

BAB I

PENDAHULUAN UMUM

1.1 Latar Belakang

Perkembangan kebutuhan energi listrik saat ini, menyebabkan kebutuhan akan perangkat penyimpanan energi listrik semakin meningkat (Elsherif et al., 2023). Berdasarkan data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (2024), konsumsi listrik per kapita Indonesia terus meningkat sejak tahun 2017 dan pada tahun 2024 mencapai 1.408 kWh/kapita. Oleh karena itu, pemerintah terus menyiapkan pasokan listrik guna mengantisipasi kenaikan konsumsi listrik masyarakat. Sumber utama energi selama ratusan tahun merupakan bahan bakar yang berasal dari fosil (Saini et al., 2021).

Konsumsi bahan bakar fosil yang meningkat mengakibatkan terjadinya penipisan lapisan ozon, perubahan iklim, masalah lingkungan, dan peningkatan risiko kesehatan bagi makhluk hidup (Hussain et al., 2017). Penggunaan bahan bakar fosil yang berlebihan menimbulkan masalah, hal ini mendorong pencarian sumber energi terbarukan yang dapat menyimpan energi yang lebih efisien. Sumber energi terbarukan yang dapat digunakan ialah energi surya, energi angin, energi nuklir, energi biomassa, energi hidroelektrik dan energi geotermal (Zhou et al., 2020). Berdasarkan pemanfaatannya, sumber energi tersebut memiliki kelemahan diantaranya adalah ketersediaan sepanjang tahun yang tidak terjamin dan harus disesuaikan dengan lokasi penggunaannya (Zhang et al., 2023). Oleh karena itu, perangkat penyimpanan energi diperlukan untuk dapat digunakan dalam jangka waktu lama. Salah satu perangkat penyimpanan energi adalah superkapasitor.

Superkapasitor merupakan jenis kapasitor yang dapat menyimpan energi dalam skala besar dengan jumlah energi kimia yang hampir setara dengan baterai kimia (Nursiti et al., 2018). Superkapasitor memiliki beberapa keunggulan yaitu, kepadatan daya yang tinggi, stabilitas kimia jangka panjang, pengisian dan pengosongan yang cepat, masa siklus yang panjang ($>1.000.000$ siklus), dan ramah lingkungan (Rodríguez-Rego et al., 2023; Tynan et al., 2023). Keunggulan tersebut menjadikan superkapasitor sebagai terobosan baru penyimpanan energi dan telah digunakan secara luas dalam berbagai bidang seperti transportasi listrik, teknologi digital, dan mesin listrik (Zhang et al., 2023).

Superkapasitor memiliki prinsip dasar seperti kinerja baterai, yang terdiri dari komponen elektroda, pengumpul arus, pengikat, separator, dan elektrolit (Sharma dan Chand, 2023). Prinsip kerja dari superkapasitor ialah dengan mengumpulkan muatan-muatan elektron bebas dari hasil penyerapan ion elektrostatis ke permukaan elektroda keping sejajar yang telah dilengkapi elektrolit diantara bahan konduktif pada area permukaan spesifik. Pengumpulan muatan-muatan tersebut akan menghasilkan medan listrik yang menyebabkan superkapasitor dapat menyimpan energi (Huda et al., 2022).

Komponen yang memiliki peran penting dalam sistem penyimpanan energi listrik adalah elektroda, karena dalam komponen tersebut terjadi proses *charge-discharge* (Arif et al., 2015). Sifat elektrokimia dan pengisian mekanisme pada superkapasitor sangat tergantung pada jenis bahan elektroda yang digunakan (Hardi et al., 2020). Abioye dan Ani (2015) menyatakan bahwa bahan elektroda yang biasa digunakan untuk superkapasitor dibagi menjadi tiga kategori, yaitu polimer konduktif, logam oksida, dan bahan karbon dengan permukaan spesifik yang luas.

Karbon aktif merupakan salah satu jenis bahan yang paling sering digunakan sebagai bahan elektroda untuk superkapasitor karena memiliki luas permukaan spesifik yang besar, ketahanan kimia, konduktivitas listrik yang baik, stabilitas kimia yang baik dan harga yang terjangkau (Tumimomor dan Palilingan, 2018). Salah satu bahan baku yang dapat digunakan untuk pembuatan karbon aktif ialah limbah biomassa yang berasal dari cangkang kelapa sawit, karena melimpah di alam, mudah didapat dan karbon aktif yang dihasilkan pada cangkang kelapa sawit cukup tinggi (Zheng et al., 2017). Beberapa penelitian menyatakan bahwa karbon aktif dinilai masih kurang baik untuk menghasilkan superkapasitor berkinerja tinggi, karena proses transportasi ion elektrolit yang sangat lambat sehingga membatasi pembentukan lapisan ganda listrik dan mengurangi kapasitas muatan (Fleischmann et al., 2022; Li et al., 2023). Oleh karena itu, karbon aktif dapat dikompositkan dengan oksida logam berupa mangan dioksida (MnO_2). Mangan dioksida merupakan bahan penyimpan muatan yang menjanjikan untuk elektroda superkapasitor elektrokimia (Wallar et al., 2017). Material ini sangat tepat digunakan untuk desain superkapasitor karena mudah didapat, biaya rendah, toksisitas yang rendah, memiliki rentang tegangan yang lebar, dan kapasitansi spesifik sebesar $\pm 1.370 \text{ F/g}$ (Tseng et al., 2018).

Kinerja elektroda superkapasitor dapat dipengaruhi oleh dua faktor, yaitu struktur dan gugus fungsi. Keragaman struktur menyebabkan perbedaan kapasitas penyimpanan ion dan kapasitas transport elektron bahan elektroda yang memengaruhi kinerja kapasitas bahan. Gugus fungsi akan memengaruhi konduktivitas bahan dan kinerja laju serta stabilitas kimia. Oleh karena itu, proses persiapan karbon dan mekanisme perlu diperhatikan (Dai et al., 2018). Metode karbonisasi yang tepat dilakukan yaitu melalui proses karbonisasi hidrotermal. Karbonisasi hidrotermal merupakan metode karbonisasi yang ramah lingkungan dan baik digunakan untuk memodifikasi fungsi permukaan dan porositas karbon. (Sandeep dan Ravindra, 2024). Che dan Heynderickx (2024) juga menyatakan bahwa karbonisasi hidrotermal adalah salah satu proses karbonisasi yang sangat baik digunakan untuk mengubah limbah biomassa menjadi karbon, karena dapat dihasilkan karbon aktif yang memiliki porositas yang tinggi dan ukuran pori yang besar, serta dapat digunakan untuk menyimpan energi.

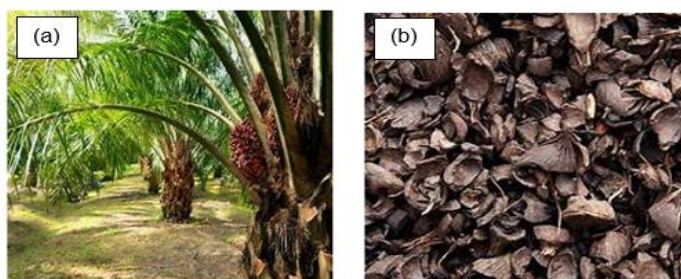
Penelitian mengenai sintesis bahan elektroda superkapasitor berbasis karbon dengan memanfaatkan limbah biomassa dan logam oksida beberapa tahun terakhir ini telah banyak dilakukan. Salah satu penelitian yang berhasil dilakukan oleh Choi et al. (2020) adalah mengkomposit karbon aktif dengan MnO_2 yang memiliki

kapasitansi spesifik sebesar 60,3 F/g. Wang et al. (2022) juga melakukan penelitian serupa dengan menggunakan limbah biomassa dari terong dan memperoleh kapasitansi spesifik sebesar 652,5 F/g. Selain itu, Hamouda et al. (2024) juga memperoleh hasil kapasitansi spesifik sebesar 301 F/g dengan menggunakan limbah biomassa dari kayu akasia. Sivakumar dan Prabu (2021) juga berhasil mensintesis nanopartikel α -MnO₂ sebagai elektroda superkapasitor dan hasil penelitian menunjukkan kapasitansi spesifik yang sangat besar pada kinerja elektrokimia elektroda yaitu sebesar 910 F/g.

Berdasarkan pemaparan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mensintesis karbon aktif dari cangkang kelapa sawit dengan menggunakan metode hidrotermal dengan komposit MnO₂ sebagai kandidat bahan elektroda superkapasitor. Penelitian ini dibagi menjadi dua bagian utama, yaitu sintesis karbon aktif dari cangkang kelapa sawit (Bab II) dan sintesis komposit karbon aktif dan MnO₂ sebagai kandidat elektroda superkapasitor (Bab III). Oleh karena itu, pembahasan teori yang mendukung penelitian ini akan disajikan pada bagian berikut.

1.1.1 Limbah Biomassa Cangkang Kelapa Sawit

Indonesia merupakan salah satu negara penghasil kelapa sawit terbesar di dunia. Kelapa sawit memegang peranan penting bagi perekonomian Indonesia yaitu sebagai salah satu penyumbang devisa non-migas yang cukup besar (Larasati et al., 2021). Menurut Direktorat Jenderal Perkebunan (2021), luas perkebunan sawit di Indonesia mencapai 15 juta hektar dan peningkatan produksi kelapa sawit mencapai 49 juta ton. Peningkatan luas perkebunan dan peningkatan produksi berimplikasi pada peningkatan jumlah limbah biomassa yang dihasilkan (Yanti et al., 2022).



Gambar 1.1 (a) Pohon kelapa sawit dan (b) Limbah cangkang kelapa sawit

Klasifikasi tanaman kelapa sawit menurut Pahan (2012) ialah sebagai berikut.

Divisi	: Embryophyta Siphonagama
Kelas	: Angiospesmae
Ordo	: Monocotyledonae
Famili	: Arecaceae
Subfamili	: Cocoideae
Genus	: <i>Elaeis</i>
Spesies	: <i>Elaeis guineensis</i>

Tanaman kelapa sawit menghasilkan limbah padat dan cair yang merupakan sisa pengolahan kelapa sawit yang tidak termasuk dalam produk utama (Agustina et al., 2023). Limbah padat kelapa sawit diantaranya adalah tandan buah segar sekitar 20-22%, cangkang sekitar 7%, serabut sekitar 10-13%, dan limbah cair sebanyak 60% (Meutia, 2023). Pemanfaatan limbah kelapa sawit terutama pada cangkang kelapa sawit telah banyak dilakukan karena sifat fisika dan kimia yang menunjukkan keuntungan bagi industri konstruksi, pemurnian air, dan energi terbarukan (Abdullah et al., 2021). Selain itu, pemanfaatan limbah cangkang kelapa sawit juga banyak digunakan sebagai karbon aktif, elektroda superkapasitor, briket, penguat komposit logam dan polimer, serta agregat konstruksi (Uchegbulam et al., 2022).

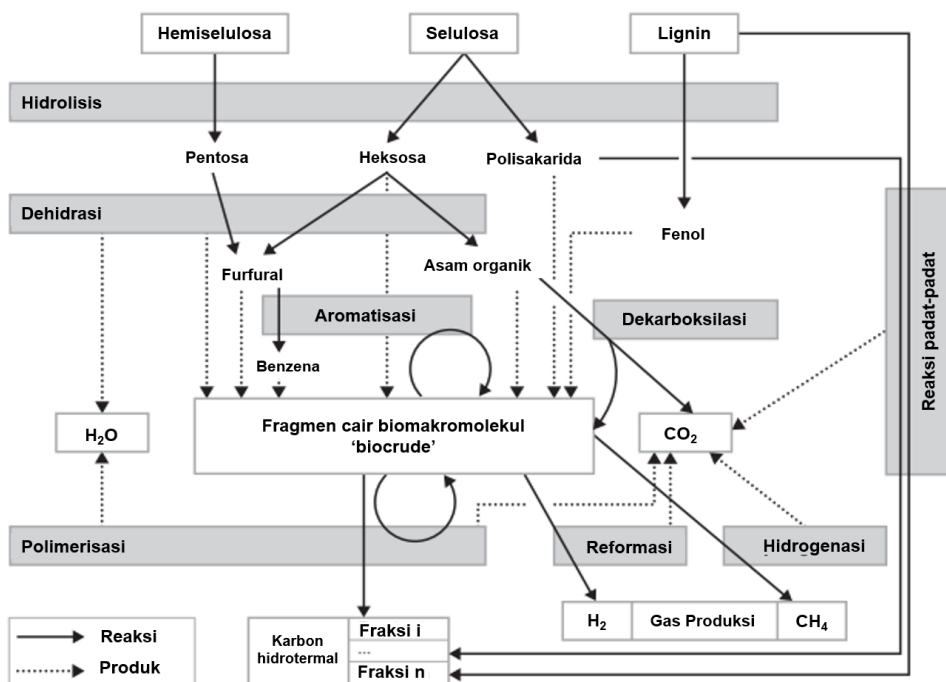
Limbah cangkang kelapa sawit memiliki ciri berwarna hitam keabuan, bentuk tidak beraturan dan memiliki kekerasan cukup tinggi (Vasdazara et al., 2018). Mehta et al. (2020) menyatakan bahwa cangkang kelapa sawit memiliki kandungan lignoselulosa, dengan masing-masing kandungan lignin sebesar 23%, hemiselulosa sebesar 21%, dan selulosa sebesar 51%. Bahan biomassa yang mengandung bahan lignoselulosa seperti lignin, selulosa, dan hemiselulosa dapat dikonversi menjadi bahan yang memiliki nilai guna tinggi (Hardi et al., 2020). Produk yang dihasilkan oleh biomassa lignoselulosa yang bernilai tinggi diantaranya dapat digunakan sebagai bahan elektroaktif, bahan kimia, dan penyimpanan energi (Mehta et al., 2020).

