

## Potential of palm frond waste as a basic material for making porous activated carbon

Novi Yanti<sup>1</sup>, Pharada Kresna<sup>2</sup>, Muhammad Nasir<sup>3</sup>, Rakhmawati Farma<sup>1</sup>,  
Lilik Tri Hardanto<sup>4</sup>, Rika Taslim<sup>5</sup>, Erman Taer<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Universitas Riau, Pekanbaru 28293, Indonesia

<sup>2</sup>State Junior High School, SMPN 1 Tapung Hulu, Tapung Hulu 28465, Indonesia

<sup>3</sup>Department of Physics Education, Universitas Riau, Pekanbaru 28293, Indonesia

<sup>4</sup>Aspen Technology, AspenTech, Jakarta 12190, Indonesia

<sup>5</sup>Department of Industrial Engineering, UIN Sultan Syarif Kasim, Pekanbaru 28293, Indonesia

\*Corresponding author: [erman.taer@lecturer.unri.ac.id](mailto:erman.taer@lecturer.unri.ac.id)

### ABSTRACT

Palm frond waste (*Elaeis guineensis* Jacq.) has been successfully processed as a raw material in the manufacture of porous activated carbon through the development of tools and methods. Preparation of raw materials, drying, pre-carbonization using an energy-efficient furnace, washing, integrated pyrolysis ( $N_2/H_2O$ ), neutralization, and conversion of carbon powder into monolith coins are the general steps for making porous activated carbon. The focus of this research lies in increasing the production of activated carbon from a laboratory scale to an industrial scale through efficiency in all aspects of production. Precarbonization and pyrolysis are important stages in increasing the scale of activated carbon production. Currently, the conversion of biomass waste into carbon is still on a laboratory scale, namely by using an electric oven which is not time efficient, not economical and not energy efficient. Increasing the scale of pre-carbonization is carried out by replacing the use of electric ovens with modified energy-saving furnaces that can increase carbon production up to 74% in a very efficient time. Furthermore, the physical activation stage (pyrolysis) is carried out in a water vapor ( $H_2O$ ) environment and without the addition of chemicals as activating agents, of course it is more economical and environmentally friendly. This scale-up is the main key in the development of porous carbon which has high potential for application as a component in energy storage devices, namely electrodes in supercapacitors. Through these results it is known that the fronds of palm leaves have great potential as a basic material for making sustainable activated carbon to be forwarded to an industrial scale.

**Keywords:** Palm fronds; porous activated carbon; production efficiency; production scale

Received 26-10-2023 | Revised 07-11-2023 | Accepted 21-12-2023 | Published 31-03-2024

### PENDAHULUAN

Akhir-akhir ini, material karbon aktif yang diaplikasikan pada berbagai komponen piranti elektronik karena memiliki geometri unik telah menjadi menarik. Hal ini karena karbon aktif memiliki stabilitas termal dan konduktivitas elektrokimia yang sangat luar biasa [1, 2]. Material karbon aktif dengan struktur pori morfologi unik menjadi sangat menjanjikan karena tersusun dari struktur mikro superior dengan porositas yang dapat diatur dan kinerja elektrokimia yang baik [3, 4]. Produksi karbon aktif dengan struktur pori melimpah telah dilakukan melalui pendekatan yang sederhana

dalam tahap percobaan. Prakarbonisasi dan pirolisis merupakan tahapan yang dapat ditingkatkan sehingga proses pembuatan elektroda superkapasitor menjadi lebih efisien dan hemat energi [5, 6].

*Up-scaling* prakarbonisasi dilakukan dengan mengganti penggunaan oven listrik menjadi tanur hemat energi. Prakarbonisasi menggunakan tanur dapat memaksimalkan produksi karbon hingga 200 kali lebih banyak dibanding penggunaan oven listrik. Pada tahap pirolisis terintegrasi satu tahap, scale up dilakukan dengan mengganti serapan gas karbon dioksida ( $CO_2$ ) menjadi uap air ( $H_2O$ ) untuk membuka struktur pori karbon saat

proses aktivasi fisika yang menghemat biaya dan ramah lingkungan [7]. Selain itu, untuk mendapatkan kinerja elektrokimia yang seragam dari karbon aktif *low-cost* ini, dilakukan penghilangan metode aktivasi kimia yang kurang efisien. Berdasarkan penelitian sebelumnya, karbon aktif berpori dapat dihasilkan melalui metode yang lebih komplek dari bahan dasar limbah biomassa untuk diaplikasikan pada komponen piranti penyimpanan energi, pemurnian air, dan penyerapan gas CO<sub>2</sub> [8, 9]. Pemilihan biomassa sebagai pertimbangan permasalahan global dalam pengembangan karbon aktif yang berkelanjutan [10, 11].

