

Modifikasi Karbon Aktif dengan Aktivasi Kimia dan Fisika Menjadi Elektroda Superkapasitor

Adhi Prayogatama^{1*}, Nuryoto², Teguh Kurniawan³ 

^{1,2,3} Magister Teknik Kimia, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa Cilegon, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received December 29, 2021

Revised January 05, 2022

Accepted March 24, 2022

Available online April 25, 2022

Kata Kunci:

Karbon Aktif, Aktivasi, Elektrolit, Superkapasitor

Keywords:

Active Carbon, Activation, Electrolytes, Supercapacitors



This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

Copyright © 2022 by Author. Published by Universitas Pendidikan Ganesha.

ABSTRAK

Keterbatasan akan sumber energi dan hilangnya energi selama pemakaian menjadi salah satu kasus yang sering dijumpai dalam kehidupan sehari-hari di masyarakat. Selain itu, penggunaan listrik nasional pada sektor teknologi dan industri terus mengalami peningkatan dari tahun ke tahun, sehingga perlu pemikiran lebih lanjut untuk melakukan tindakan efisiensi energi. Tujuan penelitian ini modifikasi karbon aktif dengan aktivasi kimia dan fisika menjadi elektroda superkapasitor. Jenis penelitian ini merupakan penelitian review. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bahan pembuatan elektroda superkapasitor beragam seperti karbon aktif yang terbuat dari proses karbonisasi dan aktivasi secara kimia fisika. Proses aktivasi pada bahan hasil karbonisasi dimaksudkan untuk memberikan kemampuan yang lebih baik untuk meningkatkan luas permukaan dan kapasitansi spesifik elektroda. Selain itu, besarnya konsentrasi aktivator yang digunakan juga dapat memengaruhi nilai kapasitansi spesifik. Maka, kinerja dari karbon aktif sebagai elektroda superkapasitor dipengaruhi oleh beberapa faktor di antaranya temperatur karbonisasi, metode aktivasi, konsentrasi aktivator, temperatur aktivasi, dan jenis bahan yang digunakan.

ABSTRACT

The limitations of energy sources, and the loss of energy during use is one of the cases that is often encountered in everyday life in society. In addition, the use of national electricity in the technology and industrial sectors continues to increase from year to year, so further thinking is needed to take energy efficiency measures. The purpose of this research is to modify activated carbon by chemical and physical activation into supercapacitor electrodes. This type of research is a review research. The results of the research show that the materials for making supercapacitor electrodes are varied, such as activated carbon, which is made from a carbonization process and chemical-physical activation. The activation process on the carbonized material is intended to provide a better ability to increase the surface area and specific capacitance of the electrodes, besides that the concentration of the activator used can also affect the value of the specific capacitance. Thus, the performance of activated carbon as a supercapacitor electrode is influenced by several factors including carbonization temperature, activation method, activator concentration, activation temperature and the type of material used.

1. PENDAHULUAN

Energi listrik telah menjadi kebutuhan pokok masyarakat dunia dan telah membawa pengaruh besar pada hampir seluruh sektor kehidupan. Kebutuhan energi di Indonesia yang masih bergantung pada bahan bakar fosil seperti minyak bumi, batubara, dan gas bumi sebagai sumber energi listrik telah berpengaruh pada dampak terhadap pencemaran udara dan akan berdampak terhadap mutu kehidupan dan kesehatan masyarakat (Hermansyah Aziz et al., 2017; Hardi et al., 2020). Kebutuhan energi di Indonesia juga terus mengalami peningkatan seiring dengan aktivitas ekonomi pada sektor industri, transportasi, komersial, dan rumah tangga. Kebutuhan energi yang semakin besar tersebut, mendorong hadirnya berbagai energi alternatif dalam memecahkan masalah krisis energi nasional (Habibah, 2016; Sari et al., 2014). Energi listrik dapat dihasilkan dari sumber energi terbarukan seperti, matahari dan angin, akan tetapi efektivitas penggunaannya membutuhkan penyimpanan energi listrik yang efisien. Pengembangan dalam sistem penyimpanan energi listrik sangat penting untuk penyamarataan efektivitas alami siklus sumber-sumber energi (Farma & Hasibuan, 2017; Hardi et al., 2020).

Ketergantungan akan energi khususnya energi listrik menjadi salah satu masalah yang sering dijumpai dalam kehidupan masyarakat modern (F. R. Tumimomor & Palilingan, 2018). Jika mengacu kepada konsumsi listrik nasional, ternyata konsumsi listrik mengalami peningkatan dari tahun ke tahun, yaitu pada tahun 2015 sebesar 910 kWh per kapita menjadi 1084 kWh per kapita pada 2019 (ESDM, 2020).

*Corresponding author.

E-mail addresses: adhiprayogatama70@gmail.com (Adhi Prayogatama)

Sektor yang cukup besar dalam mengkomsumsi listrik adalah sektor industri, dengan persentase masing-masing adalah 18,5% industri makanan dan minuman, 18,1% petrokimia, 17,2% industri semen, 17% industri tekstil, dan 9,7% dari industri baja serta sisanya dari sektor teknologi (Kemenperin, 2020). Dari fenomena ini memunculkan ide dan inovasi guna mengembangkan penyimpanan energi listrik pada barang elektronik yang nantinya dapat memudahkan mobilisasi dan komunikasi dalam kehidupan sehari-hari, sehingga menuntut hadirnya penyimpanan energi dengan kemampuan superkapasitor (Hermansyah Aziz et al., 2017; Kwon et al., 2014; F. Tumimomor et al., 2017). Media penyimpanan energi listrik dengan kapasitas besar seperti elektroda superkapasitor memiliki kemampuan untuk menutupi tingginya kebutuhan beban energi dalam produksi barang yang terjadi (Azizi & Radjeai, 2018).

Superkapasitor adalah jenis kapasitor elektrokimia yang mempunyai sifat kepadatan daya yang tinggi dan siklus daya yang lama (Habibah, 2016; Huang et al., 2016). Berdasarkan mekanisme penyimpanan energinya, superkapasitor terbagi menjadi electrode double layer capacitor (EDLC) dan pseudocapacitor (Kar, 2020). Superkapasitor EDLC terdiri dari beberapa susunan material di antaranya elektroda, pengumpul arus, elektrolit, dan spacer. Elektroda adalah piranti yang sangat penting dalam media penyimpanan energi berbasis superkapasitor dikarenakan dapat bereaksi secara langsung terhadap elektrolit. Bahan utama yang umum digunakan dalam pembuatan elektroda superkapasitor diantaranya karbon aktif, polimer konduksi, oksida logam / nitrida, graphene dan carbon nanotube (Hermansyah Aziz et al., 2017; Farzana et al., 2018). Bahan elektroda dari karbon aktif masih menjadi pilihan bila dibandingkan dengan bahan lain dikarenakan ketersediaan dari bahan jenis ini masih mudah untuk didapatkan, tidak memerlukan biaya yang mahal, memiliki permukaan tinggi, nilai konduktivitas listrik baik dan stabilitas elektrokimia yang tinggi. (K. Wang et al., 2015). Dengan memanfaatkan karbon aktif sebagai elektroda superkapasitor akan membantu menyelesaikan permasalahan dari limbah biomassa, seperti konversi biomassa sebagai bahan karbon aktif. Terdapat beberapa tahapan dalam pembuatan biomassa menjadi karbon aktif, yaitu karbonisasi hidrotermal, aktivasi secara fisik dan kimia (J. Wang et al., 2020).

