

## SINTESIS KARBON BERPORI AKTIF DARI ECENG GONDOK DAN APLIKASINYA SEBAGAI ALTERNATIF ANODA BATERAI *LEAD ACID*

MITA PUTRIYANI<sup>1</sup>, SAHRUL HIDAYAT<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Sarjana Fisika, FMIPA, Universitas Padjadjaran, Jl. Raya Jatinangor KM 21, Jatinangor, Kabupaten Sumedang, 45363

<sup>2</sup>Departemen Fisika, FMIPA, Universitas Padjadjaran, Jl. Raya Jatinangor KM 21, Jatinangor, Kabupaten Sumedang, 45363

**Abstrak.** Baterai lead acid merupakan komponen penting dalam menyimpan energi listrik yang dihasilkan dari energi terbarukan. Salah satu komponen baterai yang mempengaruhi kemampuannya dalam menyimpan energi adalah elektroda. Pada penelitian ini, elektroda negatif baterai diganti dengan karbon aktif (AC) dari eceng gondok untuk mengurangi bobot dan mengkaji potensinya sebagai pengganti anoda timbal. Eceng gondok dipilih sebagai bahan baku AC karena memiliki densitas yang rendah sehingga menghasilkan jumlah partikel AC yang lebih banyak pada massa yang sama. Setelah eceng gondok melewati proses karbonisasi dan aktivasi kimia, AC yang dihasilkan memiliki gugus fungsi mirip dengan bahan bakunya, yaitu O-H, C=C, dan C-O. AC ini juga memiliki kandungan karbon yang tinggi dan kadar air yang rendah meskipun tidak melalui kalsinasi. Ketika AC dikompositkan dengan PbO, AC berperan sebagai "bak" yang menampung partikel PbO baik di bagian permukaan maupun makroporinya. Selain itu, nilai konduktivitas anoda baik AC maupun komposit PbO/AC memenuhi syarat sebagai material aktif elektroda, yaitu secara berturut-turut  $4,46 \times 10^{-2}$  S/cm,  $1,56 \times 10^{-2}$  S/cm,  $8,80 \times 10^{-3}$  S/cm, dan  $7,59 \times 10^{-3}$  S/cm untuk variasi AC, komposit 30% PbO:70% AC, 50% PbO:50% AC, dan 70% PbO:30% AC. Sayangnya, sel baterai yang dihasilkan masih belum bisa menyamai baterai standar dari segi kapasitasnya karena kualitas elektroda yang rendah.

**Kata kunci:** Baterai Lead Acid, Eceng Gondok, Karbon Aktif, Komposit PbO/Karbon Aktif, Kapasitas Pengosongan.

**Abstract.** Lead-acid batteries are an essential part of storing electrical energy from renewable sources. The electrode is one of the battery components that affects its ability to store energy. In this research, the negative battery electrode was replaced with activated carbon (AC) from water hyacinth to reduce weight and evaluate its potential as a replacement for lead anodes. Water hyacinth was chosen as the raw material for AC because it has a low density and produces more AC particles for the same mass. After the water hyacinth goes through the carbonization and chemical activation process, the resulting AC has functional groups similar to those of the raw material: O-H, C=C, and C-O. This AC also has a high carbon and low water content, although it does not undergo calcination. When AC is combined with PbO, AC acts as a "trough" that holds PbO particles both on the surface and in the macropores. Furthermore, the anode conductivity values for both AC and PbO/AC composites meet the requirements as active electrode materials, namely  $4.46 \times 10^{-2}$  S/cm,  $1.56 \times 10^{-2}$  S/cm,  $8.80 \times 10^{-3}$  S/cm, and  $7.59 \times 10^{-3}$  S/cm for AC, composite of 30% PbO:70% AC, 50% PbO:50% AC and 70% PbO:30% AC. Unfortunately, due to the poor quality of the electrodes, the resulting battery cells still cannot compete with standard batteries in terms of capacity.

**Keywords:** Lead-Acid Battery, Water Hyacinth, Activated Carbon, PbO/Activated Carbon Composite, Discharge Capacity.

### 1. Pendahuluan

Untuk mengurangi emisi karbon dan ketergantungan pada bahan bakar fosil, Indonesia berkomitmen mencapai target bauran energi terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025 [1]. Hal ini mendorong dipercepatnya pemanfaatan teknologi energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan, seperti kendaraan listrik dan PLTS atap. Dalam pengaplikasian energi terbarukan tersebut, baterai memegang peranan penting sebagai penyimpan energi listrik secara kimia dan dapat mengubahnya

---

\* Email: sahrul.hidayat@phys.unpad.ac.id

menjadi arus listrik saat diperlukan [2]. Salah satu jenis baterai yang umum digunakan dalam aplikasi ini adalah baterai *lead acid* [3].