Kelapa sawit merupakan salah satu jenis komoditas perkebunan yang memberikan peran strategis dalam mendukung pembangunan ekonomi Indonesia. Sebagai pertimbangan, menurut data Badan Pusat Statistik (BPS) produksi sawit di Indonesia sangat tinggi yaitu mencapai 45,12 juta ton pada tahun 2022. Indonesia juga menjadi negara penghasil sawit terbanyak di dunia dengan produksi mencapai 42,5% yang diikuti oleh Malaysia, Thailand, Kolombia, dan Nigeria. Sawit merupakan tanaman penghasil minyak goreng dengan kualitas yang diakui oleh dunia. Disamping pengolahan kelapa sawit menjadi minyak, dihasilkan juga produk sampingan dari limbah sawit seperti batang, tandan kosong, pelepah, buah, dan daun. Penanggulangan limbah sawit ini telah dioptimalkan dalam bidang industri sebagai media absorben. Merujuk kepada Tobi & Dennis (2021) telah menyiapkan kerangka karbon 3D menggunakan material dasar komposit limbah bio sawit melalui serangkaian proses karbonisasi [12]. Penelitian ini menghasilkan karbon aktif dengan porositas yang dapat diakses oleh ion bermuatan yang dapat meningkatkan kapasitansi spesifik. Bhattacharjya & Yu (2014) menganggap biomassa lidi sawit sebagai prekursor karbon potensial untuk menghasilkan karbon berpori 3D melalui proses karbonisasi-aktivasi fisika dengan impregnasi KOH [13]. Hasil ini juga menunjukkan kinerja elektrokimia yang tinggi

dari karbon aktif lidi sawit sebagai bahan dasar elektroda superkapasitor [14, 15].

Namun, penelitian yang memanfaatkan limbah pelepah sawit sebagai material pembuatan karbon berpori, khususnya untuk elektroda pada komponen sel superkapasitor masih dalam tahap awal (skala laboratorium). Pelepah sawit memiliki karakteristik berwarna hijau tua dengan ukuran mencapai 2 meter. Di sini, limbah pelepah sawit menjadi bahan dasar potensial karena kaya akan serat alami yang tersusun atas selulosa (50%), hemiselulosa (23%), dan lignin (21.7%), serta tingginya kadar karbon dan oksigen yang diharapkan mampu menghadirkan sifat fisika-kimia unggul untuk diaplikasikan sebagai bahan dasar karbon aktif berpori [16, 17]. Nanoselulosa penghasil karbon lebih banyak diproduksi dari tanaman dengan struktur non kayu salah satunya pelepah sawit [18]. Konversi pelepah sawit menjadi karbon aktif berpori ini dilakukan menggunakan peningkatan metode dan alat juga penghapusan sintesis kimia karbon, sehingga proses menjadi lebih sederhana dan hemat biaya.

Fokus dari penelitian ini terletak pada pembuatan karbon aktif berpori melalui pendekatan scale up dengan mempertahankan teknologi hijau yang hemat energi, efisien waktu dan tanpa penambahan bahan kimia yang mahal dan berbahaya. Keterbaruan penelitian ini adalah ditemukannya prekursor alami dari limbah pelepah sawit sebagai bahan dasar elektroda karbon untuk komponen piranti penyimpanan energi superkapasitor yang memiliki kemampuan elektrokimia yang seragam, eco-friendly, low cost, dan sustainable energy melalui scale up produksi. Penekanan kegiatan penelitian diarahkan pada pendekatan teknologi hijau melalui scale up prakarbonisasi dan pirolisis untuk mewujudkan superkapasitor dalam skala komersial. Untuk pertama kalinya, kami menggunakan limbah biomassa potensial pelepah sawit melalui peningkatan metode (prakarbonisasi dan aktivasi fisika) sebagai satu-satunya material dasar pembuatan karbon aktif melalui sintesis yang sederhana, dengan pirolisis terintegrasi satu tahap (karbonisasi-aktivasi fisika) untuk mendapatkan karbon

