

Perbandingan larutan elektrolit H₂SO₄ dan KOH pada kinerja elektrokimia bahan elektroda berbasis karbon aktif sabut kelapa muda

Comparison of H₂SO₄ and KOH aqueous electrolyte on the electrochemical performance of electrode material based young coconut coir activated carbon

Awitdrus*, Zurya Hanifa, Agustino, Erman Taer, dan Rakhmawati Farma

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Riau

Jl. H.R Soebrantas Km. 12,5 Simpang Baru, Pekanbaru, Indonesia

* e-mail: awitdrus@lecturer.unri.ac.id

**INFO ARTIKEL****Sejarah artikel:**

Diterima :

16 Agustus 2021

Direvisi :

09 Juni 2022

Diterbitkan :

30 Juni 2022

Kata kunci:

bahan elektroda;
elektrolit berair;
karbon aktif;
sabut kelapa muda;
super kapasitor.

ABSTRAK

Selama beberapa tahun terakhir, pemanfaatan karbon aktif berbasis biomassa untuk elektroda superkapasitor telah mendapat perhatian luas karena ketersediaannya, lebih murah, dan sifat elektrokimia yang baik. Bahan elektroda untuk perangkat superkapasitor dibuat menggunakan karbon aktif sabut kelapa muda melalui proses aktivasi kimia dan fisika. Dalam penelitian ini, perbandingan kinerja elektrokimia elektroda berbasis sabut kelapa muda (SKM) dalam elektrolit berair 1 M H₂SO₄ dan 1 M KOH dievaluasi. Berdasarkan pola XRD, elektroda SKM yang disiapkan menunjukkan struktur amorf. Hasil penelitian menunjukkan bahwa elektroda SKM memiliki kapasitansi spesifik masing-masing 152 F/g dalam 1 M H₂SO₄ dan 102 F/g dalam 1 M KOH pada laju pemindaian 1 mV/s. Hasil ini menunjukkan bahwa karbon aktif sabut kelapa muda merupakan kandidat yang menjanjikan sebagai bahan elektroda untuk perangkat superkapasitor.

ABSTRACT

Over the past few years, exploiting biomass-based activated carbon for supercapacitor electrode has gained widespread attention due to their availability, less expensive, and good electrochemical properties. The electrode materials for supercapacitors devices were fabricated using young coconut coir-based activated carbon via chemical and physical activations process. In this study, a comparison of electrochemical performances of the young coconut coir (SKM) electrode in 1 M H₂SO₄ and 1 M KOH aqueous electrolyte was evaluated. Based on the XRD pattern, the prepared SKM electrodes present amorphous structure. The results showed that the SKM electrode had a specific capacitance of 152 F/g in 1 M H₂SO₄ and 102 F/g in 1 M KOH at scan rate of 1 mV/s, respectively. These result showed that the young coconut coir-based activated carbon is promising candidate as electrode materials for supercapacitor devices.

© 2022 Penulis. Dipublikasikan oleh Baristand Industri Padang. Akses terbuka dibawah lisensi CC BY-NC-SA

1. Pendahuluan

Dewasa ini, fokus utama para peneliti dalam pengembangan perangkat penyimpanan energi hijau (*green energy*) dan berkelanjutan adalah untuk mengatasi masalah lingkungan, krisis energi dan pembangunan pedesaan. Aplikasi penyimpanan energi saat ini umumnya memanfaatkan baterai lithium-ion dan

superkapasitor sebagai kandidat utama untuk piranti penyimpanan energi (Thomas *et al.*, 2021).

Superkapasitor dengan rapat daya yang tinggi, pengisian daya cepat, dan siklus hidup yang panjang, membuatnya lebih menarik untuk aplikasi penyimpanan energi dibandingkan dengan baterai lithium-ion yang memiliki rapat energi yang tinggi, tetapi memiliki rapat daya yang rendah dan siklus hidup yang pendek (Thomas *et al.*, 2021; Winter and Brodd, 2004).

