

Superkapasitor berbahan dasar karbon aktif dari ampas biji kopi robusta menggunakan aktivator NaOH

Supercapactors based on active carbon from spent arabica coffee ground using NaOH activators

Rikaryalita Novitra¹, Erman Taer², dan Hermansyah Aziz^{1*}

Received 16 August 2021
Accepted 11 November 2021
Published January 2022

¹Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas, 25163

²Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Riau, 28293

Abstrak. Karbon aktif dari ampas biji kopi dimanfaatkan sebagai bahan dasar elektroda superkapasitor. Pembuatan karbon aktif ini diaktivasi dengan NaOH menggunakan gas N₂, meliputi variasi konsentrasi 0,2 M, 0,3 M dan 0,4 M. Sifat fisis dari karbon aktif ampas biji kopi robusta telah dilakukan meliputi analisa densitas, penurunan densitas setelah karbonisasi-aktivasi berkisar antara 9% - 35%. Kapasitansi spesifik elektroda karbon ampas biji kopi robusta berdasarkan hasil pengujian menggunakan metode Cyclic voltammetry (CV) diperoleh kapasitansi spesifik tertinggi dengan elektrolit 1 M H₂SO₄ adalah 130 F/g⁻¹ pada konsentrasi 0,3 M, dan pada pengujian menggunakan metode Galvanostatic charge discharge (GCD) diperoleh kapasitansi spesifik tertinggi dengan elektrolit 1 M H₂SO₄ adalah 198,53 F/g⁻¹ pada konsentrasi 0,3 M. Luas permukaan spesifik elektroda 0,3 M adalah 739,911 m² g⁻¹, kandungan unsur elektroda karbon 0,3 M berdasarkan karakterisasi EDX didominasi oleh unsur karbon yaitu 49,37%. Kurva isotherm adsorpsi karbon aktif ampas biji kopi robusta 0,3 M adalah tipe IV yang menunjukkan bahwa struktur mesopore yang mendominasi. Dengan nilai kapasitansi dan luas permukaan spesifik yang besar, karbon aktif dari ampas biji kopi robusta bisa dimanfaatkan sebagai elektroda superkapasitor yang murah dan ramah lingkungan.

Abstract. Activated carbon from coffee bean pulp is used as the base material for supercapacitor electrodes. The manufacture of activated carbon is activated by NaOH using N₂ gas, covering variations in concentrations of 0.2 M, 0.3 M and 0.4 M. The physical properties of the activated carbon of robusta coffee beans have been carried out including density analysis, density reduction after carbonization-activation. ranged from 9% - 35%. The specific capacitance of the robusta coffee bean dregscarbon electrode based on the test results using the Cyclic voltammetry (CV) method, the highest specific capacitance with 1 M H₂SO₄ electrolyte was 130 F/g⁻¹ at a concentration of 0.3 M, and in the test using the Galvanostatic charge discharge method (GCD) obtained the highest specific capacitance with 1 M H₂SO₄ electrolyte is 198,53 F/g⁻¹ at a concentration of 0.3 M. The specific surface area of carbon 0.3 M electrode is 739,911 m² g⁻¹, the element content of carbon 0.3 M electrode based on EDX characterization is dominated by carbon element, which is 49,37%. The isotherm curve for activated carbon of robusta coffee 0.3 M grounds is type IV which indicates that the mesopore structure is dominant. With a large capacitance value and specific surface area, activated carbon from robusta coffee grounds can be used as a supercapacitor electrode that cheap and environmentally friendly

Keywords: Activated carbon, coffee bean pulp, supercapacitor, activation, carbon pores

Pendahuluan

Pemanfaatan baterai sebagai alat penyimpan energi dinilai kurang efisien, karena beberapa kelemahannya, seperti rapat daya yang kecil dan waktu penyimpanan listrik yang lama (Kotz, 2000). Hal ini menyebabkan penemuan superkapasitor, yang memiliki kemampuan untuk menghemat energi dan kepadatan daya yang lebih tinggi selama siklus hidup yang berkepanjangan. Alat ini terdiri dari empat komponen utama yaitu elektrolit, separator, kolektor arus, dan elektroda (Burke, 2000 and Abioye *et al.*, 2015). Elektroda merupakan komponen terpenting yang digunakan untuk menentukan kinerjanya, yang terbuat dari oksida logam, polimer, dan karbon (Namisnyk, 2003). Hal ini dikarenakan, selama bertahun-tahun, karbon aktif telah banyak digunakan sebagai elektroda superkapasitor karena berbagai keunggulannya seperti luas permukaan yang tinggi, hemat biaya, dan ketersediaannya dalam jumlah banyak (Ruiz *et al.*, 2007). Karbon aktif berpori adalah salah satu material baru yang memiliki sifat yang cukup menjanjikan sebagai bahan

dasar superkapasitor seperti memiliki struktur morfologi yang unik, luas permukaan spesifik tinggi, distribusi ukuran pori yang cocok, stabilitas kimia yang baik dan proses preparasi yang relatif mudah (Zhang *et al.*, 2017). Meningkatkan kepadatan energi pada sebuah superkapasitor sangat membutuhkan suatu bahan karbon yang berpori hirarkis yang meliputi mikropori, mesopori dan makropori (Baujibar *et al.*, 2019). Pori makro menyediakan jarak yang relative pendek untuk difusi ion pada permukaan material elektroda (Zhang *et al.*, 2017).

Karbon aktif berbasis limbah biomassa untuk dijadikan karbon menjadi perhatian saat ini karena mempunyai beberapa keuntungan secara ekonomi, lingkungan dan sosial (Aziz *et al.*, 2016). Karbon aktif dapat dibuat dari berbagai bahan biomassa. Beberapa biomassa yang mengandung unsur karbon apabila mengalami proses karbonisasi atau pengarangkan seperti, tempurung kelapa, kayu, sekam padi, biji kopi dan lain – lain. Kriteria bahan dipilih sebagai bahan karbon aktif diantaranya memiliki unsur anorganik yang rendah,

ketersediaan bahan mudah didapat dan tidak mahal, memiliki daya tahan yang baik, dan mudah untuk diaktivasi (Taer *et al.*, 2014).

