

SINTESIS FISIKOKIMIA DARI KARBON AKTIF BERBASIS BIOMASSA SABUT NIPAH (*Nypa fruticans*) UNTUK PERFORMANSI KINERJA SUPERKAPASITOR

Irma Apriyani*, Rakhmawati Farma, Awitdrus, Aria Yunita
Jurusan Fisika FMIPA Universitas Riau

*E-mail korespondensi: irma.apriyani7523@grad.unri.ac.id

ABSTRACT

*Biomass-based activated carbon materials provide a new approach for the development of high-performance electrode materials for supercapacitor cells. In addition, the carbon materials are low cost and sustainable for large-scale production of electrode materials. In this study, carbon electrodes made from nipa palm (*Nypa fruticans*) coir were synthesized physicochemically. The pore size distribution of the carbon electrodes can be adjusted with the increased CO₂ activation temperature (700°C, 800°C, and 900°C). The results showed that the SN-800 carbon electrode had the lowest density shrinkage and showed excellent electrochemical performance. The highest specific capacitance was obtained at 247 F/g at a current density of 1 A/g in a symmetrical two-electrode system. This work provides an efficient strategy for the preparation of high performance carbon electrodes based on nipa coir biomass.*

Keywords: Nipa Coir, Activated Carbon, Physicochemistry, Electrochemical Capacitors.

ABSTRAK

*Bahan karbon aktif berbasis biomassa memberikan pendekatan baru untuk pengembangan bahan elektroda berkinerja tinggi untuk sel superkapasitor. Selain itu, bahan karbon tersebut memiliki biaya rendah dan bersifat berkelanjutan untuk produksi bahan elektroda dalam skala besar. Pada penelitian ini elektroda karbon berbahan dasar dari sabut nipah (*Nypa fruticans*) yang disintesis secara fisikokimia. Distribusi ukuran pori elektroda karbon dapat disesuaikan dengan suhu aktivasi CO₂ yang ditingkatkan (700°C, 800°C, dan 900°C). Hasil penelitian menunjukkan bahwa elektroda karbon SN-800 mengalami penyusutan densitas terendah dan menunjukkan kinerja elektrokimia yang sangat baik. Kapasitansi spesifik tertinggi diperoleh sebesar 247 F/g pada rapat arus 1 A/g dalam sistem dua elektroda simetris. Pekerjaan ini memberikan strategi yang efisien untuk persiapan elektroda karbon kinerja tinggi berbasis biomassa sabut nipah.*

Kata kunci: Sabut Nipah, Karbon Aktif, Fisikokimia, Kapasitor Elektrokimia.

Diterima 12-09-2022 | Disetujui 15-01-2023 | Dipublikasi 18-04-2023

PENDAHULUAN

Kemajuan industri dan teknologi modern telah menghasilkan permintaan energi yang tinggi bahkan untuk pengoperasian sehari-hari dan pengembangan selanjutnya [1,2]. Permintaan energi tersebut, sebagian besar dipenuhi oleh eksploitasi konvensional dan alami dari bahan bakar fosil seperti minyak bumi dan turunannya dengan biaya tata kelola yang tinggi [3,4]. Permintaan energi yang tidak pernah berakhir dan eksploitasi alam yang tidak terkendali telah mengakibatkan masuknya

polutan baru ke lingkungan, yang mengakibatkan pencemaran lingkungan lebih lanjut [5]. Mengatasi masalah tersebut, pengembangan perangkat penyimpanan energi yang efisien menjadi solusi, yang dapat menyimpan sejumlah besar energi dari sumber terbarukan dan melepaskannya saat dibutuhkan. Perangkat penyimpanan energi di antaranya perangkat penyimpan energi elektrokimia seperti baterai, *fuel cell*, kapasitor dan superkapasitor [6,7].

