

## SINTESIS KARBON AKTIF BERBASIS BIOMASSA SERAT BINTARO SEBAGAI BAHAN ELEKTRODA UNTUK APLIKASI SEL SUPERKAPASITOR

Aria Yunita\*, Rakhmawati Farma, Awitdrus, Irma Apriyani

Jurusan Fisika FMIPA Universitas Riau

\*E-mail korespondensi: [aria.yunita7524@grad.unri.ac.id](mailto:aria.yunita7524@grad.unri.ac.id)

### ABSTRACT

*Biomass-based activated carbon has been widely developed due to its environmental friendliness, abundant availability, porous structure, high specific surface area and good electrical conductivity. One of the ways to improve the performance of supercapacitor cells is to increase the carbonization temperature, so that in this study various carbonization temperatures were carried out at 500°C, 600°C and 700°C. The results showed that the carbonization temperature of 600°C was the optimum temperature for making SB-based activated carbon. This is indicated by the results of measuring the physical properties of SB-600 in the form of the lowest density shrinkage value which can increase porosity thereby increasing the performance of supercapacitor cells. From this study, the highest capacitance value of 213 F.g<sup>-1</sup> was found on the SB-600. The results obtained indicate that the selection of the optimum carbonization temperature is important and can improve the performance of supercapacitor cells.*

**Keywords:** Activated Carbon, Bintaro Fruit Fiber, Carbonization, Supercapacitor.

### ABSTRAK

*Bahan karbon aktif berbasis biomassa banyak dikembangkan karena sifatnya yang ramah lingkungan, ketersediaan melimpah, strukturnya berpori, luas permukaan spesifiknya tinggi dan konduktivitas listrik baik. Salah satu cara untuk meningkatkan kinerja dari sel superkapasitor adalah dengan meningkatkan suhu karbonisasi, sehingga pada penelitian ini dilakukan variasi suhu karbonisasi pada 500°C, 600°C dan 700°C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu karbonisasi 600°C merupakan suhu yang optimum dalam pembuatan karbon aktif berbasis CMF. Hal tersebut ditunjukkan dengan hasil pengukuran sifat fisis dari SB-600 berupa nilai penyusutan densitas terendah yang dapat meningkatkan porositas sehingga meningkatkan kinerja sel superkapasitor. Dari penelitian ini, nilai kapasitansi tertinggi yaitu sebesar 213 F.g<sup>-1</sup> ditemukan pada SB-600. Hasil yang didapatkan ini menunjukkan bahwa pemilihan suhu karbonisasi yang optimum merupakan satu hal yang penting dan dapat meningkatkan kinerja sel superkapasitor.*

**Kata kunci:** Karbon Aktif, Serat Bintaro, Karbonisasi, Superkapasitor.

Diterima 17-01-2023 | Disetujui 14-04-2023 | Dipublikasi 30-11-2023

### PENDAHULUAN

Permintaan energi di seluruh dunia terus meningkat, sehingga konsumsi energi juga meningkat, dimana sebagian besar sumber energi tersebut berasal dari bahan bakar fosil [1]. Konsumsi bahan bakar fosil menyebabkan polusi dan pemanasan global, sehingga dibutuhkan energi yang bersih dan terbarukan. Para peneliti di seluruh dunia melakukan

pengeksplorasian terhadap teknologi energi hijau untuk mengurangi pemakaian bahan bakar fosil dan dampak buruknya [2]. Sumber energi bersih dan terbarukan seperti energi matahari, angin dan air masih memiliki masalah yaitu bergantung pada waktu dan kondisi cuaca, dan mungkin tidak tersedia saat dibutuhkan, sehingga perlu pengembangan teknologi penyimpanan energi yang sumber energinya melimpah dan tidak bergantung pada waktu dan