Sumber daya biomassa alam yang melimpah dengan struktur mikro memiliki potensi untuk menjadi dasar untuk serat karbon. Biomassa memiliki senyawa lignoselulosa yang merupakan sumber karbon yang melimpah dan mudah. Selain itu selulosa juga bersifat hidrofilik, sehingga menyederhanakan proses difusi ion kedalam pori (Taer *et al.*, 2016). Pada era sekarang, yang sangat populer adalah minuman yang bernuasa kopi, dengan berkembang pesatnya minuman yang berbahan dasar kopi mengakibatkan limbah yang dihasilkan juga banyak. Secara teoritis ampas biji kopi mengandung karbohidrat (38-42%), melanoidin (23%), lipid (11-17%), dan komponen lainnya. Sebelumnya, pemanfaatan ampas biji kopi sebagai bahan dasar elektroda superkapasitor telah dilakukan oleh beberapa peneliti, salah satunya oleh Jonghyun dkk pada tahun 2019. Mengenai pembuatan karbon aktif yang didoping nitrogen dari limbah ampas kopi. Untuk karbon aktif yang dihasilkan dari limbah ampas kopi didapatkan nilai kapasitansi spesifik sebesar 74 F/g⁻¹. Namun demikian, nilai kapasitansi yang didapatkan perlu ditingkatkan penggunaannya. Penelitian sebelumnya (Kenji *et al.*, 2018) tentang Bio-nanokarbon berpori tinggi yang dibuat dengan karbonisasi dan aktivasi NaOH dari polisakarida untuk bahan elektroda EDLC. Untuk karbon aktif yang dihasilkan didapatkan nilai kapasitansi spesifik sebesar 46,1 F/g. Namun demikian, nilai kapasitansi yang telah didapatkan perlu ditingkatkan lagi.

Berdasarkan beberapa penelitian tersebut, pemilihan prekursor biomassa adalah proses penting karena sumber karbon mempengaruhi tekstur dan karakteristik struktural hasil produk akhir (Taer *et al.*, 2020). Berdasarkan hal tersebut, maka dalam penelitian ini, akan dilakukan pembuatan superkapasitor berbahan dasar karbon aktif dari ampas biji kopi robusta dengan aktivator NaOH. Penelitian ini memvariasikan konsentrasi aktivator NaOH, yaitu 0,2 M, 0,3 M, 0,4 M, Hal ini bertujuan untuk melihat kemampuan aktivator NaOH terhadap distribusi pori dan luas permukaan karbon aktif dari ampas biji kopi.

Bahan dan Metode

Bahan

Alat-alat yang digunakan adalah *hot plate* (IKA'C-MAG HS4), *oven*, *furnace* N2 (Nabertherm), plat *stainless steel* 316L, neraca analitik (Mettler PM4000), dan peralatan gelas laboratorium. Bahan-bahan yang digunakan adalah ampas biji kopi Aceh (diambil dari warung kopi Aceh di Provinsi Nanggroe Aceh Darussalam), asam sulfat (H₂SO₄) p.a, Natrium hidroksida (NaOH) (Merck), Kalium Hidroksida (KOH) asam klorida (HCl), kertas pH meter, membran cangkang telur, ampelas, dan aquades.

Prosedur Awal

Ampas biji kopi robusta dicuci dengan aquades dan dikeringkan pada suhu ruang. Sampel yang telah bersih dikeringkan dalam oven pada suhu 110°C lebih kurang 3 jam lalu ditimbang (Rifani, 2018). Setelah itu ampas biji kopi robusta dihaluskan dan diayak menggunakan ayakan berukuran 38 µm. Ampas biji kopi robusta diaktivasi menggunakan larutan NaOH dengan perbandingan variasi konsentrasi 0,2 M, 0,3 M dan 0,4 M dalam 100 mL aquades. Diaduksampai homogen selama kurang lebih 3 jam pada suhu 80°C, selanjutnya dioven pada suhu 110°C selama 1 hari. Karbon aktif kering dihaluskan dan ditimbang sebanyak 0,7 gram, dicetak menjadi pellet menggunakan hidroullic press pada tekanan 8 ton dan ditahan selama 2 menit. Ditimbang massa dan diukur diameter serta ketebalan, dan disiapkan untuk proses karbonisasi. karbonisasi dilakukan dengan laju pemanasan 5 °C/menit, dipanaskan secara bertingkat dengan suhu awal 400°C lalu ditahan selama 1 jam dan suhu dinaikkan 600°C kemudian ditahan lagi selama 1 jam dan suhu dinaikkan lagi hingga 800°C dan ditahan selama 1,5 jam. Setelah elektroda berhasil dibuat, kemudian dilakukan pengujian pengukuran kapasitansi spesifik menggunakan uji Sifat elektrokimia diukur dengan *cyclic voltammetry* dan *galvanostatic charge-discharge*, Sifat elektrokimia ini diukur padalaju pemindaian 1 mVs⁻¹, 2 mVs⁻¹, 5 mVs⁻¹, dan 10 mVs⁻¹ menggunakan rentang tegangan 0-1 Volt. Untuk sampel yang memiliki kapasitansi paling besar akan dilakukan karakterisasi tambahan berupa karakterisasi *Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray* (SEM-EDX) dan *Surface Area Analyzer* (SAA).

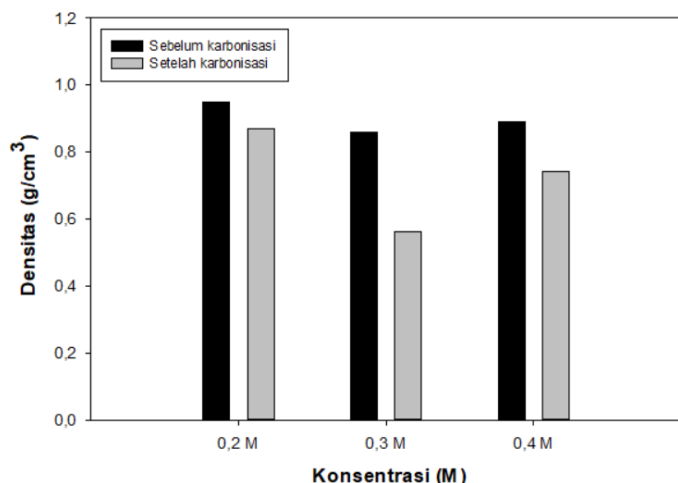
Hasil dan Pembahasan

Densitas

Grafik densitas sebelum dan sesudah karbonisasi dapat dilihat pada Gambar 1. Densitas merupakan salah satu sifat fisis yang mempengaruhi kinerja sel superkapasitor. Densitas mempengaruhi nilai kapasitansi spesifik superkapasitor. Densitas mempengaruhi nilai kapasitansi spesifik superkapasitor. Semakin kecil nilai densitas maka pori yang dihasilkan semakin banyak sehingga porositas yang dihasilkan akan semakin besar. Densitas dapat menentukan kemampuan sel superkapasitor sebagai penyimpan muatan, semakin tinggi densitas elektroda superkapasitor maka semakin kecil kemampuannya dalam menyimpan muatan. Semakin kecil nilai densitas maka pori yang dihasilkan semakin banyak sehingga porositas yang dihasilkan akan semakin besar (Puspitasari, 2014).

