



Analisis Daya Prototipe Superkapasitor Berbasis N-Glc dan Elektrolit Na_2SO_4

Jonatan Hutapea^{1*}, Nur Rohmat², Hasky Bambang Kurniawan³

¹⁻³ Program Studi Teknik Mesin, Universitas Pamulang, Indonesia

Email: jonatan.hutapea94@gmail.com^{1*}, dosen000597@unpam.ac.id², khaskybambang@gmail.com³

*Penulis Korespondensi: jonatan.hutapea94@gmail.com¹

Abstract. *The increasingly complex global energy problem drives the need for efficient, low-cost, and environmentally friendly energy storage systems. This study aims to analyze the power performance of two symmetric supercapacitor prototypes using Nitrogen-doped Graphene-Like Carbon (N-GLC) as the electrode material and 1 M Na_2SO_4 as the electrolyte, with different electrode substrates: aluminum and copper. Both prototypes were tested through charging and discharging processes using resistive loads of 470 ohms and 560 ohms for 5 minutes. The analyzed parameters include voltage, current, power, and output energy. The results show that the aluminum electrode achieved a higher maximum charging power of up to 18 mW; however, its energy discharge efficiency was very low at only 0.87%. In contrast, the copper electrode demonstrated a more balanced charging and discharging performance with an energy discharge efficiency of 19.4%. Analysis also indicates that the copper substrate maintains better voltage stability after 6 hours of storage compared to aluminum, which experienced significant degradation. Thus, the copper electrode is superior in maintaining the power and stability of a simple N-GLC-based symmetric supercapacitor system.*

Keywords: Aluminum Electrode; Copper Electrode; N-GLC; Na_2SO_4 ; Symmetric Supercapacitor.

Abstrak. Permasalahan energi global yang semakin kompleks mendorong kebutuhan akan sistem penyimpanan energi yang efisien, murah, dan ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis performa daya dari dua prototipe superkapasitor simetris yang menggunakan material elektroda *Nitrogen-doped Graphene-Like Carbon* (N-GLC) dan elektrolit Na_2SO_4 1 M, dengan substrat elektroda berbeda yaitu aluminium dan tembaga. Kedua prototipe diuji melalui proses pengisian dan pengosongan menggunakan beban resistif 470 ohm dan 560 ohm selama 5 menit. Parameter yang dianalisis meliputi tegangan, arus, daya, dan energi keluaran. Hasil menunjukkan bahwa elektroda aluminium memiliki daya maksimum lebih tinggi saat pengisian hingga 18 mW, namun efisiensi pelepasan energi sangat rendah hanya 0,87%. Sebaliknya, elektroda tembaga menunjukkan performa pengisian dan pengosongan yang lebih seimbang dengan efisiensi pelepasan energi sebesar 19,4%. Analisis juga menunjukkan bahwa substrat tembaga memiliki kestabilan tegangan yang lebih baik setelah penyimpanan 6 jam, dibandingkan aluminium yang mengalami degradasi signifikan. Dengan demikian, elektroda tembaga lebih unggul dalam mempertahankan daya dan kestabilan sistem superkapasitor simetris sederhana berbasis N-GLC.

Kata kunci: Elektroda Aluminium; Elektroda Tembaga; N-GLC; Na_2SO_4 ; Superkapasitor Simetris.

1. LATAR BELAKANG

Krisis energi global dan ketergantungan pada bahan bakar fosil memacu transisi menuju energi bersih yang membutuhkan sistem penyimpanan energi efisien. Menurut Al Huda (2023), Indonesia sedang mempercepat transisi energi ini melalui berbagai kebijakan strategis. Di sektor teknologi, superkapasitor muncul sebagai alternatif unggul karena memiliki densitas daya lebih tinggi dan siklus hidup lebih lama dibandingkan baterai konvensional (Lemian & Bode, 2022).

Pengembangan material elektroda menjadi kunci utama, di mana penggunaan karbon terdoping nitrogen (N-GLC) terbukti mampu meningkatkan luas permukaan aktif dan

konduktivitas (Azam dkk., 2021; Siburian dkk., 2023). Selain material, pemilihan elektrolit yang ramah lingkungan seperti Na₂SO₄ menjadi fokus karena stabilitasnya yang baik dibandingkan elektrolit asam atau basa (Xu dkk., 2021; Awitdrus dkk., 2021).