kondisi cuaca [3]. Untuk mengatasi masalah tersebut, superkapasitor telah menjadi perangkat konversi energi yang signifikan karena tingkat pengisian-pengosongan yang sangat cepat, kepadatan daya yang tinggi, ramah lingkungan, dan masa pakai yang lama [4]. Superkapasitor diklasifikasikan ke dalam tiga kategori berdasarkan mekanisme penyimpanannya, yaitu *electric double layer capacitor* (EDLC), *pseudocapacitor* (PC) dan kombinasinya (superkapasitor hibrid). Mekanisme kerja EDLC berdasarkan proses *non-faradaic*, yaitu melalui akumulasi elektron pada antarmuka elektroda/elektrolit, PC berdasarkan proses *faradic* oleh reaksi redoks, dan superkapasitor hibrid dengan reaksi *non-faradic* di satu sisi dan reaksi *faradaic* di sisi yang lain [5,6].

Komponen penyusun superkapasitor terdiri dari elektroda, elektrolit, pengumpul arus dan pemisah [7]. Elektroda memainkan peranan penting dalam mekanisme penyimpanan energi, sehingga perangkat penyimpanan superkapasitor bergantung pada sifat bahan elektrodanya [8,9]. Bahan elektroda yang umum digunakan pada EDLC adalah bahan berbasis karbon seperti karbon aktif, *carbon nanofiber*, *carbon nanotube*, dan *graphene* [10]. Bahan karbon aktif berbasis biomassa merupakan bahan yang banyak digunakan sebagai elektroda superkapasitor karena memiliki luas permukaan tinggi, melimpah, harga relatif murah, ramah lingkungan, dan memiliki kapasitansi tinggi [11,12]. Biomassa ini berupa limbah dari sumber daya hayati seperti kulit manggis [13], sabut kelapa [14], sisik ikan [15], dan kulit biji karet [16].

Bintaro (*cerbera manghas*) adalah tanaman yang tidak dapat dimakan karena terdapat kandungan racun sehingga tanaman ini juga dikenal dengan *suicide tree* [17]. Meskipun terdapat kandungan racun, tanaman bintaro banyak digunakan untuk penghijauan dan banyak ditemui di ruang terbuka hijau (RTH), tetapi buahnya masih belum dimanfaatkan dengan maksimal dan hanya menjadi limbah [18]. Dalam buah bintaro juga terdapat kandungan lognoseselulosa, sehingga buah

bintaro menarik untuk dijadikan bahan elektroda karbon sel superkapasitor [19].

Elektroda karbon disintesis melalui karbonisasi dan aktivasi. Reaksi antara bahan karbon aktif dengan aktivasi dan karbonisasi, dapat menentukan struktur berpori dari karbon aktif. Selain itu, melalui karbonisasi senyawa pengotor akan terurai sehingga didapatkan kandungan karbon yang tinggi. Jadi, salah satu yang terpenting untuk mengontrol struktur pori karbon adalah suhu karbonisasi, sehingga pemilihan suhu karbonisasi menjadi penting untuk mendapatkan produk karbon yang diinginkan [20].

Studi ini berfokus pada pembuatan karbon aktif yang diturunkan dari serat bintaro dengan pengoptimalan suhu karbonisasi untuk mencapai kinerja elektrokimia yang tinggi.

## METODE PENELITIAN

Sintesis karbon aktif berbasis biomassa serat bintaro (SB) melalui proses pra-karbonisasi, aktivasi kimia, karbonisasi dan aktivasi fisika. SB dibersihkan dan dikeringkan di bawah sinar matahari hingga massa konstan. SB yang telah bermassa konstan dilakukan pra-karbonisasi dengan suhu 200°C selama 1 jam, lalu dihaluskan untuk menghasilkan serbuk yang homogen dengan ukuran  $\leq 100$  mesh. Proses selanjutnya yaitu aktivasi kimia menggunakan agen pengaktif KOH dengan konsentrasi 0,1 M, kemudian dikeringkan menggunakan oven pada suhu 110°C. Sampel yang telah kering dihaluskan kembali dan cetak berbentuk seperti koin menggunakan alat hidrolik pres. Selanjutnya dilakukan proses karbonisasi-aktivasi fisika dengan memasukkan sampel ke dalam furnace yang terintegrasi. Proses karbonisasi dengan mengalirkan gas nitrogen (N<sub>2</sub>) pada suhu yang divariasikan yaitu 500°C, 600°C dan 700°C dan aktivasi fisika dengan mengalirkan gas karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) pada suhu 800°C. Setelah suhu furnace mencapai suhu ruang, sampel dikeluarkan dari furnace, kemudian dinetralkan menggunakan aquades hingga pH 7 dan dikeringkan menggunakan oven pada suhu 110°C. Sampel yang telah

menjadi karbon aktif diberi kode SB-500, SB-600 dan SB-700.

