perhatian yang substansial sebagai sumber karbon berpori untuk elektroda sel superkapasitor. Fokus utama pada penelitian ini adalah pada karbon berpori berasal dari biopolimer *Chitin* berbasis cangkang udang dengan *doping* heteroatom beserta komposisinya dalam aplikasi sel superkapasitor. Tahap pembuatan elektroda karbon melalui proses pra-karbonisasi, aktivasi kimia KOH 0, 0,3 dan 0,5 M, karbonisasi-aktivasi fisika masing-masing dialiri gas N₂ dan CO₂. Selain itu, untuk menghadirkan permukaan hidrofobik dalam sistem larutan elektrolit yang dapat meningkatkan kinerja sel superkapasitor dapat dilakukan dengan pendopingan oksigen dan nitrogen secara internal. Elektroda karbon yang dihasilkan dikarakterisasi untuk menentukan sifat fisiknya seperti karakterisasi XRD dan FTIR. Analisis sifat elektrokimia sel superkapasitor untuk menentukan nilai kapasitansi spesifik dengan menggunakan metode CV dan GCD. Elektroda yang dihasilkan menunjukkan puncak landai dan beberapa puncak tajam yang mengindikasikan struktur mikrokristalin serta gugus fungsi yang mengandung oksigen dan nitrogen dengan nilai kapasitansi spesifik tertinggi sebesar 227 F/g pada laju pemindaian 1 mV/s di dalam larutan H₂SO₄ 1 M. Studi ini memaparkan strategi yang efektif untuk pengembangan superkapasitor berkinerja tinggi secara ekonomis dari limbah biomassa berbasis *chitin* yang bersifat terbarukan.

Abstract.

Naturally available chitin biopolymer-based carbon materials are receiving substantial attention as porous carbon sources for supercapacitor cell electrodes. The main focus of this research is on porous carbon derived from shrimp shell-based Chitin biopolymer with doping heteroatoms and their composites in supercapacitor cell applications. The steps for making carbon electrodes were through a process of pre-carbonization, chemical activation 0, 0.3 and 0.5 M KOH, carbonization-physical activation, each flowed with N₂ and CO₂ gas. In addition, to presenting a hydrophobic surface in the electrolyte solution system which can improve the performance of supercapacitor cells can be done by doping oxygen and nitrogen internally. The resulting carbon electrode is characterized to determine its physical properties such as XRD and FTIR characterization. Analysis of the electrochemical properties of supercapacitor cells to determine specific capacitance values using CV and GCD methods. The resulting electrode showed a sloping peak and several sharp peaks indicating a microcrystalline structure and functional groups containing oxygen and nitrogen with the highest specific capacitance value of 227 F/g at a scan rate of 1 mV/s in 1 M H₂SO₄ solution. This study describes an effective strategy for the economic development of high-performance supercapacitors from chitin-based biomass waste which is renewable.

Keywords: Shrimp Shell, activated carbon, KOH activation, self-doping, supercapacitor.

Pendahuluan

Konsumsi energi saat ini sebagian besar bergantung pada bahan bakar fosil yang tidak dapat diperbaharui (Wang *et al.*, 2020), dimana beberapa laporan menunjukkan bahwa ketergantungan pada bahan bakar fosil harus dikurangi setidaknya 80% untuk menghilangkan gas rumah kaca pada tahun 2050 (Rubio *et al.*, 2022). Pesatnya perkembangan ekonomi global, menipisnya bahan bakar fosil, dan meningkatnya pencemaran lingkungan, menyebabkan kebutuhan mendesak akan sumber energi yang efisien, bersih, dan berkelanjutan, serta teknologi baru yang terkait dengan konversi dan penyimpanan energi (Sammed *et al.*, 2023). Solusi inovatif dan efektif sangat dibutuhkan untuk mengatasi dan memenuhi masalah lingkungan dan permintaan energi. Para peneliti tidak hanya berfokus

untuk menghasilkan energi terbarukan dari matahari, angin, pasang surut atau sumber daya panas bumi, tetapi juga mencoba mengembangkan teknologi penyimpanan energi yang murah, ramah lingkungan dan berkinerja tinggi (Molahalli *et al.*, 2023).

Superkapasitor telah dianggap sebagai salah satu sumber energi elektrokimia yang paling menjanjikan untuk penyimpanan energi dan perangkat konversi, karena rapat daya yang tinggi dan siklus hidup yang panjang (Shanmuga Priya, Divya dan Rajalakshmi, 2020). Superkapasitor memiliki empat komponen penyusun selnya antara lain; elektroda, elektrolit, pemisah, dan pengumpul arus, dimana kontributor utama terhadap kapasitas penyimpanan energi superkapasitor adalah material elektroda. Bahan karbon yang banyak digunakan sebagai elektroda antara lain: karbon

nanotube, karbon templet, graphene, dan karbon aktif berbasis biomassa (Khedulkar *et al.*, 2023).

