

KARAKTERISTIK I-V ELEKTRODA SUPERKAPASITOR BERBASIS KARBON AKTIF KULIT KACANG BATIK KAWANGKOAN

I-V CHARACTERISTICS OF SUPERCAPACITOR ELECTRODES BASED ON BATIK KAWANGKOAN PEANUT SHELL ACTIVATED CARBON

Gersom Jeremia Tamara¹, Jeferson Polii², Farly R. Tumimomor³,
Alfrie M. Rampengan⁴, Satyano W. Mongan⁵

¹Program Studi Fisika,
Fakultas Matematika, Ilmu
Pengetahuan Alam dan
Kebumihan, Universitas Negeri
Manado, Kabupaten
Minahasa, 95618, Indonesia
gersomtamura23@gmail.com

²⁻⁵Jurusan Fisika, Fakultas
Matematika, Ilmu
Pengetahuan Alam dan
Kebumihan, Universitas Negeri
Manado, Kabupaten
Minahasa, 95618, Indonesia

ABSTRACT

The energy crisis is one of the major problems facing the world today, especially electrical energy. Supercapacitors are an alternative solution as an electrical energy storage devices. In this study, batik kawangkoan peanut shell samples have been successfully modified into activated carbon as a supercapacitor electrode. The carbonization process is given a carbonization temperature treatment of 350°C, 400°C, 450°C, 500°C, 550°C which is activated using a 7 M KOH solution by heating in a furnace at 750°C to produce a voltage of 0.966 V, 1.273 V, respectively, 1.295 V, 1.325 V, 1.654 V and currents of 18.56 mA, 23.43 mA, 26.47 mA, 30.53 mA, 48.24 mA which shows that there is a change in the value of current and voltage in supercapacitors, and the best sample is in the sample with 550°C carbonization temperature treatment. Thus, it can be concluded that carbonization temperature has an influence on the current and voltage characteristics of supercapacitor electrodes.

Keywords : *I-V Characteristics, Supercapacitor, Electrode, Activated Carbons, Carbonization Temperature*

1. PENDAHULUAN

Pada zaman modern yang didominasi oleh perkembangan teknologi yang pesat, krisis energi menjadi salah satu masalah besar yang dihadapi dunia. Hal ini disebabkan oleh kurangnya pemanfaatan sumber daya yang menghasilkan energi. Jumlah penduduk yang meningkat menyebabkan cadangan bahan bakar minyak semakin menipis, terutama bahan bakar fosil yang tidak dapat didaur ulang. Maka, untuk menyelesaikan masalah ini diperlukan suatu terobosan dan pembaharuan mengenai energi yaitu pemakaian energi alternatif pengganti bahan bakar fosil. Pemanfaatan energi alternatif ini salah satunya adalah divais penyimpan energi seperti superkapasitor.

Superkapasitor adalah teknologi sistem penyimpanan energi listrik terkemuka saat ini. Superkapasitor menyimpan energi listrik secara langsung sebagai muatan^[1]. Superkapasitor (*EDLC*) adalah salah satu perangkat penyimpan energi yang paling efektif dan efisien. *EDLC* umumnya terdiri dari beberapa komponen utama seperti elektroda, elektrolit, dan separator. Energi dan kekuatan superkapasitor ditentukan oleh elektrolit dan elektroda di mana interaksi ion elektrolit terjadi pada area permukaan elektroda berpori^[2]. Superkapasitor juga memiliki sifat yang melekat dengan baterai, itulah mengapa mereka sangat cocok untuk digunakan di bidang tertentu yang bisa meningkatkan kemampuan baterai. Superkapasitor juga memiliki kemampuan yang lebih tinggi untuk bidang yang membutuhkan properti komposit pengiriman daya yang lebih tinggi, periode pengisian dan pemakaian yang lebih pendek, stabilitas tinggi dalam jumlah siklus yang lebih besar dan periode penyimpanan yang lebih lama. Untuk membuat superkapasitor lebih praktis, meningkatkan ketersediaan solusi untuk berbagai bidang terapan, harus ada peningkatan Penelitian dan Pengembangan^[3]. Superkapasitor juga memiliki daya tahan yang sangat baik pada 12.000 siklus pengisian-pengosongan dengan 99% retensi kapasitansi