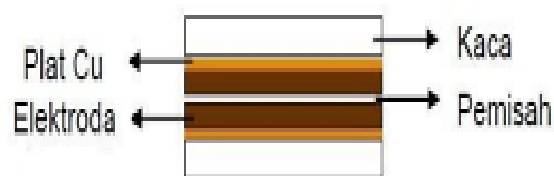
Perlakuan aktivasi kimia dan fisika dalam menghasilkan karbon aktif bertujuan untuk meningkatkan peforma elektrokimia dari elektroda superkapasitor, yang mana dengan aktivasi karbon dapat memperbesar struktur pori, luas permukaan dan kandungan senyawa kimia dari karbon aktif (Faraji & Ani, 2015; Suryani et al., 2018). Beberapa hasil penelitian yang menunjukkan adanya peningkatan kadar pengaktifan (aktivator) kimia dalam meningkatkan nilai kapasitansi (Taer et al., 2016). Pemilihan jenis biomassa juga akan mempengaruhi karakterisasi dari karbon aktif yang dimana sangat erat kaitannya terhadap peningkatan kapasitansi elektroda superkapasitor, seperti karbon aktif dari limbah cangkang kelapa sawit yang menunjukkan bentuk amorf dengan kapasitansi spesifik sebesar 99,151 F/g (Alif et al., 2017a). Bila dibandingkan dengan karbon aktif jenis kristalin dari bahan arang serabut kelapa sawit yang lebih besar kapasitansinya, yaitu 149,627 F/g (Farma & Hasibuan, 2017). Penggunaan variasi konsentrasi dari aktivator juga harus diperhatikan. Tingginya konsentrasi yang diberikan akan berdampak pada nilai kapasitansi spesifik yang dihasilkan (P. Kurniawan et al., 2018). Hal ini sangat berbanding lurus dengan penelitian yang dilakukan (H Aziz et al., 2017) yang menyatakan bahwa semakin tinggi konsentrasi larutan elektrolit H₃PO₄ maka akan dapat meningkatkan nilai kapasitansi spesifik, namun ketika konsentrasi H₃PO₄ lebih dari 0.3N terjadi penurunan nilai kapasitansi spesifik yang diakibatkan oleh tingginya konsentrasi larutan elektrolit sehingga menyebabkan muatan bergerak ke masing-masing elektroda.

Beberapa hasil penelitian menyatakan bahwa sifat dari bahan kimia sebagai aktivator akan memengaruhi kemampuan karbon aktif, seperti aktivator HCl yang menghasilkan nilai kapasitas adsorpsi lebih kecil dari aktivator NaOH pada konsentrasi yang sama karena proses dealuminasi yang menyebabkan struktur bahan menjadi kurang negatif (Ngapa, 2017). Selain itu, luas permukaan karbon aktif yang dihasilkan oleh penggunaan aktivator asam H₃PO₄ lebih kecil, bila dibandingkan dengan luas permukaan karbon aktif dari aktivator basa KOH, yaitu sebesar 1,352x10⁵ m²/g dan 1,435x10⁵ m²/g (Rahmadani & Kurniawati, 2017). Pemilihan KOH sebagai aktivator untuk proses aktivasi kimia pada bahan karbon dianggap sangat tepat, dikarenakan sifat basa kuat dan sifat higroskopis (menyerap uap air) yang dimilikinya (Istiqomah et al., 2016). Selain itu, KOH dapat bereaksi dengan karbon serta mampu menghilangkan zat-zat pengotor dalam karbon sehingga karbon menjadi lebih berpori (Apriani et al., 2013). Besarnya luas permukaan dan kapasitansi yang dihasilkan dari penggunaan aktivator KOH juga menjadi alasan pemilihan aktivator jenis ini, dengan luas permukaan yang dihasilkan sebesar 898,229 m²/g dan kapasitansi 107,83 F/g (Hardi et al., 2020). Bila dibandingkan dengan NaOH yang hanya menghasilkan luas permukaan sebesar 473 m²/g serta kapasitansi 67F/g (Mossfika et al., 2020). Dari beberapa penelitian di atas dinyatakan bahwa luas permukaan karbon aktif dapat memengaruhi peningkatan nilai kapasitansi suatu elektroda. Besarnya luas permukaan dipengaruhi oleh konsentrasi dan jenis aktivator yang digunakan. Tujuan penelitian ini untuk menganalisis kondisi operasi yang tepat dalam pembuatan elektroda superkapasitor, sehingga didapatkan nilai kapasitansi spesifik yang tinggi dari elektroda superkapasitor berbasis bahan karbon aktif.

2. METODE

Pembuatan bahan karbon aktif sebagai elektroda superkapasitor dilakukan dengan cara karbonisasi pada temperatur 400-900°C (Haniffudin & Diah, 2013). Pada tahapan ini didapatkan arang atau karbon dengan *moisture* 3,73%, *volatile* 5,52%, kadar abu 19,65% dan *fixed carbon* 71,55% (Rout, 2013). Menurut (Nurisman et al., 2017) semakin meningkatnya temperatur karbonisasi akan menyebabkan rendemen karbon aktif menurun, namun terdapat peningkatan kadar *fixed carbon*. Setelah dilakukan proses karbonisasi, karbon kemudian diaktivasi secara kimia dengan bantuan larutan kimia seperti senyawa asam (Jamilatun et al., 2016) atau senyawa basa (Yuliusman, 2015). Pemilihan jenis senyawa dalam proses aktivasi kimia akan berpengaruh terhadap karbon aktif yang dihasilkan, seperti pemakaian senyawa H₃PO₄ pada aktivasi karbon yang menghasilkan pori lebih banyak bila dibandingkan dengan senyawa HCl (Verayana et al., 2018). Hal ini terjadi karena pori-pori itu nantinya menjadi celah dalam memperluas permukaan karbon aktif (Nasir La Hasan ; Zakir, M; Budi, 2015). Rasio antara senyawa kimia dengan bahan karbon juga harus diperhatikan, menurut (F. R. Tumimomor & Palilingan, 2018) rasio paling baik antara aktivator dan arang adalah 3:1 selama 24 jam, dikarenakan ini dapat menjamin keberlangsungan proses difusi ke bagian pori-pori arang. Karbon yang telah melewati proses aktivasi kimia, untuk selanjutnya dilakukan aktivasi fisika pada temperatur 800°C dengan lamanya waktu 120 menit (Yuningsih et al., 2016). Proses aktivasi fisika pada karbon dimaksudkan untuk menghilangkan zat-zat pengotor yang mudah menguap, memperbesar struktur rongga dan membuang hidrokarbon pengotor pada arang (Anggraeni & Yuliana, 2015). Tahapan akhir dari proses ini adalah pencucian arang dengan aquades yang bertujuan untuk menetralkan pH, selanjutnya karbon aktif dikeringkan pada temperatur 105°C untuk mengeluarkan uap air yang terjebak di dalam pori-pori (Imelda et al., 2019).