Karbon aktif berbasis limbah biomassa memiliki keuntungan seperti sangat mudah didapat dan dapat mengurangi biaya produksi pembuatan superkapasitor, serta dapat memberikan efek yang positif jika terus dikembangkan, sehingga limbah yang biasanya tidak digunakan dan terbuang dapat di daur ulang menjadi perangkat penyimpan energi (Sammed *et al.*, 2023). Bahan karbon yang dapat diturunkan dari biomassa yaitu selulosa, lignin, alginat, pati, kitin dan kitosan (Lin, Wang and Shao, 2021).

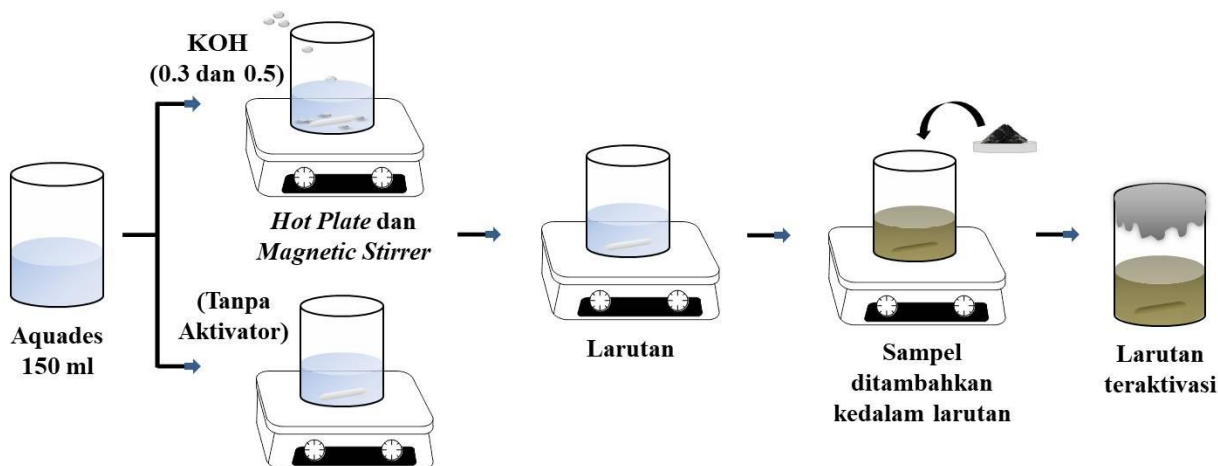
Kitin adalah polisakarida struktural seperti selulosa dan kitin merupakan biopolimer kedua paling melimpah setelah selulosa, sedangkan kitosan merupakan turunan dari kitin. Jumlah biosintesis tahunannya sekitar miliaran ton, yang hampir sama dengan produksi selulosa setiap tahunannya (Wang *et al.*, 2020). Kitin dan kitosan sangat basa, tidak seperti polisakarida alami lainnya yaitu selulosa yang bersifat asam (Xu *et al.*, 2021; Hidayat *et al.*, 2023). Kitin dapat ditemukan pada zygomycetes jamur, krustasea (seperti kulit udang dan kepiting), serangga, dan artropoda lainnya (Lin, Wang dan Shao, 2021). Cangkang krustasea merupakan salah satu sumber kitin yang pada dasarnya terdiri dari protein (30-40%), garam mineral (30-50%), kitin (13-42%), dan juga karotenoid sebagai pigmen. Budidaya dan pabrik pengolahan udang adalah industri makanan laut terbesar di dunia karena permintaan dan nilai pasarnya yang tinggi. Industri pengolahan udang menghasilkan 50–60% limbah dari volume tangkapan (Prakash *et al.*, 2020). Sebagian besar limbah udang sering dibuang di tempat pembuangan akhir atau laut, yang akan menyebabkan pencemaran lingkungan yang serius.

Penelitian ini dilakukan untuk pengembangan teknologi baru dalam pemanfaatan limbah kulit udang windu (*Penaeus Monodon*) dengan *self-doping* nitrogen. Cangkang udang tersusun atas nitrogen yang mengandung polisakarida dan dinamakan *chitin* (poly-

b(1/4)-N-acetyl-D-glucosamine), yang dapat digunakan sebagai prekursor karbon untuk menghasilkan *doping* nitrogen secara langsung dengan teknik pirolisis. Namun, karbon tersebut biasanya memiliki kapasitansi yang buruk ketika digunakan sebagai elektroda sel superkapasitor, karena porositasnya yang relatif rendah. Biasanya, aktivasi fisika atau kimia dari prekursor karbon dapat digunakan untuk meningkatkan porositas dan luas permukaan sehingga dapat menghasilkan performa yang baik pada elektroda sel superkapasitor. Disini, kami melaporkan karbon aktif berbasis *chitin* turunan kulit udang windu dengan pendopingan nitrogen untuk performansi elektroda sel superkapasitor yang tinggi (Lin, Wang dan Shao, 2021).