Meskipun penelitian mengenai material N-GLC telah banyak dilakukan, evaluasi performa pada tingkat prototipe dengan variasi substrat kolektor arus masih terbatas. Kolektor arus seperti aluminium dan tembaga memiliki peran krusial dalam meminimalkan resistansi internal (Abdisattar dkk., 2022), namun rentan terhadap degradasi (Liu dkk., 2021). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan performa daya prototipe superkapasitor simetris berbasis N-GLC dengan substrat aluminium dan tembaga guna menentukan efisiensi penyimpanan energi yang optimal untuk aplikasi praktis.

2. KAJIAN TEORITIS

Penelitian ini memiliki beberapa kajian teoritis yang melandasi penelitian. Berikut merupakan teori-teori dari penelitian yang dilakukan:

Superkapasitor dan Mekanisme Penyimpanan

Superkapasitor merupakan perangkat penyimpanan energi yang memiliki densitas daya lebih tinggi dibandingkan baterai konvensional (Lemian & Bode, 2022). Mekanisme penyimpanan energinya berbasis pada pembentukan electric double layer (EDL) di antarmuka elektroda dan elektrolit, yang memungkinkan proses pengisian dan pengosongan muatan berlangsung cepat tanpa melibatkan reaksi kimia permanen (Azam dkk., 2021).

Material Nitrogen-doped Graphene-Like Carbon (N-GLC)

Penggunaan material karbon seperti grafena yang dimodifikasi melalui nitrogen doping (N-GLC) bertujuan untuk meningkatkan performa elektrokimia. Menurut Siburian dkk. (2023), penambahan atom nitrogen dalam struktur karbon dapat meningkatkan konduktivitas listrik dan menciptakan lebih banyak situs aktif untuk adsorpsi ion. Karakteristik ini sangat krusial dalam menentukan kapasitas penyimpanan dan respon daya perangkat (Azam dkk., 2021).

Peran Elektrolit Na₂SO₄

Pemilihan elektrolit sangat menentukan jendela tegangan kerja dan stabilitas perangkat. Natrium sulfat (Na₂SO₄) dalam konsentrasi 1 M sering digunakan karena sifatnya yang netral dan ramah lingkungan. Xu dkk. (2021) menyatakan bahwa Na₂SO₄ memberikan stabilitas yang lebih baik pada elektroda karbon, sementara Awitdrus dkk. (2021) menyoroti efisiensinya dalam sistem superkapasitor berbasis air yang ekonomis.

Substrat Kolektor Arus (Aluminium dan Tembaga)

Kolektor arus berfungsi sebagai media penghantar elektron dari material aktif ke sirkuit luar. Abdisattar dkk. (2022) menekankan bahwa pemilihan jenis logam kolektor arus sangat mempengaruhi resistansi internal (ESR). Meskipun aluminium (Al) umum digunakan, ia rentan terhadap degradasi dan self-discharge dalam kondisi tertentu, sedangkan tembaga (Cu) menawarkan stabilitas tegangan yang berbeda dalam aplikasi sel simetris (Liu dkk., 2021; Chen dkk., 2021).

Analisis Performa Daya dan Energi

Evaluasi performa superkapasitor dilakukan dengan mengukur daya (Power) dan energi (Energy) melalui proses pengisian dan pengosongan menggunakan beban resistif. Analisis ini penting untuk mengetahui seberapa besar energi yang dapat dilepaskan kembali oleh sistem (efisiensi pelepasan) setelah proses penyimpanan muatan dilakukan.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental laboratorium untuk mengembangkan dan menguji prototipe superkapasitor simetris. Fokus utama penelitian adalah menganalisis pengaruh variasi substrat elektroda terhadap performa daya dan efisiensi energi.

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan meliputi perangkat akuisisi data Arduino untuk pembacaan parameter secara real-time, magnetic stirrer untuk pencampuran larutan, beban resistif (220 Ω , 470 Ω , dan 560 Ω), serta baterai 3V sebagai sumber pengisian. Bahan utama terdiri dari:

- a. Material Elektroda Aktif: Nitrogen-doped Graphene-Like Carbon (N-GLC).
- b. Substrat Kolektor Arus: Aluminium foil dan tembaga (copper foil) dengan dimensi 5 cm x 5cm.
- c. Elektrolit: Larutan Natrium Sulfat (Na_2SO_4) 1 M yang dilarutkan dalam air deionisasi.
- d. Separator: Kertas membran berpori untuk memisahkan kedua elektroda.