Berdasarkan mekanisme penyimpanan energinya, superkapasitor dapat diklasifikasikan ke dalam kapasitor elektrokimia dua lapisan (KEDL) dan kapasitor pseudo (*pseudocapacitors*) (Simon and Gogotsi, 2008). KEDL, penyimpanan energi berdasarkan interaksi elektrostatis nonfaradaik pada permukaan elektroda/elektrolit, sedangkan kapasitor *pseudo* mekanisme penyimpanan energinya berdasarkan pada reaksi redoks faraday (Shao et al., 2018; Simon and Gogotsi, 2008).

Saat ini, penggunaan bahan karbon berbasis limbah biomassa untuk piranti penyimpanan energi, khususnya superkapasitor, telah mendapat perhatian besar. Kinerja dari piranti ini sebagian besar tergantung pada desain dan pengembangan bahan karbon yang digunakan sebagai material elektroda. Material elektroda superkapasitor dapat dianggap ideal ketika mikrostrukturnya berisi pori-pori dalam ukuran yang berbeda, yaitu (i) makropori (>50 nm) yang bertindak sebagai reservoir buffer ion, (ii) mesopori (2-50 nm) untuk transportasi ion, dan (iii) mikropori (<2 nm) yang meningkatkan penyimpanan pengisian (Zhi et al., 2013).

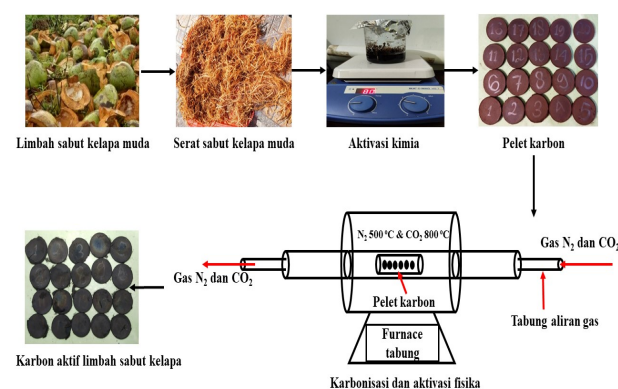
Selain biaya produksi yang rendah, bahan karbon yang diturunkan dari limbah biomassa telah digunakan sebagai bahan yang menjanjikan untuk material elektroda superkapasitor karena reversibilitasnya (Shatla et al., 2020), luas permukaan spesifik yang relatif besar (Barnes et al., 2020), stabilitas luar biasa (Kennedy et al., 2018), dan konduktivitas yang superior (Chen et al., 2018). Awitdrus et al., 2021 telah berhasil mengkonversi limbah biomassa pelepah aren menjadi karbon aktif sebagai material elektroda superkapasitor dan didapatkan kapasitansi spesifik sebesar 130 F/g (Awitdrus et al., 2021). Selain itu, Taer et al., 2021a juga telah mendapatkan kapasitansi spesifik sebesar 168 F/g dari konversi limbah biomassa daun jati sebagai material elektroda dengan mengaplikasikan variasi suhu aktivasi CO_2 (Taer et al., 2021a).

Pada penelitian ini, kami melaporkan konversi limbah biomassa sabut kelapa muda sebagai bahan baku pembuatan karbon aktif dan aplikasinya sebagai material elektroda superkapasitor. Penggunaan limbah sabut kelapa muda pada penelitian ini dikarenakan banyaknya limbah yang dihasilkan dari penjualan es kelapa muda dan belum adanya pemanfaatan terhadap limbah tersebut serta dibiarkan menumpuk begitu saja. Oleh karena itu, limbah tersebut kami manfaatkan sebagai bahan baku pada pembuatan karbon aktif sebagai bahan elektroda pada piranti superkapasitor. Sejauh pengetahuan kami, penelitian terkait penggunaan limbah biomassa sabut kelapa muda sebagai bahan baku pembuatan karbon aktif dan aplikasinya sebagai material elektroda superkapasitor belum pernah dilaporkan dimanapun. Kinerja elektrokimia material elektroda dievaluasi menggunakan metode *cyclic voltammetry* dalam sistem dua elektroda menggunakan larutan elektrolit 1 M KOH dan 1 M H_2SO_4 . Larutan 1 M H_2SO_4 menunjukkan kinerja elektrokimia yang lebih baik dan unggul dibandingkan 1 M KOH dengan kapasitansi spesifik sebesar 152 F/g. Material elektroda berbasis limbah biomassa sabut kelapa muda menunjukkan kandidat yang menjanjikan untuk pengembangan piranti penyimpanan energi khususnya piranti superkapasitor di masa depan.