Proses karbonisasi terjadi penguapan senyawa volatil, senyawa volatil digunakan untuk mengisi kekosongan pada rantai karbon sehingga dapat mengurangi diameter dan ketebalan pelet (Taer *et al.*, 2020). Volatil yang dilepaskan untuk menghasilkan kekosongan dalam rantai karbon yang mengarahkan ke penataan ulang yang mengurangi diameter dan ketebalan

pelet (Taer *et al.*, 2020) sehingga terjadi pengurangan massa pellet. Pengurangan tersebut terjadi akibat pengeluaran unsur-unsur yang terdapat dalam karbon dari bambu betung terutama senyawa yang mudah menguap seperti *volatile matter* (Saragih, 2008). *Volatile matter* terdiri dari metan, senyawa hidrokarbon, hidrogen dan nitrogen (Tirono dan Sabit, 2011).



Gambar 1. Hasil densitas elektroda karbon berdasarkan variasi konsentrasi

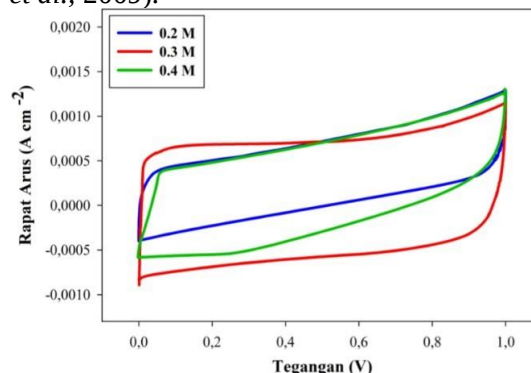
Gambar 1 menunjukkan data densitas elektroda karbon ampas biji kopi robusta sebelum dan setelah proses karbonisasi-aktivasi. Secara umum nilai densitas yang dihasilkan pada proses sebelum karbonisasi aktivitas untuk semua sampel hampir sama. Hal ini karena pada proses awal pembuatan pelet karbon diberikan perlakuan yang sama untuk semua variasi konsentrasi, sedangkan densitas elektroda ampas biji kopi robusta setelah karbonisasi-aktivasi mengalami penurunan densitas. Penurunan densitas setelah karbonisasi-aktivasi berkisar antara 9% sampai 35%. Penurunan densitas tertinggi ditunjukkan oleh elektroda karbon ampas biji kopi robusta dengan konsentrasi 0,3 M setinggi 35%. Pada densitas 0,4 M mengalami kenaikan dikarenakan adanya *volatile* yang masih menempel pada permukaan sampel setelah dilakukan karbonisasi, hal ini dikarenakan semakin banyaknya massa yang digunakan dalam aktivasi kimia untuk konsentrasi 0,4 Molar. Proses karbonisasi aktivasi ini juga menyebabkan hilangnya senyawa non karbon sehingga massa karbon menjadi berkurang. Persentase pengurangan massa (*burn off*) berpengaruh terhadap nilai densitas yang dihasilkan. Semakin besar persentase *burn off* maka pengurangan massa yang terjadi semakin tinggi, sehingga densitas semakin kecil (Taer *et al.*, 2016).

Analisa Pengukuran Sifat Elektrokimia Sel Superkapasitor

Siklik Voltametri (CV) adalah suatu pengukuran yang digunakan untuk mengetahui sifat elektrokimia sel superkapasitor dengan menentukan nilai kapasitansi

spesifik dari sel superkapasitor. Kurva siklik voltametri menghasilkan hubungan antara rapat arus dan tegangan. Lebar kurva bergantung pada rapat arus dan tegangan sehingga luas kurva yang dihasilkan mewakili nilai kapasitansi spesifik sel superkapasitor. Semakin luas kurva yang dihasilkan maka nilai kapasitansi juga akan semakin besar. Kapasitansi spesifik ($F\ g^{-1}$) merupakan kemampuan dari suatu elektroda untuk menyimpan muatan pada tegangan tertentu per satuan massa dari elektroda. Data hasil pengukuran CV merupakan hubungan dari rapat arus (A) dan tegangan (V) yang membentuk kurva hysteresis. Arus terbagi menjadi 2 yaitu arus *charge* (I_c) dan arus *discharge* (I_d). Arus *charge* terjadi saat ion – ion yang berasal dari variasi elektrolit H_2SO_4 1 M dan KOH 1 M yang diberikan mulai memasuki pori dari elektroda ketika diberi tegangan 0-1 V, sedangkan arus *discharge* terjadi saat ion – ion kembali keluar dari pori ketika tegangan dilepaskan yaitu dari 1-0 V (Taer *et al.*, 2017). Analisis dengan menggunakan CV menghasilkan kurva bentuk persegiempat yang terdistorsi, hal tersebut menandakan bahwa superkapasitor memiliki sifat EDLC yang normal (Scott *et al.*, 2016). Laju pemindaian sebesar 1 mV/s berarti tegangan dinaikan sebesar 1 mV setiap 1 detik sehingga mencapai tegangan 1000 mV atau 1 V. Laju pemindaian 1 mV/s membutuhkan waktu yang lebih lama untuk ion-ion yang berasal dari larutan elektrolit terdifusi secara merata untuk mengisi pori elektroda karbon. Pada laju pemindaian 1 mV/s, ion-ion akan berdifusi secara sempurna pada permukaan elektroda sehingga cocok digunakan untuk penentuan nilai kapasitansi spesifik (Taer *et al.*, 2009). Kurva CV untuk elektrolit H_2SO_4 1M pada penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.