1.1.2 Karbonisasi Hidrotermal

Karbonisasi hidrotermal merupakan proses karbonisasi yang memanfaatkan penggunaan media air dalam reaktor bertekanan dengan melibatkan reaksi hidrolisis, dehidrasi, dekarboksilasi, kondensasi, dan aromatisasi. Proses hidrolisis melibatkan air sebagai kelompok glikosidik dalam selulosa dan hemiselulosa biomassa, hal ini dapat membantu menghasilkan jumlah *hydrochar* berpori yang lebih tinggi sebagai produk karbon (Tang et al., 2018). Karbonisasi hidrotermal sering dilakukan pada suhu sedang yaitu sekitar 180-250 °C dan pada tekanan 2-10 MPa (Vardiambasis et al., 2020). Proses karbonisasi hidrotermal dilakukan pada *autoclave* tertutup yang terbuat dari baja yang dilapisi oleh perak atau platina dan berfungsi untuk melindungi dari proses korosi akibat adanya cairan alkali (Pratiwi, 2021). Produk utama karbonisasi hidrotermal ialah *hydrochar* yang merupakan arang padat melalui proses pembakaran yang tidak melibatkan udara sedikitpun (Hitzl et al., 2015). Selain itu, juga menghasilkan produk sampingan berupa H₂O dan gas CO₂ (Yoganandham et al., 2020). Proses pembuatan karbon dengan cara hidrotermal mudah dilakukan dan murah, tidak beracun serta ramah lingkungan (Djandja et al., 2023).

Proses karbonisasi hidrotermal dapat mengkonversi berbagai jenis biomassa menjadi karbon dengan massa tertinggal sekitar 35-60%. Proses ini sangat dipengaruhi oleh jenis biomassa serta kondisi operasi yang meliputi waktu dan suhu. Reaksi yang terjadi pada proses hidrotermal diawali dengan hidrolisis yaitu ketika limbah biomassa dipanaskan dalam air, kemudian selulosa akan mengalami hidrolisis pada kondisi hidrotermal pada suhu 200 °C. Hemiselulosa akan mengalami

hidrolisis pada suhu sekitar 180 °C. Lignin akan terdegradasi secara hidrotermal diatas suhu 200 °C. Setelah terjadi reaksi hidrolisis, biomassa akan mengalami reaksi dehidrasi yaitu penghilangan kandungan air dari matriks biomassa tanpa mengubah susunan kimianya. Karbonisasi hidrotermal didasarkan pada proses kimia sederhana, yaitu pemisahan air dari karbohidrat (Kruse et al., 2013).



Gambar 1.2 Prinsip reaksi karbonisasi hidrotermal (Kruse et al., 2013)

Penggunaan metode hidrotermal memiliki beberapa kelebihan yaitu, suhu karbonisasi yang dibutuhkan rendah, karbonisasi terjadi dalam air dibawah tekanan yang dihasilkan sendiri, diperoleh partikel berukuran mikro, porositas dapat dikontrol dengan mudah, bahan berkarbon dapat dikombinasikan dengan komponen lain, permukaan kimia dan sifat elektronik dapat dikontrol dengan mudah melalui perlakuan termal serta morfologi dan porositasnya dipertahankan. Selain itu, material hasil karbonisasi hidrotermal juga dapat digunakan untuk berbagai aplikasi, yaitu sebagai bahan produksi biofuel, sintesis bahan kimia, pupuk, katalisis, pemurnian air, penyerapan gas CO₂, dan perangkat penyimpanan energi (Djandja et al., 2023).

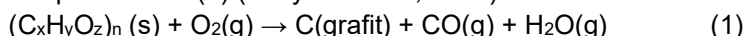
1.1.3 Sintesis Karbon Aktif

Karbon aktif merupakan suatu senyawa amorf hasil pengolahan bahan berkarbon atau arang dengan perlakuan khusus untuk memperbesar luas permukaannya. Karbon aktif memiliki bentuk karbon mikrokristalin dan nongrafit. Karbon aktif dalam bentuk nongrafit terdiri dari sejumlah hidrogen dan oksigen dalam strukturnya. Karbon aktif dikategorikan dalam karbon nongrafit karena memiliki kerapatan rendah

dan struktur yang berpori. Karbon aktif dapat diproduksi dari bahan yang mengandung karbon seperti limbah biomassa pertanian, yaitu cangkang kelapa sawit, tempurung, akar, kulit buah, kulit kayu dan daun. Selain itu, karbon aktif juga biasa terbuat dari bahan berbasis karbon, seperti batubara, lignin, bahan lignoselulosa, polimer sintesis, dan limbah karbon (Yahya et al., 2018).

Menurut Lubis et al. (2020) dan Ramadhani et al. (2020), terdapat tiga tahapan dalam pembuatan karbon aktif, yaitu:

1. Proses dehidrasi adalah proses pengurangan atau penghilangan air yang terkandung dalam bahan dasar pembuat karbon aktif. Proses ini biasanya dilakukan dengan menjemur bahan baku di bawah sinar matahari langsung atau mengeringkannya dengan oven sehingga diperoleh bahan baku yang diinginkan.
2. Proses karbonisasi adalah proses pembakaran bahan organik yang bertujuan untuk menghasilkan kandungan karbon dengan cara menghilangkan zat-zat selain karbon. Proses ini akan memicu terjadinya dekomposisi material organik dan mengeluarkan zat-zat pengotor dalam bahan baku. Unsur-unsur selain karbon pada proses ini, sebagian besar akan hilang dan terjadi perubahan struktur pori. Proses karbonisasi melalui beberapa tahapan proses, yaitu diawali dengan terjadinya proses penguapan air pada suhu 100-120 °C, kemudian proses penguraian selulosa, selanjutnya penguraian lignin, dan tahap pemurnian arang atau peningkatan kadar karbon. Proses karbonisasi dapat dilakukan melalui tiga cara, yaitu pirolisis, destilasi kering, dan hidrotermal. Reaksi umum yang terjadi pada pembentukan karbon dapat dilihat pada persamaan (1) (Maryono et al., 2013).



3. Proses aktivasi adalah proses yang bertujuan untuk meningkatkan volume pori, memperbesar diameter pori dan meningkatkan porositas karbon aktif. Proses aktivasi karbon dapat dilakukan dengan tiga cara, yaitu aktivasi fisika, aktivasi kimia, dan aktivasi fisika-kimia.

Sintesis karbon aktif dari limbah biomassa dapat dilakukan melalui kombinasi karbonisasi dan aktivasi, baik dalam satu langkah atau dua langkah tergantung pada metode aktivasi yang digunakan (Tang et al., 2018). Aktivasi kimia dilakukan dengan perendaman menggunakan zat pengaktif seperti NaOH, HCl, ZnCl₂, KOH, H₃PO₄ dan zat pengaktif lainnya (Xu dan Stromme, 2019). Sedangkan, aktivasi fisika dilakukan dengan menggunakan pemanasan pada suhu tinggi dan dapat menggunakan aliran gas pengoksidasi atau gas inert seperti O₂, CO₂, dan N₂ (Yahya et al., 2018). Proses aktivasi kimia memiliki beberapa kelebihan dibandingkan aktivasi fisika, yaitu temperatur yang digunakan lebih rendah, karbon yang dihasilkan lebih besar, karbon yang dihasilkan memiliki luas permukaan yang tinggi, serta mikroporositas dapat berkembang dengan baik dan bisa dikontrol. Akan tetapi, kelemahan dari aktivasi kimia ini dibutuhkan proses khusus untuk menghilangkan sisa-sisa dari bahan kimia yang digunakan (Sevilla dan Mokaya, 2014).

Proses pembuatan karbon aktif memiliki beberapa kriteria dalam pemilihan bahan baku, yaitu kandungan karbon tinggi, kandungan zat anorganik rendah agar hasil abu rendah, berlimpah di alam, biaya rendah, tingkat degradasi rendah, dan menghasilkan karbon aktif dengan hasil persen yang tinggi (Lubis et al., 2020). Penyusun utama karbon aktif ialah karbon yang berkisar antara 80% hingga 95%, selain itu zat penyusun karbon aktif juga mengandung oksigen 7%, sulfur 1%, nitrogen 0,5%, dan hidrogen 0,5% (Yahya et al., 2018; Zhou et al., 2020). Kualitas suatu karbon aktif dapat dinilai berdasarkan persyaratan Standar Nasional Indonesia (SNI) 06-3730-1995 yang dapat dilihat pada **Tabel 1.1**.

Tabel 1.1 Persyaratan karbon aktif berdasarkan SNI 06-3730-1995

Jenis Persyaratan	Parameter
Kadar air	Maks 15%
Kadar abu	Maks 10%
Kadar zat menguap	Maks 25%
Kadar karbon terikat	Min 65%
Daya serap terhadap iodium	Min 750 mg/g
Daya serap terhadap benzene	Min 25%

Karbon aktif memiliki sifat dengan luas permukaan tinggi dan porositas yang tinggi, sehingga karbon aktif banyak digunakan sebagai adsorben, katalis, bahan untuk pengolahan air limbah, dan penyimpan energi (Abdullah et al., 2021). Karbon aktif juga memiliki sifat dengan kinerja tinggi dalam konduktivitas listrik, stabilitas termal yang baik, dan reaktivitas permukaan yang baik sehingga menjadi alasan utama karbon aktif digunakan dalam beberapa tahun terakhir dalam penelitian, terutama pada pembuatan elektroda superkapasitor (Sevilla dan Mokaya, 2014; Yahya et al., 2018).

1.1.4 Nanopartikel MnO_2

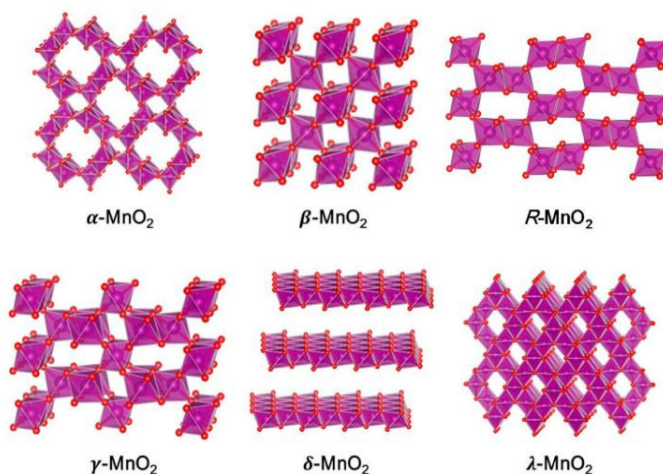
Sintesis nanopartikel mangan dioksida (MnO_2) merupakan penelitian yang sangat berkembang saat ini. Hal ini disebabkan karena memiliki aplikasi yang bervariasi. Nanopartikel MnO_2 adalah salah satu bahan yang paling umum digunakan di industri karena memiliki kelebihan seperti toksisitas rendah, kapasitansi tinggi, melimpah di alam, dan biaya produksi yang rendah (Nguyen et al., 2023).

Mangan dioksida (MnO_2) termasuk ke dalam material logam transisi seperti RuO_2 , SnO_2 , dan NiO yang memiliki kemampuan menyimpan muatan tinggi karena adanya energi celah pita (Yuda et al., 2021). Material ini merupakan senyawa yang memiliki toksisitas rendah dibanding senyawa lain, sehingga dapat menjadi dasar nanopartikel. Nanopartikel MnO_2 dapat diaplikasikan dalam pertukaran ion, biosensor, kedokteran, penyerapan molekul, katalisis, dan superkapasitor (Forouzandeh et al., 2020).

Nanopartikel MnO_2 memiliki karakteristik yang sangat baik untuk dijadikan perangkat penyimpanan energi karena stabilitas siklus yang baik, biaya rendah, dan kemampuan *charge-discharge* yang efisien (Abdullah et al., 2024). Maerial ini banyak digunakan pada aplikasi superkapasitor karena kapasitansi spesifik yang mencapai

1.370 F/g (Shi et al., 2024). Yao et al. (2019) juga mengungkapkan bahwa MnO_2 mengalami tren peningkatan dalam pemanfaatannya pada superkapasitor karena karakteristik elektrokimianya yang khas, reaktivitas tinggi, dan kapasitas untuk mengalami beragam bilangan oksidasi. Bilangan oksidasi MnO_2 diantaranya ialah Mn^{2+} , Mn^{3+} , dan Mn^{4+} (Yang et al., 2021).

Mangan dioksida (MnO_2) memiliki beberapa polimorf dengan struktur kristal yang berbeda, sehingga menghasilkan kinetika reaksi redoks yang berbeda pula. Polimorf MnO_2 dibedakan menjadi enam jenis, yaitu α - MnO_2 , β - MnO_2 , R - MnO_2 , γ - MnO_2 , δ - MnO_2 , dan λ - MnO_2 . Setiap polimorf MnO_2 ini memiliki susunan atom yang khas, sehingga keberagaman struktur tersebut menyebabkan selektivitas ion dan kinetika transfer elektron yang berbeda pada masing-masing polimorf MnO_2 . Sebagian besar sistem penyimpanan energi listrik menggunakan ion dalam elektrolit dan kinetika transfer elektron pada permukaan elektroda, sehingga diharapkan struktur kristal MnO_2 dapat diaplikasikan untuk penyimpan energi. Salah satu sistem penyimpanan energi listrik yang dapat diaplikasikan menggunakan nanopartikel MnO_2 adalah superkapasitor. Material ini dapat digunakan sebagai bahan elektroda superkapasitor, karena memiliki luas permukaan dan kapasitas penyimpanan yang besar (Shin et al., 2020).