Prosedur Pembuatan Prototipe

Tahapan pembuatan prototipe meliputi:

- a. Persiapan Elektroda: Pelapisan material aktif N-GLC secara merata pada substrat aluminium dan tembaga, diikuti dengan proses pengeringan untuk memastikan adhesi yang baik.
- b. Perakitan Sel: Penyusunan dua elektroda sejenis (simetris) yang dipisahkan oleh separator, kemudian dibasahi dengan elektrolit Na_2SO_4 1 M.

- c. Pengemasan: Sel digulung secara kompak dan dimasukkan ke dalam wadah silinder untuk menjaga stabilitas mekanis.

Prosedur Pengujian dan Parameter

Pengujian dilakukan dalam dua tahap: uji langsung setelah perakitan dan uji kedua setelah penyimpanan selama 6 jam untuk melihat stabilitas muatan (*self-discharge*). Langkah pengujian meliputi:

- a. Proses Pengisian: Menggunakan baterai 3V melalui resistor 220 Ω selama 5 menit.
- b. Proses Pengosongan: Menggunakan beban resistif 470 Ω dan 560 Ω selama 5 menit.
- c. Akuisisi Data: Parameter tegangan (V), arus (I), dan waktu (t) direkam secara otomatis setiap 15 detik menggunakan sistem mikrokontroler.

Analisis Data

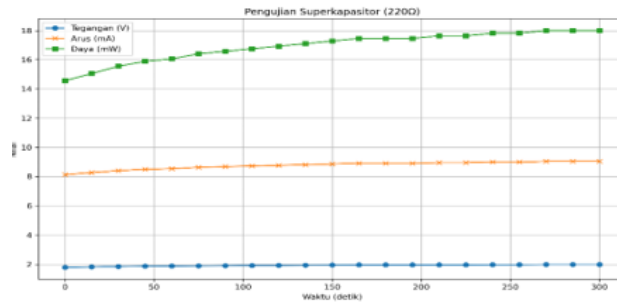
Data yang diperoleh diolah untuk menghitung daya ($P = V \times I$) dan energi keluaran ($E = \int P dt$). Efisiensi pelepasan energi dihitung dengan membandingkan energi yang dilepaskan saat pengosongan terhadap energi yang diserap saat pengisian. Hasil pengujian dari kedua variasi substrat kemudian dibandingkan untuk menentukan material kolektor arus yang paling stabil dan efisien.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

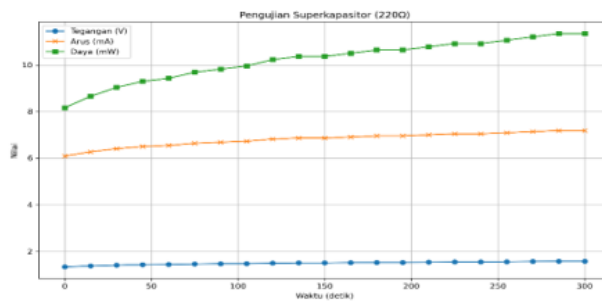
Hasil pengujian karakteristik dan daya energy pada prototype superkapasitor simetris berbasis N-GLC menunjukkan perbedaan performa yang signifikan. Berikut merupakan data hasil dan pembahasan dari penelitian yang telah dilakukan:

Karakteristik Pengisian (Charging) Prototipe

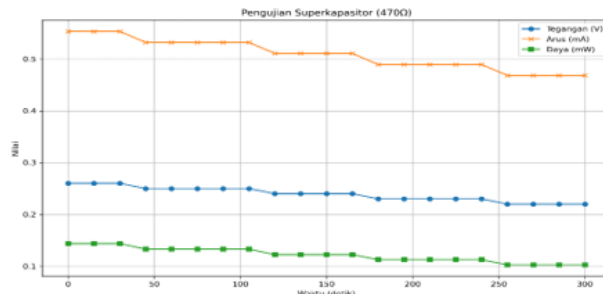
Proses pengisian dilakukan untuk mengetahui kemampuan prototipe dalam menyerap muatan energi hingga mencapai titik jenuh. Berdasarkan hasil pengujian, prototipe dengan substrat aluminium mencapai tegangan maksimum lebih cepat dibandingkan tembaga, namun dengan kestabilan yang berbeda.



