

PEMANFAATAN KARBON AKTIF ECENG GONDOK (*EICHHORNIA CRASSIPES*) SEBAGAI MATERIAL ELEKTRODA SUPERKAPASITOR DENGAN VARIASI KOSENTRASI ELEKTROLIT Na_2SO_4

UTILIZATION OF WATER HYACINTH (*EICHHORNIA CRASSIPES*) ACTIVATED CARBON AS ELECTRODE MATERIAL FOR SUPERCAPACITORS WITH VARIATIONS IN Na_2SO_4 ELECTROLYTE CONCENTRATION

Aldo N. Watulingas¹, Alfrie M. Rampengan², Farly Reynol Tumimomor³, Donny R. Wenas⁴,
Jeilen G. N. Nusa⁵

¹Universitas Negeri Manado,
Jl. Kampus Unima, Tonsaru,
Kec. Tondano Sel, Minahasa,
Indonesia
aldowatulingas09@gmail.com

²Universitas Negeri Manado,
Jl. Kampus Unima, Tonsaru,
Kec. Tondano Sel, Minahasa,
Indonesia
alfrierampengan@unima.ac.id

³Universitas Negeri Manado,
Jl. Kampus Unima, Tonsaru,
Kec. Tondano Sel, Minahasa,
Indonesia
farlytumimomor@unima.ac.id

⁴Universitas Negeri Manado,
Jl. Kampus Unima, Tonsaru,
Kec. Tondano Sel, Minahasa,
Indonesia
donny_wenas@unima.ac.id

⁵Universitas Negeri Manado,
Jl. Kampus Unima, Tonsaru,
Kec. Tondano Sel, Minahasa,
Indonesia
jeilennusa@unima.ac.id

ABSTRACT

The utilization of renewable energy has become a major focus in an effort to reduce dependence on fossil energy sources and reduce negative impacts on the environment, making it important to increase the use of clean and renewable energy. One of the biggest challenges in the application of renewable energy is efficient and sustainable energy storage. In this case, supercapacitors have proven to be a solution as an efficient and sustainable energy storage device. In this study, water hyacinth biomass material was tested as a supercapacitor electrode which was influenced by variations in Na_2SO_4 electrolyte, namely 1M, 2M, and 3 M, which produced voltages of 1.037 V, 1.404 V, and 1.647 V respectively and electric currents of 18.56 mA, 23.32 mA, and 32.34 mA. From the results of this study, it was found that the sample with an electrolyte concentration of Na_2SO_4 3 M had higher voltage and amperage values, which amounted to 1.654 V and 32.34 mA due to the greater number of Na^+ and SO_4^{2-} ions in the electrolyte. So it can be concluded that the variation of Na_2SO_4 electrolyte concentration of 1 M, 2 M, and 3 M results in an increase in the value of voltage and electric current produced by supercapacitors.

Keywords: Supercapacitor, Electrode, Activated Carbon, Electrolyte, Water Hyacinth Biomass, Electric Voltage, Electric Current

1. PENDAHULUAN

Pemanfaatan energi terbarukan telah menjadi fokus utama dalam upaya mengurangi ketergantungan terhadap sumber energi fosil dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan sehingga untuk mencapai masyarakat tanpa emisi karbon penting untuk meningkatkan penggunaan energi bersih dan terbarukan. Salah satu tantangan terbesar dalam penerapan energi terbarukan adalah penyimpanan energi yang efisien dan berkelanjutan^[1]. Dalam hal ini, superkapasitor telah terbukti menjadi solusi yang menjanjikan karena sebagai perangkat penyimpanan energi yang ramah lingkungan, kemampuan menyimpan dan melepaskan energi dengan cepat, serta kemampuannya untuk diisi ulang berkali-kali dan masa pemakaian yang lama^[2].

Supercapacitor telah menarik perhatian karena memiliki beberapa kelebihan dibandingkan kapasitor konvensional lain yaitu memiliki kapasitas dalam menyimpan energi yang tinggi dan kepadatan daya yang lebih tinggi dibandingkan baterai, tingkat pengisian daya dan pengosongan yang sangat cepat, biaya perawatan yang rendah, masa pemakaian yang lebih lama, dan pengoperasian yang

aman menjadikannya sistem penyimpanan energi generasi mendatang sangat berpotensi untuk aplikasi dalam elektronik, cadangan daya, dan kendaraan hibrida. Superkapasitor terdiri dari empat komponen utama yaitu kolektor arus, elektroda, elektrolit, dan separator. Penggunaan bahan elektroda menjadi salah satu faktor yang memengaruhi tingkat keefektifan superkapasitor^[3].