Gambar 1.3 Struktur kristal dari polimorf MnO_2 (Shin et al., 2020)

1.1.5 Superkapasitor

Superkapasitor merupakan salah satu perangkat penyimpanan energi yang memiliki kapasitas lebih besar dibandingkan dengan kapasitor konvensional. Superkapasitor sama halnya dengan baterai dan kapasitor konvensional dapat mengubah energi kimia menjadi energi listrik (Meena et al., 2023). Superkapasitor juga dikenal sebagai elektrokimia kapasitor yang dapat menggantikan alternatif penyimpanan energi seperti *fuel cells*, baterai dan kapasitor konvensional karena memiliki beberapa keunggulan yaitu kepadatan daya tinggi, stabilitas kimia jangka panjang, pengisian

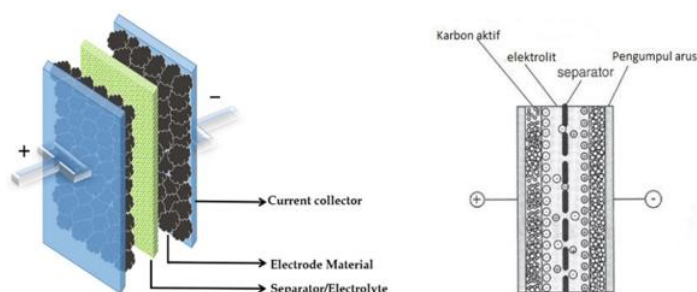
dan pengosongan cepat, masa siklus yang panjang, dan ramah lingkungan (Rodríguez-Rego et al., 2023). Komparasi dari baterai, kapasitor konvensional, dan superkapasitor dapat dilihat pada **Tabel 1.2**.

Tabel 1.2 Perbandingan karakteristik dari baterai, kapasitor konvensional, dan superkapasitor (Meena et al., 2023)

Karakteristik	Baterai	Kapasitor konvensional	Superkapasitor
Waktu pengisian-pengosongan	1 – 10 jam	Pikodetik – milidetik	Milidetik – detik
Kepadatan energi	8 – 600 Wh/kg	0,01 – 0,05 Wh/kg	1 – 10 Wh/kg
Kepadatan daya	0,005 – 0,4Wh/kg	0,25 – 10 Wh/kg	1 – 120 Wh/kg
Berat	1 - >10 kg	1 – 10 kg	0,001 – 0,23 kg
Potensial Listrik	1,25 – 4,2 V	2,3 – 2,75 V	6 – 800 V
Siklus hidup	150 – 1500 siklus	>100.000 siklus	>1.000.000 siklus

Superkapasitor sebagai perangkat penyimpanan energi telah banyak digunakan dalam berbagai perangkat seperti laptop, kamera digital, ponsel, pesawat terbang, kendaraan listrik, kereta listrik, dan lainnya (Meena et al., 2023). Prinsip kerja superkapasitor melibatkan pengumpulan muatan elektron bebas melalui penyerapan ion elektrostatis pada permukaan elektroda keping sejajar. Pengumpulan muatan akan menciptakan medan listrik yang memungkinkan superkapasitor dapat menyimpan energi (Huda et al., 2022).

Komponen dan desain superkapasitor disusun hampir mirip dengan baterai yang terdiri dari bahan elektroda, bahan elektrolit, pengumpul arus, pengikat dan separator. Bahan elektroda dan elektrolit merupakan komponen aktif pada superkapasitor, sedangkan pengumpul arus, pengikat, dan separator merupakan komponen pasif. Komponen aktif dan pasif pada superkapasitor memiliki kontribusi terhadap kinerja superkapasitor, namun yang paling berperan penting ialah elektroda dan elektrolit (Samantara dan Ratha, 2018).

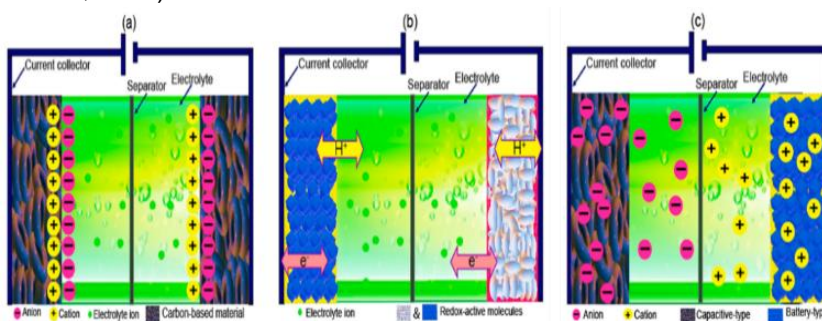


Gambar 1.4 Komponen penyusun superkapasitor (Samantara dan Ratha, 2018)

Elektroda merupakan komponen penting dalam penyusunan superkapasitor untuk menghasilkan lapisan ganda listrik dan mengakumulasi muatan. Bahan aktif elektroda harus memiliki luas permukaan yang besar, tidak dapat bereaksi dengan elektrolit, dan memiliki daya hantar listrik yang baik (He dan Zhang, 2022). Selain itu, pemilihan bahan elektroda juga perlu diperhatikan untuk mencapai kapasitas

penyimpanan energi yang tinggi, tingkat pengisian-pengosongan yang cepat dan stabilitas perangkat jangka panjang (Dar et al., 2024). Beberapa bahan elektroda yang telah diteliti dan dikembangkan yang paling meyakinkan untuk meningkat kinerja elektrokimia ialah seperti bahan karbon, polimer, dan logam oksida transisi (Forouzandeh et al., 2020).

Bahan berbasis karbon paling sering digunakan untuk bahan elektroda superkapasitor karena biayanya yang rendah, luas permukaan spesifik dan konduktivitas tinggi (Sahani et al., 2024). Bahan berbasis karbon yang umum digunakan ialah karbon aktif, *graphene*, dan karbon nanotube (Dar et al., 2024). Senyawa berbasis logam oksida transisi merupakan bahan aktif redoks yang juga biasa digunakan sebagai elektroda superkapasitor. Secara umum, terdapat beberapa logam transisi yang digunakan dalam bentuk logam oksida transisi seperti RuO_2 , MnO_2 , NiO , CuO , V_2O_5 , Fe_3O_4 , dan Co_3O_4 (Forouzandeh et al., 2020). Logam oksida transisi sering digunakan sebagai bahan elektroda superkapasitor karena kapasitansi spesifik yang tinggi, konduktivitas listrik dan stabilitas yang unggul (Sahani et al., 2024).



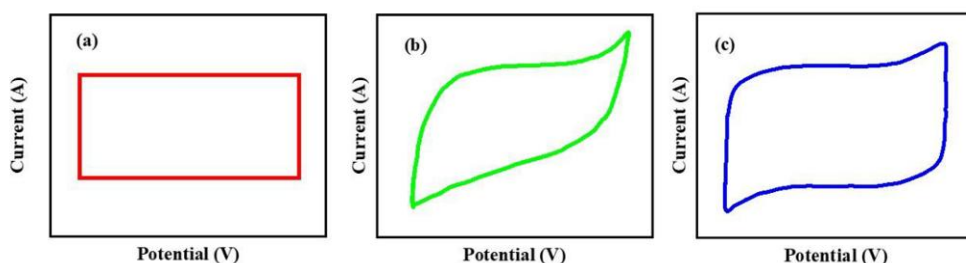
Gambar 1.5 Skema representasi superkapasitor (a) *Electric double-layer capacitor* (ELDC), (b) *Pseudocapacitor* dan (c) *Hybrid supercapacitor* (Forouzandeh et al., 2020)

Berdasarkan material elektroda penyusunnya, superkapasitor dibagi menjadi 3 jenis, yaitu *electric double layer capacitors* (EDLC), *pseudocapacitors*, dan *hybrid supercapacitor* (J. Zhang et al., 2023). EDLC menggunakan area permukaan yang besar dari bahan elektroda seperti karbon aktif dan turunannya untuk menyimpan muatan di lapisan ganda listrik. Pseudokapasitor menggunakan logam oksida transisi atau polimer konduktif sebagai elektroda yang memberikan reaksi redoks pseudokapasitansi. Keunggulan dari tipe ini memberikan kapasitansi spesifik yang besar, rapat energi dan daya yang relatif tinggi namun waktu hidup yang lebih pendek. Kapasitor hibrid merupakan superkapasitor yang dirangkai dari dua kombinasi bahan EDLC dan pseudokapasitif yang berbeda, elektroda dapat berfungsi sebagai anoda atau katoda (Forouzandeh et al., 2020; Sahani et al., 2024; Zhang et al., 2023).

Kinerja elektroda superkapasitor dapat dievaluasi melalui metode elektrokimia yaitu *cyclic voltammetry* (CV), *galvanostatic charge-discharge* (GCD), dan *electrochemical impedance spectroscopy* (EIS). Dari pengukuran elektrokimia

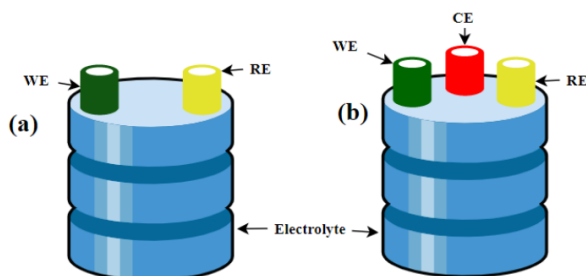
tersebut dapat diperoleh informasi terkait perilaku dan kinerja material elektroda berupa kapasitansi spesifik (Csp), energi spesifik (Esp), daya spesifik (Psp), dan resistivitas (Azman et al., 2018). *Cyclic voltammetry* (CV) merupakan salah satu teknik elektrokimia yang umum digunakan untuk memahami sifat elektrokimia dari suatu material superkapasitor secara termodinamika dan kinetik (Sharma dan Chand, 2023). CV banyak digunakan untuk menilai kinerja perangkat penyimpanan energi listrik dan memeriksa mekanisme penyimpanan muatan. Teknik ini melibatkan potensial dan mengamati respon arus yang dihasilkan dengan dilakukan pada beberapa laju pemindaian dalam mV/s (Pholauyphon et al., 2024).

Hasil pengukuran pada CV berupa kurva voltamogram yang dapat berfungsi sebagai klasifikasi kualitatif awal mekanisme penyimpanan muatan. Mekanisme penyimpanan dalam CV memberikan informasi mengenai perilaku penyimpanan muatan yang bersifat kapasitif dan difusif. Sifat kapasitif menunjukkan bahwa dalam elektroda terjadi pelepasan muatan yang cepat antara elektroda dan elektrolit yang didorong oleh interaksi elektrostatis. Sedangkan, pada sifat difusif menunjukkan adanya reaksi redoks dalam proses pengisian dan pengosongan superkapasitor (Pholauyphon et al., 2024). Voltamogram merupakan grafik arus terhadap tegangan yang biasanya berbentuk persegi panjang atau elips untuk superkapasitor ideal (**Gambar 1.6a**). Bentuk persegi panjang pada voltamogram menunjukkan pembentukan lapisan ganda listrik dan kerapatan arus kapasitif. Voltamogram pada pseudokapasitor biasanya berbentuk kuasi-persegi yang terdiri dari kerapatan arus redoks kapasitif dan faradaik (**Gambar 1.6b**). Dalam situasi nyata, bentuk persegi panjang biasa disebabkan karna adanya resistansi seri sistem yang dapat dikaitkan dengan proses transfer elektron dalam material elektroda, difusi ion dalam elektrolit, dan kontak antara elektroda (Kumar et al., 2025).



Gambar 1.6 Tipe voltamogram superkapasitor: a) superkapasitor ideal, b) pseudokapasitor, c) superkapasitor tidak ideal (degradasi elektrolit) (Kumar et al., 2025)

Elektroda seringkali mengalami degradasi dengan elektrolit yang digunakan pada saat pengukuran, hal ini dikarenakan terjadi pada titik ekstrem pemindaian tegangan yang merupakan fase tidak ideal pada superkapasitor (**Gambar 1.6c**). Terdapat dua tipe sistem elektroda pada teknik CV, yaitu dengan sistem dua elektroda dan tiga elektroda yang dapat dilihat pada **Gambar 1.7**.



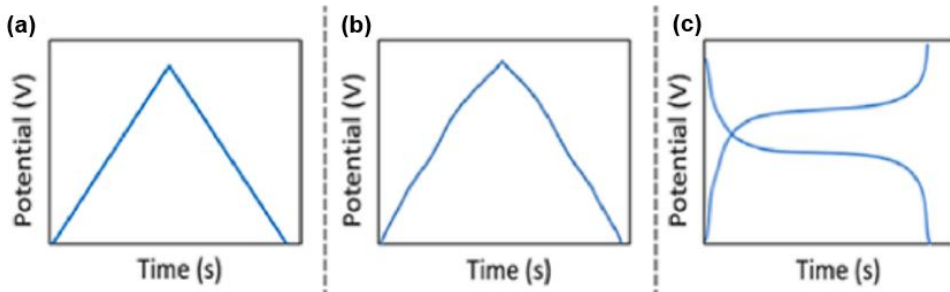
Gambar 1.7 Tipe sistem pengukuran elektroda: a) sistem dua elektroda dan b) sistem tiga elektroda (Kumar et al., 2025)

Sistem dua elektroda (**Gambar 1.7a**) menggunakan dua elektroda, yaitu elektroda kerja (WE) berfungsi sebagai elektroda positif dan elektroda referensi (RE) berfungsi sebagai elektroda negatif (Kumar et al., 2025). Sedangkan, pada sistem tiga elektroda (**Gambar 1.7b**) melibatkan elektroda kerja (WE) yang merupakan tempat berlangsungnya reaksi elektrokimia, elektroda referensi (RE) yang digunakan sebagai titik referensi untuk mengukur potensial elektroda dalam sel elektrokimia, biasa menggunakan elektroda AgCl/Ag, dan elektroda pembanding (CE) digunakan untuk merekam arus yang masuk selama proses pengujian sel elektrokimia, biasa menggunakan elektroda Pt (Mohamad, 2025). Pengukuran CV dengan menggunakan sistem tiga elektroda dapat digunakan untuk menentukan kapasitansi spesifik, jendela potensial material, dan reversibilitas pengisian-pengosongan (Santos et al., 2023). Kapasitansi spesifik yang diukur dengan metode CV dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2).

$$C_s = \frac{\int i dV}{2 k m \Delta V} \quad (2)$$

Dimana C_s merupakan kapasitansi spesifik (F/g), k adalah laju pemindaian atau *scanrate* (mV/s), m adalah massa aktif elektroda (g), ΔV adalah jendela potensial (V), dan $\int i dV$ adalah luas area pada kurva CV.