dan 99% efisiensi^[4]. Komponen utama superkapasitor terdiri dari elektroda, pengumpul cairan, diafragma dan elektrolit, dengan faktor utama yang memengaruhi kinerja dan biaya produksi adalah bahan elektroda^[5]. Superkapasitor memanfaatkan permukaan elektroda yang luas dan bahan dielektrik yang tipis untuk mencapai nilai kapasitansi yang jauh lebih besar daripada kapasitor konvensional. Hal ini memungkinkan superkapasitor akan memiliki rapat energi yang jauh lebih besar dibanding dengan kapasitor konvensional dan memiliki rapat daya jauh lebih besar daripada baterai. Sehingga, superkapasitor akan menjadi solusi yang sangat baik sebagai piranti penyimpan energi listrik.

Karbon aktif adalah bahan berkarbon dengan struktur berpori tinggi. Untuk pembuatan karbon aktif digunakan dua proses dasar yaitu karbonisasi dan aktivasi^[6]. Karbon aktif mengandung 85-95% karbon, dihasilkan dari bahan-bahan yang mengandung karbon dengan pemanasan pada suhu tinggi. Ketika pemanasan berlangsung, diusahakan agar tidak terjadi kebocoran udara di dalam ruangan pemanasan sehingga bahan yang mengandung karbon tersebut hanya terkarbonisasi dan tidak teroksidasi^[7]. Karbon aktif adalah salah satu bahan yang sering di gunakan untuk pembuatan baterai, superkapasitor dan absorben. Dalam beberapa tahun terakhir ini, teknologi penyimpanan energi listrik telah berkembang pesat, terutama dalam hal baterai dan superkapasitor. Karbon aktif banyak digunakan dalam berbagai aplikasi elektrokimia salah satunya adalah sebagai bahan elektroda superkasitor, di karenakan harganya yang relatif rendah dan bahan dasar yang mudah didapat dari berbagai jenis bahan alam. Penggunaan karbon aktif yang merupakan material berpori sebagai elektroda superkapasitor sudah banyak dimodifikasi untuk meningkatkan nilai kapasitansinya. Banyak penelitian yang telah dilakukan dengan cara memanfaatkan karbon aktif dari bahan limbah alam sebagai elektroda superkapasitor seperti, cangkang kelapa sawit^[8], sekam padi^[9] dan ampas biji kopi robusta^[10]. Ini mengapa peneliti tertarik membuat karbon aktif dari bahan limbah alam seperti kulit kacang batik kawangkoan. Tujuannya adalah agar limbah alam yang akan tercemar di lingkungan dapat bermanfaat dan berbasis *green chemistry* karena berkurangnya pencemaran limbah organik.

Limbah organik kulit kacang batik kawangkoan banyak ditemukan di Provinsi Sulawesi Utara, namun belum dimanfaatkan secara efektif. Dinamakan kacang kawangkoan, karena di daerah tersebut memiliki jenis tanah yang subur dan iklim yang sesuai dengan pertumbuhan kacang tanah. Kacang juga merupakan *icon* kecamatan Kawangkoan yang telah diabadikan dalam patung kacang^[11]. Kacang tanah (*Arachis hypogaea L.*) merupakan tanaman yang tergolong famili *Leguminoceae*. Kacang tanah sendiri terdiri dari biji dan kulitnya, dimana kulitnya tidak dapat dimanfaatkan secara optimal dan limbahnya masih merugikan bagi lingkungan. Kandungan selulosa pada kulit kacang tanah cukup tinggi sehingga dapat digunakan sebagai penyerap karena gugus —OH terikat pada selulosa. Pada penelitian kali ini karbon aktif pelet kulit kacang tanah digunakan sebagai adsorben untuk menurunkan kadar warna dan menetralkan pH limbah pewarna sintesis melalui proses Adsorpsi^[12]. Jika limbah kulit kacang yang bernilai rendah dapat diubah menjadi karbon yang berguna untuk membuat elektroda superkapasitor, masalah pengolahan dan pembuangan yang disebabkan oleh pembakaran biomassa limbah dalam jumlah besar dapat diatasi secara efektif. Bahan yang disintesis juga mudah diakses, murah, dan berkelanjutan, yang membawa manfaat sosial, ekonomi, dan lingkungan^[5]. Dengan keunggulan biaya rendah dan ramah lingkungan, bahan karbon yang disiapkan memiliki kinerja elektrokimia yang unggul dan prospek yang sangat baik dalam penerapan elektroda superkapasitor^[13]. Dalam penelitian ini, peneliti akan melakukan proses karbonisasi dari bahan limbah tersebut menggunakan alat furnace dengan variasi suhu karbonisasi. Pengaruh variasi suhu karbonisasi dari kulit kacang kawangkoan ini masih perlu diteliti lebih lanjut baik itu dari karakteristik bahan, sifat fisis bahan dan lain sebagainya. Oleh karena itu, penelitian ini akan difokuskan pada variasi suhu karbonisasi kulit kacang batik kawangkoan untuk mengidentifikasi karakteristik I-V pada elektroda superkapasitor.