Metedologi Penelitian

Pembuatan elektroda karbon berbahan dasar kulit udang (KU) diawali dengan pengumpulan, pembersihan dan pengeringan sampel di bawah sinar matahari. Proses pra-karbonisasi pada suhu 250 °C selama 1 jam, kemudian dilakukan *ball milling* dan dihasilkan serbuk halus karbon. Selanjutnya serbuk tersebut dilakukan pengaktifan KOH 0, 0,3 dan 0,5 M di dalam aquades 150 mL dan dikonversi ke dalam bentuk padatan seperti koin. Pengaktifan KOH bertujuan untuk meningkatkan pembentukan porositas pada elektroda karbon. Padatan seperti koin yang terbentuk dilakukan proses karbonisasi menggunakan suhu 600 °C pada suasana N₂ dan aktivasi fisika secara terintegrasi menggunakan tabung *furnance* menggunakan suhu 800 °C pada suasana CO₂. Selanjutnya material karbon direndam dengan aquades hingga mencapai tingkat pH ~7 dan dikeringkan pada suhu 110 °C. Material karbon yang dihasilkan berdasarkan tanpa aktivasi dan aktivasi kimia diberi label KU, KU-03 dan KU-05. Gambar 1 menunjukkan skema proses aktivasi kimia tanpa dan dengan pengaktifan KOH 0, 0,3 dan 0,5 M.



Gambar 1. Ilustrasi skema proses aktivasi kimia

Karakterisasi material karbon

Spektroskopi *Fourier Transform Infrared* berfungsi untuk menentukan gugus fungsi sampel KU menggunakan instrumen IR Prestige-21 Shimadzu pada rentang bilangan gelombang 500-4500 cm^{-1} . *X-ray Diffraction* juga dilakukan untuk menganalisis struktur fase kristalografi dari sampel KU menggunakan instrumen XRD Shimadzu 700 pada sudut 2θ dalam rentang 10° - 60° .

Pengukuran elektrokimia

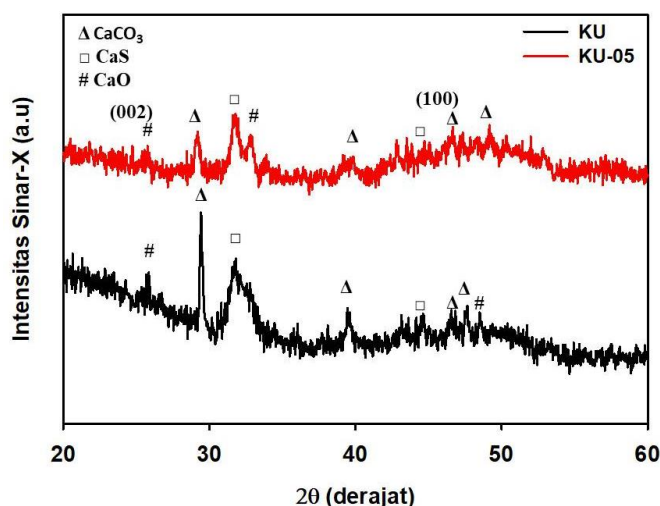
Konfigurasi dua elektroda simetris diterapkan pada rangkaian sel superkapsitor. Material karbon KU yang identik diberi larutan H_2SO_4 1 M dan dipisahkan oleh membran kulit telur ayam. Pada saat proses pengisian dan pengosongan muatan bilayer yang dihasilkan dikumpulkan pada stainless steel 316. Metode yang digunakan yaitu *Cyclic Voltammetry* (CV) dengan berbagai laju pemindaian dan *Galvanostatic Charge-Discharge* (GCD) berbagai rapat arus.

Hasil Penelitian

Analisis Struktur Mikro Elektroda Karbon

Struktur kristalografi dan mikro dari elektroda karbon diidentifikasi menggunakan pola difraksi sinar-X yang dihasilkan seperti terlihat pada Gambar 2. Kurva XRD dari bahan karbon berpori berbasis kitin turunan kulit udang menunjukkan puncak landai dan beberapa puncak tajam yang mengindikasikan struktur semikristalin di sekitar sudut 2θ 24° - 25° dan 45° masing-masing sesuai dengan bidang (002) dan (100), yang mengindikasikan struktur semikristalin (Wei et al., 2023). Pengaktifan KOH menyebabkan perubahan struktur kristalografi matriks karbon. Agen pengaktif KOH dapat menyebabkan peningkatan jumlah nanopori yang dapat meningkatkan ketidakteraturan atom karbon pada kisi karbon. Lebih lanjut puncak tajam rendah juga lemah juga dihasilkan, menunjukkan eksistensi senyawa kristal anorganik yang relatif kecil. Puncak difraksi dalam bidang karbon (002) menunjukkan adanya grafitisasi rendah, sedangkan bidang (100) merupakan bidang dengan intensitas rendah menunjukkan amorfisme berlimpah dalam padatan prekursor karbon.