Aplikasi karbon aktif sebagai elektroda superkapasitor. Luas area permukaan yang besar dan jarak pemisah yang sangat kecil menjadikan karbon aktif sangat tepat untuk dimodifikasi sebagai bahan elektroda superkapasitor. Pada superkapasitor umumnya terdiri dari dua elektroda yang direndam dalam larutan elektrolit atau polimer konduktif dan dipisahkan dengan bahan dielektrik sebagai separator agar mampu mencegah terjadinya *overload* muatan serta mempengaruhi kinerja superkapasitor dengan sifat listrik yang dimiliki (Syarif, 2014). Susunan material dari superkapasitor dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian Superkapasitor Metoda Plat/Sandwich

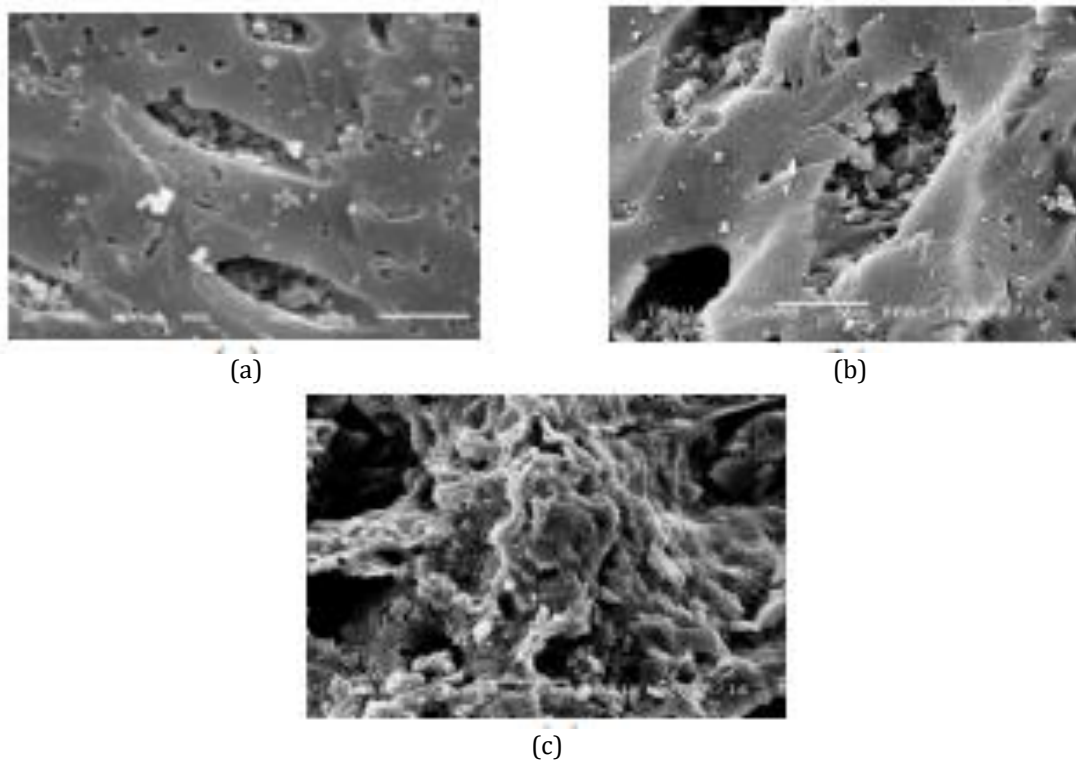
(Tetra et al., 2018)

Pada gambar 1 menunjukkan rangkaian superkapasitor yang di bentuk seperti sandwich dengan susunan material sebagai berikut, kertas batang padi dilapisi dengan karbon aktif yang dijadikan sebagai elektroda dan disusun seperti sandwich serta dipisahkan oleh separator PVA (Polivinil Alkohol) pada bagian tengah, kemudian kedua plat elektroda diapit oleh lempengan tembaga (Alif et al., 2017b). Setelah elektroda superkapasitor selesai dibuat, dilanjutkan dengan pengukuran kapasitansi untuk mengetahui kinerja dari elektroda superkapasitor dengan ditetaskan oleh larutan KOH 6M yang dilarutkan dalam etanol (Febriyanto et al., 2019).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

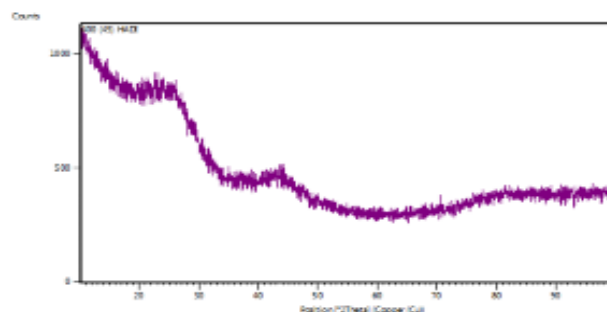
Pengujian yang dilakukan pada bahan karbon aktif sebagai elektroda superkapasitor meliputi morfologi karbon aktif dengan sistem *Scanning Electron Microscopy* (SEM), *Brunauer Emmett Teller* (BET) dan struktur karbon aktif secara analisa XRD. Pada karbon aktif terdapat beberapa ukuran pori kristalit-kristalit, seperti ukuran makropori yang memiliki diameter pori karbon aktif lebih besar dari 250Å dengan volume 0,8 ml/g dan luas permukaan spesifik 0,5 – 2 m²/g, ukuran mesopori yang memiliki diameter pori karbon aktif berkisar antara 50 – 250 Å dengan volume 0,1 ml/g dan permukaan spesifik antara 20 – 70 m²/g, serta ukuran mikropori yang memiliki diameter pori lebih kecil dari 50Å. Hasil pengujian karbon aktif menggunakan SEM bisa dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Hasil Foto SEM Karbon Aktif Perbesaran 5000x dengan Temperatur Aktivasi (a) 600°C, (b) 700°C (c) 800°C

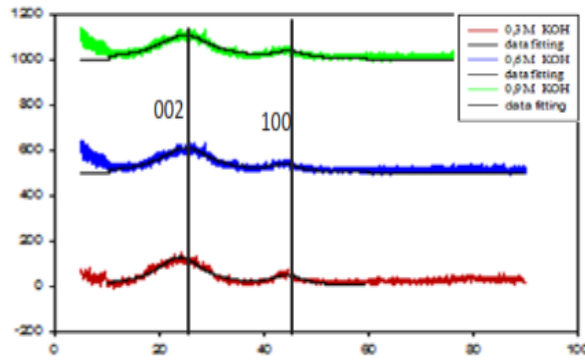
(Efendi & Astuti, 2016)

Dari Gambar 2 terlihat bahwa jumlah mesopori terbanyak terdapat pada karbon aktif dengan perlakuan aktivasi 700°C yang berjumlah 2253 pori bila dibandingkan dengan perlakuan aktivasi pada temperatur 600°C dan 800°C yang hanya berjumlah 105 pori serta 924 pori. Ini dikarenakan energi panas yang diterima lebih besar pada temperatur aktivasi 700°C, sedangkan pada temperatur 800°C terjadi penguapan yang berlebih dari aktivator. Selain itu, jenis bahan yang digunakan, temperatur karbonisasi dan temperatur aktivasi fisika sangat mempengaruhi besarnya pori dan luas permukaan yang dihasilkan dari karbon aktif. Bahan tempurung kelapa pada temperatur karbonisasi 700°C dan temperatur aktivasi 600°C adalah kondisi terbaik dalam menghasilkan jenis karbon aktif dengan jenis pori berukuran makro, yaitu sebesar 4,555 - 17,320 μm serta luas permukaan yang didapat sebesar 548,542 m^2/g . Pada pengukuran secara *X-Ray Diffraction* (XRD) bertujuan untuk memberikan gambaran struktur dari karbon aktif, seperti struktur yang didapatkan dari bahan karbon aktif cangkang kelapa sawit dengan bentuk amorf dan bentuk semikristalin dari bahan serabut tandan kosong kelapa sawit. Pola difraksi tersebut dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4.



