

## Analisa cyclic voltammetry dan galvanostatic charge discharge elektroda superkapasitor berbasis karbon aktif dari daun pisang kepok (*Musa balbisiana*)

## Analysis of cyclic voltammetry dan galvanostatic charge discharge electrode supercapacitor based on activated carbon from kepok banana leaf (*Musa balbisiana*)

Apriwdani, Erman Taer, dan Rakhmawati Farma

Received 14 January 2021  
Accepted 04 April 2021  
Published October 2021

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas  
Riau, Riau, Indonesia

**Abstrak.** Teknologi penyimpan energi elektrokimia yang ramah lingkungan merupakan aspek yang penting dalam menunjang kinerja sistem konversi energi terbarukan. Studi ini menyiapkan elektroda superkapasitor berbahan asal karbon aktif berpori limbah daun pisang kepok. Sampel dipreparasi melalui impregnasi Natrium hidroksida pada konsentrasi 0,5 m/L dan dipirolisis satu tahap meliputi karbonisasi dan aktivasi fisika. Serbuk karbon yang dihasilkan dikonversi dalam bentuk pellet atau monolit dengan menggunakan hidrolik press tanpa adanya penambahan bahan perekat. Proses karbonisasi dilakukan dari suhu kamar hingga 600 °C pada lingkungan gas N<sub>2</sub> sedangkan proses aktivasi fisika dilakukan dari suhu 600 °C hingga pada suhu tinggi dengan tiga jenis suhu yang berbeda meliputi 700 °C, 800 °C, dan 900 °C pada lingkungan gas CO<sub>2</sub>. Analisis densitas ditinjau sebagai evaluasi awal elektroda karbon berpori. Lebih lanjut, sifat elektrokimia superkapasitor dievaluasi melalui dua teknik yang berbeda meliputi teknik cyclic voltammetry (CV) dan galvanostatic charge discharge (GCD) pada sistem dua elektroda dalam elektrolit 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Kapasitansi spesifik pada teknik CV adalah sebesar 142 F/g sedangkan dengan teknik GCD menghasilkan kapasitansi spesifik sebesar 154 F/g pada resistansi 42·10<sup>-3</sup>Ω. Rapat daya dan rapat energi yang dihasilkan berturut-turut 20,45 Wh/kg dan 38,32 W/kg. Hasil ini mengkonfirmasi bahwa daun pisang berpotensi dijadikan sebagai karbon aktif berpori untuk material dasar elektroda superkapasitor.

**Abstract.** Environmentally friendly electrochemical energy storage technology is an important aspect of supporting global energy fulfillment as a contribution to improving the performance of renewable energy conversion systems. Currently, supercapacitors are considered as a superior electrochemical energy storage technology compared to others. This study performed a supercapacitor with electrodes made from porous activated carbon based on biomass waste, especially banana leaf waste. The sample was prepared by sodium hydroxide impregnated at a concentration of 0.5 m/L and one-step pyrolysis both carbonization and physical activation. The carbon powder is converted into pellets or monoliths using a hydraulic press without the addition of any adhesive materials. The carbonization process is performed from room temperature to 600 °C in an N<sub>2</sub> gas environment while the physical activation process is carried out from a temperature of 600 °C to a high temperature with three different types including 700 °C, 800 °C, and 900 °C in CO<sub>2</sub> gas atmosphere. Density analysis is reviewed as an initial evaluation of the porous carbon electrode. Furthermore, the electrochemical properties of the supercapacitor were evaluated through two different techniques including cyclic voltammetry (CV) and galvanostatic charge-discharge (GCD) in a two-electrode system in 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> electrolyte. The specific capacitance in the CV technique is 142 F/g while the GCD technique produces a specific capacitance of 154 F/g at resistance of 42·10<sup>-3</sup> Ω. The power density and energy densities for the K-900 are 20.45 Wh/kg and 38.32 W/kg, respectively. These results confirmed that banana leaves have the potential to be used as porous activated carbon for the supercapacitor electrode.

**Keywords:** Cyclic Voltammetry, Galvanostatic Charge-Discharge, Porous carbon, Electrode Materials, Supercapacitor ility.

### Pendahuluan

Superkapasitor merupakan teknologi penyimpanan energi listrik yang menyimpan dan melepaskan energi dengan pemisahan muatan nanoskopik pada antarmuka elektrokimia antara elektroda dan elektrolit (Gao et al., 2017). Penyimpanan muatan pada superkapasitor dibagi menjadi tiga jenis seperti kapasitor elektrokimia lapis gdana (EDLC), pseudo-kapasitor dan kapasitor hybrid (Jose et al., 2019). Kapasitor elektrokimia lapis gdana (EDLC) didasarkan pada lapisan gdana antar muka karbon dengan luas spesifik tinggi, sedangkan pseudo-kapasitor didasarkan pada pseudokapasitansi yang terkait dengan

proses elektrosorpsi dan redoks permukaan pada bahan elektroda seperti oksida logam dan konduksi polimer (H. Yang et al., 2019). Kapasitor hibrid adalah kombinasi dari elektroda jenis faradic yang digabungkan dengan elektroda lapis gdana atau yang sering disebut elektroda kapasitor asimetris. Meskipun kepadatan energi superkapasitor sangat tinggi dibandingkan dengan kapasitor konvensional, namun secara signifikan kepadatan energi ini masih lebih rendah dibandingkan dengan baterai (Abioye dan Ani, 2015; González et al., 2016). Lebih lanjut, superkapasitor dengan kinerjanya dianggap perlu untuk memasok energi dalam jangka

waktu yang lebih lama. Hal ini mendorong minat yang kuat pada para peneliti untuk meningkatkan kepadatan energi superkapasitor agar lebih mendekati kepadatan energi baterai.

