

Pemanfaatan Limbah Ban Bekas untuk Sintesis Nanokomposit MnO₂/C dengan Metode Hidrotermal sebagai Material Superkapasitor

Rizky Putra Adithia¹, Ahmad Ali Muckharom¹, Tabah Ditalistya², Putri Diah Wahyu Karimah², Agus Subagio^{1*}

¹Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia

²Departemen Kimia, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia

Corresponding Author:
Agus Subagio
agusubagio@lecturer.undip.ac.id

Received: February 2024
Accepted: September 2024
Published: September 2024

© Agus Subagio et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Abstract

Activated carbon from waste tires is used as MnO₂ metal oxide doping in making MnO₂/C-based nanocomposites into high-density and environmentally friendly supercapacitor electrodes. The MnO₂/C nanocomposite synthesis process was carried out using the hydrothermal method by varying the mass of activated carbon by 1.25 g, 2.5 g and 3.75 g to determine the optimum results. Based on the results of research that has been carried out, it shows that MnO₂/C can be used as a high density supercapacitor electrode. This is in accordance with the XRD test results which show that the MnO₂ nanocomposite with the addition of C was successfully synthesized and has an orthorhombic crystalline phase. The SEM test results show that the material has almost the same morphology, namely many protrusions which make each particle have high roughness. The most optimal results were obtained from the MnO₂/C-50 variation because it has the highest C element content, namely 39.93%, so it has the highest capacitance value of 5.791 f/g during the CV test. The GCD test shows that electrodes with a carbon variation of 2.5 g have a much longer and constant charge-discharge measurement time. In the EIS test, this variation shows a resistance value that is not too high and not too small, materials that have good storage capacity or capacity have moderate resistance.

Keywords: *Supercapacitors, Waste Tires, Carbon, Nanocomposites, MnO₂/C*

Pendahuluan

Salah satu perangkat yang paling berpotensi sebagai penyimpan energi masa depan adalah superkapasitor. Superkapasitor dianggap sebagai perangkat penyimpanan energi generasi baru karena memiliki beberapa kelebihan seperti kepadatan energi tinggi^[1], kapasitas energi lebih besar^[2], *cycle life* yang lama^[3], wilayah suhu operasi yang luas^[4], stabilitas tinggi, dan lebih ramah lingkungan^[5].

Superkapasitor mempunyai dua elemen penting yaitu elektroda dan elektrolit. Bahan elektroda superkapasitor sangat berperan dalam penyimpanan energi^[6]. Saat ini, elektroda dengan kinerja yang baik dapat dibuat dari berbagai bahan, termasuk bahan berbasis karbon, oksida logam transisi, dan polimer konduktif. Diantara berbagai oksida logam transisi, MnO₂ merupakan bahan penyimpan muatan yang ideal untuk superkapasitor^[7].

MnO₂ adalah bahan elektroda superkapasitor yang ideal karena memiliki karakteristik unggul seperti nilai rasio teoritis penyimpanan yang tinggi (hingga 1.370 F/g), energi spesifik, densitas yang tinggi, biaya relatif murah, toksisitas rendah, dan ramah lingkungan^[8]. Akan tetapi, material ini memiliki konduktivitas listrik rendah dan difusi proton yang cukup lamban. Hal ini menyebabkan perlunya rekayasa material agar dapat meningkatkan performa material MnO₂, cara yang dapat dilakukannya yaitu dengan menurunkan dimensi partikel hingga skala nanometer dan penambahan *conductive agent* berupa karbon untuk meningkatkan performa^[9].

Salah satu bahan yang berpotensi sebagai sumber karbon adalah limbah ban bekas. Ban bekas mempunyai kandungan *fixed carbon* yang tinggi serta ketersediaan limbah yang terus meningkat setiap tahunnya bahkan hingga mencapai 11 juta ban bekas. Oleh sebab itu, diperlukan penanganan agar tidak menimbulkan permasalahan lingkungan seperti pencemaran^[10]. Tingginya kandungan *fixed carbon* ban bekas dibuktikan dari riset^[2], yang menunjukkan kandungan *fixed carbon* limbah ban bekas mencapai 77,7% melebihi nilai *fixed carbon* dari tempurung kelapa yaitu 20,96%^[11], dan *fixed carbon* eceng gondok sebanyak 72,02%^[12]. Kandungan *fixed carbon* ban bekas yang tinggi sangat berpotensi digunakan sebagai sumber *conductive agent* agar dapat meningkatkan performa elektroda MnO₂.

Metode hidrotermal merupakan proses pembentukan material dengan menggunakan air pada suhu rendah dan tekanan tinggi untuk merubah struktur kristal dan membentuk material nanostruktur^[9]. Metode hidrotermal dapat dilakukan pada suhu dan tekanan yang rendah serta dengan bantuan pelarut sebagai pembentuk suatu material berpori. Prinsip hidrotermal adalah menurunkan nilai tegangan pada material dengan cara memecahkan ikatan-ikatan senyawa amorf pada material dengan uap air pada temperatur tertentu sehingga diharapkan terjadinya peningkatan ukuran partikel^[10].