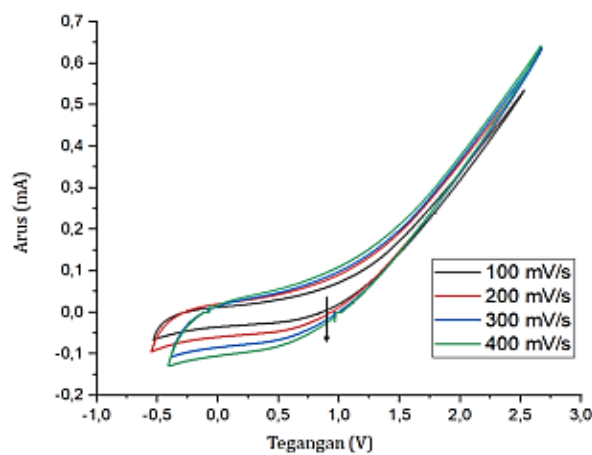
Gambar 3. Pola Difraksi Karbon Cangkang Kelapa Sawit dengan Temperatur 400°C

(Alif et al., 2017b)



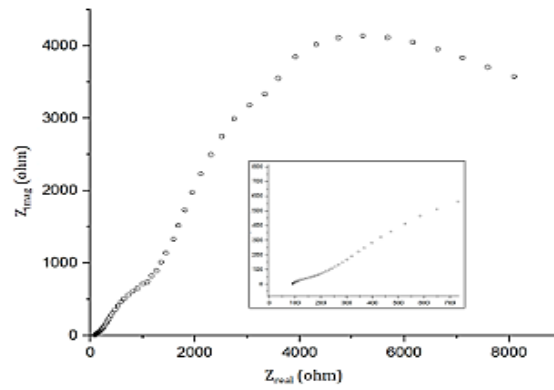
Gambar 4. Pola Diffraksi Sinar-X elektroda Karbon dengan Variasi Konsentrasi KOH (Farma & Hasibuan, 2017).

Pengukuran kapasitansi pada elektroda superkapasitor berbasis karbon aktif. Karakterisasi elektrokimia pada elektroda superkapasitor dalam menentukan kapasitansi dapat dilakukan dengan metode *Cyclic Voltammetry* (CV) dan *Electrochemical Impedance Spectrometry* (EIS) pada rentang frekuensi 0,01 – 10⁶ Hz menggunakan potensiostat Gamry Reference 3000. Dimana C_{cv} adalah kapasitansi spesifik dari uji CV (F/g), I adalah arus spontan (A), m adalah massa dari material karbon aktif yang digunakan (g), serta Δv adalah rentang tegangan (V). Hasil dari pengujian kapasitansi spesifik pada superkapasitor menggunakan elektroda karbon aktif yang diplot dalam bentuk kurva CV pada rentang 0 – 1,0 V dapat dilihat pada Gambar 5.



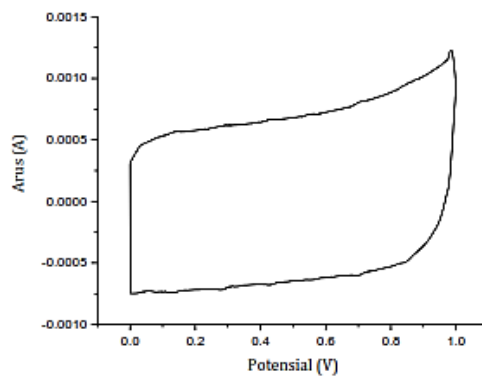
Gambar 5. Kurva CV Superkapasitor Karbon Aktif Kulit Durian (Febriyanto et al., 2019)

Dari gambar 5, kurva tidak menunjukkan bentuk persegi. Hal ini dikarenakan kapasitor jenis EDLC mempunyai tahanan ohmik yang signifikan pada pori yang menyebabkan kurva berbentuk rhomboid pada scan rate 100-400 mV/s. Area integral kurva CV menunjukkan kapasitansi dari superkapasitor dengan nilai kapasitansi spesifik yang diperoleh sebesar 18mF/g pada scan rate 400mV/s (Cai et al., 2013). Metode lain yang bisa digunakan untuk menentukan kapasitansi dari suatu elektroda superkapasitor, yaitu dengan *electrochemical impedance spectrometry* (EIS) yang diperlihatkan oleh Gambar 6.



Gambar 6. Kurva EIS Superkapasitor Karbon Aktif Kulit Durian (Febriyanto et al., 2019)

Kurva EIS menunjukkan tingginya tahanan transfer-muatan yang diplotkan ke dalam bentuk Nyquist dari data impedansi yang diperoleh. Rendahnya nilai kapasitansi spesifik diakibatkan oleh tahanan transfer muatan yang tinggi. Hal ini biasanya berhubungan dengan ukuran pori yang terlalu kecil, sehingga tidak mampu diakses oleh elektrolit KOH yang digunakan (Du et al., 2016). Selain dua metode di atas, ada metode lain dalam menentukan kapasitansi spesifik dari elektroda, yaitu dengan menggunakan kurva voltamogram yang diperlihatkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Kurva Voltamogram Siklik Sel Superkapasitor (Joni et al., 2021)

Kurva voltamogram pada gambar di atas menunjukkan hubungan antara arus (A) dan tegangan (V). arus muatan (I_c) ditunjukkan pada kurva dari tegangan 0 hingga 0,5 V, sedangkan arus luaran (I_d) ditunjukkan pada tegangan 0,5V hingga 0. Pada kurva menunjukkan bentuk rectangular yang bagus dengan bentuk simetris dan mempunyai jarak lebar sehingga menghasilkan nilai kapasitansi yang paling tinggi sebesar 125,446 F/g. Nilai kapasitansi dari elektroda superkapasitor dengan bahan karbon aktif dipengaruhi oleh beberapa faktor, di antaranya metode aktivasi, jenis aktivator, kondisi karbonisasi dan jenis elektrolit. Selain itu, tingginya luas permukaan elektroda juga dapat mempengaruhi nilai kapasitansi spesifik dari superkapasitor, dikarenakan semakin tinggi luas permukaan elektroda maka akan meningkatkan nilai dari kapasitansi spesifik sel superkapasitor. Pengukuran terhadap nilai kapasitansi elektroda superkapasitor dari berbagai jenis karbon aktif, kondisi operasi karbonisasi, dan metode aktivasi dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Kapasitansi Spesifik yang Dihasilkan terhadap Jenis Elektroda Karbon Aktif

No.	Bahan	Temperatur Karbonisasi	Metode Aktivasi	Larutan Elektrolit	Kapasitansi	Referensi
1.	Serbuk Bambu	400°C	Kimia : Senyawa KOH Fisika : Furnace Pada 800°C Selama 1 Jam	H ₂ SO ₄ 1 M.	59,50 F/g	(F. Tumimomor et al., 2017)
2.	Serabut Tandan Kosong Kelapa Sawit	600°C	Kimia : Senyawa Koh Fisika : Furnace Pada 700°C Selama 1 Jam	HCl 1 M	149,627 F/g	(Farma & Hasibuan, 2017)
3.	Ampas Tangkai Buah Lada Putih Bangka	130°C	Kimia : Senyawa H ₃ PO ₄ Fisika : Furnace Pada 700°C Selama 3 Jam	H ₂ SO ₄ 1 M	74,85 F/g.	(Megiyo et al., 2019)
4.	Kayu Karet	600°C	Kimia : Senyawa Koh Fisika : Furnace Pada 800°C Selama 1 Jam	H ₂ SO ₄ 1 M.	55,46 F/g	(Muchammad Sam et al., 2015)
5.	Serbuk Gergaji Kayu Karet	600°C	Kimia : Senyawa KOH Fisika : Furnace Pada 900°C Selama 2 Jam	HCl 1 M	55,41 F/g	(Sari et al., 2014)
6.	Serbuk Gergaji Kayu	500°C	Kimia : Senyawa KOH Fisika : Furnace Pada 850°C Selama 3 Jam	KOH 6 M	225 F/g.	(Huang et al., 2016)
7.	Kulit Durian	275°C	Kimia : Senyawa ZnCl ₂ Fisika : Furnace Pada 800°C Selama 2 Jam	KOH 6 M	18 mF/g	(Febriyanto et al., 2019)

Dari Tabel 1 dapat dianalisis bahwa kondisi operasi untuk menghasilkan elektroda dengan hasil maksimum adalah temperatur karbonisasi 850°C, aktivator KOH, dan aktivasi fisika pada temperatur 700°C serta diberi larutan elektrolit KOH 6M.