Pengaruh variasi suhu karbonisasi dari kulit kacang kawangkoan ini masih perlu diteliti lebih lanjut baik itu dari karakteristik bahan, sifat fisis bahan dan lain sebagainya. Oleh karena itu, penelitian

ini akan difokuskan pada variasi suhu karbonisasi kulit kacang batik kawangkoan untuk mengidentifikasi karakteristik I-V pada elektroda superkapasitor. Karakteristik I-V atau Arus-Tegangan adalah hubungan antara arus listrik yang mengalir melalui suatu komponen atau rangkaian dan tegangan yang diberikan pada komponen atau rangkaian tersebut. Hubungan ini sering digambarkan dalam bentuk kurva yang menunjukkan bagaimana arus berubah sesuai dengan perubahan tegangan. Karakteristik ini sangat penting dalam memahami perilaku komponen listrik dan elektronik, seperti resistor, dioda, transistor, kapasitor dan superkapasitor. Menurut^[14] kurva arus-tegangan (I-V) menggambarkan sifat listrik dari membran dan memberikan informasi tentang mekanisme transport ion, termasuk polarisasi konsentrasi.

Karakteristik I-V pada superkapasitor sangat penting untuk memahami bagaimana perangkat ini berperilaku di bawah berbagai kondisi operasi. Grafik I-V dari superkapasitor biasanya akan menunjukkan kurva hubungan linier antara arus dan tegangan, namun dengan beberapa deviasi yang disebabkan oleh faktor-faktor seperti *ESR* dan arus bocor.^[15] menjelaskan bahwa arus bocor menurun secara eksponensial setelah penerapan tegangan *DC* bertahap dan menunjukkan perbedaan yang signifikan antara elektroda yang berbeda. Kurva karakteristik arus-tegangan (I-V) juga menunjukkan perbedaan, di mana arus puncak pada pembebanan maksimum 5 V adalah 5,1 nA untuk sampel dengan elektroda Ag, 138,9 nA untuk elektroda Au, dan 13,5 μ A untuk elektroda Pt. Selain itu, terdapat puncak arus redoks yang jelas pada sekitar 4 V pada sampel LLTO/Pt dan puncak yang kabur pada sampel LLTO/Au pada sekitar 2 V, yang mengindikasikan adanya reaksi elektrokimia antara elektroda LLTO dan Pt/Au. Perbedaan ini disebabkan oleh reaksi redoks dari antarmuka kontak *Schottky* antara sampel dan elektroda. Karakteristik I-V antarmuka antara LLTO dan elektroda logam ini membantu kita untuk memahami mekanisme yang mendasari superkapasitor keramik lapisan ganda listrik padat di masa depan.