berpori yang menjanjikan berdasarkan perbedaan suhu karbonisasi dan waktu aktivasi fisika. Suhu karbonisasi yang berbeda 550°C, 600°C, dan 650°C diberikan saat proses karbonisasi yang berkontribusi dalam mengontrol optimalisasi penguapan unsur non-karbon. Kapasitansi spesifik yang relatif sama diharapkan dapat dihasilkan dari elektroda karbon aktif berbasis limbah pelepah sawit yang diperoleh, juga didukung oleh fitur menarik dari sistem pori yang dihasilkan seperti sifat amorf yang baik, keterbasahan yang tinggi dan penyediaan situs aktif antara elektroda dan elektrolit yang sesuai saat proses elektrokimia. Pemilihan prekursor limbah biomassa potensial pelepah sawit sebagai material pembuatan elektroda karbon merupakan strategi yang sangat cocok dan menjanjikan sebagai pembuka jalan baru untuk perangkat penyimpanan energi menuju skala komersial yang berkelanjutan, terbarukan, ramah lingkungan, dan hemat biaya.

## METODE PENELITIAN

Metode penelitian untuk pembuatan elektroda karbon berpori berbasis limbah pelepah sawit melalui peningkatan skala produksi dibagi menjadi beberapa tahapan yaitu persiapan awal, prakarbonisasi, persiapan lanjutan, pirolisis terintegrasi, dan karakterisasi. Pelepah sawit didapatkan dari residu perkebunan sawit di daerah Rumbai, Pekanbaru, Riau. Sebelumnya, prekursor dibersihkan dan dipotong menjadi bagian kecil (5 – 10 cm) untuk mempercepat proses pengeringan konvensional (penjemuran di bawah sinar matahari) hingga didapatkan penyusutan massa sampel < 6%. Selanjutnya, dilakukan prakarbonisasi melalui scale up metode yaitu penggunaan oven listrik menjadi tanur termodifikasi. Biasanya, prakarbonisasi dilakukan menggunakan oven listrik dari suhu 50°C – 250°C selama 2,5 jam dengan massa sampel 30 g. Pada penelitian ini, menggunakan tanur termodifikasi, prakarbonisasi dapat dilakukan dengan jumlah prekursor yang lebih banyak mencapai 10 kg dengan waktu pembakaran 1 jam untuk merubah sampel

biomassa mentah menjadi arang, merapuhkan, dan meningkatkan sifat swamerekat karbon yang dihasilkan. Kemudian, prekursor karbon yang diperoleh, dicuci menggunakan aquades untuk menghilangkan abu sisa pembakaran dan menetralkan derajat keasaman sampel (pH = 7). Karbon yang telah netral dikeringkan melalui penjemuran di bawah sinar matahari selama 2 hari untuk mendehidrasi kandungan air yang tersisa. Setelah itu, sampel dihaluskan partikelnya dalam skala mikrometer menggunakan alat mortar dan ballmilling. Selanjutnya, penyeragaman ukuran partikel karbon dengan pengayakan < 60  $\mu\text{m}$ . Selanjutnya, serbuk karbon dipirolisis menggunakan metode terintegrasi satu tahap dengan karbonisasi suhu 30°C – 600°C gas  $\text{N}_2$  dan aktivasi fisika hingga suhu 800°C gas  $\text{H}_2\text{O}$ . Kemudian, sampel dicetak menjadi bentuk koin monolit menggunakan alat *hydraulic press*. Selanjutnya, sampel karbon aktif dinetralkan pH-nya menggunakan 1 liter aquades dengan metode perendaman, dan dikeringkan kembali untuk dikarakterisasi.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Prakarbonisasi

Limbah biomassa, khususnya pelepah sawit memiliki potensi tinggi untuk diolah sebagai sumber karbon karena tersusun atas kandungan alami selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Di sini, konversi pelepah sawit menjadi karbon dilakukan melalui proses prakarbonisasi menggunakan tanur hemat energi. Prakarbonisasi tanur (Gambar 1) dilakukan secara manual, sehingga tidak menghabiskan energi listrik untuk menghasilkan karbon dalam jumlah yang lebih banyak dan efektif. Pada penelitian ini, penggunaan tanur hemat energi yang dimodifikasi dapat mengkonversi 5 kg limbah pelepah sawit mentah hampir 4 kg arang/karbon. Berikut ini Gambar 1 adalah hasil pembakaran limbah pelepah sawit menggunakan tanur hemat energi.



**Gambar 1.** Konversi limbah biomassa (a) limbah kayu, (b) pelepah sawit tahap 1, (c) bambu, dan (d) pelepah sawit tahap 2 menjadi karbon menggunakan tanur hemat energi.