Galvanostatic charge-discharge (GCD) sama halnya dengan CV, yaitu untuk mengevaluasi proses penyimpanan muatan dan kapasitansi spesifik (Sharma dan Chand, 2023). Analisis GCD menerapkan arus konstan selama proses pengisian dan pengosongan yang jendela potensialnya telah ditentukan. Teknik ini lebih menyerupai hasil nyata karena bergantung pada waktu dan potensial yang ditetapkan selama pengukuran (Santos et al., 2023). Tegangan yang diperoleh dari hasil pengukuran dengan teknik GCD selama waktu ke waktu berbentuk linear dengan kemiringan positif dan negatif yang bergantian. Gambar kurva dari hasil analisis GCD dapat dilihat pada **Gambar 1.8**. Material EDLC memiliki kurva GCD bersifat linear dan menunjukkan sifat kapasitif elektrokimia yang baik. Material pseudokapasitif memiliki kurva pengisian dan pengosongan yang bersifat tidak linear akibat reaksi faradaik kuasi reversibel (Sharma & Chand, 2023).



Gambar 1.8 Hasil Kurva GCD: a) material EDLC, b) pseudokapasitif, dan c) baterai (Sharma dan Chand, 2023)

Analisis CV merujuk pada laju pemindaian, sedangkan analisis GCD merepresentasikan jumlah proses elektrokimia dalam perangkat pada kerapatan arus ($A\ g^{-1}$) (Santos et al., 2023). Analisis GCD memberikan evaluasi kinerja material dalam superkapasitor yaitu seperti kapasitansi spesifik yang stabil dengan peningkatan kerapatan arus, meningkatkan proses pseudokapasitor untuk material logam oksida, dan stabilitas siklus yang tinggi. Siklus pada galvanostatik dapat digunakan untuk menguji kemampuan laju pada rentang kerapatan arus yang luas (Kumar et al., 2025).

Superkapasitor merupakan perangkat penyimpan energi, oleh karena itu muatan dan energi yang disimpan atau dilepaskan pada saat pengukuran GCD merupakan data yang penting. Temuan terkait energi mencerminkan temuan untuk kapasitansi karena energi hanya terkait dengan kapasitansi dan regangan dimana muatan ditambahkan atau dihilangkan dari sistem (Kumar et al., 2025). Kapasitansi spesifik dari kurva GCD dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (3).

$$C_{sc} = \frac{I \times \Delta t}{m \times \Delta V} \quad (3)$$

Kinerja elektrokimia superkapasitor dapat ditingkatkan dengan pengisian dan pengosongan yang cepat serta menurunkan tegangan yang minimal. Seiring dengan peningkatan kerapatan arus dan penurunan kerapatan daya, maka kerapatan energi akan meningkat (Sharma & Chand, 2023). GCD juga dapat memberikan nilai energi spesifik dan daya spesifik yang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (4) dan (5).

$$E_{sc} = \frac{C_{sc} \times \Delta V^2}{2 \times 3.6} \quad (4)$$

$$P_{sc} = \frac{3600 \times E_{sc}}{\Delta t} \quad (5)$$

Dimana C_s merupakan kapasitansi spesifik (F/g), E_s adalah energi spesifik (Wh/kg), P_s adalah daya spesifik (W/kg), I adalah arus *charge-discharge* (A), m adalah massa aktif elektroda (g), Δt adalah waktu (s), dan ΔV adalah jendela potensial (V) (Li et al., 2023).

Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) merupakan teknik yang sangat efektif digunakan dalam karakterisasi superkapasitor. Teknik ini untuk mengetahui resistansi yang terjadi pada transfer muatan dan mengidentifikasi mekanisme perpindahan ion dalam pori elektroda. Analisis EIS dapat memberikan informasi pemahaman mengenai proses transfer muatan, perilaku elektrolit, dan mekanisme yang terjadi antara elektroda dan elektrolit (Laschuk et al., 2021). EIS memungkinkan penentuan beberapa parameter secara presisi dari suatu eksperimen, termasuk resistansi elektrolit dalam pori, resistansi Warburg, kapasitansi, dan konstanta waktu. Variasi frekuensi pada sistem penyimpanan energi dapat merepresentasikan berbagai fenomena elektrokimia tergantung pada respons frekuensi, sehingga memungkinkan analisis mekanisme penyimpanan muatan dan kinetika (Pholauyphon et al., 2024).

Spektrum EIS dibagi menjadi tiga rentang frekuensi yaitu rendah (<10 mHz), menengah (10 mHz- 1 kHz), dan tinggi (>1 kHz). Rentang frekuensi rendah memberikan informasi mengenai transpor massa dalam material padat, termasuk difusi ion dalam elektroda interkalasi. Proses seperti reaksi transfer muatan dan pengisian lapisan ganda listrik pada antarmuka elektroda dan elektrolit biasanya diamati dalam rentang frekuensi menengah. Selain itu, resistansi sel, seperti resistansi antarmuka dan elektrolit, terjadi dalam wilayah frekuensi tinggi. (Pholauyphon et al., 2024). Spektral EIS berdasarkan model rangkaian ekuivalen yang diperoleh dapat digunakan untuk mengetahui nilai impedansi setiap rentang frekuensi. Impedansi yang diturunkan pada setiap frekuensi ditampilkan sebagai *plot Nyquist* yang menggambarkan komponen imajiner impedansi terhadap komponen riil dan *plot Bode* yang menunjukkan besarnya impedansi dan pergeseran fasa versus frekuensi (Kumar et al., 2025).

Plot Nyquist merupakan parameter penting seperti resistansi seri ekuivalen (ESR), kapasitansi, resistansi antarmuka, dan resistansi transfer muatan. Bentuk kurva impedansi hanya dapat memberikan indikasi kualitatif tentang bagaimana muatan disimpan. Hal ini dapat membantu memahami perilaku umum atau sifat proses penyimpanan muatan, tetapi tidak memberikan detail kuantitatif yang tepat. *Plot impedansi* yang membentuk setengah lingkaran dapat menandakan adanya perilaku pseudokapasitif yang terkait dengan mekanisme penyimpanan muatan faradaik (Pholauyphon et al., 2024). *Plot Nyquist* juga dapat menunjukkan garis dengan sudut berkisar antara 45° hingga 90° terhadap sumbu nyata. Deviasi ini disebabkan oleh dampak gabungan mekanisme difusi ion seperti difusi ion kapasitif ideal dan kapasitas difusi elektrolit untuk mengangkut ion dari permukaan elektroda (Laschuk et al., 2021; Lazanas dan Prodromidis, 2023). Pengukuran EIS sangat penting dilakukan karena parameter tertentu, seperti resistansi transfer muatan dan impedansi Warburg, dapat dikonversi menjadi besaran yang bermakna secara fisik (Pholauyphon et al., 2024).

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini ialah sebagai berikut.

1. Bagaimana karakteristik karbon aktif cangkang kelapa sawit yang disintesis melalui karbonisasi hidrotermal dan aktivasi kimia fisika?
2. Bagaimana karakteristik komposit nanopartikel MnO_2 dan karbon aktif dari cangkang kelapa sawit yang dihasilkan?
3. Bagaimana sifat elektrokimia superkapasitor dari komposit nanopartikel MnO_2 dan karbon aktif cangkang kelapa sawit?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini dilakukan ialah sebagai berikut.

1. Menentukan karakteristik karbon aktif dari cangkang kelapa sawit yang disintesis melalui karbonisasi hidrotermal dan aktivasi kimia,
2. Menentukan karakteristik komposit nanopartikel MnO_2 dan karbon aktif dari cangkang kelapa sawit yang dihasilkan,
3. Menentukan nilai kapasitansi spesifik superkasitor dari komposit nanopartikel MnO_2 dan karbon aktif cangkang kelapa sawit.

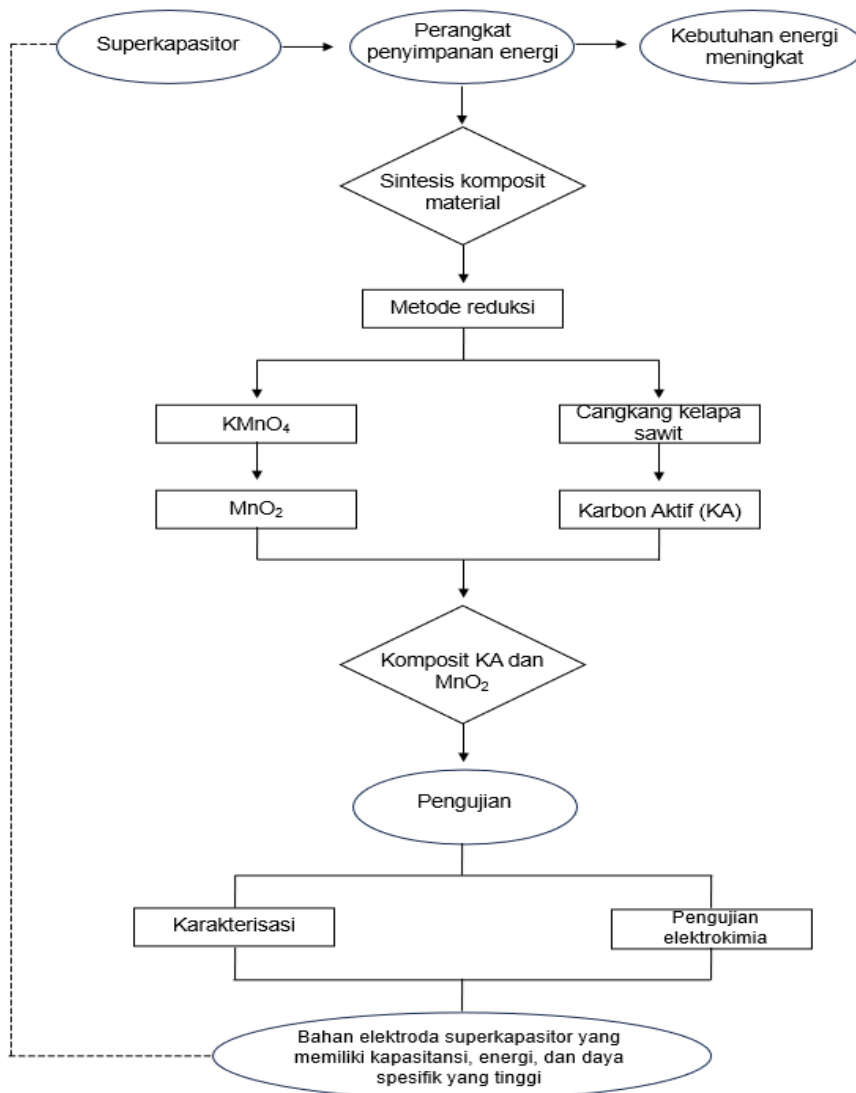
1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut.

1. Memberikan informasi kepada masyarakat mengenai karakteristik elektroda superkapasitor yang dihasilkan dari nanopartikel MnO_2 dan karbon aktif dari cangkang kelapa sawit sebagai energi terbarukan yang ramah lingkungan dan bernilai ekonomi tinggi, serta mengurangi limbah pertanian kelapa sawit dan memanfaatkannya menjadi lebih efisien sebagai penyimpanan energi pada elektroda superkapasitor,
2. Sebagai bahan rujukan bagi peneliti yang akan meneliti selanjutnya.

1.5 Kerangka Pikir

Penggunaan energi yang semakin meningkat menyebabkan perlu adanya perangkat penyimpanan energi. Pasokan energi di masa depan merupakan permasalahan yang senantiasa menjadi perhatian bangsa, karena selama ratusan tahun sumber bahan bakar energi berasal dari fosil (Saini et al., 2021; Tumimomor dan Palilingan, 2018). Konsumsi bahan bakar fosil yang meningkat mengakibatkan terjadinya penipisan lapisan ozon, perubahan iklim, masalah lingkungan, dan peningkatan risiko kesehatan bagi makhluk hidup (Hussain et al., 2017). Masalah yang timbul akibat penggunaan bahan bakar fosil, perlu adanya penyimpanan energi yang lebih efisien yaitu dengan menggunakan superkapasitor (Zhou et al., 2020).



Gambar 1.9 Alur kerangka pikir penelitian

Superkapasitor dapat menyimpan energi dalam skala besar. Selain itu, superkapasitor juga memiliki beberapa keunggulan yaitu rapat daya tinggi, pengisian waktu singkat, prinsip dan modelnya sederhana, serta stabilitas siklus yang panjang (Tynan et al., 2023). Komponen yang memiliki peran penting dalam superkapasitor ialah elektroda. Oleh karena itu, bahan elektroda perlu di desain dengan baik untuk menghasilkan kinerja yang optimal. Bahan elektroda superkapasitor dapat terbuat dari karbon aktif, logam oksida, dan polimer.