Selain itu, penelitian ini juga akan memberikan pemahaman tentang proses pembuatan karbon sampai menjadi karbon aktif dari bahan limbah organik dan aplikasinya dalam pengolahan limbah kulit kacang batik kawangkoan. Penggunaan limbah kulit kacang batik kawangkoan sebagai bahan baku utama untuk karbon aktif perlu menjadi perhatian untuk keperluan riset dan pengembangan karbon aktif sebagai elektroda superkapasitor.

2. METODE PENELITIAN

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Fisika Material, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika, Ilmu Pengetahuan Alam dan Kebumihan, Universitas Negeri Manado. Waktu penelitian dilaksanakan pada bulan Januari sampai Mei 2024.

Alat dan Bahan Penelitian

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

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah adalah kulit kacang batik kawangkoan sebagai bahan baku yang digunakan dalam pembuatan karbon aktif. Sedangkan bahan yang digunakan untuk proses aktivasi sampai pembuatan elektroda superkapasitor adalah KOH (*potassium hydroxide*) *Pro-Analysis*, akuades, alkohol 70%, larutan elektrolit KOH 6 M, kertas saring *Whatman*, *tissue* makan, bubuk *PTFE*, aluminium foil, kaca akrilik.

Pembuatan Karbon Aktif

Pada tahap pra-karbonisasi, sampel kulit kacang batik kawangkoan dicuci untuk menghilangkan debu dan sisa kotoran yang ada pada sampel. Kemudian sampel di keringkan dalam oven pada suhu 80°C selama 12 Jam^[16] dan dilakukan secara berulang sampai massa sampel tidak berkurang, yang bertujuan untuk mengurangi kadar air yang ada pada sampel sebelum dilakukan proses karbonisasi. Selanjutnya, untuk proses karbonisasi, sampel diberikan perlakuan variasi suhu karbonisasi dengan nilai 350°C, 400°C, 450°C, 500°C, 550°C.

Proses karbonisasi dilakukan selama 1 jam dalam furnace dengan laju pemanasan 10°C/menit [17]. Sampel yang sudah melewati proses karbonisasi dihaluskan menggunakan *mortar and pestle* dan disaring menggunakan ayakan 100 *mesh*. Kemudian, dilakukan proses aktivasi kimia menggunakan larutan KOH 7 M lalu disimpan dalam oven pada suhu 60°C selama 4 jam.

Selanjutnya, pada suhu 750°C^[18] selama 2 jam dilakukan untuk proses aktivasi fisika menggunakan *furnace*. Setelah itu, sampel dibilas dengan air deionisasi hingga pH = 7^[15] dan dikeringkan dalam oven vakum pada suhu 110°C selama 12 jam^[19].

Fabrikasi Elektroda Superkapasitor dan Pengukuran I-V

Larutan KOH 6 M digunakan sebagai elektrolit^[20]. Elektroda dibuat dengan campuran homogen 7:2:1 karbon aktif, bubuk *PTFE* dan lem *epoxy steel* hitam (10 wt%) dengan *ONEMED* alkohol 70% sebanyak 50 mL sebagai media pencampuran menggunakan *stirrer with heater* selama 1 jam. Setelah itu nyalakan *heater* untuk membuat sampel menjadi bentuk pasta. Kemudian, sampel dilapisi diatas permukaan kolektor arus yang terbuat dari aluminium foil berukuran 5 × 5 cm, lalu disusun dengan separator yang terbuat dari tissue makan berukuran 5,5 × 5,5 cm dan *cover body* yang terbuat dari kaca akrilik berukuran 5 × 5 cm. Sebelumnya kedua elektroda diberikan larutan elektrolit sebanyak 3 tetes menggunakan alat pipet tetes dan di separator sebanyak 1 tetes.

Pada penelitian ini dilakukan pengukuran arus dan tegangan listrik pada masing-masing sampel elektroda superkapasitor. Sebelum melakukan pengukuran arus dan tegangan listrik pada sampel elektroda superkapasitor, dilakukan proses pengisian selama 10 menit menggunakan *power supply DC to DC* dengan tegangan sebesar 3 V dan arus 0,6 A.