Proses prakarbonisasi dapat mendehidrasi kandungan air dan menghilangkan kelembaban sampel. Efektivitas penggunaan tanur dievaluasi dengan prakarbonisasi sampel limbah biomassa berbeda dengan lama waktu pembakaran yang beragam, ditampilkan pada Gambar 1. Limbah kayu, pelepah sawit tahap 1,

bambu, dan pelepah sawit tahap 2 mengkonfirmasi optimalisasi produksi karbon aktif. Karakteristik biomassa dan lama waktu pembakaran menjadi parameter kualitas karbon. Persentase karbon yang dihasilkan untuk masing-masing biomassa dirincikan seperti pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Perbandingan hasil prakarbonisasi limbah pelepah sawit dan biomassa lainnya.

| Sampel             | Waktu prakarbonisasi (jam) | Massa awal (kg) | Massa akhir (kg) | Penyusutan (kg) | Karbon (%) |
|--------------------|----------------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------|
| Limbah kayu        | 2.5                        | 5               | 2.5              | 2.5             | 50         |
| Pelepah sawit ke-1 | 2                          | 5               | 1.1              | 3.9             | 22         |
| Bambu              | 0.75                       | 5               | 2.4              | 2.6             | 48         |
| Pelepah sawit ke-2 | 0.5                        | 5               | 3.7              | 1.3             | 74         |

Prakarbonisasi menggunakan tanur hemat energi dikonvinsi dapat mengubah 5 kg sampel limbah biomassa kering menjadi karbon melalui satu kali pembakaran. Limbah kayu, pelepah sawit tahap-1, dan bambu menunjukkan persentase karbon yang beragam. Hasil ini dipengaruhi oleh komposisi dan tekstur biomassa, juga lama waktu prakarbonisasi. Waktu prakarbonisasi menggunakan tanur yang lebih lama mengakibatkan arang yang dihasilkan pada kondisi optimum berubah menjadi abu. Berdasarkan ini, untuk biomassa dengan tekstur padat seperti limbah pelepah sawit kering hanya membutuhkan waktu prakarbonisasi selama 30 menit untuk mengkonversi menjadi karbon. Selanjutnya, untuk mendapatkan partikel karbon yang lebih kecil dilakukan melalui teknik penghancuran secara manual dan mekanis. Pengerjaan secara manual ini dilakukan dengan cara menumbuk sampel karbon secara langsung menggunakan alat mortar. Sementara, penghancuran secara mekanis dilakukan dengan memanfaatkan pertumbukan antara bola-bola baja dengan sampel karbon di dalam tabung vakum yang dapat menghancurkan partikel karbon hingga skala mikrometer.

### **Karbon Aktif**

Selanjutnya, untuk mendapatkan keseragaman ukuran partikel karbon dilakukan dengan cara pengayakan menggunakan ayakan 60  $\mu\text{m}$ . Penyeragaman ukuran partikel karbon ini dimaksudkan untuk menghasilkan partikel karbon nanomaterial dengan sifat fisis yang lebih unggul. Selain itu, ayakan 60  $\mu\text{m}$  diasumsikan dapat menghasilkan matrik karbon yang memiliki pori antar partikel yang lebih baik dengan ikatan yang lebih kuat.

Setiap tahapan dari pengolahan limbah biomassa ini memberikan dampak yang signifikan terhadap sifat fisik dan kimia pada karbon aktif yang dihasilkan, dan mempengaruhi penerapannya. Perbedaan suhu dan waktu penahanan pada proses pirolisis baik itu pada karbonisasi dan aktivasi fisika