Baterai *lead acid* (35-40 Wh/kg) memiliki densitas energi yang lebih rendah dibandingkan baterai *lithium-ion* (>200 Wh/kg), tetapi harganya lebih murah. Hal ini membuat baterai *lead acid* tetap menjadi pilihan umum sebagai sumber daya listrik elektrokimia. Selain itu, meskipun baterai *lead acid* mengandung unsur timbal yang beracun, baterai ini tetap dianggap sebagai baterai ramah lingkungan karena dapat didaur ulang dengan baik, tidak mudah rusak, tangguh, tidak memerlukan perawatan khusus, dan dapat beroperasi dalam rentang suhu yang lebar [4]. Salah satu permasalahan baterai *lead acid* adalah pengelupasan bahan aktif dari permukaan elektroda dan korosi yang mengakibatkan pendeknya masa pakai baterai. Proses *charge-discharge* berulang menyebabkan anoda Pb terdegradasi, sehingga siklus dan kapasitas baterai berkurang [5]. Sulfasi atau penumpukan kristal timbal sulfat yang menutupi anoda menjadi gejala terjadinya degradasi tersebut.

Solusi untuk mengatasi permasalahan baterai *lead acid* yang disebutkan di atas adalah menggunakan anoda karbon sebagai pengganti timbal. Beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa penambahan karbon pada material aktif negatif baterai *lead acid* dapat mengurangi sulfasi dan meningkatkan jumlah siklus hidup [6]. Dalam hal ini, karbon ditambahkan dalam bentuk karbon aktif karena dapat meningkatkan aktivitas elektrokimia pada permukaan elektroda sehingga berpotensi meningkatkan kapasitas baterai. Untuk menekan evolusi hidrogen berlebihan saat karbon aktif digunakan sebagai elektroda, dapat dipertimbangkan penggunaan bentuk kompositnya dengan PbO. Tentunya, karbon aktif yang digunakan harus memiliki tingkat porositas dan volume pori yang memadai untuk memfasilitasi pergerakan ion  $SO_4^{2-}$ .

Penelitian terdahulu telah menggunakan karbon aktif dari biomassa, yaitu sekam padi, sebagai tambahan pada material aktif anoda baterai *lead acid* [7]. Berdasarkan penelusuran publikasi, belum ada penelitian yang memanfaatkan eceng gondok sebagai karbon aktif untuk anoda baterai *lead acid*. Dibandingkan dengan sekam padi, eceng gondok memiliki densitas yang lebih rendah, yaitu berkisar antara 6,28 kg hingga 25,44 kg (berat basah) per meter persegi karena strukturnya yang berongga [8]. Densitas yang rendah ini dapat berkontribusi pada peningkatan jumlah karbon dengan massa yang rendah sehingga menurunkan bobot baterai *lead acid*. Selain itu, ketersediaan eceng gondok juga melimpah karena pertumbuhannya yang cepat dan kerap menjadi gulma di perairan. Oleh karena itu, dalam penelitian ini dilakukan sintesis karbon aktif dari eceng gondok dan mengaplikasikannya sebagai alternatif anoda baterai *lead acid*. Selain itu, dilakukan juga pengkajian karakteristik anoda baterai *lead acid* ketika PbO ditambahkan dalam bentuk komposit dengan karbon aktif.

## 2. Bahan dan Metoda

Eceng gondok yang sudah dibersihkan dan dihilangkan bagian akarnya dikeringkan selama 5 hari di bawah sinar matahari. Batang eceng gondok yang sudah kering dipotong menjadi ukuran 2-5 cm dan dipanaskan kembali menggunakan oven selama 1 jam pada suhu 85 °C. Berikutnya, karbonisasi dilakukan menggunakan *furnace* selama 1 jam pada suhu 600 °C. Arang yang dihasilkan dipisahkan dari abunya dan dihaluskan dengan ayakan berukuran 200 mesh. Selanjutnya, proses aktivasi secara kimia dilakukan dengan merendam arang dalam larutan aktivator  $ZnCl_2$  30% selama 24 jam pada suhu ruang. Karbon aktif kemudian dicuci dengan aquades sampai pH netral dan dikeringkan menggunakan oven pada suhu 85 °C dengan lama pemanasan divariasikan 1 jam, 2 jam, 5 jam, dan 10 jam. Karbon aktif dengan pemanasan 1 jam selanjutnya diaktivasi secara fisika menggunakan *tube furnace* yang dialiri gas argon selama 1 jam pada suhu 800°C, sedangkan variasi karbon aktif

lainnya tidak melalui proses ini. Untuk membuat komposit PbO/karbon aktif, serbuk PbO dan karbon aktif dicampurkan menggunakan mortar selama 1 jam. Massa PbO yang digunakan untuk membuat komposit ini divariasikan, yaitu 30%, 50%, dan 70% dari jumlah zat aktif katoda berukuran 3x2 cm.