Sel superkapasitor disusun seperti *sandwich* yang terdiri dari dua elektroda yang simetris, pemisah, elektrolit dan pengumpul arus. Sampel SB digunakan sebagai elektroda, kemudian ke dalam larutan elektrolit 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> selama 2 hari. Sampel SB dipisahkan oleh pemisah yang terbuat dari membran cangkang telur ayam dan muatan akan tersimpan di pengumpul arus yang terbuat dari stainless steel.

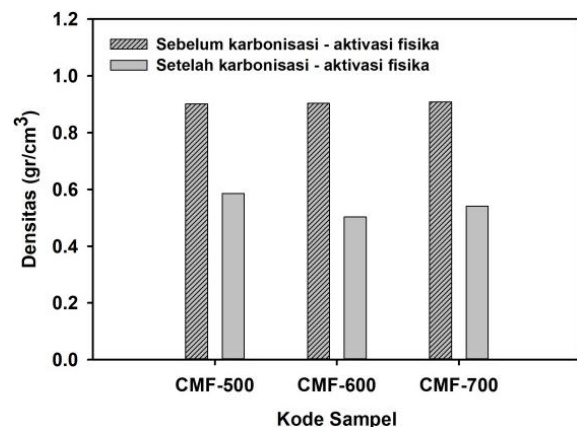
Pengukuran densitas karbon aktif SB dilakukan sebelum dan sesudah proses karbonisasi – aktivasi fisika. Pada proses ini, diameter dan ketebalan diukur menggunakan jangka sorong digital serta massa menggunakan timbangan digital untuk semua sampel SB. Pengukuran elektrokimia karbon aktif SB menggunakan metode *cyclic voltammetry* (CV) dan *galvanostatic charge-discharge* (GCD) untuk menentukan kapasitansi spesifik, rapat daya, rapat energi dan IR drop dari sel superkapasitor. Metode CV menggunakan potensial 0 – 1 V pada laju pemindaian 1, 2, 5, dan 10 mV.s<sup>-1</sup>. Metode GCD menggunakan potensial 0 – 1 V pada rapat arus 1, 2, 5, dan 10 A.g<sup>-1</sup>.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Analisis Penyusutan Densitas

Pengukuran densitas karbon aktif dilakukan sebelum dan sesudah proses karbonisasi - aktivasi fisika. Hasil pengukuran yang diperoleh digunakan untuk menganalisis pengaruh densitas terhadap nilai kapasitansi spesifik sel superkapasitor pada masing-masing sampel. Gambar 1 memperlihatkan perbandingan pengukuran densitas rata-rata karbon aktif sebelum dan sesudah proses karbonisasi-aktivasi fisika untuk sampel SB-500, SB-600 dan SB-700. Berdasarkan Gambar 1, sebelum proses karbonisasi – aktivasi fisika, densitas yang diperoleh dari sampel SB-500, SB-600 dan SB-700 masing-masing sebesar 0,9008, 0,9033, dan 0,9079 gr/cm<sup>3</sup>, sedangkan setelah proses karbonisasi – aktivasi fisika,