Superkapasitor adalah sistem penyimpanan energi yang telah menerima perhatian besar

sebagai penyimpan energi karena rapat daya tinggi, siklus hidup yang panjang, dan tingkat pengisian dan pengosongan cepat [8]. Superkapasitor diklasifikasikan berdasarkan mekanisme penyimpanan muatan menjadi pseudokapasitor, kapasitansi yang berasal dari reaksi faraday reversibel dari spesies elektroaktif, *electric double layer capacitor* (EDLC), kapasitansi berasal dari elektrostatik reversible dari adsorpsi ion pada antarmuka elektroda-elektrolit, dan hibrid dengan reaksi lapisan ganda terjadi di satu sisi dan reaksi faraday terjadi di sisi lain [9]. Superkapasitor EDLC memiliki rapat daya dan siklus hidup yang lebih panjang jika dibandingkan superkapasitor hibrid dan PC. EDLC memiliki komponen penyusun yang terdiri dari dua elektroda simetris, elektrolit, kolektor arus dan pemisah [10]. Elektroda adalah inti dari EDLC dan memainkan peran penting dalam mekanisme penyimpanan energi, sehingga desain dan pengembangan bahan elektroda menjadi cara untuk meningkatkan kinerja superkapasitor [11]. Bahan elektroda yang umum digunakan pada EDLC adalah bahan berbasis karbon seperti karbon aktif berbasis biomassa, *carbon nanofiber*, *carbon nanotube*, *carbon aerogel*, *carbon nanobelts*, *graphene*, dan lain-lain.

Karbon aktif adalah bentuk karbon yang telah diproses menjadi karbon yang sangat berpori sehingga memiliki luas permukaan yang sangat besar yang tersedia untuk adsorpsi dan reaksi kimia. Elektroda superkapasitor yang berasal dari karbon aktif berbasis biomassa memiliki kemampuan daya dan energi yang tinggi karena memiliki luas permukaan yang tinggi, konduktivitas yang tinggi, dan kemampuan karbon aktif untuk mengoptimalkan sifat-sifat superkapasitor. Karbon aktif juga sebagai elektroda sel superkapasitor dapat melepaskan energi yang tersimpan yang diperlukan dengan cepat dan tanpa kehilangan energi yang signifikan, serta mengembalikan kapasitas optimal ke sel superkapasitor sehingga dapat melakukan pengisian dan pengosongan berulang kali

selama ribuan siklus tanpa kehilangan kinerja [12]. Karbon aktif telah banyak diterapkan untuk pembuatan elektroda superkapasitor berbasis biomassa lignoselulosa seperti sekam padi [13], bambu [14], kulit mangga [15], biji *datura stramonium* [16] dan lain-lain. Pada paper ini memanfaatkan biomassa limbah dari tanaman nipah yaitu sabut nipah.

Tanaman *Nypa fruticans* atau nipah merupakan spesies tanaman palmaetertua yang pernah ditemuidan pada awalnya tersebar di empat benua, yaitu Afrika tropis, Asia, Eropa, dan Amerika [17]. Nipah juga merupakan tumbuhan berumah satu yang berbeda dengan palmae biasa seperti kelapa (*Cocos nucifera*) dan kelapa sawit (*Elaeis guineensis*), tumbuh subur di muara sungai dan lingkungan air payau di mana garam dan air tawar bercampur. Tanaman nipah dapat dimanfaatkan sebagai; bagian getah nipah dapat disadap untuk pembuatan gula merah, minuman tuba dan cuka. Selain itu, getah nipah dapat diolah menjadi atanol dan butanol. Tunas muda dan kelopak bunganya dimanfaatkan untuk pembuatan teh herbal aromatik. Daun nipah yang sudah tua bermanfaat untuk membuat atap rumah dan kerajinan tangan. Buah nipah memiliki rasa manis dan dapat dijadikan *dessert* serta bahan pembuatan obat-obatan herbal [17,18]. Sabut buah nipah tidak dimanfaatkan dan hanya dianggap sebagai limbah dari buah nipah. Sabut buah nipah memiliki kandungan lignoselulosa yang mengindikasikan adanya unsur karbon yang dapat dijadikan sebagai bahan pembuatan karbon aktif.

Aktivasi fisika merupakan salah satu metode yang digunakan untuk pembuatan material karbon pada lingkungan pengoksidasi seperti udara, oksigen, uap, karbon dioksida atau campurannya pada temperature 450°C – 900°C [1]. Gas karbon dioksida memiliki karakteristik bersih dan dapat mempertahankan elektroda karbon pada temperature tinggi. Tujuan utama dari proses aktivasi adalah untuk meningkatkan volume pori, diameter pori dan memperbaiki struktur pori dan porositas elektroda karbon.

