

Identifikasi Potensi Limbah Lidi Kelapa Sawit sebagai Sumber Karbon untuk Aplikasi Penyimpanan Energi Super-kapasitor

Julnaidi¹, Edy Saputra², Nofrizal¹ dan Erman Taer^{3*}

¹Jurusan Ilmu Lingkungan, Program Pascasarjana, Universitas Riau; joelnaidi@gmail.com, aan-fish@yahoo.com

²Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Riau; edysaputra_eng@yahoo.com

³Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Riau; erman.taer@lecturer.unri.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.32528/nms.v2i3.274>

*Correspondensi: Erman Taer

Email: erman.taer@lecturer.unri.ac.id

Published: Mei, 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

didapatkan sebesar 140 F/g pada rapat arus 1 A/g. Hasil yang sangat baik ini menunjukkan bahwa pengembangan metode yang diterapkan dan desain bahan elektroda berbasis karbon-biomassa yang dipelajari sangat mungkin untuk mencapai keseimbangan kinerja yang sangat cocok dalam perangkat superkapasitor simetris.

Keywords: biomass, lidi sawit, karbon, elektroda, superkapasitor

PENDAHULUAN

Menipisnya sumber energi, meningkatnya pemanasan global, dan pencemaran lingkungan yang berlebihan memicu pengembangan sumber daya energi terbarukan yang ramah lingkungan. Dalam beberapa tahun terakhir, beberapa sumber daya energi terbarukan yang telah diteliti misalnya sumber energi tenaga air, tenaga surya dan tenaga angin. Namun demikian, sumber energi tersebut tersedia secara periodik sehingga diperlukan suatu sistem peranti penyimpan energi. Lebih lanjut, pengembangan sistem penyimpanan energi elektrokimia yang andal berperan penting dalam memanfaatkan sumber daya energi tersebut. Salah satu sistem penyimpanan energi yang berkembang pesat saat ini adalah piranti superkapasitor. Superkapasitor telah menarik penelitian penting dalam sepuluh tahun terakhir karena keunggulan kepadatan daya yang tinggi, daya tahan output yang unggul, dan tingkat pengisian/pengosongan yang cepat (Rawat et al., 2022; Saini et al., 2021). Kinerja superkapasitor yang tinggi ini dipengaruhi oleh material dasar elektroda yang digunakan. Di antara berbagai bahan elektroda, karbon berpori adalah kandidat yang menjanjikan karena luas permukaan spesifik yang tinggi, kelembaman elektrokimia, konduktivitas yang unggul, dan biaya yang terjangkau (Lin et al., 2019; Taer, Taslim, et al., 2022). Secara umum, proses pembuatan karbon berpori umumnya terdiri dari dua langkah: sumber karbon pertama-tama dikarbonisasi dan kemudian diaktivasi oleh

zat pengaktif seperti KOH, ZnCl₂, dll. Namun demikian, proses preparasi menghadapi tantangan bahan kimia korosif kuat yang berlebihan, hasil karbon rendah dan proses preparasi kompleks, yang membatasi aplikasi skala besar.

Kajian ilmiah terbaru telah melaporkan potensi luarbiasa dari precursor limbah biomassa sebagai karbon berpori piranti penyimpan energi superkapasitor seperti terong (Li et al., 2022), kayu eucalyptus (Atika & Dutta, 2021), bunga sakura (Ma et al., 2019), kulit buah kapok (Liang et al., 2019), dll. Biomassa ini dikonversi menjadi serbuk karbon melalui berbagai pendekatan meliputi karbonisasi, aktivasi kimia, aktivasi fisika, dan sebageian kecil menambahkan metal framework dan hard/soft template untuk memaksimalkan kombinasi pori hirarkis dan nano-2D (González et al., 2016). Teknik karbonisasi diikuti dengan multi aktivasi asam/basa/garam dianggap sebagai strategi yang ramah lingkungan sekaligus meningkatkan potensi struktur pori 3D pada bahan karbon, meskipun kapasitansi dan konduktivitas mereka yang masih rendah (Liangshuo et al., 2020). Lebih lanjut, teknik hard/template menjanjikan bahan karbon memiliki struktur nano 2D kaya seperti nansheet, nano-rod, dan nanofiber yang menginisiasi konduktivitas tinggi dan sifat elektrostatik luarbiasa pada superkapasitor (Niu et al., 2018). Namun demikian pendekatan ini dianggap memiliki kekurangan yang besar pada produk sampingan mereka yang toksik, sulit terurai, dan berperilaku korosif sehingga membatasi aplikasi praktis mereka pada aspek keberlanjutan, ramah lingkungan dan berbiaya rendah.