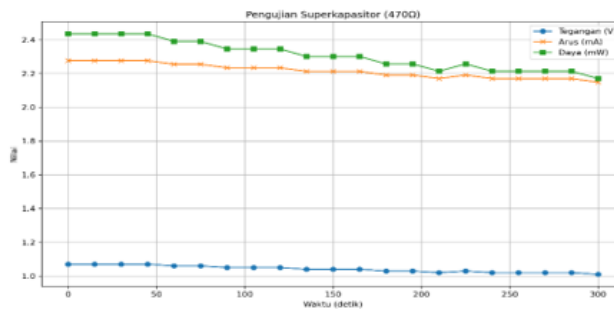
Gambar 1. Grafik tegangan, arus, dan daya saat pengisian superkapasitor berbasis aluminium (Uji 1, 220 ohm).



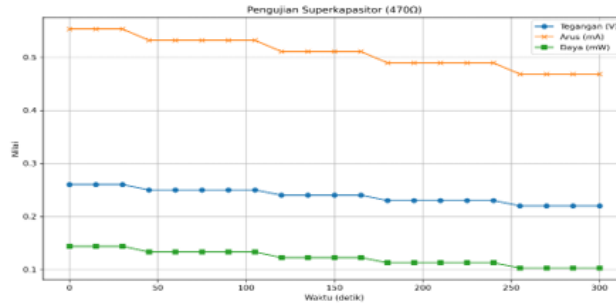
Gambar 2. Grafik tegangan, arus, dan daya saat pengisian superkapasitor berbasis tembaga (Uji 1, 220 ohm).



Gambar 3. Grafik tegangan, arus, dan daya saat pengosongan superkapasitor aluminium setelah 6 jam (Uji 2, 470 ohm).



Gambar 4. Grafik tegangan, arus, dan daya saat pengosongan superkapasitor tembaga setelah 6 jam (Uji 2, 470 ohm).



Gambar 5. Grafik tegangan, arus, dan daya saat pengosongan superkapasitor aluminium setelah 6 jam (Uji 2, 470 ohm).

Perhitungan daya pengisian menggunakan rumus:

$$P = V \times I$$

Tabel 1. Perbandingan tegangan awal, akhir, dan daya maksimum 220 ohm superkapasitor aluminium & tembaga.

Parameter	Aluminium Uji 1	Aluminium Uji 2	Tembaga Uji 1	Tembaga Uji 2
(V) Awal	0,0033 V	0,0319 V	0,1953 V	0,2162 V
(V) Akhir	1,99 V	1,95 V	1,58 V	1,62 V
Daya Maks.	18,000 mW	17,284 mW	11,347 mW	11,929 mW

Berdasarkan table di atas, di mana P adalah daya (Watt), V adalah tegangan (Volt), dan I adalah kuat arus (Ampere). Elektroda aluminium menunjukkan daya maksimum pengisian sebesar 18 mW, sementara elektroda tembaga menunjukkan karakteristik pengisian yang lebih linier.

Karakteristik Pengosongan (Discharging) dan Analisis Energi

Pengujian pengosongan dilakukan untuk mengukur energi yang tersimpan yang dapat dilepaskan kembali ke beban. Total energi yang dilepaskan (W) dihitung dengan rumus:

$$W = Pxt$$

Pada data gambar 3 (aluminium) tersebut menunjukkan penurunan tegangan yang sangat drastic (drop) dalam waktu singkat.

Pada gambar 4 ini memiliki kebalikan dari gambar sebelumnya, yang menunjukkan kurva pengosongan yang lebih landau, menandakan kemampuan penyimpanan muatan yang lebih baik.

Perbandingan efisiensi energy (η) antara kedua substrat dihitung dengan rumus:

$$\eta = \frac{W_{out}}{W_{in}} \times 100\%$$

Hasil perhitungan menunjukkan perbedaan yang signifikan sebagaimana dirangkum dalam table berikut:

Tabel 2. Perbandingan tegangan awal, akhir, dan daya maksimum 220 ohm superkapasitor aluminium & tembaga.

Parameter	Aluminium Uji 1	Aluminium Uji 2	Tembaga Uji 1	Tembaga Uji 2
(V) Awal	0,0033 V	0,0319 V	0,1953 V	0,2162 V
(V) Akhir	1,99 V	1,95 V	1,58 V	1,62 V
Daya Maks.	18,000 mW	17,284 mW	11,347 mW	11,929 mW

Tabel 3. Perbandingan energi pengisian 220 ohm dan pengosongan 470 ohm aluminium & tembaga.