Proses aktivasi fisika menyebabkan mikropori yang terbentuk pada proses sebelumnya melebar mengacu pada pembentukan pori-pori dengan diameter lebih besar akibat terkikisnya dinding antara mikropori dan terbentuknya pori-pori baru, sehingga meningkatkan luas permukaan spesifik. Tingkat pembentukan porositas tergantung pada sifat gas yang digunakan dan suhu aktivasi. Sifat-sifat ini menentukan struktur berpori dari elektroda karbon berpori dari porositas tinggi hingga rendah.

Studi ini berfokus pada pembuatan material karbon berpori turunan Sabut nipah, berbiaya rendah dan terbarukan. Pengoptimalan suhu pengaktifan CO₂ dipilih sebagai pembentukan struktur berpori untuk mencapai performa kinerja elektrokimia tinggi sebagai bahan elektroda untuk superkapasitor.

METODE PENELITIAN

Biomassa sabut nipah (SN) dibersihkan dan dikeringkan menggunakan cahaya matahari. SN dengan massa yang konstan dilakukan pra-karbonisasi selama 60 menit pada temperatur 200°C pada keadaan vakum. Proses selanjutnya SN di ball-milling untuk menghasilkan serbuk dengan ukuran yang homogen, kemudian diaktivasi kimia menggunakan KOH 0.5 M selama 2 jam serta dikeringkan pada suhu 110°C. Sampel yang sudah kering dicetak menggunakan hidraulik press untuk menghasilkan elektroda karbon berbentuk seperti koin. Proses selanjutnya yaitu karbonisasi-aktivasi fisika secara terintegrasi dengan memasukkan pelet ke dalam tungku tabung horizontal dan dipanaskan pada laju 3 °C/min hingga 600°C, di mana suhu sampel dipertahankan selama 60 menit di bawah atmosfer nitrogen pada laju aliran 1.5 l/min. Pemanasan dilanjutkan dengan laju 10 °C/min hingga 800°C, di mana suhu sampel dipertahankan selama 60 menit di bawah atmosfer karbon dioksida pada laju aliran 1 l/min. Pada proses pemanasan tahap kedua (aktivasi fisika) suhu divariasikan 700°C,

800°C, dan 900°C, dan masing-masing sampel diberi kode dengan SN-700, SN-800, dan SN-900. Selanjutnya, sampel didinginkan hingga suhu kamar dibawah atmosfer nitrogen, kemudian dinetralkan menggunakan larutan aquades hingga pH ~7, lalu dikeringkan pada suhu 110°C. Elektroda karbon yang dihasilkan dilakukan pengukuran densitas menggunakan timbangan dan jangka sorong.

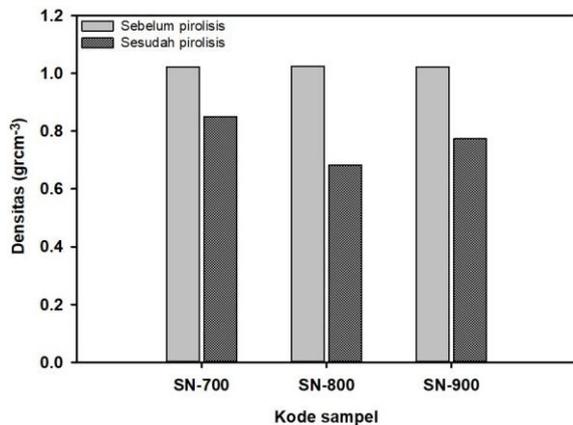
Rangkaian sel superkapasitor terdiri dari elektroda karbon SN simetri yang telah direndam larutan elektrolit H₂SO₄ 1 M selama 48 jam. Separator dari membran kulit ari telur ayam dan pengupul arus menggunakan *stainless steel*. Rangkaian superkapasitor disusun seperti sandwich. Pengukuran elektrokimia menggunakan metode *cyclic voltammetry* (CV UR Rad-Far 5831, Pekanbaru) dan *galvanostatic charge-discharge* (GCD UR Rad-Far 5831, Pekanbaru) digunakan untuk menentukan kapasitansi spesifik, rapat daya, rapat energi dan IR drop dari sel superkapasitor. Metode *cyclic voltammetry* (CV) menggunakan potensial 0-1 V pada laju pemindaian 1, 2, 5, dan 10 mV/s. Metode *galvanostatic charge-discharge* (GCD) menggunakan potensial 0-1 V pada rapat arus 1, 2, 5, dan 10 Ag⁻¹.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Penyusutan Densitas

