

**DEPOSISI NANOPARTIKEL MnO_2 PADA PERMUKAAN KARBON
TEMPURUNG KEMIRI (*Aleurites moluccana* L) TERAKTIVASI
 H_3PO_4 DAN APLIKASINYA SEBAGAI BAHAN
ELEKTRODA SUPERKAPASITOR**

*DEPOSITION OF MnO_2 NANOPARTICLES ON THE SURFACE OF
 H_3PO_4 ACTIVATED CANDELNUT SHELL (*Aleurites moluccana*)
CARBON AND ITS APPLICATION AS SUPERCAPACITOR
ELECTRODE MATERIAL*

ELFA SIHAYA



**PROGRAM PASCASARJANA
DEPARTEMEN KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2023**

**DEPOSISI NANOPARTIKEL MnO_2 PADA PERMUKAAN KARBON
TEMPURUNG KEMIRI (*Aleurites moluccana L*) TERAKTIVASI H_3PO_4
DAN APLIKASINYA SEBAGAI BAHAN ELEKTRODA
SUPERKAPASITOR**

Tesis

sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar magister

Program Studi Magister Kimia

Disusun dan diajukan oleh

ELFA SIHAYA

H012 20 1 011

kepada

**PROGRAM PASCASARJANA
DEPARTEMEN KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2023**

TESIS

**DEPOSISI NANOPARTIKEL MnO_2 PADA PERMUKAAN KARBON
TEMPURUNG KEMIRI (*Aleurites moluccana* L.) TERAKTIVASI
 H_3PO_4 DAN APLIKASINYA SEBAGAI BAHAN
ELEKTRODA SUPERKAPASITOR**

ELFA SIHAYA

NIM: H012201011

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam
rangka Penyelesaian Studi Program Magister Kimia Fakultas Matematika
dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin
pada tanggal 30 Januari 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui

Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping


Dr. Sci. Muhammad Zakir, S.Si., M.Si
NIP. 197011031999031001


Prof. Dr. Paulina Taba, M. Phil
NIP. 195711151988102001

Ketua Program Studi
Magister Kimia


Dr. Hasnah Natsir, M.Si
NIP. 196203201987112001

Dekan Fakultas MIPA
Universitas Hasanuddin


Dr. Eng. Amiruddin, M.Si
NIP. 197205151997021002



**PERNYATAAN KEASLIAN TESIS
DAN KELIMPAHAN HAK CIPTA**

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Elfa Sihaya
NIM : H012201011
Program Studi : Magister Kimia

Dengan ini saya menyatakan bahwa, tesis berjudul "Deposisi Nanopartikel MnO_2 pada Permukaan Karbon Tempurung Kemiri (*Aleurites moluccana* L.) Teraktivasi H_3PO_4 dan Aplikasinya sebagai Bahan Elektroda Superkapasitor" adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Dr. Sci. Muhammad Zakir, S.Si., M.Si sebagai Pembimbing Utama dan Prof. Dr. Paulina Taba, M. Phil sebagai Pembimbing Pendamping). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apapun kepada perguruan tinggi manapun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan di *American Institute of Physics* sebagai artikel dengan judul "*Deposition and Characterization of MnO_2 Nanoparticles on Surface of the Sell Candlenut (*Aleurites moluccana*) H_3PO_4 Activated Carbon*".

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Makassar, 27 Februari 2023



Elfa Sihaya

NIM: H012201011

UCAPAN TERIMA KASIH

Bismillahirrahmananirrahim, segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT karena berkat rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis dengan judul “**Deposisi Nanopartikel MnO₂ Pada Permukaan Karbon Tempurung Kemiri (*Aleurites Moluccana*) Teraktivasi H₃PO₄ dan Aplikasinya Sebagai Bahan Elektroda Superkapasitor**” Shalawat dan salam tak lupa tucurahkan kepada Baginda Rasulullah SAW, kepada keluarganya, para sahabatnya, dan kepada umatnya hingga akhir zaman. Berhasilnya penulis dalam menyelesaikan penyusunan skripsi ini menandakan berakhirnya salah satu dimensi perjuangan sebagai syarat dalam memperoleh gelar sarjana di Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin.

Ucapan terima kasih dan penghargaan penulis sampaikan kepada seluruh pihak yang membantu dalam proses penyelesaian skripsi ini, terutama kepada ayahanda **Dr. Sci. Muhammad Zakir, M.S.Si** dan ibunda **Prof. Dr. Paulina Taba, M.Phill** selaku penasehat yang menjadi orang tua di kampus dan senantiasa meluangkan waktu, tenaga dan pikirannya dalam membimbing dan memberikan arahan yang baik, terutama dalam menyelesaikan penelitian ini.

Kepada kedua orang tua tercinta, ayahanda **Suhadi**, dan ibunda **Saenab** terima kasih untuk setiap semangat, bantuan, kasih sayang dan doa yang senantiasa tak henti-hentinya diberikan kepada saya, semoga Allah senantiasa memberikan rahmat berupa kasih sayang, keteguhan hati di atas agama Allah, dan kemuliaan bukan hanya di dunia tapi juga di akhirat Insya Allah. Terima kasih juga kepada saudara-saudara saya **Erwin Soci, Aswandi** dan **Satria** yang selalu memberikan motivasi untuk saya, serta menjadi penyemangat bagi saya, semoga Allah senantiasa melindungi mereka di jalan kebenaran, Amin.

Penulis juga tak lupa mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ayahanda **Dr. Eng Amiruddin, S.Si, M.Si** selaku dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin beserta semua staf pegawai.

2. **Dr. Hasnah Natsir, M.Si**, selaku ketua program studi S2 Ilmu Kimia Universitas Hasanuddin, beserta dosen dan staf yang telah membantu penulis dalam perjalanan menyelesaikan pendidikan ini.
3. Dosen penguji ujian, yaitu **Prof.Dr. Abd. Wahid Wahab, Dr. Maming, M. Si** dan **Dr. Abdul Karim, M.Si**.
4. Seluruh **Analisis Laboratorium** di Departemen Kimia, terkhusus untuk **Pak Iqbal, S.Si** selaku analis Laboratorium Kimia fisika atas bantuan serta arahnya selama penelitian berlangsung. Terima kasih atas bantuan dan kerjasamanya.
5. Teman-teman **Angkatan 2020 Ganjil** terima kasih atas semangat, penghibur dikala suka dan duka.
6. Sahabat-sahabat **Ridha, Besse, Lulu, Nova, Nadya dan Risma**. Terima kasih telah hadir sebagai penghibur dan penyemangat dalam kemalasan untuk berangkat kuliah dan mengerjakan skripsi ini.
7. Teman-teman Baschem **Bahrin, Romi, Ibe, Vitra, Gaffar, Fajri dan Ilo**. Terima kasih telah hadir sebagai penghibur dan penyemangat dalam kemalasan untuk berangkat kuliah dan mengerjakan Tesis ini.
8. Teman-teman **Kimia 2014** yang merupakan saudara seperjuangan dalam menimba ilmu di jurusan kimia. Terkhusus saudara-saudariku **PREKURSOR 2014**, terima kasih atas kebersamaan dan pengalaman, suka dan duka yang tak terlupakan “HMK Tempat kita di Bina, HMK Tempat kita di Tempa”.
9. Semua pihak yang telah banyak membantu penulis selama menyelesaikan penelitian, terima kasih.

Penulis sadar bahwa laporan skripsi ini tidak sempurna dan banyak kekurangan baik materi maupun teknik penulisannya, karena sejatinya kesempurnaan hanyalah milik Allah SWT. Oleh karena itu, penulis berharap saran dan kritikan yang bersifat membangun dari pembaca, dan semoga dapat memberikan manfaat bagi siapa saja dalam pengembangan ilmu pengetahuan kimia khususnya bidang kimia fisika.

Makassar, Januari 2023

Penulis

ABSTRAK

Elfa Sihaya. Deposisi Nanopartikel MnO_2 Pada Permukaan Karbon Tempurung Kemiri (*Aleurites Moluccana L*) Teraktivasi H_3PO_4 dan Aplikasinya Sebagai Bahan Elektroda Superkapasitor (dibimbing oleh **Muhammad Zakir dan Paulina Taba**).

Elektroda merupakan komponen penting dari sebuah superkapasitor. Pemilihan bahan elektroda memainkan peran penting dalam meningkatkan kinerja superkapasitor. Salah satu kriteria elektroda untuk superkapasitor adalah memiliki luas permukaan dan porositas yang tinggi, selain itu elektroda harus memiliki biaya rendah dan ramah lingkungan. Deposisi nanopartikel MnO_2 pada permukaan karbon aktif tempurung kemiri (KATK) teraktivasi H_3PO_4 telah dilakukan sebagai upaya pengembangan elektroda superkapasitor. Pembentukan nanopartikel MnO_2 dilakukan dengan mereaksikan $KMnO_4$ dengan KATK. Hasil filtrat dianalisis dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis yang menunjukkan terbentuknya koloid nanopartikel MnO_2 dengan sekitar 4,83 %. Hasil residu dikarakterisasi dengan menggunakan FTIR, XRD, SEM EDS dan SAA. Pengukuran kapasitansi spesifik dengan metode *cyclic voltammetry* menunjukkan bahwa MnO_2 memiliki efek pseudo-kapasitif yang sangat baik dan meningkatkan nilai kapasitansi spesifik dengan nilai kapasitansi spesifik karbon aktif terdeposisi sebesar 94,1847 F/g.