Pembahasan

Berdasarkan hasil penelitian, kondisi operasi untuk menghasilkan elektroda dengan hasil maksimum adalah temperatur karbonisasi 850°C, aktivator KOH dan aktivasi fisika pada temperatur 700°C serta diberi larutan elektrolit KOH 6M. Energi panas yang diterima pada temperatur aktivasi 700°C lebih besar sedangkan pada temperatur 800°C terjadi penguapan yang berlebih dari aktivator (Efendi & Astuti, 2016). Pemilihan KOH sebagai aktivator untuk proses aktivasi kimia juga menjadi pilihan tepat, karena sifatnya yang basa kuat higroskopis (Istiqomah et al., 2016; Simamora et al., 2020), serta KOH dapat menghilangkan zat-zat pengotor dalam karbon, sehingga pori karbon menjadi banyak (Apriani et al., 2013). Superkapasitor atau kapasitor elektrokimia lapis rangkap listrik adalah media penyimpanan energi

berbasis elektrokimia dengan proses *charging* dan *discharging* yang cepat serta memiliki kestabilan yang baik ($>10^6$ siklus) bila dibandingkan dengan baterai yang hanya >10 kWh kg^{-1} (Vangari et al., 2013). Hal ini dikarenakan material penyusun dari superkapasitor mempunyai karakterisasi yang baik, seperti luas permukaan elektroda yang besar, elektrolit yang dapat memberikan muatan ion, dan separator yang dapat membantu peningkatan kapasitansi (Haniffudin & Diah, 2013; Zhou et al., 2013). Terdapat beberapa bahan yang dapat dijadikan sebagai elektroda superkapasitor, diantaranya *template carbon* (Itoi et al., 2011), *carbon nanotubes* (McDonough et al., 2012), dan *graphene* (Zhu et al., 2011). Selain bahan itu, penggunaan bahan lain seperti karbon aktif juga telah banyak mengalami perkembangan sehingga karbon aktif menjadi bahan pilihan karena konduktivitasnya tinggi, kapasitansi yang dihasilkan tinggi, siklus hidupnya tinggi, biaya produksi yang rendah, dan ketersediaan bahannya yang melimpah (Misonon et al., 2015; Wei & Yushin, 2012).

Faktor-faktor yang memengaruhi karbon aktif sebagai elektroda superkapasitor. Karbon aktif merupakan padatan berpori yang mengandung 85-95% karbon dan memiliki luas permukaan sebesar 300-2000 m²/g (Othmer, 1978). Ada beberapa faktor yang mempengaruhi kualitas dari karbon aktif, yaitu temperatur dan waktu karbonisasi (Farma & Hasibuan, 2017; Ramadhani et al., 2020). Dengan bertambahnya temperatur dan lamanya waktu karbonisasi akan berdampak pada jumlah arang yang dihasilkan semakin sedikit, sedangkan hasil karbonisasi yang didapat menunjukkan peningkatan sehingga zat-zat yang teruapkan semakin banyak (Alif et al., 2017a; Muhammad Turmuzi & Arion Syaputra, 2015; Rawal et al., 2018). Hal ini sangat sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Hendrawan et al., 2017) yang menyatakan bahwa kadar karbon yang dihasilkan pada temperatur karbonisasi 400°C lebih besar bila dibandingkan dengan temperatur karbonisasi 300°C, yaitu sebesar 19,8917% dan 16,2947%. Akan tetapi pemilihan kondisi operasi juga harus diperhatikan, dikarenakan pada temperatur karbonisasi 500°C dan 600°C dengan bertambahnya waktu karbonisasi malah menyebabkan kadar karbon mengalami penurunan bila dibandingkan dengan kadar karbon pada temperatur karbonisasi 400°C yang semakin mengalami peningkatan. Hal ini dikarenakan terjadinya kerusakan pelat-pelat karbon akibat oksidasi yang berlebihan (Satriyani Siahaan et al., 2013). Setelah didapatkan arang atau karbon melalui proses karbonisasi, kemudian dilanjutkan dengan proses aktivasi. Terdapat tiga metode dalam proses aktivasi, yaitu aktivasi kimia, aktivasi fisika dan gabungan dari aktivasi kimia fisika (Febriyanto et al., 2019; R. Kurniawan et al., 2014). Tujuan dari proses aktivasi karbon adalah untuk memperbesar diameter pori karbon, memperluas volume dalam pori dan membuka pori-pori baru, sehingga kinerja dari karbon aktif lebih optimal (Prabarini & Okayadnya, 2014). Hal ini sesuai dengan penelitian (Alif et al., 2017b) yang menghasilkan peningkatan terhadap luas permukaan dari karbon aktif setelah dilakukan aktivasi, yaitu sebesar 27,253 m²/g dari sebelumnya tanpa aktivasi 1,829 m²/g.

Dalam proses aktivasi secara kimia ada beberapa hal yang harus diperhatikan untuk menghasilkan bahan karbon aktif yang baik, seperti waktu perendaman, konsentrasi aktivator dan ukuran bahan (Goleman et al., 2019). Menurut (Apriani et al., 2013) pemberian konsentrasi KOH yang semakin besar untuk aktivasi karbon akan meningkatkan ukuran pori yang dihasilkan. Variasi konsentrasi KOH terbaik dihasilkan oleh konsentrasi 25% dengan ukuran pori 8,277 μm bila dibandingkan dengan konsentrasi 5%, 10%, 15% dan 20% yang hanya menghasilkan pori berukuran 1,357 μm , 1,611 μm , 2,042 μm serta 4,513 μm . Selain konsentrasi aktivator, waktu perendaman juga mempengaruhi kualitas dari bahan karbon aktif yang dihasilkan. Waktu perendaman terbaik untuk proses aktivasi secara kimia adalah 22 jam karena kadar abu yang dihasilkan rendah dan kadar karbon yang dihasilkan tinggi bila dibandingkan dengan waktu perendaman 20 jam, 24 jam dan 26 jam (Suryani et al., 2018). Selain diaktivasi secara kimia, karbon aktif diaktivasi juga secara fisika dengan bantuan uap, panas maupun CO₂ (Anggraeni & Yuliana, 2015; Apriani et al., 2013). Aktivasi fisika dilakukan pada temperatur tinggi, yaitu berkisar antara 500 – 1000°C. Massa karbon aktif paling banyak dihasilkan pada temperatur 500°C sebesar 103,63 gram. Hal ini terjadi karena kandungan air dan zat organik yang belum banyak teruapkan, namun untuk perlakuan aktivasi fisika yang paling baik terjadi pada temperatur 1000°C karena kualitas karbon aktif yang dihasilkan telah memenuhi standar SNI 06-3730 (Rosita Idrus, Boni Pahlanop Lapanporo, 2013).