Nilai densitas yang dimiliki elektroda karbon berhubungan dengan pembentukan struktur pori, ukuran partikel, dan resistansi yang dihasilkan saat pengukuran sel superkapasitor. Gambar 1 menunjukkan hasil pengukuran densitas sebelum dan sesudah dilakukan proses pirolisis dari elektroda karbon SN dengan variasi suhu pengaktifan CO₂. Sampel SN-700, SN-800 dan SN-900 memiliki densitas dengan perbedaan yang relatif kecil sebelum dilakukannya proses pirolisis masing-masing sebesar 1,0215 g/cm³, 1,0251 g/cm³, dan 1,0224 g/cm³, sedangkan penyusutan densitas yang signifikan terjadi setelah pirolisis

masing-masing sebesar $0,8507 \text{ g/cm}^3$, $0,6833 \text{ g/cm}^3$, dan $0,7745 \text{ g/cm}^3$ secara berturut-turut. Penyusutan densitas secara umum terjadi disebabkan oleh penghilangan senyawa selain karbon, pemutusan rantai karbon, dan pembentukan pori-pori baru.

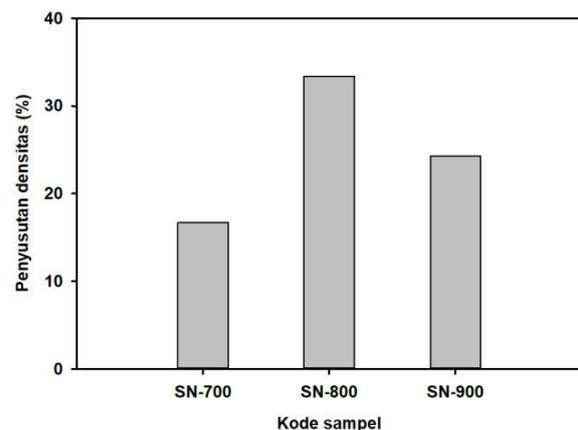


Gambar 1. Diagram batang densitas sebelum dan sesudah pirolisis dari elektroda karbon SN dengan variasi suhu pengaktifan CO₂.

Proses pirolisis masing-masing berperan dalam penyusutan densitas, proses karbonisasi menyebabkan terjadi penguapan air dan menghadirkan kelembaban pada material, terjadi dekomposisi lignoselulosa dan pembentukan struktur kerangka karbon, serta menyebabkan konsolidasi dari struktur elektroda karbon [19]. Proses aktivasi fisika terdiri dari tiga tahap yang terjadi pada suhu tinggi ($700^\circ\text{C} - 900^\circ\text{C}$). Tahap pertama, gas CO₂ bereaksi dengan atom karbon dan senyawa *volatile* yang tidak teratur untuk membuka pori-pori yang tertutup dan mengekspos permukaan karbon selama proses pirolisis. Pada tahap kedua, pori-pori yang terbentuk diperbesar secara intensif, atom-atom karbon pada permukaan bereaksi dengan aktivator, sehingga meninggalkan *hole-hole* pada kerangka karbon. Tahap ketiga, pembentukan situs aktif di permukaan kerangka karbon yang bereaksi dengan gas CO₂ secara terus-menerus sehingga menghasilkan pori-pori baru [9].

Gambar 2 menunjukkan persentase penyusutan densitas elektroda karbon SN dengan variasi suhu aktivasi fisika. Persentase penyusutan tertinggi dimiliki oleh SN-800 yaitu

sebesar 33,4 %, disebabkan oleh peningkatan suhu pengaktifan CO₂ dapat menyebabkan matriks karbon dan gas CO₂ bereaksi secara komprehensif [20]. Fenomena ini menghasilkan produk *solvothermal* yang menguap untuk menghasilkan mikropori. Sementara itu, CO₂ di antara bidang lapisan karbon juga menyebabkan ekspansi kisi karbon, yang disebabkan oleh efek interkalasi CO₂, yang bertindak sebagai aktivator untuk menghasilkan pori-pori pada proses pirolisis. Peningkatan suhu di atas 800°C menyebabkan pengaktifan CO₂ terjadi secara eksensif menghasilkan deformasi, keruntuhan dan degradasi muka pada kerangka karbon [21]. Pengaktifan CO₂ dibawah suhu 800°C menyebabkan interaksi kisi karbon dengan gas CO₂ berfluktuasi, sehingga pori baru yang terbentuk berjumlah sedikit dan pori dasar pada kerangka karbon mengalami pengembangan dengan jumlah yang sedikit [22].