Pemilihan bahan elektroda dan fabrikasinya memainkan peran penting dalam meningkatkan kinerja superkapasitor. Elektroda superkapasitor harus memberikan stabilitas termal, luas permukaan yang tinggi, ketahanan korosi, konduktivitas listrik tinggi, stabilitas kimia yang sesuai, dan keterbasahan permukaan yang sesuai. Bahan elektroda juga harus berbiaya rendah dan ramah lingkungan. Selain itu, kemampuannya mentransfer muatan aliran arus listrik melalui elektroda penting untuk meningkatkan kinerja kapasitansi. Bahan elektroda dapat dibuat dari bahan polimer, oksida logam, dan material berpori seperti karbon aktif^[4]. Namun, perkembangan superkapasitor masih menghadapi beberapa tantangan, salah satunya adalah mencari bahan elektroda yang lebih murah, ramah lingkungan, meningkatkan efisiensi penyimpanan dan pelepasan energi superkapasitor^[5].

Eceng gondok (*eichhornia crassipes*) sebagai gulma perairan yang melimpah seringkali dianggap sebagai tanaman invasif dan menyebabkan masalah pencemaran lingkungan. Penggunaan eceng gondok (*eichhornia crassipes*) sebagai bahan baku karbon aktif dapat mengurangi masalah pencemaran lingkungan. Di sinilah potensi karbon aktif dari eceng gondok (*eichhornia crassipes*) dilakukan dengan biaya rendah dan ramah lingkungan dengan menghasilkan struktur pori-pori yang besar dan luas permukaan yang menguntungkan untuk penyimpanan energi dalam superkapasitor.

Kinerja superkapasitor juga sangat dipengaruhi oleh jenis dan konsentrasi elektrolit yang digunakan. Natrium sulfat (Na_2SO_4) adalah salah satu elektrolit yang sering digunakan dalam superkapasitor karena kestabilannya dan ketersediaan biaya yang relatif murah^[6]. Variasi konsentrasi Na_2SO_4 dapat mempengaruhi kapasitansi spesifik dan impedansi dari superkapasitor, sehingga penting untuk menganalisis pengaruh variasi ini terhadap karakteristik tegangan dan arus listrik elektroda superkapasitor dengan bahan dasar karbon aktif dari eceng gondok (*eichhornia crassipes*).

Penelitian ini memiliki potensi untuk berkontribusi pada perkembangan teknologi energi terbarukan serta memberikan sumbangan dalam upaya global mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan melalui penggunaan bahan-bahan limbah perairan yang dapat diolah menjadi teknologi yang bermanfaat dengan mengeksplorasi potensi pemanfaatan karbon aktif eceng gondok (*eichhornia crassipes*) sebagai material elektroda superkapasitor. Diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi positif dalam pengembangan sumber energi terbarukan yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Waktu Dan Tempat Penelitian

Penelitian ini telah dilaksanakan pada bulan Mei sampai Juni 2024 di Laboratorium Fisika Material, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika, Ilmu Pengetahuan Alam, dan Kebumihan, Universitas Negeri Manado.

2.2 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah timbangan kimia analitik, mortar and pestle, spatula, batang pengaduk, ayakan 100 mesh, pipet ukur 1-50 mL, laboratory funnel 75 mm, gelas beker 50-500 mL, gelas ukur 10-50 mL, pompa vakum, labutakar 500 mL, botol reagen 250 mL, botol semprot 500 mL, crucible porcelain 50 mL, oven pengering Memmert, furnace, vortex mixer, pH meter digital, multimeter digital, timbangan kimia analitik, pipet tetes dan magnetic stirrer with heater.

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah eceng gondok (*eichhornia crassipes*) sebagai bahan baku yang digunakan dalam pembuatan karbon aktif. Sedangkan bahan yang digunakan untuk proses aktivasi fisik dan kimia sampai pembuatan elektroda superkapasitor adalah NaOH (sodium hydroxide) Pro-Analysis, akuades, alkohol 70%, larutan elektrolit Na₂SO₄ (natrium sulfat) 1 M, 2 M, dan 3 M, aluminium foil, kertas saring Whatman, tissue makan, bubuk PTFE, kaca akrilik.

