

STUDI KOMPARASI PELARUT ORGANIK PADA ELEKTROLIT TEABF₄ TERHADAP KINERJA ELEKTROKIMIA SUPERKAPASITOR KARBON

Yusril Al Fath, Surya Prihanto, Ahmad Faruq Abdurrahman, Ayu Aprilia, Suprihatin, dan Iqbal Firdaus

*Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung, Jl. Soemantri Brodjonegoro no. 1, Bandar Lampung, 35144, Indonesia
E-mail: yusril.al@fmipa.unila.ac.id*

Abstrak

Superkapasitor berbasis karbon merupakan perangkat penyimpanan energi yang memiliki rapat daya tinggi, siklus hidup panjang, serta kemampuan pengisian–pengosongan cepat. Kinerja superkapasitor sangat dipengaruhi oleh interaksi antara elektroda, separator, dan elektrolit. Namun, pengaruh sifat pelarut seperti viskositas atau konstanta dielektrik dari elektrolit terhadap performa elektrokimia masih belum dipahami secara optimal. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi pelarut organik Acetonitrile (ACN) dan Propylene Carbonate (PC) pada elektrolit Tetraethylammonium tetrafluoroborate (TEABF₄) terhadap kinerja superkapasitor berbasis karbon aktif dengan separator polietilen. Pembuatan elektroda dilakukan dengan metode blending menggunakan komposisi 9 (karbon aktif) : 1 (carbon black) : 1 (PVDF). Hasil XRD menunjukkan karbon aktif bersifat amorf dengan puncak (002), sementara polietilen memiliki struktur kristalin dengan puncak utama pada $2\theta \approx 21^\circ$ (110) dan 23° (200). Citra SEM memperlihatkan karbon aktif memiliki struktur berpori yang mendukung adsorpsi ion, sedangkan separator polietilen menunjukkan jaringan fibril yang memungkinkan transport ion. Pengujian GCD pada tegangan 1 V (0,1 A/g) menunjukkan bahwa penggunaan pelarut ACN menghasilkan kapasitansi lebih tinggi (47,01 F/g) dibandingkan dengan PC, serta nilai iR drop yang lebih rendah (0,06 V vs 0,57 V). Pada rapat arus tinggi, kepadatan daya superkapasitor dengan elektrolit TEABF₄/ACN meningkat dari 166,6 W/kg hingga 676,04 W/kg.

Kata kunci: *Karbon; Superkapasitor; Tetraethylammonium tetrafluoroborate (TEABF₄); Acetonitrile (ACN); Propylene Carbonate (PC)*

Abstract

Carbon-based supercapacitors are energy storage devices characterized by high power density, long cycle life, and fast charge–discharge capability. Their performance is strongly influenced by the interaction between electrodes, separators, and electrolytes. However, the influence of solvent properties, such as viscosity and dielectric constant, on electrochemical performance is not yet fully understood. This study aims to investigate the effect of organic solvent variation, namely acetonitrile (ACN) and propylene carbonate (PC), in tetraethylammonium tetrafluoroborate (TEABF₄) electrolyte on the performance of carbon-based supercapacitors with polyethylene separators. The electrodes were prepared using a blending method with a composition ratio of 9(activated carbon) : 1(carbon black): 1(PVDF). XRD results indicate that activated carbon is amorphous with (002) peak, while polyethylene exhibits a crystalline structure with main peaks at $2\theta \approx 21^\circ$ (110) and 23° (200). SEM images reveal that activated carbon has a porous structure that facilitates ion adsorption, whereas the polyethylene separator shows a fibrillar network that enables ion transport. GCD testing at 1 V (0.1 A/g) demonstrates that the use of ACN results in higher capacitance (47.01 F/g) compared to PC, along with a lower iR drop (0.06 V vs 0.57 V). At high current density, the power density of the TEABF₄/ACN electrolyte increases from 166.6 W/kg to 676.04 W/kg.