Pembuatan sel baterai diawali dengan penyiapan *slurry* yang terbuat dari material aktif anoda, perekat *polyvinylidene fluoride* (PVDF), dan pelarut *N-methyl pyrrolidone* (NMP). Material aktif dan perekat dicampurkan dengan perbandingan massa 9:1 selama 2 jam menggunakan mortar. *Slurry* kemudian dideposisikan di atas grid anoda berukuran 3x2 cm. Selanjutnya, grid tersebut diletakkan di atas *hot plate* selama 2 jam pada suhu 80°C untuk menguapkan pelarut *slurry*. Terakhir, anoda yang sudah jadi disatukan dengan katoda dan separator dengan susunan zig-zag.

Dalam penelitian ini, batang eceng gondok kering dan karbon aktif dikarakterisasi menggunakan *Fourier Transform Infra-Red* (FTIR) untuk mengidentifikasi gugus fungsi dan efektivitas proses aktivasi fisika dalam menghasilkan karbon aktif dengan kandungan karbon tinggi dan kadar air rendah. Selain itu, karakterisasi *Scanning Electron Microscopy* (SEM) digunakan untuk mengamati morfologi arang, karbon aktif, dan komposit PbO/karbon aktif, sementara karakterisasi *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS) digunakan untuk mengidentifikasi kandungan unsur setiap sampel. Selanjutnya, konduktivitas anoda diukur menggunakan metode *Four Point Probe* (FPP). Sementara itu, uji siklibilitas sel baterai dilakukan untuk mengamati kestabilan baterai selama proses *charge-discharge* berulang.

### 3. Hasil dan Pembahasan

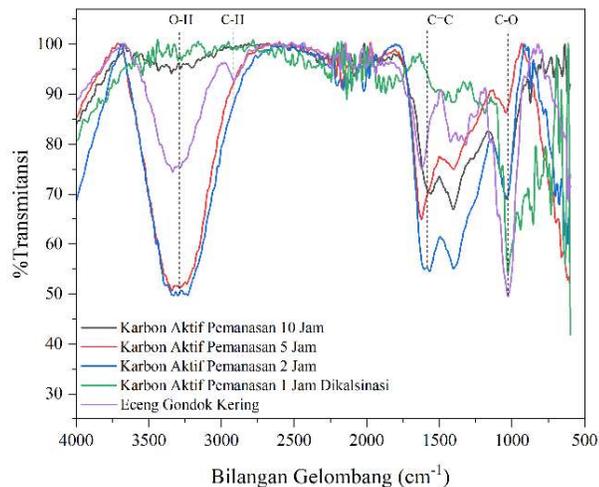
Hasil karakterisasi FTIR batang eceng gondok kering memperlihatkan munculnya beberapa gugus fungsi seperti yang tercantum dalam Tabel 1. Pada batang eceng gondok kering, gugus hidroksil (O-H) yang menunjukkan adanya selulosa dan lignin dapat diidentifikasi pada bilangan gelombang 3332  $\text{cm}^{-1}$ . Adanya gugus hidroksil yang besar menunjukkan ikatan hidrogen yang kuat dari karboksilat, fenol, atau alkohol [9]. Selain gugus hidroksil, batang eceng gondok kering juga mengandung gugus C-H alifatik yang dapat diidentifikasi pada bilangan gelombang 2921  $\text{cm}^{-1}$ . Gugus fungsi ini merupakan ciri khas dari senyawa hidrokarbon [10]. Sementara itu, pita pada 1621  $\text{cm}^{-1}$  dapat diatributkan pada getaran dari regangan cincin aromatik C=C yang terdapat dalam lignin [11]. Selain itu, keberadaan gugus fungsional dari komponen konstituen selulosa juga terlihat dengan munculnya pita pada 1027  $\text{cm}^{-1}$  terkait dengan getaran regangan C-O [12].

Karbon aktif variasi pemanasan 1 jam yang dikalsinasi serta pemanasan 2 jam, 5 jam, dan 10 jam tanpa kalsinasi menunjukkan gugus fungsi yang sama dengan batang eceng gondok kering, kecuali gugus C-H alifatik yang hilang. Perbedaan utama antara keempat sampel tersebut terletak pada intensitas relatif dari puncak-puncaknya. Berdasarkan Gambar 1, karbon aktif pemanasan 1 jam dikalsinasi memperlihatkan penurunan puncak absorpsi gugus fungsi O-H. Penurunan ini disebabkan oleh eliminasi air dan dimulainya pembentukan senyawa aromatik [9]. Sayangnya, proses kalsinasi ini juga merusak gugus fungsi C=C yang ditandai dengan penurunan intensitas serapan. Gugus fungsi ini mengindikasikan kemurnian unsur karbon dan bertanggung jawab atas getaran karbon-karbon dalam cincin aromatik. Sementara itu, karbon aktif pemanasan 2 jam memiliki intensitas puncak gugus fungsi O-H yang masih cukup tinggi dan dapat dikaitkan pada proses eliminasi air yang belum sempurna. Meskipun demikian, karbon aktif variasi ini menunjukkan peningkatan intensitas gugus fungsi C=C dibandingkan dengan batang eceng gondok kering. Nilai intensitas ini juga masih lebih tinggi dibandingkan karbon aktif yang dikalsinasi. Hal ini