Penelitian ini menggunakan karbon aktif dan logam oksida sebagai bahan elektroda. Karbon aktif digunakan karena memiliki luas permukaan spesifik yang besar, ketahanan kimia, stabilitas kimia dan konduktivitas listrik yang baik

(Tumimomor dan Palilingan, 2018). Salah satu bahan baku yang dapat digunakan untuk pembuatan karbon aktif ialah limbah cangkang kelapa sawit, karena melimpah di alam, mudah didapat dan karbon aktif yang dihasilkan pada cangkang kelapa sawit cukup tinggi (Zheng et al., 2017). Namun, beberapa penelitian menyatakan bahwa karbon aktif kurang baik untuk menghasilkan superkapasitor berkinerja tinggi, karena proses transportasi ion elektrolit yang sangat lambat sehingga membatasi pembentukan lapisan ganda listrik dan mengurangi kapasitas muatan (Fleischmann et al., 2022; Li et al., 2023). Oleh karena itu, dapat direaksikan dengan KMnO_4 sehingga menghasilkan nanopartikel MnO_2 .

Nanopartikel MnO_2 merupakan bahan penyimpan muatan yang menjanjikan untuk elektroda superkapasitor karena merupakan logam oksida yang mudah ditemukan, murah, toksisitas rendah, rentang tegangan yang lebar, dan kapasitansi spesifik sebesar $\pm 1370 \text{ F/g}$ (Tseng et al., 2018; Wallar et al., 2017). Material ini sangat tepat digunakan untuk desain superkapasitor. Komposit bahan elektroda MnO_2 dan karbon aktif diharapkan dapat menghasilkan bahan elektroda superkapasitor yang memiliki kapasitansi spesifik, energi spesifik, dan daya spesifik yang tinggi, serta stabilitas kimia yang baik. Kerangka pikir pada penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 1.9**.

1.6 Hipotesis

Berdasarkan kerangka pikir di atas, hipotesis pada penelitian ini ialah sebagai berikut.

1. Karbon aktif cangkang kelapa sawit dapat disintesis melalui karbonisasi hidrotermal dan aktivasi kimia fisika,
2. Komposit nanopartikel MnO_2 dan karbon aktif dari cangkang kelapa sawit dapat disintesis melalui metode reduksi dengan KMnO_4 ,
3. Bahan elektroda superkapasitor dari komposit nanopartikel MnO_2 dan karbon aktif cangkang kelapa sawit memiliki nilai kapasitansi spesifik yang memadai untuk elektroda superkapasitor.

BAB II

TOPIK PENELITIAN I

SINTESIS DAN KARAKTERISASI KARBON AKTIF DARI CANGKANG KELAPA SAWIT

2.1 Abstrak

Latar belakang, cangkang kelapa sawit merupakan limbah biomassa yang melimpah dari industri minyak kelapa sawit di Indonesia dengan kandungan lignoselulosa tinggi yang berpotensi sebagai material energi terbarukan. Cangkang kelapa sawit secara konvensional biasa digunakan sebagai bahan bakar boiler dan dapat menyebabkan pencemaran terhadap lingkungan, sehingga untuk mengatasi hal tersebut diperlukan alternatif pemanfaatan berkelanjutan. Salah satunya ialah dengan mengkonversi cangkang kelapa sawit menjadi karbon aktif. Karbon aktif dapat dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi seperti adsorpsi, katalis, dan penyimpanan energi. **Tujuan** penelitian ini untuk mensintesis dan mengkarakterisasi karbon aktif dari cangkang kelapa sawit menjadi material yang bernilai tinggi dan mengurangi limbah biomassa. Sintesis karbon aktif dilakukan dengan menggunakan **metode** karbonisasi hidrotermal dengan variasi suhu dan waktu, kemudian dilanjutkan dengan aktivasi kimia menggunakan KOH dan aktivasi fisika pada suhu 700 °C selama 2 jam. Produk hasil sintesis dilakukan analisis proksimat untuk mengetahui kadar karbon aktif tetap yang baik dan dikarakterisasi menggunakan XRD, FTIR, SEM-EDS, dan SAA. **Hasil** analisis proksimat menunjukkan kadar karbon aktif tetap yang baik ialah pada sampel KACS 200-4 yaitu sebesar 89,18%. Hasil karakterisasi XRD pada sampel KACS menunjukkan struktur amorf dengan bentuk heksagonal. Spektra FTIR menunjukkan berkurangnya gugus fungsi secara signifikan yang menandakan bahwa sampel KACS telah murni. Morfologi struktur pada KACS menunjukkan ciri khas dari karbon aktif yang ditandai dengan adanya pori pada permukaan karbon aktif dan berbetuk susunan berlapis. Hasil EDS menunjukkan bahwa komposisi unsur yang terdapat pada KACS adalah C sebesar 87,87%, O sebesar 8,6%, dan K sebesar 3,44%. Hasil analisis SAA menunjukkan bahwa KACS termasuk dalam kategori material mesopori dengan luas permukaan spesifik sebesar 960,79 m²/g, total volume pori sebesar 0,73 cm³/g, dan distribusi ukuran pori sebesar 3,04 nm. **Kesimpulan** penelitian ini menunjukkan karbon aktif yang disintesis dari cangkang kelapa sawit memiliki karakteristik yang sesuai dengan karbon aktif, sehingga karbon aktif tersebut berpotensi untuk digunakan sebagai kandidat elektroda superkapasitor dalam aplikasi penyimpanan energi.

Kata Kunci : aktivasi kimia fisika; cangkang kelapa sawit; karbonisasi hidrotermal; karbon aktif; KOH

2.2 Pendahuluan

Masalah lingkungan akibat limbah industri menjadi salah satu tantangan global yang memerlukan solusi berkelanjutan. Indonesia merupakan salah satu produsen dan

eksportir minyak sawit terbesar di dunia dengan 85-90% dari total produksi minyak sawit dunia (Aziz et al., 2016). Salah satu limbah padat pengolahan minyak kelapa sawit yang melimpah adalah cangkang kelapa sawit yang mencapai 60% dari produksi minyak sawit (Wahyuni dan Fathoni, 2019). Cangkang kelapa sawit memiliki kandungan selulosa sebesar 45% dan hemiselulosa sebesar 26%, sehingga layak untuk dijadikan sumber biomassa dan berpotensi tinggi untuk material energi terbarukan (Aziz et al., 2016; Ikpotokin, 2025). Cangkang kelapa sawit biasa digunakan sebagai bahan bakar boiler pada pabrik kelapa sawit, akan tetapi hal ini dapat menimbulkan pencemaran lingkungan dan risiko kesehatan (Ikpotokin, 2025). Oleh karena itu, untuk meningkatkan nilai tambah dan fungsional cangkang kelapa sawit dapat dikonversi menjadi karbon aktif.

Karbon aktif merupakan material karbon yang memiliki luas permukaan yang sangat tinggi, struktur pori yang berkembang, ketahanan kimia, konduktivitas listrik dan stabilitas kimia yang baik (Tumimomor dan Pallilingan, 2018). Karbon aktif banyak diaplikasikan dalam berbagai bidang seperti adsorpsi zat warna (Pam et al., 2022), pengolahan air (Parniske et al., 2024), katalis (R. F. Abdullah et al., 2021), penyimpanan energi, dan superkapasitor (Chaiammart et al., 2024; Nasir et al., 2018; Zakir et al., 2018). Karbon aktif dapat disintesis melalui dua tahap, yaitu karbonisasi dan aktivasi karbon. Metode konvensional seperti pirolisis memiliki kelemahan dalam hal konsumsi energi yang besar, sehingga diperlukan pendekatan yang lebih inovatif dan efisien (Tang et al., 2018). Metode karbonisasi yang tepat dilakukan ialah melalui karbonisasi hidrotermal. Karbonisasi hidrotermal merupakan proses karbonisasi yang memanfaatkan media air dalam reaktor hidrotermal dengan suhu sekitar 180-250 °C (Vardiambasis et al., 2020). Che dan Heynderickx (2024) menyatakan bahwa proses karbonisasi hidrotermal sangat baik digunakan untuk mengubah limbah biomassa menjadi karbon, karena metode ini menghasilkan karbon aktif yang memiliki luas permukaan besar dan porositas yang tinggi, bersifat ramah lingkungan, serta dapat digunakan untuk penyimpanan energi.

Hasil karbonisasi hidrotermal dikenal dengan *hydrochar* dan memiliki porositas yang lebih rendah, oleh karena itu untuk meningkatkan luas permukaan spesifik dan porositas karbon perlu dilakukan aktivasi untuk memperbaiki struktur fisik dan kimianya (Mishra et al., 2024). Perlakuan aktivasi karbon bertujuan untuk meningkatkan volume pori, memperbesar diameter pori, dan meningkatkan porositas karbon (Lubis et al., 2020). Aktivasi secara fisika dan kimia sangat baik dilakukan pada pembuatan karbon aktif sebagai bahan elektroda karena dapat meningkatkan nilai kapasitansi spesifik (Prayogatama dan Kurniawan, 2022). Penggunaan metode hidrotermal dan aktivasi kimia fisika dinilai lebih efisien dibanding dengan satu tahap aktivasi. Metode tersebut dapat menghasilkan superkapasitor dengan konduktivitas listrik yang baik, luas permukaan yang besar dan distribusi pori yang beragam (Maniscalco et al., 2020). Li et al. (2021) berhasil mensintesis karbon aktif yang memperoleh luas permukaan spesifik sebesar 1.504 m²/g dan kapasitansi spesifik sebesar 324 F/g dengan metode hidrotermal dan aktivasi bertahap. Sevilla et al (2017) juga berhasil mensintesis karbon aktif dengan metode serupa dan

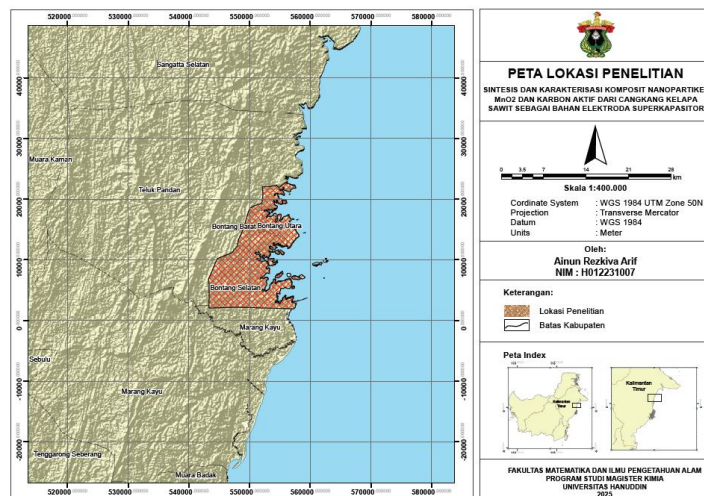
memperoleh luas permukaan yang sangat tinggi yaitu sekitar 2.600-3.000 m²/g. Dai et al (2018) mensintesis karbon aktif dengan menggunakan KOH sebagai aktivator kimia dan memperoleh luas permukaan spesifik yang cukup besar yaitu sekitar 927 m²/g.

Kombinasi sintesis karbon aktif dengan metode karbonisasi hidrotermal dan aktivasi kimia fisika diharapkan dapat menghasilkan karbon aktif dengan karakteristik fisika kimia yang unggul untuk aplikasi berkelanjutan dan pengembangan material. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini mengenai sintesis karbon aktif dari cangkang kelapa sawit dengan memanfaatkan metode karbonisasi hidrotermal dan aktivasi kimia fisika untuk mengoptimalkan karakteristik yang dihasilkan dari karbon aktif. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan nilai tambah bagi limbah cangkang kelapa sawit dan mengembangkan material karbon aktif yang berpotensi untuk digunakan sebagai elektroda supekapasitor pada penelitian selanjutnya.

2.3 Metode Penelitian

2.3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan September 2024 hingga Februari 2025. Pengambilan sampel cangkang kelapa sawit dilakukan di Kota Bontang, Kalimantan Timur (**Gambar 2.1**). Preparasi sampel dan penelitian dilakukan di Laboratorium Teknik Kimia Politeknik Ujung Pandang dan Laboratorium Kimia Fisika FMIPA Universitas Hasanuddin. Karakterisasi sampel dilakukan di Pusat Penelitian Nanosains dan Nanoteknologi ITB, Laboratorium Penelitian dan Pengembangan Sains, dan Laboratorium Kimia Terpadu FMIPA Universitas Hasanuddin.



Gambar 2.1 Lokasi pengambilan sampel cangkang kelapa sawit

2.3.2 Bahan

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah biomassa cangkang kelapa sawit yang berasal dari Bontang, Kalimantan Timur. Sampel cangkang kelapa sawit diperoleh dari salah satu perusahaan yang mengelola kelapa sawit di Kota Bontang. Cangkang kelapa sawit merupakan limbah padat dari proses pengolahan minyak kelapa sawit dan bagian ini berasal dari *endocarp* buah kelapa sawit yang keras dan berwarna coklat kehitaman. Bahan lain yang digunakan dalam penelitian ini ialah n-heksana, etanol pa (JK Care), kalium hidroksida (KOH) pa (Merck), akuabides (*Onemed*), akuades, kertas saring *Whatmann* No.42, dan kertas pH universal.