Gambar 2 menunjukkan kurva CV untuk sel superkapasitor dari ampas biji kopi robusta yang diuji menggunakan elektrolit H_2SO_4 1 M. Kurva CV menunjukkan bentuk persegiempat yang terdistorsi yang menandakan bahwa superkapasitor memiliki sifat ELDC yang normal (Scott, 2016). Semakin besar daerah kurva I_c - I_d yang terbentuk maka nilai kapasitansi spesifik elektroda karbon yang dihasilkan akan semakin besar (Taer *et al.*, 2009).



Gambar 2. Kurva CV untuk elektrolit H2SO4 1M

Selain kurva I_c dan I_d yang lebar, massa elektroda juga mempengaruhi besarnya kapasitansi spesifik yang dihasilkan, semakin kecil massa elektroda maka kapasitansi spesifik yang dihasilkan semakin tinggi (Taer, *et al.*, 2009).

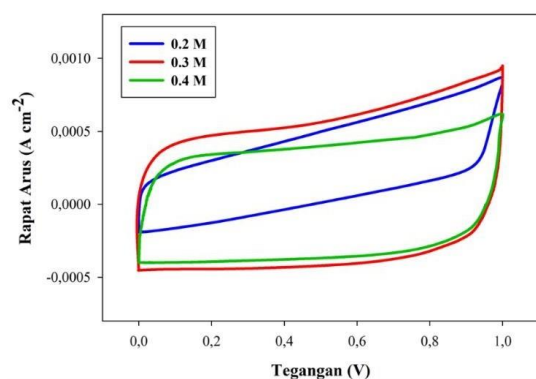
Menghitung kapasitansi spesifik menggunakan rumus $C_{sp} = \frac{I_c - I_d}{S_{xm}}$ Selain kapasitansi spesifik, sifat elektrokimia superkapasitor juga dapat dianalisis dengan menggunakan persamaan $E = \frac{1}{2} C_{sp} V^2$ untuk rapat energi dan persamaan $P = \frac{E}{\Delta t}$ untuk rapat daya.

Tabel 1 dapat diketahui bahwa konsentrasi sampel 0,3 M memiliki nilai kapasitansi tertinggi 130 F/g^{-1} , sedangkan sampel dengan konsentrasi 0,2 M dengan kapasitansi terendah yaitu 42 F/g^{-1} . Hal ini menunjukkan bahwa kinerja elektrolit H_2SO_4 menunjukkan kinerja yang baik, karena H_2SO_4 memiliki konduktivitas ion yang sangat tinggi, dan hambatan yang rendah (Zhong *et al.*, 2015).

Tabel 1. Nilai kapasitansi spesifik sel superkapasitor dengan elektrolit 1 M H_2SO_4

Konsentrasi aktivator	C_{sp} (F/g^{-1})	E ($Wh\ kg^{-1}$)	P ($W\ kg^{-1}$)
0,2 M	42	5,8333	21,0209
0,3 M	130	18,0555	65,0649
0,4 M	84	11,6666	42,0418

Selain itu, elektrolit H_2SO_4 terurai menjadi ion H^+ dan ion SO_4^{2-} dalam larutan dan memiliki ukuran ion yang sangat kecil sehingga mudah berinteraksi dalam proses pengisian dan pengosongan (Endo *et al.*, 2001), serta elektrolit H_2SO_4 memiliki diameter ion yang sesuai untuk difusi ke pori-pori karbon aktif berbasis biomassa (Taer *et al.*, 2015). Kurva CV untuk elektrolit KOH 1 M pada penelitian dapat dilihat pada Gambar 3



Gambar 3. Kurva CV untuk elektrolit KOH 1 M

Gambar 3 Menunjukkan kurva CV untuk sel superkapasitor berbahan asal ampas biji kopi robusta yang diuji menggunakan elektrolit 1 M KOH. Analisis pada kurva berbentuk persegiempat yang terdistorsi (Scott, 2016), meskipun arus yang dihasilkan terlihat lebih kecil

dibandingkan dengan elektrolit H_2SO_4 . Kurva I_c - I_d yang terbentuk mengindikasikan nilai kapasitansi paling tinggi diperoleh pada sampel dengan konsentrasi 0,3 M, karena memiliki luas daerah kurva I_c - I_d yang paling besar, sedangkan sampel 0,2 M, diindikasikan memiliki nilai kapasitansi spesifik yang paling rendah karena memiliki luas daerah kurva I_c - I_d yang paling kecil (Taer *et al.*, 2009).

Tabel 2. Nilai kapasitansi sel superkapasitor dengan elektrolit 1 M KOH

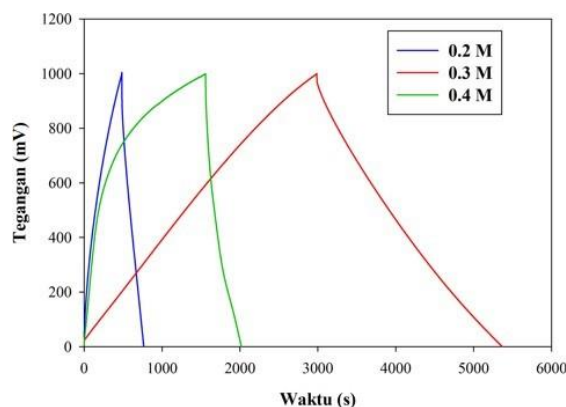
Konsentrasi Aktivator	C_{sp} (F/g^{-1})	E ($Wh\ kg^{-1}$)	P ($W\ kg^{-1}$)
0,2 M	29	4,0277	14,5142
0,3 M	109	15,1389	54,5545
0,4 M	73	10,1389	36,5365