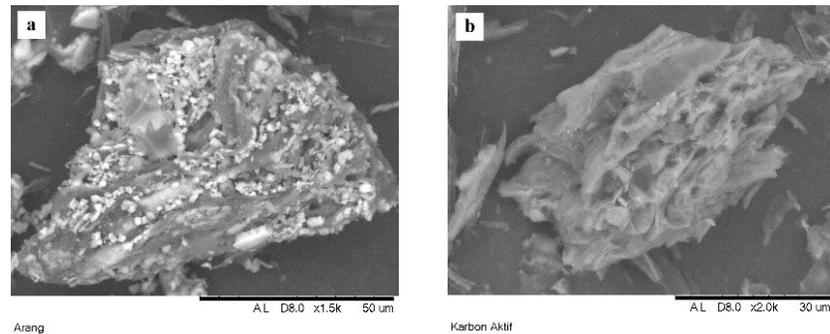
menunjukkan bahwa proses aktivasi sudah berhasil sedikit lebih memurnikan karbon aktif walaupun tidak dikalsinasi. Selanjutnya, spektrum karbon aktif pemanasan 5 jam dan 10 jam menunjukkan bahwa proses pemanasan berperan menghilangkan kadar air dan memurnikan kandungan karbon dalam karbon aktif. Dalam hal ini, semakin lama pemanasan menggunakan oven setelah proses pencucian, karbon aktif akan memiliki intensitas gugus fungsi O-H dan C=C yang semakin rendah.

**Tabel 1.** Analisis gugus fungsi batang eceng gondok kering dan karbon aktif dari hasil FTIR.

Sampel	Bilangan Gelombang ( $\text{cm}^{-1}$ )			
	O-H	C-H	C=C	C-O
Batang eceng gondok kering	3332	2921	1621	1027
	3303	-	1419	809
Karbon aktif pemanasan 1 jam dikalsinasi				852
				941
				1025
Karbon aktif pemanasan 2 jam	3295	-	1403	871
			1567	1033
Karbon aktif pemanasan 5 jam	3342	-	1401	1041
			1627	
Karbon aktif pemanasan 10 jam	3343	-	1409	1035
			1563	



**Gambar 1.** Spektrum FTIR batang eceng gondok kering dan karbon aktif



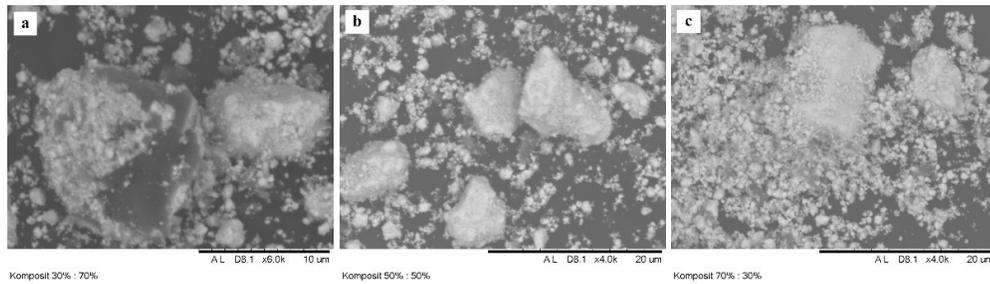
**Gambar 2.** Morfologi partikel (a) arang dan (b) karbon aktif

Berdasarkan Gambar 2, arang dan karbon aktif memiliki ukuran partikel yang heterogen. Selain itu, pori arang yang dihasilkan belum terlihat jelas karena permukaan pori tertutupi oleh residu karbonisasi seperti tar dan abu. Sementara itu, pori karbon aktif yang terbentuk tampak lebih jelas dibandingkan dengan arang hasil karbonisasi. Dalam hal ini,  $ZnCl_2$  dalam proses aktivasi berperan sebagai agen dehidrasi yang memicu perkembangan pori yang lebih lebar. Distribusi ukuran pori dari karbon aktif dapat diketahui melalui proses pengolahan citra menggunakan software ImageJ, yaitu ukuran rata-ratanya adalah  $2,7142 \mu m$  (makropori). Ukuran pori ini cukup untuk mendukung pergerakan ion  $SO_4^{2-}$  yang berdiameter  $0,0049 \mu m$  pada permukaan elektroda [13].