Dari permasalahan tersebut, diperoleh inovasi riset yang bertujuan untuk merekayasa elektroda MnO₂ dengan cara menambahkan doping karbon dari limbah ban bekas sebagai bahan dasar alternatif pembuatan elektroda yang dapat menunjang superkapasitor berdensitas energi tinggi. Sehingga dengan adanya inovasi ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi dari superkapasitor dan dapat mengatasi permasalahan lingkungan akibat limbah ban bekas.

Metodologi Penelitian

Bahan kimia

Bahan-bahan yang digunakan dalam riset ini adalah limbah ban bekas, kalium hidroksida (KOH), kalium permanganat (KMnO₄), asam sulfat (H₂SO₄), etanol, akuades, polivinilidena fluorida (PVDF), natrium sulfat (Na₂SO₄) dan N-Metil-2-pirolidon (NMP).

Peralatan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah gelas ukur, sarung tangan, masker, pipet tetes, tisu, batang pengaduk, *hot plate stirrer*, *aluminium foil*, cawan petri, pinset gelas ukur, neraca analitik, alat uji CV, EIS, XRD dan alat-alat kimia lainnya.

Prosedur penelitian

Sintesis Karbon (C) dari Ban Bekas

Sintesis diawali dengan memotong ban bekas menjadi kecil-kecil, kemudian ban bekas ditimbang untuk menentukan berat awal. Potongan ban bekas dikarbonasi dengan furnace pada suhu 600 °C. Kemudian menimbang ulang hasil pembakaran untuk menentukan presentase penyusutan berat dan diayak dengan saringan 100 mesh. Hasil ayakan merupakan granul yang akan diaktivasi. Proses aktivasi karbon diawali dengan pencampuran granul dan KOH dengan perbandingan granul:KOH sebesar 2:1 dan diaduk selama 5 jam. Hasil pencampuran dipanaskan dengan menggunakan oven pada suhu 100 °C kemudian diradiasi gelombang mikro selama 10 menit.

Sintesis Nanokomposit MnO₂/C Limbah Ban Bekas

Nanokomposit MnO₂/C disintesis dengan menggunakan metode *hydrothermal*. Langkah pertama adalah mencampurkan 19,75 g KMnO₄, 20 mL H₂SO₄ 4 M dan 375 mL akuades dengan *magnetic stirrer* pada suhu 35 °C selama 2,5 jam. Hasil larutan kemudian ditambahkan karbon ban bekas dengan 3 variasi yaitu 1,25 g, 2,5 g dan 3,75 g, setelah itu diaduk menggunakan *magnetic stirrer* hingga menjadi homogen pada suhu 40 °C. Selanjutnya, hasil campuran yang sudah homogen dimasukkan ke dalam *autoclave* dan dipanaskan pada suhu 160°C selama 15 jam. Larutan hasil pemanasan *autoclave* kemudian dipanaskan kembali menggunakan oven hingga terbentuk serbuk yang sudah kering sempurna. Material dibasuh dengan etanol untuk menghilangkan zat pengotor, selanjutnya material dipanaskan pada suhu 60 °C menggunakan oven. Hasil pemanasan merupakan produk nanokomposit MnO₂/C limbah ban bekas. Berdasarkan tabel 1 dapat dilihat bahwa hasil sintesis terdiri dari 3 variasi yaitu MnO₂/C – 25 (Massa karbon 1,25 g), MnO₂/C – 50 (Massa karbon 2,5 g), dan MnO₂/C – 75 (Massa karbon 3,75 g).

Preparasi Lembaran Elektroda Superkapasitor

Proses pembuatan lembaran elektroda superkapasitor dilakukan dengan mencampurkan material MnO₂/C dan PVDF dengan rasio 80:20 ke dalam N-Metil-2-pirolidon (NMP) untuk mendapatkan *slurry* elektroda. Langkah selanjutnya yang dilakukan ialah penuangan *slurry* ke atas lembaran kaca untuk dilakukan proses *casting* (perataan), kemudian *slurry* dibiarkan hingga kering pada udara bebas. Proses pengeringan memerlukan

]

Tabel 1. Variasi Komposisi Karbon

Nanokomposit MnO ₂ /C Ban Bekas	Massa KMnO ₄ (g)	Massa Karbon (g)
MnO ₂ /C – 25	3,95	1,25
MnO ₂ /C - 50	3,95	2,5
MnO ₂ /C - 75	3,95	3,75

waktu 2 hari agar lembaran elektroda dapat kering secara sempurna.