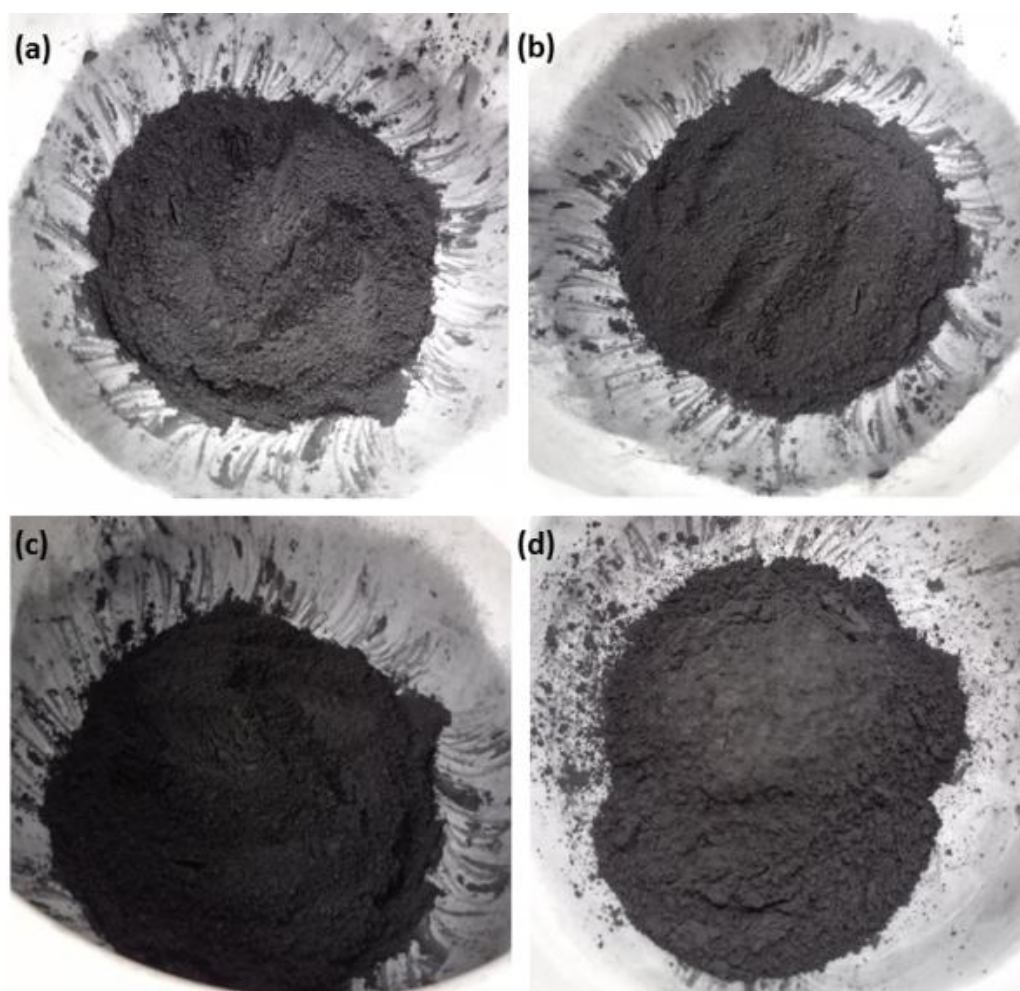
memberikan pengaruh langsung dalam persiapan dan struktur pori dalam matriks karbon. Karbonisasi merupakan bagian dari proses pirolisis untuk mengubah karbon menjadi karbon aktif melalui pemanasan hingga suhu tinggi pada ruang vakum. Proses karbonisasi terbagi menjadi tiga tahap, yaitu karbonisasi suhu rendah 300°C – 500°C, karbonisasi suhu menengah 550°C – 700°C, dan karbonisasi suhu tinggi 750°C – 1000°C. Pada pengolahan karbon pelepah sawit ini, suhu karbonisasi yang digunakan adalah 600°C yang bertujuan untuk menguapkan unsur selain karbon yang melekat pada sampel [19, 20]. Kelembapan, kandungan air, dan unsur volatil merupakan contoh unsur non-karbon yang harus dihilangkan untuk mencapai kemurnian karbon. Senyawa volatil merupakan unsur pengotor pada sampel karbon yang terdiri dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang akan dikeluarkan dalam bentuk gas yang menguap. Proses karbonisasi biasanya dilakukan dengan mengalirkan beberapa gas tertentu seperti nitrogen, argon, karbon dioksida, dan uap air kedalam tabung furnace [21, 22]. Pengolahan karbon aktif berbasis limbah pelepah sawit pada tahap karbonisasi ini dilakukan dibawah pengaruh gas  $\text{N}_2$  yang bersifat inert untuk membantu menguapkan unsur selain karbon yang melekat pada sampel karbon.

Aktivasi fisika merupakan proses pembentukan dan modifikasi stuktur pori karbon aktif dalam lingkungan gas pengoksidasi seperti  $\text{H}_2\text{O}$  atau  $\text{CO}_2$  [23], yang bertujuan untuk membantu memperbesar pori, menghilangkan pengotor pada karbon, dan meningkatkan konduktivitas pada koin karbon sampel [24]. Suhu aktivasi fisika yang berbeda telah diakui dapat memberikan efek fisika yang sangar besar, seperti pada luas permukaan spesifik dan total volume pori yang dihasilkan. Suhu pirolisis yang tinggi dapat meningkatkan perkembangan struktur pori dari mikropori ke mesopori hingga makropori yang mendukung peningkatan luas permukaan dan penyediaan jalur transportasi ion yang sesuai antara elektroda dan elektrolit untuk meningkatkan sifat elektrokimia [25, 26]. Lebih lanjut, perlu