Kata kunci: superkapasitor, kapasitansi spesifik, karbon aktif, tempurung kemiri, MnO_2 .

ABSTRACT

Elfa Sihaya. Deposition Of MnO_2 Nanoparticles On The Surface Of H_3PO_4 Activated Candelnut Shell (Aleurites Moluccana) Carbon And Its Application As Supercapacitor Electrode Material (supervised by **Muhammad Zakir** and **Paulina Taba**).

Electrodes are an important component of a supercapacitor. The choice of electrode material plays an important role in improving the performance of the supercapacitor. One of the electrode criteria for a supercapacitor is to have a high surface area and porosity, besides that the electrode must have a low cost and be environmentally friendly. The deposition of MnO_2 nanoparticles on the surface of H_3PO_4 activated candle shell activated carbon (KATK) has been carried out as an effort to develop supercapacitor electrodes. The formation of MnO_2 nanoparticles was carried out by reacting KMnO_4 with KATK. The results of the filtrate were analyzed using a UV-Vis spectrophotometer which showed the formation of a colloidal fraction of MnO_2 nanoparticles with about 4.83%. Residual results were characterized using FTIR, XRD, SEM EDS and SAA. Specific capacitance measurement using cyclic voltammetry method showed that MnO_2 had a very good pseudo-capacitive effect and increased the specific capacitance value with the specific capacitance value of deposited activated carbon of 94.1847 F/g

Keywords: supercapacitor, specific capacitance, activated carbon, candelnut shell, MnO_2

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN SAMBUTAN.....	i
HALAMAN PENGANTAR.....	ii
HALAMAN PERSETUJUAN.....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan.....	5
1.4 Manfaat Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Superkapasitor.....	6
2.2 Karbon Aktif.....	8
2.2.1. Pembuatan Karbon Aktif	8
2.2.2... Aktivasi.....	9
2.3 Tempurung kemiri (<i>Aleurites Moluccana L</i>)	10
2.4 Mangan Dioksida (MnO ₂) sebagai Superkapasitor.....	12
2.5 Nanopartikel.....	14
2.6 Mangan (Mn).....	15

2.7. Karakterisasi Elektroda Superkapsitor.....	16
2.8 Kerangka Pikir.....	18
2.9 Hipotesis.....	19
BAB III METODE PENELITIAN.....	20
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	20
3.2. Bahan Penelitian.....	20
3.3. Alat Penelitian.....	20
3.4. Prosedur Penelitian.....	21
3.4.1 Preparasi Sampel.....	21
3.4.2 Karbonisasi Tempurung Kemiri.....	21
3.4.3 Aktivasi Karbon Tempurung Kemiri.....	21
3.4.4 Pengaruh Massa Karbon Aktif Terhadap Pembentukan Koloid Nanopartikel MnO ₂	21
3.4.5 Pengaruh konsentrasi KMnO ₄ terhadap pembentukan Koloid Nanopartikel MnO ₂	22
3.4.6 Pengaruh pH Terhadap Pembentukan Koloid Nanopartikel MnO ₂	22
3.4.7 Pengaruh Suhu Terhadap Pembentukan Koloid Nanopartikel MnO ₂	22
3.5 Penentuan Kadar Gugus Fungsional Asam dan Basa Total dengan Metode Titrasi Boehm.....	23
3.6 Pembuatan Elektroda	24
3.7 Penentuan Kapasitansi Kapasitansi Spesifik Dengan Metode Siklik voltametri.....	24
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	25
4.1 Preparasi Sampel Tempurung kemiri.....	25
4.2 Karbonisasi dan Aktivasi Karbon Tempurung Kemiri.....	26
4.3 Sintesis nanopartikel MnO ₂	27
4.4 Pengaruh Massa Karbon Aktif Terhadap Pembentukan Koloid Nanopartikel MnO ₂	28

4.5 Pengaruh Konsentrasi KMnO_4 Terhadap Pembentukan Koloid Nanopartikel MnO_2	30
4.5 Pengaruh pH Terhadap Pembentukan Koloid Nanopartikel MnO_2	32
4.5 Pengaruh Suhu Terhadap Pembentukan Koloid Nanopartikel MnO_2	33
4.6 Karakterisasi Gugus Fungsi dengan FTIR.....	35
4.7 Karakterisasi XRD.....	38
4.8 Karakterisasi Morfologi Karbon dengan SEM EDS.....	40
4.9 Karakterisasi Luas Permukaan dan Volume dengan SAA.....	43
4.10 Pengukuran Nilai Kapasitansi Spesifik.....	46
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	50
5.1 Kesimpulan.....	50
5.2 Saran.....	50
DAFTAR PUSTAKA.....	51
LAMPIRAN.....	67

DAFTAR TABEL

Nomor	Halaman
1..Komponen kimia tempurung kemiri.....	12
2. Elektrokimia beberapa material karbon komposit magnesium oksida (MnO ₂).....	14
3....Data hasil mapping EDX KTK(a), KATK (b) dan KATK + MnO ₂ (c).....	43
4....Data Luas permukaan spesifik, volume pori dan ukuran diameter pori Dari KTK, KATK dan KATK+MnO ₂	45
5....Hasil analisis nilai kapasitansi dengan berbagai laju scan rate pada Elektrolit Na ₂ SO ₄ 1 M.....	47

DAFTAR GAMBAR

Nomor	Halaman
1. <i>Ragone plot</i> untuk berbagai jenis penyimpanan energi.....	6
2. Skema superkapasitor: (a) Elektrokimia lapisan ganda listrik (b) Pseudo-kapasitor dan (c) Hibrid superkapasitor.....	7
3. Tempurung Kemiri (<i>A. moluccana L.</i>).....	11
4. Struktur lignoselulosa.....	12
5. Deposisi nanopartikel MnO ₂ pada karbon aktif.....	13
6. Spektrum UV-Vis larutan KMnO ₄ tereduksi menjadi larutan MnO ₂	16
7. Spektrum FT-IR dari struktur nano MnO ₂	17
8. Data XRD karbon aktif berpori (PAC) dan karbon aktif berpori.....	17
9. Kerangka berfikir	19
10...Spektrum pengaruh massa KATK terhadap pembentukan koloid nanopartikel MnO ₂ (a) dan Grafik hubungan persentase pembentukan koloid MnO ₂ dengan variasi massa KATK (b).....	29
11...Spektrum pengaruh konsentrasi KMnO ₄ terhadap pembentukan koloid nanopartikel MnO ₂ (a) dan Grafik hubungan persentase pembentukan koloid MnO ₂ dengan Konsentrasi KMnO ₄ (b).....	31
12...Spektrum pengaruh pH terhadap pembentukan koloid nanopartikel MnO ₂ (a) dan Grafik hubungan persentase pembentukan koloid MnO ₂ dengan pH (b).....	32
13...Spektrum pengaruh suhu terhadap pembentukan koloid nanopartikel MnO ₂ (a) dan Grafik hubungan persentase pembentukan koloid MnO ₂ dengan suhu (b).....	34
14. Spektrum FTIR dari KTK, KTAK dan KATK+MnO ₂	35
15...Gugus yang terikat pada KATK.....	34
16...Grafik analisis gugus fungsi dengan metode titrasi Boehm.....	37
17...Reaksi pembentukan nanopartikel MnO ₂	38
18...Pola difraksi XRD KTK, KTAK dan KATK+MnO ₂	39
19...Hasil analisis SEM pada perbesaran 1000 dan 7000x dari KTK (a dan b), KTAK (c dan d) dan KATK+MnO ₂ (e dan f).....	41

20. Hasil Mapping EDS KTK (a), KATK (b) dan KATK+MnO ₂ (c).....	43
21...Spektrum hubungan tekanan relatif terhadap volume N ₂ pada (a) KTK, (b) KATK dan KATK+MnO ₂ (c).....	44
22...Voltammogram KTK, (b) KATK dan KATK+MnO ₂ (c).....	48