2.3 Pembuatan karbon aktif

Pada tahap pra-karbonisasi, sampel eceng gondok (*eichhornia crassipes*) dibersihkan dengan clean water untuk menghilangkan kotoran dan debu yang menempel pada sampel. kemudian dilakukan pengeringan dalam oven pengering dengan suhu 100°C selama 24 jam. Setelah bahan baku kering, eceng gondok dihaluskan sampai menjadi serbuk^[7].

Proses karbonisasi dilakukan dalam furnace pada suhu 450°C selama 2 jam dengan laju pemanasan 10°C/menit untuk mengubah menjadi karbon dan selanjutnya sampel dihaluskan menggunakan mortar dan disaring menggunakan ayakan 100 mesh. Kemudian dilakukan proses aktivasi kimia menggunakan larutan aktivator NaOH 5 M lalu disimpan dalam oven pada suhu 60°C selama 4 jam. Selanjutnya proses aktivasi fisik pada 700°C selama 2 jam. Setelah itu, sampel dibilas dengan aquades hingga pH = 7 dan dikeringkan dalam oven vakum pada suhu 110°C selama 12 jam^[8].

Sampel karbon aktif yang telah kering kemudian dihaluskan menggunakan mortar lalu ditimbang untuk digunakan pada tahap karakterisasi SEM untuk mengetahui struktur morfologi permukaan.

2.4 Fabrikasi Elektroda Superkapasitor dan Pengukuran I-V

Proses pembuatan elektroda prototype superkapasitor menggunakan campuran homogen 7:2:1 karbon aktif, bubuk PTFE, lem epoxy steel hitam (10wt%) ONEMED dengan alkohol 70% sebanyak 50 mL sebagai media percampuran menggunakan magnetic stirrer with heater selama 1 jam sehingga sampel berubah menjadi pasta yang homogen.

Siapkan kolektor arus yang terbuat dari aluminium foil berukuran 5 × 5 cm lalu oleskan sampel yang sudah berbentuk pasta sampai permukaan menjadi rata lalu diberikan larutan variasi elektrolit Na₂SO₄ 1M, 2M dan 3M sebanyak 3 tetes dan disusun dengan separator dari tissue makan yang berukuran 5,5 × 5,5 cm dan diberikan larutan elektrolit sebanyak 1 tetes pada separator lalu disusun lagi dengan elektroda dan untuk cover body menggunakan kaca akrilik berukuran 5 × 5 cm^[9]. Kemudian dilakukan pengukuran tegangan dan arus listrik.

Dalam penelitian ini, data diambil dari hasil uji sampel elektroda superkapasitor. Data yang dikumpulkan meliputi hasil pengukuran tegangan dan arus listrik oleh superkapasitor. Sebelum pengukuran tegangan listrik dilakukan, superkapasitor diisi selama 10 menit menggunakan *power supply DC to DC* dengan tegangan sebesar 3 V dan arus 0,6 A.

2.5 Teknik Pengumpulan Data dan Analisis Data

Data yang diambil pada eksperimen laboratorium yang dilakukan menghasilkan karbon aktif dari eceng gondok dengan mengaktivasi menggunakan larutan NaOH 5 M. Karakterisasi sampel karbon aktif dengan SEM serta dilakukan analisis data dari masing-masing sampel konsentrasi elektrolit Na₂SO₄ 1 M, 2 M, dan 3 M dengan mengukur tegangan dan arus listrik output dari elektroda superkapasitor