dilakukan kajian terlebih dahulu dalam pemilihan suhu aktivasi fisika yang sesuai. Hal ini karena kerangka karbon berbasis limbah biomassa memiliki sifat yang mudah terdegradasi pada suhu tinggi, yang dapat menyebabkan runtuhnya struktur pori [27–30]. Kerusakan pori pada kerangka karbon ini akan memberikan dampak buruk pada kinerja elektrokimia karena dapat mengurangi kelancaran akses ion elektrolit mengisi pori elektroda. Selama berlangsungnya proses aktivasi fisika, terjadi reaksi antara karbon dan uap air yang dialirkan, dengan reaksi berikut:



Reaksi antara karbon dan uap air pada proses aktivasi fisika akan menghasilkan perpindahan atom karbon dan mendorong pengembangan pembentukan struktur pori. Unsur oksigen yang terperangkap dalam sampel akan menguap dalam bentuk gas CO dan membuka struktur pori-pori yang tertutup. Selanjutnya juga terjadi reaksi antara CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O dengan banyak ikatan karbon hingga membentuk struktur pori baru [31]. Hasil dari proses pirolisis terintegrasi satu langkah (karbonisasi-aktivasi fisika / N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O) dari limbah pelepah sawit dan biomassa lainnya ditunjukkan pada Gambar 2.



**Gambar 2.** Kabon aktif berbasis limbah biomassa pelepah sawit berdasarkan waktu aktivasi fisika (a) 2 jam, (b) 2.5 jam, (c) 2.5 jam, dan (d) 3 jam.

### Produk Karbon Aktif

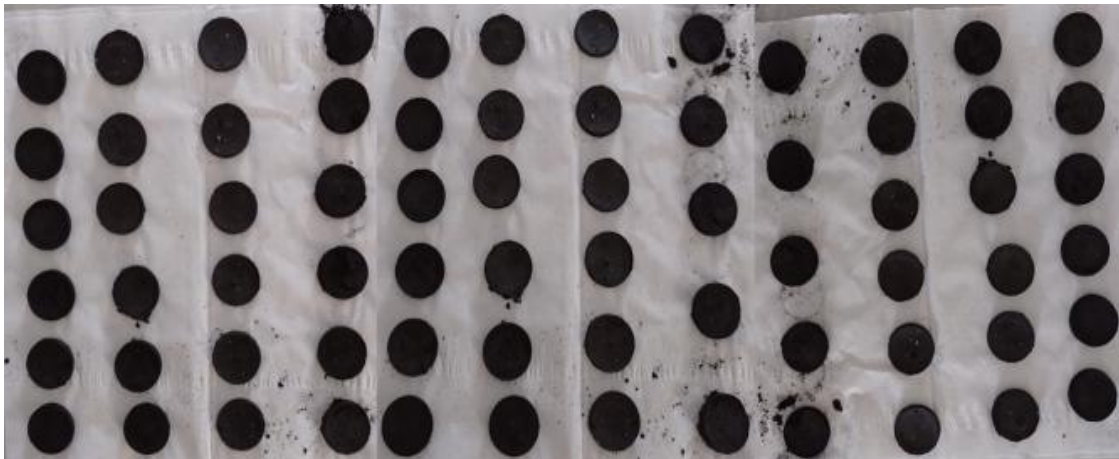
Selanjutnya, serbuk karbon aktif yang telah dihasilkan dikemas dalam bentuk padatan

berupa koin monolit. Pemadatan serbuk karbon ini dilakukan melalui penambahan bahan perekat 3 – 5 tetes 10% PVA untuk menghasilkan koin karbon monolit yang dicetak



menggunakan alat *hydraulic press* dengan tekanan 8 ton dan waktu penahanan selama 5 menit. Disini, dihasilkan padatan serbuk karbon

yang siap untuk diteruskan menjadi elektroda pada superkapasitor sebagai komponen penyimpanan ion bermuatan.



**Gambar 3.** Kabon aktif berbasis limbah pelepah sawit tahap 2 dalam bentuk koin monolit.

Ketentuan pencetakan ini adalah untuk menghasilkan koin karbon dengan struktur yang kuat dan tidak mudah rapuh. Koin karbon yang dihasilkan langsung dipanaskan ke menggunakan *oven* dengan suhu 100°C selama  $\pm 2$  jam untuk menguatkan perekatan.