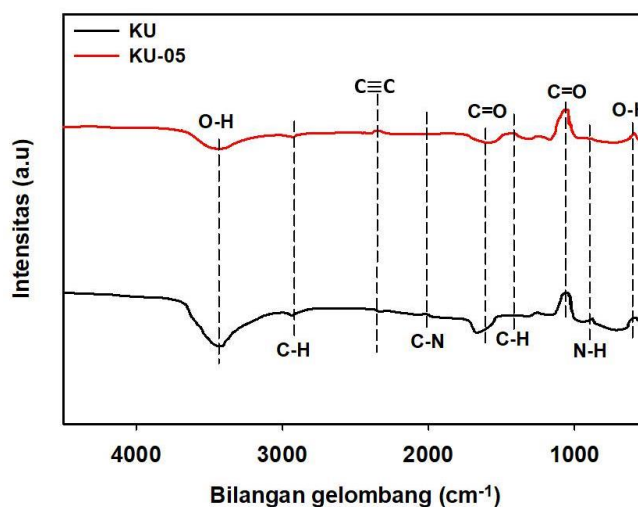
Gambar 2 juga menunjukkan elektroda karbon mengandung kalsit alami atau kalsium karbonat (CaCO_3), oldhamite atau kalsium sulfida (CaS), dan kalsium oksida (CaO) yang masing-masing diberi simbol “ Δ ”, “ $\square$ ”, “ $\#$ ”. Kalsium karbonat (CaCO_3) merupakan mineral penyusun kulit udang (Moussout et al., 2023). Kalsium karbonat (CaCO_3) dengan simbol “ Δ ” terdapat pada setiap elektroda di sekitar sudut $29,08^\circ$ - $29,51^\circ$ menunjukkan dekomposisi CaCO_3 disertai dengan pembentukan fase CaO (Wei et al., 2023b). Kalsium sulfida (CaS) dan kalsium oksida (CaO) merupakan senyawa kristal anorganik pada kulit udang. CaS dengan simbol “ $\square$ ” terdapat pada setiap elektroda di sekitar sudut $31,66^\circ$ - $31,83^\circ$.



Gambar 2. Pola Difraksi Sinar-X KU dan KU-05

Analisis Gugus Fungsi Elektroda Karbon

Gugus fungsi pada sampel diperoleh melalui analisis FTIR yang disajikan pada Gambar 3. KU dan KU-05 memiliki spektrum FTIR pada panjang bilangan gelombang yang sama, yang mengindikasikan semua sampel memiliki konstituen gugus fungsi yang sama. Peregangan OH seperti alkohol, phenol dan asam karboksilat ditandai dengan puncak lebar pada bilangan gelombang 3440 cm^{-1} (Kanjana et al., 2021). Vibrasi ulur ikatan C-H alifatik yaitu gugus metil terjadi pada bilangan gelombang 2917 cm^{-1} . Pita pada 2325 cm^{-1} adalah getaran regangan $\text{C}\equiv\text{C}$ dalam gugus alkuna, ikatan rangkap tiga menunjukkan kemurnian karbon yang dapat meningkatkan konduktivitas sifat bahan karbon (Farma et al., 2023). Puncak pada 2160 cm^{-1} , 2030 cm^{-1} dan 1970 cm^{-1} dapat dikaitkan dengan getaran C-N gugus fungsi nitrogen. Puncak lebar pada 1635 cm^{-1} diidentifikasi sebagai getaran peregangan $\text{C}=\text{O}$ (Farma et al., 2023).



Gambar 3. Spektrum FTIR elektroda karbon KU dan KU-05

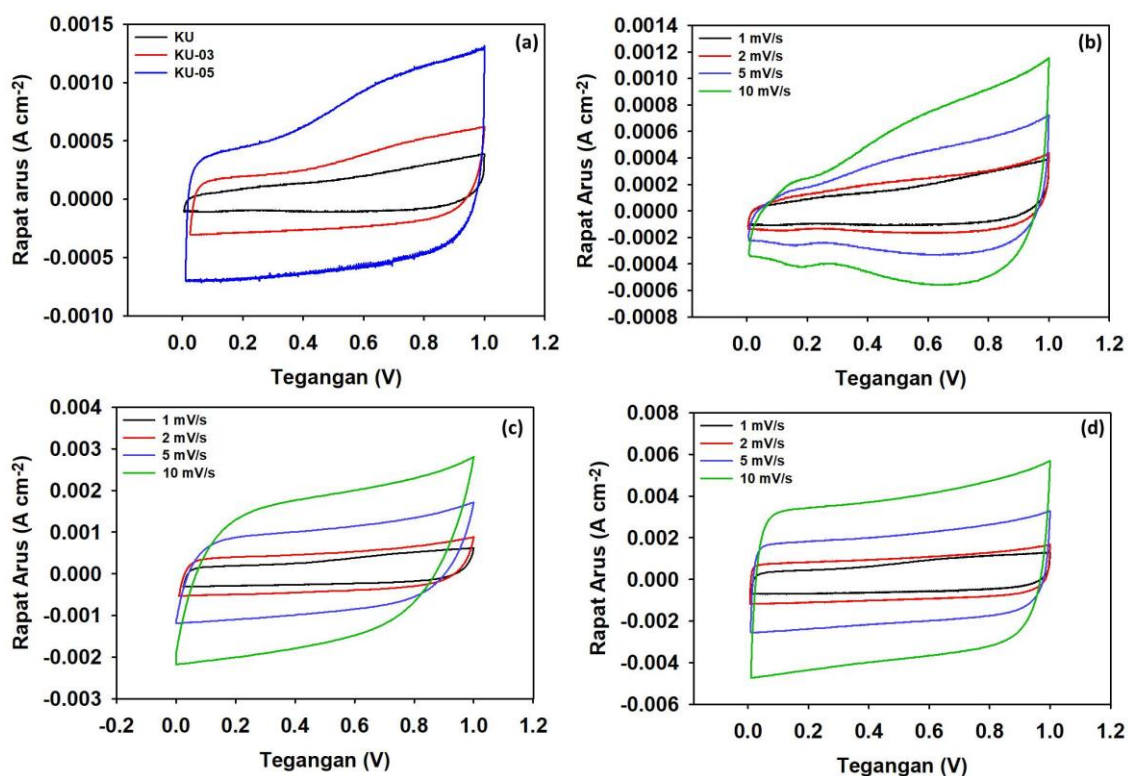
Puncak pada 1465 cm^{-1} sesuai dengan C-H regangan getaran simetris pada alkana. Puncak pada 1087