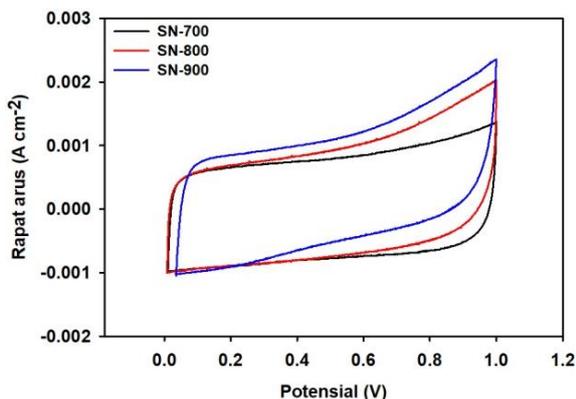


Gambar 2. Diagram batang persentase penyusutan densitas elektroda karbon dengan variasi suhu pengaktifan CO₂.

Analisis *Cyclic Voltammetry*

Pengukuran CV dilakukan menggunakan sistem dua elektroda simetris di dalam elektrolit berair H₂SO₄ 1 M untuk mengevaluasi kinerja elektrokimia sel superkapasitor berbasis sabut nipah. Gambar 3 menunjukkan kurva CV SN dengan variasi pengaktifan CO₂ pada laju pemindaian 1 mV/s. Kurva yang terbentuk dari sampel SN memiliki bentuk kuasi persegi

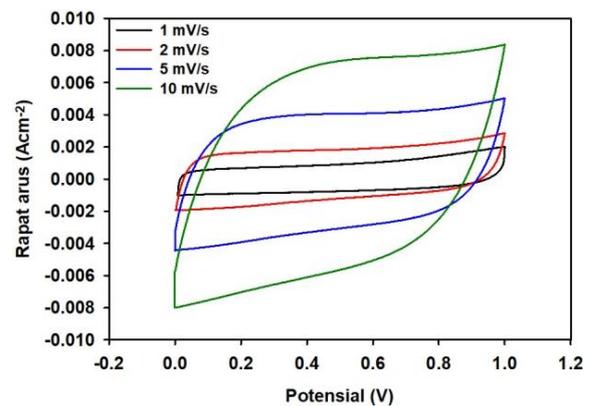
panjang, yang sesuai dengan kapasitor lapisan ganda listrik (EDLC) [23]. Kurva masing-masing sampel memiliki luas kurva yang berbeda, yang membuktikan adanya pengaruh dari variasi suhu aktivasi fisika. Suhu aktivasi fisika yang meningkat pada SN-800 menyebabkan penyusutan densitas terendah yang berhubungan dengan pembentukan pori-pori dengan jumlah terbanyak pada matriks karbon. Fenomena tersebut juga menyebabkan sampel SN-800 mengakumulasi ion-ion elektrolit dengan jumlah terbanyak dan menghasilkan arus pada proses pengisian dan pengosongan yang tinggi menyebabkan kurva yang terbentuk lebih besar dan kapasitansi spesifik yang tinggi. Luas daerah kurva yang terbentuk dengan laju pemindaian yang sama menunjukkan besarnya nilai kapasitansi spesifik, semakin besar luas permukaan kurva yang terbentuk maka semakin tinggi nilai kapasitansi spesifiknya. Sampel SN-800 memiliki luas kurva terbesar dengan nilai C_{sp} 230 F/g dan sampel SN-700 memiliki kurva terkecil dengan nilai C_{sp} 128 F/g. Nilai kapasitansi spesifik sampel SN-900 sebesar 178 F/g.