2.3.3 Alat

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah peralatan gelas yang umum di laboratorium, botol semprot, batang pengaduk, spatula, cawan petri, cawan porselen, penyaring Buchner, pompa vakum, *grinder*, desikator, lumpang dan alu, ayakan 100 dan 200 mesh, reaktor hidrotermal, neraca analitik (Ohaus), *magnetic stirrer*, *cyclo disc mill (pulverizer)*, oven Gen Lab, dan tanur (Muffle *furnace* tipe 6000 dan Nabertherm). Karakterisasi sampel dilakukan dengan menggunakan *X-Ray Diffraction* (Shimadzu XRD-700), *Fourier Transform Infrared* (Shimadzu IR Prestige 21), *Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive Spectroscopy* (SU-3500 imaging), dan *Surface Area Analyzer* (Altamira Micro200).

2.3.4 Prosedur Penelitian

2.3.4.1 Preparasi Sampel Cangkang Kelapa Sawit

Sampel cangkang kelapa sawit dikumpulkan sebanyak 2 kg, kemudian dibersihkan dan dihilangkan zat pengotornya menggunakan akuades. Selanjutnya, cangkang kelapa sawit dikeringkan di bawah sinar matahari. Sampel cangkang kelapa sawit yang telah kering, dihaluskan dengan *grinder* dan diayak menggunakan ayakan 100 mesh. Cangkang kelapa sawit yang telah dihaluskan dicuci dengan n-heksana dan etanol, serta dibilas dengan akuabides. Sampel cangkang kelapa sawit yang telah bersih, dikeringkan dengan menggunakan oven pada suhu 100 °C selama 2 jam. Sampel cangkang kelapa sawit yang telah dihaluskan dan dicuci hingga bersih diberi simbol CS (serbuk cangkang kelapa sawit).

2.3.4.2 Sintesis Karbon Aktif Cangkang Kelapa Sawit

Serbuk cangkang kelapa sawit (CS) dikarbonisasi secara hidrotermal dengan variasi suhu dan waktu. Karbonisasi hidrotermal dilakukan pada variasi suhu 180 °C dan 200 °C dengan variasi waktu 2, 3, dan 4 jam. Proses karbonisasi hidrotermal diilustrasikan seperti pada **Gambar 2.2**.



Gambar 2.2 Prosedur karbonisasi hidrotermal cangkang kelapa sawit

Serbuk cangkang kelapa sawit (CS) ditimbang dengan neraca analitik sebanyak 15 gram dan ditambahkan akuabides sebanyak 75 mL. Campuran diaduk hingga merata, lalu dimasukkan ke dalam reaktor hidrotermal dan ditutup hingga rapat (Nakason et al., 2017). Reaktor hidrotermal dimasukkan ke dalam tanur dan dipanaskan pada suhu 180 °C selama 2 jam. Campuran dalam reaktor hidrotermal didinginkan dan disaring menggunakan filtrasi vakum hingga bersih. Karbon yang diperoleh dikeringkan dalam oven pada suhu 100 °C selama 12 jam, lalu diayak menggunakan ayakan 200 mesh. Proses karbonisasi hidrotermal dilakukan perlakuan yang sama pada suhu 200 °C dengan variasi waktu 2, 3, dan 4 jam. Karbon yang diperoleh merupakan *hydrochar* dan diberi simbol KCS.

Langkah yang dilakukan setelah karbonisasi hidrotermal adalah aktivasi karbon. Aktivasi karbon dilakukan melalui dua tahap aktivasi, yaitu aktivasi kimia dan aktivasi fisika. Aktivasi kimia dilakukan dengan karbon cangkang kelapa sawit (KCS) direndam dalam larutan KOH 3 M dengan perbandingan KCS dan larutan KOH yaitu 1:5 (b/v). Selanjutnya, campuran dihomogenkan menggunakan *magnetic stirrer* selama 1 jam dan didiamkan selama 24 jam (Tumimomor dan Palilingan, 2018). Campuran yang telah diaktivasi kimia disaring menggunakan penyaring Buchner dengan kertas saring *Whatman* No.42. Karbon hasil penyaringan dikeringkan dalam oven selama 24 jam pada suhu 100 °C. Karbon yang telah dikeringkan, selanjutnya diaktivasi secara fisika dengan tanur pada suhu 700 °C selama 2 jam (Kurniawan et al., 2021). Karbon hasil aktivasi fisika dicuci dengan akuabides berulang kali hingga pH netral yang diukur menggunakan kertas pH universal dan dikeringkan dalam oven pada suhu 100 °C selama 24 jam. Karbon aktif yang diperoleh diberi simbol KACS. Proses aktivasi karbon diilustrasikan seperti pada **Gambar 2.3**.



Gambar 2.3 Prosedur aktivasi karbon cangkang kelapa sawit

2.3.4.3 Analisis Proksimat Karbon Aktif Cangkang Kelapa Sawit

2.3.4.3.1 Penentuan Kadar Air (SNI No. 06-3730-1995)

Cawan porselin yang telah bersih dipanaskan dalam oven pada suhu 110 °C selama 2 jam. Cawan didinginkan dalam desikator selama 30 menit, kemudian ditimbang bobot kosongnya. Karbon aktif ditimbang sebanyak 1 gram dan dimasukkan ke dalam cawan. Kemudian, karbon aktif dipanaskan dalam oven pada suhu 110 °C selama 1 jam. Selanjutnya, sampel didinginkan dalam desikator dan ditimbang sampai diperoleh bobot konstan. Kadar air dalam sampel karbon aktif dihitung menggunakan rumus pada persamaan (1) (Almira et al., 2021).

$$\text{Kadar air (\%)} = \frac{\text{berat awal} - \text{berat setelah dipanaskan}}{\text{berat awal sampel}} \times 100\% \quad (1)$$

2.3.4.3.2 Penentuan Kadar Abu (SNI No. 06-3730-1995)

Cawan porselin yang telah bersih dikeringkan dalam oven pada suhu 110 °C selama 2 jam. Cawan didinginkan dalam desikator selama 30 menit, kemudian ditimbang bobot kosongnya. Karbon aktif ditimbang sebanyak 2 gram dan dimasukkan ke dalam cawan. Kemudian, karbon aktif dipanaskan dalam tanur pada suhu 800 °C selama 2 jam. Selanjutnya, sampel didinginkan dalam desikator dan ditimbang sampai diperoleh bobot konstan. Kadar abu dalam sampel karbon aktif dihitung menggunakan rumus pada persamaan (2) (Almira et al., 2021).

$$\text{Kadar abu (\%)} = \frac{\text{berat abu}}{\text{berat awal sampel}} \times 100\% \quad (2)$$

2.3.4.3.3 Penentuan Kadar Senyawa Volatil (SNI No. 06-3730-1995)

Cawan porselin yang telah bersih dikeringkan dalam oven pada suhu 110 °C selama 2 jam. Cawan didinginkan dalam desikator selama 30 menit, kemudian ditimbang bobot kosongnya. Karbon aktif dimasukkan kedalam cawan tersebut dan ditimbang sebanyak 2 gram dan dipanaskan dalam tanur pada suhu 900 °C selama 7 menit. Kemudian sampel didinginkan dalam desikator, dan timbang bobot akhirnya. Kadar senyawa volatil dalam sampel karbon aktif dihitung menggunakan rumus pada persamaan (3) (Almira et al., 2021).

$$\text{Kadar volatil (\%)} = \frac{\text{berat senyawa volatil}}{\text{berat awal sampel}} \times 100\% \quad (3)$$

2.3.4.3.4 Penentuan Kadar Karbon Aktif Murni (SNI No. 06-3730-1995)

Karbon aktif murni dihitung dari 100% dikurangi dengan nilai kadar abu dan kadar senyawa volatil dalam sampel. Kadar karbon aktif murni dalam sampel dihitung dengan menggunakan rumus pada persamaan (4).

$$\text{Karbon tetap (\%)} = 100\% - (\text{kadar abu} + \text{kadar senyawa volatil}) \% \quad (4)$$

2.3.4.4 Karakterisasi Sampel

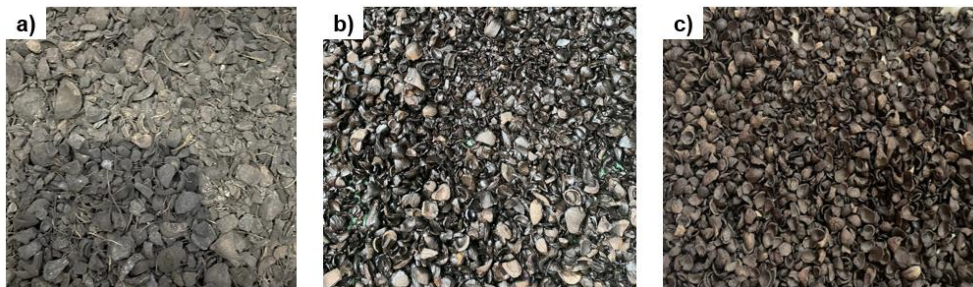
Karakterisasi sampel dilakukan dengan menggunakan beberapa instrumen, seperti, XRD, FTIR, SEM-EDS, dan SAA. Pola XRD dikarakterisasi menggunakan difraksi sinar-X (Shimadzu XRD-700). Pengambilan data dilakukan pada rentang 2θ antara 15° hingga 70° dengan menggunakan kecepatan pemindaian 2° per menit dengan sumber radiasi Cu-K α . Spektra FTIR dikarakterisasi menggunakan Shimadzu IR Prestige 21 pada daerah 400-4000 cm⁻¹ dengan preparasi sampel metode pellet KBr. Morfologi struktur dan komposisi unsur pada sampel dikarakterisasi menggunakan mikroskop elektron pemindaian (SEM-EDS SU 3500 imaging). Luas permukaan dan porositas sampel dikarakterisasi dengan menggunakan instrumen *surface area analyzer* (Altamira micro200). Isoterm linear diukur untuk menentukan luas permukaan spesifik menggunakan metode *Brunauer-Emmett-Teller* (BET) dan distribusi ukuran pori dinilai dengan metode BJH. Selain itu, isoterm adsorpsi-desorpsi nitrogen diperoleh pada suhu 77,35 K dengan adsorbat N₂.

2.4 Hasil dan Pembahasan

2.4.1 Preparasi Sampel

Preparasi sampel dilakukan dengan mengkonversi cangkang kelapa sawit yang bersifat keras dan berwarna coklat kehitaman menjadi serbuk halus berwarna coklat muda (CS). Tahap preparasi diawali dengan cangkang kelapa sawit dicuci dan dibersihkan dengan akuades untuk menghilangkan zat-zat pengotor seperti debu, serat kelapa sawit, dan sisa minyak kelapa sawit yang menempel pada permukaan cangkang kelapa sawit. Cangkang kelapa sawit yang telah bersih dikeringkan

dibawah sinar matahari untuk menghilangkan kandungan air. Hasil pembersihan, pencucian, dan pengeringan cangkang kelapa sawit dapat dilihat pada **Gambar 2.4**.



Gambar 2.4 Karakteristik visual cangkang kelapa sawit pada berbagai tahapan, yaitu (a) kondisi awal sebelum dibersihkan, (b) kondisi selama proses pencucian dan pengeringan, dan (c) kondisi setelah dibersihkan dan dikeringkan

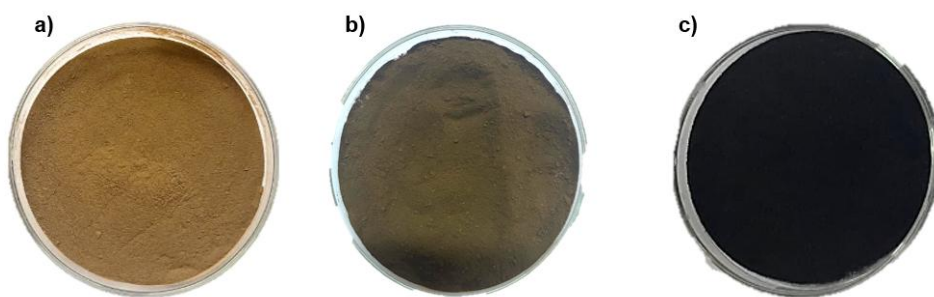
Tahap preparasi lanjut dilakukan untuk mengkonversi sampel cangkang kelapa sawit menjadi serbuk halus yang homogen dengan menggunakan grinder dan ayakan 100 mesh. Proses penghalusan dan pengayakan dilakukan agar diperoleh distribusi ukuran partikel yang seragam dan memudahkan proses karbonisasi. Serbuk cangkang kelapa sawit (CS) yang telah diayak, kemudian dicuci secara berturut-turut menggunakan n-heksana dan etanol. Pencucian dengan menggunakan n-heksana bertujuan untuk melarutkan senyawa-senyawa non-polar seperti sisa minyak dan lemak yang masih tertinggal pada permukaan cangkang kelapa sawit, sedangkan pencucian dengan etanol bertujuan untuk menghilangkan senyawa polar dan senyawa organik lainnya. Setelah pencucian dengan pelarut organik, CS dibilas dengan akuabides untuk menghilangkan sisa-sisa pelarut dan pengotor yang masih tertinggal. Tahap akhir preparasi adalah pengeringan dalam oven pada suhu 100 °C selama 2 jam untuk menghilangkan sisa-sisa pelarut dan air yang masih terdapat pada sampel. Sampel CS hasil penghalusan dan pencucian dengan pelarut organik dapat dilihat pada **Gambar 2.5**.