Parameter	Aluminium (J)	Tembaga (J)
Pengisian 220 Ohm	5,333	3,215
Pengosongan 470 Ohm	0,046	0,625

Pembahasan

Berdasarkan hasil di atas, substrat tembaga memiliki efisiensi 22 kali lipat lebih tinggi dibandingkan substrat aluminium dalam sistem elektrolit Na₂SO₄. Hal ini disebabkan oleh konduktivitas listrik tembaga yang lebih tinggi dan resistansi antarmuka yang lebih rendah antara material aktif N-GLC dengan kolektor arus.

Kurva pada Gambar 5 menunjukkan bahwa aluminium mengalami self-discharge atau kebocoran muatan yang sangat tinggi, sehingga meskipun daya pengisiannya besar, energi tersebut tidak dapat tersimpan secara efektif. Di sisi lain, penggunaan substrat tembaga memberikan stabilitas tegangan yang lebih baik, menjadikannya pilihan yang lebih optimal untuk aplikasi superkapasitor simetris berbasis karbon.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa karakteristik tegangan, arus, dan daya pada superkapasitor simetris berbasis N-GLC sangat dipengaruhi oleh jenis substrat elektroda yang digunakan. Berdasarkan hasil pengujian pengisian dan pengosongan menggunakan beban resistif 220 Ω , 470 Ω , dan 560 Ω , elektroda tembaga terbukti memiliki performa yang jauh lebih unggul dan konsisten dibandingkan aluminium. Meskipun aluminium mencatat daya pengisian yang tinggi, efisiensi pelepasan energinya sangat rendah dan rentan terhadap *self-discharge*. Sebaliknya, elektroda tembaga mampu menghasilkan energi keluaran sebesar 0,625 Joule—

jauh melampaui aluminium yang hanya 0,046 Joule—serta menunjukkan stabilitas penyimpanan muatan yang lebih baik setelah 6 jam. Oleh karena itu, substrat tembaga sangat direkomendasikan untuk diaplikasikan pada sistem penyimpanan energi serupa karena tingkat efisiensi dan kestabilannya yang lebih tinggi. Untuk pengembangan selanjutnya, disarankan agar penelitian masa depan mengeksplorasi variasi konsentrasi elektrolit Na₂SO₄, melakukan optimasi pada durasi pengisian-pengosongan, serta melakukan pengujian ketahanan jangka panjang di atas 6 jam guna memahami profil *self-discharge* secara menyeluruh.

DAFTAR REFERENSI

- Abdisattar, A., Yeleuov, M., Daulbayev, C., Askaruly, K., Tolyzbekov, A., Taurbekov, A., & Prikhodko, N. (2022). Recent advances and challenges of current collectors for supercapacitors. *Electrochemistry Communications*, 142, 107373. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2022.107373>
- Al Huda, A. K. N. (2023). Transisi energi di Indonesia: Overview & challenges. *Buletin Pertamina*, 9(2), 49–58.
- Awitdrus, Suwandi, D. A., Agustino, Taer, E., Farma, R., & Syahputra, R. F. (2021). Effect of aqueous electrolyte to the supercapacitor electrode performance made from sugar palm fronds waste. *Journal of Physics: Conference Series*, 1951(1), 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1951/1/012009>
- Azam, M. A., Safie, N. E., Aziz, M. F. A., Seman, R. N. A. R., Suhaili, M. R., Latiff, A. A., Arith, F., Kassim, A. M., & Ani, M. H. (2021). Structural characterization and electrochemical performance of nitrogen-doped graphene supercapacitor electrode fabricated by hydrothermal method. *International Journal of Nanoelectronics and Materials*, 14(2), 127–136.
- Chen, X., Shen, C., Xia, X., & Xu, S. (2021). Surface treatment and adhesion strength of aluminum foil for lithium-ion battery package. *Surface and Interface Analysis*, 53(6), 559–568. <https://doi.org/10.1002/sia.6943>
- Dong, D., Zhang, Y., Xiao, Y., Wang, T., Wang, J., Romero, C. E., & Pan, W. P. (2020). High performance aqueous supercapacitor based on nitrogen-doped coal-based activated carbon electrode materials. *Journal of Colloid and Interface Science*, 580, 77–87. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.07.018>
- Lemian, D., & Bode, F. (2022). Battery-supercapacitor energy storage systems for electrical vehicles: A review. *Energies*, 15(15), 5683. <https://doi.org/10.3390/en15155683>
- Liu, D., Kim, S., & Choi, W. M. (2024). Facile synthesis of nitrogen-doped graphene quantum dots/MnCO₃/ZnMn₂O₄ on Ni foam composites for high-performance supercapacitor electrodes. *Materials*, 17(4), 884. <https://doi.org/10.3390/ma17040884>
- Liu, Y., Ma, L., & Dahn, J. R. (2021). Designing positive/positive and negative/negative symmetric cells with electrodes operating in the same potential ranges as electrodes in a full Li-ion cell. *Journal of the Electrochemical Society*, 168(8), 080537. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac1eb7>