Keywords: *Carbon; Supercapacitor; Tetraethylammonium tetrafluoroborate (TEABF₄); Acetonitrile (ACN); Propylene Carbonate (PC)*

PENDAHULUAN

Kebutuhan terhadap sistem penyimpanan energi yang efisien dan berdaya tinggi terus meningkat seiring dengan perkembangan perangkat elektronik portabel, kendaraan listrik, dan sistem energi terbarukan. Salah satu perangkat penyimpanan energi yang banyak dikembangkan adalah superkapasitor karena memiliki keunggulan berupa densitas daya tinggi, waktu pengisian cepat, stabilitas siklus yang baik, serta umur pakai yang panjang [1,2]. Superkapasitor berbasis karbon (*Activated Carbon/AC*) menjadi salah satu jenis yang paling banyak diteliti karena material karbon memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi, konduktivitas listrik yang baik, stabilitas kimia yang tinggi, serta ketersediaan sumber yang melimpah [3,4]. Kinerja elektrokimia superkapasitor tidak hanya dipengaruhi oleh sifat material elektroda, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh sistem elektrolit yang digunakan. Elektrolit berperan penting dalam proses transport ion, pembentukan lapisan *electric double layer*, serta menentukan jendela tegangan operasi dari perangkat superkapasitor. Salah satu elektrolit organik yang banyak digunakan dalam penelitian superkapasitor adalah *tetraethylammonium tetrafluoroborate* (TEABF₄), karena memiliki stabilitas elektrokimia yang baik dan memungkinkan operasi pada jendela tegangan yang lebih tinggi dibandingkan elektrolit berbasis air [5,6].

Selain jenis garam elektrolit, jenis pelarut yang digunakan juga memiliki peranan penting terhadap kinerja sistem elektrokimia. Pelarut akan memengaruhi beberapa parameter penting seperti konduktivitas ionik, viskositas larutan, konstanta dielektrik, ukuran solvasi ion, serta kemampuan ion untuk berdifusi ke dalam pori material elektroda. Perbedaan sifat fisikokimia pelarut dapat menghasilkan perbedaan performa elektrokimia yang signifikan, seperti nilai kapasitansi spesifik, resistansi internal, maupun stabilitas siklus perangkat superkapasitor. Di antara berbagai pelarut organik yang digunakan dalam sistem elektrolit superkapasitor, *acetonitrile* (ACN) dan *propylene carbonate* (PC) merupakan dua pelarut yang paling umum digunakan dalam elektrolit berbasis TEABF₄. Elektrolit berbasis ACN banyak digunakan karena memiliki konstanta dielektrik yang relatif tinggi (~37) dan viskositas sebesar 0,337 mPa.s pada suhu ruang, sehingga mampu melarutkan berbagai

jenis garam elektrolit secara efektif. Selain itu, asetonitril juga digunakan dalam studi mekanisme reduksi oksigen menjadi superoksida, dengan karakteristik spektrum inframerah yang ditandai oleh pita-pita kuat dari gugus CN pada wilayah tertentu [7,8]. Di sisi lain, PC memiliki konstanta dielektrik sebesar 64 dan viskositas sebesar 2,5 mPa.s pada suhu ruang (lebih tinggi dari ACN) [9,10]. PC banyak digunakan karena memiliki jendela stabilitas elektrokimia yang luas, yaitu sekitar 2,7–2,8 V, serta ketahanan yang baik terhadap hidrolisis [11]. Keunggulan ini memungkinkan superkapasitor menghasilkan energi spesifik yang lebih tinggi. Namun demikian, viskositas PC yang relatif tinggi menyebabkan transport ion menjadi lebih lambat, sehingga kinerjanya lebih sensitif terhadap perubahan suhu dibandingkan dengan ACN. Oleh karena itu, dalam praktiknya, PC sering dikombinasikan dengan pelarut lain atau dioptimalkan bersama pemilihan garam seperti TEABF₄ untuk meningkatkan konduktivitas elektrolit.

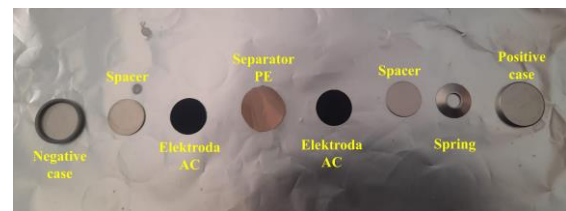
Meskipun superkapasitor berbasis karbon telah banyak diteliti sebagai perangkat penyimpanan energi berdaya tinggi, sebagian besar penelitian sebelumnya lebih berfokus pada pengembangan material elektroda, seperti peningkatan luas permukaan spesifik, modifikasi struktur pori, maupun penggabungan material pseudokapasitif untuk meningkatkan kinerja elektrokimia. Di sisi lain, aspek elektrolit yang juga berperan penting dalam menentukan performa perangkat sering kali belum dikaji secara mendalam, khususnya terkait pengaruh jenis pelarut dalam sistem elektrolit organik. Beberapa penelitian melaporkan penggunaan elektrolit berbasis TEABF₄ dengan pelarut ACN atau PC, namun umumnya hanya menggunakan salah satu jenis pelarut serta belum banyak melakukan perbandingan langsung dalam kondisi sistem yang sama. Hung *et al.* (2021) memfabrikasi *pouch cell* superkapasitor dengan elektrolit TEABF₄/PC menghasilkan kapasitansi 32.4 F [12]. Forghani *et al.* (2019) memfabrikasi superkapasitor simteri dengan elektrolit TEABF₄/ACN menghasilkan kapasitansi perangkat 37.6 F/g [13]. Keduanya menggunakan elektrolit organik, namun pada kondisi pengujian berbeda sehingga tidak dapat dilakukan perbandingan secara langsung. Akibatnya, pemahaman mengenai bagaimana perbedaan sifat fisikokimia kedua pelarut