2. Metode

2.1. Preparasi sampel

Limbah sabut kelapa diperoleh dan dikumpulkan dari penjual es kelapa muda di sekitar lingkungan kampus Universitas Riau, Pekanbaru dan sekitarnya. Sabut kelapa dipotong-potong dan dijemur di bawah sinar matahari selama 2 hari dan dilanjutkan dengan pra-karbonisasi. Hasil pra-karbonisasi kemudian dihaluskan menggunakan mesin *ballmilling* untuk mendapatkan partikel halus (<53 mikron) dan dilanjutkan dengan pengayakan. KOH dengan konsentrasi 0,5 M dan 10 g karbon dicampurkan ke dalam 50 mL air suling, dan dipanaskan dalam *hot plate stirrer* pada suhu 80°C. Setelah suhu turun secara alami hingga suhu kamar (28-30°C), sampel teraktivasi dikeringkan pada suhu 110°C selama 48 jam. Selanjutnya, sampel teraktivasi dicetak menjadi bentuk pelet menggunakan *hydraulic press* dengan tekanan 7 metrik ton. Pelet kemudian dipirolisis dalam lingkungan gas N_2 pada suhu 500°C dan CO_2 pada suhu 800°C selama 1 jam 30 menit. Akhirnya, pelet dicuci hingga pH netral dan dilanjutkan dengan pengeringan pada suhu 110°C selama 48 jam. Ilustrasi skema pembuatan elektroda karbon dari limbah sabut kelapa muda ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Ilustrasi skema pembuatan elektroda karbon

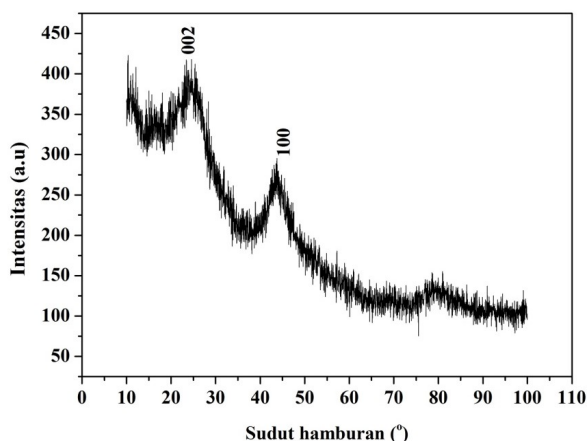
2.2. Karakterisasi

Difraksi sinar-X (XRD, *X-pert powder analytical*) dan *Fourier Transform Infrared (IRPrestige-21, Shimadzu serial no. A210048 02656)* digunakan untuk mengkarakterisasi struktur kristalinitas dan gugus fungsi dari elektroda sabut kelapa muda (SKM). Kinerja elektrokimia elektroda SKM dievaluasi dengan metode *cyclic voltammetry* (*Physics CV UR Rad-Er 5841*) dalam larutan elektrolit 1 M H_2SO_4 dan 1 M KOH dengan konfigurasi dua elektroda.