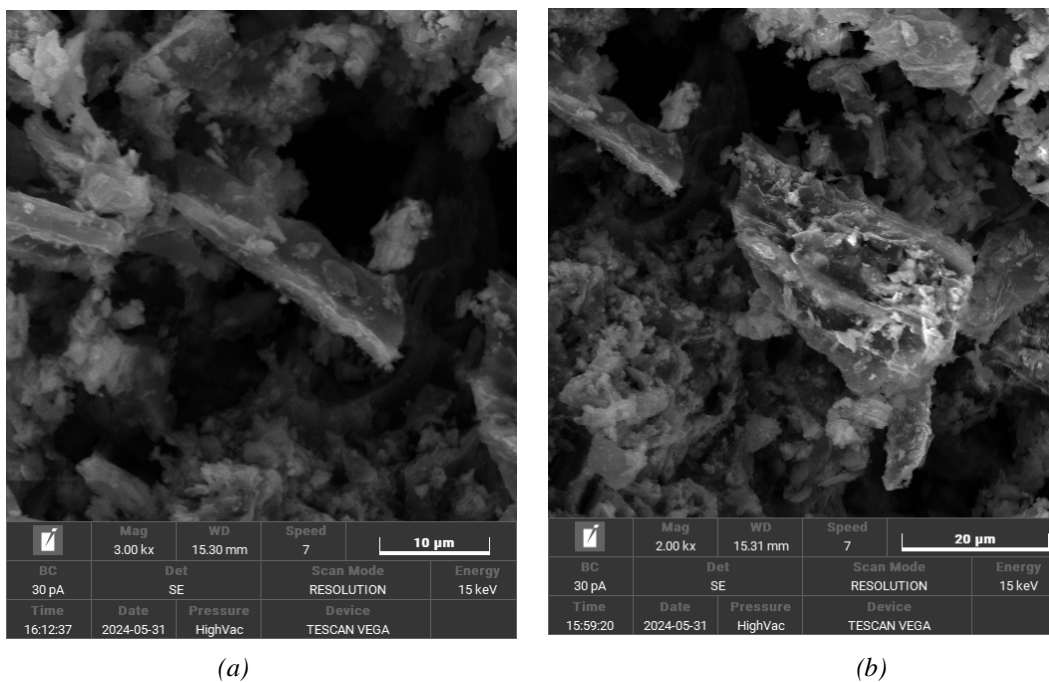


Gambar 1. Desain Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakterisasi SEM

Scanning electron microscopy (SEM) umumnya dimanfaatkan untuk mengamati perubahan morfologi sampel yang terjadi akibat perlakuan termal atau kimia selama proses mengubah bahan baku menjadi karbon aktif^[10]. Dalam penelitian superkapasitor, SEM digunakan untuk mengamati permukaan karbon aktif. Hasil Analisa SEM karbon aktif eceng gondok pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2



Gambar 2. (a) Morfologi karbon aktif perbesaran 3000x skala 10 μm . (b) Morfologi karbon aktif perbesaran 2000x skala 20 μm

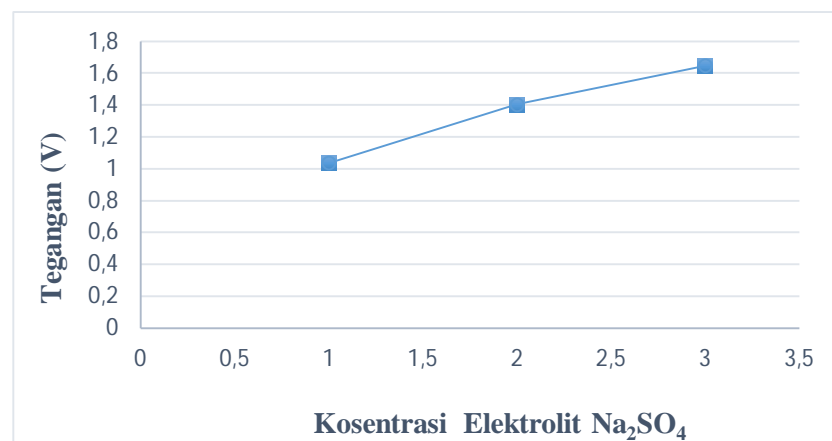
Karbon aktif yang dihasilkan dari eceng gondok dengan aktivasi kimia menggunakan NaOH 5 M dan aktivasi fisik pada suhu 700°C. Berdasarkan analisis morfologi SEM, material ini memiliki struktur berpori yang signifikan, dengan variasi pori-pori mikro dan meso. Mikro-pori memberikan area untuk penyimpanan muatan listrik, sementara mesopori membantu dalam transportasi ion yang cepat. Kombinasi pori-pori ini sangat penting untuk meningkatkan kapasitansi dan performa daya, yang merupakan karakteristik utama material elektrode dalam superkapasitor^[11].