Tabel 2 menunjukkan nilai kapasitansi tertinggi adalah sampel 0,3 M sebesar 109 F/g^{-1} . sedangkan sampel dengan konsentrasi 0,2 M dengan kapasitansi terendah yaitu 29 F/g^{-1} . Hal ini menunjukkan kinerja elektrolit KOH masih menunjukkan kinerja yang baik (Taer *et al.*, 2015). Hal tersebut dikarenakan elektrolit hidroksida sangat larut dalam air serta anion OH^- memiliki konduktivitas yang sangat baik sebagai elektrolit superkapsitor (Robinson *et al.*, 2002). Nilai kapasitansi sangat berpengaruh dalam kinerja superkapasitor, respon pemberian tegangan yang dihasilkan pada sel superkapsitor adalah berupa rapat arus, dimana nilai arus ditentukan oleh pergerakan ion-ion didalam sebuah pori elektroda dalam membentuk lapisan pasangan muatan (Taer *et al.*, 2016). Pergerakan ion dipengaruhi oleh ukuran, konduktivitas dan mobilitas ion dari suatu elektrolit. Semakin tinggi konduktivitas dan mobilitas ion maka semakin kecil ukuran ion sehingga pergerakan ion pada permukaan elektroda/elektrolit semakin cepat yang dapat meningkatkan kapasitansi spesifik superkapasitor. (Berezgar *et al.*, 2015). Pada hal ini, elektrolit H_2SO_4 dan KOH memiliki ukuran diameter ion yang berbeda – beda. Diameter elektrolit dari H_2SO_4 sebesar 0,26 nm sedangkan KOH 0,36 nm (Inagaki *et al.*, 2010). Ukuran diameter ion H_2SO_4 yang dihasilkan lebih kecil sehingga menyebabkan lebih banyak berdifusi kedalam pori elektroda karbon dibandingkan dengan elektrolit KOH. Semakin banyak ion yang dapat berdifusi maka akan semakin banyak pula lapisan ganda yang dihasilkan sehingga kapasitansi spesifiknya semakin besar (Schneuwly, 2000).

Analisa Galvano Charge Discharge (GCD)

Kurva GCD untuk elektrolit H_2SO_4 1M pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 4. *Galvanostatic charge discharge* merupakan metode lain yang sering digunakan untuk mengevaluasi sifat elektrokimia superkapasitor. Idealnya, plot tegangan yang dihasilkan dari waktu ke

waktu adalah linier, dengan kemiringan positif dan *negative* bolak-balik. Penyimpangan dari linieritas dapat terjadi karena peningkatan tegangan tiap pertambahan waktu, dengan resistansi seri yang menyebabkan tegangan sel turun dengan cepat (penurunan IR) saat beralih dari pengisian daya ke pengosongan (Kampouris *et al.*, 2015). Superkapasitor melepaskan dua titik tegangan yang ditentukan pada arus konstan. Jenis metoda ini lebih akurat untuk menentukan kinerja superkapasitor. Plot tegangan yang dihasilkan dari waktu ke waktu adalah linier, dengan kemiringan positif dan negatif.



Gambar 4. Kurva GCD untuk elektrolit H₂SO₄ 1M

Pada Gambar 4 menunjukkan kurva GCD untuk sel superkapasitor berbahan asal ampas kopi yang diuji menggunakan elektrolit H₂SO₄ 1 M. Berdasarkan Gambar 4 dapat dilihat bahwa ketiga elektroda dengan konsentrasi sampel 0,2 M, 0,3 M dan 0,4 M menunjukkan waktu charge-discharge yang berbeda. Elektroda dengan konsentrasi sampel 0,3 M menunjukkan waktu pengukuran charge-discharge yang jauh lebih lama dari elektroda dengan konsentrasi 0,2 M dan 0,4 M. Menurut (Ismanto *et al.*, 2010) perbedaan waktu pada saat proses charge-discharge merupakan faktor yang dapat mempengaruhi bentuk simetri dari segitiga sama kaki pada grafik.

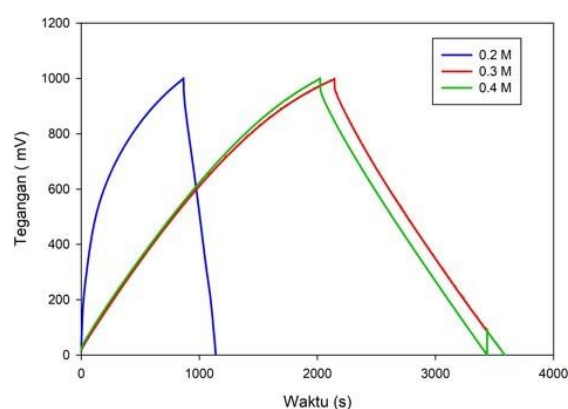
Perbedaan waktu charge-discharge yang sedikit akan membentuk segitiga dan segitiga sama kaki yang lebih simetris yang mengindikasikan efisiensi yang semakin tinggi pada saat charge discharge. Efisien yang tinggi pada superkapasitor menunjukkan bahwa elektroda karbon dapat terhubung dengan baik dengan larutan elektrolit atau dengan kata lain karbon memiliki *hydrophilicity* tinggi pada permukaannya. Rumus untuk menghitung nilai kapasitansi yaitu $C_{sp} = \frac{(I \cdot \Delta t)}{(m \cdot \Delta V)}$.

Tabel 3. Nilai kapasitansi spesifik dan resistansi spesifik pada elektrolit 1 M H₂SO₄

Konsentrasi sampel	C _{sp} (F g ⁻¹)	Resistansi (10 ⁻³ Ω)
0,2 M	62,79	64
0,3 M	198,53	19
0,4 M	125,92	21

Pada Tabel 3 dapat dilihat bahwa nilai kapasitansi spesifik tertinggi adalah 198,53 F/g⁻¹ didapatkan dari konsentrasi 0,3 M. Hal ini karena elektroda dengan konsentrasi sampel 0,3 M dapat diisi dengan lebih banyak ion atau elektrolit (Taer *et al.*, 2015), dibanding dengan elektroda dengan konsentrasi sampel 0,2 M dan 0,4 M. Serta sampel dengan konsentrasi 0,2 M dan 0,4 M memiliki waktu pengosongan yang lebih pendek daripada sampel 0,3 M.