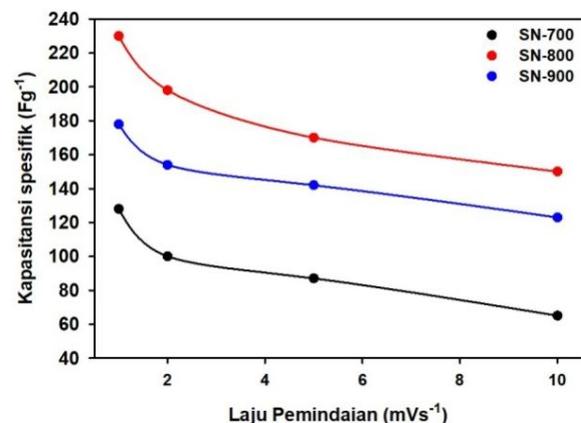
Gambar 3. Kurva CV dari sel Supercapacitor berbasis sabut nipah dengan laju pemindaian 1 mV/s

Gambar 4 menunjukkan kurva CV dengan laju pemindaian mulai dari 1 – 10 mV/s pada potensial 0 – 1 V. Semua sampel karbon berpori menunjukkan kurva CV berbentuk kuasi persegi panjang tanpa deformasi yang berbeda bahkan pada pemindaian 10 mV/s,

menunjukkan perilaku kapasitif yang baik. Performa kapasitif yang relatif tinggi dapat disebabkan oleh difusi dan transmisi muatan yang sangat baik di dalam struktur pori-pori. Laju pemindaian yang meningkat menyebabkan kurva CV menjadi lebih luas dan mempertahankan bentuk kuasi persegi panjang, yang dapat dikaitkan dengan resistansi polarisasi kecil dan pergerakan ion-ion elektrolit dengan kecepatan yang tinggi selama proses pengisian-pengosongan muatan [23].



Gambar 4. Kurva CV dari sampel SN-800 dengan variasi laju pemindaian.



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

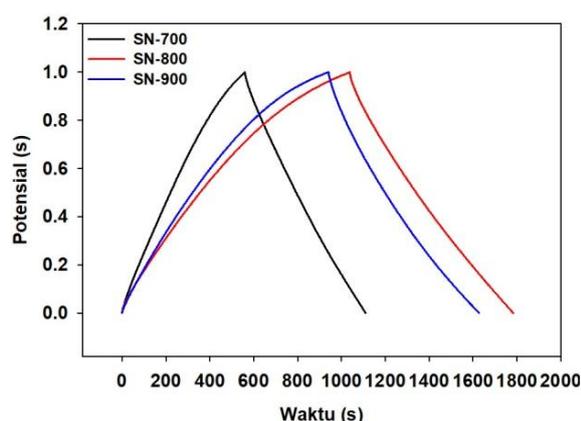
Gambar 5 menunjukkan hubungan laju pemindaian dengan nilai kapasitansi spesifik dari elektroda SN. Tingkat pemindaian yang rendah menunjukkan nilai kapasitansi spesifik yang lebih tinggi, yang disebabkan oleh ion-ion elektrolit dapat berdifusi dan berinteraksi dengan baik ke dalam pori-pori elektroda yang dapat diakses. Pada tingkat laju pemindaian yang lebih tinggi, aksesibilitas yang buruk atau

ketersediaan waktu yang lebih rendah untuk ion ditransfer dari elektrolit ke permukaan elektroda, dan dengan demikian menyebabkan penurunan nilai kapasitansi spesifik [24].

Analisis Galvanostatic Charge Discharge

Pengukuran GCD dilakukan dalam sistem dua elektroda simetris untuk menyelidiki lebih lanjut sifat elektrokimia sampel SN seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Kurva GCD dari semua sampel menunjukkan bentuk kuarsi segitiga tanpa penurunan tegangan yang jelas, menunjukkan fitur kinerja kapasitif kapasitor lapisan ganda listrik yang baik, resistansi seri rendah, efisiensi Coulomb tinggi dan reversibilitas pengisian-pengosongan muatan yang sangat baik [25].