Pengukuran

Pengujian yang dilakukan dalam pembuatan elektroda superkapasitor ini terdiri dari Uji *X-Ray Diffraction* (XRD), Uji *Galvanostatic Charge Discharge* (GCD), Uji *Cyclic Voltametry* (CV), dan Uji *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS). Uji XRD bertujuan untuk mengetahui ukuran dan fase kristalin dari material nanokomposit MnO₂/C. Uji GCD bertujuan untuk menganalisis kapasitas spesifik superkapasitor. Uji *Cyclic Voltametry* (CV) untuk mengetahui proses elektrokimia reduksi dan oksidasi pada superkapasitor. Uji *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) untuk menganalisis sifat elektrokimia superkapasitor.

Hasil dan Diskusi

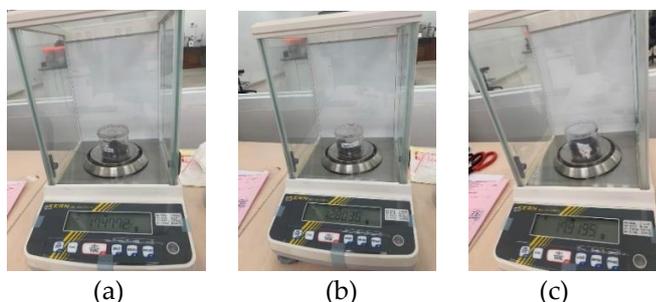
Dalam riset ini proses sintesis elektroda berbasis nanokomposit MnO₂/C dilakukan dengan tiga tahap, yaitu tahap sintesis karbon aktif dari ban bekas, tahap sintesis nanokomposit MnO₂/C, dan tahap preparasi lembaran elektroda superkapasitor. Pada sintesis karbon diperoleh hasil material berupa serbuk karbon aktif berwarna hitam pekat. Pada saat pembakaran ban bekas terjadi penyusutan berat yang semula 50 g menjadi 10,4 g dengan rendemen arang aktif sebesar 20,8%. Kemudian, setelah diaktivasi karbon aktif mengalami penyusutan berat menjadi 8,9 g dengan rendemen karbon aktif sebesar 85,6%, hal ini dikarenakan adanya proses karbonisasi ketika sintesis dan pemanasan pada saat aktivasi. Dapat dilihat hasil sintesis dari sintesis karbon pada gambar 1, karbon berbentuk serbuk halus berwarna hitam pekat.



Gambar 1. Hasil Sintesis Karbon Ban Bekas



Gambar 2. Hasil Sintesis Nanokomposit MnO₂/C



Gambar 3. Hasil Penimbangan Sintesis Nanokomposit MnO₂/C-25 (a), MnO₂/C-50 (b), MnO₂/C-75 (c)

Hasil yang diperoleh dari proses sintesis nanokomposit MnO₂/C menggunakan 3 variasi yaitu 1,25 g, 2,5 g, dan 3,75 g berupa material serbuk halus berwarna hitam keunguan. Ketiga material memiliki bentuk fisik yang sama dan warna yang sedikit berbeda pada variasi 1,25 g memiliki warna yang kurang pekat, hal ini dikarenakan jumlah karbon yang ditambahkan paling sedikit jika dibandingkan dengan variasi yang lain seperti yang dapat dilihat pada gambar 2. Sedangkan kuantitas dari hasil yang diperoleh terdapat sedikit perbedaan ketika penimbangan. Pada variasi karbon 1,25 g, 2,5 g, dan 3,75 g diperoleh serbuk nanokomposit MnO₂/C secara berturut – turut sebanyak 17,47 g, 17,8 g, dan 17,92 g seperti yang dapat dilihat pada gambar 3.

Hasil yang diperoleh dari proses preparasi elektroda (Gambar 4) superkapasitor berupa lembaran yang sangat tipis berwarna hitam pekat berbentuk persegi panjang yang

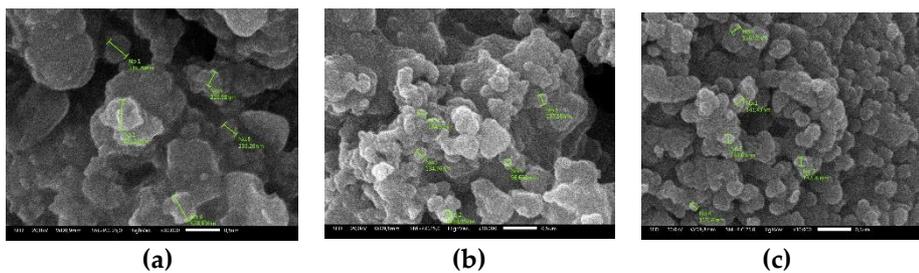
merupakan bagian elektroda untuk superkapasitor.