**Tabel 2.** Persentase kandungan unsur arang dan karbon aktif

Unsur	Arang		Karbon Aktif	
	% Berat	% Atomik	% Berat	% Atomik
C	72,553	83,673	59,059	73,064
O	12,179	10,544	24,718	22,957
Cl	14,247	5,566	1,515	0,635
Zn	1,022	0,217	14,707	3,343

Selanjutnya, hasil karakterisasi EDS menunjukkan persentase beberapa unsur dalam arang dan karbon. Persentase unsur-unsur tersebut tercantum pada Tabel 2. Berdasarkan Tabel 2, karbon merupakan unsur yang mendominasi dalam suatu arang (86,673%) dan karbon aktif (73,064%) yang menunjukkan bahwa proses penghilangan unsur selain karbon selama proses karbonisasi dan aktivasi telah berhasil. Selain itu, kandungan oksigen pada karbon aktif mengalami peningkatan yang dapat terjadi akibat interaksi karbon aktif dengan radikal bebas selama proses pencucian ataupun penyimpanan. Hal ini juga didukung oleh hasil FTIR sebelumnya yang menunjukkan banyaknya ikatan karbon dengan oksigen. Pengotor Zn serta Cl pada karbon aktif juga masih terdeteksi. Pengotor tersebut kemungkinan berasal dari proses aktivasi.



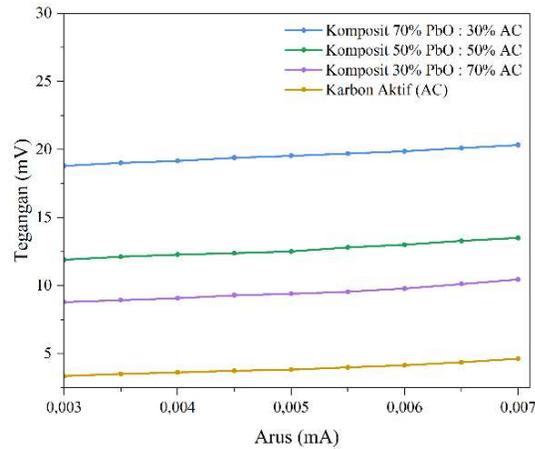
**Gambar 3.** Morfologi partikel komposit (a) 30% PbO:70% karbon aktif, (b) 50% PbO:50% karbon aktif, dan (c) 70% PbO:30% karbon aktif.

Berikutnya, Gambar 3 memperlihatkan hasil SEM komposit 30% PbO:70% karbon aktif, 50% PbO:50% karbon aktif, dan 70% PbO:30% karbon aktif. Hasil karakterisasi SEM menunjukkan bahwa distribusi partikel PbO dalam komposit PbO/karbon aktif bervariasi tergantung pada komposisinya. Pada variasi komposit 30% PbO:70% karbon aktif, karbon aktif berperan sebagai "bak" yang menampung PbO di dalam dan di permukaan pori karbon aktif. Hal ini dapat mengimplikasikan bahwa luas permukaan spesifik komposit ini cukup tinggi. Selain itu, pada variasi komposit 50% PbO:50% karbon aktif, karbon aktif tertutupi secara merata oleh PbO tanpa menyisakan bagian karbon aktif. Hal ini dapat menyebabkan penurunan luas permukaan spesifik secara signifikan. Sementara itu, pada variasi komposit 70% PbO:30% karbon aktif, pori dan permukaan karbon aktif juga tertutupi partikel PbO secara merata. Namun, pada komposit ini, jumlah partikel PbO lebih banyak dibandingkan matriksnya sehingga memberikan cabang gumpalan kecil yang dapat berperan untuk meningkatkan interaksi elektroda dan ion elektrolit.

**Tabel 3.** Persentase kandungan unsur komposit PbO/karbon aktif.

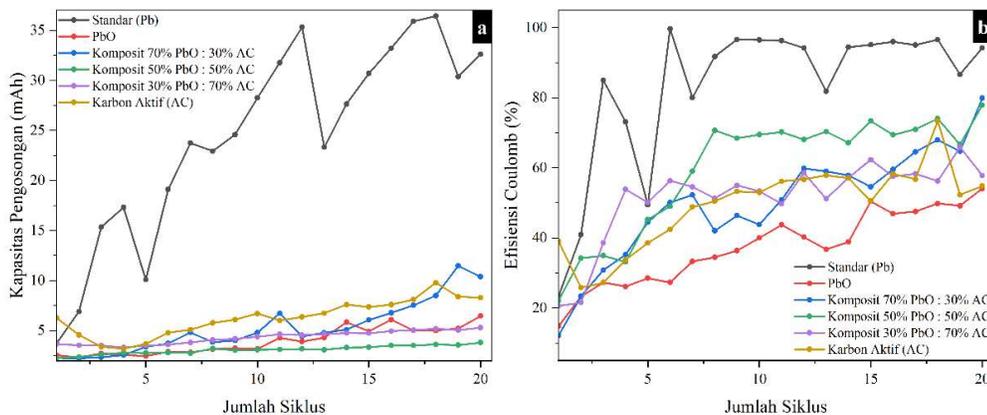
Unsur	Variasi PbO:Karbon Aktif					
	30%:70%		50%:50%		70%:30%	
	% Berat	% Atomik	% Berat	% Atomik	% Berat	% Atomik
C	23,356	64,752	14,355	51,697	7,923	35,106
O	11,356	23,636	11,198	30,275	12,996	43,231
Cl	1,107	1,040	2,107	2,571	0,971	1,458
Zn	0,737	0,376	0,784	0,518	0,254	0,207
Pb	63,444	10,197	71,556	14,939	77,856	19,999