Teknik Pengumpulan Data dan Analisis Data

Data yang diambil dalam penelitian ini adalah data dari proses karbonisasi kulit kacang batik kawangkoan menggunakan alat *furnace* dengan variasi suhu karbonisasi 350°C, 400°C, 450°C, 500°C dan 550°C. Kemudian dilakukan analisis data dari masing-masing sampel dengan mengukur arus dan tegangan *output* dari elektroda superkapasitor.

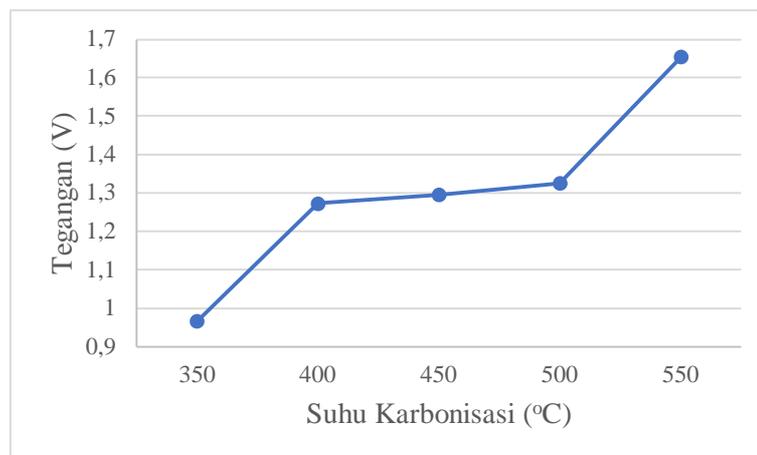
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tegangan Listrik

Tabel 1. "Hasil Uji Tegangan Pada Superkapasitor"

No.	Suhu Karbonisasi (°C)	Tegangan (V)
1	350	0,966
2	400	1,273
3	450	1,295
4	500	1,325
5	550	1,654

Tabel 1 diatas menunjukkan bahwa hasil pengukuran Tegangan Listrik pada Superkapasitor menggunakan alat Multimeter Digital dengan nilai satuan yang didapat adalah Volt (V).



Gambar 1. Grafik Nilai Tegangan Superkapasitor pada suhu 350°C-550°C

Berdasarkan data Tabel 1 dan Gambar 1 diatas menunjukkan bahwa nilai tegangan yang dihasilkan oleh superkapasitor mengalami peningkatan bersamaan dengan bertambahnya suhu karbonisasi pada sampel kulit kacang batik kawangkoan. Dari hasil penelitian, suhu yang divariasikan yaitu 350°C, 400°C, 450°C, 500°C dan 550°C dan masing-masing mempunyai nilai tegangan yang bervariasi juga pada superkapasitor yaitu sebesar 0,966 V, 1,273 V, 1,295 V, 1,325 V dan 1,654 V.

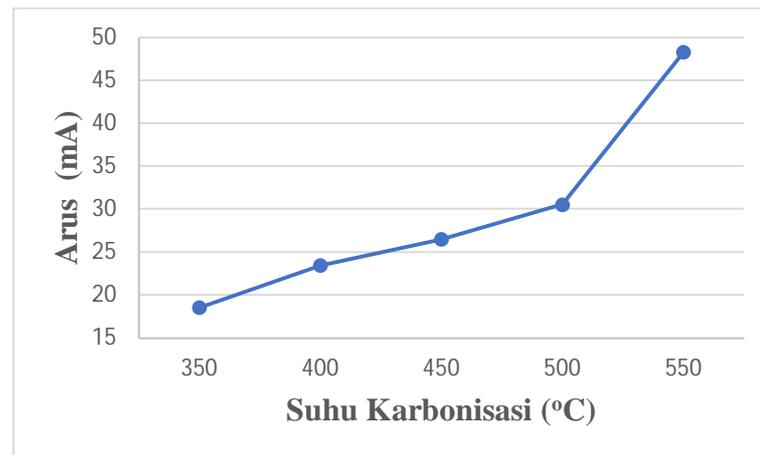
Bertambahnya tegangan listrik pada superkapasitor di pengaruhi dengan adanya peningkatan suhu karbonisasi, itu dikarenakan seiring bertambahnya suhu karbonisasi maka karbon yang dihasilkan memiliki kadar mineral, air dan zat pengotor yang rendah sehingga karbon yang dihasilkan memiliki nilai karbon yang sangat tinggi. Tegangan listrik pada superkapasitor juga dapat meningkat karena bertambahnya suhu karbonisasi yang mempengaruhi perubahan struktur dan sifat material karbon aktif tersebut. Suhu karbonisasi yang lebih tinggi menghasilkan karbon aktif dengan tingkat kekonduksian listrik yang lebih baik. Hal ini disebabkan oleh pengurangan kandungan bahan non-karbon dan peningkatan jumlah struktur grafitik yang lebih teratur, yang memungkinkan transfer elektron lebih efisien.^[21] juga menegaskan bahwa suhu memiliki pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik produk akhir.