3. Hasil dan pembahasan

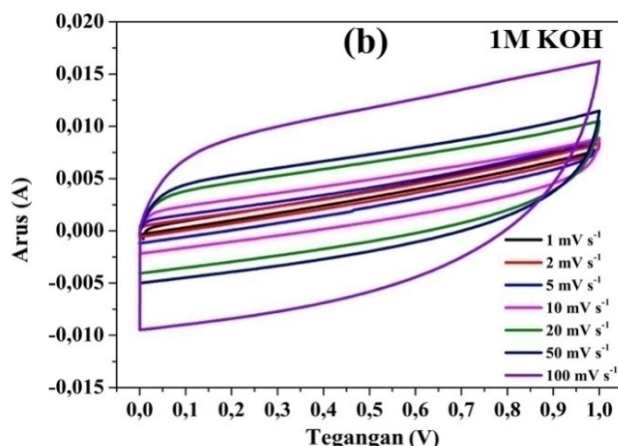
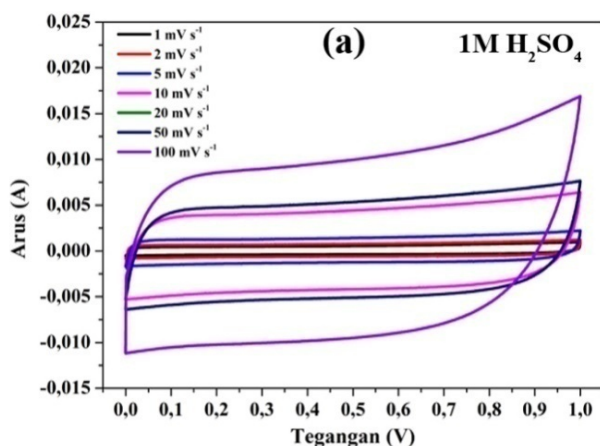
Pola difraksi sinar-X (XRD) diukur menggunakan difraktometer *X-pert powder analytical* dengan bantuan sumber radiasi sinar $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 0.154$ nm) pada temperatur ruang. Pola difraksi elektroda dari sampel SKM pada rentang sudut hamburan (2θ) 10° - 100° ditampilkan pada Gambar 2. Terlihat bahwa, elektroda SKM memiliki struktur amorfus atau semikristal, yang

diperkuat dengan kehadiran dua puncak yang landai pada sudut 2 θ 22° dan 43°, kedua puncak ini bersesuaian dengan bidang hkl (002) dan (100).



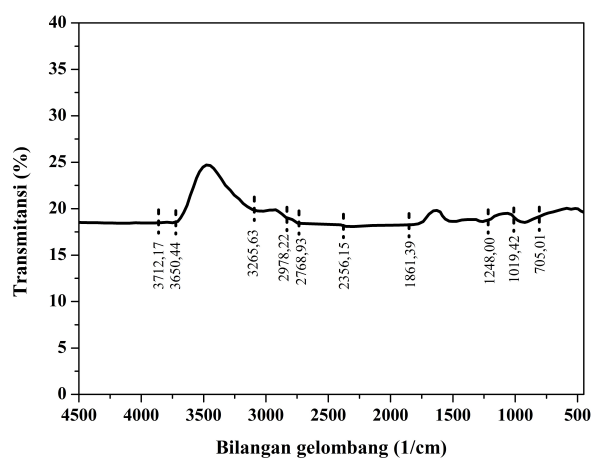
Gambar 2. Pola XRD elektroda SKM

Karakterisasi menggunakan spektroskopi *Fourier Transform-Infrared* (FTIR) bertujuan mengidentifikasi gugus fungsi yang terdapat pada permukaan elektroda SKM. Gambar 3 menampilkan kurva spektrum FTIR elektroda SKM. Kurva tersebut menunjukkan hubungan antara transmittansi (%T) terhadap bilangan gelombang (1/cm). Sebagian permukaan dari elektroda SKM mengandung sejumlah oksigen dan komposisi kimia lainnya. Dalam gugus fungsi spektroskopi FTIR dapat menunjukkan spektrum dasar karbon aktif, terutama untuk penentuan jenis dan intensitas dari kelompok fungsional permukaan karbon aktif itu sendiri. Pada bilangan gelombang 3712,17-3650,44 1/cm menunjukkan adanya pita serapan O-H *stretching* dari gugus hidroksil (Sim *et al.*, 2015; Zhu *et al.*, 2018). Serapan pada bilangan gelombang 2978,22 1/cm dan 705,01 1/cm menunjukkan adanya pita serapan C-H *stretching* dari gugus metil (Reddy *et al.*, 2018; M. Yu *et al.*, 2017). Bilangan gelombang pada 2356,15 1/cm menunjukkan adanya pita serapan CO₂ dan pada bilangan gelombang 1861,391/cm menunjukkan adanya pita serapan C≡C.