Uji SEM yang digunakan pada riset ini yaitu SEM – EDX bertujuan untuk menganalisa morfologi dan mengetahui kandungan unsur yang terdapat pada nanokomposit MnO₂/C. Berdasarkan analisa morfologi permukaan material, diketahui bahwa material nanokomposit ini memiliki banyak tonjolan yang membuat setiap partikel memiliki kekasaran yang tinggi. Tonjolan – tonjolan tersebut merupakan partikel MnO₂ dengan karbon yang beraglomerasi. Hasil karakterisasi SEM dianalisis lebih lanjut untuk menentukan ukuran rata – rata partikel pada variasi material MnO₂/C-25, MnO₂/C-50, MnO₂/C-75. Pengukuran dilakukan dengan mengukur partikel yang berbentuk spheris (berupa tonjolan), diketahui bahwa ukuran diameter MnO₂/C yang disintesis dengan variasi karbon 1,25 g, 2,5 g, dan 3,75 g secara berturut – turut sebesar 333,704 μm ; 141,782 μm ; dan 137,618

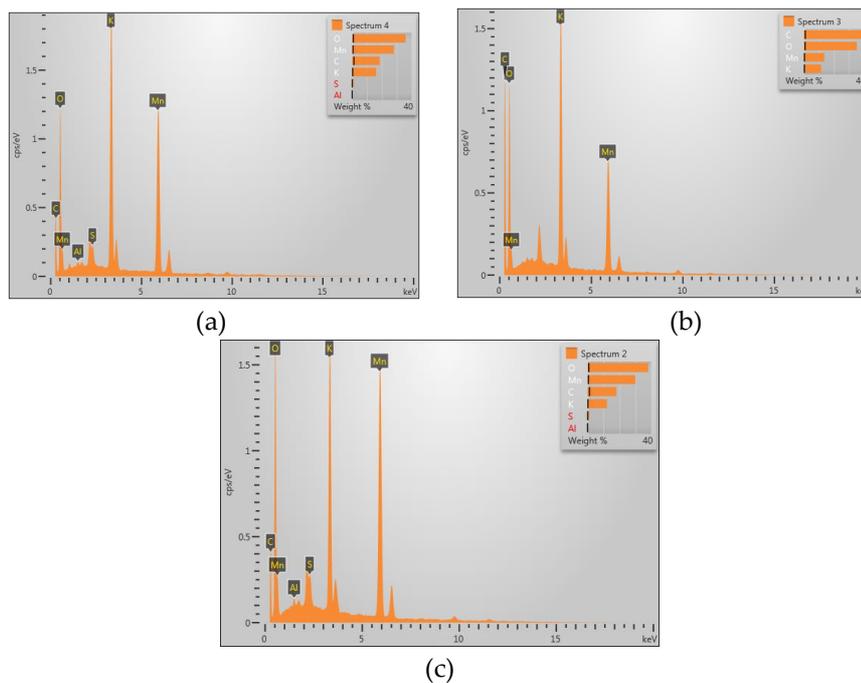
µm (terlihat pada gambar 5). Dapat disimpulkan bahwa semakin banyak karbon yang ditambahkan maka semakin kecil diameter partikel, dari hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan karbon dapat mengurangi aglomerasi antar partikel sehingga diperoleh ukuran partikel yang lebih kecil [13].

Berdasarkan data uji EDX pada gambar 6, nanokomposit MnO₂/C mengandung tiga unsur utama dengan kandungan paling tinggi berupa karbon (C), oksigen (O), dan mangan (Mn). Selain itu, terdapat unsur lain seperti kalium (K), sulfur (S), dan aluminium (Al). Pada variasi karbon 1,25 g terkandung unsur Mn sebanyak 28,14%, O sebanyak 35,98%, dan C sebanyak 32,48%. Pada variasi karbon 2,5 g terkandung unsur Mn sebanyak 13,48%, O sebanyak 35,21%, dan C sebanyak 39,93%. Pada