Hasil EDS komposit PbO/karbon aktif dalam Tabel 3 menunjukkan bahwa semakin besar persentase PbO, semakin tinggi kandungan unsur O dan Pb, sedangkan unsur C semakin rendah. Kandungan pengotor Zn dan Cl dalam komposit ini juga lebih rendah dibandingkan karbon aktif. Dalam hal ini, komposit 70% PbO:30% karbon aktif memiliki kandungan pengotor relatif yang paling rendah.



**Gambar 4.** Pengaruh arus terhadap tegangan dalam uji konduktivitas.

Berdasarkan Gambar 4, tegangan yang terukur meningkat ketika arus yang diberikan pada permukaan sampel diperbesar. Hal ini bersesuaian dengan hukum Ohm yang menyatakan bahwa terdapat kesebandingan antara arus listrik yang mengalir dengan tegangan. Selain itu, semakin besar persentase PbO, tegangan yang terukur semakin besar untuk arus yang tetap. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan PbO dalam komposit PbO/karbon aktif memberikan penurunan nilai konduktivitas. Penurunan konduktivitas ini disebabkan oleh konduktivitas PbO yang cukup rendah, yaitu  $5,17 \times 10^{-6}$  S/cm [14]. Kandungan oksigen yang tinggi juga dapat menyumbat makropori sehingga menghambat pergerakan elektron pada permukaan elektroda sehingga menurunkan konduktivitasnya. Meskipun demikian, nilai konduktivitas yang didapatkan dalam penelitian ini masih berada pada spektrum konduktivitas listrik bahan semikonduktor, yaitu antara  $10^{-8} - 10^3$  S/cm. Nilai konduktivitas karbon aktif pada penelitian ini adalah  $4,46 \times 10^{-2}$  S/cm. Sementara itu, nilai konduktivitas komposit berturut-turut adalah  $1,55 \times 10^{-2}$  S/cm,  $8,80 \times 10^{-3}$  S/cm, dan  $7,59 \times 10^{-3}$  S/cm untuk variasi 30% PbO:70% karbon aktif, 50% PbO:50% karbon aktif, dan 70% PbO:30% karbon aktif.



**Gambar 5.** Hasil uji stabilitas siklus (a) kapasitas pengosongan dan (b) efisiensi coulomb baterai.

Pengujian siklibilitas dilakukan dengan mengatur konsentrasi elektrolit sebesar 15%, arus pengisian sebesar 100 mA, dan arus pengosongan sebesar 20 mA. Hasil uji siklibilitas digambarkan pada Gambar 5 yang menunjukkan kapasitas pengosongan dan efisiensi coulomb setiap siklusnya. Dari Gambar 5, baterai dengan anoda karbon aktif maupun komposit PbO/karbon aktif masih stabil setelah melalui 20 siklus pengisian dan pengosongan. Gambar 5 (a) menunjukkan bahwa kapasitas pengosongan dari yang tertinggi adalah variasi anoda standar, karbon aktif, komposit 70% PbO:30% karbon aktif, komposit 30% PbO:70% karbon aktif, PbO, dan komposit 50% PbO:50% karbon aktif.

Berdasarkan pengujian FPP sebelumnya, komposit 70% PbO:30% karbon aktif memiliki konduktivitas yang paling rendah, tetapi kapasitas pengosongannya lebih tinggi dari yang diperkirakan. Hal ini mungkin disebabkan oleh peran PbO sebagai cabang-cabang kecil yang aktif dan energetik sehingga mengimplikasikan bahwa cabang-cabang tersebut dapat diisi muatan. PbO yang masuk ke dalam pori karbon aktif juga berperan sebagai pengumpul arus sekunder [4]. Persentase pengotor Zn dan Cl yang rendah juga dapat berkaitan dengan kestabilan reaksi redoks sehingga elektroda tetap aktif mengikat ion dan tidak ternetralkan. Sementara itu, pada komposit 30% PbO:70% karbon aktif, luas permukaan karbon aktif yang masih cukup tinggi memfasilitasi reaksi elektrokimia sehingga ion-ion tersebut mudah untuk berinterkalasi. Komposit 50% PbO:50% karbon aktif memiliki kapasitas pengosongan yang paling rendah. Hal ini disebabkan oleh partikel PbO yang mengisi pori dan permukaan karbon aktif, sehingga menurunkan luas area permukaan spesifik dan volume pori. Karena komposisinya yang seimbang, kemungkinan tidak ada bagian aktif lain seperti pada variasi sebelumnya sehingga menurunkan kemampuan elektroda untuk berinteraksi dengan ion-ion elektrolit.