DAFTAR LAMPIRAN

Nomor	Halaman
1.. Diagram Alur Penelitian.....	66
2. Skema kerja Preparasi dan Karbonisasi Sampel.....	67
3. Skema Kerja Aktivasi Sampel.....	67
4. Skema kerja Pengaruh Massa KATK Pembentukan Nanopartikel MnO ₂ KATK.....	68
5. Skema Skema Kerja Pengaruh Konsentrasi KMnO ₄ Pembentukan Nanopartikel MnO ₂	69
6. Skema kerja Pengaruh pH Pembentukan Nanopartikel MnO ₂	70
7. Skema kerja Pengaruh Suhu Pembentukan Nanopartikel MnO ₂	71
8. Skema kerja Skema Kerja Analisis Gugus Fungsi dengan Titrasi Boehm.....	72
9. Skema Kerja Pembuatan Elektroda.....	73
10. Pengukuran Nilai Kapasitansi Spesik.....	73
11. Perhitungan Pembuatan Larutan Pereaksi.....	74
12. Perhitungan Kadar Koloid Nanopartikel MnO ₂	76
13. Perhitungan Kadar Gugus Fungsi dengan Titrasi Boehm.....	79
14. Perhitungan Kapasitansi Spesifik.....	82
15. Dokumentasi.....	84
16. Data FTIR.....	88
17. DATA UV-Vis.....	91
18. Hasil Karakterisasi SEM EDS.....	95
19. Hasil Karakterisasi SAA.....	104

DAFTAR SIMBOL/SINGKATAN

AC	<i>Activated Carbon</i>
BET	<i>Brunaure-Emmet-Teller</i>
BJH	<i>Barret Joyner Hallanda</i>
CV	<i>Cyclic Voltametry</i>
EC	<i>Electrochemical Capacitor</i>
FTIR	<i>Fourier Transform Infra Red</i>
IUPAC	<i>Internasional Union of Pure dan Applied Chemical</i>
MnO ₂	Mangan Dioksida
XRD	<i>X-Ray Diffraction</i>
KTK	Karbon Tempurung Kemiri
KATK	Karbon Aktif Tempurung Kemiri
PAC	<i>Porous Activated Carbon</i>
SEM EDS	<i>Scanning Electron Microscope Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy</i>
SC	<i>Supercapacitor</i>
SAA	<i>Surface Area Analyzer</i>
UV-Vis	Ultra Violet-Visible

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi yang semakin meningkat menyebabkan teknologi kendaraan listrik juga mengalami peningkatan yang pesat (Allcott dan Wozny, 2014; Nikoloski, 2016; Ding dkk., 2017). Kendaraan listrik menggunakan media penyimpanan energi berupa baterai (Jing dkk., 2016; Ding dkk., 2017). Namun, penggunaan baterai memiliki kekurangan diantaranya kerapatan daya yang tidak terlalu tinggi, durasi pengisian yang relatif lama dan usia baterai yang terbatas (Hannan dkk., 2017; Kouchachvili dkk., 2017; She dkk., 2020). Perangkat penyimpan energi lainnya yang banyak dikembangkan saat ini selain baterai, yaitu superkapasitor dan *fuel cell* (Abioye dan Ani 2015; Dong dkk., 2020).

Superkapasitor dianggap sebagai salah satu perangkat penyimpanan energi yang paling menjanjikan karena kepadatan daya yang superior, waktu pengisian daya yang cepat, kerapatan energi dan jumlah siklus energi yang tinggi (>100000 siklus) (Wang dkk., 2015; Meng dkk., 2018). Parameter kemampuan penyimpanan energi yang tinggi pada suatu superkapasitor ditentukan oleh nilai kapasitansi spesifiknya yang bergantung pada jenis bahan elektroda yang digunakan pada superkapasitor (Choi dan Park, 2014).

Pembuatan elektroda superkapasitor dapat menggunakan grafena (Naderi dkk., 2020), tabung nano karbon (Cho dkk., 2020), aerogel karbon (Liu dkk., 2013) dan karbon aktif (Xie dan Zhou, 2019). Salah satu bahan yang paling banyak digunakan sebagai elektroda superkapasitor adalah karbon aktif karena bahan ini memiliki luas permukaan yang cukup besar, sifat listrik yang baik dan biaya yang murah (Syarif dkk., 2012; Pina dkk., 2018; Han dkk., 2020).

Bahan baku karbon aktif diproses dengan cara karbonisasi dan aktivasi (Xu dkk., 2014). Proses aktivasi menghasilkan porositas dalam struktur karbon aktif yang dikategorikan atas mikro, meso dan makro (Surets dkk., 2008; Tung dkk., 2019). Aktivasi karbon dapat menggunakan bahan seperti natrium

hidroksida (NaOH) (Yang dkk., 2020), kalium hidroksida (KOH) (Liu dkk., 2019), asam fosfat (H_3PO_4) (Zakir dkk., 2019) dan seng klorida (ZnCl) (Sun dkk., 2019). Diantara agen aktivasi, H_3PO_4 banyak digunakan sebagai aktivator karbon aktif karena memiliki kemampuan mengikat air lebih sempurna untuk melarutkan zat-zat organik ataupun anorganik yang terikat dalam material karbon sehingga dapat diperoleh pori-pori yang lebih bersih dan terbuka (Sandi dan Astuti, 2014; Erawati dan Fernando, 2018). Aktivasi menggunakan H_3PO_4 dapat meningkatkan pembentukan pori-pori dan luas permukaan yang berkontribusi terhadap kapasitas yang tinggi dari karbon aktif (Frackowiak dk., 2007; Wang dkk., 2003; Wen dkk., 2009).

Karbon aktif dapat dibuat dari limbah biomassa (Peng dkk., 2017). Limbah biomassa dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan karbon aktif karena keberadaannya melimpah, murah dan mudah diperoleh (Abioye dan Ani, 2015). Sumber limbah biomassa yang telah dimanfaatkan sebagai karbon aktif adalah ampas tebu (Alsadi dan Esfdaniari, 2019), tempurung kelapa (Gawdane dan Kaware 2017), tongkol jagung (Igwegbe dkk., 2021), kulit singkong (Arazi dan Putra, 2020) dan tempurung kemiri (Zakir dkk., 2019).

Tempurung kemiri merupakan salah satu limbah biomassa yang belum dimanfaatkan secara optimal (Lempang dkk., 2011; Zakir dkk., 2019). Tempurung kemiri mengandung bahan kayu seperti lignin, selulosa dan hemiselulosa yang cukup tinggi sehingga dapat dijadikan sebagai bahan baku pembuatan karbon aktif (Chao dkk., 2014; Latupeirissa, 2017; Bapa dan Botahala, 2019). Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa biomassa karbon aktif dalam sistem penyimpanan energi memiliki kekurangan yaitu ukuran pori karbon yang tidak beraturan. Biomassa menghasilkan karbon dengan ukuran pori dari mikropori hingga makropori, ukuran pori yang bervariasi, dapat menghambat transpor ion dalam sistem sel kapasitor dan akhirnya menurunkan nilai kapasitas (Wei dan Yushin, 2012). Oleh karena itu, permukaan biomassa karbon aktif perlu ditambahkan material untuk menghasilkan nilai kapasitas yang lebih tinggi (Minson dkk., 2019; Prataap dkk., 2018).

Berbagai cara telah dilakukan untuk meningkatkan nilai kapasitas suatu elektroda baik dalam bidang sains maupun bidang teknologi (Balakrishnan dan Subramanian, 2014). Bidang Sains yang telah berkembang saat ini yaitu nanopartikel. Perkembangan bidang sains nanopartikel dekade terakhir ini telah menjadi salah satu bidang yang intensif dilakukan, karena nanopartikel memiliki

sifat yang berbeda dari ukuran besarnya sehingga diaplikasikan dalam berbagai bidang (Ali dkk., 2021). Nanopartikel memiliki partikel dengan ukuran 1-100 nm (Guo dkk., 2014). Pembentukan nanopartikel dipengaruhi oleh konsentrasi, pH dan suhu (Mahbubul dkk., 2013). Logam oksida transisi yang berstruktur nano telah banyak digunakan sebagai perangkat penyimpanan energi pada baterai dan superkapasitor (Sathiya dkk., 2011). Berbagai logam oksida transisi seperti RuO_2 , MnO_2 , Fe_2O_3 , Co_3O_4 , NiO , ZnO dan V_2O_5 telah banyak digunakan sebagai bahan elektroda superkapasitor (Bhujun dkk., 2017).

Oksida rutenium memiliki kapasitansi spesifik yang paling tinggi dibandingkan oksida yang lain tetapi membutuhkan biaya yang cukup mahal. Teknesium (Tc) yang berada dalam satu periode dengan rutenium diharapkan memiliki kapasitansi yang sama dengan rutenium (Lundberg 2013; Javanovic dkk., 2020). Pembentukan dan penguraian nanopartikel TcO_2 (Zakir dkk., 2005; Sekine dan Zakir, 2004; Zakir dan Sekine, 2009; Zakir dan Sekine 2010) melibatkan spesies terlarut (*soluble species*) $\text{TcO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (Sekine dkk., 2004), namun teknesium bersifat toksik (Javanovic dkk., 2020). Mangan dioksida (MnO_2) yang berada dalam satu golongan dengan teknesium dianggap sebagai salah satu unsur yang dapat digunakan sebagai bahan superkapasitor yang baik karena bahan ini ramah lingkungan, memiliki toksisitas rendah dan lebih murah (Grote dkk., 2014; Pang dkk., 2015; Huang dkk., 2018).