Gambar 4. Kurva CV elektroda SKM (a) dalam elektrolit 1 M H₂SO₄ dan (b) dalam elektrolit 1 M KOH

Serapan yang terjadi pada bilangan gelombang 1248,00-1019,42 1/cm menunjukkan adanya pita serapan C-O dari gugus asam karboksilat. Hasil ini hampir sama dengan elektroda superkapasitor berbasis batang *Scleria sumatrensis* (Taer *et al.*, 2021b).



Gambar 3. Spektrum FTIR elektroda SKM

Metode *cyclic voltammetry* dengan konfigurasi dua elektroda dalam larutan elektrolit 1 M H₂SO₄ dan 1 M KOH dengan beda potensial 0-1 V. Gambar 4 menampilkan kurva CV pad laju pemindaian yang berbeda (1, 2, 5, 10, 20, 50 dan 100 mV/s) dari elektroda SKM. Kedua kurva CV menampilkan bentuk hampir menyerupai persegi panjang tanpa adanya kehadiran puncak redoks, yang identik dengan lapisan ganda dari bahan elektroda berbasis limbah biomassa (González *et al.*, 2016). Kapasitansi spesifik elektroda SKM dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

$$C_{sp} = \frac{2I}{s \Delta m}$$

Dimana C_{sp} , I , s , dan m masing-masing adalah kapasitansi spesifik (F/g), arus (A), laju pemindaian (mV/s) dan massa elektroda (g).

Di antara kedua larutan elektrolit yang digunakan, elektroda SKM dalam elektrolit 1 M H_2SO_4 memiliki kapasitansi spesifik tertinggi 152 F/g pada laju pemindaian 1 mV/s. Tabel 1 menunjukkan nilai kapasitansi spesifik yang diperoleh untuk setiap larutan elektrolit dari kurva CV pada laju pemindaian yang berbeda.

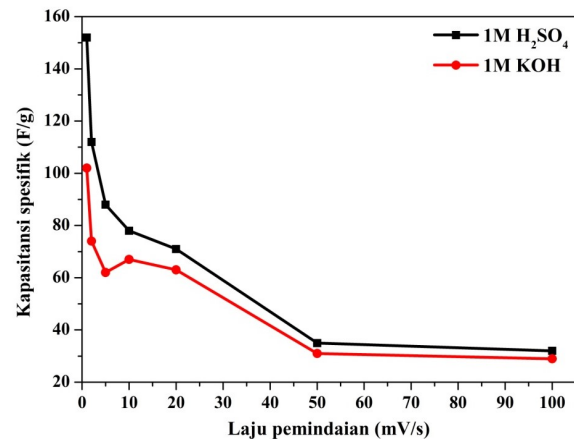
Tabel 1

Kapasitansi spesifik yang dihitung dari kurva CV pada laju pemindaian yang berbeda.

Laju pemindaian (mV/s)	Kapasitansi spesifik (F/g)	
	1 M H_2SO_4	1 M KOH
1	152	102
2	112	74
5	88	62
10	78	67
20	71	63
50	35	31
100	32	29

Kurva kapasitansi spesifik elektroda SKM vs. laju pemindaian ditunjukkan pada Gambar 5. Kapasitansi spesifik meningkat untuk kedua elektrolit dengan penurunan laju pemindaian. Hal ini dikarenakan pada laju pemindaian yang lebih rendah, ion-ion dari elektrolit mendapatkan waktu yang cukup untuk mengakses permukaan dalam dan luar bahan elektroda yang menghasilkan akumulasi ion dalam jumlah yang besar pada elektroda yang secara signifikan meningkatkan kapasitansi spesifik (Saha et al., 2019). Sedangkan pada laju pemindaian yang tinggi, aksesibilitas difusi yang buruk untuk ion elektrolit pada pori elektroda menyebabkan kapasitansi spesifik menurun. Lebih lanjut lagi, perbedaan nilai kapasitansi spesifik elektroda SKM dalam larutan elektrolit 1 M H_2SO_4 dan 1 M KOH dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti jari-jari ionik terhidrasi, mobilitas ionik, dan konduktivitas ionik molar. Jari-jari ionik terhidrasi ion H^+ dan K^+ masing-