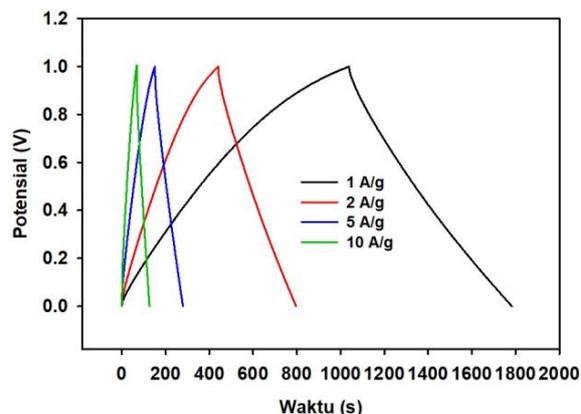
SN-800 memiliki bentuk kurva dengan luas terbesar yang disebabkan oleh waktu pengisian dan pengosongan yang lebih lama dibandingkan dengan sampel lainnya, hasil ini juga berkorespondensi dengan hasil yang diperoleh dari uji CV dengan SN-800 memiliki nilai kapasitansi spesifik tertinggi dibandingkan dengan sampel lainnya. Kapasitansi spesifik dari sampel SN-700, SN-800 dan SN-900 masing-masing sebesar 115 F/g, 247 F/g, dan 187 F/g secara berturut-turut.



Gambar 6. Kurva GCD dari sel superkapasitor dengan rapat Arus 1 A/g.

Gambar 7 menunjukkan kurva GCD dari sampel SN-800 dengan kerapatan arus 1 A/g, 2 A/g, 5 A/g, dan 10 A/g. Bentuk kuarsi segitiga dapat dipertahankan ketika peningkatan

kerapatan arus dilakukan yang mengindikasikan reversibilitas dalam kemampuan penyimpanan muatan dari bahan elektroda sel superkapasitor sangat baik.



Gambar 7. Kurva GCD dari sampel SN-800 dengan variasi rapat arus.

KESIMPULAN

Prekursor karbon biomassa disiapkan dengan proses pra-karbonisasi pada suhu rendah dari limbah sabut nipah yang murah dan melimpah, kemudian diaktifkan oleh KOH dan CO₂ untuk mendapatkan karbon aktif berpori. Karya ini mempelajari pengaruh suhu aktivasi CO₂ terhadap kinerja elektrokimia dari elektroda karbon SN. Suhu aktivasi yang digunakan adalah 700°C, 800°C, dan 900°C di lingkungan CO₂. Suhu aktivasi CO₂ untuk memperoleh kinerja terbaik dari elektroda SN adalah pada suhu 800°C. SN-800 memiliki nilai kapasitansi spesifik, sebesar 247 F/g. Berdasarkan dari proses persiapan yang sederhana, bahan baku yang murah, reversibilitas dan kinerja elektrokimia yang sangat baik, karbon berpori dari sabut nipah akan menjadi bahan elektroda yang menjanjikan untuk superkapasitor.

REFERENSI

- De, B., Banerjee, S., Pal, T., Verma, K. D., Tyagi, A., Manna, P. K., & Kar, K. K. (2020). Transition metal oxide-/carbon-/electronically conducting polymer-based ternary composites as electrode materials for supercapacitors. *Handbook of*