Bahan elektroda adalah komponen kunci utama yang menentukan kinerja tinggi superkapasitor (Cheng et al., 2020; Deraman et al., 2016). Akhir-akhir ini, karbon berpori dari limbah biomassa menjadi sangat diminati oleh para peneliti sebagai bahan dasar elektroda untuk aplikasi penyimpanan energi. Hal ini dikarenakan karbon aktif berpori dari limbah biomassa menawarkan sifat fisis yang fantastis untuk menunjang sifat elektrokimia superkapasitor, diantaranya adalah Luas permukaan yang relative sangat tinggi, menyediakan struktur nanomaterial, memiliki kombinasi pori yang cocok, dan memiliki stabilitas kimia dan panas yang relatif baik, kesediaan berlimpah, dapat diperbarui, dan biaya rendah (Ayinla et al., 2019; Poonam et al., 2019). Berbagai laporan telah menyampaikan potensi limbah biomassa untuk mengembangkan bahan karbon berpori sebagai aplikasi elektroda superkapasitor (Manasa et al., 2020; Mary et al., 2019; Mehare et al., 2020)

Baru-baru ini, Yang *et al.*, melaporkan karbon berpori hirarkis dari limbah manggis (V. Yang et al., 2019). Mereka mengubah limbah manggis menggunakan metode karbonisasi dan aktivasi NaOH untuk memodifikasi karbon berpori. Luas permukaan yang dihasilkan sebesar 2623 m<sup>2</sup>/g dan kapasitansi spesifik yang luarbiasa sebesar 357 F/g. Hasil yang hampir sama juga ditunjukkan oleh limbah kulit buah naga yang dipreparasi melalui metode aktivasi KOH dengan luas permukaan 1870 m<sup>2</sup>/g dan kapasitansi spesifik 255 F/g (Lu et al., 2020). Lebih lanjut, sintesis karbon berpori dari limbah kapas dengan menggunakan metode swelling larutan NaOH/urea dan proses pirolisis telah menghasilkan karbon berpori hirarkis tinggi dan karbon nanofiber dengan kapasitansi spesifik 221 F/g (Liu et al., 2016). Namun demikian, preparasi karbon berpori yang telah disampaikan diatas masih menggunakan penambahan bahan sintetik meliputi bahan polimer, bahan logam oksida, dan perekat dan bahan sintetik lainnya dalam menguji performansi sel superkapasitor seperti PVDF atau PTFE yang bersifat isolator sehingga menghambat sifat kapasitif maksimum dari material dasar karbon berpori.

Pisang merupakan tanaman pertanian dan agroindustri yang memberikan kontribusi yang besar pada limbah biomassa dunia. Dalam beberapa dekade terakhir, produksi pisang meluas dari 35 juta menjadi 102 juta ton antara tahun 1978 dan 2012 dan diperkirakan hingga 2025 akan terus meningkat (Sellin et al., 2016). Potensi limbah daun pisang sangat besar sebagai karbon aktif karena memiliki kandungan lignoselulosa dan karbon yang relatif tinggi sebagaimana telah disampaikan oleh penelitian sebelumnya (Fernandes et al., 2013). Limbah daun pisang dikonversi menjadi karbon aktif melalui aktivasi kimia menghasilkan luas permukaan spesifik tinggi dalam

rentang 798,51-1466,7 m<sup>2</sup>/g dan ukuran pori rata-rata dalam rentang 2-3 nm (Salman dan Kadhim, 2017). Namun demikian, belum ada laporan yang menyatakan potensi karbon aktif dari daun pisang sebagai elektroda superkapasitor.

Selain itu, metode pengujian paling pasti untuk bahan elektroda karbon untuk mengevaluasi kinerjanya dalam skala penuh juga termasuk parameter yang penting untuk dipertimbangkan dalam menunjang superkapasitor agar dapat dikomersialkan. Ternyata penggunaan sel dalam ukuran besar tidak selalu menunjukkan kinerja yang riil pada superkapasitor, terutama saat menangani material berbahan asal karbon aktif yang menggunakan limbah biomassa sebagai prekursor. Perlu ditinjau prosedur eksperimental yang secara akurat mengevaluasi kinerja suatu bahan, cukup fleksibel dan cepat untuk menampung sejumlah besar sampel pada berbagai jenis dan jumlah bahan. Selain itu, hasil tes harus dapat diulang dan cocok dengan lokasi dan kelompok penelitian lain. Saat ini, metode pengukuran untuk menentukan kinerja suatu bahan tidak terstandarisasi dengan baik sehingga akibatnya sulit untuk menilai kinerja sebenarnya yang dilaporkan dalam literatur (Climent dan Feliu, 2018). Hal ini menghambat kemajuan dalam bidang material, khususnya bahan elektroda sebagai pengimplan energi. Namun demikian, diawal decade ini, para peneliti mengklaim bahwa metode *cyclic voltammetry* (CV) dan *galvanostatic charge discharge* (GCD) telah efektif menunjukkan hasil yang konsisten dalam mengevaluasi sifat elektrokimia elektroda superkapasitor, khususnya berbahan asal karbon berpori.

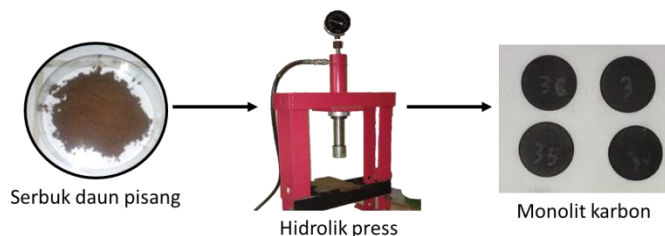
Objektif penelitian ini adalah menghasilkan elektroda superkapasitor dari karbon berpori limbah daun pisang melalui metode yang relatif ramah lingkungan menggunakan impregnasi NaOH dan pirolisis satu tahap terintegrasi dengan tanpa penambahan bahan sintetik seperti oksida logam, bahan konduksi polimer dan bahan sintetik lainnya kedalam material dasar. Selain itu, preparasi sel superkapasitor dalam sistem dua elektroda disiapkan tanpa adanya penambahan bahan perekat seperti PVDF atau PTFE yang bersifat isolator sehingga konduktivitas riil bahan terjaga. Lebih lanjut, evaluasi sifat elektrokimia diuji melalui dua metode meliputi *cyclic voltammetry* (CV) dan *galvanostatic charge discharge* (GCD) yang efektif dan efisien dalam mengevaluasi kinerja superkapasitor berbahan asal karbon berpori limbah biomassa.

## Metodologi

### *Preparasi karbon berpori dari daun pisang*

Limbah daun pisang kepek diperoleh dari ladang pertanian tradisional di provinsi Riau, yang kemudian dicuci, dipotong (4x5 cm) dan dikeringkan pada sinar matahari selama 2 hari. Selanjutnya dilakukan pra karbonisasi dalam oven pada suhu 250 °C selama 2,5 jam, dilanjutkan dengan penggilingan dan penghalusan untuk menghasilkan serbuk

prakarbonisasi yang homogen dengan ukuran partikel <53  $\mu\text{m}$ . Sampel ini kemudian diaktivasi secara kimia melalui  $0.5 \text{ m L}^{-1}$  Natrium Hidroksida (NaOH) dengan menggunakan instrumen hotplate pada suhu  $80^\circ\text{C}$  dan kecepatan putar 300 rpm, dan setelahnya dikeringkan pada oven pengering suhu  $110^\circ\text{C}$ .