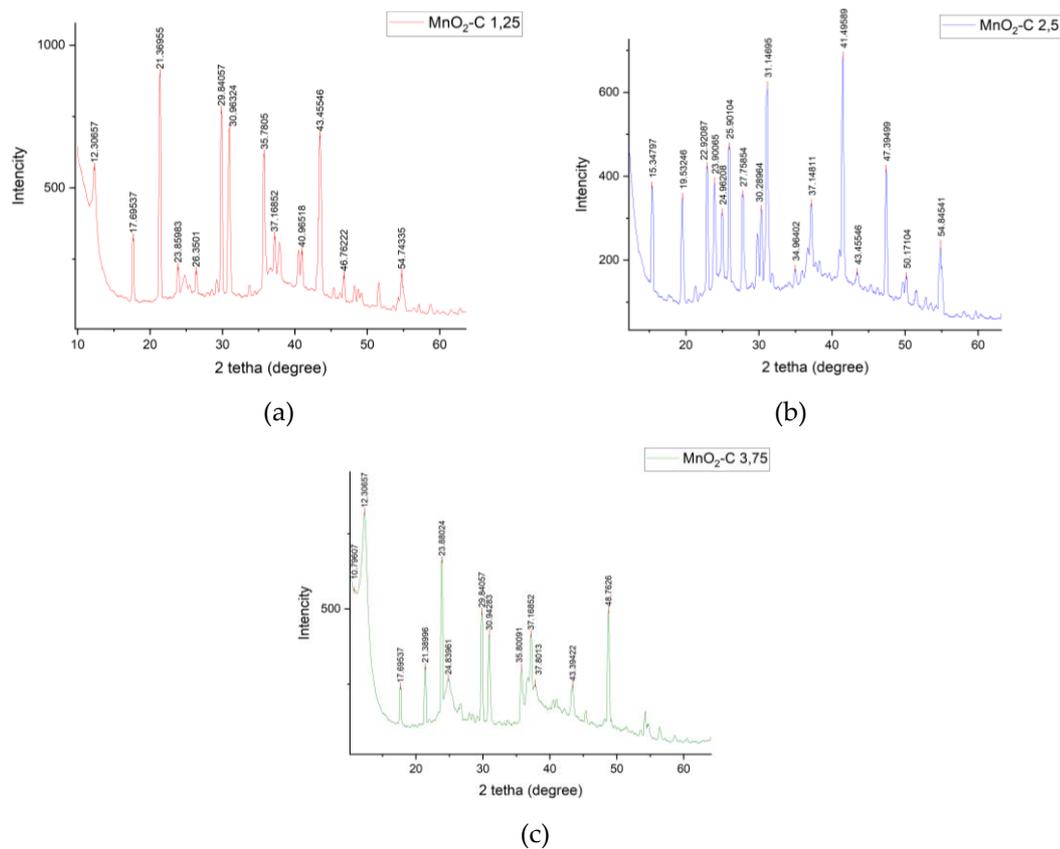
variasi karbon 3,75 g terkandung unsur Mn sebanyak 30,10%, O sebanyak 38,19%, dan C sebanyak 18,13%. Karbon yang ditambahkan mungkin tidak diintegrasikan ke dalam sampel seperti yang diharapkan, atau mungkin hilang karena berbagai faktor, seperti kontaminasi karbon pada permukaan sampel, masalah preparasi sampel dan kekasaran permukaan, keterbatasan detektor EDX, efek absorpsi X-ray dan fluoresensi^[14]. Dapat disimpulkan bahwa material yang mengandung unsur C paling tinggi yaitu pada variasi karbon 2,5 g. Komposisi unsur C dengan persentase massa paling tinggi menandakan bahwa nilai kapasitansi material semakin baik. Hal ini dikarenakan semakin banyak unsur karbon yang terkandung di dalamnya maka semakin banyak muatan yang akan tersimpan, karena yang berperan menyimpan muatan dalam superkapasitor adalah karbon^[15].



Gambar 5. Hasil Karakterisasi SEM MnO₂/C-25 (a), MnO₂/C-50 (b), MnO₂/C-75 (c)



Gambar 6. Hasil Karakterisasi SEM-EDX MnO₂/C-25 (a), MnO₂/C-50 (b), MnO₂/C-75 (c)



Gambar 7. Hasil karakterisasi XRD MnO₂/C-1,25 (a), MnO₂/C-2,50 (b), dan MnO₂/C-3,75 (c)

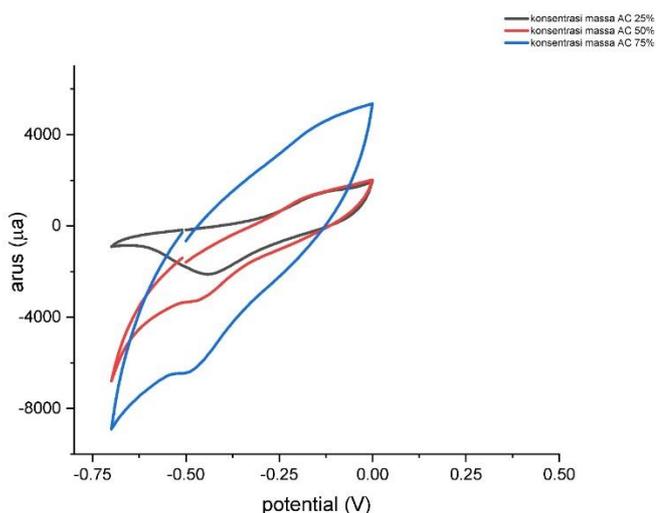
Uji karakterisasi *X-Ray Diffraction* (XRD) bertujuan untuk mengetahui ukuran dan fase kristalin dari material nanokomposit MnO₂/C. Gambar 7 merupakan hasil analisis XRD MnO₂/C-1,25; MnO₂/C-2,5; MnO₂/C-3,75.