Sementara itu, lonjakan permintaan CPO-minyak mentah dunia dari kelapa sawit merangsang perkembangan kelapa sawit yang tidak terkendali, khususnya di Asia Tenggara. Dalam studi terbaru, Indonesia memimpin produksi minyak sawit dunia dengan 55% dari total pasokan sawit dunia sebesar 7.340 juta ton (Ezechi & Muda, 2019). Sebagai hasil sampingannya, sejumlah besar limbah bio sawit diproduksi setiap tahun terdiri dari pelepah sawit, tempurung kelapa sawit, dan tandan buah kosong. Sebagai hasilnya, produk sampingan dan limbah mereka yang ditanggulangi konvensional secara terbuka seperti pembakaran menimbulkan bahaya lingkungan seperti kabut asap, mengurangi kualitas tanah, dan memiliki efek akumulatif jangka panjang pada ekosistem negara tetangga. Kandungan karbon yang tinggi pada limbah kelapa sawit menjadi daya tarik dalam pembuatan karbon aktif untuk berbagai aplikasi, termasuk aplikasi material elektroda karbon untuk superkapasitor. Preferensi limbah sawit sebagai bahan awal pembuatan karbon aktif sangat terkait dengan unsur kimia dan molekuler limbah tersebut (Ayinla et al., 2019). Tandan Kosong dan ijuk masing-masing memiliki kandungan selulosa dan hemiselulosa tertinggi. Kandungan karbon cangkang sawit secara signifikan lebih tinggi dibandingkan limbah lainnya. Selulosa termanifestasi paling tinggi pada pelepah sawit dan tandan kosong (Ayinla et al., 2019). Tingginya kandungan hemiselulosa, selulosa dan lignin pada limbah sawit ini mengkonfirmasi potensinya sebagai sumber karbon aktif berkualitas. Lebih lanjut, penelitian tentang potensi limbah bio sawit sebagai material dasar elektroda superkapasitor telah dilaporkan oleh (Ayinla et al., 2019). Mereka menunjukkan potensi limbah bio sawit sebagai sumber karbon aktif untuk aplikasi superkapasitor melalui metode yang relatif hemat biaya dan menghasilkan produk berkualitas tinggi.

Atas dasar pemikiran diatas, kami mengidentifikasi potensi limbah lidi kelapa sawit sebagai sumber karbon alami untuk diaplikasikan sebagai material dasar elektroda penyimpanan energi superkapasitor melalui pendekatan yang berkelanjutan, ramah lingkungan dan berbiaya rendah. Ketebaharuan penelitian difokuskan pada desain karbon yang dibuat padat menyerupai cakram koin tanpa menggunakan bahan perekat sintesis sehingga mempertahankan sifat konduktivitas tinggi elektroda. Konfirmasi sifat fisis karbon ditinjau melalui perubahan dimensi cakram koin meliputi massa, ketebalan dan diameter selama proses pirolisis

terintegrasi. Secara mengejutkan material karbon yang dihasilkan menunjukkan porositas dengan kerapatan dipertahankan pada $1,10 \text{ g/cm}^3$. Lebih lanjut, sifat elektrokimia ditinjau secara detail melalui metode CV dan GCD dengan kapasitansi sepsifik tertinggi sebesar 140 F/g pada 1 A/g dalam larutan elektrolit $1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$.

METODE

Bahan yang digunakan

Biomassa asal dipilih dari limbah lidi kelapa sawit jenis TENERA. Bahan aktivasi kimia difokuskan pada kalium hidroksida (KOH) dan seng klorida (ZnCl_2) yang didapatkan dari sigma aldrich, Merck KGaA, Germany. Elektrolit cair dipilih dari larutan asam sulfat (H_2SO_4) yang berasal dari Panreac Quimica S.A.U. Universal (pH) indikator diperoleh dari Merck KGaA (HC148594).

Sintesis karbon padat dengan pendekatan pirolisis satu tahap

Sumber karbon difokuskan pada limbah perkebunan sawit, khususnya bagian lidi kering. Limbah tersebut diperoleh dari salah satu perkebunan sawit yang berada di wilayah provinsi Riau, Indonesia. Biomassa asal diperlakukan awal dengan semestinya seperti dipotong-potong kecil $1 \times 2 \text{ cm}$, dicuci pada air mengalir dan dikeringkan. Kadar air yang bersisa pada precursor diuapkan pada oven dried dalam jangka waktu 48 jam sampai 72 jam. Selanjutnya, sampel dimasukkan dalam wadah tertutup dan dipanaskan dalam oven suhu 250°C bebas lingkungan gas. Sampel yang telah kering maksimal dihancurkan menggunakan martil dan mesin penggiling. Proses ini dilakukan secara periodik sampai didapatkan prekursor berbentuk serbuk dengan homogenasi partikel $\leq 59 \text{ nm}$. Aktivasi kimia diterapkan pada prekursor serbuk dengan cara mencampurkan larutan kalium hidroksida dan seng klorida dengan serbuk prekursor kering pada molaritas yang sama. Larutan tersebut diaduk pada *hoteplate stirrer* pada suhu 80°C dalam 300 rpm. Setelah larutan telah tercampur merata, precursor tersebut dikeringkan pada suhu 100°C . Sebagai bahan perbandingan, sampel tanpa aktivasi fisika juga dilakukan. Lebih lanjut, serbuk kering teraktivasi kimia dimasukkan pada wadah pencetak dalam rangkaian instrument *hydraulic press* dan ditekan dengan beban massa 8 metrik ton. Langkah ini dibutuhkan untuk mengkonversi bentuk serbuk prekursor menjadi bentuk cakram koin padat. Selanjutnya, precursor cakram koin padat disiapkan sebanyak 20 buah dan ditempatkan pada tungku bakar *furnace horizontal* untuk dipirolisis dalam lingkungan gas N_2 dan CO_2 terintegrasi satu tahap. Proses ini diawali dari suhu 30°C sampai 300°C pada laju kenaikan suhu 1 C/min dan dilanjutkan sampai suhu 600°C pada laju kenaikan suhu 3°C/min dalam lingkungan gas N_2 . Setelah suhu furnace melewati 600°C , lingkungan gas ditukar ke CO_2 sampai suhu maksimum 850°C dengan laju kenaikan gas 10°C/min , pada suhu maksimum ini proses pirolisis ditahan selama 150 menit. Langkah *cooling down* pada *furnace horizontal* dilakukan dalam jangka waktu 18 jam dan setelahnya sampel dikeluarkan dan direndam dalam DI water untuk tahap akhir penetralan. Prekursor karbon yang telah didapatkan dilabelkan dengan KAPLS-k, KAPLS-z dan KAPLS-n. KAPLS adalah singkatan dari karbon aktif padat lidi sawit sedangkan huruf akhir dari label mencerminkan bahan pengaktif mereka seperti k untuk KOH, z untuk ZnCl_2 , dan n untuk non aktivasi kimia.