Gambar 1. Konversi serbuk menjadi monolit.

Lebih lanjut, serbuk karbon aktif dikonversi menjadi bentuk monolit dengan menggunakan hidrolik press pada beban yang setara  $\pm 8$  ton. Semua sampel dipirolisis terintegrasi satu tahap meliputi karbonisasi pada suhu  $600^\circ\text{C}$  di lingkungan gas  $\text{N}_2$ , dan aktivasi fisika pada lingkungan gas  $\text{CO}_2$  selama 2,5 jam. Suhu aktivasi fisika dibedakan menjadi tiga meliputi  $700^\circ\text{C}$ ,  $800^\circ\text{C}$ , dan  $900^\circ\text{C}$ . Berdasarkan variasi suhu ini, sampel diberi label K-700, K-800, dan K-900 untuk memudahkan dalam analisa dan interpretasi data. Tahap terakhir adalah preparasi sel superkapasitor dalam bentuk susunan koin yang terdiri dari dua elektroda karbon dari limbah daun pisang, elektrolit  $1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ , pengumpul arus berbahan stainless steel, dan separator dari membran kulit telur itik (Taer et al., 2020b).

#### Karakterisasi sel superkapasitor

Analisis perubahan densitas merupakan faktor pertama yang dipertimbangkan dalam mengevaluasi karbon aktif dalam bentuk monolit untuk material berbasis limbah biomassa. Densitas sebelum dan sesudah pirolisis dievaluasi berdasarkan perubahan dimensi monolit meliputi massa, volume, dan ketebalan pada proses pirolisis, dimana 10 sampel diuji untuk setiap karbon monolit. Setiap monolit diukur massa, ketebalan dan diameternya. Hasil pengukuran ini digunakan untuk menghitung densitas melalui persamaan standar yaitu massa per volume (Taer et al., 2020b). Bentuk monolit diumpamakan seperti bentuk tabung sehingga volume monolit dapat dihitung menggunakan rumus volume tabung.

Sifat elektrokimia elektroda superkapasitor dievaluasi menggunakan dua teknik meliputi *cyclic voltammetry* (CV) dan *galvanostatic charge discharge* (GCD). Superkapasitor simetris dipasang dengan dua elektroda kerja yang dipisahkan oleh membran kulit telur itik. Sel superkapasitor disiapkan dalam ukuran  $2 \times 3 \text{ cm}$  dengan badan sel terbuat dari akrilik. Pengukuran dilakukan dalam larutan elektrolit  $1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ . Metode cyclic voltammetry dilakukan dengan instrumen CV, Rad-

Er 5841, yang telah dikalibrasi dengan instrumen VersaStat II Princeton Applied Research. Lebih lanjut, CV diuji pada rentang tegangan dari 0,0 hingga 1,0 V pada kecepatan pemindaian yang berbeda dari 1 hingga 10 mV/s. Kapasitansi spesifik ( $C_{sp}$ ), rapat energi ( $E_{sp}$ ), rapat daya ( $P_{sp}$ ), dilakukan dengan menggunakan persamaan standar berdasarkan voltamogram siklik (Men et al., 2019; Sun et al., 2019).

$$C_{sp} = \frac{I}{s \times m} \quad (1)$$

$$I = \frac{2(I_c - I_d)}{2} \quad (2)$$

$$E_{sp} = \frac{1}{2} C_{sp} V^2 \frac{1}{3.6} \quad (3)$$

$$P_{sp} = \frac{E}{\Delta t} \times 3600 \quad (4)$$

$I_c$  adalah rapat arus saat pengisian ( $\text{A}/\text{cm}^2$ ),  $I_d$  adalah rapat arus saat pengosongan ( $\text{A}/\text{cm}^2$ ),  $s$  adalah laju pindai ( $\text{mV}/\text{s}$ ),  $m$  adalah massa rata-rata elektroda ( $\text{g}$ ),  $V$  adalah tegangan ( $\text{V}$ ).

Lebih lanjut, sifat elektrokimia sampel karbon juga dievaluasi dengan metode *galvanostatic charge discharge* (GCD) pada rapat arus yang konstan  $2 \text{ A}/\text{g}$ . Berdasarkan data GCD, kapasitansi spesifik ( $C_{sp}$ ), dan resistansi ( $R$ ) dari masing-masing elektroda superkapasitor dapat dihitung dengan persamaan standar (Liang et al., 2020; Miller et al., 2018).

$$C_{sp} = \frac{I \Delta t}{m \Delta V} \quad (5)$$

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (6)$$

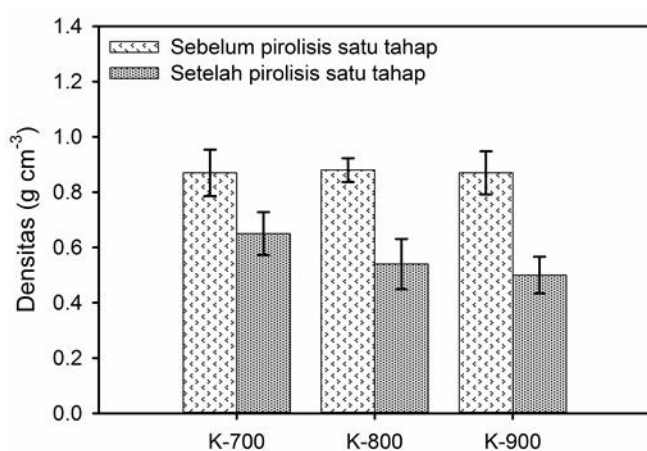
$I$  adalah rapat arus saat gcd ( $\text{A}/\text{g}$ ),  $\Delta V$  adalah tegangan saat pengosongan ( $\text{V}$ ),  $\Delta t$  adalah waktu saat pengosongan ( $\text{s}$ ), dan  $R$  adalah resistansi elektroda ( $\Omega$ )

#### Hasil Penelitian

##### Analisis Densitas

Perubahan densitas monolit merupakan karakteristik yang penting sebagai analisa awal untuk mengevaluasi sifat fisis karbon aktif monolit yang dapat menunjang sifat elektrokimia yang baik. Perubahan densitas dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain aktivasi kimia, karbonisasi, dan aktivasi fisika (Miller et al., 2018). Aktivator kimia yang digunakan diketahui bereaksi langsung dengan serbuk karbon, sedangkan aktivasi fisika berinteraksi dengan permukaan elektroda, yang selanjutnya menyebabkan penurunan densitas semua variasi sampel (Ayinla et al., 2019). Pada proses pirolisis yang mencakup karbonisasi maupun aktivasi fisika menyebabkan penguapan senyawa non-karbon, volatil, dan kandungan air dalam bahan baku dan otomatis mengurangi dimensi monolit termasuk massa, volume, dan densitas (Taer et al., 2018a, 2019).