tersebut mempengaruhi kapasitas penyimpanan dan pembentukan lapisan *electric double layer* pada permukaan elektroda karbon masih terbatas. Perbedaan viskositas, konstanta dielektrik, serta konduktivitas ionik antara ACN dan PC berpotensi memberikan pengaruh yang berbeda terhadap karakteristik elektrokimia perangkat superkapasitor, seperti kapasitansi spesifik, resistansi internal, serta stabilitas kinerja selama proses pengisian dan pengosongan muatan. Namun demikian, studi komparatif yang secara sistematis mengevaluasi pengaruh kedua pelarut tersebut dalam sistem elektrolit TEABF₄ pada superkapasitor berbasis karbon masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji secara komparatif pengaruh penggunaan pelarut acetonitrile (ACN) dan propylene carbonate (PC) dalam sistem elektrolit TEABF₄ terhadap kinerja elektrokimia superkapasitor berbasis karbon. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai hubungan antara sifat fisikokimia pelarut dan performa elektrokimia, serta menjadi dasar dalam pemilihan sistem elektrolit organik yang lebih optimal untuk aplikasi penyimpanan energi berbasis superkapasitor.

METODE

Elektroda dari karbon aktif (*Activated Carbon/AC*) dibuat dengan metode blending [14]. Awalnya, 0,1 g (10 wt%) PVDF dilarutkan dalam NMP sampai homogen. Selanjutnya, 0,1 g (10 wt%) *carbon black* dan 0,8 g (80 wt%) AC ditambahkan perlahan sampai didapatkan pasta hitam selama 8 jam (200 rpm). Kemudian, pasta dilapiskan pada substrat *Al foil* dan dikeringkan dengan oven pada suhu 100 °C selama 2 jam. Elektroda kemudian dipotong dengan diameter 1,5 cm. Pada proses pembuatan 1 M elektrolit, sebanyak ~1,14 gram TEABF₄ dilarutkan dalam masing-masing 5 ml PC dan ACN selama 30 menit sampai larut sempurna. Selanjutnya, elektroda AC

dikonfigurasi secara simetri (separator: membran polietilen/PE) dan ditambahkan 0,05 ml elektrolit seperti pada Gambar 1.

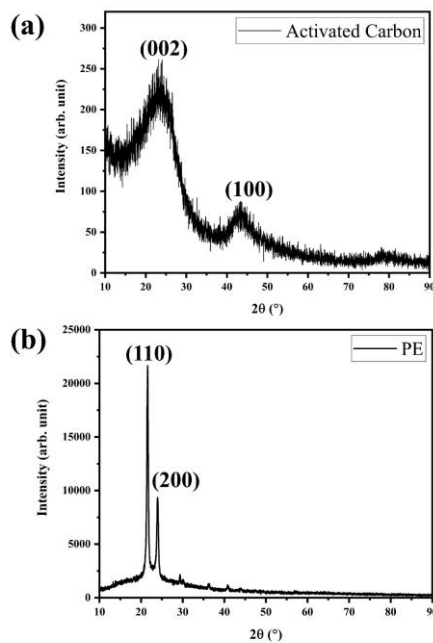


Gambar 1. Konfigurasi simetri elektroda karbon dalam *coin cell*

Metode karakterisasi yang digunakan adalah XRD untuk mengetahui fase material dan SEM untuk mengetahui morfologi material. Pengujian untuk mengetahui performa elektrokimia dilakukan dengan menggunakan *Galvanostatic Charge-Discharge* (GCD) dengan rapat arus 0,1 A/g pada jendela potensial 0 – 1 V.