- Nurul Huda, A. (2022). Pemanfaatan karbon aktif dari sekam padi sebagai elektroda superkapasitor. *Jurnal Ilmu dan Inovasi Fisika*, 6(2), 102–113. <https://doi.org/10.24198/jiif.v6i2.39639>
- Putra, N. A. E., Ferdianto, S. A., Qunefi, F., & Adelyadi, J. (2024). Perbandingan material superkapasitor berbasis karbon dan oksida logam untuk optimalisasi penyimpanan energi dalam aplikasi sistem energi terbarukan: Systematic literature review. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 5(3), 60–74. <https://doi.org/10.14710/jebt.2024.24858>
- Rajagukguk, E. P., Nasution, W. M., Muldarisnur, M., & Yetri, Y. (2024). Analisis pengaruh variasi elektrolit H₂SO₄, KOH, dan Na₂SO₄ terhadap kinerja elektrokimia superkapasitor berbasis biomassa kulit kakao. *Jurnal Fisika Unand*, 13(5), 610–616. <https://doi.org/10.25077/jfu.13.5.610-616.2024>
- Şahin, M. E., Blaabjerg, F., & Sangwongwanich, A. (2022). Review of supercapacitor applications in renewable energy systems. *Energies*, 15(3), 674. <https://doi.org/10.3390/en15030674>
- Saini, P. (2023). A historical review of electrode materials and electrolytes for electrochemical double layer supercapacitors and pseudocapacitors. *Indian Journal of Pure and Applied Physics*, 61(4), 268–290. <https://doi.org/10.56042/ijpap.v61i4.69622>
- Siburian, R., Hutagalung, F., Silitonga, O., Paiman, S., Simatupang, L., Simanjuntak, C., Aritonang, S. P., Alias, Y., Jing, L., Goei, R., & Tok, A. I. Y. (2023). The new materials for battery electrode prototypes. *Materials*, 16(2), 555. <https://doi.org/10.3390/ma16020555>
- Simanullang, L. E., Nasruddin, & Fadlly, T. A. (2024). Pengaruh penambahan karbon aktif pada elektrolit padat baterai berbasis CaO dari limbah cangkang kerang. *Hadron: Jurnal Fisika dan Terapan*, 6(2), 27–32. <https://doi.org/10.33059/jh.v6i2.10970>
- Tamara, G. J., Polii, J., Tumimomor, F. R., Rampengan, A. M., & Mongan, S. W. (2024). Karakteristik I–V elektroda superkapasitor berbasis karbon aktif kulit kacang batik Kawangkoan. *Sosced*, 7(2).
- Vietanti, F., Saidatin, N., Arinda, S., Riyadi, K., & Program Studi Teknik Mesin Industri. (2021). Pengaruh doping nitrogen pada matriks reduced graphene oxide terhadap sifat kapasitif superkapasitor. *Metalurgi*, 59–68.
- Wang, X., Su, Y., Ouyang, Q., Zhu, C., Cao, H., & Zhang, D. (2021). Fabrication, mechanical and thermal properties of copper coated graphite films reinforced copper matrix laminated composites via ultrasonic-assisted electroless plating and vacuum hot-pressing sintering. *Materials Science and Engineering: A*, 824, 141768. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141768>
- Witjaksono, G., Junaid, M., Khir, M. H., Ullah, Z., Tansu, N., Saheed, M. S. B. M., Siddiqui, M. A., Ba-Hashwan, S. S., Algamili, A. S., Magsi, S. A., Aslam, M. Z., & Nawaz, R. (2021). Effect of nitrogen doping on the optical bandgap and electrical conductivity of nitrogen-doped reduced graphene oxide. *Molecules*, 26(21), 6424. <https://doi.org/10.3390/molecules26216424>
- Xu, Y., Zhu, J., Feng, J., Wang, Y., Wu, X., Ma, P., Zhang, X., Wang, G., & Yan, X. (2021). A rechargeable aqueous zinc/sodium manganese oxides battery with robust performance enabled by Na₂SO₄ electrolyte additive. *Energy Storage Materials*, 38, 299–308. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2021.03.019>