Sebanyak 10 sampel monolit untuk setiap label sampel ditempatkan ke dalam tabung furnace untuk dipirolisis secara satu tahap meliputi karbonisasi dan aktivasi fisika. Densitas sebelum dan sesudah proses pirolisis monolit untuk semua sampel yang berdasarkan aktivator kimia Natrium hidroksida 0.5 m/L dan suhu aktivasi fisika meliputi 700 °C, 800 °C, dan 900 °C ditunjukkan pada Gambar 2. Semua sampel menunjukkan penurunan densitas setelah proses pirolisis satu tahap dari karbonisasi dan aktivasi fisika. Selanjutnya, penurunan densitas meningkat secara teratur akibat penambahan suhu aktivasi fisika dari 700 °C hingga 900 °C. Penurunan densitas ini jelas disebabkan karena proses karbonisasi dan aktivasi fisika yang dilakukan pada suhu tinggi.



Gambar 1. Perubahan densitas karbon monolit daun pisang

Proses karbonisasi dari 30 °C hingga 600 °C mengurangi dan menguraikan air, mineral, dan kelembapan, dan semua senyawa kompleks termasuk hemiselulosa, selulosa, dan lignin (Fan et al., 2017; Gonzalez et al., 2009). Proses ini mengubah bahan dasar menjadi karbon murni dan dapat meningkatkan kandungan karbon (Gonzalez et al., 2009). Akan tetapi, produk sampingan karbonisasi berupa tar padat menutupi pori-pori yang telah terbentuk sehingga perlu dilakukan aktivasi secara fisika pada suhu tinggi pada atmosfer gas CO<sub>2</sub>. Aktivasi fisika dari suhu 600 °C ke suhu yang lebih tinggi dapat menghilangkan produk sampingan dari proses karbonisasi yang menutupi pori dan dapat mengekspansikan struktur pori ke arah yang relatif lebih baik (Miller et al., 2018). Akibatnya, semua sampel karbon monolit mengalami penurunan densitas. Lebih lanjut, Gambar 2 menunjukkan sampel yang telah teraktivasi kimia dengan Natrium hidroksida secara dramatis menurunkan densitas rata-rata 23%. Hal ini mengkonfirmasi bahwa aktivasi natrium hidroksida berpengaruh dalam memberikan sifat porositas pada sampel. Selain itu, peningkatan suhu pada karbon aktif yang teraktivasi fisika juga menunjukkan penurunan densitas yang semakin besar yaitu dari 19.7%, 24.3%, dan 26.4% untuk sampel K-700, K-800, dan K-900. Reaksi pertama yang terjadi antara karbon dengan Natrium

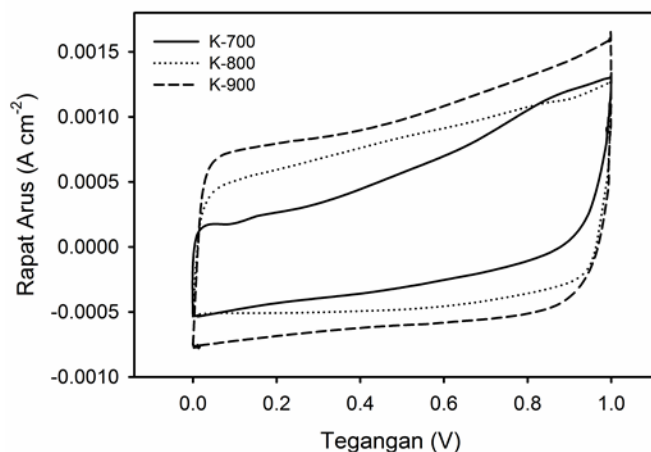
hidroksida selama proses aktivasi pada suhu tinggi tepatnya pada 600 °C menghasilkan senyawa karbonat (Wang et al., 2019).

Penambahan suhu lebih lanjut menyebabkan reaksi selanjutnya menggerus atom karbon dan meninggalkan banyak kekosongan pada material (X. Liu et al., 2019), dimana penghilangan tempat senyawa karbonat menghasilkan pori-pori pada ukuran yang relatif lebih kecil. Hal inilah yang menyebabkan terjadinya reduksi densitas secara teratur pada peningkatan suhu dari 700 °C hingga 900 °C. Densitas sampel monolit setelah pirolisis masing-masing sebesar 0,650 g/cm<sup>3</sup>, 0.544 g/cm<sup>3</sup>, dan 0,501 g/cm<sup>3</sup> dengan penurunan yang signifikan berturut-turut adalah 19.7%, 24.3%, dan 26.4% untuk sampel K-700, K-800, dan K-900. Standar deviasi rata-rata penurunan kepadatan adalah 0,07. Hasil ini hampir sama dengan penelitian sebelumnya yang juga menunjukkan penurunan densitas seiring meningkatnya suhu pirolisis dengan prekursor biomassa yang berbeda seperti daun pucuk merah (Taer et al., 2020a) dan sabut kelapa (Taer et al., 2018b).

#### Analisis sifat elektrokimia

Analisis tentang sifat elektrokimia karbon aktif monolith yang dipersiapkan dari bahan asal limbah daun pisang diperlukan untuk optimalisasi aplikasi elektrokimia mereka. Sifat kapasitif meliputi kapasitansi spesifik, energy spesifik dan daya spesifik dari monolit PACs dievaluasi menggunakan teknik *cyclic voltammetry* dan teknik *galvanostatic charge-discharge*. Gambar 3 menunjukkan kurva *cyclic voltammetry* (CV) dari sampel karbon aktif monolit berbahan asal daun pisang yang diaktivasi kimia dan diaktivasi fisika pada suhu yang berbeda dalam elektrolit 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Semua kurva CV jelas menunjukkan area loop persegiempat terdistorsi dan beberapa kurva menunjukkan adanya kenaikan arus yang sedikit melonjak. Ini menunjukkan bahwa kinerja kapasitif yang ideal untuk tipe normal kapasitor elektrokimia lapis ganda listrik dan disertai dengan karakteristik pseudo-kapasitansi. Lebih lanjut, sampel precursor menunjukkan kurva CV yang relatif segiempat yang baik mengindikasikan sifat normal kapasitor lapis ganda listrik (Wang et al., 2021). Sampel K-700 menghasilkan kurva segiempat dengan kenaikan arus pada rentang tegangan 0.7-0.9 V yang luas mengkonfirmasi pseudokapasitansi faradaic yang dikaitkan dengan keberadaan kelompok fungsional yang beragam atau heteroatom pada distribusi unsur sampel (Yumak et al., 2020). Beberapa jenis heteroatom yang berkontribusi pada sifat pseudo-kapasitansi ini antara lain seperti N, O, S, dan P (Cai et al., 2017). Unsur-unsur ini hadir sebagian kecil disumbangkan dari unsur dasar penyusun limbah biomassa.