4. SIMPULAN

Kinerja dari karbon aktif sebagai elektroda superkapasitor dipengaruhi oleh beberapa faktor di antaranya temperatur karbonisasi, metode aktivasi, konsentrasi aktivator, temperatur aktivasi, dan jenis bahan yang digunakan. Nantinya dari kondisi ini akan berdampak pada peningkatan luas permukaan, sifat morfologi, dan diameter pori yang secara langsung memengaruhi kapasitansi yang dihasilkan. Kondisi operasi yang tepat untuk pembuatan karbon aktif sebagai elektroda superkapasitor, yaitu temperatur karbonisasi 400°C selama 1 jam, aktivator KOH dengan perendaman 22 jam, temperatur aktivasi 700°C selama 1 jam, dan penggunaan larutan elektrolit KOH 6M.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Alif, A., Tetra, O. N., Aziz, H., & Defri, H. (2017a). Pengaruh Aktivator KOH terhadap Kinerja Karbon Aktif dari Cangkang Kelapa Sawit sebagai Bahan Elektroda Superkapasitor. *Jurnal Zarah*, 5(2), 38–43. <https://doi.org/10.31629/zarah.v5i2.207>.
- Alif, A., Tetra, O. N., Aziz, H., & Defri, H. (2017b). Pengaruh Perlakuan Sokletasi dan Aktivator KOH terhadap Kinerja Karbon Aktif Cangkang Kelapa Sawit sebagai Bahan Elektroda Superkapasitor. *Jurnal Zarah*, 5(2), 38–43. <https://doi.org/10.31629/zarah.v5i2.207>.
- Anggraeni, I. S., & Yuliana, L. E. (2015). Pembuatan Karbon Aktif dari Limbah Tempurung Siwalan (*Borassus Flabellifer* L.) dengan Menggunakan Aktivator Seng Klorida ($ZnCl_2$) dan Natrium Karbonat (Na_2CO_3). In *Tugas Akhir* (pp. 1–19).
- Apriani, R., Diah Faryuni, I., Wahyuni, D., Kunci, K., Aktif, K., Durian, K., Hidroksida, K., & Fe, A. (2013). Pengaruh Konsentrasi Aktivator Kalium Hidroksida (KOH) terhadap Kualitas Karbon Aktif Kulit Durian sebagai Adsorben Logam Fe pada Air Gambut. *Prisma Fisika*, 1(2), 82–86. <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/jpfu/article/view/2931>.
- Aziz, H., Tetra, O. N., Alif, A., Syukri, & Perdana, Y. A. (2017). Performance Karbon Aktif dari Limbah Cangkang Kelapa Sawit sebagai Bahan Elektroda Superkapasitor. *Jurnal Zarah*, 5(2), 1–6. <https://doi.org/10.31629/zarah.v5i2.208>.
- Aziz, Hermansyah, Tetra, O. N., Alif, A., Syukri, S., & Perdana, Y. A. (2017). Performance Karbon Aktif dari Limbah Cangkang Kelapa Sawit sebagai Bahan Elektroda Superkapasitor. *Jurnal Zarah*, 5(2), 1–6. <https://doi.org/10.31629/zarah.v5i2.208>.
- Azizi, I., & Radjeai, H. (2018). A New Strategy for Battery and Supercapacitor Energy Management for An Urban Electric Vehicle. *Electrical Engineering*, 100(2), 667–676. <https://doi.org/10.1007/s00202-017-0535-1>.
- Cai, T., Zhou, M., Ren, D., Han, G., & Guan, S. (2013). Highly Ordered Mesoporous Phenol-Formaldehyde Carbon as Supercapacitor Electrode Material. *Journal of Power Sources*, 231, 197–202. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.12.072>.
- Du, X., Zhao, W., Ma, S., Ma, M., Qi, T., Wang, Y., & Hua, C. (2016). Effect of $ZnCl_2$ Impregnation Concentration on The Microstructure and Electrical Performance of Ramie-Based Activated Carbon Hollow Fiber. *Ionics*, 22(4), 545–553. <https://doi.org/10.1007/s11581-015-1571-3>.
- Efendi, Z., & Astuti, A. (2016). Pengaruh Suhu Aktivasi terhadap Morfologi dan Jumlah Pori Karbon Aktif Tempurung Kemiri sebagai Elektroda. *Jurnal Fisika Unand*, 5(4), 297–302. <https://doi.org/10.25077/jfu.5.4.297-302.2016>.
- ESDM, K. (2020). Konsumsi Listrik Nasional Terus Meningkat. *Databoks*.
- Faraji, S., & Ani, F. N. (2015). The Development Supercapacitor from Activated Carbon by Electroless Plating - A Review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 42, pp. 823–834). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.068>.
- Farma, R., & Hasibuan, R. (2017). Karakterisasi Sifat Fisis dan Elektrokimia Sel Superkapasitor dengan Penumbuhan Nanopartikel Platinum di Atas Pengumpul Arus. *Jurnal Komunikasi Fisika Indonesia*, 14(2), 1067–1072. <https://kfi.ejournal.unri.ac.id/index.php/JKFI/article/view/5049>.
- Farzana, R., Rajarao, R., Bhat, B. R., & Sahajwalla, V. (2018). Performance of an Activated Carbon Supercapacitor Electrode Synthesised from Waste Compact Discs (CDs). *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 65, 387–396. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.05.011>.
- Febriyanto, P., Jerry, J., Satria, A. W., & Devianto, H. (2019). Pembuatan dan Karakterisasi Karbon Aktif Berbahan Baku Limbah Kulit Durian sebagai Elektroda Superkapasitor. *Jurnal Integrasi Proses*, 8(1), 19. <https://doi.org/10.36055/jip.v8i1.5439>.
- Goleman, D., Boyatzis, R., & Mckee, A. (2019). Karbon Aktif. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- Habibah, M. D. (2016). Variasi Holding Time Suhu Aktivasi Karbon Aktif dari Tempurung Kluwak (Pangium edule) sebagai Elektroda pada Superkapasitor. *Inovasi Fisika Indonesia*, 5(1). <https://doi.org/10.26740/ifi.v5n1.p%25p>.
- Haniffudin, N., & Diah, S. (2013). Pengaruh Variasi Temperatur Karbonisasi dan Karbon Aktif Tempurung Kelapa dan Kapasitansi Electric Double Layer Capacitor (EDLC). *Jurnal Teknik Pomits*, 2(1), F-13–F-17. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v2i1.2197>.
- Hardi, A. D., Joni, R., Syukri, S., & Aziz, H. (2020). Pembuatan Karbon Aktif dari Tandan Kosong Kelapa Sawit sebagai Elektroda Superkapasitor. *Jurnal Fisika Unand*, 9(4), 479–486. <https://doi.org/10.25077/jfu.9.4.479-486.2020>.
- Hendrawan, Y., Sutan, S. M., & Kreative, R. Y. R. (2017). Pengaruh Variasi Suhu Karbonisasi dan Konsentrasi Aktivator terhadap Karakteristik Karbon Aktif dari Ampas Tebu (Bagasse) Menggunakan