Arus Listrik

Tabel 2. “Hasil Uji Arus Pada Superkapasitor”

No	Suhu Karbonisasi (°C)	Arus (mA)
1	350	18,56
2	400	23,43
3	450	26,47
4	500	30,53
5	550	48,24

Tabel 2 diatas menunjukkan hasil pengukuran Arus Listrik menggunakan alat Multimeter Digital dengan nilai satuan yang didapat adalah miliampere (mA).



Gambar 2. Grafik Nilai Arus Superkapasitor pada suhu 350°C-550°C

Berdasarkan data Tabel 2 dan Gambar 2 diatas menunjukkan bahwa nilai arus yang dihasilkan oleh superkapasitor mengalami peningkatan secara signifikan bersamaan dengan bertambahnya suhu karbonisasi pada sampel kulit kacang batik kawangkoan. Dari hasil penelitian, suhu yang divariasikan yaitu 350°C, 400°C, 450°C, 500°C dan 550°C dan masing-masing mempunyai nilai arus yang bervariasi juga pada superkapasitor yaitu sebesar 18,56 mA, 23,43 mA, 26,47 mA, 30,53 mA dan 48,24 mA dan dengan bertambahnya tegangan pada superkapasitor mempengaruhi adanya peningkatan arus pada superkapasitor.

Variasi suhu karbonisasi mempengaruhi kualitas dan karakteristik material karbon aktif. Seperti tegangan listrik, tingginya suhu karbonisasi menghasilkan karbon aktif dengan kadar mineral, air dan zat pengotor yang rendah. Sehingga, karbon aktif yang dihasilkan memiliki nilai karbon yang sangat tinggi. Nilai karbon yang semakin tinggi akan mempengaruhi proses perpindahan elektron karena struktur karbon memiliki tingkat absorpsi yang lebih tinggi. Peningkatan suhu karbonisasi ini juga mengubah ukuran dan distribusi pori dalam karbon aktif sehingga cenderung menghasilkan pori yang lebih banyak dan besar, meningkatkan luas permukaan spesifik dan kapasitas penyimpanan ion, yang secara langsung meningkatkan kapasitas penyimpanan muatan dan arus listrik. Suhu karbonisasi juga dapat mempengaruhi sifat elektrokimia material, di mana suhu yang lebih tinggi meningkatkan mobilitas dan konsentrasi ion, serta efisiensi interaksi antara elektrolit dan elektroda. [13] mempertegas bahwa performa kapasitansi bahan elektroda karbon aktif pada superkapasitor memiliki korelasi yang signifikan dengan luas permukaan spesifiknya.

Selain itu, struktur pori yang lebih teratur dan ideal memungkinkan ion bergerak lebih efisien selama proses pengisian dan pengosongan superkapasitor. Kandungan abu dan impuritas lainnya juga berkurang pada suhu yang lebih tinggi, sehingga mengurangi hambatan dan meningkatkan konduktivitas listrik. Stabilitas kimia dan mekanis dari karbon aktif juga lebih baik pada suhu karbonisasi yang tinggi, sehingga membantu mempertahankan kinerja tinggi dalam jangka waktu yang lebih lama, termasuk kemampuan untuk menghantarkan arus listrik yang lebih besar. Menurut [22] dengan meningkatnya suhu karbonisasi, kapasitas penyerapan metilen biru dan angka yodium juga meningkat untuk semua rasio impregnasi. Keadaan ini disebabkan oleh peningkatan struktur berpori, pembentukan pori baru, dan luas permukaan karena penghilangan zat-zat yang mudah menguap sebagai akibat dari peningkatan suhu karbonisasi.