HASIL DAN PEMBAHASAN

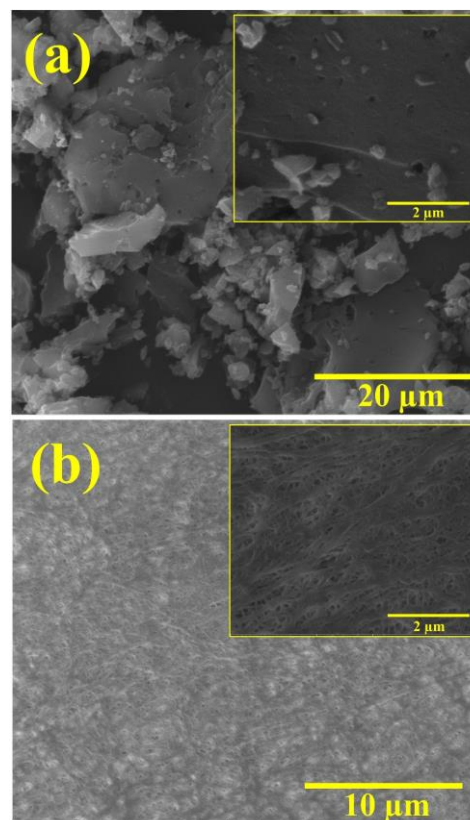
Hasil karakterisasi *X-ray diffraction* (XRD) pada material elektroda karbon aktif dan separator menunjukkan perbedaan struktur kristal yang signifikan. Pada Gambar 2.a, pola difraksi karbon aktif menampilkan puncak lebar pada sekitar $2\theta \approx 23^\circ$ yang berkaitan dengan bidang (002), serta puncak lemah di sekitar 43° yang diasosiasikan dengan bidang (100) [15]. Lebarnya puncak (002) mengindikasikan bahwa karbon aktif memiliki struktur amorf dengan tingkat keteraturan grafitik yang rendah. Di sisi lain, pola XRD pada separator polietilen (Gambar 2.b) menunjukkan puncak yang tajam dan intens pada sekitar $2\theta \approx 21^\circ$ dan 23° , yang masing-masing dikaitkan dengan bidang (110) dan (200) [16]. Puncak yang tajam ini menandakan bahwa material separator memiliki derajat kristalinitas yang tinggi. Struktur kristalin ini berperan penting dalam memberikan stabilitas mekanik dan ketahanan termal pada separator, sehingga mampu mempertahankan integritas fisik selama proses *charge-discharge*.



Gambar 2. Pola XRD: (a) *Activated Carbon* dan (b) Polietilen

Dari hasil SEM, Gambar 3.a menunjukkan morfologi karbon aktif (AC) yang didominasi oleh partikel tidak beraturan dengan ukuran yang bervariasi dan permukaan yang kasar. Pada inset (perbesaran 50.000 kali), permukaan karbon tampak memiliki banyak rongga kecil yang berperan sebagai situs aktif untuk adsorpsi ion [17]. Struktur berpori ini sangat penting dalam aplikasi superkapasitor karena memungkinkan penetrasi ion elektrolit ke dalam pori-pori elektroda, sehingga meningkatkan luas permukaan efektif dan kapasitansi [18]. Gambar 3.b menunjukkan morfologi membran polietilen (PE) pada perbesaran 10.000 kali yang relatif lebih homogen dan kompak pada skala makro. Namun, pada inset (perbesaran 50.000 kali) terlihat adanya struktur fibril atau jaringan serat halus yang saling terhubung, membentuk pori-pori mikro yang berfungsi sebagai jalur transport ion [19]. Struktur ini khas untuk separator berbasis polimer, di mana keseimbangan antara kekuatan mekanik dan porositas menjadi faktor penting untuk menjaga stabilitas sistem sekaligus memungkinkan pergerakan ion. Dalam penggunaan elektrolit organik seperti ACN dan PC dengan garam TEABF₄, morfologi AC dan PE memainkan peran yang sangat krusial. Pada elektroda karbon aktif, keberadaan pori yang berkembang memungkinkan ion dari elektrolit organik yang

umumnya berukuran lebih besar dibandingkan elektrolit *aqueous* untuk dapat teradsorpsi secara optimal [20]. Hal ini menjadi penting terutama ketika menggunakan pelarut dengan viskositas tinggi seperti PC, yang cenderung memperlambat difusi ion, sehingga struktur pori elektroda harus mampu mengompensasi hambatan tersebut. Di sisi lain, membran polietilen dengan struktur fibril yang terlihat mendukung distribusi elektrolit secara merata, namun sifat hidrofobik dari PE dapat menjadi tantangan dalam sistem elektrolit organik tertentu, sehingga kompatibilitas antara pelarut dan separator menjadi faktor penting [21]. Kombinasi morfologi karbon aktif yang berpori dan membran polietilen yang semi-porous memberikan sinergi dalam mendukung difusi ion, distribusi elektrolit, dan stabilitas sistem, yang pada akhirnya menentukan kinerja elektrokimia superkapasitor berbasis elektrolit organik.