Evaluasi sifat fisis karbon lidi kelapa sawit

Evaluasi potensi karbon koin padat dengan tanpa penambahan bahan perekat dilakukan dengan meninau dimensi koin tersebut meliputi massa, ketebalan, diameter, volume, dan densitas. Massa diukur dengan menggunakan timbangan digital sedangkan ketebalan dan diameter koin diukur dengan menggunakan jangka sorong. Lebih lanjut, volume karbon koin padat dievaluasi dengan menggunakan persamaan volume tabung,

dengan asumsi bahwa karbon koin yang didapatkan memiliki bangun ruang menyerupai tabung. Densitas karbon koin padat dievaluasi dengan menggunakan persamaan standar (Taer et al., 2020).

$$\rho = m/V \quad (1)$$

Dimana, ρ adalah densitas karbon koin (g/cm^3), m adalah massa karbon cakram koin padat (g), dan V adalah volume karbon koin (cm^3).

Desain sel superkapasitor simetris

Sel superkapasitor didesain sedemikian rupa yang terdiri dari dua elektroda simetris dari lempengan karbon padat yang dipisahkan oleh separator membrane organik dengan elektrolit aqueous. Lempengan karbon padat yang telah didapatkan dibuat dalam bentuk cakram koin tipis bebas pengikat. Separator membrane organik dibuat dari kulit telur itik dengan larutan 1 molar H_2SO_4 sebagai elektrolit. Lebih lanjut, pengumpul arus disediakan dari stainless steel dan body cell didesain persegi pada dimensi $2 \times 2 \text{ cm}$ berbahan akrilik.