Gambar 2.5 Serbuk cangkang kelapa sawit

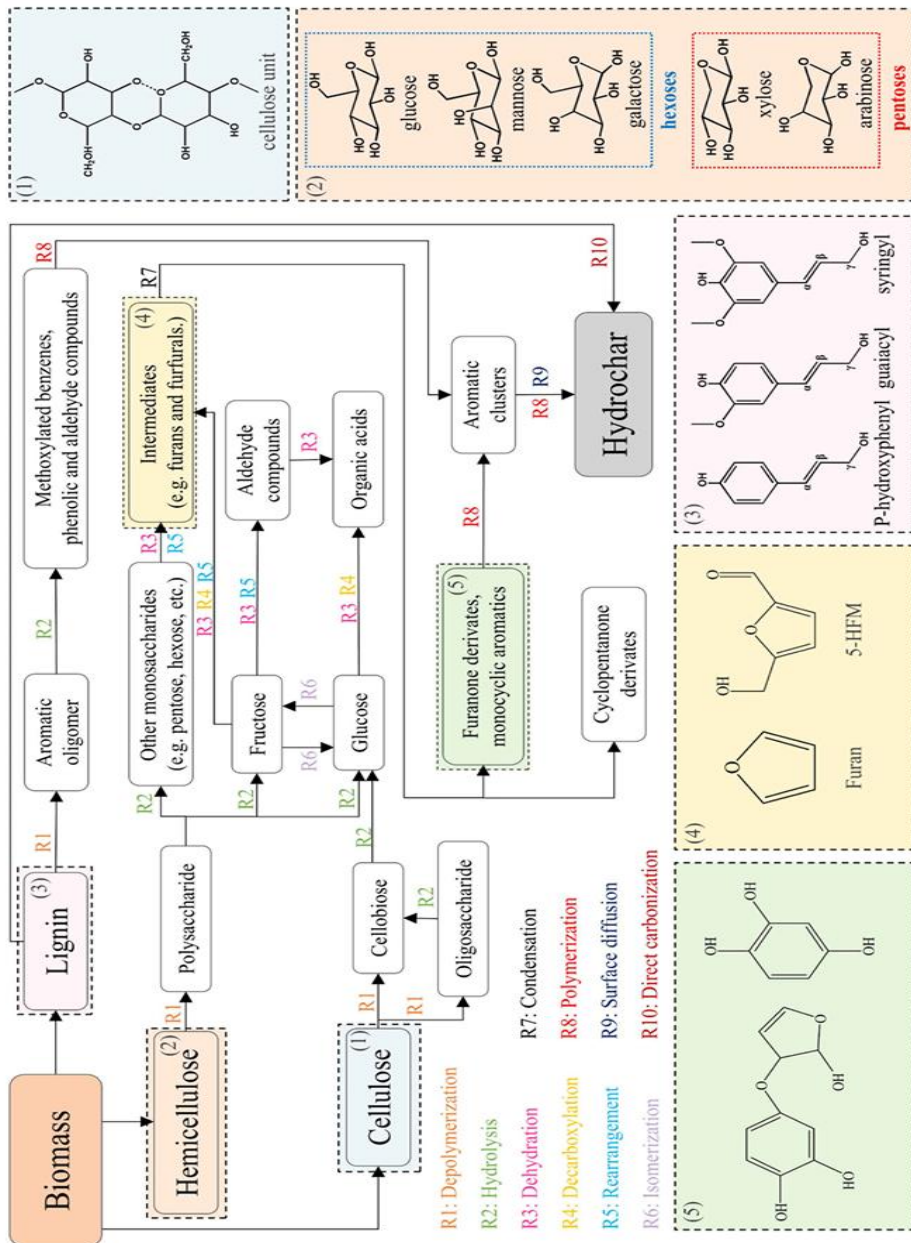
2.4.2 Konversi Biomassa Cangkang Kelapa Sawit menjadi Karbon Aktif

Sintesis karbon aktif dari cangkang kelapa sawit dilakukan melalui dua tahap, yaitu karbonisasi hidrotermal dan aktivasi karbon. Karbonisasi hidrotermal dilakukan untuk mengonversi biomassa basah menjadi suatu material yang kaya akan karbon sehingga memiliki kepadatan energi tinggi (Boamah dan Salaudeen, 2025). Konversi serbuk cangkang kelapa sawit (CS) menjadi karbon cangkang kelapa sawit (KCS) ditandai dengan adanya perubahan warna dari coklat muda menjadi coklat tua. Konversi KCS menjadi karbon aktif cangkang kelapa sawit (KACS) juga menunjukkan perubahan warna yang sangat signifikan yaitu dari warna coklat tua menjadi warna hitam. Hasil konversi cangkang kelapa sawit (CS) menjadi karbon aktif cangkang kelapa sawit dapat dilihat pada **Gambar 2.6**.



Gambar 2.6 Serbuk cangkang kelapa sawit pada berbagai tahapan pengolahan, yaitu (a) CS sebagai serbuk cangkang kelapa sawit, (b) KCS sebagai serbuk cangkang kelapa sawit hasil karbonisasi hidrotermal, dan (c) KACS sebagai cangkang kelapa sawit hasil proses aktivasi karbon

Proses karbonisasi hidrotermal dilakukan dengan menggunakan air yang berperan untuk memecah komponen lignoselulosa melalui reaksi hidrolisis dan dehidrasi, serta menghilangkan senyawa volatil (Rasam et al., 2021). Shen et al. (2024) menyatakan bahwa secara umum proses karbonisasi hidrotermal melibatkan beberapa reaksi, yaitu hidrolisis, dehidrasi, dekarboksilasi, polimerasi, dan aromatisasi. Proses awal ialah lignoselulosa biomassa mengalami hidrolisis atau depolimerisasi dalam fase air dan diikuti oleh reaksi dehidrasi. Pada tahap hidrolisis, air panas bertekanan pada suhu 180–200 °C berperan sebagai medium reaksi sekaligus reaktan yang memutus ikatan polimer lignoselulosa, terutama ikatan β -1,4-glikosidik pada selulosa dan hemiselulosa, sehingga menghasilkan senyawa bermassa molekul rendah berupa monosakarida, seperti glukosa dan xilosa, serta fragmen fenolik dari degradasi lignin. Senyawa tersebut kemudian diubah menjadi unit yang dapat dipolimerisasi melalui reaksi dehidrasi dan dekarboksilasi. Reaksi dehidrasi berperan penting dalam menurunkan rasio atom hidrogen dan oksigen sehingga mendorong terjadinya aromatisasi dan kondensasi molekul organik (Zhuang et al., 2019). Pada tahap akhir, yaitu pada reaksi aromatisasi terjadi pembentukan padatan karbon yang berupa *hydrochar* dengan stabilitas struktur yang baik dan kandungan karbon yang tinggi (Wu et al., 2023). Reaksi yang terjadi selama proses karbonisasi dapat dilihat pada **Gambar 2.7**.



Gambar 2.7 Alur reaksi karbonisasi hidrotermal biomassa menjadi *hydrochar* (Wu et al., 2023)

Variasi suhu dan waktu karbonisasi berpengaruh signifikan terhadap hasil rendemen karbon, semakin tinggi suhu dan waktu karbonisasi maka akan menghasilkan karbon aktif dengan persentase rendemen yang semakin rendah. Pengaruh suhu dan waktu terhadap hasil karbonisasi hidrotermal ditunjukkan pada **Tabel 2.1**. Penurunan rendemen pada suhu reaksi dari 180 °C menjadi 200 °C

menunjukkan bahwa komposisi biomassa pada cangkang kelapa sawit telah terdegradasi menjadi produk yang lebih kecil dan dapat larut melalui reaksi hidrolisis dan deoksigenasi (Nakason et al., 2017; Nakason et al., 2018). Kaewtrakulchai et al. (2024) juga menyatakan bahwa peningkatan suhu dapat mempengaruhi laju pemecahan senyawa-senyawa yang dapat menurunkan massa padatan. Selain itu, seiring dengan peningkatan retensi waktu juga menyebabkan penurunan massa dan rendemen *hydrochar*, hal ini dikarenakan semakin lama waktu pemanasan maka semakin banyak komponen senyawa organik dan volatil yang terurai (Khosravi et al., 2022). Meskipun jumlahnya menurun, *hydrochar* yang dihasilkan pada waktu karbonisasi yang lebih lama memiliki struktur karbon yang lebih baik karena senyawa-senyawa yang terdapat dalam cangkang kelapa sawit dapat terdegradasi sempurna, sehingga material yang dihasilkan kaya akan karbon (Kaewtrakulchai et al., 2024; Khosravi et al., 2022).

Tabel 2.1 Hasil rendemen *hydrochar* dari proses karbonisasi hidrotermal

No.	Suhu karbonisasi (°C)	Waktu karbonisasi (jam)	Massa CS (g)	Massa KCS (g)	% Rendemen <i>hydrochar</i>
1.	180	2	15,0005	10,0275	66,84
2.	180	3	15,0007	9,0372	60,25
3.	180	4	15,0002	8,2734	55,16
4.	200	2	15,0004	9,0056	60,04
5.	200	3	15,0003	8,4579	56,38
6.	200	4	15,0002	7,5248	50,16

Tahap kedua dalam proses sintesis karbon aktif ialah aktivasi karbon. Aktivasi karbon dalam proses sintesis karbon aktif merupakan hal paling penting karena bertujuan untuk memperluas permukaan dan mengembangkan struktur pori agar dapat meningkatkan nilai kapasitansi spesifik dalam aplikasi superkapasitor (Prayogatama dan Kurniawan, 2022). Proses aktivasi karbon dilakukan dalam dua tahap, yaitu kimia dan fisika. Aktivasi kimia dilakukan dengan menggunakan KOH untuk impregnasi ion kalium ke dalam struktur karbon sehingga dapat memperluas permukaan spesifik (Sevilla et al., 2017). Menurut Boulanger et al. (2024) KOH merupakan salah satu aktivator kimia yang efektif digunakan untuk memperoleh karbon dengan luas permukaan yang besar. Selain itu, KOH juga berfungsi untuk mendegradasi zat pengotor sehingga pori yang banyak dapat terbentuk dan difusi ion menjadi mudah dalam aplikasi superkapasitor (Hanifa dan Awitdrus, 2022).

Aktivasi fisika dilakukan untuk menghilangkan sisa-sisa senyawa organik yang belum terurai sempurna dan mengembangkan struktur pori karbon, sehingga dapat memperluas permukaan karbon aktif (Prayogatama dan Kurniawan, 2022). Hasil karbon aktif yang diperoleh dari proses aktivasi kimia fisika berwarna hitam pekat dengan tekstur ringan yang ditunjukkan pada **Gambar 2.6c**. Pencucian dilakukan dengan menggunakan akuabides hingga pH netral setelah aktivasi berperan penting dalam menghilangkan sisa KOH dan pengotor dalam karbon aktif yang dapat menurunkan kinerja karbon aktif dalam aplikasi superkapasitor. Kombinasi kedua

tahap aktivasi karbon tersebut terbukti efektif menghasilkan karbon aktif dengan karakteristik yang memenuhi standar kualitas untuk aplikasi lebih lanjut. Sevilla et al. (2017) dalam penelitiannya menyatakan bahwa kombinasi dengan aktivasi kimia dan fisika dapat meningkatkan konduktivitas listrik.

Tabel 2.2 menunjukkan hasil rendemen karbon aktif dari proses aktivasi karbon. Massa KCS menunjukkan adanya peningkatan setelah aktivasi kimia, hal ini disebabkan oleh adanya residu sisa KOH seperti kalium yang menempel pada karbon. Akan tetapi, setelah dilanjutkan dengan aktivasi fisika dan pencucian hingga pH netral, massa akhir karbon aktif menurun drastis. Massa yang diperoleh setelah aktivasi fisika menurun drastis karena pada proses aktivasi fisika dengan pemanasan suhu tinggi dapat menyebabkan senyawa volatil menguap. Selain itu, proses yang dilakukan pada aktivasi fisika tidak menggunakan gas inert, sehingga pemanasan dalam kondisi tersebut tidak dapat terkontrol dan menyebabkan pengabuan parsial akibat oksida karbon oleh oksigen dari udara. Rendemen yang diperoleh menunjukkan karbonisasi pada 200 °C lebih rendah dibanding 180 °C, hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu dan lama waktu karbonisasi akan menghasilkan rendemen karbon aktif yang semakin rendah. Proses karbonisasi dengan suhu dan waktu yang tinggi mengakibatkan dekomposisi senyawa organik lebih besar, sehingga massa karbon yang tersisa setelah aktivasi juga semakin sedikit.

Tabel 2.2 Hasil rendemen karbon aktif dari proses aktivasi karbon

No.	Variasi	Massa KCS (g)	Massa setelah aktivasi kimia (g)	Massa setelah aktivasi fisika + pencucian (g)	% Rendemen aktivasi karbon
1.	KACS 180-2	20,0005	23,2245	6,0257	30,13
2.	KACS 180-3	20,0002	23,1037	5,9274	29,64
3.	KACS 180-4	20,0009	23,0236	5,9031	29,51
4.	KACS 200-2	20,0000	22,9716	5,5174	27,59
5.	KACS 200-3	20,0008	23,0137	5,5237	27,62
6.	KACS 200-4	20,0006	22,7803	5,3126	26,56

2.4.3 Analisis Proksimat Karbon Aktif

Analisis proksimat dilakukan untuk mengetahui karakteristik dasar karbon aktif yang meliputi kadar air, kadar abu, kadar zat menguap (volatil), dan kadar karbon aktif tetap (Jouhara et al., 2018). Pengujian parameter tersebut penting dilakukan untuk menilai kualitas karbon aktif karena akan berpengaruh terhadap kinerja pada aplikasi superkapasitor (Racero-Galaraga et al., 2024). Analisis proksimat karbon aktif dilakukan dengan mengacu pada SNI No. 06-3730-1995. Hasil analisis proksimat karbon aktif dari cangkang kelapa sawit (KACS) dengan variasi suhu dan waktu karbonisasi dapat dilihat pada **Tabel 2.3**.