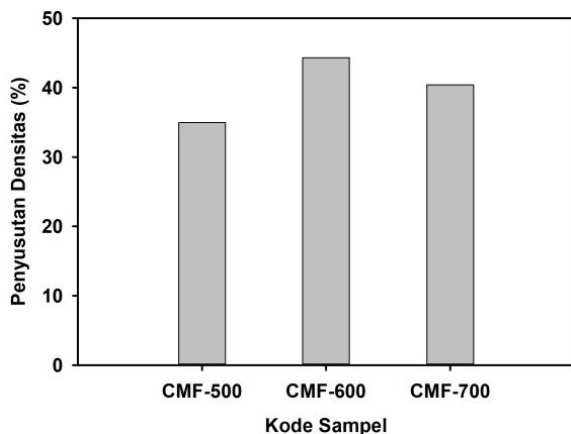
densitas dari SB-500, SB-600 dan SB-700 masing-masing sebesar 0,5860, 0,5031, dan 0,5412 gr/cm<sup>3</sup>. Semua sampel semua sampel mengalami penyusutan yang disebabkan oleh proses karbonisasi dengan suhu tinggi. Karbonisasi pada suhu tinggi menyebabkan senyawa volatil dan unsur penyusun biomassa selain unsur karbon menguap sehingga mengurangi dimensi densitas pada elektroda karbon dan menghasilkan karbon murni dengan struktur pori yang mulai terbuka [21]. Dari Gambar 1 dapat diketahui bahwa sampel SB-600 memiliki densitas terendah. Semakin rendah nilai densitas yang dihasilkan, maka porositas akan meningkat dan dapat mempengaruhi kemampuan elektroda karbon dalam menyimpan energi [22].



**Gambar 1.** Diagram batang densitas sebelum dan sesudah karbonisasi – aktivasi fisika dari sampel SB-500, SB-600 dan SB-700.

Persentase penyusutan densitas yang terjadi pada semua sampel ditunjukkan pada Gambar 2 dengan persentase rata-rata penyusutan densitas masing-masing sebesar 34,95%, 44,30% dan 40,39%. Persentase penyusutan densitas pada sampel SB-600 lebih tinggi dibandingkan sampel SB-500 dan SB-700, hal ini terjadi dikarenakan proses karbonisasi pada suhu 600°C dapat mengkonversi bahan baku biomassa menjadi arang dan dapat mengembangkan pori awal sehingga persentase penyusutan densitas yang dihasilkan lebih tinggi [23]. Semakin tinggi suhu karbonisasi maka ikatan oksigen, hidrogen dan karbon

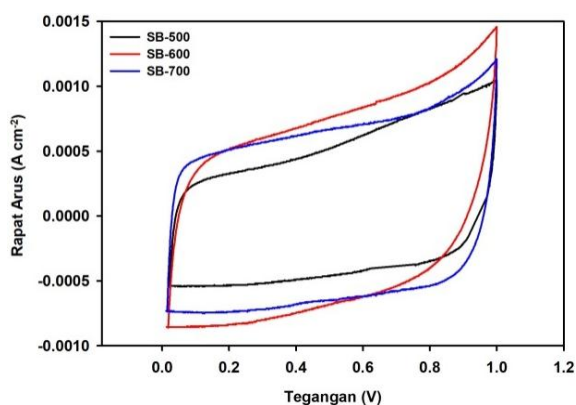
menjadi lemah, sehingga gas nitrogen mudah untuk melepaskan oksigen dan hidrogen dari karbon. Sampel SB-700 mengalami penyusutan yang lebih rendah dibandingkan SB-600, hal ini karena ketika suhu karbonisasi semakin tinggi akan merusak pori karbon yang disebabkan oleh proses disosiasi secara berlebihan [21].



**Gambar 2.** Diagram batang persentase penyusutan densitas dari sampel SB-500, SB-600 dan SB-700.

### Analisis Cyclic Voltammetry (CV)

Kinerja elektrokimia karbon aktif turunan serat bitar sebagai bahan elektroda untuk superkapasitor diuji melalui metode dua elektroda menggunakan larutan  $H_2SO_4$  1M sebagai elektrolit.