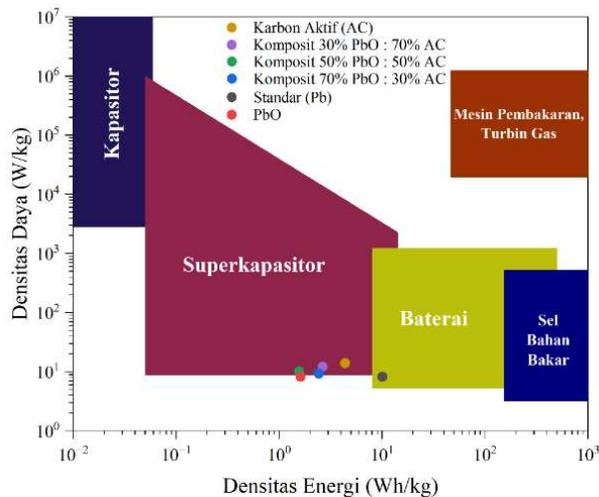
Di sisi lain, Gambar 5 (b) menunjukkan efisiensi coulomb tertinggi secara berturut-turut adalah variasi anoda standar, komposit 50% PbO:50% karbon aktif, komposit 30% PbO:70% karbon aktif, komposit 70% PbO:30% karbon aktif, karbon aktif, dan PbO. Semua sampel menunjukkan kestabilan bahkan kecenderungan efisiensi coulomb yang meningkat selama pengujian 20 siklus pertama. Dengan demikian, dari hasil ini diperoleh bahwa tidak ada pola tertentu yang dapat diprediksi untuk kapasitas pengosongan dan efisiensi coulomb komposit PbO/karbon aktif. Namun, variasi 70% PbO:30% karbon aktif merupakan komposisi komposit PbO/karbon aktif optimal untuk mendapatkan kapasitas pengosongan yang tinggi.

**Tabel 4.** Perbandingan kinerja baterai dengan beberapa variasi anoda.

Anoda	$m$ (g)	$\bar{Q}_{ds}$ (mAh/g)	$\bar{\eta}$ (%)	$\bar{E}_s$ (Wh/kg)	$\bar{P}_s$ (W/kg)
Karbon Aktif (AC)	2,8264	2,23	49,33	4,38	13,93
Komposit 30% PbO : 70% AC	3,2031	1,35	51,53	2,65	12,22
Komposit 50% PbO : 50% AC	3,8896	0,80	59,75	1,57	10,15
Komposit 70% PbO : 30% AC	4,2277	1,25	50,00	2,43	9,21
PbO	4,8578	0,81	37,48	1,62	8,21
Standar (Pb)	4,6835	5,23	83,37	10,08	8,19

Berdasarkan Tabel 4, baterai *lead acid* baik dengan anoda karbon aktif maupun komposit PbO/karbon aktif belum bisa menyamai baterai standar dari segi kapasitasnya. Hal ini juga terlihat dari ragone plot pada Gambar 6, di mana kinerja divais yang diperoleh lebih mirip dengan

superkapasitor daripada baterai. Elektroda karbon aktif dalam divais ini lebih bertindak sebagai superkapasitor asimetris yang mampu memberikan dan menyerap muatan dengan cepat. Kualitas elektroda sangat berperan penting dalam menentukan kinerja baterai. Namun, kualitas elektroda dalam penelitian ini masih rendah akibat proses deposisi yang tidak dapat secara presisi menghasilkan massa elektroda sesuai standar. Selain itu, kualitas karbon aktif yang disintesis sebagai penyimpan muatan juga mempengaruhi kualitas elektroda yang dihasilkan.