Gambar 3. Hasil karakterisasi SEM: (a) *Activated Carbon* dan (b) Polietilen

Proses pengisian–pengosongan muatan dari superkapasitor dievaluasi menggunakan pengukuran *galvanostatic charge–discharge* (GCD). Data yang diperoleh berupa hubungan

parameter tegangan (V) terhadap waktu (t), yang kemudian digunakan untuk menentukan parameter performa elektrokimia, meliputi kapasitansi spesifik gravimetrik (C_s), energi spesifik (E_s), dan daya spesifik (P_s). Persamaan yang digunakan untuk menghitung parameter tersebut ditunjukkan pada Persamaan (1)–(3) [22]. Dalam persamaan tersebut, m merupakan massa material aktif (g), Δt adalah waktu total selama proses pelepasan muatan (s), dan ΔV adalah selisih potensial selama pelepasan muatan (V).

$$C_s = \frac{4(I)(\Delta t)}{(m)(\Delta V)} \quad (1)$$

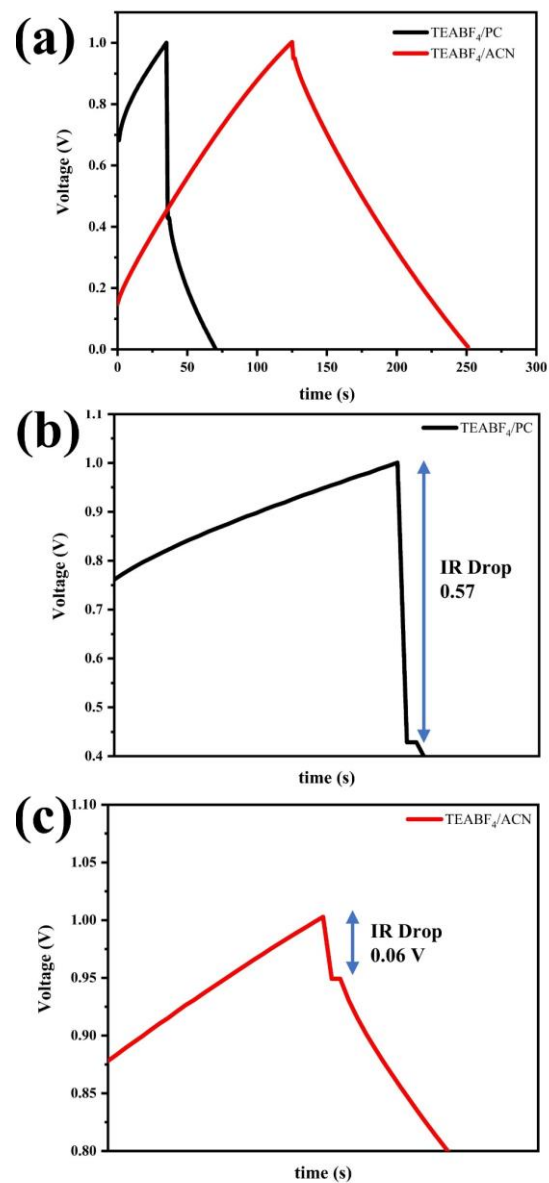
$$E_s = \frac{1}{8} \frac{4(C_s)(\Delta V)^2}{3.6} \quad (2)$$

$$P_s = \frac{E_s \times 3.6}{\Delta t} \quad (3)$$

Hasil komparasi GCD superkapasitor dengan variasi pelarut pada tegangan 1 V dan rapat arus 0,1 A/g diberikan pada Gambar 4.a. Grafik tersebut menunjukkan bahwa penggunaan pelarut ACN pada superkapasitor dengan separator PE memiliki kurva lebih lebar dan kapasitansi gravimetri 47,01 F/g (4x lebih besar dibanding menggunakan pelarut PC). Nilai kapasitansi superkapasitor dengan TEABF₄/ACN sudah cukup baik dibandingkan dengan penelitian lain pada konfigurasi yang sama, namun dengan kondisi pengujian berbeda. Perbandingan kapasitansi terhadap penelitian lain ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan kapasitansi perangkat superkapasitor dengan pelarut organic