masing dalam larutan elektrolit H_2SO_4 dan KOH, yaitu 0,28 nm dan 0,331 nm (Kiriukhin and Collins, 2002; Nightingale, 1959). Selain itu, konduktivitas ionik molar masing-masing ion dalam elektrolit ini juga berbeda. Konduktivitas ionik H^+ dalam H_2SO_4 adalah 350,1 $\text{S cm}^2/\text{mol}$ dan K^+ dalam KOH adalah 73,5 $\text{S cm}^2/\text{mol}$, (Burke, 2007; A. Yu et al., 2017). Elektrolit H_2SO_4 memiliki jari-jari ionik terhidrasi yang rendah, mobilitas dan konduktivitas ionik yang tinggi, sehingga menghasilkan kapasitansi spesifik yang tinggi pada elektroda SKM.



Gambar 5. Kapasitansi spesifik vs. laju pemindaian untuk kedua jenis larutan elektrolit

Perbandingan kapasitansi elektroda dari limbah sabut kelapa dengan dengan bahan elektroda berbasis bahan biomassa lain yang telah dilaporkan sebelumnya secara lengkap ditampilkan pada Tabel 2. Berdasarkan Tabel 2, elektroda SKM menunjukkan kapasitansi spesifik yang relatif lebih tinggi dibandingkan kapasitansi spesifik elektroda yang dibuat dari rumput purun tikus, cangkang kelapa sawit, cangkang buah ketapang, ampas teh, kulit buah kakao dan lain-lain.

Tabel 2

Perbandingan kapasitansi spesifik elektroda SKM dengan penelitian lain yang telah dilaporkan sebelumnya berbasis limbah biomassa

Biomassa	Elektrolit	Kapasitansi spesifik (F/g)	Referensi
Rumput purun tikus	1 M H_2SO_4	58	(Zulkifli et al., 2018)
Cangkang buah ketapang	1 M H_2SO_4	125	(Joni et al., 2020)
Serat daun nanas	1 M H_2SO_4	110	(A. Agustino et al., 2020)
Cangkang kelapa sawit	1 M H_2SO_4	99	(Perdana et al., 2020)
Ampas teh	1 M H_2SO_4	67	(Mossfika et al., 2020)
Kulit buah kakao	1 M H_2SO_4	90	(Yetri et al., 2020)
Daun nanas	6 M KOH	127	(Agustino et al., 2020)
Batang jagung	1 M H_2SO_4	109	(Awitdrus et al., 2018)
Pelepah aren	1 M H_2SO_4	130	(Awitdrus et al., 2021)
Sabut kelapa muda	1 M H_2SO_4	152	Penelitian ini
	1 M KOH	102	

4. Kesimpulan

Elektroda SKM telah berhasil dibuat dan dibandingkan kinerja elektrokimianya menggunakan larutan elektrolit berair 1 M H₂SO₄ dan 1 M KOH sebagai bahan elektroda untuk superkapasitor. Pola XRD elektroda SKM menunjukkan struktur amorf. Elektroda SKM berdasarkan data FT-IR memiliki gugus fungsi C-H, O-H, CO₂ dan C-O. Kapasitansi spesifik elektroda SKM dalam 1 M H₂SO₄ dan 1 M KOH pada laju pemindaian 1 mV/s masing-masing sebesar 152 F/g dan 102 F/g. Hasil ini menunjukkan bahwa bahan elektroda yang terbuat dari sabut kelapa muda menunjukkan kandidat yang bagus untuk digunakan sebagai bahan elektroda superkapasitor.

Ucapan terima kasih

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada LPPM Universitas Riau atas dukungan finansial yang diberikan melalui hibah penelitian bidang ilmu tahun 2021 (no. kontrak: 662/UN.19.5.1.3/PT.01.03/2021).