cm^{-1} terkait dengan mode getaran C-O. Puncak lainnya diposisikan pada 877 cm^{-1} , terjadi perubahan gugus fungsi asetamida (NHCOCH_3) pada kitin menjadi gugus amina (NH_2), sehingga membentuk bidang getaran N-H (Wei *et al.*, 2023b). Regangan O-H terjadi lagi pada puncak 690 cm^{-1} (Moussout *et al.*, 2023). Pengaktifan KOH menyebabkan *Self-doping* oksigen (O) dikonfirmasi dengan gugus fungsi O-H, C-O, dan C=O yang berasal dari senyawa organik alkohol, fenol, asam karboksilat, keton dan aldehida yang berasal dari penyederhanaan senyawa lignoselulosa biomassa MIS. Heteroatom O yang terdapat pada gugus fungsi dapat berperan dalam peningkatan hidrofilisitas pada larutan elektrolit, di mana dapat memfasilitasi dalam transmisi muatan sehingga meningkatkan perilaku kapasitansi (Kanjana *et al.*, 2021). *Self-doping* (N) dikonfirmasi dengan gugus fungsi C-N dan N-H. *Self-doping* Nitrogen secara signifikan mempengaruhi sifat fisis elektroda karbon seperti peningkatan keterbasahan dan difusi ion yang akan menyebabkan pengurangan resistensi kontak dan akibatnya meningkatkan kinerja kapasitif dari elektroda karbon (Shang *et al.*, 2021).

Analisis Cyclic Voltammetry

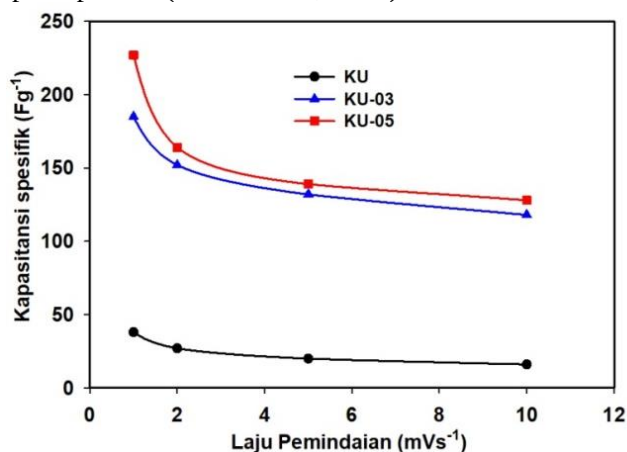
Perilaku elektrokimia dari KU, KU-03 dan KU-05 dievaluasi menggunakan metode CV pada sistem dua elektroda simetris di dalam larutan H_2SO_4 1 M seperti yang terlihat pada Gambar 4. Karakteristik EDLC ditunjukkan pada setiap KU, dimana semua profil CV menunjukkan kuasi-persegi panjang (Farma *et al.*, 2021).

Efisiensi dari sel superkapasitor KU dipengaruhi oleh luas kurva yang terbentuk yang berhubungan langsung dengan nilai kapasitansi spesifik. KU-05 memiliki kurva CV dengan area terluas dan nilai kapasitansi tertinggi dibandingkan dengan KU dan KU-03. Hal tersebut disebabkan oleh peningkatan molaritas dapat menyebabkan KOH terinterkalasi dan terhidrasi pada struktur karbon secara kompleks sehingga menghasilkan struktur karbon dengan mesoporositas. Mesoporositas dapat memudahkan akumulasi muatan dengan jumlah banyak sehingga dapat meningkatkan kapasitansi spesifik (Farma, Putri dan Apriyani, 2023). Lebih lanjut *Self-doping* oksigen dan nitrogen dapat meningkatkan keterbasahan yang berhubungan dengan meningkatkan luas permukaan yang dapat diakses untuk penyimpanan muatan (Fan *et al.*, 2023). Lebih lanjut distribusi pori tersebut dapat menyediakan situs aktif untuk akomodasi muatan. Oleh karena itu KU-05 memiliki kapasitas penyimpanan muatan yang lebih tinggi dibandingkan KU dan KU-03. Adapun nilai kapasitansi spesifik yang diperoleh yaitu 38, 185, dan 227 F/g untuk sampel KU, KU-03 dan KU-05 masing-masing pada laju pemindaian 1 mVs^{-1} . Laju pemindaian yang diterapkan meningkat, menampilkan profil CV dari KU, KU-03 dan KU-05 dapat mempertahankan kuasi persegi panjang tanpa adanya pendistorsian seperti yang terlihat pada Gambar 4 (b), (c) dan (d). Hal tersebut mengindikasikan elektroda sel superkapasitor memiliki laju kapasitas, propogasi muatan dan reversibilitas yang baik.