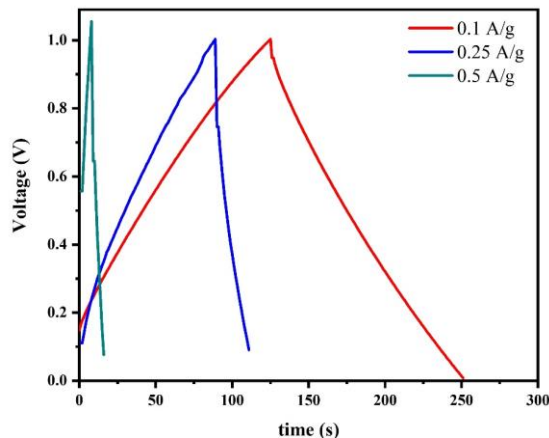
No	Elektroda	Elektrolit	C	Ref
1	HPAC	1 M TEABF ₄ /PC	32.4 F	[12]
2	Karbon aktif	1 M TEABF ₄ /ACN	37.6 F/g	[13]
3	Karbon Aktif Marabu	1 M TEABF ₄ /PC	22 F/g	[23]
4	Komposit Karbon-Grafena	1 M TEABF ₄ /ACN	34.9 F/g	[24]
5	Karbon aktif	1 M TEABF ₄ /ACN	47 F/g	This work



Gambar 4. (a) Grafik GCD AC dengan elektrolit TEABF₄/PC dan TEABF₄/ACN; kurva iR drop AC dengan elektrolit (b) TEABF₄/PC dan (c) TEABF₄/CAN

Dalam aspek lain, terdapat parameter penurunan tegangan sesaat yang dikenal sebagai *iR drop*, yaitu ketika superkapasitor beralih dari proses pengisian (*charging*) ke pengosongan (*discharging*) sebagai akibat dari resistansi ohmik gabungan yang berasal dari elektroda, elektrolit, serta resistansi kontak dalam sistem. Akibatnya, jendela tegangan yang dapat digunakan (ΔV) menjadi berkurang [25]. Oleh karena itu, semakin besar nilai *iR drop* kinerja superkapasitor akan semakin menurun karena hal tersebut menunjukkan tingginya resistansi dalam sistem, sehingga

sebagian tegangan terpakai untuk mengatasi hambatan tersebut. Penggunaan ACN sebagai elektrolit menghasilkan iR drop 0,06 V (Gambar 4.b), yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan PC (0,57 V pada Gambar 4.c). Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan ACN sebagai pelarut TEABF₄ menghasilkan resistansi sistem yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan PC, sehingga berdampak pada hasil kapasitansi.



Gambar 5. Grafik variasi rapat arus GCD elektroda karbon dengan elektrolit TEABF₄/ACN

Pada pengujian dengan variasi rapat arus, terlihat bahwa peningkatan arus dari 0,1; 0,25; 0,5 A/g (Gambar 5) menghasilkan perubahan signifikan pada kepadatan daya, yaitu 166,6; 366,72; 676,04 W/kg. Hal ini menunjukkan kemampuan sistem dalam melepaskan energi secara cepat, yang merupakan karakteristik utama superkapasitor untuk aplikasi dengan kebutuhan daya tinggi dan respons dinamis [26]. Peningkatan kepadatan daya ini mengindikasikan bahwa transport ion dalam elektrolit berlangsung efisien serta hambatan internal relatif rendah, terutama pada sistem berbasis ACN. Mobilitas ion yang tinggi memungkinkan proses pembentukan dan pelepasan lapisan ganda listrik berlangsung lebih cepat, sehingga mendukung performa pada arus tinggi [27]. Sebaliknya, pada sistem berbasis PC, viskositas yang lebih tinggi cenderung membatasi difusi ion, sehingga peningkatan kepadatan daya tidak seoptimal pada ACN. Sementara itu, kepadatan energi superkapasitor karbon dengan elektrolit TEABF₄/ACN mengalami penurunan dari 5,8 Wh/kg pada 0,1 A/g menjadi 1,32 Wh/kg pada 0,5 A/g. Penurunan ini disebabkan oleh waktu

pengosongan yang semakin singkat pada arus tinggi, sehingga energi tidak tersimpan dan dimanfaatkan secara maksimal. Meskipun demikian, hal ini merupakan *trade-off* umum, di mana peningkatan kepadatan daya sering diiringi dengan penurunan kepadatan energi [28]. Dengan demikian, sistem ini tetap menunjukkan potensi yang baik untuk aplikasi yang memerlukan pelepasan energi cepat dan operasi berulang dengan frekuensi tinggi.