Permukaan kasar yang terlihat dalam gambar SEM menunjukkan bentuk permukaan yang kasar dengan pori-pori yang kecil seperti serpihan, Pori-pori ini terbentuk dari reaksi kimia antara eceng gondok dengan NaOH selama proses aktivasi dan selama proses aktivasi NaOH akan terurai menjadi natrium^[12]. Material ini memiliki luas permukaan yang tinggi. Luas permukaan yang lebih besar menyediakan lebih banyak area untuk ion elektrolit berinteraksi untuk meningkatkan kapasitansi. Selain itu, retakan dan rongga yang terbentuk selama proses aktivasi meningkatkan aksesibilitas ion ke pori-pori internal, yang berdampak positif pada kecepatan pengisian dan pengosongan superkapasitor^[13].

3.2 Tegangan Listrik

Berdasarkan hasil pengamatan, data tegangan listrik menunjukkan bahwa konsentrasi elektrolit Na₂SO₄ yang berbeda memberikan pengaruh terhadap nilai tegangan listrik yang dihasilkan oleh elektroda superkapasitor. Berikut adalah hasil pengamatan:

- Pada konsentrasi 1 M tegangan listrik yang dihasilkan adalah 1,037 V.
- Pada konsentrasi 2 M tegangan listrik yang dihasilkan meningkat menjadi 1,404 V.
- Pada konsentrasi 3 M tegangan listrik mencapai 1,647 V.



Gambar 3 Grafik Nilai Tegangan Superkapasitor Terhadap Konsentrasi Elektrolit Na₂SO₄ 1M, 2M, dan 3M

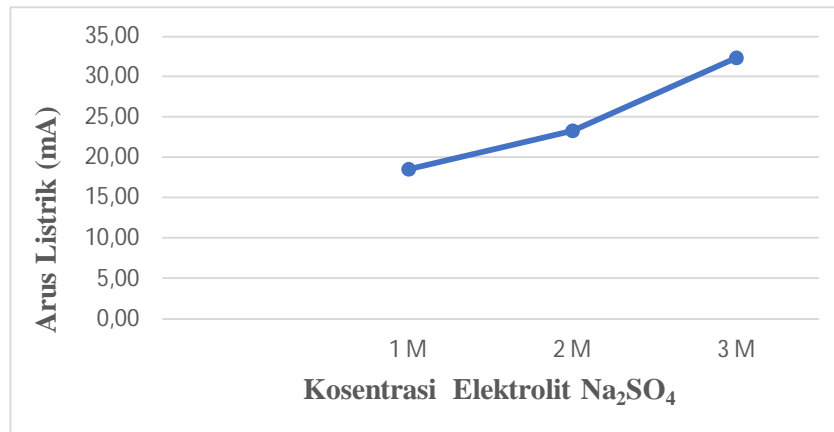
Peningkatan konsentrasi Na₂SO₄ berbanding lurus dengan kenaikan tegangan listrik. Ini membuktikan bahwa peningkatan konsentrasi elektrolit meningkatkan jumlah ion yang tersedia dalam larutan untuk menyimpan energi listrik dan membantu meningkatkan kapasitas penyimpanan energi elektroda superkapasitor, sehingga meningkatkan tegangan output pada superkapasitor^[14]. Meningkatnya konsentrasi Na₂SO₄ dari 1 M menjadi 3 M, maka jumlah ion Na⁺ dan SO₄²⁻ yang larut dalam larutan meningkat, sehingga meningkatkan kapasitas yang lebih besar untuk menyimpan muatan di permukaan elektroda. Tegangan yang tinggi menunjukkan bahwa superkapasitor tersebut memiliki kapasitas yang lebih besar untuk penyimpanan energi^[15].

3.3 Arus Listrik

Berdasarkan hasil pengamatan, menunjukkan bahwa konsentrasi elektrolit Na₂SO₄ yang berbeda memberikan pengaruh terhadap nilai arus listrik yang dihasilkan oleh elektroda superkapasitor. Arus listrik pada superkapasitor berkaitan langsung dengan jumlah muatan yang dilepaskan atau dihasilkan selama pengisian dan pelepasan muatan. Dalam penelitian ini, arus yang dihasilkan oleh superkapasitor dengan variasi konsentrasi elektrolit Na₂SO₄ menunjukkan sebagai berikut:

- Pada konsentrasi 1 M, arus listrik yang dihasilkan adalah 18,56 mA.