## KESIMPULAN

Limbah pelepah daun sawit telah berhasil diolah menjadi karbon aktif melalui pengembangan alat dan metode. Produksi karbon yang ditingkatkan dengan pengembangan alat dan metode dengan penggunaan tanur hemat energi, tanpa penambahan bahan kimiadan pemanfaatan uap air ( $H_2O$ ) merupakan inovasi pengembangan dan menjadi langkah efisien dalam pengembangan produksi karbon aktif menuju skala industri. Efektivitas pengerjaan, peningkatan jumlah produksi, dan penghematan biaya menjadi keuntungan pada penelitian ini. Inovasi metode dan alat konversi limbah pelepah sawit menjadi karbon aktif ini sangat mendukung dalam pengembangan karbon aktif untuk diteruskan menuju skala komersial.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada LPPM Universitas Riau melalui Hibah

Kegiatan Pengabdian Program Kemitraan Masyarakat dengan No. Kontrak: 8379/UN.19.5.1.3/AL.04/2023.

## REFERENSI

1. Du, W., Wang, X., Zhan, J., Sun, X., Kang, L., Jiang, F., ... & Guo, Z. (2019). Biological cell template synthesis of nitrogen-doped porous hollow carbon spheres/ $MnO_2$  composites for high-performance asymmetric supercapacitors. *Electrochimica Acta*, **296**, 907–915.
2. Wang, Y., Liu, R., Tian, Y., Sun, Z., Huang, Z., Wu, X., & Li, B. (2020). Heteroatoms-doped hierarchical porous carbon derived from chitin for flexible all-solid-state symmetric supercapacitors. *Chemical Engineering Journal*, **384**, 123263.
3. Li, X., Tang, Y., Song, J., Yang, W., Wang, M., Zhu, C., ... & Lin, Y. (2018). Self-supporting activated carbon/carbon nanotube/reduced graphene oxide flexible electrode for high performance supercapacitor. *Carbon*, **129**, 236–244.

4. Wang, Q., Lai, Z., Luo, C., Zhang, J., Cao, X., Liu, J., & Mu, J. (2021). Honeycomb-like activated carbon with microporous nanosheets structure prepared from waste biomass cork for highly efficient dye wastewater treatment. *Journal of Hazardous Materials*, **416**, 125896.
5. Chen, W., Luo, M., Yang, K., Zhang, D., & Zhou, X. (2021). A clean and industrially applicable approach for the production of copper-doped and core-shell structured porous carbon microspheres as supercapacitor electrode materials. *Journal of Cleaner Production*, **282**, 124534.
6. De, S., Acharya, S., Sahoo, S., & Nayak, G. C. (2020). Present status of biomass-derived carbon-based composites for supercapacitor application. *Nanostructured, Functional, and Flexible Materials for Energy Conversion and Storage Systems*, 373–415.
7. Huang, J., Wu, J., Dai, F., & Li, C. M. (2019). 3D honeycomb-like carbon foam synthesized with biomass buckwheat flour for high-performance supercapacitor electrodes. *Chemical Communications*, **55**(62), 9168–9171.
8. Chen, C., Yu, D., Zhao, G., Du, B., Tang, W., Sun, L., ... & Yu, M. (2016). Three-dimensional scaffolding framework of porous carbon nanosheets derived from plant wastes for high-performance supercapacitors. *Nano Energy*, **27**, 377–389.
9. Jiang, H., Lee, P. S., & Li, C. (2013). 3D carbon based nanostructures for advanced supercapacitors. *Energy and Environmental Science*, **6**(1), 41–53.
10. Yang, L., Wang, J., Wang, S., Guan, X., Guan, X., & Wang, G. (2020). Biomass-derived multi-heteroatom-doped carbon materials for high-performance solid-state symmetric supercapacitors with superior long-term cycling stability. *Ionics*, **26**, 4141–4151.
11. Zhang, Z., Liu, L., Shen, B., & Wu, C. (2018). Preparation, modification and development of Ni-based catalysts for catalytic reforming of tar produced from biomass gasification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **94**, 1086–1109.
12. Tobi, A. R. & Dennis, J. O. (2021). Activated carbon from composite of palm bio-waste as electrode material for solid-state electric double layer capacitor. *Journal of Energy Storage*, **42**, 103087.
13. Bhattacharjya, D. & Yu, J. S. (2014). Activated carbon made from cow dung as electrode material for electrochemical double layer capacitor. *Journal of Power Sources*, **262**, 224–231.
14. Hussin, F., Aroua, M. K., & Yusoff, R. (2021). Adsorption of CO<sub>2</sub> on palm shell based activated carbon modified by deep eutectic solvent: Breakthrough adsorption study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **9**(4), 105333.
15. Zhao, J. & Burke, A. F. (2021). Review on supercapacitors: Technologies and performance evaluation. *Journal of Energy Chemistry*, **59**, 276–291.
16. Cao, M., Wang, Q., Cheng, W., Huan, S., Hu, Y., Niu, Z., ... & Wang, G. (2021). A novel strategy combining electrospraying and one-step carbonization for the preparation of ultralight honeycomb-like multilayered carbon from biomass-derived lignin. *Carbon*, **179**, 68–79.
17. Li, Y., Wang, G., Wei, T., Fan, Z., & Yan, P. (2016). Nitrogen and sulfur co-doped porous carbon nanosheets derived from willow catkin for supercapacitors. *Nano Energy*, **19**, 165–175.