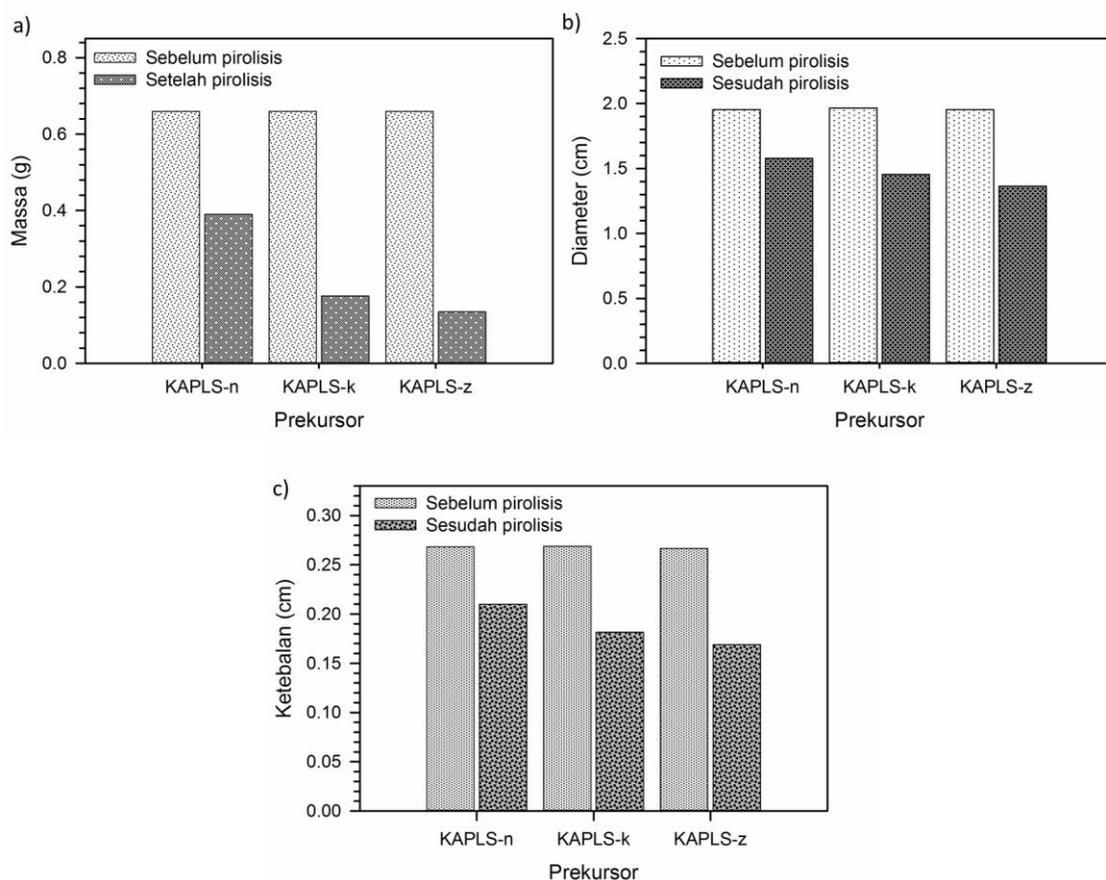
Pengujian kinerja elektrokimia

Kinerja sel superkapasitor simetris dievaluasi pada perilaku elektrokimia menggunakan pendekatan cyclic voltammetry (CV), dan galvanostatic charge-discharge (GCD) dalam parameter gravimetric dan volumetric dari kapasitansi, rapat energi, dan rapat daya. *Cyclic voltammetry* dan *galvanostatic charge discharge* dilakukan pada potensial 0.0-1.0V pada laju pemindaian dan rapat arus 1 mV/s dan 1 A/g . Kapasitansi spesifik (C_{sp} , F/g), energi spesifik (E_{sp} , Wh/kg), dan daya spesifik (P_{sp} , W/kg) dihitung melalui persamaan standar yang telah dilaporkan sebelumnya (Taer et al., 2023).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pendekatan yang menjanjikan untuk meningkatkan kinerja perangkat superkapasitor berbasis karbon biomassa yang aplikatif adalah dengan mendesain material elektroda padat tanpa penambahan bahan pengikat dengan tetap mempertahankan struktur porositas tinggi mereka. Salah satu strategi untuk mencapai desain optimal tersebut adalah dengan mengubah bentuk material karbon menjadi cakram koin padat bebas pengikat, sebagaimana direpresentasikan pada studi ini. Prekursor lempengan tipis padat yang diperlakukan dengan pirolisis terintegrasi, karbonisasi, aktivasi kimia KOH & ZnCl_2 dan aktivasi fisika CO_2 . Rangkaian sintesis ini secara signifikan mengubah morfologi, kepadatan, dan porositas dari prekursor tersebut. Analisis perubahan dimensi massa ketebalan dan diameter merupakan evaluasi dini yang mengasumsikan pembentukan struktur pori dan perbaikan morfologi dari karbon padat berbentuk cakram koin (Taer et al., 2021). Penyusutan massa, diameter, dan ketebalan diilustrasikan pada Gambar 1. Massa prekursor KAPLS-n, KAPLS-k, dan KAPLS-z awalnya dibuat pada $\pm 0.70 \text{ g}$ dengan diameter dan ketebalan pada kisaran $\pm 2.0 \text{ cm}$ dan 0.27 cm . Setelah dipirolisis suhu tinggi yang terintegrasi dari karbonisasi dan aktivasi fisika, ketiga dimensi tersebut mengalami penurunan dan degradasi yang bervariasi. Dimensi massa terdegradasi sekitar 50-71% dari $\pm 0.70 \text{ g}$ menjadi 0.3900, 0.1767, dan 0.1347 g untuk masing-masing prekursor KAPLS-n, KAPLS-k, dan KAPLS-z. Berkesesuaian dengan penyusutan massa, diameter dan ketebalan dari prekursor KAPLS-n, KAPLS-k, dan KAPLS-z juga mengalami penurunan secara teratur sekitar 12-35%. Hal ini mengindikasikan bahwa proses perlakuan pirolisis yang diberikan pada prekursor berdampak besar pada perubahan morfologi, struktur dan kepadatan mereka. Melalui persamaan standar kepadatan ketiga sampel berkurang secara drastis berturut turut sebesar 11%, 34%, dan 35% untuk masing masing prekursor KAPLS-n, KAPLS-k, dan KAPLS-z. Pirolisis terintegrasi secara dramatis menguraikan rangkaian senyawa kompleks yang terdapat pada biomassa yang dipilih. Alurnya diawali dengan evaporasi kandungan air dan

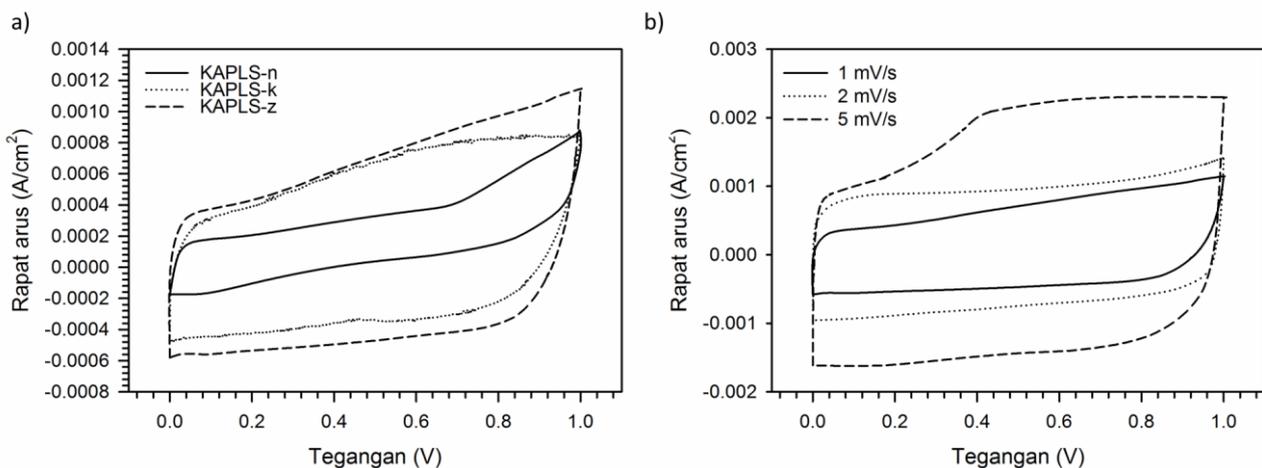
atsiri pada suhu rendah. Lebih lanjut, komponen yang lebih kompleks saling terdegradasi “melepaskan diri” meliputi senyawa hemiselulosa, selulosa, dan lignin (Ahmed et al., 2018). Perlakuan panas tinggi pada furnace memungkinkan penghilangan elemen bio dan non-bio yang menginisiasi kandungan karbon tinggi. Secara simultan proses ini menghasilkan porositas kerangka pori kaya sekaligus mereduksi kepadatan prekursor cakram koin padat. Gambar 1 secara umum mengilustrasikan bahwa setelah tahap pirolisis diterapkan, ketiga prekursor menunjukkan densitas karbon terdegradasi secara teratur. Lebih detail, penambahan agen pengaktif kimia KOH dan $ZnCl_2$ secara nyata beraksi dengan karbon memungkinkan etsa kerangka pori yang signifikan sehingga menghasilkan degradasi massa, diameter, dan ketebalan yang lebih besar dibandingkan dengan prekursor tanpa aktivasi kimia. Larutan kimia secara nyata mendegradasi densitas paling tinggi, mengindikasi etsa rantai karbon berlebihan menyediakan ruang-ruang kosong besar dan berlimpah. Lebih daripada itu, CO_2 sebagai agen pengaktif fisika juga beraksi dengan karbon sehingga memungkinkan pertubuhan pori-pori baru yang melesat namun masih dalam batas mempertahankan bentuk padat mereka. Secara eksplisit, semua precursor mengindikasikan secara dini bahwa mereka dipenuhi oleh pori-pori yang bermanfaat bagi difusi ion pada antarmuka elektroda/elektrolit (H. Liu et al., 2021). Ini membuktikan bahwa desain karbon yang diusulkan telah memiliki informasi awal untuk keberhasilan peningkatan kinerja superkapasitor pada segi penyediaan pori-pori berlimpah.