Hasil spektrum XRD yang didapatkan dari variasi MnO₂/C-1.25, MnO₂/C-2.50, dan MnO₂/C-3.75 dicocokkan dengan data sheet dari MnO₂/C pada aplikasi Match! Berdasarkan hasil analisa dapat diketahui bahwa struktur dari partikel MnO₂/C dengan variasi karbon 1,25 g, 2,5 g dan 3,75 g berbentuk kristal yang dibuktikan dengan adanya puncak-puncak tajam pada hasil XRD. Ketiga partikel MnO₂/C memiliki fase kristalin berbentuk *orthorhombic* yang diketahui melalui software Match! Hasil yang paling mendekati peak MnO₂/C yaitu material dengan variasi karbon 2,5 g yang dapat dilihat dari peak yang dihasilkan pada variasi ini berbeda dengan peak pada variasi 1,25 g dan 3,75 g [8].

Uji karakterisasi *Cyclic Voltametry* (CV) bertujuan untuk mengetahui proses elektrokimia reduksi dan oksidasi pada superkapasitor. Uji *cyclic voltametry* dilakukan pada kondisi sistem elektroda 3 kaki dimana terdiri dari elektroda kerja (material sintesis) elektroda referensi (Ag/AgCl) dan elektroda balik (platina). Dilakukan pada kondisi elektrolit menggunakan Na₂SO₄ 2 M pada suhu ruangan dengan scan rate 0,05 v/s.

Dari grafik yang ditunjukkan pada gambar 8, kemudian dilakukan perhitungan nilai kapasitansi elektroda superkapasitor, diperoleh hasil seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.

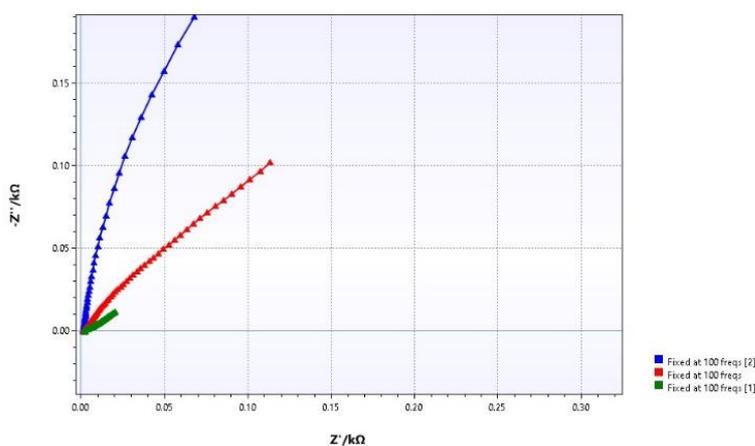
Elektroda dengan variasi karbon 2,5 g atau MnO₂/C - 50 menunjukkan nilai kapasitansi yang paling besar yaitu 155206.93 mAh/g jika dibandingkan elektroda dengan variasi karbon 1,25 g 3,75 g



Gambar 8. Hasil Uji Karakterisasi Cyclic Voltametry (CV)

Tabel 2. Nilai Kapasitansi Elektroda

No	Nanokomposit MnO ₂ /C Ban Bekas	Nilai Kapasitansi (Cp)
1	MnO ₂ /C - 25	43739.89 mAh/g
2	MnO ₂ /C - 50	155206.93 mAh/g
3	MnO ₂ /C - 75	68209.57 mAh/g



Gambar 9. Hasil Uji Karakterisasi Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)

Uji karakterisasi Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) bertujuan untuk menganalisis sifat elektrokimia superkapasitor. Uji EIS dilakukan pada rentan 1 hingga 100000 Hz pada sistem 3 elektroda dengan pelarut Na₂SO₄ 2 M.

Dari grafik yang terlihat pada gambar 9, kemudian dilakukan perhitungan nilai hambatan rangkaian elektroda superkapasitor,

diperoleh hasil seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Berdasarkan nilai hambatan yang telah diperoleh, kita dapat menghitung nilai daya hantar arus listrik menggunakan rumus:

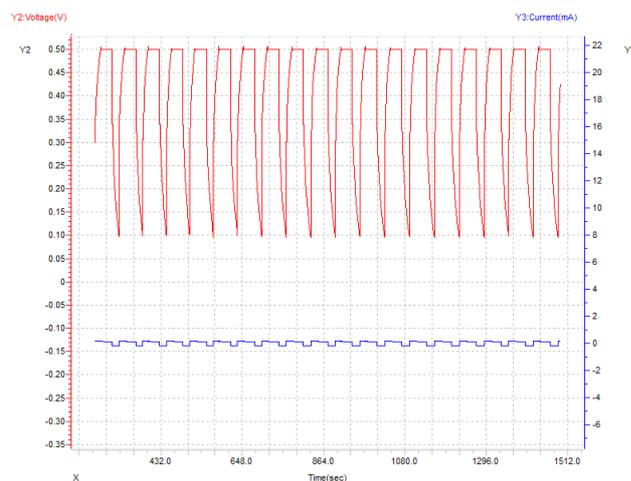
$$G = \frac{1}{R}$$

Tabel 1. Nilai Hambatan Rangkaian

No	Nanokomposit MnO ₂ /C Ban Bekas	Hambatan rangkaian (ohm)
1	MnO ₂ /C - 25	1.615
2	MnO ₂ /C - 50	2.243
3	MnO ₂ /C - 75	3.217