18. Promdee, K., Chanvidhwatanakit, J., Satitkune, S., Boonmee, C., Kawichai, T., Jarenpasert, S., & Vitidsant, T. (2017). Characterization of carbon materials and differences from activated carbon particle (ACP) and coal briquettes product (CBP) derived from coconut shell via rotary kiln. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **75**, 1175–1186.
19. Shu, Y., Bai, Q., Fu, G., Xiong, Q., Li, C., Ding, H., ... & Uyama, H. (2020). Hierarchical porous carbons from polysaccharides carboxymethyl cellulose, bacterial cellulose, and citric acid for supercapacitor. *Carbohydrate Polymers*, **227**, 115346.
20. Taer, E., Yanti, N., Mustika, W. S., Apriwandi, A., Taslim, R., & Agustino, A. (2020). Porous activated carbon monolith with nanosheet/nanofiber structure derived from the green stem of cassava for supercapacitor application. *International Journal of Energy Research*, **44**(13), 10192–10205.
21. Arvas, M. B., Gürsu, H., Gencten, M., & Sahin, Y. (2021). Preparation of different heteroatom doped graphene oxide based electrodes by electrochemical method and their supercapacitor applications. *Journal of Energy Storage*, **35**, 102328.
22. Miller, E. E., Hua, Y., & Tezel, F. H. (2018). Materials for energy storage: Review of electrode materials and methods of increasing capacitance for supercapacitors. *Journal of Energy Storage*, **20**, 30–40.
23. Heidarinejad, Z., Dehghani, M. H., Heidari, M., Javedan, G., Ali, I., & Sillanpää, M. (2020). Methods for preparation and activation of activated carbon: A review. *Environmental Chemistry Letters*, **18**, 393–415.
24. Jjagwe, J., Olupot, P. W., Menya, E., & Kalibbala, H. M. (2021). Synthesis and application of granular activated carbon from biomass waste materials for water treatment: A review. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, **6**(4), 292–322.
25. Salleh, N. A., Kheawhom, S., & Mohamad, A. A. (2021). Chitosan as biopolymer binder for graphene in supercapacitor electrode. *Results in Physics*, **25**, 104244.
26. Scibioh, M. A. & Viswanathan, B. (2020). Chapter 3—Electrode materials for supercapacitors. *Materials for Supercapacitor Applications*, 35–204.
27. Gopi, C. V. M., Vinodh, R., Sambasivam, S., Obaidat, I. M., & Kim, H. J. (2020). Recent progress of advanced energy storage materials for flexible and wearable supercapacitor: From design and development to applications. *Journal of Energy Storage*, **27**, 101035.
28. Mohd, N. H., Kargazadeh, H., Miyamoto, M., Uemiy, S., Sharer, N., Baharum, A., ... & Othaman, R. (2021). Aminosilanes grafted nanocrystalline cellulose from oil palm empty fruit bunch aerogel for carbon dioxide capture. *Journal of Materials Research and Technology*, **13**, 2287–2296.
29. Taer, E., Yanti, N., Putri, J. A., Apriwandi, A., & Taslim, R. (2023). Novel macaroni-sponge-like pore structure biomass (*Zingiber officinale* Rosc. leaves)-based electrode material for excellent energy gravimetric supercapacitor. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, **98**(4), 990–1002.
30. Miao, L., Song, Z., Zhu, D., Li, L., Gan, L., & Liu, M. (2020). Recent advances in carbon-based supercapacitors. *Materials*

- Advances*, **1**(5), 945–966.
31. Li, X., Zhang, J., Liu, B., & Su, Z. (2021). A critical review on the application and recent developments of post-modified biochar in supercapacitors. *Journal of Cleaner Production*, **310**, 127428.



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