Gambar 1. a) nilai massa, b) nilai diameter, dan c) nilai ketebalan dari prekursor selama proses pirolisis

Kinerja elektrokimia superkapasitor dikonfirmasi secara detail melalui pendekatan *cyclic voltammetry* (CV) dan *galvanostatic charge discharge* (GCD) dalam elektrolit cair 1 molar asam sulfat H_2SO_4 .

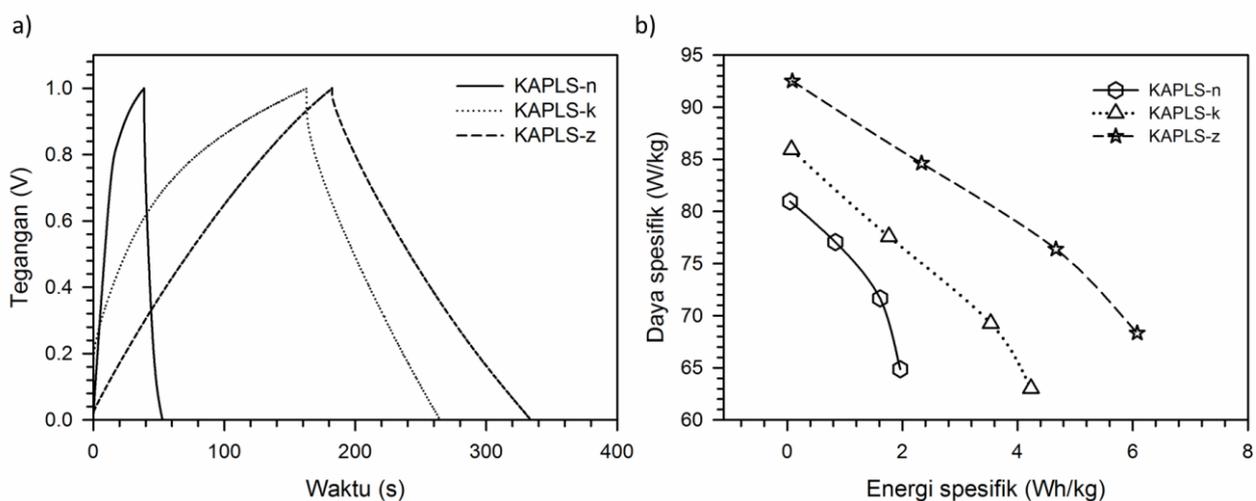
Karakteristik penyimpanan dan sifat kapasitif dari prekursor KAPLS-n, KAPLS-k, KAPLS-z dievaluasi pertama melalui teknik *cyclic voltammetry* (CV) pada sistem dua elektroda dalam elektrolit 1 M H₂SO₄. Gambar 2a menunjukkan profil CV untuk karbon aktif berbasis limbah lidi sawit dengan variasi agen pengaktif kimia berbeda pada KAPLS-n, KAPLS-k, KAPLS-z. Pada laju pemindaian 1 mV/s, profil CV menunjukkan bentuk persegi panjang yang terganggu mengkonfirmasi sifat superkapasitor tipe elektrokimia lapis ganda listrik (EDLC) untuk ketiga prekursor. Sebagai tambahan, puncak lebar dalam jendela tegangan 0.45-0.85V ditemukan pada profil CV menunjukkan kontribusi superkapasitor tipe kapasitansi semu/pseudokapasitan (Taer, Apriwandi, et al., 2022). Kombinasi dari dua tipe superkapasitor ini kemungkinan disebabkan oleh sifat kombinasi struktur porositas berlimpah dan heteroatom doping (Zhao et al., 2021). Selanjutnya, besarnya area loop tertutup dari profil CV menginterpretasikan nilai kapasitansi spesifik mereka, dimana KAPLS-z memiliki area tertutup CV terbesar dan setelahnya diikuti oleh KAPLS-k dan KAPLS-n. Berdasarkan rumus standar dengan sistem perhitungan dua elektroda berbentuk cakram koin padat, kapasitansi spesifik KAPLS-z didapatkan sebesar 137 F/g sedangkan kapasitansi spesifik KAPLS-k dan KAPLS-n didapatkan berturut-turut sebesar 122 F/g dan 36 F/g. Hasil kapasitansi yang telah didapatkan tersebut membuktikan bahwa prekursor berbasis biomassa sebagai sumber karbon yang diaktivasi secara kimia dan pirolisis suhu tinggi menunjukkan nilai kapasitansi spesifik lebih tinggi dibandingkan dengan tanpa aktivasi kimia. Lebih lanjut, aktivasi kimia ZnCl₂ secara nyata dapat menghasilkan kapasitansi spesifik tinggi. Aktivasi kimia dapat memaksimalkan potensi porositas prekursor khususnya untuk aplikasi elektroda superkapastitor.