Daftar pustaka

- Agustino, A., Awitdrus, A., Farma, R., Taer, E., 2020. Pembuatan dan karakterisasi elektroda karbon aktif dari serat daun nanas untuk aplikasi superkapasitor. *J. Aceh Phys. Soc.* 9, 1–8. <https://doi.org/10.24815/jacps.v9i1.14895>
- Agustino, Awitdrus, Amri, A., Taslim, R., Taer, E., 2020. The physical and electrochemical properties of activated carbon electrode derived from pineapple leaf waste for supercapacitor applications. *J. Phys. Conf. Ser.* 1655, 012008-1-012008–7. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1655/1/012008>
- Awitdrus, Juliani, R., Taer, E., Farma, R., Iwantono, Deraman, M., 2018. Supercapacitor electrodes based on corn stalk binderless activated carbon. *J. Phys. Conf. Ser.* 1120, 012005-1-012005–7. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1120/1/012005>
- 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. *J. Phys. Conf. Ser.* 1951, 012009-1-012009–7. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1951/1/012009>
- Barnes, P., Smith, K., Parrish, R., Jones, C., Skinner, P., Storch, E., White, Q., Deng, C., Karsann, D., Lau, M.L., Dumais, J.J., Dufek, E.J., Xiong, H., 2020. A non-aqueous sodium hexafluorophosphate-based electrolyte degradation study: Formation and mitigation of hydrofluoric acid. *J. Power Sources* 447, 227363. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227363>
- Burke, A., 2007. R&D considerations for the performance and application of electrochemical capacitors. *Electrochim. Acta* 53, 1083–1091. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.01.011>
- Chen, J., Fang, K., Chen, Q., Xu, J., Wong, C.P., 2018. Integrated paper electrodes derived from cotton stalks for high-performance flexible supercapacitors. *Nano Energy* 53, 337–344. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.08.056>
- González, A., Goikolea, E., Barrena, J.A., Mysyk, R., 2016. Review on supercapacitors: Technologies and materials. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 58, 1189–1206. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.249>
- Joni, R., Syukri, S., Aziz, H., 2020. Study of activated carbon characteristic from ketaping fruit shell (*Terminalia Catappa*) as supercapacitors electrode. *J. Aceh Phys. Soc.* 10, 1–6. <https://doi.org/10.24815/jacps.v10i1.17755>
- Kennedy, L.J., Ratnaji, T., Konikkara, N., Vijaya, J.J., 2018. Value added porous carbon from leather wastes as potential supercapacitor electrode using neutral electrolyte. *J. Clean. Prod.* 197, 930–936. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.244>
- Kiriukhin, M.Y., Collins, K.D., 2002. Dynamic hydration numbers for biologically important ions. *Biophys. Chem.* 99, 155–168. [https://doi.org/10.1016/S0301-4622\(02\)00153-9](https://doi.org/10.1016/S0301-4622(02)00153-9)
- Mossfika, E., Syukri, S., Aziz, H., 2020. Preparation of activated carbon from tea waste by naoh activation as a supercapacitor material. *J. Aceh Phys. Soc.* 9, 42–47. <https://doi.org/10.24815/jacps.v9i2.15905>
- Nightingale, E.R., 1959. Phenomenological theory of ion solvation. Effective radii of hydrated ions. *J. Phys. Chem.* 63, 1381–1387. <https://doi.org/10.1021/j150579a011>
- Perdana, Y.Z., Joni, R., Emriadi, Aziz, H., 2020. Pengaruh aktivator koh terhadap kinerja karbon aktif dari cangkang kelapa sawit sebagai bahan elektroda superkapasitor. *J. Aceh Phys. Soc.* 9, 13–19.
- Reddy, K.O., Maheswari, C.U., Dhlamini, M.S., Mothudi, B.M., Kommula, V.P., Zhang, Jinming, Zhang, Jun, Rajulu, A.V., 2018. Extraction and characterization of cellulose single fibers from native african napier grass. *Carbohydr. Polym.* 188, 85–91. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.01.110>
- Saha, S., Maji, P., Pethsangave, D.A., Roy, A., Ray, A., Some, S., Das, S., 2019. Effect of morphological ordering on the electrochemical performance of MnO₂-Graphene oxide composite. *Electrochim. Acta* 317, 199–210. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.05.148>
- Shao, Y., El-Kady, M.F., Sun, J., Li, Y., Zhang, Q., Zhu, M., Wang, H., Dunn, B., Kaner, R.B., 2018. Design and mechanisms of asymmetric supercapacitors. *Chem. Rev.* 118, 9233–9280. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00252>
- Shatla, A.S., Abd-El-Latif, A.A., Ayata, S., Demir, D., Baltruschat, H., 2020. Iodide adsorption at Au(111) electrode in non-aqueous electrolyte: AC-voltammetry and EIS studies. *Electrochim. Acta* 334, 135556. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.135556>
- Sim, C.K., Majid, S.R., Mahmood, N.Z., 2015. Electrochemical performance of activated carbon derived from treated food-waste. *Int. J. Electrochem. Sci.* 10, 10157–10172.
- Simon, P., Gogotsi, Y., 2008. Materials for electrochemical capacitors. *Nat. Mater.* 7, 845–854. <https://doi.org/10.1038/nmat2297>
- Taer, E., Melisa, M., Agustino, A., Taslim, R., Sinta, W., Apriwandi, A., 2021a. Biomass-based activated