4. KESIMPULAN

Pada penelitian ini, sampel kulit kacang batik kawangkoan telah berhasil di modifikasi menjadi karbon aktif sebagai elektroda superkapasitor. Proses karbonisasi yang diberikan perlakuan suhu karbonisasi sebesar 350°C, 400°C, 450°C, 500°C, 550°C yang di aktivasi menggunakan larutan KOH 7 M dengan pemanasan didalam *furnace* pada suhu 750°C menghasilkan tegangan masing-masing sebesar 0,966 V, 1,273 V, 1,295 V, 1,325 V, 1,654 V dan arus 18,56 mA, 23,43 mA, 26,47 mA, 30,53 mA, 48,24 mA yang menunjukkan bahwa adanya perubahan nilai arus dan tegangan pada superkapasitor, dan sampel yang paling bagus terdapat di sampel dengan perlakuan suhu karbonisasi 550°C. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa suhu karbonisasi memiliki pengaruh terhadap karakteristik arus dan tegangan pada superkapasitor.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Tumimomor, A. Maddu, and G. Pari, "Pemanfaatan Karbon Aktif Dari Bambu Sebagai Elektroda Superkapasitor," *J. Ilm. Sains*, vol. 17, no. 1, p. 73, 2017, doi: 10.35799/jis.17.1.2017.15802.
- [2] E. Taer *et al.*, "The synthesis of activated carbon made from banana stem fibers as the supercapacitor electrodes," *Mater. Today Proc.*, vol. 44, pp. 3346–3349, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.645.
- [3] S. Karthikeyan, B. Narenthiran, A. Sivanantham, L. Deepak, and T. Maridurai, "Materials Today : Proceedings Supercapacitor : Evolution and review," *Mater. Today Proc.*, vol. 46, no. xxxx, pp. 3984–3988, 2021, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.526>
- [4] M. Muthu Balasubramanian, M. Subramani, D. Murugan, and S. Ponnusamy, "Groundnut shell-derived porous carbon-based supercapacitor with high areal mass loading using carbon cloth as current collector," *Ionics (Kiel)*, vol. 26, no. 12, pp. 6297–6308, 2020, doi: 10.1007/s11581-020-03754-8.
- [5] Y. Wang *et al.*, "Hydrothermal synthesis and electrochemical properties of Sn-based peanut shell biochar electrode materials," *RSC Adv.*, vol. 14, no. 9, pp. 6298–6309, 2024, doi: 10.1039/d3ra08655k.
- [6] G. Sharma *et al.*, "Activated Carbon as Superadsorbent and Sustainable Material for Diverse Applications," *Adsorpt. Sci. Technol.*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/4184809.
- [7] R. Komala, D. S. Dewi, and N. Pandiyah, "Proses Adsorpsi Karbon Aktif Kulit Kacang Tanah Terhadap Penurunan Kadar Cod Dan Bod Limbah Cair Industri Tahu," *J. Redoks*, vol. 6, no. 2, pp. 139–148, 2021, doi: 10.31851/redoks.v6i2.6382.
- [8] H. Aziz, O. N. Tetra, A. Alif, Syukri, and W. Ramadhan, "Electrical properties of supercapacitor electrode-based on activated carbon from waste palm kernel shells," *Der Pharma Chem.*, vol. 8, no. 15, pp. 227–232, 2016.
- [9] W. Zhang *et al.*, "Direct carbonization of rice husk to prepare porous carbon for supercapacitor applications," *Energy*, vol. 128, pp. 618–625, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.04.065.
- [10] G. Sania, E. Taer, and H. Aziz, "Utilization of activated carbon from used robusta coffee ground activated using potassium hydroxide (KOH) as a material for supercapacitor electrodes," *J. Aceh Phys. Soc.*, vol. 11, no. 1, pp. 24–32, 2022, doi: 10.24815/jacps.v11i1.22190.
- [11] M. F. Pomalingo, F. Fatimah, and I. W. G. Suarjana, "Penerapan Dan Pelatihan Mesin Penyangrai Kacang Kawangkoan Pada Ikm Rimawar Kabupaten Minahasa: Application and Training of Kawangkoan Peanut ...," *Abdi Techno*, vol. 3, no. 1, pp. 1–11, 2022, [Online]. Available: <http://agritech.unhas.ac.id/ojs/index.php/abditechno/article/view/734>
- [12] R. Komala, Rina Dwi Oktaiani, Sisnayati, Dian Sari Dewi, Hendra Dwipayana, and Nurlela, "Karakterisasi Karbon Aktif Pelet Kulit Kacang Tanah Dan Aplikasinya Pada Limbah Pewarna Sintesis," *J. Redoks*, vol. 9, no. 1, pp. 43–54, 2024, doi: 10.31851/redoks.v9i1.14155.