Sampel 0,3 M memiliki yang terpanjang waktu pengosongan. Selain itu, ada potensi penurunan tiba-tiba selama pelepasan awal untuk masing-masing sel, penurunan potensial seperti itu relative kecil, hal ini disebabkan konduktivitas yang baik dari sifat mesopori yang ada pada sampel (Taer *et al.*, 2011). Kurva GCD untuk elektrolit KOH 1M ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Kurva GCD untuk elektrolit KOH 1M

Pada Gambar 5 menunjukkan kurva GCD untuk sel superkapasitor berbahan asal ampas kopi yang diuji menggunakan elektrolit KOH 1 M. Berdasarkan Gambar 5 dapat dilihat bahwa ketiga elektroda dengan konsentrasi sampel 0,2 M, 0,3 M dan 0,4 M menunjukkan waktu charge-discharge yang berbeda. Elektroda dengan konsentrasi sampel 0,3 M dan 0,4 M menunjukkan waktu pengukuran charge-discharge yang jauh lebih lama dari elektroda dengan konsentrasi 0,2 M.

Tabel 4. Nilai kapasitansi spesifik dan resistansi spesifik 1M KOH

Konsentrasi sampel	C _{sp} (F g ⁻¹)	Resistansi (10 ⁻³ Ω)
0,2 M	44,60	30
0,3 M	172,66	28
0,4 M	111,06	23

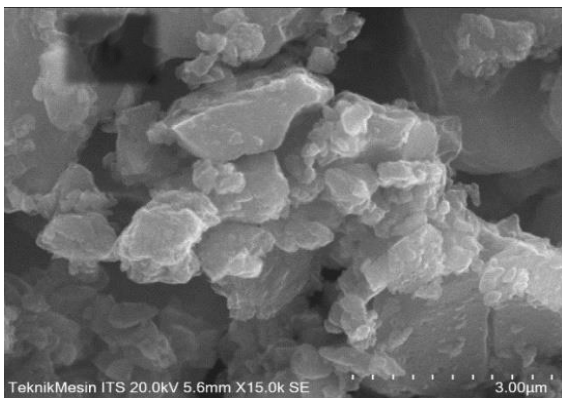
Pada Tabel 4 dapat dilihat bahwa nilai kapasitansi spesifik tertinggi adalah 172,66 F/g⁻¹ didapatkan dari konsentrasi 0,3 M. Hal ini menyebabkan elektroda dengan konsentrasi sampel 0,3 M dan 0,4 M dapat diisi dengan lebih banyak ion atau elektrolit (Taer *et al.*, 2015) dibanding dengan elektroda dengan konsentrasi sampel 0,2 M. Serta Superkapasitor berdasarkan sampel 0,2 M memiliki waktu pengosongan yang lebih pendek dari pada

sampel 0,3 M dan 0,4 M. Sampel 0,3 M dan 0,4 M memiliki yang terpanjang waktu pengosongan.

Pada pengujian sifat elektrokimia sel superkapasitor dengan menentukan nilai kapasitansi spesifik dari sel superkapasitor menggunakan metode CV dan GCD sehingga dapat disimpulkan sampel yang memiliki kapasitansi spesifik yang terbesar yaitu sampel 0.3 M menggunakan elektrolit 1 M H₂SO₄. Sehingga diperlukan beberapa karakterisasi tambahan untuk mengetahui bagaimana bentuk morfologi dan luas permukaan dari sampel 0.3 M menggunakan elektrolit 1 M H₂SO₄.

Scanning Electron Microscopy (SEM)

Gambar 6 menunjukkan perbandingan mikrogram SEM dari morfologi permukaan elektroda dengan konsentrasi molaritas NaOH yang bervariasi masing-masing 0,3 M, pada perbesaran 15000X. Mikrogram ini dengan jelas menunjukkan bahwa semua elektroda karbon berpori dengan ukuran dan bentuk pori makro yang berbeda antara butir dan batas. *Scanning electron microscopy (SEM) micrographs* biasanya digunakan untuk menunjukkan perubahan morfologi material, akibat perlakuan termal atau kimia, selama proses konversi bahan baku menjadi karbon aktif (Gonzales *et al.*, 2017). Dalam penelitian superkapasitor, SEM digunakan untuk melihat penyebaran ukuran pori pada permukaan karbon dengan distribusi ukuran mikropori yang tinggi.



Gambar 6 SEM Mikrogram elektroda karbon dari ampas biji kopi robusta dengan perbesaran 15.000X

Pada Gambar 6 dengan pembesaran perbesaran 15000X menunjukkan bentuk permukaan yang kasar dengan pori-pori kecil seperti serpihan. Pori-pori ini terbentuk dari reaksi kimia antara ampas biji kopi dengan NaOH selama proses aktivasi. NaOH akan terurai menjadi natrium selama proses aktivasi (Sattayarut *et al.*, 2019). Selain itu, Mikrogram ini menunjukkan bahwa ukuran volume pori dari karbon aktif besar dengan distribusi ukuran pori yang tidak merata. Aktivasi NaOH menghasilkan banyaknya mesopori, hal ini menunjukkan aktivator NaOH bisa berfungsi dengan baik dalam membentuk struktur berpori selama proses karbonisasi.

Struktur berpori akan menghasilkan pori yang terbuka sehingga dapat meningkatkan proses difusi dan transfer ion elektrolit. Penggunaan aktivator NaOH pada karbon dari ampas biji robusta dapat memperluas permukaan dari karbon aktif dengan menarik gugus fungsi yang terdapat di permukaan karbon (Aziz *et al.*, 2020). Hal yang serupa juga dilaporkan oleh penelitian (Yahya *et al.*, 2015) bahwa bentuk morfologi SEM dipengaruhi oleh sifat bahan biomassa, bahan pengaktif kimia, dan perlakuan lain yang digunakan dalam produksi karbon aktif.

Energy Dispersive X-Ray (EDX)

Tabel 5 menunjukkan kandungan unsur yang terdapat pada karbon aktif dari ampas kopi robusta dengan menggunakan EDX. Analisa EDX terhadap karbon aktif dari limbah ampas biji kopi robusta menunjukkan komposisi material yang terdapat pada elektroda konsentrasi 0,3 M NaOH. *Energy Dispersive X-Ray (EDX)* digunakan untuk mengetahui kandungan unsur kimia dari suatu material. Prinsip kerja dari EDX yaitu dengan menangkap sinyal (Fluoresensi) dan sinar X yang dikeluarkan.