Mangan dioksida (MnO_2) memiliki kapasitansi spesifik yang tinggi 1370 F/g (Wei dkk., 2011; Yang dkk., 2018). Keberadaan oksida MnO_2 nanopartikel dapat memberikan efek pseudo-kapasitif yang akan meningkatkan kapasitansi melalui reaksi oksidasi reduksi proton atau kation dengan elektrolit dalam sistem kapasitor (Chen dkk., 2018; Hu dkk., 2015; Yao dkk., 2019). Pada saat pengisian pseudo-kapasitif berlangsung terjadi reduksi partikel pada permukaan elektroda sehingga senyawa elektroaktif bertambah (Antonucci dan Antonucci, 2011). Partikel yang berukuran nano dapat meningkatkan konduktivitas listrik sehingga kapasitas penyimpanan akan semakin tinggi (Min-min dkk., 2010; Sanchez dkk., 2016).

Menurut Zhang dkk. (2012), deposisi nanopartikel MnO_2 pada karbon aktif sebagai elektroda superkapasitor menunjukkan kapasitansi 210 F/g. Superkapasitor komposit MnO_2 dengan karbon aktif memiliki kapasitansi spesifik yang tinggi yaitu hingga 332,6 F/g dan siklus hidup 2000 kali (Wang dkk., 2015). Pengaruh konsentrasi nanopartikel MnO_2 pada karbon aktif sebagai elektroda

superkapasitor menghasilkan kapasitansi spesifik 372 F/g dan siklus hidup superkapasitor 4500 kali (Doloksaribu dkk., 2017). Sintesis hidrotermal dari α -MnO₂/karbon aktif dan kinerjanya sebagai elektrokimia superkapasitor menghasilkan kapasitansi yang mencapai 977,4 F/g dan mencapai siklus hidup 3000 kali menunjukkan bahwa MnO₂/karbon aktif berpotensi untuk diaplikasikan sebagai bahan elektroda untuk superkapasitor (Shen dkk., 2018).

Berdasarkan uraian di atas, deposisi nanopartikel MnO₂ pada permukaan karbon aktif tempurung kemiri dilakukan dan hasilnya diaplikasikan sebagai elektroda superkapasitor. Penggunaan nanopartikel MnO₂ pada superkapasitor didasarkan pada pertimbangan bahwa nanopartikel deposisi MnO₂ + karbon aktif memiliki nilai kapasitansi yang tinggi, karena adanya pengaruh deposisi nanopartikel MnO₂ terhadap massa karbon aktif sehingga menghasilkan komposisi nanopartikel MnO₂ pada permukaan karbon yang paling baik. Salah satu cara yang dapat dilakukan pada deposisi MnO₂ sebagai superkapasitor yaitu dengan cara mengoptimalkan pengaruh konsentrasi, pH dan suhu terhadap deposisi nanopartikel MnO₂ pada permukaan karbon aktif tempurung kemiri. Kemudian, karakterisasi dengan spektrofotometer *Ultra Violet-Visible* UV-Vis, analisis gugus fungsi menggunakan *Fourier Transform Infra Red* (FTIR), analisis struktur dan ukuran kristal dengan *X-Rays Difraktion* (XRD), karakterisasi permukaan dengan *Scanning Electron Microscope Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (SEM EDS), karakterisasi luas permukaan dan volume dengan *Surface Area Analyzer* (SAA) dan penentuan nilai kapasitansi spesifik elektroda menggunakan siklik voltametri.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang dapat dikemukakan adalah sebagai berikut:

1. bagaimana pengaruh aktivator H₃PO₄ terhadap sifat fisik dan kimia karbon aktif tempurung kemiri?,
2. bagaimana pengaruh massa karbon aktif terhadap pembentukan koloid nanopartikel MnO₂?,
3. bagaimana pengaruh konsentrasi KMnO₄, pH dan suhu terhadap pembentukan koloid nanopartikel MnO₂?,
4. bagaimana pengaruh deposisi koloid nanopartikel MnO₂ pada permukaan karbon aktif terhadap nilai kapasitansi spesifik karbon aktif tempurung kemiri

dengan metode siklik voltametri?,

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. menentukan pengaruh aktivator H_3PO_4 terhadap sifat fisik dan kimia karbon aktif tempurung kemiri.
2. menentukan pengaruh massa karbon aktif terhadap pembentukan koloid nanopartikel MnO_2 .
3. menentukan pengaruh konsentrasi KMnO_4 , pH dan suhu terhadap pembentukan koloid nanopartikel MnO_2 .
4. menentukan pengaruh deposisi koloid nanopartikel MnO_2 pada permukaan karbon aktif terhadap nilai kapasitansi spesifik karbon aktif tempurung kemiri dengan metode siklik voltametri.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai:

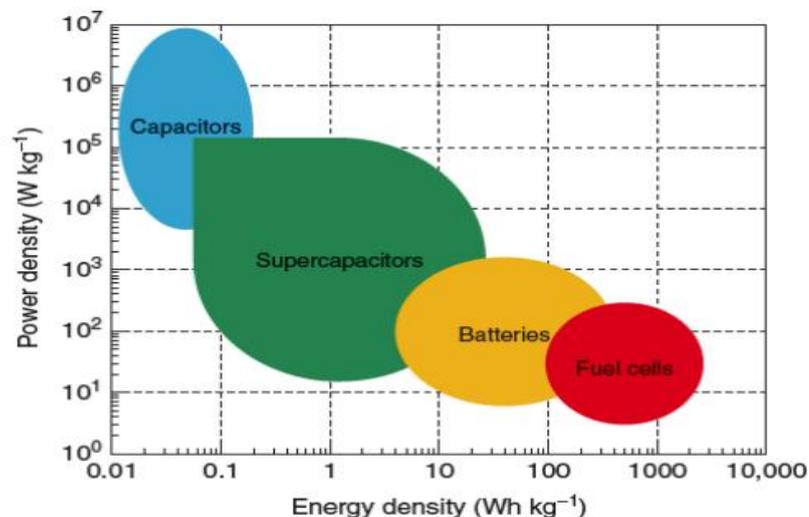
1. bahan informasi untuk solusi perkembangan teknologi dan penyimpanan energi di masa yang akan datang.
2. bahan informasi tentang deposisi koloid nanopartikel MnO_2 ke dalam permukaan karbon aktif dan aplikasinya sebagai bahan elektroda superkapasitor.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Superkapasitor

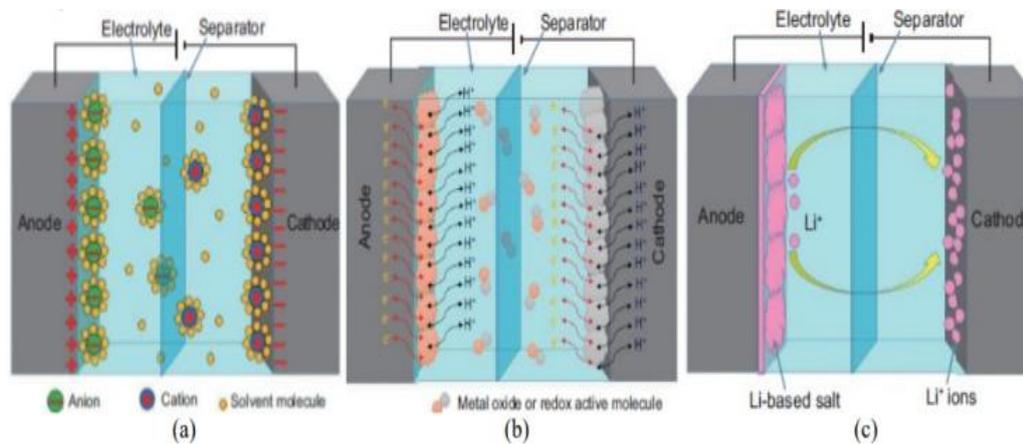
Superkapasitor adalah perangkat penyimpanan energi secara elektrokimia yang berperan dalam memenuhi kebutuhan energi listrik. Berbeda dengan baterai, superkapasitor dapat memberikan rapat daya ($>10 \text{ kWkg}^{-1}$) pada proses pengisian dan pengosongan muatan yang cepat serta tingkat kestabilan yang tinggi (Vangari dkk., 2012; Chen dkk., 2011). Superkapasitor memiliki keunggulan dibanding dengan baterai diantaranya; usia pemakaian yang lebih lama dan waktu pengisian cepat. Namun, superkapasitor juga memiliki kekurangan yaitu tegangan yang rendah dibanding dengan baterai (Nugroho, 2011).



Gambar 1. *Ragone plot* untuk berbagai jenis penyimpanan energi (Kim dkk., 2015).