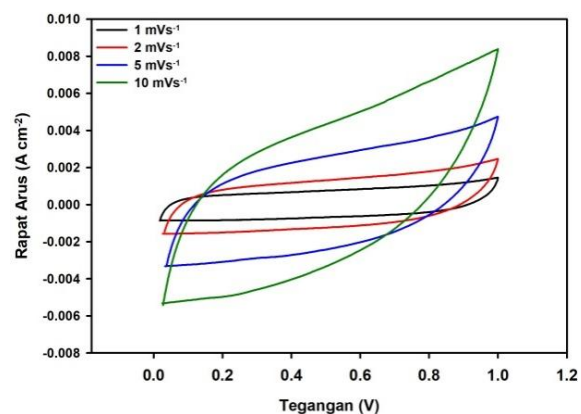


**Gambar 3.** Kurva CV dari sampel SB-500, SB-600 dan SB-700 pada laju pemindaian 1 mV/s.

Gambar 3 menunjukkan kurva CV dari elektroda SB dengan variasi suhu karbonisasi. Kurva CV yang dihasilkan untuk setiap sampel berbentuk kuasi-segiempat yang menunjukkan sifat EDLC Ideal. Kurva yang terbentuk serupa

tetapi luas kurva disetiap sampel berbeda yang disebabkan oleh variasi suhu karbonisasi. SB-600 memiliki luas kurva terbesar dibandingkan SB-500 dan SB-700. Semakin luas kurva yang terbentuk maka kapasitansi spesifik yang dihasilkan akan tinggi [24].

Nilai kapasitansi spesifik yang dihasilkan dari sampel SB-500, SB-600 dan SB-700 masing-masing sebesar 150, 203, dan 187  $F \cdot g^{-1}$ . Kapasitansi spesifik yang dihasilkan SB-700 lebih rendah dibandingkan SB-600 karena suhu karbonisasi yang lebih tinggi dapat merusak elektroda karbon yang disebabkan disosiasi yang berlebihan sehingga kinerja sel superkapasitor menurun [25].

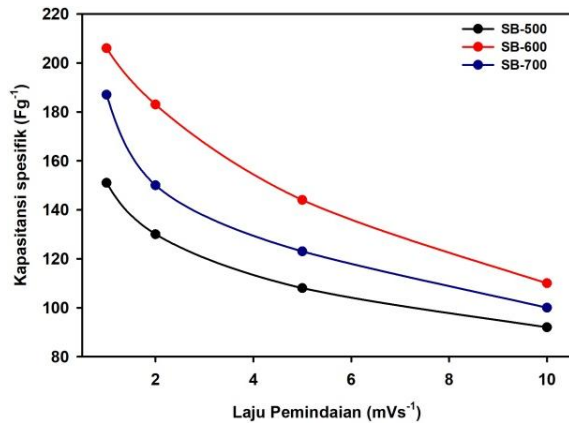


**Gambar 4.** Kurva CV dari sampel SB-600 dengan variasi laju pemindaian.

Gambar 4 menunjukkan kurva CV dari sampel SB-600 laju pemindaian 1, 2, 5, dan 10  $mV \cdot s^{-1}$ . Berdasarkan Gambar 4, bentuk kurva dengan laju pemindaian berbeda tetap mempertahankan bentuk kuasi-persegi panjang yang menunjukkan elektroda memiliki karakteristik kapasitif yang baik. Secara umum, laju pemindaian dapat mempengaruhi bentuk kurva yang dihasilkan sehingga mempengaruhi nilai kapasitansi spesifik yang ditunjukkan pada Gambar 5.

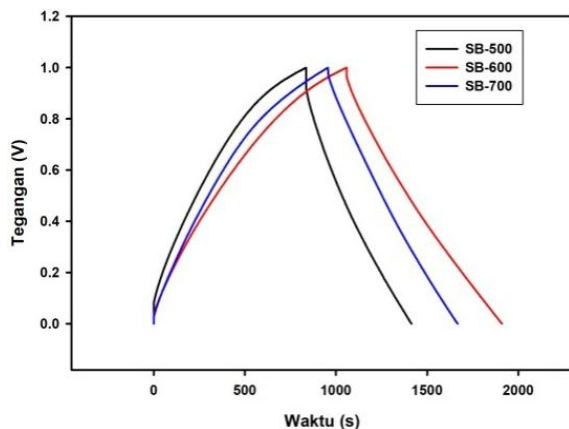
Gambar 5 memperlihatkan kapasitansi spesifik untuk semua sampel pada tingkat laju pemindaian yang berbeda, kapasitansi spesifik menurun secara signifikan dengan meningkatnya laju pemindaian. Semakin tinggi kecepatan pemindaian, semakin kecil kapasitansi yang diukur. Hal ini disebabkan adanya hambatan transfer ion ke permukaan