Gambar 4. (a) Kurva CV elektroda sel superkapasitor pada laju pemindaian 1 mV/s , kurva CV dengan variasi laju pemindaian (b) KU, (c) KU-03, dan (d) KU-05

Gambar 5 menunjukkan hubungan laju pemindaian dengan nilai kapasitansi spesifik untuk semua sampel. Berdasarkan grafik tersebut, nilai kapasitansi spesifik menurun dengan peningkatan laju pemindaian yang disebabkan oleh situs elektroaktif tidak dapat memanfaatkan ion-ion elektrolit secara maksimal untuk menyelesaikan reaksi elektrokimia. Laju pemindaian yang tinggi menyebabkan waktu pengisian dan pengosongan menjadi relatif lebih singkat. Reaksi elektrokimia yang tidak optimal dapat mengurangi muatan bilayer pada permukaan elektroda sehingga meminimalkan nilai kapasitansi spesifik sel superkapasitor (Farma et al., 2022).

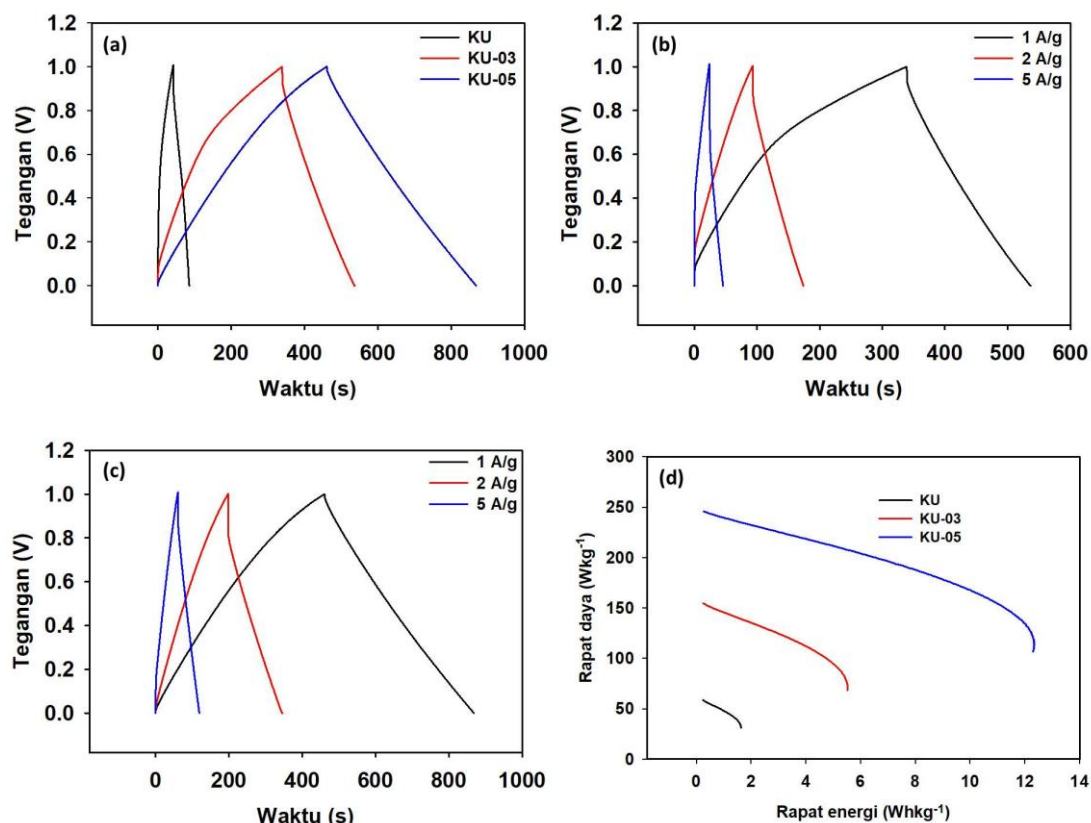


Gambar 5. Grafik laju pemindaian dengan kapasitansi spesifik

Analisis Galvanostatic Charge-Discharge

Perilaku elektrokimia dari semua sampel juga diukur menggunakan metode GCD pada rapat arus konstan 1 A/g seperti yang terlihat pada Gambar 6 (a) dan variasi rapat arus 1, 2, 5, dan 10 A/g seperti yang terlihat pada Gambar 6 (b) dan (c). Semua sampel menunjukkan kurva dengan bentuk kuasi segitiga yang merupakan indikasi perilaku EDLC (Farma et al., 2022; Apriyani et al., 2023).