Superkapasitor yang memiliki densitas energi lebih rendah dibandingkan dengan baterai, namun memiliki densitas daya yang lebih tinggi dapat dilihat pada Gambar 1. Berdasarkan mekanisme energi yang mendasari superkapasitor terdiri atas tiga jenis: kapasitor lapis ganda elektrokimia, pseudokapasitor dan

hibrid superkapasitor yang dapat dilihat pada Gambar 2 (Tetra dkk., 2018; Iro dkk., 2016).



Gambar 2. Skema superkapasitor: (a) Elektrokimia lapisan ganda listrik, (b) Pseudokapasitor dan (c) Hibrid superkapasitor (Chen dkk., 2017).

Elektrokimia lapisan ganda listrik dapat menyimpan muatan secara elektrostatik atau melalui cara non-Faradaik tanpa transfer muatan. Prinsip penyimpanan energi elektrokimia lapisan ganda listrik adalah lapisan ganda elektrokimia (Iro dkk., 2016; Kiamahalleh, 2012; Jayalakshmi, 2008). Elektrokimia lapisan ganda listrik dibuat menggunakan dua bahan berbasis karbon untuk elektroda, elektrolit dan pemisah. Elektrokimia lapisan ganda listrik umumnya mempunyai rapat dan daya yang tinggi dan siklus hidup yang lebih lama (Iro dkk., 2016).

Pseudokapasitor menyimpan muatan melalui proses Faradaik yang melibatkan transfer muatan secara elektro-statis antara elektroda dan elektrolit. Ketika potensial diterapkan pada reduksi pseudokapasitor, oksidasi terjadi pada bahan elektroda (Iro dkk., 2016). Proses ini melibatkan perjalanan muatan melintasi lapisan ganda, menghasilkan arus Faradik yang melewati sel superkapasitor. Proses Faradaik ini menyebabkan pseudokapasitor memiliki kepadatan energi yang lebih tinggi dari pada elektrokimia lapisan ganda listrik (Najib dkk., 2019).

Supercapacitor asimetrik atau hibrid superkapasitor yang dirangkai dari dua elektroda yang tidak sama dan dilengkapi dengan potensial kerja (Rajkumar dkk., 2015). Hibrid superkapasitor diharapkan dapat meningkatkan tegangan sel dengan kombinasi elektroda yang lebih baik dan dapat meningkatkan kepadatan energi dan daya terhadap superkapasitor (Iro dkk., 2016; Burke, 2007). Jenis

superkapasitor ini yang terdiri atas elektroda yang dapat dipolarisasi seperti karbon dan elektroda yang tidak dapat dipolarisasi seperti logam atau polimer penghantar. Proses Faradaik dan non-Faradaik digunakan untuk mendapatkan penyimpanan energi yang tinggi, baik melalui jenis baterai dan elektroda jenis kapasitor (Halper dkk., 2006; Ho dkk., 2014).

2.2 Karbon Aktif

Karbon merupakan material yang umum ditemukan pada berbagai bahan alam, memiliki beragam jenis dan bentuk dengan sifatnya yang unik (Zhang dkk., 2016; Rashidi dan Yusup, 2017). Karbon aktif dapat didefinisikan sebagai bahan berkarbon memiliki porositas dan luas permukaan yang tinggi. Karbon aktif yang digunakan dapat ditemukan dalam bentuk bubuk ataupun butiran (Bapa dan Botahala, 2019). Karbon aktif merupakan suatu bahan berupa karbon amorf yang sebagian besar terdiri atas atom karbon bebas. Karbon aktif dapat dibuat dari semua bahan yang mengandung karbon, dengan syarat bahan tersebut mempunyai struktur berpori (Laos, 2016). Karbon aktif memiliki luas permukaan yang tinggi antara 500-2.000 m²/g (Kristianto, 2017).

Karbon dapat diubah menjadi karbon aktif dari proses aktivasi. Sifat dan mutu karbon aktif bergantung pada bahan baku dan cara aktivasi yang digunakan. Berdasarkan sifat permukaannya, karbon masih ditutupi oleh hidrokarbon yang menghambat keaktifannya sedangkan permukaan karbon aktif relatif bebas dari hidrokarbon, permukaan yang luas dan pori-porinya telah terbuka, sehingga memiliki kapasitas adsorpsi yang tinggi (Rohmah dkk., 2014). Menurut *Internasional Union of Pure dan Applied Chemical (IUPAC)* ukuran pori dapat dikategorikan menjadi 3, yaitu mikropori dengan diameter < 2 nm, mesopori dengan diameter 2-50 nm dan makropori dengan diameter > 50 nm (Sing dkk., 1985).

2.2.1 Proses Pembuatan Karbon Aktif

Pembuatan karbon aktif dilakukan melalui 3 tahap yaitu dehidrasi, karbonisasi dan aktivasi (Rasdiansyah dkk., 2014). Dehidrasi merupakan proses penghilangan air dengan cara pemanasan bahan baku pada suhu 170 °C (Rohmah dan Redjeki, 2014). Karbonisasi adalah pembentukan pori-pori dalam

karbon dengan cara memecahkan ikatan hidrokarbon (Sanni dkk., 2017). Proses aktivasi dapat dilakukan sebelum proses karbonisasi atau setelah karbonisasi (Sani, 2011).

2.2.2 Aktivasi

Aktivasi adalah proses perlakuan terhadap karbon yang bertujuan memperbesar pori-pori dengan cara memecahkan ikatan hidrokarbon sehingga karbon mengalami perubahan sifat baik secara kimia ataupun fisika. Aktivasi karbon secara fisika merupakan proses pemutusan rantai karbon dari senyawa organik dengan bantuan panas, uap dan CO₂. Aktivasi membentuk struktur pori yang ada pada karbon sehingga memberikan luas permukaan yang tinggi, menghilangkan zat-zat pengotor yang mudah menguap dan membuang produksi tar atau hidrokarbon-hidrokarbon pengotor pada karbon (Abioye dan Farid, 2015; Saka, 2012). Karbon yang sudah dikarbonisasi dengan waktu dan suhu tertentu dengan aliran gas atmosfer, uap, udara atau CO₂ dapat mengaktifkan material pada suhu tinggi untuk membentuk struktur pori (Iwanow dkk., 2020; Mazlana dkk., 2016). Secara umum aktivasi fisik karbon memiliki keunggulan dibandingkan aktivasi kimiawi untuk menghindari pengotor dari zat pengaktif/aktivator yang digunakan (Suhass dkk., 2016).

Aktivasi kimia merupakan proses pemutusan rantai karbon dari senyawa organik dengan menggunakan bahan-bahan kimia. Aktivasi kimia adalah metode pencampuran karbon dengan zat pengaktif (aktivator) sehingga menghasilkan banyaknya pori-pori yang lebih banyak pada bahan karbon aktif (Patil dan kulkarni, 2012; Sharma dkk., 2019). Aktivator yang sering digunakan seperti (KOH, NaOH, ZnCl₂, H₃PO₄, MgCl₂, AlCl₃, K₂CO₃ dll) (Baseri dkk., 2012). Keuntungan aktivasi ini dibanding aktivasi fisika yaitu lebih ekonomis karena suhu aktivasi yang lebih rendah dan menghasilkan karbon aktif yang memiliki luas permukaan yang tinggi (Rashidi dkk., 2017).

Aktivasi menggunakan H₃PO₄ dapat membentuk pori-pori pada permukaan karbon aktif yang lebih tinggi dibandingkan pada karbon aktif yang tidak teraktivasi (Rosalina dkk., 2018; Demiral dan Samdan 2016; Yakout dan El-deen 2016). Mekanisme utama aktivasi dengan asam fosfat adalah depolimerisasi, dehidrasi dan redistribusi biopolimer yang mengandung lignoselulosa (Abdelnaeim dkk., 2016; Deyuso dkk., 2014). Proses aktivasi terjadi

melalui reaksi antara asam fosfat dengan prekursor berbasis karbon aktif dan menghasilkan produk yang berupa partikel atau zat yang mudah menguap yang mengakibatkan pori-pori atau bertambahnya jumlah pori pada karbon aktif (Deyuso dkk., 2014; Liu dkk., 2010). Selain itu, asam fosfat dapat menghasilkan mikro dan mesopori pada karbon aktif (Deyuso dkk., 2014; Demiral dan Samdan 2016).

2.3 Tempurung Kemiri (*Aleuritas moluccana L. wild*) sebagai Sumber Kabon Aktif)

Kemiri (*Aleuritas moluccana L. wild*) berasal dari Indonesia dan tumbuhan kemiri tumbuh di daerah tropis dan subtropis sehingga dapat ditanam di daerah dataran rendah maupun dataran tinggi, baik di tanah yang subur maupun di tanah kurang subur (Laos dkk., 2016). Kemiri memiliki banyak manfaat diantaranya untuk masakan rempah-rempah, bahan baku industri, perabot rumah tangga, kayu bakar, korek api dan bahan baku pembuatan *pulp* (bahan pembuatan kertas) (Marks-Block dkk., 2019; Zeppa dkk., 2014).