Gambar 2. a) Profil CV pada laju pemindaian 1 mV/s, dan b) Profil CV dari KAPLS-z pada laju pemindaian berbeda

Bentuk profil CV yang persegi panjang terdistorsi dapat dipertahankan dari laju pemindaian 1 mV/s sampai 5 mV/s, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2b, mengindikasikan pembentukan sifat lapis ganda listrik normal untuk material karbon berpori berbasis bahan asal organik dan biomassa. Pada laju pemindaian 2 dan 5 mV/s profil CV dari KAPLS-z tidak ditemukan puncak lebar pada jendela tegangan tertentu mengkonfirmasi sifat pseudo-kapasitif tidak bertahan pada dinamika cepat transfer ion lebih tinggi. Dinamika cepat transportasi ion berbeda secara simultan mempengaruhi sifat kapasitif, laju pemindaian yang tinggi secara teratur dapat mereduksi kapasitansi spesifik dari KAPLS-z. Fenomena ini umum ditemui pada berbagai studi berbasis limbah sebagai bahan dasar karbon.

Sifat elektrokimia dari elektroda KAPLS-n, KAPLS-k, KAPLS-z selanjutnya ditinjau melalui GCD dalam sistem dua elektroda pada elektrolit H_2SO_4 . Profil GCD dari KAPLS-n, KAPLS-k, KAPLS-z direkam pada rapat arus 1 A/g dalam laju pemindaian 1 mV/s, sebagaimana ditampilkan pada gambar 3a. Secara umum, semua profil GCD menunjukkan kurva khas segitiga sama kaki yang terdistorsi yang mengindikasikan bahwa elektroda memiliki sifat kapasitif EDLC yang ideal, sebagaimana dikonfirmasi serupa melalui analisis CV. Lebih lanjut, durasi pengisian-pengosongan mengungkapkan nilai kapasitif dari elektroda KAPLS-n, KAPLS-k, KAPLS-z. Elektroda KAPLS-n yang disiapkan tanpa aktivasi kimia menunjukkan waktu cas-discas pada 52 sekon dengan kapasitansi spesifik sebesar 24 F/g. Hal ini dikarenakan sifat porositas yang buruk pada prekursor KALPS-n. Hal ini juga terbukti pada perubahan dimensi cakram koin padat karbon yang dihasilkan paling rendah diantara ketiganya. Perlakuan aktivasi kimia menggunakan KOH diyakini dapat meningkatkan porositas karbon yang ditandai dengan penyusutan dimensi densitas mereka yang hampir 34% dapat meningkatkan nilai kapasitansi spesifik dari prekursor KALPS-k. Elektroda KALPS-k secara nyata menampilkan durasi waktu cas-discas lebih panjang yaitu 264 sekon yang menghasilkan kapasitansi spesifik sebesar 130 F/g. Menariknya lagi, pada aktivasi $ZnCl_2$, elektroda KALPS-z menunjukkan waktu cas-discas paling lama mencapai 335 sekon dengan kapasitansi spesifik sebesar 140 F/g. Hasil interpretasi ini menunjukkan bahwa sampel dengan perlakuan aktivasi kimia menghasilkan karbon dengan prestasi kapasitif tinggi. Lebih daripada itu, ketiga elektroda yang telah disiapkan menunjukkan resistansi elektroda yang relatif kecil pada rentang 0.03-0.04 Ω . Hal ini dikonstruksikan oleh beberapa factor diantaranya: (i) penurunan massa, ketebalan dan diameter koin padat yang semakin besar memungkinkan peningkatan porositas karbon yang sangat berguna untuk menyediakan situs aktif maksimal pada permukaan elektroda sehingga ion-ion membentuk lapisan listrik berlimpah, (ii) bentuk elektroda karbon yang dipertahankan tetap dalam bentuk padat bebas pengikat memungkinkan elektroda memiliki konduktivitas listrik tinggi sehingga menghasilkan resistansi elektroda yang rendah.