Gambar 6 (a) juga menunjukkan KU-05 memiliki waktu pengisian dan pengosongan yang lebih besar yang dapat diaktikan dengan nilai kapasitansi spesifik yang tinggi. Hal ini juga berkesesuaian dengan analisis CV. Nilai kapasitansi spesifik yang dihasilkan dari sampel adalah 15, 132, dan 155 F/g untuk KU, KU-03 dan KU-05 masing-masing pada rapat arus 1 A/g. Gambar 6 (b) menunjukkan peningkatan rapat arus dapat menurunkan waktu pengisian dan pengosongan yang disebabkan oleh reaksi elektrokimia terjadi dengan cepat pada rapat arus yang lebih tinggi. Lebih lanjut semua sampel dapat mempertahankan profil kuasi-segitiga pada peningkatan rapat arus yang mengindikasikan kinerja pengisian-pengosongan yang reversibel (Jiang et al., 2020). Superkapasitor simetris KU-05 memiliki rapat energi maksimum 22 Wh/Kg pada rapat daya 100 W/kg pada rapat arus 1 A/g seperti yang terlihat pada Gambar 6 (c).



Gambar 6. (a) Kurva GCD elektroda sel superkapasitor pada rapat arus 1 A/g, kurva GCD dengan variasi rapat arus (b) KU-03, (c) KU-05, dan (d) Grafik energi spesifik dengan daya spesifik

Kesimpulan

chitin adalah biopolimer polisakarida yang dapat dijadikan material dasar pembuatan bahan karbon untuk sel superkapsaitor karena ketersediaan yang luas, struktur pori yang dapat dikontrol, stabilitas termal dan kimia dan harga yang efisien. Karya ini melaporkan produksi material karbon secara komprehensif yang berfokus pada material elektroda berbasis chitin turunan cangkang udang. Analisis XRD mengkonfirmasi struktur mikrokristalin dan Analisis FTIR mengkonfirmasi keberhasilan *self doping* oksigen-nitrogen pada matriks karbon. Perilaku superkapasitif dari sampel yang telah dipersiapkan dianalisis menggunakan CV dan GCD. Material karbon berbasis KU, KU-03, dan KU-05 memiliki kapasitansi maksimum sebesar 227 F/g pada suasana H₂SO₄ 1M. Karya ini menunjukkan bahwa biomassa kulit udang dapat menjadi alternatif untuk menyiapkan material aktif mesoporositas dengan *self doping* oksigen-nitrogen untuk aplikasi penyimpanan energi digenerasi yang akan datang.

Ucapan Terima Kasih

Para penulis mengucapkan terima kasih kepada Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), dengan kontrak: 7674/UN19.5.1.3/ AL.04/2023.