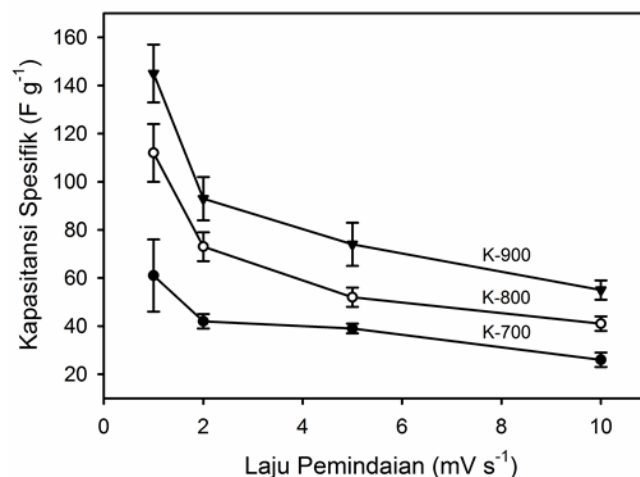
Gambar 2. Kurva CV dari elektroda karbon aktif monolit berbahan asal daun pisang

Lebih lanjut, lonjakan arus ini pada CV secara bertahap melemah dengan peningkatan suhu aktivasi fisika dari 700 °C hingga 900 °C, yang disebabkan oleh reduksi kdanungan heteroatom dan mengakibatkan penurunan sifat pseudokapasitan. Reduksi heteroatom ini disebabkan karena tingginya suhu pirolisis dapat menguraikan dan menguapkan kdanungan non-karbon lebih banyak sehingga menghasilkan kdanungan karbon yang lebih murni (F. Liu et al., 2019). Analisa ini berkesesuaian dengan analisa densitas yang telah disampaikan sebelumnya, dimana densitas mengalami penurunan yang teratur akibat peningkatan suhu aktivasi fisika.

Selain itu, area tertutup persegiempat yang dibentuk oleh kurva CV mengkonfirmasi sifat kapasitansi spesifik gravimetri dari elektroda karbon monolit, dimana area tertutup kurva CV dari K-900 adalah yang terbesar, diikuti oleh K-800, dan K-700. Kapasitansi spesifik dapat dievaluasi berdasarkan kurva CV melalui persamaan stdanar yang telah disampaikan sebelumnya. Berdasarkan persamaan ini didapatkan kapsitansi spesifik sebesar 61 F/g, 124 F/g, dan 142 F/g. Impregnasi natrium hidroksida dan peningkatan suhu aktivasi fisika pada material dasar limbah daun pisang dapat meningkatkan kapasitif yang signifikan dari 61 F/g hingga 142 F/g, sebagaimana ditunjukkan pada kapasitansi spesifik sampel K-700 dan K-900.

Hasil ini dikarenakan sifat fisis sampel yang berubah akibat impregnasi Natrium hidroksida dan perbedaan suhu aktivasi fisika. Banyak para peneliti menyampaikan bahwa impregnasi Natrium hidroksida dapat mengubah struktur morfologi permukaan menjadi berpori dan meningkatkan status elemen karbon serta dekomposisi heteroatom. Karakteristik-karakteristik ini membantu menyediakan bidang kontak ion dan elektroda semakin banyak sehingga meningkatkan kinerja material elektroda. Lebih lanjut, peningkatan suhu aktivasi fisika dari 700 °C hingga 900 °C dapat meningkatkan kapasitansi spesifik dari 61 F/g ke 142 F/g. Hal ini mengindikasikan bahwa suhu aktivasi fisika relatif

mempengaruhi sifat elektrokimia superkapasitor. Peningkatan suhu aktivasi fisika dari sampel K-700 hingga K-900 secara signifikan menunjukkan perubahan struktur pori dengan adanya kombinasi pori dari meso dan makropori, yang mana pori meso dan pori makro berkontribusi menyediakan jalur transfer ion yang pendek dan aliran ion yang sangat lancar. Hal ini tentunya menghasilkan sifat elektrokimia tinggi pada superkapasitor. Selain itu, reduksi heteroatom yang terjadi pada K-800 dan K-900 juga berperan dalam meningkatkan kapasitansi spesifik.



Gambar 4. Kurva kapasitansi spesifik vs. laju pemindaian dari elektroda karbon aktif monolit berbahan asal daun pisang

Tiga sampel elektroda karbon monolit ini juga dievaluasi pada tingkat pemindaian yang berbeda yaitu 1 mV/s, 2 mV/s, 5 mV/ dan 10 mV/s. Kapasitansi spesifik yang dihasilkan terhadap penerapan laju pemindaian pada masing-masing sampel ini dapat ditinjau pada Gambar 4. Lebih lanjut, ternyata, laju pemindaian mempengaruhi kapasitansi spesifik elektroda karbon, dimana peningkatan laju pemindaian lebih tinggi dari 1 mV/s hingga 10 mV/s mereduksi kapasitansi spesifik semua sampel. Namun demikian, ketiga sampel K-700, K-800, dan K-900 masih mempertahankan sebesar 52,20% dari kapasitansi spesifik awalnya pada rapat arus 10 mV/s untuk sampel K-900 dan diikuti oleh sampel K-80 (51,68%), dan K-700 (44,05%). Hal ini mengkonfirmasi bahwa sampel K-900 memiliki daya tahan elektrokimia yang lebih baik dari sampel lainnya.

Rapat energi dan rapat daya juga dievaluasi untuk tiga variasi melalui persamaan stdanar. Rapat energi untuk K-700, K-800, dan K-900 berturut-turut 8,47 Wh/kg, 17,22 Wh/kg, dan 19,72 Wh/kg dan rapat daya berturut-turut 30,53 W/kg, 62,06 W/kg, dan 71,07 W/kg. Hasil kapasitansi spesifik, rapat energi, dan rapat daya yang dihasilkan dengan metode pengujian CV secara rinci dirangkum pada Tabel 1. Hasil ini serupa dengan yang dilaporkan sebelumnya yang menunjukkan karbon aktif berpori dari bambu dengan energi spesifik dan daya spesifik 10,9 Wh/kg dan 63 W/kg (Zhang et al., 2018).