- carbon monolith from *Tectona grandis* leaf as supercapacitor electrode materials. *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.* 00, 1–12. <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1950871>
- Taer, E., Tsalis, M.A.A., Apriwandi, Yanti, N., Awitdrus, Lazuardi, Taslim, R., 2021b. Porous activated carbon binder-free *Scleria sumatrensis* stem-based for supercapacitor application. *J. Phys. Conf. Ser.* 2049, 0–11. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2049/1/012008>
- Thomas, B., Geng, S., Sain, M., Oksman, K., 2021. Hetero-porous, high-surface area green carbon aerogels for the next-generation energy storage applications. *Nanomaterials* 11, 1–19. <https://doi.org/10.3390/nano11030653>
- Winter, M., Brodd, R.J., 2004. What are batteries, fuel cells, and supercapacitors? *Chem. Rev.* 104, 4245–4269. <https://doi.org/10.1021/cr020730k>
- Yetri, Y., Mursida, Dahlan, D., Taer, E., Agustino, Muldarisnur, 2020. Identification of cacao peels potential as a basic of electrodes environmental friendly supercapacitors. *Key Eng. Mater.* 846 KEM, 274–281. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.846.274>
- Yu, A., Chabot, V., Zhang, J., 2017. *Electrochemical supercapacitors for energy storage and delivery: Fundamentals and applications, Electrochemical Supercapacitors for Energy Storage and Delivery: Fundamentals and Applications.* CRC Press, Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/b14671>
- Yu, M., Li, J., Wang, L., 2017. KOH-activated carbon aerogels derived from sodium carboxymethyl cellulose for high-performance supercapacitors and dye adsorption. *Chem. Eng. J.* 310, 300–306. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.10.121>
- Zhi, M., Xiang, C., Li, J., Li, M., Wu, N., 2013. Nanostructured carbon-metal oxide composite electrodes for supercapacitors: A review. *Nanoscale* 5, 72–88. <https://doi.org/10.1039/c2nr32040a>
- Zhu, X., Yu, S., Xu, K., Zhang, Y., Zhang, L., Lou, G., Wu, Y., Zhu, E., Chen, H., Shen, Z., Bao, B., Fu, S., 2018. Sustainable activated carbons from dead ginkgo leaves for supercapacitor electrode active materials. *Chem. Eng. Sci.* 181, 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.02.004>
- Zulkifli, Awitdrus, Taer, E., 2018. Studi awal pemanfaatan purun tikus sebagai elektroda superkapasitor menggunakan aktivasi uap air. *J. Aceh Phys. Soc.* 7, 30–34.