- Activating Agent NaCl. *Jurnal Keteknik Pertanian Tropis Dan Biosistem*, 5(3), 200–207. <https://jkptb.ub.ac.id/index.php/jkptb/article/view/420>.
- Huang, Y., Peng, L., Liu, Y., Zhao, G., Chen, J. Y., & Yu, G. (2016). Biobased Nano Porous Active Carbon Fibers for High-Performance Supercapacitors. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 8(24), 15205–15215. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b02214>.
- Imelda, D., Khanza, A., & Wulandari, D. (2019). Pengaruh Ukuran Partikel dan Suhu terhadap Penyerapan Logam Tembaga (Cu) dengan Arang Aktif dari Kulit Pisang Kepok (Musa Paradisiaca Formatypica). *Jurnal Teknologi*, 6(2), 107–118. <https://doi.org/10.31479/jtek.v6i2.10>.
- Istiqomah, A. U., Rahmawati, F., & Nugrahaningtyas, K. D. (2016). Penggantian Soda Api (NaOH) dengan Kalium Hidroksida (KOH) pada Destilasi Sistem Biner Air-Etanol. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 12(2), 179–189. <https://jurnal.uns.ac.id/alchemy/article/download/1876/PDF>.
- Itoi, H., Nishihara, H., Kogure, T., & Kyotani, T. (2011). Three-Dimensionally Arrayed and Mutually Connected 1.2-nm Nanopores for High-Performance Electric Double Layer Capacitor. *Journal of the American Chemical Society*, 133(5), 1165–1167. <https://doi.org/10.1021/ja108315p>.
- Jamilatun, S., Salamah, S., & Isparulita, I. D. (2016). Karakteristik Arang Aktif dari Tempurung Kelapa dengan Pengaktivasi H₂SO₄. *CHEMICA: Jurnal Teknik Kimia*, 2(1), 13. <https://doi.org/10.26555/chemica.v2i1.4562>.
- Joni, R., Syukri, & Aziz, H. (2021). Studi Karakteristik Karbon Aktif dari Cangkang Buah Ketaping sebagai Elektroda Superkapasitor. *Journal of Aceh Physics Society*, 10(1), 1–6. <https://doi.org/10.24815/jacps.v10i1.17755>.
- Kar, K. K. (2020). Springer Series in Materials Science 300 Handbook of Nanocomposite Supercapacitor Materials I. In K. K. Kar (Ed.), Book (II). Spinger.
- Kemenperin, R. I. (2020). Penyedia energi listrik dukung pertumbuhan ekonomi. Kementerian Perindustrian Republik Indonesia.
- Kurniawan, P., Taer, E., Malik, U., & Taslim, R. (2018). Pengaruh Konsentrasi KOH terhadap Sifat fFsis dan Elektrokimia Elektroda Karbon dari Limbah Kulit Durian sebagai Sel Superkapasitor. *Komunikasi Fisika Indonesia*, 15(1), 62. <https://doi.org/10.31258/jkfi.15.1.62-66>.
- Kurniawan, R., Luthfi, M., & Wahyunanto, A. (2014). Karakterisasi Luas Permukaan Bet (Braunanear , Emmelt dan Teller) Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa dan Tandan Kosong Kelapa Sawit dengan Aktivasi Asam Fosfat. *Jurnal Keteknik Pertanian Tropis Dan Biosistem*, 2(1), 15–20. <https://doi.org/10.32734/jtk.v6i1.1564>.
- Kwon, S. H., Lee, E., Kim, B. S., Kim, S. G., Lee, B. J., Kim, M. S., & Jung, J. C. (2014). Activated Carbon Aerogel as Electrode Material for Coin-Type EDLC Cell in Organic Electrolyte. *Current Applied Physics*, 14(4), 603–607. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2014.02.010>.
- McDonough, J. K., Frolov, A. I., Presser, V., Niu, J., Miller, C. H., Ubiето, T., Fedorov, M. V., & Gogotsi, Y. (2012). Influence of The Structure of Carbon Onions on Their Electrochemical Performance in Supercapacitor Electrodes. *Carbon*, 50(9), 3298–3309. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.12.022>.
- Megiyo, Noor, A., Farika, N., & Aldila, H. (2019). Sintesis Karbon Berpori Limbah Tangkai Buah Lada Putih Bangka sebagai Elektroda Superkapasitor. *Prosiding Seminar Nasional Penelitian dan Pengabdian Masyarakat*, 3, 171–174. <https://doi.org/10.33019/snppm.v3i0.1342>.
- Mison, I. I., Zain, N. K. M., Aziz, R. A., Vidyadharan, B., & Jose, R. (2015). Electrochemical Properties of Carbon from Oil Palm Kernel Shell for High Performance Supercapacitors. *Electrochimica Acta*, 174(1), 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.05.163>.
- Mossfika, E., Syukri, & Aziz, H. (2020). Pembuatan Karbon Aktif dari Ampas Teh yang Diaktivasi dengan NaOH sebagai Material Elektroda Superkapasitor Preparation of Activated Carbon from Tea Waste by NaOH Activation as A Supercapacitor Material. *Journal of Aceh Physics Society*, 9(2), 42–47. <http://jurnal.unsyiah.ac.id/JAcPS/article/view/15905>.
- Muchammadsam, I. D., Taer, E., & Farma, R. (2015). Pembuatan dan Karakterisasi Karbon Aktif Monolit dari Kayu Karet dengan Variasi Konsentrasi Koh untuk Aplikasi Superkapasitor. *JOM FMIPA*, 2(1), 8–13. <https://www.neliti.com/publications/189488/pembuatan-karbon-aktif-monolit-dari-kayu-karet-menggunakan-aktivator-koh-dan-hno>.
- Muhammad Turmuzi, & Arion Syaputra. (2015). Pengaruh Suhu dalam Pembuatan Karbon Aktif dari Kulit Salak dengan Impregnasi Asam Fosfat (H₂SO₄). *Jurnal Teknik Kimia USU*, 4(1), 42–46. <https://doi.org/10.32734/jtk.v4i1.1459>.
- Nasir La Hasan ; Zakir, M; Budi, P. (2015). Desilikasi Karbon Aktif Sekam Padi sebagai Adsorben hg pada Limbah Pengolahan Emas di Kabupaten Buru provinsi Maluku. *Indonesia Chimica Acta*, 7(2), 1–11. <https://indonesiachimicaacta.files.wordpress.com/2012/05/1-nasir-la-hasan1.pdf>.