Tabel 1. kapasitansi spesifik ( $C_{sp}$ ), rapat energi ( $E_{sp}$ ), dan rapat daya ( $P_{sp}$ ) yang dihasilkan dengan metode pengujian CV

| Sampel | $C_{sp}$ (F/g) | $E_{sp}$ (Wh/kg) | $P_{sp}$ (W/kg) |
|--------|----------------|------------------|-----------------|
| K-700  | 61             | 8,47             | 30,53           |
| K-800  | 124            | 17,22            | 62,06           |
| K-900  | 142            | 19,72            | 71,07           |

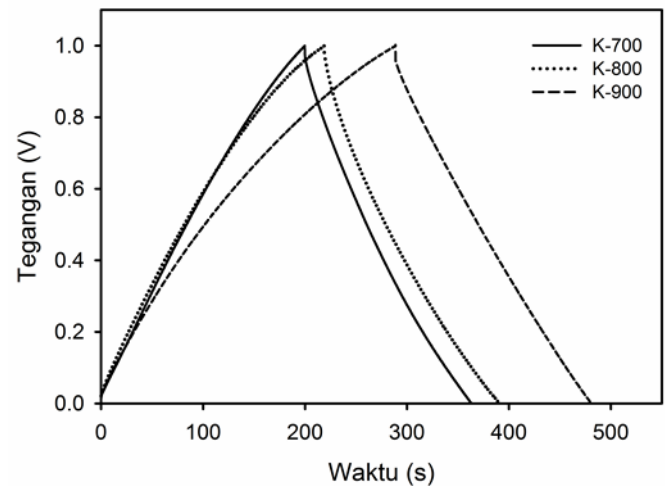
Lebih lanjut, profil *galvanostatic charge discharge* (GCD) dievaluasi untuk mengkonfirmasi lebih lanjut sifat elektrokimia elektroda karbon aktif. Gambar 5 menampilkan profil *galvanostatic charge discharge* (GCD) dari sampel K-700, K-800, dan K-900 pada rapat arus 1 A/g dengan laju pemindaian 2 mV/s. Profil GCD menunjukkan bentuk segitiga simetris yang tidak sempurna dengan karakteristik non-linier yang menandakan adanya sifat kapasitor elektrokimia lapis ganda listrik yang menjanjikan pada sampel dan diikuti oleh reaksi faradaic akibat distribusi unsur sampel yang mengandung heteroatom yang mengindikasikan adanya sifat pseudo-kapasitansi pada tiap sampel (Wei et al., 2020). Analisa ini sama dengan analisa yang dikonfirmasi pada kurva CV pada Gambar 3.

Selanjutnya, potensi penurunan potensial tiba-tiba pada awal profil *discharge* terlihat berbeda untuk setiap sampel K-700, K-800, dan K-900, dikarenakan resistensi difusi ion ke dalam pori-pori bahan elektroda dan konduktivitas listrik dari elektroda karbon (Yumak et al., 2020). Nilai resistensi untuk masing-masing sampel K-700, K-800, dan K-900 berturut-turut  $31 \cdot 10^{-3} \Omega$ ,  $35 \cdot 10^{-3} \Omega$ , dan  $42 \cdot 10^{-3} \Omega$ . Resistensi ini terlihat meningkat seiring dengan meningkatnya suhu aktivasi fisika dari 700 °C hingga 900 °C. Hal ini disebabkan adanya pori-pori kecil yang berkembang semakin banyak pada suhu yang relative tinggi sehingga sedikit menghambat aksesibilitas ion pada permukaan elektroda superkapasitor (F. Liu et al., 2019).

Tabel 2. kapasitansi spesifik ( $C_{sp}$ ), rapat energi ( $E_{sp}$ ), rapat daya ( $P_{sp}$ ), dan resistansi ( $\Omega$ ) yang dihasilkan dengan metode pengujian GCD

| Sampel | $C_{sp}$ (F/g) | $E_{sp}$ (Wh/kg) | $P_{sp}$ (W/kg) | $R$ ( $10^{-3} \Omega$ ) |
|--------|----------------|------------------|-----------------|--------------------------|
| K-700  | 119            | 16,10            | 33,73           | 31                       |
| K-800  | 127            | 16,49            | 36,33           | 35                       |
| K-900  | 154            | 20,45            | 38,32           | 42                       |

Berdasarkan persamaan standar, profil GCD menampilkan kapasitansi spesifik elektroda karbon tertinggi sebesar 154 F/g untuk sampel K-900, dan diikuti oleh K-800 dan K-700 berturut-turut 127 F/g dan 119 F/g. Hasil ini mengkonfirmasi analisa CV yang telah disampaikan sebelumnya pada Gambar 2. Rapat energi dan rapat daya yang dihasilkan melalui teknik GCD ini juga dievaluasi. Secara rinci nilai-nilai ini dirangkum pada Tabel 3.



Gambar 5. Kurva CV dari elektroda karbon aktif monolit berbahan asal daun pisang

Tabel 3. Perbandingan  $C_{sp}$  dari berbagai bahan asal

| Bahan asal        | Material perekat | $C_{sp}$ (F/g) | Referensi                  |
|-------------------|------------------|----------------|----------------------------|
| Chitin seafood    | PTFE             | 95             | (Duan et al., 2016)        |
| Buah kelapa sawit | -                | 85             | (Farma et al., 2013)       |
| Sellulosa asetat  | PVDF             | 11             | (Kuzmenko et al., 2015)    |
| Batang pisang     | PTFE             | 74             | (Subramanian et al., 2007) |
| Ampas wortel      | PVDF             | 135.5          | (Ahmed et al., 2018)       |
| Daun nanas        | -                | 110            | (Agustino et al., 2020)    |
| Ampas teh         | PVDF             | 67             | (Mossfika et al., 2020)    |
| Daun pisang       | -                | 154            | Penelitian ini             |

Secara mengejutkan, kinerja elektrokimia tinggi K-900 lebih unggul dari sampel lainnya dan lebih lanjut hasil ini sebanding dengan yang dilaporkan sebelumnya berasal dari bahan karbon berbasis biomassa lainnya sebagaimana ditampilkan pada Tabel 2. Selain itu, nilai kapasitansi yang dihasilkan pada metode GCD sedikit lebih besar dibandingkan dengan CV. Hal ini kemungkinan besar penyebabnya adalah perbedaan arus. Arus yang lebih tinggi dapat memberikan nilai kapasitansi yang lebih kecil karena kinetika. Untuk mengukur kapasitansi, kedua metode tersebut dapat dibandingkan. Namun, mereka masing-masing dapat memberikan informasi yang berbeda. Misalnya, CV dapat memberi tahu Dana jika ada reaksi redoks non-kapasitif yang terlibat, sementara GCD dapat menunjukkan resistansi sel atau elektroda (Stoller dan Ruoff, 2010).