Tabel 4. Nilai Daya Hantar Arus

No	Nanokomposit MnO ₂ /C Ban Bekas	Daya Hantar Arus Listrik (ohm ⁻¹)
1	MnO ₂ /C - 25	0.619
2	MnO ₂ /C - 50	0.446
3	MnO ₂ /C - 75	0.311



(c)

Gambar 10. Hasil karakterisasi GCD MnO₂/C-25 (a), MnO₂/C-50 (b), MnO₂/C-75 (c)

Dengan G adalah daya hantar arus listrik (ohm⁻¹), R adalah hambatan (ohm). Setelah dilakukan proses perhitungan maka kita dapatkan hasil seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.

Setelah dilakukan perhitungan dan analisis diperoleh nilai hambatan dan daya hantar arus setiap variasi MnO₂/C-25 sebesar 1.615 Ω dan 0,619 Ω⁻¹, MnO₂/C-50 sebesar 2.243 Ω dan 0,446 Ω⁻¹, dan MnO₂/C-75 sebesar 3.217 Ω dan 0,311 Ω⁻¹. Dari data tersebut dapat diketahui MnO₂/C - 50 menunjukkan nilai hambatan rangkaian yang paling standar[8]. Pada variasi ini menunjukkan nilai hambatan yang tidak terlalu tinggi dan tidak terlalu kecil, material yang

memiliki daya simpan atau kapasitas yang baik memiliki hambatan yang sedang, karena jika hambatan terlalu kecil maka daya listrik akan lebih mudah lepas dan jika terlalu besar akan mengganggu kinerja elektroda.

Uji karakterisasi *Galvanostatic Charge Discharge* (GCD) bertujuan untuk mengetahui kapasitas spesifik superkapasitor MnO₂/C. Gambar x merupakan hasil analisis GCD MnO₂/C-1,25; MnO₂/C-2,5; MnO₂/C-3,75.

Pada Gambar 10, menunjukkan kurva GCD untuk sel superkapasitor berbahan dasar karbon ban bekas yang diuji menggunakan

elektrolit Na_2SO_4 5 M. Berdasarkan gambar di atas dapat dilihat bahwa ketiga elektroda dengan variasi berat karbon sebanyak 1,25 g, 2,5 g dan 3,75 g menunjukkan waktu charge-discharge yang berbeda. Elektroda dengan variasi karbon 2,5 g menunjukkan waktu pengukuran charge-discharge yang jauh lebih lama dan konstan jika dibandingkan elektroda dengan variasi karbon 1,25 g 3,75 g. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa elektroda pada variasi karbon 2,5 g memiliki kapasitas yang paling tinggi.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa MnO_2/C bisa digunakan sebagai elektroda superkapasitor yang berdensitas tinggi. Hal ini sesuai dengan hasil uji XRD menunjukkan bahwa nanokomposit MnO_2 dengan doping C berhasil disintesis meskipun masih terdapat zat – zat pengotor di dalamnya. Hasil uji SEM – EDX menunjukkan bahwa material memiliki bentuk morfologi yang hampir mirip yaitu memiliki banyak tonjolan yang membuat setiap partikel memiliki kekasaran yang tinggi. Kandungan unsur C pada variasi MnO_2/C -25 sebanyak 32,48%, MnO_2/C -50 sebanyak 39,93%, MnO_2/C -75 sebanyak 18,13%. Hasil uji CV menunjukkan nilai kapasitansi pada variasi MnO_2/C -25 sebesar 1,632 f/g, MnO_2/C -50 sebesar 5,791 f/g, dan MnO_2/C -75 sebesar 32,545 f/g. Hasil uji EIS menunjukkan nilai hambatan dan daya hantar arus disetiap variasi MnO_2/C -25 sebesar 1.615 Ω dan 0,619 Ω^{-1} , MnO_2/C -50 sebesar 2.243 Ω dan 0,446 Ω^{-1} , dan MnO_2/C -75 sebesar 3.217 Ω dan 0,311 Ω^{-1} . Uji GCD menunjukkan waktu charge-discharge yang berbeda, elektroda dengan variasi karbon 2,5 g menunjukkan waktu pengukuran charge-discharge yang jauh lebih lama dan konstan. Dari analisis tersebut dapat disimpulkan bahwa hasil paling optimal diperoleh dari variasi MnO_2/C -50 (penambahan karbon aktif ban bekas sebanyak 2,5 g) yang mengandung unsur C paling banyak sehingga memiliki nilai kapasitansi paling tinggi yang didukung dengan hasil CV dan GCD. Pada uji EIS variasi ini menunjukkan nilai hambatan yang tidak

terlalu tinggi dan tidak terlalu kecil, material yang memiliki daya simpan atau kapasitas yang baik memiliki hambatan yang sedang, karena jika hambatan terlalu kecil maka daya listrik akan lebih mudah lepas dan jika terlalu besar akan mengganggu kinerja elektroda.