- Nanocomposite Supercapacitor Materials II: Performance*, 387–434.
2. Wang, Y., Qu, Q., Gao, S., Tang, G., Liu, K., He, S., & Huang, C. (2019). Biomass derived carbon as binder-free electrode materials for supercapacitors. *Carbon*, **155**, 706–726.
 3. Gopalakrishnan, A., & Badhulika, S. (2020). Effect of self-doped heteroatoms on the performance of biomass-derived carbon for supercapacitor applications. *Journal of power sources*, **480**, 228830.
 4. Wei, X., Li, Y., & Gao, S. (2017). Correction: Biomass-derived interconnected carbon nanoring electrochemical capacitors with high performance in both strongly acidic and alkaline electrolytes. *Journal of Materials Chemistry A*, **5**(38), 20505–20505.
 5. 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.
 6. Wang, J., Zhang, X., Li, Z., Ma, Y., & Ma, L. (2020). Recent progress of biomass-derived carbon materials for supercapacitors. *Journal of Power Sources*, **451**, 227794.
 7. Kar, K. K. (2020). *Handbook of nanocomposite supercapacitor materials II*, **302**.
 8. Islam, M. A., Ong, H. L., Halim, K. A. A., Ganganboina, A. B., & Doong, R. A. (2021). Biomass-derived cellulose nanofibrils membrane from rice straw as sustainable separator for high performance supercapacitor. *Industrial Crops and Products*, **170**, 113694.
 9. Jiang, G., Senthil, R. A., Sun, Y., Kumar, T. R., & Pan, J. (2022). Recent progress on porous carbon and its derivatives from plants as advanced electrode materials for supercapacitors. *Journal of Power Sources*, **520**, 230886.
 10. 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.
 11. 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.
 12. Sundriyal, S., Shrivastav, V., Pham, H. D., Mishra, S., Deep, A., & Dubal, D. P. (2021). Advances in bio-waste derived activated carbon for supercapacitors: Trends, challenges and prospective. *Resources, Conservation and Recycling*, **169**, 105548.
 13. Zhang, X., Sun, B., Fan, X., Liang, P., Zhao, G., Saikia, B. K., & Wei, X. (2022). Hierarchical porous carbon derived from coal and biomass for high performance supercapacitors. *Fuel*, **311**, 122552.
 14. Pang, X., Cao, M., Qin, J., Li, X., & Yang, X. (2022). Synthesis of bamboo-derived porous carbon: Exploring structure change, pore formation and supercapacitor application. *Journal of Porous Materials*, **29**(2), 559–569.
 15. Jalalah, M., Sivasubramaniam, S. S., Aljafari, B., Irfan, M., Almasabi, S. S., Alsuwian, T., ... & Harraz, F. A. (2022). Biowaste assisted preparation of self-nitrogen-doped nanoflakes carbon framework for highly efficient solid-state supercapacitor application. *Journal of Energy Storage*, **54**, 105210.
 16. Subramanian, D., Raju, G., Palanivel, B., Al-Zaqri, N., & Hossain, M. S. (2022). Exploration of ONS heteroatom self-doped mesoporous activated carbon derived from *Datura stramonium* seed pods as a

- potential electrode for supercapacitor application. *Ionics*, **28**(5), 2363–2375.
17. Moudingo, J. H., Ajonina, G., Dibong, D., & Tomedi, M. (2020). Distribution, devastating effect, and drivers of the exotic mangrove *Nypa fruticans* Van Wurmb (Arecaceae) on the mangroves of West and Central Africa. *Biotechnological Utilization of Mangrove Resources*, 49–78.
 18. Tamunaidu, P., & Saka, S. (2011). Chemical characterization of various parts of nipa palm (*Nypa fruticans*). *Industrial Crops and Products*, **34**(3), 1423–1428.
 19. Farma, R., Putri, A., Taer, E., Awitdrus, A., & Apriwandi, A. (2021). Synthesis of highly porous activated carbon nanofibers derived from bamboo waste materials for application in supercapacitor. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **32**, 7681–7691.
 20. Baig, M. M., & Gul, I. H. (2021). Conversion of wheat husk to high surface area activated carbon for energy storage in high-performance supercapacitors. *Biomass and Bioenergy*, **144**, 105909.
 21. Jiang, C., Yakaboylu, G. A., Yumak, T., Zondlo, J. W., Sabolsky, E. M., & Wang, J. (2020). Activated carbons prepared by indirect and direct CO₂ activation of lignocellulosic biomass for supercapacitor electrodes. *Renewable Energy*, **155**, 38–52.
 22. Saka, C., Baytar, O., Yardim, Y., & Şahin, Ö. (2020). Improvement of electrochemical double-layer capacitance by fast and clean oxygen plasma treatment on activated carbon as the electrode material from walnut shells. *Biomass and Bioenergy*, **143**, 105848.
 23. Gunasekaran, S. S., Gopalakrishnan, A., Subashchandrabose, R., & Badhulika, S. (2021). Single step, direct pyrolysis assisted synthesis of nitrogen-doped porous carbon nanosheets derived from bamboo wood for high energy density asymmetric supercapacitor. *Journal of Energy Storage*, **42**, 103048.
 24. Gupta, G. K., Sagar, P., Pandey, S. K., Srivastava, M., Singh, A. K., Singh, J., ... & Srivastava, A. (2021). In situ fabrication of activated carbon from a bio-waste *desmostachya bipinnata* for the improved supercapacitor performance. *Nanoscale research letters*, **16**(1), 85.
 25. Xiao, K., Ding, L. X., Chen, H., Wang, S., Lu, X., & Wang, H. (2016). Nitrogen-doped porous carbon derived from residuary shaddock peel: a promising and sustainable anode for high energy density asymmetric supercapacitors. *Journal of Materials Chemistry A*, **4**(2), 372–378.



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