- [13] D. Lan *et al.*, “Preparation and characterization of high value-added activated carbon derived from biowaste walnut shell by KOH activation for supercapacitor electrode,” *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 31, no. 21, pp. 18541–18553, 2020, doi: 10.1007/s10854-020-04398-0.
- [14] M. N. Islami, N. N. Rupiasih, M. Sumadiyasa, and I. B. S. Manuaba, “Studi Kurva Karakteristik Arus-Tegangan (I-V) Membran Komposit Kitosan-Nanopartikel Perak The Study of Current-Voltage (I-V) Characteristic Curve of Chitosan-Silver Nanoparticle Composite Membrane,” *Bul. Fis.*, vol. 19, no. 2, pp. 40–45, 2018.
- [15] R. Gu *et al.*, “Electrolyte for Ceramic Supercapacitors,” vol. 45, no. July 2018, pp. 8243–8247, 2019.
- [16] Y. Qiao, C. Zhang, F. Kong, Q. Zhao, A. Kong, and Y. Shan, “Activated biochar derived from peanut shells as the electrode materials with excellent performance in Zinc-air battery and supercapacitance,” *Waste Manag.*, vol. 125, pp. 257–267, 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2021.02.057.
- [17] L. Pandey *et al.*, “Fabrication of activated carbon electrodes derived from peanut shell for high-performance supercapacitors,” *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 13, no. 8, pp. 6737–6746, 2023, doi: 10.1007/s13399-021-01701-9.
- [18] S. Wang, H. Nam, and H. Nam, “Preparation of activated carbon from peanut shell with KOH activation and its application for H₂S adsorption in confined space,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 8, no. 2, p. 103683, 2020, doi: 10.1016/j.jece.2020.103683.
- [19] N. Yadav, M. K. Singh, N. Yadav, and S. A. Hashmi, “High performance quasi-solid-state supercapacitors with peanut-shell-derived porous carbon,” *J. Power Sources*, vol. 402, no. June, pp. 133–146, 2018, doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.09.032.
- [20] Y. Zhan *et al.*, “Preparation of highly porous activated carbons from peanut shells as low-cost electrode materials for supercapacitors,” *J. Energy Storage*, vol. 34, no. November 2020, p. 102180, 2021, doi: 10.1016/j.est.2020.102180.
- [21] A. Fletcher, T. Somorin, and O. Aladeokin, “Production of High Surface Area Activated Carbon from Peanut Shell by Chemical Activation with Zinc Chloride: Optimisation and Characterization,” *Bioenergy Res.*, vol. 17, no. 1, pp. 467–478, 2024, doi: 10.1007/s12155-023-10683-7.
- [22] E. Arslanoğlu, M. Ş. A. Eren, H. Arslanoğlu, and H. Çiftçi, “Fabrication, characterization, and adsorption applications of low-cost hybride activated carbons from peanut shell-vinasse mixtures by one-step pyrolysis,” *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 13, no. 3, pp. 2321–2335, 2023, doi: 10.1007/s13399-021-01400-5.