- Pada konsentrasi 2 M, arus listrik yang dihasilkan meningkat menjadi 23,32 mA.
- Pada konsentrasi 3 M, arus listrik mencapai 32,34 mA.



Gambar 4 Grafik Nilai Arus Superkapasitor Terhadap Konsentrasi Elektrolit Na₂SO₄ 1M, 2M, dan 3M

Superkapasitor menyimpan energi melalui mekanisme penyimpanan muatan pada antarmuka elektroda-elektrolit. Dalam mekanisme ini, ion-ion dalam elektrolit bergerak dan berinteraksi dengan permukaan elektroda ketika superkapasitor diisi atau dilepaskan. Semakin tinggi konsentrasi Na₂SO₄, semakin banyak ion yang tersedia untuk menghasilkan muatan pada elektroda, yang pada akhirnya meningkatkan arus listrik yang dihasilkan^[15].

Arus listrik dihasilkan dari pergerakan ion dalam elektrolit. Pada superkapasitor, elektrolit Na₂SO₄ bertindak sebagai media yang menghantarkan ion Na⁺ dan SO₄²⁻ ke elektroda. Peningkatan konsentrasi Na₂SO₄ akan menghasilkan jumlah ion yang lebih banyak, yang meningkatkan konduktivitas elektrolit dan mempengaruhi arus listrik^[16].

Pada konsentrasi 3 M, arus yang dihasilkan mencapai 32,34 mA, yang hampir dua kali lipat dari nilai arus pada konsentrasi 1 M. Peningkatan arus ini menunjukkan bahwa elektrolit dengan konsentrasi yang lebih tinggi mampu menghantarkan lebih banyak muatan listrik per satuan waktu, sehingga meningkatkan efisiensi penghantaran arus yang pada akhirnya meningkatkan konduktivitas dan difusi ion, serta mengurangi resistansi internal^[17].

Peningkatan konsentrasi elektrolit dalam superkapasitor dapat mempengaruhi beberapa aspek performa termasuk kapasitansi, densitas energi, dan stabilitas siklus. Peningkatan ini diakibatkan oleh ketersediaan ion yang lebih banyak untuk proses penyimpanan muatan di dalam elektroda^[18]. Namun, meskipun peningkatan konsentrasi elektrolit dapat meningkatkan kapasitansi penyimpanan energi, hal ini juga dapat menyebabkan pembatasan pada kinerja superkapasitor karena itu penting untuk menjaga keseimbangan antara kapasitansi dan stabilitas siklus serta efisiensi daya. Secara keseluruhan bahwa peningkatan variasi konsentrasi elektrolit Na₂SO₄ memungkinkan adanya kenaikan nilai tegangan dan arus listrik yang dihasilkan pada superkapasitor^[19].

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, peningkatan variasi konsentrasi elektrolit Na₂SO₄ 1 M, 2 M, dan 3 M memberikan hasil tegangan listrik masing-masing sebesar 1,037 V, 1,404 V, dan 1,647 V dan arus listrik masing-masing sebesar 18,56 mA, 23,32 mA, dan 32,34 mA yang menunjukkan bahwa variasi konsentrasi elektrolit Na₂SO₄ memberikan pengaruh terhadap karakteristik tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh superkapasitor. Hal ini dikarenakan peningkatan jumlah ion yang tersedia dalam elektrolit yang memperkuat pembentukan lapisan ganda elektrostatik pada permukaan elektroda,