partikel karbon sehingga terdapat bagian pori elektroda yang tidak dapat diakses saat pengukuran dengan laju pemindaian yang tinggi [26].



**Gambar 5.** Kurva hubungan nilai kapasitansi spesifik terhadap laju pemindaian.

### Analisis Galvanostatic Charge Discharge (GCD)



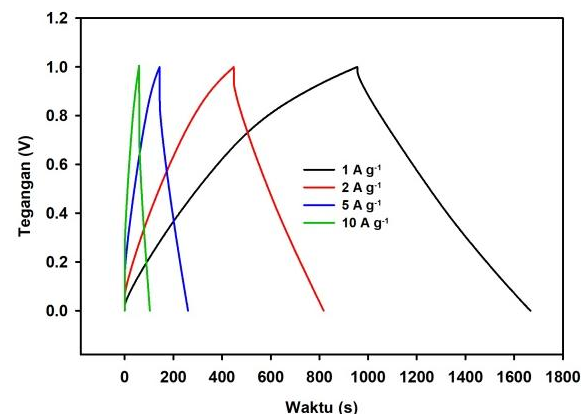
**Gambar 6.** Kurva GCD dari sampel SB-500, SB-600 dan SB-700.

Pengukuran GCD dilakukan untuk mengevaluasi lebih lanjut nilai kapasitansi spesifik dari elektroda karbon berbasis serat bintaro. Seperti yang digambarkan pada Gambar 6, kurva GCD dari semua sampel menunjukkan bentuk segitiga sama kaki tanpa tekukan yang jelas pada kerapatan arus  $0,1 \text{ A.g}^{-1}$ , yang menunjukkan perilaku EDLC, efisiensi muatan-pengosongan yang tinggi, dan reversibilitas yang baik dalam proses pengisian dan pengosongan. Selain itu, waktu pelepasan muatan yang lebih lama mencerminkan

kapasitansi spesifik sampel yang lebih besar [25].

Nilai kapasitansi spesifik yang dihasilkan dari sampel SB-500, SB-600 dan SB-700 masing-masing sebesar  $154, 213, \text{ dan } 189 \text{ F.g}^{-1}$ . Nilai kapasitansi spesifik tertinggi terdapat pada sampel SB-600 dibandingkan dengan sampel SB-500 dan SB-700. Hasil yang didapatkan konsisten dengan analisis CV.

Gambar 7 menunjukkan kurva GCD dari SB-600 dengan variasi rapat arus yaitu  $1, 2, 5, \text{ dan } 10 \text{ A.g}^{-1}$ . Dari kurva tersebut dapat diketahui bahwa semakin rendah rapat arus yang diberikan, maka waktu pengisian yang dibutuhkan semakin lama sehingga kurva yang terbentuk semakin besar dan nilai kapasitansi spesifik yang dihasilkan semakin tinggi. Hal tersebut terjadi karena semakin rendah rapat arus, maka akan semakin banyak daerah yang dilalui ion-ion dan waktu yang dibutuhkan untuk ion berdifusi lebih lama [27].