Gambar 6. Ragone plot dari divais yang dihasilkan

#### 4. Kesimpulan

Karbon aktif dari eceng gondok memiliki ukuran partikel dan pori yang tidak seragam. Pori tersebut termasuk dalam jenis makropori dengan ukuran rata-rata  $2,7142 \mu\text{m}$ . Ukuran pori ini diperlebar oleh peran  $\text{ZnCl}_2$  sebagai agen dehidrasi. Meskipun demikian, ukuran ini cukup untuk memfasilitasi pergerakan ion sulfat. Sementara itu, nilai konduktivitas listrik karbon aktif adalah  $4,46 \times 10^{-2} \text{ S/cm}$ , sedangkan komposit 30% PbO:70% karbon aktif, 50% PbO:50% karbon aktif, dan 70% PbO:30% karbon aktif berturut-turut ialah  $1,55 \times 10^{-2} \text{ S/cm}$ ,  $8,80 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$ , dan  $7,59 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$ . Konduktivitas PbO/karbon aktif menurun karena nilai konduktivitas PbO itu sendiri yang cukup rendah. Walaupun demikian, nilai konduktivitas ini sudah cukup baik sebagai syarat material aktif anoda baterai *lead acid* karena berada dalam rentang konduktivitas semikonduktor. Namun, sel baterai *lead acid* dengan anoda baik karbon aktif maupun komposit PbO/karbon aktif belum bisa menyamai baterai standar dari segi kapasitasnya. Hal ini dipengaruhi oleh kualitas elektroda yang dihasilkan. Kualitas elektroda masih rendah dipengaruhi oleh proses deposisi yang tidak dapat secara presisi menghasilkan massa elektroda sesuai standar dan juga kualitas karbon aktif yang disintesis sebagai penyimpan muatan.

#### Daftar Pustaka

- [1] Pemerintah Indonesia. (2017). *Peraturan Presiden Republik Indonesia No. 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional*. Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2017, No.43. Sekretariat Negara. Jakarta.

- [2] Nasution, M. (2021). Karakteristik Baterai Sebagai Penyimpan Energi Listrik Secara Spesifik. *JET (Journal of Electrical Technology)*, 6(1), pp.35–40.
- [3] Truong, V.M., Duong, N.B., Dien, T.V. dan Banh, H.T. (2021). Improving Performance of Lead-Acid Batteries Through Carbon Lead Hybrid Electrodes. *Journal of Sustainability Science and Management*, 16(3), pp.91–102.
- [4] Yin, J., Lin, H., Shi, J., Lin, Z., Bao, J., Wang, Y., Lin, X., Qin, Y., Qiu, X. dan Zhang, W. (2022). Lead-Carbon Batteries toward Future Energy Storage: From Mechanism and Materials to Applications. *Electrochemical Energy Reviews*, 5(3).
- [5] Ma, S., Jiang, M., Tao, P., Song, C., Wu, J., Wang, J., Deng, T. dan Shang, W. (2018). Temperature Effect and Thermal Impact in *Lithium-ion* Batteries: A Review. *Progress in Natural Science: Materials International*, 28(6), pp.653–666.
- [6] Yanamandra, K., Pinisetty, D. dan Gupta, N. (2023). Impact of carbon additives on lead-acid battery electrodes: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 173.
- [7] Lin, Z., Lin, N., Lin, H. dan Zhang, W. (2020). Significance of PbO deposition ratio in activated carbon-based lead-carbon composites for lead-carbon battery under high-rate partial-state-of-charge operation. *Electrochimica Acta*, 338.
- [8] Lin, Z., Zhang, W., Lin, N., Lin, H. dan Shi, J. (2020). Long-Life Lead-Acid Battery for High-Rate Partial-State-of-Charge Operation Enabled by a Rice-Husk-Based Activated Carbon Negative Electrode Additive. *ChemistrySelect*, 5(8), pp.2551–2558.
- [9] Quinten Struik, Junior, Veraart, A.J. dan Kosten, S. (2022). Methane Emissions through Water Hyacinth are Controlled by Plant Traits and Environmental Conditions. *Aquatic Botany*, 183.
- [10] Maulina, S. dan Mentari, V.A. (2019). Comparison of Functional Group and Morphological Surface of Activated Carbon from Oil Palm Fronds Using Phosphoric Acid (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) and Nitric Acid (HNO<sub>3</sub>) as an Activator. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 505.
- [11] Tiwow, V.A., Rampe, M.J., Rampe, H.L. dan Apita, A. (2021). Pola Inframerah Arang Tempurung Kelapa Hasil Pemurnian Menggunakan Asam. *CHEMISTRY PROGRESS*, 14(2).
- [12] Chanpee, S., Suksai, N., Kaewtrakulchai, N., Chutipajit, S., Fuji, M. dan Eiad-ua, A. (2020). Highly Porous Carbon Materials for Adsorbent from Water Hyacinth via Hydrothermal Carbonization. *AIP Conference Proceedings*, 2279.
- [13] Setyaningsih, L., Satria, E., Khoironi, H., Dwisari, M., Setyowati, G., Rachmawati, N., Kusuma, R. dan Anggraeni, J. (2019). Cellulose extracted from water hyacinth and the application in hydrogel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 673(1).
- [14] Louati, I., Guesmi, F., Chaabouni, A., Hannachi, C. dan Hamrouni, B. (2015). Effect of Ionic Strength on the Ion Exchange Equilibrium between AMX Membrane and Electrolyte Solutions. *Water Quality Research Journal*, 51(1),
- [15] Mousa, A.O. dan Marmoss, A.F. (2017). Study the Structural and Electrical Properties of PbO Thin Films Deposited by Chemical Spray Pyrolysis Technique. *International Journal of ChemTech Research*, 10(9), p.624-632.