SIMPULAN DAN SARAN

Struktur amorf karbon aktif dan struktur kristalin separator polietilen memberikan kombinasi yang mendukung difusi ion serta stabilitas sistem superkapasitor. Morfologi berpori pada elektroda memungkinkan adsorpsi ion yang optimal, sementara struktur fibril pada separator memfasilitasi jalur transport ion yang efektif. Dari hasil pengujian elektrokimia, penggunaan elektrolit TEABF₄ dalam pelarut ACN menunjukkan kinerja yang lebih unggul dibandingkan PC, dengan kapasitansi sebesar 47,01 F/g (4 kali lebih tinggi) serta nilai iR drop yang lebih rendah, yaitu 0,06 V (dibandingkan 0,57 V pada PC). Selain itu, peningkatan rapat arus dari 0,1 hingga 0,5 A/g menghasilkan perubahan kepadatan daya yang signifikan, yaitu dari 166,6 W/kg menjadi 676,04 W/kg, yang menunjukkan kemampuan sistem dalam memberikan respons energi secara cepat. Secara umum, hasil ini menegaskan bahwa pemilihan pelarut elektrolit berperan penting dalam menentukan kinetika transport ion dan performa daya superkapasitor.

Berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh, disarankan agar penelitian selanjutnya dapat memperluas cakupan kajian melalui penambahan variasi metode karakterisasi dan parameter pengujian. Hal ini bertujuan untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif terkait kinerja superkapasitor. Dengan pendekatan yang lebih beragam, diharapkan hasil penelitian di masa mendatang dapat memberikan dasar ilmiah yang lebih kuat dalam pengembangan sistem superkapasitor yang optimal.

ACKNOWLEDGEMENT

Para penulis menyampaikan rasa terima kasih kepada Laboratorium Fisika Material dan Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung, atas penyediaan ruang kerja dan fasilitas dasar yang

memungkinkan terlaksananya penelitian mandiri ini. Kami juga sangat berterima kasih kepada rekan-rekan atas diskusi teknis yang berharga, masukan yang konstruktif, serta dukungan moral selama berbagai tahap pelaksanaan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- 1 Diantoro M, Istiqomah M, Fath Y Al, Nasikhudin M, Alias Y, Meevasana W. 2023. Potential of MnO₂-based composite and numerous morphological for enhancing supercapacitors performance. *Int. J. Appl. Ceram. Technol.* (October 2022): 7.
- 2 Al Fath Y, Aturroifah NIM, Puspitasari DA, Purwaningsih H, Trilaksana H, Supardi ZAI, Aziz MA, Singh PK, Diantoro M. 2026. Unlocking the energy storage potential of silicon: Morphological and electrochemical mechanism studies of Si-NiO/graphene//AC/MnO₂ composites for sustainable energy storage applications. *J. Electroanal. Chem.* **1010**: 120033.
- 3 Olabi AG, Abbas Q, Abdelkareem MA, Alami AH, Mirzaeian M, Sayed ET. 2023. Carbon-Based Materials for Supercapacitors: Recent Progress, Challenges and Barriers. .
- 4 Siraj N, Macchi S, Berry B, Viswanathan T. 2020. Metal-Free Carbon-Based Supercapacitors — A Comprehensive Review. 410.
- 5 Acharjee A, Saha B. 2024. Organic electrolytes in electrochemical supercapacitors: Applications and developments. *J. Mol. Liq.* **400**: 124487.
- 6 Liang H, Li H, Tang S, Li J, Zhu Z, Pan L, Bu Y. 2026. A high-dielectric additive for enhanced supercapacitor performance with N-doped carbon electrodes. *Chem. Eng. J.* **531**: 174038.
- 7 Gunasekaran P, Cuesta A. 2025. Double-layer structure and cation-dependent solvent decomposition in acetonitrile-based electrolytes. *J. Solid State Electrochem.* **29**(6): 2213.
- 8 Barthel J, Neueder R, Rawytsch P, Roch H. 1999. Conductivity study on lithium bromide in propylene carbonate+acetonitrile mixtures in dilute solutions from -35 to 75°C. *J. Electroanal. Chem.* **471**(1): 78.
- 9 Mynam M, Ravikumar B, Rai B. 2019. Molecular dynamics study of propylene carbonate based concentrated electrolyte solutions for lithium ion batteries. *J. Mol. Liq.* **278**: 97.
- 10 Jain P, Singh M. 2004. Density, Viscosity, and Excess Properties of Binary Liquid Mixtures of Propylene Carbonate with Polar and Nonpolar Solvents. *J. Chem. Eng. Data.* **49**(5): 1214.
- 11 Béguin F, Presser V, Balducci A, Frackowiak E. 2020. Carbons and Electrolytes for Advanced Supercapacitors. 2219.
- 12 Hung T-F, Hsieh T-H, Tseng F-S, Wang L-Y, Yang C-C, Yang C-C. 2021. High-Mass Loading Hierarchically Porous Activated Carbon Electrode for Pouch-Type Supercapacitors with Propylene Carbonate-Based Electrolyte. *Nanomaterials.* **11**(3): 785.
- 13 Forghani M, McCarthy J, Mavroudis H, Donne SW. 2019. Electroanalytical characterization of electrochemical capacitor systems. *Electrochim. Acta.* **327**: 135010.
- 14 Al Fath Y, Istiqomah I, Nasikhudin N, Diantoro M, Zulaikah S, Subagio A, Suprayogi T, Osman Z. 2023. Various Low Magnetic Field Effect on Electrochemical Performance of Asymmetric Supercapacitor MnO₂-Carbon-Based Composites. *Mater. Sci. Forum.* **1080**: 99.
- 15 Xie X et al. 2020. Dielectric parameters of activated carbon derived from rosewood and corncob. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* **31**(20): 18077.
- 16 Moravskiy V, Kucherenko A, Kuznetsova M, Dulebova L. 2024. X-ray Diffraction Study of Metallized Polyethylene for Creating Heat Storage Systems. *Appl. Sci.* **14**(4183): .
- 17 Tetra ON, Aulia RH, Deswati D. 2025. Sintesis Karbon Aktif dari Tongkol Jagung (*Zea mays* L.) dengan Metoda Dehidrasi sebagai Elektroda Superkapasitor. *ALCHEMY J. Penelit. Kim.* **21**(2): 358.
- 18 Muflihatun. 2025. Pemanfaatan Karbon Aktif Berbasis Biomassa Lokal sebagai