Gambar 3. a) Profil GCD, dan b) Plot Ragone dari KAPLS-n, KAPLS-k, KAPLS-z pada 1 A/g

Melalui persamaan standar, energi dan rapat spesifik yang dihasilkan oleh elektroda padat KAPLS-n, KAPLS-k, KAPLS-z ditampilkan dalam bentuk plot Ragone, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3b. Gambar 3b mengkonfirmasi energi spesifik tertinggi didapatkan sebesar 6,1 Wh/kg pada KAPLS-z diikuti oleh KAPLS-k dan KAPLS-n berurut-turut sebesar 4,2 Wh/kg dan 1,9 Wh/kg, sedangkan daya spesifik optimum mereka berturut-turut 92,5, 85,9 dan 80,9 W/kg. Kapasitansi spesifik dan kepadatan energi spesifik

yang dihasilkan pada penelitian ini sangat kompetitif dibandingkan dengan superkapasitor simetris berbasis karbon turunan biomassa yang dilaporkan sebelumnya. Secara eksplisist, prestasi elektrokimia dari studi ini dibandingkan dengan studi sebelumnya dirangkum dalam Tabel 1. Hasil tersebut mengkonfirmasi bahwa limbah lidi sawit berpotensi dijadikan sebagai sumber karbon untuk aplikasi superkapasitor.

Tabel 1. Perbandingan sifat elektrokimia superkapasitor pada berbagai sumber bahan asal

Sumber bahan asal	Tipe karbon	C _{sp} (F/g)	E _{sp} (Wh/kg)	P _{sp} (W/kg)	Ref
Cangkang kepiting	Serbuk+perekat	128.5	4,46	50	(Shang et al., 2021)
SnCl ₄ ·5H ₂ O/PVA	Serbuk+perekat	105	5,1	242,2	(Z. Liu et al., 2014)
Tahu	Serbuk+perekat	170	7,2	88,9	(Sun et al., 2018)
Alang-alang	Serbuk+perekat	198.6	3,5	20.000	(He et al., 2021)
Tanaman poplar	Koin padat	58.71	7,99	372	(Kumar et al., 2020)
Lidi sawit	Koin padat bebas pengikat	140	6,1	92,5	Studi ini

SIMPULAN

Limbah biomassa lidi kelapa sawit telah berhasil di pelajari dan dikonversi menjadi sumber karbon alami sebagai bahan asal material elektroda untuk aplikasi penyimpanan energi superkapasitor. Karbon yang didapatkan disintesis melalui proses aktivasi kimia dan pirolisis satu tahap terintegrasi dari karbonisasi dan aktivasi fisika. Selanjutnya, potensi lidi sawit sebagai sumber karbon dipelajari melalui perbedaan agen pengaktif yang diterapkan meliputi non-aktivasi, aktivasi kimia dengan KOH, dan aktivasi kimia dengan ZnCl₂. Semua sampel menunjukkan penurunan dimensi massa, ketebalan, dan diameter setelah diberikan perlakuan pirolisis suhu tinggi. Prekursor KAPLS-z menunjukkan degradasi dimensi massa, ketebalan, diameter, dan densitas paling tinggi mengindikasikan pembentukan porositas paling baik diantara ketiga sampel. Menariknya, ketiga prekursor yang telah disiapkan dapat mempertahankan bentuk cakram padat bebas pengikat yang mengkonfirmasi sifat konduktivitas listrik tinggi pada material elektroda. Lebih lanjut, sifat elektrokimia dari elektroda yang didapatkan ditinjau melalui pendekatan CV dan GCD. Kapasitansi spesifik dari KAPLS-n, KAPLS-k, dan KAPLS-z berturut-turut sebesar 24 F/g, 130 F/g dan 140 F/g pada 1 A/g dalam larutan elektrolit uji 1 M H₂SO₄. Lebih lanjut, energi sepsifik tertinggi ditemukan sebesar 6.1 Wh/kg pada elektroda KAPLS-z dengan daya spesifik optimum sebesar 92.5 W/kg. Hasil ini mengkonfirmasi desain elektroda cakram koin padat dari karbon aktif berbahan asal limbah lidi kelapa sawit sangat berpotensi untuk diaplikasi sebagai penyimpanan energi superkapasitor.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, S., Parvaz, M., Johari, R., & Rafat, M. (2018). Studies on activated carbon derived from neem (*azadirachta indica*) bio-waste, and its application as supercapacitor electrode. *Materials Research Express*, 5(4), 045601. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aab924>
- Atika, & Dutta, R. K. (2021). Oxygen-rich porous activated carbon from eucalyptus wood as an efficient supercapacitor electrode. *Energy Technology*, 9(9), 1–12. <https://doi.org/10.1002/ente.202100463>
- Ayinla, R. T., Dennis, J. O., Zaid, H. M., Sanusi, Y. K., Usman, F., & Adebayo, L. L. (2019). A review of technical advances of recent palm bio-waste conversion to activated carbon for energy storage. *Journal of Cleaner Production*, 229, 1427–1442. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.116>