Tabel 5. Komposisi unsur yang terdapat pada karbon aktif ampas biji kopi robusta

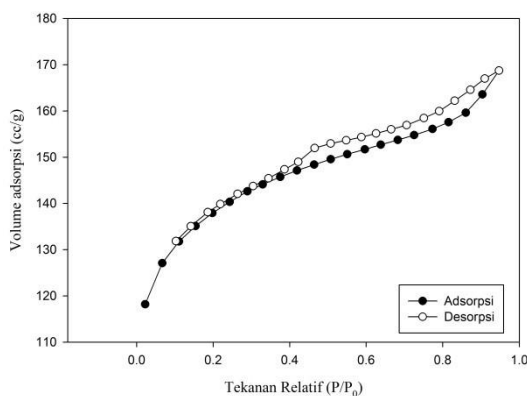
Unsur	Berat (%)
C	49,37
O ₂	21,35
Na	5,38
Mg	1,29
K	2
Ca	1,08
N	10,16
Si	6,99
P	1.05
Al	0,41

Pada Tabel 5 menunjukkan hasil analisa EDX menunjukkan bahwa komposisi kimia terbanyak pada sampel karbon aktif ampas biji kopi adalah karbon. Analisa ini dapat dilihat bahwa material karbon mengandung 49,37% karbon, 21,35% oksigen, 5,38% Natrium, 1,29% Magnesium, 2% Kalium, 1,08% kalsium, 6,99% Silicon, 10,16% Nitrogen dan 0,41% Aluminium. Kandungan yang terbanyak hasil uji EDX setelah unsur karbon yaitu oksigen, Unsur oksigen yang berasal dari bahan baku yang tertinggal karena proses karbonisasi yang tidak sempurna (Zheng *et al.*, 2017). Unsur Si umumnya ditemui dalam sampel karbon yang berasal dari bahan biomassa. Unsur K dapat disebabkan oleh pencucian yang kurang bersih dalam proses persiapan elektroda, dan unsur Na berasal dari aktivator NaOH (Aziz *et al.*, 2020). Hal yang serupa juga dilaporkan oleh penelitian (Taer *et al.*, 2019), mengenai sintesis karbon nanofiber berasal dari serat daun nanas sebagai elektroda

karbon untuk aplikasi superkapasitor, hasil karakterisasi EDX pada elektroda serat daun nanas didominasi oleh karbon dengan persentasi atom berkisar 79-83% dan oksigen 13-17,14% serta unsur-unsur lain seperti magnesium, kalium, dan kalsium berasal dari serat daun nanas.

Isoterm Adsorpsi-desorpsi Gas N_2

Menurut standarisasi IUPAC, semua data isoterm adalah profil tipe IV (Sing, 1985). Tipe IV menandai loop histeresis pada kisaran tekanan relatif 0,40-0,9 P/P_0 , yang menunjukkan bahwa material tersebut mesopori (Taer et al., 2019). Karakter kurva isoterm dengan peningkatan volume yang teradsorpsi secara tiba-tiba dan grafik yang membulat berada pada kisaran tekanan relatif yang lebih rendah. Oleh karena itu, semua elektroda memiliki distribusi ukuran pori yang luas, yang berkisar dari mikropori hingga mesopori. Kurva adsorpsi dan desorpsi dari penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Kurva adsorpsi dan desorpsi dari karbon aktif ampas biji kopi robusta.

Pada Gambar 7 menunjukkan hubungan antara volume adsorpsi (cm^3g^{-1}) terhadap tekanan relative (atm). Kurva isoterm ini menunjukkan bahwa adsorpsi pada karbon aktif dari ampas biji kopi tergolong isoterm tipe IV berdasarkan klarifikasi IUPAC. Karakteristik tipe IV ini menunjukkan adanya *loop hysteresis* pada tekanan relative ($P/P_0 = 0,4 - 0,99$), yang sesuai dengan kondensasi kapiler dalam ukuran mesopori (Biswal et al., 2013). Struktur pori yang terbentuk berperan untuk meningkatkan nilai kapasitansi yang didapatkan.

Makropori memiliki jarak yang relative pendek untuk terjadinya difusi ion pada permukaan elektroda (Zhang et al., 2017). Pada mesopori jalur transport ion relative lancar tanpa hambatan ke permukaan elektroda atau elektrolit (Song et al., 2015). Mikropori dapat menghasilkan luas permukaan yang tinggi untuk meningkatkan area aktif pada ion sehingga memungkinkan terjadinya lapis ganda listrik (Wu et al., 2020). Ketiga Pori yang saling terhubung dapat mencapai kinerja superkapasitor dengan rapat energi yang tinggi (Fu et al., 2018).

Dari pengujian BET untuk konsentrasi aktivator 0.3 M didapatkan hasil berupa luas permukaan spesifik $739,911 \text{ m}^2/\text{g}$, Ukuran pori rata-rata $4,433 \text{ nm}$ Volume pori $0,822 \text{ cm}^3/\text{g}$. peningkatan total volume pori seiring dengan peningkatan luas permukaan spesifik karena luas permukaan spesifik berbanding lurus dengan total volume pori (Lowell et al., 2004).

Kesimpulan

Elektroda karbon aktif dari ampas biji kopi robusta telah berhasil dibuat, Variasi konsentrasi aktivator pada 0,2 M, 0,3 M dan 0,4 M, Kapasitansi spesifik elektroda karbon ampas biji kopi robusta berdasarkan hasil pengujian menggunakan metode CV diperoleh kapasitansi spesifik dengan elektrolit 1 M H_2SO_4 adalah 130 F/g^{-1} pada konsentrasi 0,3 M, dan pada pengujian menggunakan metode GCD diperoleh kapasitansi spesifik dengan elektrolit 1 M H_2SO_4 adalah $198,53 \text{ F/g}^{-1}$ pada konsentrasi 0,3 M. didapatkan bahwa konsentrasi aktivator 0,3 M memiliki pengaruh yang paling bagus dalam pembuatan elektroda ampas biji kopi. Sifat fisis dari karbon aktif ampas biji kopi robusta telah dilakukan meliputi analisa densitas, penurunan densitas setelah karbonisasi-aktivasi berkisar antara 9%-35%. Luas permukaan spesifik elektroda karbon tertinggi adalah $739,911 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$, kandungan unsur elektroda karbon berdasarkan karakterisasi EDX didominasi oleh unsur karbon yaitu 49,37%.