- Material Elektroda Superkapasitor: Review . Newton-Maxwell J. Phys. **6**(1 SE-Articles): 22.
- 19 Zhang Y, Qiu Z, Wang Z, Yuan S. 2022. Journal of Colloid and Interface Science Functional polyethylene separator with impurity entrapment and faster Li + ions transfer for superior lithium-ion batteries. J. Colloid Interface Sci. **607**: 742.
- 20 Liu F, Yang S, Zhang X, Tang S, Wei S. 2023. Insight into the Desolvation of Organic Electrolyte Cations with Propylene Carbonate as a Solvent in Flat Pores: A First-Principles Calculation. Coatings. **13**(8): 1384.
- 21 Park SH, Kim YJ, Kwon SJ, Shin MG, Nam SE, Cho YH, Park YI, Kim JF, Lee J-H. 2018. Polyethylene Battery Separator as a Porous Support for Thin Film Composite Organic Solvent Nanofiltration Membranes. ACS Appl. Mater. Interfaces. **10**(50): 44050.
- 22 Chen Z, Zhao S, Zhao H, Zou Y, Yu C, Zhong W. 2021. Nitrogen-doped interpenetrating porous carbon/graphene networks for supercapacitor applications. Chem. Eng. J. **409**(July 2020): 127891.
- 23 Redondo E, Fevre LW Le, Fields R, Todd R, Forsyth AJ, Dryfe RAW. 2020. Enhancing supercapacitor energy density by mass-balancing of graphene composite electrodes. Electrochim. Acta. **360**: 136957.
- 24 Farm YY. Biomass derived Activated Carbon as Electrode Materials for Electrochemical Double layer Capacitors (EDLC). University of Sheffield.
- 25 Yang K, Cho K, Yoon DS, Kim S. 2017. Bendable solid-state supercapacitors with Au nanoparticle-embedded graphene hydrogel films. Sci. Rep. **7**(August 2016): 2.
- 26 Diantoro M, Nasikhudin N. Superkapasitor COIN CELL : Modifikasi Pori dan Nanokomposit. Penerbit K-Media, Yogyakarta. 2023.
- 27 Poonam, Sharma K, Arora A, Tripathi SK. 2019. Review of supercapacitors: Materials and devices. J. Energy Storage. **21**(October 2018): 801.
- 28 Simon P, Gogotsi Y. 2008. Materials for electrochemical capacitors. Nat. Mater. **7**(11): 845.