Referensi

- Apriyani, I., Farma, R. and Yunita, A. (2023) 'Sintesis Fisikokimia dari Karbon Aktif Berbasis Biomassa Sabut Nipah (*Nypa fruticans*) untuk Performansi Kinerja Superkapasitor', 20(2), pp. 127–134. doi: 10.31258/jkfi.20.2.127-134.
- Fan, Z., Feng, T., Wu, S., Wang, S., Tan, Y. and Yu, Q. (2023) 'Chemosphere Chitin-derived biochar with nitrogen doping to activate persulfate for phenol degradation: Application potential and electron transfer pathway in system', 330. doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.138641.
- Farma, R., Husni, H., Apriyani, I., Awitdrus, A. and Taer, E. (2021) 'Biomass Waste-Derived Rubber Seed Shell Functionalized Porous Carbon As an Inexpensive and Sustainable Energy Material for Supercapacitors', *Journal of Electronic Materials*, 50(12), pp. 6910–6919. doi: 10.1007/s11664-021-09226-7.
- Farma, R., Anugrah, A.P., Apriyani, I. and Awitdrus, A. (2022) 'Facile synthesis of Veitchia merilli coir-based porous carbon using combined chemical and physical activation routes as electrode material for energy storage', *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 13(1). doi: 10.1088/2043-6262/ac5dc8.
- Farma, R., Apriyani, I., Awitdrus, A., Taer, E. and Apriwandi, A. (2022) 'Hemicellulosa-derived Arenga pinnata bunches as free-standing carbon nanofiber membranes for electrode material supercapacitors', *Scientific Reports*, 12(1), pp. 1–11. doi: 10.1038/s41598-022-06619-4.
- Farma, R., Apriyani, I., Deraman, M., Taer, E., Nanda, R. and Sulisty, A. (2023) 'Enhanced electrochemical performance of oxygen, nitrogen, and sulfur tri-doped *Nypa fruticans* -based carbon nanofiber for high performance supercapacitors', *Journal of Energy Storage*, 67, p. 107611. doi: 10.1016/j.est.2023.107611.
- Farma, R., Putri, H. and Apriyani, I. (2023) 'KOH-assisted synthesis of oxygen-rich activated carbon derived from biomass sugar palm midrib as performance electrode cell supercapacitor', *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45(2), pp. 4886–4897. doi: 10.1080/15567036.2023.2206808.
- Hidayat, M.I., Adlim, M., Suhartono, S., Hayati, Z. and Bakar, N.H.H.A. (2023) 'Comparison of antibacterial properties between chitosan stabilized silver and zinc oxide nanoparticles immobilized on white silica beads', *South African Journal of Chemical Engineering*, 45, pp. 111–119. doi: 10.1016/j.sajce.2023.05.001.
- Iang, X., Guo, F., Jia, X., Zhan, Y., Zhou, H. and Qian, L. (2020) 'Synthesis of nitrogen-doped hierarchical porous carbons from peanut shell as a promising electrode material for high-performance supercapacitors', *Journal of Energy Storage*, 30, p. 101451. doi: 10.1016/j.est.2020.101451.
- Kanjana, K., Harding, P., Kwamman, T., Kingkam, W. and Chutimasakul, T. (2021) 'Biomass-derived activated carbons with extremely narrow pore size distribution via eco-friendly synthesis for supercapacitor application', *Biomass and Bioenergy*, 153, p. 106206. doi: 10.1016/j.biombioe.2021.106206.
- Khedulkar, A.P., Pandit, B., Dang, V.D. and Doong, R. (2023) 'Agricultural waste to real worth biochar as a sustainable material for supercapacitor', *Science of the Total Environment*, 869, p. 161441. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.161441.
- Lin, S., Wang, F. and Shao, Z. (2021) 'Biomass applied in supercapacitor energy storage devices', *Journal of Materials Science*, 56(3), pp. 1943–1979. doi: 10.1007/s10853-020-05356-1.
- Molahalli, V., K, C., Singh, M.K., Agrawal, M., Krishnan, S.G. and Hegde, G. (2023) 'Past decade of supercapacitor research – Lessons learned for future innovations', *Journal of Energy Storage*, 70, p. 108062. doi: 10.1016/j.est.2023.108062.
- Moussout, H., Dehmani, Y., Franco, D. S. P., Georgin, J., Daou, I., Lamhasni, T., Ilyas, C., Ahlafi, H., Taky, M., Shaim, A., and Sadik, A. (2023) 'Towards an in-depth experimental and theoretical understanding of the cadmium uptake mechanism on a synthesized chitin biopolymer', *Journal of Molecular Liquids*, 383, p. 122106. doi: 10.1016/j.molliq.2023.122106.
- Prakash, N., Santivarangkna, C., Singh, M. and Benjakul, S. (2020) 'Trends in Food Science & Technology Trends in shrimp processing waste utilization: An industrial prospective', *Trends in Food Science & Technology*, 103, pp. 20–35. doi: 10.1016/j.tifs.2020.07.001.
- Rubio, S., Odoom-wubah, T., Li, Q. and Ortiz, G.F. (2022) 'Marine shrimp / tin waste as a negative electrode for rechargeable sodium-ion batteries', 359, pp. 1–11. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131994.
- Sammed, K. A., Farid, A., Mustafa, S., Kumar, A., Tabish, M., Khan, A. A., Ajmal, S., Mo, Z., Akbar, A. R., Yasin,

- G., Zeng, Y., and Zhao, W. (2023) 'Developing next-generation supercapacitor electrodes by coordination chemistry-based advanced functional carbon nanostructures: Progress, Current challenges and prospects', *Fuel Processing Technology*, 250, p. 107896. doi: 10.1016/j.fuproc.2023.107896.
- Shang, Z., An, X., Liu, L., Yang, J., Zhang, W. and Dai, H. (2021) 'Chitin nanofibers as versatile bio-templates of zeolitic imidazolate frameworks for N-doped hierarchically porous carbon electrodes for supercapacitor', *Carbohydrate Polymers*, 251(29), p. 117107. doi: 10.1016/j.carbpol.2020.117107.
- Shanmuga Priya, M., Divya, P. and Rajalakshmi, R. (2020) 'A review status on characterization and electrochemical behaviour of biomass derived carbon materials for energy storage supercapacitors', *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 16(November 2019), p. 100243. doi: 10.1016/j.scp.2020.100243.
- Wang, J., Zhang, X., Li, Z., Ma, Y. and Ma, L. (2020) 'Recent progress of biomass-derived carbon materials for supercapacitors', *Journal of Power Sources*, 451(October 2019), p. 227794. doi: 10.1016/j.jpowsour.2020.227794.
- Wang, Y., Liu, R., Tian, Y., Sun, Z., Huang, Z., Wu, X. and Li, B. (2020) 'Heteroatoms-doped hierarchical porous carbon derived from chitin for flexible all-solid-state symmetric supercapacitors', *Chemical Engineering Journal*, 384, p. 123263. doi: 10.1016/j.cej.2019.123263.
- Wei, X., Qiu, B., Xu, L., Qin, Q., Zhang, W., Liu, Z., Wei, F., and Lv, Y. (2023) 'High performance hierarchical porous carbon derived from waste shrimp shell for supercapacitor electrodes', *Journal of Energy Storage*, 62(December 2022), pp. 1–10. doi: 10.1016/j.est.2023.106900.
- Xu, P., Tong, J., Zhang, L., Yang, Y., Chen, X., Wang, J. and Zhang, S. (2021) 'Dung beetle forewing-derived nitrogen and oxygen self-doped porous carbon for high performance solid-state supercapacitors', *Journal of Alloys and Compounds*, 892, p. 162129. doi: 10.1016/j.jallcom.2021.162129.