### Kesimpulan

Superkapasitor berbasis limbah biomassa khususnya limbah daun pisang telah ditinjau dan dievaluasi sifat elektrokimianya melalui dua teknik yang berbeda meliputi *cyclic voltammetry* (CV) dan *galvanostatic charge discharge* (GCD). Elektroda yang disiapkan adalah karbon aktif berpori monolit atau pellet yang dibentuk

tanpa penambahan bahan perekat sintetik melalui imregnasi Natrium hidroksida dan aktivasi CO<sub>2</sub> dengan menerapkan suhu aktivasi yang berbeda. Analisa densitas ditinjau sebagai evaluasi awal untuk menunjukkan sifat porositas pada bahan elektroda. Densitas yang dihasilkan mengalami reduksi setelah proses pirolisis dengan rata-rata reduksi sebesar 23% yang mengkonfirmasi sifat porositas pada tiap sampel. Lebih lanjut, teknik CV menunjukkan sifat kapasitif tinggi sebesar 142 F/g pada sampel K-900 sedangkan teknik GCD menghasilkan kapasitansi spesifik sebesar 154 F/g pada sampel yang sama. Berdasarkan tingginya sifat kapasitif yang dihasilkan maka limbah daun pisang sebagai karbon aktif serta metode preparasi yang telah dilakukan memiliki potensi besar sebagai material dasar elektroda untuk meningkatkan kinerja tinggi superkapasitor sebagai teknologi penyimpan energi elektrokimia yang ramah lingkungan.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada DRPM Kemenristek/BRIN tahun 2020 melalui Proyek Penelitian Dasar tahun kedua dengan judul “Mikro- dan nano karbon fiber dengan kerapatan tinggi berbasis bahan alam sebagai elektroda karbon superkapasitor”.

### Referensi

- Abioye, A. M. dan Ani, F. N. (2015) Recent development in the production of activated carbon electrodes from agricultural waste biomass for supercapacitors: A review. *Renew Sustain Energy Reviews*. **52**: 1282–93
- Agustino, Awitdrus, Farma, R. dan Taer, E. (2020) Pembuatan dan Karakterisasi Elektroda Karbon Aktif dari Serat Daun Nanas untuk Aplikasi Superkapasitor. *Journal of Aceh Physics Society*. **9**: 1–8
- Ahmed, S. Ahmed, A. dan Rafat, M. (2018) Supercapacitor performance of activated carbon derived from rotten carrot in aqueous, organic dan ionic liquid based electrolytes. *Journal of Saudi Chemical Society*. **22**: 993–1002
- Ayinla, R. T. Dennis, J. O. Zaid, H. M. Sanusi, Y. K. Usman, F. dan Adebayo, L. L. (2020) A review of technical advances of recent palm bio-waste conversion to activated carbon for energy storage. *Journal of Cleaner Production*. **229**: 1427–1442
- Cai, Y. Luo, Y. Dong, H. Zhao, X. Xiao, Y. dan Liang, Y. (2017) Hierarchically porous carbon nanosheets derived from *Moringa oleifera* stems as electrode material for high-performance electric double-layer capacitors. *Journal of Power Sources*. **353**: 260–269.
- Cheng, F. Yang, X. Zhang, S. dan Lu, W. (2020) Boosting the supercapacitor performances of activated carbon with carbon nanomaterials. *Journal of Power Sources*. **450**
- Climent, V dan Feliu, J. M. (2018) Cyclic voltammetry. *Encycl. Encyclopedia of Interfacial Chemistry*. 48–74
- Deraman, M. Nor, N. S. M. Taer, E. Yatim, B. Awitdrus. dan Farma, R. (2016) Review of energy dan power of supercapacitor using carbon electrodes from fibers of oil palm fruit bunches. *Materials Science Forum*. **846**: 497–504
- Duan, B. Gao, X. Yao, X. Fang, Y. Huang, L. dan Zhou, J. (2016) Unique elastic N-doped carbon nanofibrous microspheres with hierarchical porosity derived from renewable chitin for high rate supercapacitors. *Nano Energy*. **27**: 482–491
- Fan, Y. Cai, Y. Li, X. Jiao, L. Xia, J. dan Deng, X. (2017) Effects of the cellulose, xylan dan lignin constituents on biomass pyrolysis characteristics dan bio-oil composition using the Simplex Lattice Mixture Design method. *Energy Convers Management*. **138**: 106–18
- Farma, R. Deraman, M. Awitdrus, T. I. A. Omar, R. dan Manjunatha, J. G. (2013) Physical dan electrochemical properties of supercapacitor electrodes derived from carbon nanotube dan biomass carbon. *International Journal of Electrochemical Science*. **8**: 257–273
- Ferndanes, E. R. K. Marangoni, C. Souza, O. dan Sellin, N. (2013) Thermochemical characterization of banana leaves as a potential energy source. *Energy Convers Management*. **75**: 603–608
- Gao, Z. Zhang, Y. Song, N., dan Li, X. (2017) Biomass-derived renewable carbon materials for electrochemical energy storage. *Materials Research Letters*. **5**: 69–88
- González, A. Goikolea, E. Barrena, J. A. dan Mysyk, R. (2016) Review on supercapacitors: Technologies dan materials. *Renew Sustain Energy Review*. **58**: 1189–206
- Gonzalez, J. Roma, S. Encinar, J. M. dan Martí, G. (2009) Pyrolysis of various biomass residues dan char utilization for the production of activated carbons. *The Journal of Analytical dan Applied Pyrolysis*. **85**: 134–141.
- Jose, J. Thomas, V. Vinod, V. Abraham, R. dan Abraham, S. (2019) Nanocellulose based functional materials for supercapacitor applications. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*. **4**: 333–340.
- Kuzmenko, V. Naboka, O. Haque, M. Staaf, H. Göransson, G. dan Gatenholm, P. (2015) Sustainable carbon nanofibers/nanotubes composites from cellulose as electrodes for supercapacitors. *Energy*. **90**: 1490–1496.
- Liang, Y. Lu, Y. Xiao, G. Zhang, J. Chi, H. dan Dong, Y. (2020) Hierarchical porous nitrogen-doped carbon microspheres after thermal rearrangement as high performance electrode materials for supercapacitors. *Applied Surface Science*. **529**: 141–147.
- Liu, F. Wang, Z. Zhang, H. Jin, L. Chu, X. dan Gu, B. (2019) Nitrogen, oxygen dan sulfur co-doped hierarchical porous carbons toward high-performance supercapacitors by direct pyrolysis of kraft lignin. *Carbon N Y*. **149**: 105–116.
- Liu, X. Ma, C. Li, J. Zielinska, B. Kalenczuk, R. J. dan Chen, X. (2019) Biomass-derived robust three-dimensional porous carbon for high volumetric performance supercapacitors. *Journal Power Sources*. **412**: 1–9.
- Liu, Y. Shi, Z. Gao, Y. An, W. Cao, Z. dan Liu J. (2016)