**Gambar 7.** Kurva GCD dari sampel SB-600 dengan variasi rapat arus.

### KESIMPULAN

Pembuatan elektroda sel superkapasitor berbasis biomassa serat bintaro telah berhasil dilakukan dengan memvariasikan suhu karbonisasi, yaitu  $500^\circ\text{C}, 600^\circ\text{C} \text{ dan } 700^\circ\text{C}$ . Elektroda SB memiliki kinerja terbaik pada suhu karbonisasi  $600^\circ\text{C}$  karena memiliki nilai penyusutan densitas terendah dimana dapat meningkatkan porositas dari karbon aktif dan nilai kapasitansi spesifik tertinggi sebesar  $213 \text{ F.g}^{-1}$ . Sehingga dapat disimpulkan bahwa suhu  $600^\circ\text{C}$  merupakan suhu yang optimum

dalam pembuatan karbon aktif berbasis biomassa serat bintaro untuk meningkatkan kinerja sel superkapasitor.

## REFERENSI

1. Shahbaz, M., Topcu, B. A., Sarigül, S. S., & Vo, X. V. (2021). The effect of financial development on renewable energy demand: The case of developing countries. *Renewable Energy*, **178**, 1370–1380.
2. Shaikh, N. S., Ubale, S. B., Mane, V. J., Shaikh, J. S., Lokhande, V. C., Praserthdam, S., ... & Kanjanaboos, P. (2022). Novel electrodes for supercapacitor: Conducting polymers, metal oxides, chalcogenides, carbides, nitrides, MXenes, and their composites with graphene. *Journal of Alloys and Compounds*, **893**, 161998.
3. Kumar, R., del Pino, A. P., Sahoo, S., Singh, R. K., Tan, W. K., Kar, K. K., ... & Joanni, E. (2022). Laser processing of graphene and related materials for energy storage: State of the art and future prospects. *Progress in Energy and Combustion Science*, **91**, 100981.
4. Banavath, R., Nemala, S. S., Kim, S. H., Bohm, S., Ansari, M. Z., Mohapatra, D., & Bhargava, P. (2022). Industrially scalable exfoliated graphene nanoplatelets by high-pressure airless spray technique for high-performance supercapacitors. *FlatChem*, **33**, 100373.
5. Kumar, S., Saeed, G., Zhu, L., Hui, K. N., Kim, N. H., & Lee, J. H. (2021). 0D to 3D carbon-based networks combined with pseudocapacitive electrode material for high energy density supercapacitor: A review. *Chemical Engineering Journal*, **403**, 126352.
6. Muzaffar, A., Ahamed, M. B., Deshmukh, K., & Thirumalai, J. (2019). A review on recent advances in hybrid supercapacitors: Design, fabrication and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **101**, 123–145.
7. Saikia, B. K., Benoy, S. M., Bora, M., Tamuly, J., Pandey, M., & Bhattacharya, D. (2020). A brief review on supercapacitor energy storage devices and utilization of natural carbon resources as their electrode materials. *Fuel*, **282**, 118796.
8. Wu, L., Cai, Y., Wang, S., & Li, Z. (2021). Doping of nitrogen into biomass-derived porous carbon with large surface area using N<sub>2</sub> non-thermal plasma technique for high-performance supercapacitor. *International Journal of Hydrogen Energy*, **46**(2), 2432–2444.
9. Wang, J., Xu, Y., Yan, M., Ren, B., Dong, X., Miao, J., ... & Liu, Z. (2022). Preparation and application of biomass-based porous carbon with S, N, Zn, and Fe heteroatoms loading for use in supercapacitors. *Biomass and Bioenergy*, **156**, 106301.
10. Lamba, P., Singh, P., Singh, P., Singh, P., Kumar, A., Gupta, M., & Kumar, Y. (2022). Recent advancements in supercapacitors based on different electrode materials: classifications, synthesis methods and comparative performance. *Journal of Energy Storage*, **48**, 103871.
11. Liu, H., Chen, W., Zhang, R., Xu, C., Huang, X., Peng, H., ... & Miao, Z. (2021). Bioinspired in situ self-catalyzing strategy towards graphene nanosheets with hierarchical structure derived from biomass for advanced supercapacitors. *Applied Surface Science*, **566**, 150692.
12. Chen, H., Guo, Y. C., Wang, F., Wang, G., Qi, P. R., Guo, X. H., ... & Yu, F. (2017). An activated carbon derived from tobacco waste for use as a supercapacitor electrode