Tempurung kemiri merupakan limbah biomassa yang belum banyak dimanfaatkan (Halimah, 2016). Menurut Krisnawati dkk., (2011) tanaman kemiri diklasifikasikan sebagai berikut:

Kingdonm	: Plantea
Divisi	: Spermatophyta
Subdivisi	: Angiospermae
Classis	: Dicotyledonae
Ordo	: Euphorbiales
Family	: Euphorbiaceae
Spesies	: <i>Aleuritas moluccana L. wild</i>
Marga	: <i>Aleuritas</i>
Submarga	: Crotonoideae Sinonim : <i>Aleurites javanica</i> Gdan., <i>Aleurites remyi</i> Sherff, <i>Aleurites triloba</i> Forster & Forster f., <i>Camirium moluccanum</i> L., <i>Croton moluccanus</i> L., <i>Jatropha moluccana</i> L.

Tempurung kemiri memiliki struktur yang cukup keras sehingga membutuhkan waktu untuk menguraikannya secara alamiah. Oleh karena itu,

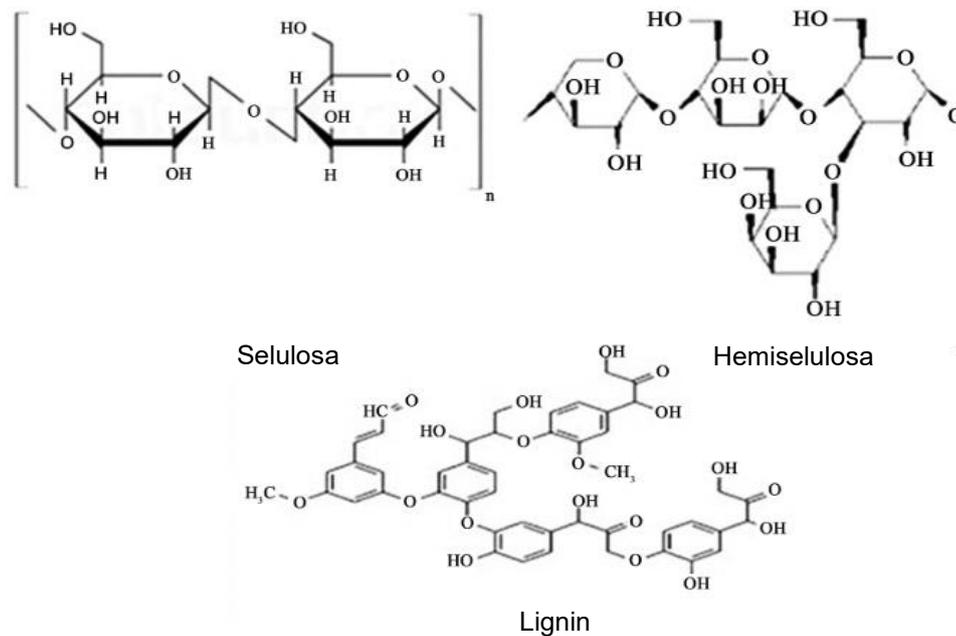
berbagai upaya dilakukan untuk memanfaatkan limbah tempurung kemiri seperti pada Gambar 3 (Yuan dkk., 2018). Pemanfaatan limbah tempurung kemiri selain untuk menanggulangi penumpukan limbah juga dapat menghasilkan produk yang aman dan ramah lingkungan.



Gambar 3. Tempurung kemiri (*A. moluccana*) (Patabang dkk., 2019)

Tempurung kemiri mengandung senyawa lignoselulosa dengan komposisi seperti terlihat pada Tabel 1. Tempurung ini dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan karbon aktif (Surest dkk., 2008). Lignoselulosa adalah makromolekul yang tersusun atas tiga komponen yakni lignin, hemiselulosa dan selulosa. Selulosa adalah komponen polisakarida yang tersusun dari kombinasi linear molekul glukosa yang terhubung melalui ikatan $\beta(1\rightarrow4)$ glikosida dan memiliki derajat polimerisasi yang tinggi mencapai 10.000 (Anca-Couce, 2016).

Hemiselulosa adalah kompleks polisakarida yang tersusun atas gula pentose (yakni xilosa dan arabinosa) dan gula heksosa (manosa, galaktosa glukosa, ramnosa atau asam glukonat). Lignin adalah makromolekul dengan kadar fenolik yang tinggi. Struktur lignin tersusun atas unit-unit atas p-kumaril alkohol, koniferil dan sinapil alkohol. Lignin pada kayu lunak tersusun dari unit-unit koniferil alkohol (dengan satu gugus metoksi) dan mengandung sedikit p-kumaril alkohol. Sedangkan lignin ada kayu keras, mengandung unit-unit sinapil alkohol (dengan dua gugus metoksi (Anca-Couce, 2016). Adapun struktur dari lignoselulosa dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Struktur lignoselulosa (Muktham dkk., 2016)

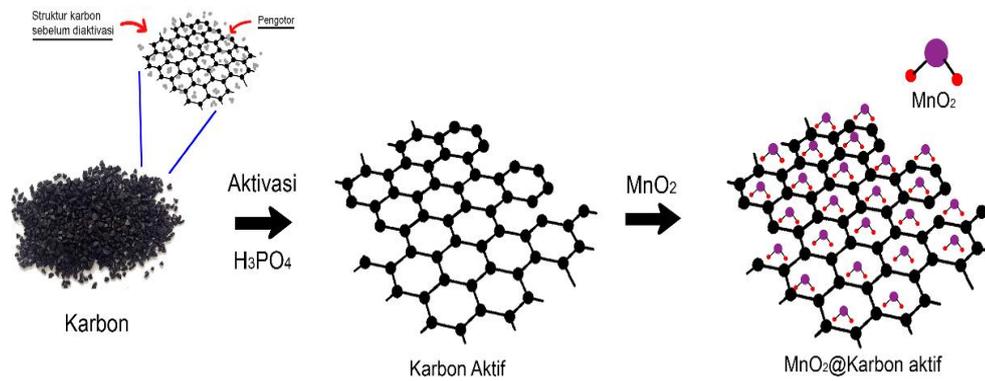
Tabel 1. Komponen kimia tempurung kemiri

Senyawa	Kadar (%)
Selulosa	25,57
Hemiselulosa	28,77
Lignin	36,03

(Lempang dkk., 2011; Darmawan dkk., 2016).

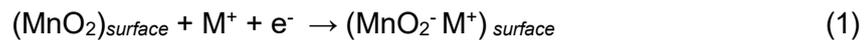
2.4 Mangan Dioksida (MnO₂) sebagai Superkapasitor

Mangan dioksida (MnO₂) adalah bahan pseudokapasitif yang paling banyak digunakan sebagai superkapasitor karena bahan ini murah, toksisitas rendah dan menghasilkan kapasitor dengan kapasitansi yang tinggi hingga ~1370 F/g melalui reaksi Faradaik (Deng dkk., 2015; Wang dkk., 2015; Huang dkk., 2010; Huang dkk., 2015). Elektroda yang terbuat dari material MnO₂ memiliki luas permukaan yang tinggi dan mengandung material pseudokapasitif yang dapat meningkatkan kerapatan energi kapasitor (Antonucci dan Antonucci, 2011). Pada pseudokapasitor terjadi reaksi redoks pada permukaan elektroda saat proses pengisian berlangsung (Zhu dkk., 2012).

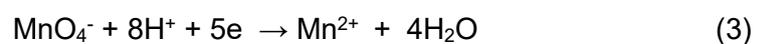
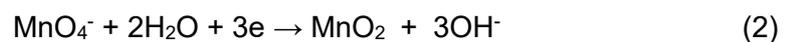


Gambar 5. Deposisi nanopartikel MnO₂ pada karbon aktif.

Mekanisme penyimpanan muatan pseudokapasitansi yang tinggi terjadi dengan adanya berbagai keadaan oksidasi pada MnO₂ melalui dua mekanisme yang melibatkan penyisipan kembali proton sebagian besar ke dalam elektroda dan adsorpsi/desorpsi kation elektrolit seperti biasa yang dapat dilihat pada Gambar 5 (Zhu dkk., 2012). Penyimpanan muatan MnO₂ sebagai material pseudokapasitif dalam larutan elektrolit didasarkan terjadinya reaksi redoks yang menyebabkan perubahan bilangan oksidasi Mn dari +4 menjadi +3 (Chen dkk., 2010; Zhu dkk., 2012). Mekanisme akumulasi muatan pada nanopartikel MnO₂ dapat dilihat pada reaksi 1. Proses adsorpsi kation elektrolit (K⁺, Na⁺, H⁺ dan sebagainya) terjadi pada permukaan elektroda berdasarkan persamaan reaksi (1) (Augustyn dkk., 2014):

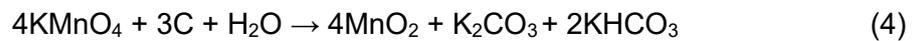


Mangan dioksida (MnO₂) dapat diperoleh dengan mereduksi ion permanganat (MnO₄⁻) (Meng dkk., 2013). Pengaruh pH larutan memiliki peran dalam pembentukan produk akhir. Pada pH tinggi, produk utama yang terbentuk adalah MnO₂ sedangkan pada pH rendah produk utamanya adalah Mn²⁺ (Abulizi dkk., 2014). Menurut Meng dkk. (2013), reaksi pembentukan kedua spesies ini dapat dilihat melalui persamaan reaksi (2) dan (3).