Ucapan Terima Kasih

Kami mengucapkan terima kasih kepada beberapa pihak khususnya Direktorat Pembelajaran dan Kemahasiswaan, Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi yang telah memberikan pendanaan PKM – RE yang dilaksanakan pada tahun 2023 ini. Selain itu, kami juga mengucapkan terima kasih kepada Universitas Diponegoro atas segala fasilitas yang telah diberikan, serta Prof. Dr. Agus Subagio, S.Si., M.Si selaku dosen pembimbing dan juga laboratorium nanomaterial.

Daftar Pustaka

1. Y. Jiang *et al.*, "Preparation and electrochemical properties of mesoporous manganese dioxide-based composite electrode for supercapacitor," *J Nanosci Nanotechnol*, vol. 17, no. 1, pp. 507–516, 2017, doi: 10.1166/jnn.2017.12430.
2. M. S. Asl *et al.*, "Flexible all-solid-state supercapacitors with high capacitance, long cycle life, and wide operational potential window: Recent progress and future perspectives," Jun. 01, 2022, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.est.2022.104223.
3. L. Zhang, X. Hu, Z. Wang, F. Sun, and D. G. Dorrell, "A review of supercapacitor modeling, estimation, and applications: A control/management perspective," Jan. 01, 2018, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2017.05.283.
4. X. Li *et al.*, "Novel Synthesis and Characterization of Flexible MnO_2/CNT Composites Co-deposited on Graphite Paper as Supercapacitor Electrodes," *J Electron Mater*, vol. 51, no. 6, pp. 2982–2994, Jun. 2022, doi: 10.1007/s11664-022-09575-x.

5. A. Muzaffar, M. B. Ahamed, K. Deshmukh, and J. Thirumalai, "A review on recent advances in hybrid supercapacitors: Design, fabrication and applications," Mar. 01, 2019, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2018.10.026.
6. K. K. Patel, T. Singhal, V. Pandey, T. P. Sumangala, and M. S. Sreekanth, "Evolution and recent developments of high performance electrode material for supercapacitors: A review," Dec. 15, 2021, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.est.2021.103366.
- 7.] S. Zhang, L. Li, Y. Liu, and Q. Li, "Nanocellulose/carbon nanotube/manganese dioxide composite electrodes with high mass loadings for flexible supercapacitors," *Carbohydr Polym*, vol. 326, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.carbpol.2023.121661.
8. X. Wang, J. Chu, H. J. Yan, and H. K. Zhang, "Synthesis and characterization of MnO₂/Eggplant carbon composite for enhanced supercapacitors," *Heliyon*, vol. 8, no. 9, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e10631.
- 9.] Y. Wang *et al.*, "Recent progress in carbon-based materials for supercapacitor electrodes: a review," Jan. 01, 2021, *Springer*. doi: 10.1007/s10853-020-05157-6.
10. W. Raza *et al.*, "Recent advancements in supercapacitor technology," Oct. 01, 2018, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.nanoen.2018.08.013.
11. B. K. Saikia, S. M. Benoy, M. Bora, J. Tamuly, M. Pandey, and D. Bhattacharya, "A brief review on supercapacitor energy storage devices and utilization of natural carbon resources as their electrode materials," Dec. 15, 2020, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.fuel.2020.118796.
12. J. Wang, X. Zhang, Z. Li, Y. Ma, and L. Ma, "Recent progress of biomass-derived carbon materials for supercapacitors," Mar. 01, 2020, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.jpowsour.2020.227794.
13. E. Meyer, A. Bede, D. Mutukwa, R. Taziwa, and N. Zingwe, "Optimization, and analysis of carbon supported VS₂ nanocomposites as potential electrodes in supercapacitors," *J Energy Storage*, vol. 27, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.est.2019.101074.
14. S. K. Kim, I. J. Park, D. Y. Lee, and J. G. Kim, "Influence of surface roughness on the electrochemical behavior of carbon steel," *J Appl Electrochem*, vol. 43, no. 5, pp. 507–514, May 2013, doi: 10.1007/s10800-013-0534-5.
15. M. Alzaid, F. Alsalh, and M. Z. Iqbal, "Biomass derived activated carbon based hybrid supercapacitors," *J Energy Storage*, vol. 40, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.102751.