- material. *New Carbon Materials*, **32**(6), 592–599.
13. Yang, V., Senthil, R. A., Pan, J., Khan, A., Osman, S., Wang, L., ... & Sun, Y. (2019). Highly ordered hierarchical porous carbon derived from biomass waste mangosteen peel as superior cathode material for high performance supercapacitor. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **855**, 113616.
  14. Sesuk, T., Tammawat, P., Jivaganont, P., Somton, K., Limthongkul, P., & Kobsiriphat, W. (2019). Activated carbon derived from coconut coir pith as high performance supercapacitor electrode material. *Journal of Energy Storage*, **25**, 100910.
  15. Zingare, P. A., Dhoble, S. J., & Deshmukh, A. D. (2022). Highly stable fish-scale derived lamellar carbon for high performance supercapacitor application. *Diamond and Related Materials*, **124**, 108925.
  16. Farma, R., Husni, H., Apriyani, I., Awitdrus, A., & 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**, 6910–6919.
  17. Menezes, R. G., Usman, M. S., Hussain, S. A., Madadin, M., Siddiqi, T. J., Fatima, H., ... & Luis, S. A. (2018). *Cerbera odollam* toxicity: A review. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, **58**, 113–116.
  18. Maharana, P. K. (2021). Ethnobotanical, phytochemical, and pharmacological properties of *Cerbera manghas* L. *Journal of Biosciences*, **46**(1), 25.
  19. Ramadhanti, W., Rahmi, M., Soemargono, S., & Suprianti, L. (2021). Hidrolisis Buah Bintaro dengan Katalis Asam Sulfat Ditinjau dari Kinetika Reaksi. *Chempro*, **2**(03), 23–27.
  20. Xu, B., Chen, Y., Wei, G., Cao, G., Zhang, H., & Yang, Y. (2010). Activated carbon with high capacitance prepared by NaOH activation for supercapacitors. *Materials Chemistry and Physics*, **124**(1), 504–509.
  21. Farma, R., Lestari, A. N. I., & Apriyani, I. (2021). Supercapacitor cell electrodes derived from nipah fruticans fruit coir biomass for energy storage applications using acidic and basic electrolytes. *Journal of Physics: Conference Series*, **2049**(1), 012043.
  22. Taer, E., Afrianda, A., Taslim, R., Krisman, Minarni, Agustino, A., ... & Malik, U. (2018). The physical and electrochemical properties of activated carbon electrode made from Terminalia Catappa leaf (TCL) for supercapacitor cell application. *Journal of Physics: Conference Series*, **1120**, 012007.
  23. Taer, E., Melisa, M., Agustino, A., Taslim, R., Sinta Mustika, W., & Apriwandi, A. (2021). Biomass-based activated carbon monolith from *Tectona grandis* leaf as supercapacitor electrode materials. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1–12.
  24. Ye, R., Cai, J., Pan, Y., Qiao, X., & Sun, W. (2020). Microporous carbon from malva nut for supercapacitors: effects of primary carbonizations on structures and performances. *Diamond and Related Materials*, **105**, 107816.
  25. Cheng, Y., Wu, L., Fang, C., Li, T., Chen, J., Yang, M., & Zhang, Q. (2020). Synthesis of porous carbon materials derived from laminaria japonica via simple carbonization and activation for supercapacitors. *Journal of Materials Research and Technology*, **9**(3), 3261–3271.
  26. Winata, A. S., Devianto, H., & Susanti, R. F. (2021). Synthesis of activated carbon from salacca peel with hydrothermal

- carbonization for supercapacitor application. *Materials Today: Proceedings*, **44**, 3268–3272.
27. Harahap, E. W., Taer, E., Rini, A. S., Taslim, R., & Apriwandi, A. (2022). Cassava peel derived self-doped and hierarchical porous carbon as an optimized electrode for the ultra-high energy density of supercapacitor. *Diamond and Related Materials*, **129**, 109407.



Artikel ini menggunakan lisensi  
[Creative Commons Attribution  
4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)