Menurut Zhang dkk. (2012), nanokomposit karbon aktif dan MnO₂ dapat dibuat dengan cara mereduksi langsung larutan KMnO₄ dengan menggunakan

karbon aktif itu sebagai reduktornya. Reaksi dapat dilihat pada persamaan reaksi (4):



Bahan berbasis MnO_2 berperan penting dalam kinerja elektrokimia. (Subramanian, 2005). Mekanisme penyimpanan energi bergantung pada bilangan oksidasi dari mangan sebagai situs aktif dan menunjukkan bahwa peningkatan persentase Mn dengan penurunan ukuran kristal mengarah ke kapasitas spesifik yang lebih tinggi (Sun dkk., 2013). Faktor fisik dan kimia juga mempengaruhi sifat elektrokimia MnO_2 yang memiliki pengaruh yang signifikan pada kapasitas spesifik dan stabilitas siklik (Chang dkk., 2009). Adapun beberapa elektrokimia material karbon yang komposit dengan magnesium oksida (MnO_2) bias dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Elektrokimia material komposit karbon dengan magnesium oksida (MnO_2)

Bahan Elektroda aktif	Kapasitansi spesifik	Siklus hidup	Referensi
MnO_2/AC	210 F/g	-	Zhang dkk., 2012
MnO_2/C	112 F/g	-	Kim dkk., 2015
MnO_2/AC	372 F/g	4500 kali	Doloksaribu dkk., 2017
MnO_2/AC	332.6 F/g	2000 kali	Wang dkk., 2015
MnO_2/AC	977,4 F/g	3000 kali	Shen dkk., 2018
MnO_2/CCY	477 F/g	-	Ullah dkk., 2019

2.5 Nanopartikel

Nanopartikel adalah partikel dengan ukuran nanometer, yaitu sekitar 1-100 nm. Material nanopartikel memiliki sifat atau karakteristik yang berbeda dari ukuran besarnya. Material berstruktur nano berbasis logam dapat disintesis melalui metode hidrotermal, solvotermal, sol-gel, elektrolisis, elektrokimia dan fisika (Chen dan Holt-Hilde, 2010). Potensi aplikasi nano telah banyak

dikembangkan pada berbagai bidang seperti komputasi, elektronik, katalis, energi, desain material dan aplikasi lainnya (Guo dkk., 2014; Kaushik dan Moores, 2016; White dkk., 2009; Cao dkk., 2020).

Bahan elektroda dengan bahan berstruktur nano berbasis logam atau oksida logam telah menunjukkan respons dan selektivitas yang lebih baik untuk menentukan berbagai analit dibandingkan bahan elektroda konvensional sebagai salah satu aplikasi nano. Struktur logam berukuran nano bertindak sebagai elektrokatalis dan kabel elektronik untuk menyediakan transfer elektron yang cepat antara transduser dan molekul analit (George dkk., 2018). Reaksi redoks elektrokimia H_2O_2 dapat ditingkatkan melalui penahan nanopartikel Pt yang dikontrol secara termal pada permukaan elektroda (Kwade dkk., 2015).

Saat ini, banyak peneliti telah mengembangkan bentuk material nano yang dikontrol bentuknya untuk meningkatkan kinerja pada aplikasi tertentu. Shen dkk., (2013) merancang bentuk elektroda melalui pertumbuhan susunan kawat nano NiCo_2O_4 mesopori pada karbon, yang meningkatkan kinerja elektroda. Bahan yang sama dengan morfologi yang berbeda dapat menghasilkan hal yang berbeda. Pada bentuk *nanoflowers* MnO_2 telah menyediakan kapasitas penyimpanan ion natrium awal yang tinggi dibandingkan dengan bentuk *nanorods* MnO_2 (Zhang dkk., 2015). Narayanan dan El-Sayed (2004) telah menganalisis berbagai morfologi skala nano Pt, seperti nanopartikel tetrahedral, kubik, dan hampir bulat. Konstanta laju tertinggi diamati dengan nanopartikel tetrahedral dan konstanta laju terendah diamati dengan nanopartikel kubik, sedangkan nanopartikel sferis menunjukkan konstanta laju tinggi. Kinerja elektrokimia MnO_2 menghasilkan kapasitansi 282 F/g, partikel nano MnO_2 menunjukkan stabilitas elektrokimia yang tinggi dalam menghasilkan bahan elektroda yang cocok untuk superkapasitor (Raj dkk., 2014).

2.6 Mangan (Mn)

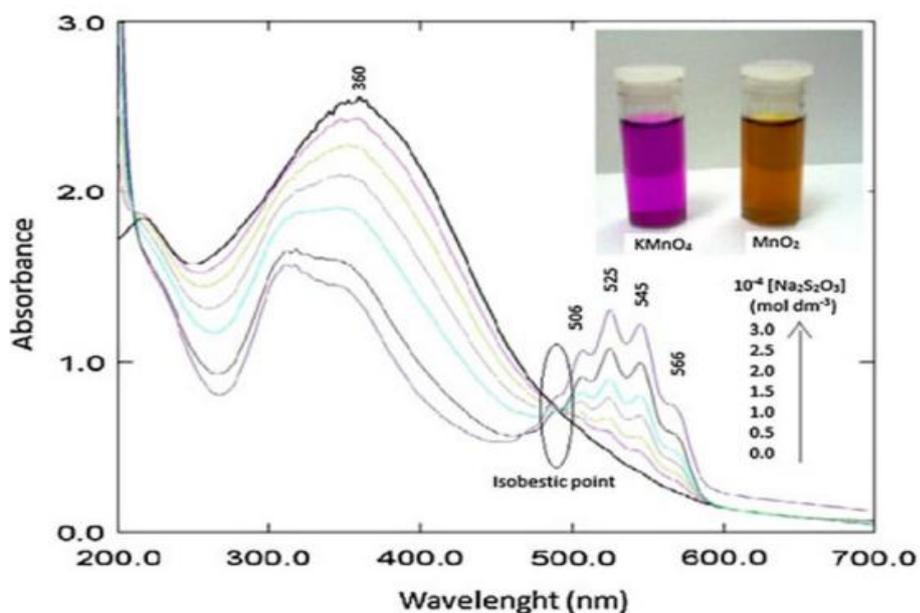
Mangan (Mn) adalah logam transisi paling melimpah di kerak bumi (Qian dkk., 2019). Mangan memiliki beberapa bilangan oksidasi mulai dari 0 hingga +7. Konfigurasi dari Mn: $[\text{Ar}] 4s^2 3d^5$ menghasilkan keadaan valensi dan spesies dari Mn yang paling umum di alam adalah Mn (II), Mn (III), dan Mn (IV) memiliki fungsi yang berbeda-beda (Du dkk., 2012). Mangan dapat mengalami reaksi

redoks dan merupakan oksidan alami terkuat yang ada di lingkungan (Feng dkk., 2018; Lan dkk., 2019). Dari tiga bilangan oksidasi yang terbentuk secara alami menyatakan, mangan dengan bilangan oksidasi +2 yang dapat terjadi sebagai ion bebas dalam larutan air (John dan Hem, 1963). Mangan dengan bilangan oksidasi +3 bisa terbentuk dalam larutan air hanya jika dikomplekskan. Mangan dengan bilangan oksida +3 cenderung tidak stabil sehingga membentuk mangan dengan bilangan oksidasi +2 dan +4 (Ismail dkk., 2004).

2.7 Karakterisasi Elektroda Superkapasitor

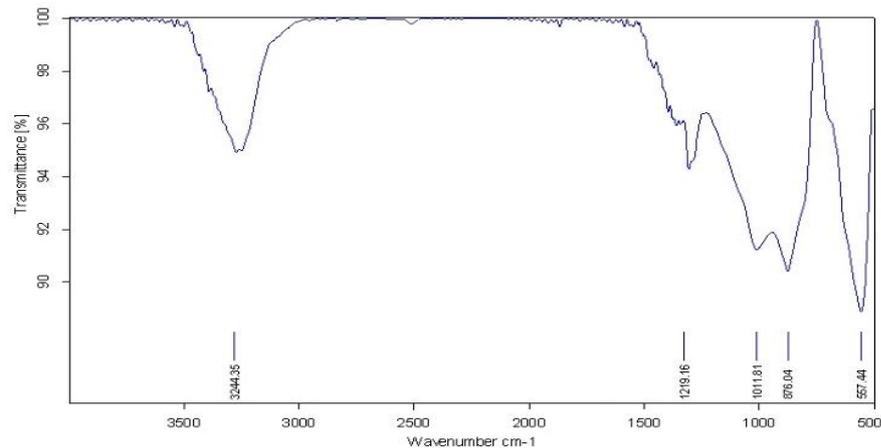
Karakterisasi elektroda superkapasitor dapat dilakukan dengan beberapa instrumen yaitu *Fourier Transformation Infrared* (FTIR), *Ultra Violet-Visible* (UV-Vis), *Scanning Electron Microscope* (SEM), *Xray diffraction* (XRD), Karakterisasi luas permukaan dan volume dengan SAA (Raj dkk., 2014; Kim dkk., 2016; Akbari dkk., 2018).