- Biomass-Swelling Assisted Synthesis of Hierarchical Porous Carbon Fibers for Supercapacitor Electrodes. *ACS Applied Mater Interfaces*. **8**: 28283–90.
- Lu, W. Cao, X. Hao, L. Zhou, Y. dan Wang, Y. (2020) Activated carbon derived from pitaya peel for supercapacitor applications with high capacitance performance. *Materials Letters*. **264**: 127-139.
- Manasa, P. Lei, Z. J. dan Ran, F. (2020) Biomass Waste Derived Low Cost Activated Carbon from *Carchorus Olitorius* (Jute Fiber) as Sustainable dan Novel Electrode Material. *Journal of Energy Storage*. **30**: 101494.
- Mary, A. J. C. Ndanhini, C. dan Bose, A. C. (2019) Hierarchical porous structured N-doped activated carbon derived from *Helianthus Annuus* seed as a cathode material for hybrid supercapacitor device. *Materials Letters*. **256** :126617.
- Mehare, M. D. Deshmukh, A. D. dan Dhoble, S. J. (2020) Preparation of porous agro-waste-derived carbon from onion peel for supercapacitor application. *Journal of Materials Science*. **55**: 4213–4224.
- Men, B. Guo, P. Sun, Y. Tang, Y. Chen, Y. Pan, J. (2019) High-performance nitrogen-doped hierarchical porous carbon derived from cauliflower for advanced supercapacitors. *Journal of Materials Science*. **54**: 2446–2457.
- Miller, E. E. Hua, Y. dan Tezel, F. H. (2018) Materials for energy storage: Review of electrode materials dan methods of increasing capacitance for supercapacitors. *Journal of Energy Storage*. **20**: 30–40.
- Mossfika, E. Syukri, S. dan Aziz, H. (2020) Preparation of Activated Carbon from Tea Waste by NaOH Activation as A Supercapacitor Material. *Journal of Aceh Physics Society*. **9**: 42–7.
- Poonam. Sharma, K. Arora, A. dan Tripathi, S. K. (2019) Review of supercapacitors: Materials dan devices. *Journal of Energy Storage*. **21**: 801–825.
- Salman, J. M. dan Kadhim, A. J. (2017) Adsorption of pesticides onto a banana leaf activated carbon: Optimization study using response surface methodology. *Journal of Al-Nisour University College*. **1**: 1–11.
- Sellin, N. Ricardo, D. Marangoni, C. dan Souza, O. (2016) Oxidative fast pyrolysis of banana leaves in fluidized bed reactor. *Renew Energy*. **96**: 56–64.
- Stoller, M. D. dan Ruoff, R. S. (2010) Best practice methods for determining an electrode material's performance for ultracapacitors. *Energy & Environmental Science* **3**: 1294–1301.
- Subramanian, V. Luo, C. Stephan, A. M. Nahm, K. S. Thomas, S. dan Wei, B. (2007) Supercapacitors from activated carbon derived from banana fibers. *The Journal of Physical Chemistry*. **111**: 7527–7531.
- Sun, Q. Jiang, T. Zhao, G. dan Shi, J. (2019) Porous carbon material based on biomass prepared by MgO template method dan ZnCl<sub>2</sub> activation method as electrode for high performance supercapacitor. *International Journal of Electrochemical Science*. **14**: 1–14.
- Taer, E. Apriwdani, A. Ningsih, Y. S. Taslim, R. dan Agustino, A. (2019) Preparation of activated carbon electrode from pineapple crown waste for supercapacitor application. *International Journal of Electrochemical Science*. **14**: 2462–2475.
- Taer, E. Apriwdani, A. Taslim, R. Agustino, A. dan Yusra, D. A. (2020) Conversion *Syzygium oleana* leaves biomass waste to porous activated carbon nanosheet for boosting supercapacitor performances. *The Journal of Materials Research and Technology*. **9**: 13332–13340.
- Taer, E. Dewi, P. Sugianto, S. Syech, R. Taslim, R. dan Salomo, S. (2018) The synthesis of carbon electrode supercapacitor from durian shell based on variations in the activation time. *AIP Conference Proceedings*. **1927**: 030026–1–030026–6.
- Taer, E. Natalia, K. Apriwdani, A. Taslim, R. Agustino, A. dan Farma, R. (2020) The synthesis of activated carbon nano fiber electrode made from acacia leaves (*Acacia mangium* wild) as supercapacitors. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*. **11**:25007.
- Taer, E. Taslim, R. Putri, A. W. Apriwdani, A. dan Agustino, A. (2018) Activated carbon electrode made from coconut husk waste for supercapacitor application. *International Journal of Electrochemical Science*. **13**: 12072–12084.
- Wang, Y. Qiao, M. dan Mamat, X. (2021) Nitrogen-doped macro-meso-micro hierarchical ordered porous carbon derived from ZIF-8 for boosting supercapacitor performance. *Applied Surface Science*. **540**:148352.
- Wang, Y. Qu, Q. Gao, S. Tang, G. Liu, K. dan He, S. (2019) Biomass derived carbon as binder-free electrode materials for supercapacitors. *Carbon N Y*. **155**: 706–726.
- Wei, H. Wang, H. Li, A. Li, H. Cui, D. dan Dong M. (2020) Advanced porous hierarchical activated carbon derived from agricultural wastes toward high performance supercapacitors. *Journal of Alloys and Compounds*. **820**: 153111.
- Yang, H. Ye, S. Zhou, J. dan Liang, T. (2019) Biomass-derived porous carbon materials for supercapacitor. *Frontiers in Chemistry*. **7**: 1–17.
- Yang, V. Senthil, R. A. Pan, J. Khan, A. Osman, S. dan Wang, L. (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.
- Yumak, T. Yakaboylu, G. A. Oginni, O. Singh, K. Ciftiyurek, E. dan Sabolsky, E. M. (2020) Comparison of the electrochemical properties of engineered switchgrass biomass-derived activated carbon-based EDLCs. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2020;586:124150.
- Zhang, G. Chen, Yuemei. Chen, Yigang. dan Guo, H. (2018) Activated biomass carbon made from bamboo as electrode material for supercapacitors. *Materials Research Bulletin*. **102**: 391–398.