- Ngapa, Y. D. (2017). Kajian Pengaruh Asam Basa pada Aktivasi Zeolit dan Karakterisasinya sebagai Adsorben Pewarna Biru Metilena. *JKPK (Jurnal Kimia Dan Pendidikan Kimia)*, 2(2), 90. <https://pdfs.semanticscholar.org/a0dd/0e82e9d59267ef182869bb6272dc7568114.pdf>.
- Nurisman, E., Miarti, A., & Sahrul, A. (2017). Studi Eksperimental Pengaruh Suhu Karbonisasi pada Prototipe Electrical Carbonization Furnace terhadap Rendemen dan Analisis Proksimat Karbon Aktif dari Limbah Tempurung Kelapa. *Proceeding Seminar Nasional Pengolahan Lingkungan*.
- Othmer, K. (1978). *Encyclopedia of Chemical Technology*.
- Prabarini, N., & Okayadnya, D. (2014). Penyisihan Logam Besi (Fe) pada Air Sumur dengan Karbon Aktif dari Tempurung Kemiri. *Envirotek: Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*, 5(2), 33–41. <http://eprints.upnjatim.ac.id/6807/>.
- Rahmadani, N., & Kurniawati, P. (2017). Sintesis dan Karakterisasi Karbon Teraktivasi Asam dan Basa Berbasis Mahkota Nanas. *Prosiding Seminar Nasoinal Kimia Dan Pembelajarannya 2017*, 2(1), 154–161. <https://www.e-prosiding.um naw.ac.id/index.php/penelitian/article/view/202>.
- Ramadhani, L. F., Imaza M. Nurjannah, Ratna Yulistiani, & Erwan A. Saputro. (2020). Review: Teknologi Aktivasi Fisika pada Pembuatan Karbon Aktif dari Limbah Tempurung Kelapa. *Jurnal Teknik Kimia*, 26(2), 42–53. <https://doi.org/10.36706/jtk.v26i2.518>.
- Rawal, S., Joshi, B., & Kumar, Y. (2018). Synthesis and Characterization of Activated Carbon from The Biomass of Saccharum Bengalense for Electrochemical Supercapacitors. *Journal of Energy Storage*, 20, 418–426. <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.10.009>.
- Rosita Idrus, Boni Pahlanop Lapanporo, Y. S. P. (2013). Pengaruh Suhu Aktivasi terhadap Kualitas Karbon Aktif Berbahan Dasar Tempurung Kelapa. *Prisma Fisika*, 1(8), 50–55. <https://doi.org/10.26418/pf.v1i1.1422>.
- Rout, T. K. (2013). Pyrolysis of Coconut Shell. *Rourkela*, 211(211), <https://www.58.ethesis.nitrkl.ac.in/5346/1/211CH1036.pdf>.
- Sari, F. P., Taer, E., & Sugianto. (2014). Efek Variasi Waktu Ball Milling terhadap Karakteristik Elektrokimia sel superkapasitor berbasis karbon. *JOM FMIPA*, 1(2), 217–227. <https://www.neliti.com/publications/186680/efek-variiasi-waktu-ball-milling-terhadap-karakteristik-elektrokimia-sel-superkap>.
- Satriyani Siahaan, Melvha Hutapea, & Rosdanelli Hasibuan. (2013). Penentuan Kondisi Optimum Suhu dan Waktu Karbonisasi pada Pembuatan Arang dari Sekam Padi. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 2(1), 26–30. <https://doi.org/10.32734/jtk.v2i1.1423>.
- Simamora, J. R., Kurniawan, C., Simamora, P., & Sinaga, G. B. (2020). Karakterisasi Karbon Aktif Cangkang Kemiri dan Tempurung Kelapa sebagai Bahan Filter Air. *JUITECH*, 4(2), 65–72. <https://doi.org/10.36764/ju.v4i2.482>.
- Suryani, D. A., Hamzah, F., & Johan, V. S. (2018). Variasi Waktu Aktivasi terhadap Kualitas Karbon Aktif Tempurung Kelapa. *Jom Faperta Ur*, 5(1), 1–10.
- Syarif, N. (2014). Performance of Biocarbon Based Electrodes for Electrochemical Capacitor. *Energy Procedia*, 52, 18–25. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.050>.
- Taer, E., Yusra, H., Iwantono, & Taslim, R. (2016). Analisa Dimensi, Densitas dan Kapasitansi spesifik eElektroda Karbon Superkapasitor dari Bunga Rumput Gajah dengan Variasi Konsentrasi Pengaktifan KOH. *Spektra Jurnal Fisika Dan Aplikasinya*, 1(1), 55–60. <https://doi.org/10.21009/Spektra.011.09>.
- Tetra, O. N., Aziz, H., Syukri, S., Arifin, B., & Novia, A. (2018). Pengaruh Penambahan Karbon Aktif dari Tanah Gambut terhadap Kapasitansi Elektroda Superkapasitor Berbahan Dasar Karbon Cangkang Kelapa Sawit. *Jurnal Zarah*, 6(2), 47–52. <https://doi.org/10.31629/zarah.v6i2.562>.
- Tumimomor, F., Maddu, A., & Pari, G. (2017). Pemanfaatan Karbon Aktif dari Bambu sebagai Elektroda Superkapasitor. *Jurnal Ilmiah Sains*, 17(1), 73–79. <https://doi.org/10.35799/jis.17.1.2017.15802>.
- Tumimomor, F. R., & Palilingan, S. C. (2018). Pemanfaatan Karbon Aktif dari Sabut Kelapa sebagai Elektroda Superkapasitor. *Fullerene Journal of Chemistry*, 3(1), 13–18. <https://doi.org/10.37033/fjc.v3i1.29>.
- Vangari, M., Pryor, T., & Jiang, L. (2013). Supercapacitors: Review of Materials and Fabrication Methods. *Journal of Energy Engineering*, 139(2), 72–79. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ey.1943-7897.0000102](https://doi.org/10.1061/(asce)ey.1943-7897.0000102).
- Verayana, Papatungan, M., & Iyabu, H. (2018). Pengaruh Aktivator HCl dan H₃PO₄ terhadap Karakteristik (Morfologi Pori) Arang Aktif Tempurung Kelapa serta Uji Adsorpsi pada Logam Timbal (Pb). *Jurnal Entropi*, 13(1), 67–75. <https://www.neliti.com/publications/277418/pengaruh-aktivator-hcl-dan-h3po4-terhadap-karakteristik-morfologi-pori-arang-akt>.
- Wang, J., Zhang, X., Li, Z., Ma, Y., & Ma, L. (2020). Recent Progress of Biomass-Derived Carbon Materials for Supercapacitors. In *Journal of Power Sources* (Vol. 451, pp. 1–17). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.227794>.

- Wang, K., Zhao, N., Lei, S., Yan, R., Tian, X., Wang, J., Song, Y., Xu, D., Guo, Q., & Liu, L. (2015). Promising Biomass-Based Activated Carbons Derived from Willow Catkins for High Performance Supercapacitors. *Electrochimica Acta*, 166, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.03.048>.
- Wei, L., & Yushin, G. (2012). Nanostructured Activated Carbons from Natural Precursors for Electrical Double Layer Capacitors. In *Nano Energy* (Vol. 1, Issue 4, pp. 552–565). <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2012.05.002>.
- Yuliusman. (2015). Pembuatan Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa Sawit dengan Bahan Pengaktif Koh dan Gas N₂ / CO₂. Seminar Teknologi Dan Rekayasa (SENTRA), June, 978–979. <http://research-report.umm.ac.id/index.php/sentra/article/view/2121>.
- Yuningsih, L. M., Mulyadi, D., & Kurnia, A. J. (2016). Pengaruh Aktivasi Arang Aktif dari Tongkol Jagung dan Tempurung Kelapa terhadap Luas Permukaan dan Daya Jerap Iodin. *Jurnal Kimia VALENSI*, 2(1), 30–34. <https://doi.org/10.15408/jkv.v2i1.3091>.
- Zhou, Z., Benbouzid, M., Frédéric Charpentier, J., Scuiller, F., & Tang, T. (2013). A Review of Energy Storage Technologies for Marine Current Energy Systems. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 18, pp. 390–400). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.006>.
- Zhu, Y., Murali, S., Stoller, M. D., Ganesh, K. J., Cai, W., Ferreira, P. J., Pirkle, A., Wallace, R. M., Cychosz, K. A., Thommes, M., Su, D., Stach, E. A., & Ruoff, R. S. (2011). Carbon-Based Supercapacitors Produced by Activation of Graphene. *Science*, 332(6037), 1537–1541. <https://doi.org/10.1126/science.1200770>.