Kalium permanganat (KMnO_4) tereduksi membentuk MnO_2 dengan karakteristik puncak serapan pada panjang gelombang 545,5 nm, 525,5 nm dan 507,5 nm. Spektrum UV-Vis pada panjang gelombang 360 nm menunjukkan adanya nanopartikel MnO_2 pada sampel seperti yang dilihat pada Gambar 6 (Jaganyi dkk., 2013).



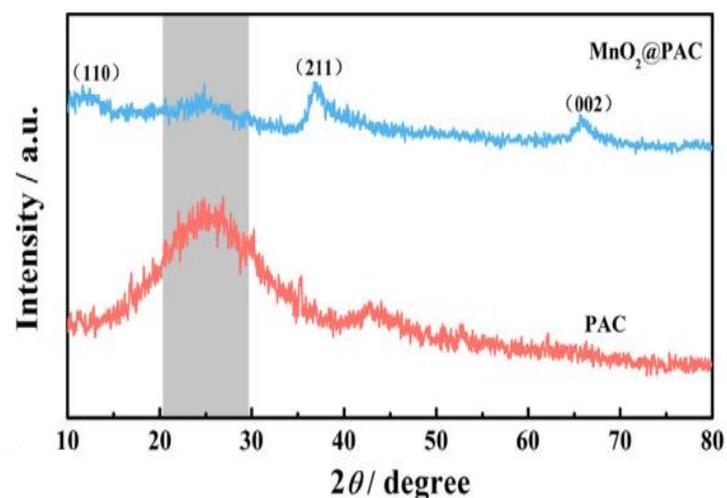
Gambar 6. Spektrum UV-Vis larutan KMnO_4 yang tereduksi menjadi larutan MnO_2 (Jaganyi dkk., 2013).

Spektrum FTIR pada Gambar 7 menunjukkan pita serapan oksida logam yaitu sekitar 567, 876 dan 1011 cm^{-1} menandakan adanya Mn-O. kemudian puncak yang lemah berpusat pada 1219 cm^{-1} dapat dikaitkan dengan vibrasi regangan Mn-O dari MnO_2 dan puncak kuat yang berpusat pada 3244 cm^{-1} (Akbari dkk., 2018).



Gambar 7. Spektrum FT-IR dari struktur nano MnO_2 (Akbari dkk., 2018)

Menurut Kong dkk. (2019) struktur karbon aktif dianalisis dengan difraksi sinar-X. Pola difraksi *porous activated carbon* (PAC) menunjukkan dua puncak yang lebar pada 26° dan $43,5^\circ$ sesuai dengan pola grafit yang menunjukkan ciri khas dari amorf. Gambar 8 penambahan MnO_2 pada PAC terbentuk tiga difraksi yang terletak pada sudut 2 theta $12,8^\circ$, $37,5^\circ$ dan $65,1^\circ$ yang menunjukkan adanya MnO_2 sesuai data JCPDS.

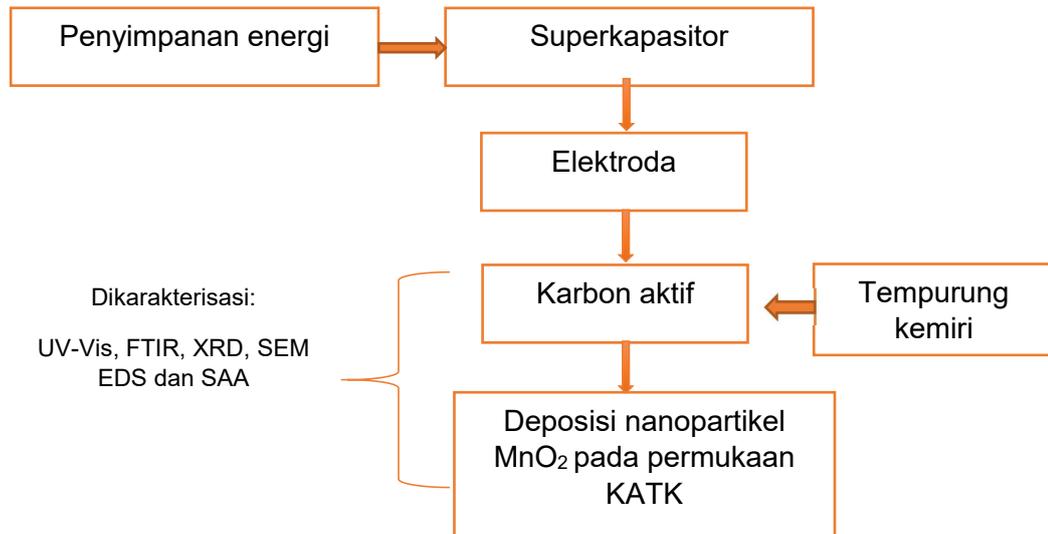


Gambar 8. Data XRD karbon aktif berpori (PAC) dan karbon aktif berpori dengan MnO₂ (Kong dkk., 2019).

2.7 Kerangka Berfikir

Superkapasitor merupakan salah satu penyimpanan energi yang memiliki nilai kapasitansi yang tinggi. Nilai kapasitansi spesifiknya yang bergantung pada jenis bahan elektroda yang digunakan. Pembuatan bahan elektroda superkapasitor dapat menggunakan karbon aktif. Pembuatan karbon aktif dapat memanfaatkan limbah biomassa seperti tempurung kemiri yang belum dimanfaatkan secara optimal. Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa biomassa karbon aktif dalam sistem penyimpanan energi memiliki kekurangan yang mana ukuran pori karbon yang dihasilkan tidak beraturan. Biomassa karbon menghasilkan ukuran pori dari mikro-pori hingga ukuran makro-pori yang dihasilkan akan menghambat transport ion dalam sistem sel kapasitor, dan akhirnya akan mempengaruhi nilai kapasitansi. Sehingga, pada permukaan biomassa karbon aktif perlu ditambahkan material untuk menghasilkan nilai kapasitansi yang lebih tinggi.

Metode yang tepat untuk meningkatkan kapasitas dari elektroda superkasitor seperti penambahan nanopartikel mangan dioksida pada permukaan karbon aktif. Pada bahan elektroda yang terdeposisi nanopartikel mangan dioksida menghasilkan konduktivitas ionik yang baik antara elektroda dan elektrolit. Hasil ini menunjukkan bahwa deposisi bahan memiliki kemampuan untuk meningkatkan interaksi elektrolit dengan bahan aktif dan membantu penetrasi elektrolit ke permukaan MnO₂. Interaksi yang terjadi menyebabkan kinerja kapasitif yang lebih baik dan jalur ion elektrolit untuk berdifusi ke permukaan elektroda. Struktur karbon menyediakan ruang pertumbuhan yang cukup untuk partikel MnO₂, yang dapat menghindari nanopartikel agregasi partikel MnO₂ dan menyediakan lebih banyak tempat untuk reaksi redoks Faradik yang cepat, sehingga meningkatkan kinerja elektrokimia. Elektroda deposisi KATK + MnO₂ menunjukkan kinerja lebih baik daripada elektroda KATK. Elektroda deposisi KATK+MnO₂ memiliki kapasitansi spesifik yang lebih tinggi dan kemampuan laju pengisian/pengosongan yang lebih baik, yang terutama disebabkan oleh struktur karbon aktif, dimana KATK dan MnO₂ bekerja secara sinergis.



Gambar 9. Kerangka Berfikir

2.8 Hipotesis

- aktivasi karbon menggunakan H_3PO_4 membentuk banyak pori pada permukaan karbon aktif, sehingga akan semakin banyak ruang yang tersedia untuk penyimpanan muatan listrik berupa ion-ion elektrolit pada biomassa karbon aktif.
- variasi massa karbon aktif tempurung kemiri (KATK) mempengaruhi pembentukan koloid nanopartikel MnO_2 .
- memaksimalkan pengaruh konsentrasi KMnO_4 , pH dan suhu terhadap pembentukan koloid nanopartikel MnO_2 .
- deposisi nanopartikel MnO_2 pada permukaan karbon aktif meningkatkan nilai kapasitansi spesifik karbon aktif tempurung kemiri.