- Ezechi, E. H., & Muda, K. (2019). Overview of trends in crude palm oil production and economic impact in Malaysia. *Sriwijaya Journal of Environment*, 4(1), 19–26. <https://doi.org/10.22135/sje.2019.4.1.19>
- González, A., Goikolea, E., Barrena, J. A., & Mysyk, R. (2016). Review on supercapacitors: Technologies and materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1189–1206.
- He, D., Gao, Y., Wang, Z., Yao, Y., Wu, L., Zhang, J., Huang, Z. H., & Wang, M. X. (2021). One-step green fabrication of hierarchically porous hollow carbon nanospheres (HCNSs) from raw biomass: Formation mechanisms and supercapacitor applications. *Journal of Colloid and Interface Science*, 581, 238–250.
- Kumar, T. R., Senthil, R. A., Pan, Z., Pan, J., & Sun, Y. (2020). A tubular-like porous carbon derived from waste American poplar fruit as advanced electrode material for high-performance supercapacitor. *Journal of Energy Storage*, 32(September), 101903. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101903>
- Li, W., Chen, C., Wang, H., Li, P., Jiang, X., Yang, J., & Liu, J. (2022). Hierarchical porous carbon induced by inherent structure of eggplant as sustainable electrode material for high performance supercapacitor. *Journal of Materials Research and Technology*, 17, 1540–1552.
- Liang, S. X., Duan, F. F., Lü, Q. F., & Yang, H. (2019). Hierarchical Biocarbons with Controlled Micropores and Mesopores Derived from Kapok Fruit Peels for High-Performance Supercapacitor Electrodes. *ACS Omega*, 4(3), 5991–5999. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b00148>
- Liangshuo, L., Lin, Q., Xinyu, L., Ming, D., & Xin, F. (2020). Preparation of biomass-based porous carbon derived from waste ginger slices and its electrochemical performance. *Optoelectronics and Advanced Materials, Rapid Communications*, 14(11–12), 548–555.
- Lin, X. Q., Yang, N., Qiu-Feng, L., & Liu, R. (2019). Self-Nitrogen-Doped Porous Biocarbon from Watermelon Rind: A High-Performance Supercapacitor Electrode and Its Improved Electrochemical Performance Using Redox Additive Electrolyte. *Energy Technology*, 7(3).
- Liu, H., Chen, W., Zhang, R., Xu, C., Huang, X., Peng, H., Huo, C., Xu, M., & Miao, Z. (2021). Bioinspired in situ self-catalyzing strategy towards graphene nanosheets with hierarchical structure derived from biomass for advanced supercapacitors. *Applied Surface Science*, 566, 150692.
- Liu, Z., Fu, D., Liu, F., Han, G., Liu, C., Chang, Y., Xiao, Y., Li, M., & Li, S. (2014). Mesoporous carbon nanofibers with large cage-like pores activated by tin dioxide and their use in supercapacitor and catalyst support. *Carbon*, 70, 295–307. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.01.011>
- Ma, F., Ding, S., Ren, H., & Liu, Y. (2019). Sakura-based activated carbon preparation and its performance in supercapacitor applications. *RSC Advances*, 9(5), 2474–2483. <https://doi.org/10.1039/c8ra09685f>
- Niu, J., Liu, M., Xu, F., Zhang, Z., Dou, M., & Wang, F. (2018). Synchronously boosting gravimetric and volumetric performance: Biomass-derived ternary-doped microporous carbon nanosheet electrodes for supercapacitors. *Carbon*, 140, 664–672. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.08.036>
- Rawat, S., Mishra, R. K., & Bhaskar, T. (2022). Biomass derived functional carbon materials for supercapacitor applications. *Chemosphere*, 286, 131961.
- Saini, S., Chand, P., & Joshi, A. (2021). Biomass derived carbon for supercapacitor applications: Review. *Journal of Energy Storage*, 39, 102646. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102646>
- Shang, Z., An, X., Liu, L., Yang, J., Zhang, W., Dai, H., Cao, H., Xu, Q., Liu, H., & Ni, Y. (2021). Chitin nanofibers as versatile bio-templates of zeolitic imidazolate frameworks for N-doped hierarchically porous carbon electrodes for supercapacitor. *Carbohydrate Polymers*, 251(29), 117107.
- Sun, X., Ye, J., Pan, F., Xu, J., Cheng, T., Wang, X., Ikram, M., & Zhu, Y. (2018). Hierarchical porous carbon obtained from frozen tofu for efficient energy storage. *New Journal of Chemistry*, 42(15),

12421–12428. <https://doi.org/10.1039/c8nj01788c>

- Taer, E., Apriwandi, A., Chow, S., & Taslim, R. (2023). Integrated pyrolysis approach of self-O-doped hierarchical porous carbon from yellow mangosteen fruit for excellent solid-state supercapacitor volumetric performance. *Diamond & Related Materials*, *135*, 109866.
- Taer, E., Apriwandi, A., Nursyafni, N., & Taslim, R. (2022). Avertrhoa bilimbi leaves-derived oxygen doped 3D-linked hierarchical porous carbon as high-quality electrode material for symmetric supercapacitor. *Journal of Energy Storage*, *52*, 104911. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104911>
- Taer, E., Apriwandi, A., & Rama, D. (2021). Solid coin-like design activated carbon nanospheres derived from shallot peel precursor for boosting supercapacitor performance. *Journal of Materials Research and Technology*, *15*, 1732–1741. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.09.025>
- Taer, E., Pratiwi, L., Apriwandi, Mustika, W. S., Taslim, R., & Agustino. (2020). Three-dimensional pore structure of activated carbon monolithic derived from hierarchically bamboo stem for supercapacitor application. *Communications in Science and Technology*, *5*(1), 22–30.
- Taer, E., Taslim, R., & Apriwandi, A. (2022). Ultrahigh capacitive supercapacitor derived from self-oxygen doped biomass-based 3D porous carbon sources. *ChemNanoMat*, *8*(2), e202100388. \
- Zhao, C., Ding, Y., Huang, Y., Li, N., Hu, Y., & Zhao, C. (2021). Soybean root-derived N , O co-doped hierarchical porous carbon for supercapacitors. *Applied Surface Science*, *555*(April), 149726.