Referensi

- Aziz, H., Tetra, O.N., Alif. A., Syukri, dan Ramadhan, W. (2020) Electrical properties of supercapacitor electrode based on activated carbon from waste palm kernel shells. *Der Pharma Chemica*. **8**(15):227-232.
- A. Burke. (2000) Ultracapacitor: why, how, and where is the technology. *Journal of power sources*. **91**: 37-50.
- Abioye, A. M., dan Ani, F. N. (2015) Recent development in the production of activated carbon electrodes from agricultural waste biomass for supercapacitors: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **52**:1282–1293.
- Namisyk, A. M., dan Zhu, J. G. (2003) A survey of electrochemical supercapacitor technology. *Faculty of Engineering University of Technology*. Sidney, Australia. pp. 1-6.
- Taer, E. A., Apriwandi, Y. S., Ningsih, R., Taslim, dan Agustino. (2019) Preparation of activated carbon electrode from pineapple crown waste for supercapacitor application. *International Journal of Electrochemical Science*. **14**: 2462-2475.
- Fu, Y., Zhang, N., Shen, Y., Ge, X., dan Chen, M. (2018) Micro-mesoporous carbons from original and pelletized rice husk via one step catalytic pyrolysis. *Bioresource Technology*. **269**: 67–73.
- Ismanto, A. E., Wang, Steven, Soetaredjo, F. E., dan Ismadji, S. (2010) Preparation of capacitor's electrode from cassava peel waste. *Bioresource Technology*. **101**: 3534.
- Kalpna, D., Cho, S. H., Lee, S. B., Lee, Y. S., Misra, R., dan Renganthan, N. G. (2009) Recycled waste paper-a new

- source of raw material for electric double-layer capacitors. *Journal of Power Sources*. **190**: 587-591.
- Kampouris, D. K., Ji, X., Randviir, E. P., dan Banks, C. E. (2015) A new approach for the improved interpretation of capacitance measurements for materials utilized in energy storage. *RSC Advances*. **5**(17): 12782–12791.
- Sing, K. S. W., Everett, D. H., Haul, R. A., Moscou, L., Pierotti, R. A., Rouquerol J., dan Siemieniewska, T. (1985) Reporting physisorption data for gas/solid system with special reference to the determination of surface area and porosity. *Pure and Applied Chemistry*. **57**: 603-619.
- Lowell, S., Joan E., S., Martin, A., T., dan Matthias, T. (2004) Characterization of porous solids and powders: surface area, pore size and density. *The Netherlands: Kluwer Academic Publishers*. Philip Drive Norwell, USA. pp. 1-349.
- Kotz, R., dan Carlen, M. (2000) Principles and applications of electrochemical capacitors. *Electrochimica Acta*. **45**: 2483–2498.
- Rifani, Z. A., Taer, E., dan Taslim, R. (2018) Pengaruh temperatur aktivasi fisika terhadap kinerja superkapasitor berbasis elektroda karbon dari ampas sagu. *Prosiding Seminar Nasional Fisika Universitas Riau*. pp. 100-105.
- Scott, K. (2016). Electrochemical principles and characterization of bioelectrochemical systems. Microbial electrochemical and fuel cells. *Microbial Electrochemical and Fuel Cells*. pp. 29-66
- Song, T., Liao, J. M., Xiao, J., dan Shen, L. H. (2015) Effect of micropore and mesopore structure on CO₂ adsorption by activated carbons from biomass. *New Carbon Materials*. **30**(2): 156–166.
- Saragih, S. A. (2008) Pembuatan dan karakterisasi karbon aktif dari batubara riau sebagai adsorbent. *Universitas Indonesia*. Jakarta, Indonesia.
- Tiriono, M., dan Sabit, A. (2011) Efek suhu pada proses pengarangan terhadap nilai kalor arang tempurung kelapa (*Coconut shell charcoal*). *Neutrino*. **3**(2): 143 – 152.
- Taer, E., Apriwandi, Agustino, S. T., Taslim, R., dan Mustika. (2020) Stuktur pori tiga dimensi dari karbon aktif monolitik yang diturunkan dari batang bamboo hierarkis untuk aplikasi superkapasitor. *Advanced Materials Research*. **896**: 22-30.
- Taer, E., Apriwandi, Agustino, S. T., Taslim, R., Natalia, dan Farma, K. (2020) Sintesis karbon aktif nano fiber elektroda yang terbuat dari daun akasia (*Acacia mangium wild*) sebagai superkapasitor. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*. **11**: 25007-25014.
- Taer, E., Satri, Taslim, R., dan Iwantono. (2014) Elektroda komposit karbon aktif dari kulit ubi kayu-karbon nano tube-polianelin untuk aplikasi superkapasitor. *Seminar Rapat Tahunan*. pp. 39-46.
- Taer, E., Zulkifli, Arif, E. N., dan Taslim, R. (2016) Analisa kapasitansi spesifik elektrodakarbon superkapasitor dari kayu karet terhadap laju scan berdasarkan variasi aktivasi HNO₃. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*. **1**(1): 29-34
- Tetra, O. N. (2018). Superkapasitor berbahan dasar karbon aktif danlarutan ionik sebagai elektrolit. *Jurnal Zarah*. **6**(1), 39-46.
- Ruiz, V., Blanco, C., Grand, M., Menendez, R., dan Santamaria, R. (2007) Influence of electrode preparation on the electrochemical behaviour of carbon-based supercapacitors. *Journal of Applied Electrochemistry*. **37**: 717-721.
- Wu, J., Xia, M., Zhang, X., Chen, Y., Sun, F., Wang, X., Yang, H., dan Chen, H. (2020) Hierarchical porous carbon derived from wood tar using crab as the template: Performance on supercapacitor. *Journal of Power Sources*. **455**: 1-9
- Zhang, Y., Yu, S., Lou, G., Shen, Y., Chen, H., Shen, Z., Zhao, S., Zhang, J., Chai, S. dan Zou, Q. (2017) Review of macroporous materials as electrochemical supercapacitor electrodes. *Journal of Materials Science*, **52**(19): 11201–11228
- Zhong, C., Deng, Y., Hu, W., Qiao, J., Zhang, L., dan Zhang, J. (2015) A Review of Electrolyte Materials and Compositions for Electrochemical Supercapacitors. *Chemical Society Reviews*. **44**: 7484-7539.