sehingga penyimpanan energi yang lebih besar dan arus yang tinggi^[20]. Secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa variasi konsentrasi elektrolit Na₂SO₄ 1 M, 2 M, dan 3 M menghasilkan kenaikan nilai tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh superkapasitor.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih kepada dosen pembimbing dan mahasiswa yang penelitian tentang superkapasitor serta berbagai pihak yang senantiasa membantu dan mendukung selama penelitian ini berlangsung sampai proses publikasi ini selesai.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Wang, Q., Yan, J. and Fan, Z. (2016) Carbon materials for high volumetric performance supercapacitors: Design, progress, challenges and opportunities, *The Royal Society of Chemistry*, 9(3), 729–762. Available at: <https://doi.org/10.1039/c5ee03109e>.
- [2] Bhat, M.Y. et al. (2023). Frontiers and recent developments on supercapacitor's materials, design, and applications: Transport and power system applications, *Journal of Energy Storage*, 58, 106104. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106104>.
- [3] Tumimomor, F., Maddu, A. and Pari, G. (2017). Pemanfaatan Karbon Aktif Dari Bambu Sebagai Elektroda Superkapasitor, *Jurnal Ilmiah Sains*, 17(1), 73. Available at: <https://doi.org/10.35799/jis.17.1.2017.15802>.
- [4] Forouzandeh, P., Kumaravel, V. and Pillai, S.C. (2020). Electrode materials for supercapacitors: A review of recent advances, *Catalysts*, 10(9), 1–73. Available at: <https://doi.org/10.3390/catal10090969>.
- [5] Kim, S., Lee, S. and Park, S. (2022). Recent Advanced Supercapacitor: A Review of Storage Mechanisms, Electrode Materials, Modification, and Perspectives, *Journal of nanomaterials*, Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/nano12203708>.
- [6] El-Zaidia, M.M, Khafagy, A.H., Hassan, S. and Zaki, M.Z. (2019). The effect of electrolyte concentration on the energy storage using MnO₂ Supercapacitor electrode, *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*, 09(2), 11–19.
- [7] Kurniawan, F. et al. (2014). Carbon microsphere from water hyacinth for supercapacitor electrode, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2014.10.002>.
- [8] Putri, L.O.N. and Nurhilal, O. (2022). Pemanfaatan Arang Aktif Eceng Gondok Untuk Material Elektroda Superkapasitor, *Jurnal Ilmu dan Inovasi Fisika*, 06(02), 131–136.
- [9] MASAKUL, P. et al. (2023). The electrochemical properties of water hyacinth-derived activated carbon, *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 33(3), 2–7. Available at: <https://doi.org/10.55713/jmmm.v33i3.1618>.
- [10] González, P. (2017). Activated carbon from lignocellulosics precursors: A review of the synthesis methods, characterization techniques and applications, *Renewable and Sustainable Energy*, 82, 1393–1414. Available at: <https://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.117>.
- [11] Wu, L. et al. (2020). Hierarchically structured porous materials: synthesis strategies and applications in energy storage, *National Science Review*, 7(11), 1667–1701. Available at: <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa183>.
- [12] Novitra, R. (2021). Superkapasitor Berbahan Dasar Karbon Aktif Ampas Biji Kopi dengan Aktivator NaOH, *Journal of Chemical Information and Modeling*. Universitas Andalas.
- [13] Castro-gutiérrez, J., Celzard, A. and Fierro, V. (2020). Energy Storage in Supercapacitors: Focus on Tannin-Derived Carbon Electrodes, *Frontiers in Materials*, 7(July), 1–25. Available at: <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00217>.

- [14] Sharma, P. and Kumar, V. (2019). Study of electrode and electrolyte material of supercapacitor, *Materials Today: Proceedings*, 33(xxxx), 1573–1578. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.694>.
- [15] Rajapriya, A., Keerthana, S. and Ponpandian, N. (2023). Fundamental understanding of charge storage mechanism, *Smart Supercapacitors: Fundamentals, Structures, and Applications*, 65–82. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90530-5.00034-4>.
- [16] Wang, Y., Song, Y. and Xia, Y. (2016). Electrochemical capacitors: Mechanism, materials, systems, characterization and applications, *Chemical Society Reviews*, 45(21), 5925–5950. Available at: <https://doi.org/10.1039/c5cs00580a>.
- [17] Pandey, D., Kumar, K.S. and Thomas, J. (2024). Supercapacitor electrode energetics and mechanism of operation: Uncovering the voltage window, *Progress in Materials Science*, 141(March). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101219>.
- [18] Mendhe, A. and Panda, H.. (2023). A review on electrolytes for supercapacitor device, *Springer*, (July). Available at: <https://doi.org/10.1007/s43939-023-00065-3>.
- [19] Krishnan, P. and Biju, V. (2022). Effect of electrolyte concentration on the electrochemical performance of RGO- Na₂SO₄ supercapacitor, 54, 958–962.
- [20] Samantaray, S. et al. (2023). Unleashing recent electrolyte materials for next-generation supercapacitor applications: A comprehensive review, *Journal of Energy Storage*, 72(November). Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108352>.