Tabel 2.3 Hasil analisis proksimat karbon aktif

No.	Variasi karbon aktif	Kadar air (%)	Kadar abu (%)	Kadar volatil (%)	Kadar karbon aktif murni (%)
1.	KACS 180-2	11,10	5,26	6,50	88,23
2.	KACS 180-3	10,57	4,23	6,49	89,27
3.	KACS 180-4	15,11	4,61	6,43	88,96
4.	KACS 200-2	15,59	5,92	6,46	87,62
5.	KACS 200-3	12,99	4,57	6,38	89,05
6.	KACS 200-4	12,58	4,03	6,36	89,61

Hasil analisis proksimat KACS pada beberapa karbon aktif dengan variasi suhu dan waktu karbonisasi menunjukkan perbedaan yang signifikan terhadap nilai kadar air, kadar abu, kadar volatil, dan kadar karbon aktif tetap. Menurut SNI No. 06-3730-1995, kadar air maksimum untuk karbon aktif adalah maksimal sebesar 15%. Nilai kadar air terhadap beberapa variasi KACS menunjukkan nilai yang telah sesuai dengan standar, kecuali pada KACS 180-4 dan KACS 200-2. Nilai kadar air terendah ditunjukkan pada sampel KACS 180-3 sebesar 10,57%, sedangkan nilai tertinggi terdapat pada KACS 200-2 sebesar 15,59%. Nilai kadar air pada 200-2 mengindikasikan bahwa proses karbonisasi pada suhu 200 °C selama 2 jam belum cukup efektif dalam menguapkan kandungan air yang tersisa, sedangkan pada KACS 180-3 dengan waktu pemanasan lebih lama menunjukkan kadar air berkurang lebih optimal. Hal ini menunjukkan bahwa semakin lama waktu karbonisasi maka semakin baik kadar air yang diperoleh. Kadar air yang rendah lebih diharapkan karena dapat menyebabkan pori karbon aktif terbuka sehingga mempermudah proses transfer ion untuk aplikasi superkapasitor dan meningkatkan kemampuan adsorpsi (Almira et al., 2021).

Kadar abu yang diperoleh pada seluruh sampel KACS menunjukkan nilai yang sesuai dengan SNI No. 06-3730-1995 karena tidak melebihi dari 10%. Nilai kadar abu tertinggi terdapat pada KACS 200-2 sebesar 5,26%, sedangkan nilai kadar abu terendah dan yang baik terdapat pada sampel KACS 200-4 sebesar 4,03%. Kadar abu merepresentasikan jumlah mineral anorganik yang tersisa setelah proses karbonisasi dan aktivasi (Almira et al., 2021). Semakin tinggi kadar abu, maka semakin rendah kualitas karbon aktif karena mineral anorganik dapat menutupi pori-pori karbon (Pusphaningrum et al., 2023). Kadar abu yang rendah diharapkan dapat menunjukkan kemurnian karbon yang tinggi, hal ini disebabkan karena situs adsorpsi tidak terhalang oleh material anorganik (Racero-Galaraga et al., 2024).

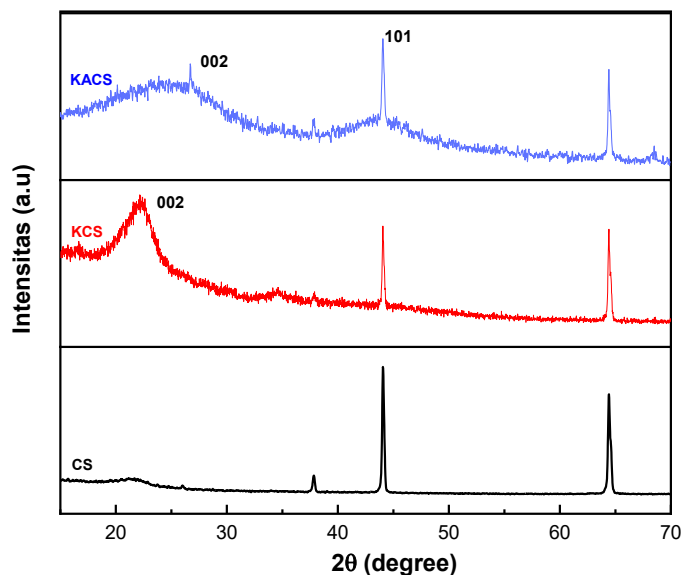
Kadar volatil yang diperoleh pada sampel KACS menunjukkan nilai yang relatif stabil, yaitu berkisar antara 6%. Menurut SNI No. 06-3730-1995, kadar volatil maksimum untuk karbon aktif adalah maksimal sebesar 25%. Kadar volatil menunjukkan jumlah senyawa organik yang mudah menguap dan dapat terurai lebih lanjut ketika dipanaskan (Almira et al., 2021). Stabilitas nilai volatil menunjukkan bahwa sebagian besar komponen volatil telah terdekomposisi sempurna sehingga mengindikasikan bahwa kondisi karbonisasi dan aktivasi yang dilakukan telah efektif untuk mengurangi zat volatil. Kadar volatil yang rendah merupakan karakteristik yang baik untuk karbon aktif karena berkontribusi pada stabilitas termal dan luas

permukaan yang tinggi (Jouhara et al., 2018). Kadar volatil yang baik ditunjukkan pada sampel KACS 200-4 yaitu sebesar 6,36%.

Parameter utama yang menentukan kualitas karbon aktif adalah kadar karbon aktif tetap. Nilai kadar karbon aktif tetap yang diperoleh pada variasi seluruh sampel KACS telah memenuhi SNI No. 06-3730-1995, karena berada diatas nilai minimum standar. Kadar karbon aktif tetap sangat dipengaruhi oleh kadar abu dan kadar volatil. Secara keseluruhan, karbon aktif yang menunjukkan kualitas baik untuk diaplikasikan lebih lanjut ialah sampel KACS 200-4 karena menghasilkan kadar abu dan kadar volatil terendah, serta kadar karbon aktif tetap tertinggi yaitu sebesar 89,61%.

2.4.4 Karakterisasi XRD

Karakterisasi difraksi sinar-X (XRD) dilakukan untuk mengetahui pola perubahan struktur kristal pada sampel mentah cangkang kelapa sawit (CS), karbon cangkang kelapa sawit (KCS) dan karbon aktif cangkang kelapa sawit (KACS). **Gambar 2.8** menunjukkan perubahan pola XRD dari sampel mentah cangkang kelapa sawit hingga terkonversi menjadi karbon aktif cangkang kelapa sawit.



Gambar 2.8 Difraktogram dari sampel cangkang kelapa sawit (CS), karbon cangkang kelapa sawit (KCS), dan karbon aktif cangkang kelapa sawit (KACS)

Hasil karakterisasi struktur kristal menggunakan XRD menunjukkan perubahan yang sangat signifikan pada sampel sebelum dan sesudah proses karbonisasi dan aktivasi. Sampel CS menunjukkan pola difraksi yang masih sangat teratur. Pola XRD pada sampel CS memperlihatkan beberapa puncak tajam dengan intensitas tinggi pada sudut 2θ sekitar $21,92^\circ$; $37,86^\circ$; $44,06^\circ$; dan $64,42^\circ$. Sudut 2θ pada $21,92^\circ$ dan $37,86^\circ$ menunjukkan koeksistensi atom karbon dan oksigen pada masing-masing puncak (Bakar et al., 2019). Puncak 2θ pada daerah sekitar $20-24^\circ$

menunjukkan keberadaan struktur amorf yang mewakili kandungan lignoselulosa pada sampel biomassa (Yeboah et al., 2020). Pada puncak $2\theta = 44,02^\circ$ dan $64,42^\circ$ menunjukkan adanya K_2O dan SiO_2 secara berturut-turut yang sesuai dengan data JCPDS No. 01-085-0457 (Abdullah et al., 2021).

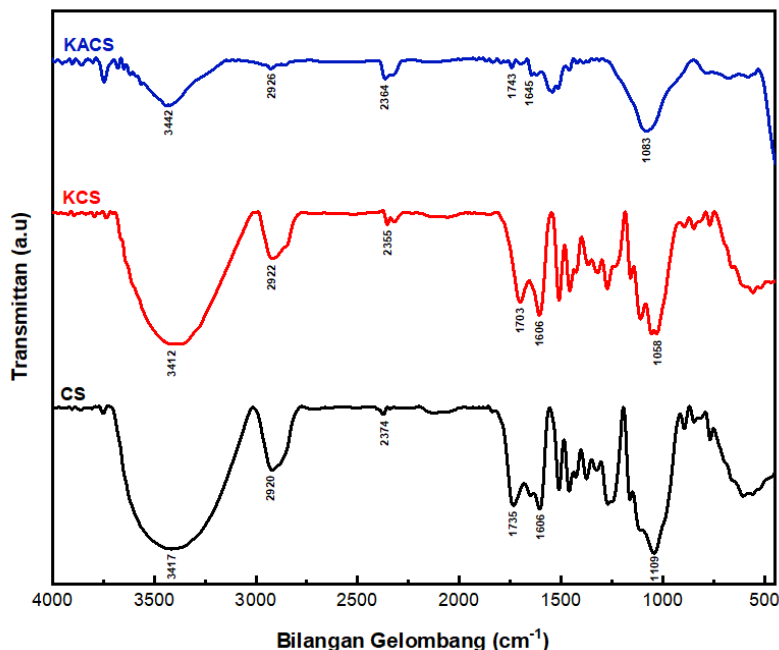
Sampel setelah karbonisasi dan aktivasi menunjukkan perubahan pola difraksi yang sangat signifikan, terutama pada sudut $2\theta = 15-30^\circ$. Pola difraksi KCS menunjukkan beberapa puncak pada 2θ yaitu $22,30^\circ$; $44,04^\circ$; dan $64,40^\circ$. Puncak lebar yang terdapat pada KCS menunjukkan bahwa karbonisasi hidrotermal berhasil mengubah struktur biomassa menjadi struktur amorf (Jain et al., 2016). Puncak difraksi pada $22,30^\circ$ dan $44,04^\circ$ menunjukkan puncak karakteristik bidang kristal (002) dan (100) yang merupakan pola XRD khas karbon sesuai dengan JCPDS No.75-1621 (Li et al., 2023; Perdana et al., 2020).

Sampel KACS menunjukkan puncak difraksi yang mengalami pelebaran dan pergeseran puncak difraksi sangat signifikan yaitu dari $22,30^\circ$ menjadi $26,69^\circ$ dengan struktur amorf. Karbon aktif yang telah diaktivasi kimia dengan KOH dan diaktivasi fisika pada suhu $700^\circ C$ menunjukkan tiga puncak difraksi utama pada sudut 2θ sekitar $26,69^\circ$; $44,04^\circ$; dan $64,40^\circ$. Hasil penelitian ini sejalan dengan yang dilakukan oleh Lestari et al (2024) yang menunjukkan dua puncak difraksi pada sudut $2\theta = 26,62^\circ$ dan $44,56^\circ$ yang sesuai dengan bidang kristal (002) dan (101) yang mengindikasikan bahwa karbon yang diaktivasi dengan basa akan mempertahankan struktur kristal heksagonal. Hamouda et al. (2021) juga menyatakan bahwa karbon amorf yang terbentuk pada bidang kristal (002) dengan bentuk tidak teratur disebabkan oleh lapisan karbon heksagonal yang berorientasi acak, sehingga dapat meningkatkan luas permukaan spesifik (Hamouda et al., 2021). Abdullah et al. (2021) dalam penelitiannya menemukan puncak difraksi pada sudut $2\theta = 26,6^\circ$ dan $44,1^\circ$ (JCPDS No. 00-050-2241), hal ini menunjukkan struktur mikrokristalin dan lapisan aromatik dalam arah planar yang menandakan keberhasilan karbonisasi dan aktivasi dari biomassa lignoselulosa.

2.4.5 Analisis Gugus Fungsi dengan FTIR

Analisis spektrum FTIR dilakukan untuk mengetahui perubahan gugus fungsi yang terjadi pada sampel selama proses sintesis karbon aktif (Gong et al., 2024). Hasil analisis FTIR menunjukkan terjadi perubahan struktural yang sangat signifikan dari panjang gelombang yang dihasilkan selama proses sintesis cangkang kelapa sawit menjadi karbon aktif. **Gambar 2.9** merupakan hasil analisis spektrum FTIR dari ketiga sampel, yaitu sampel mentah cangkang kelapa sawit (CS), sampel cangkang kelapa sawit hasil karbonisasi hidrotermal (KCS), dan karbon aktif cangkang kelapa sawit (KACS). Berdasarkan **Gambar 2.9** dapat dilihat bahwa sampel mentah memiliki jumlah puncak yang lebih banyak dibanding sampel KCS dan KACS, terutama pada sekitar panjang gelombang ($1600-650\text{ cm}^{-1}$). Hal ini mengindikasikan bahwa pada sampel mentah terdapat lebih banyak gugus fungsional kimia dibandingkan dengan karbon aktif (Nasir et al., 2018). Spektrum yang kaya akan gugus fungsional tersebut merupakan karakteristik dari material lignoselulosa (Mishra et al., 2024).

Sampel CS menunjukkan terdapat pita serapan lebar pada bilangan gelombang 3417 cm^{-1} yang dikaitkan dengan adanya gugus hidroksil ($-\text{OH}$) dari alkohol yang merupakan komponen utama dari lignoselulosa (Prabakaran dan Pillay, 2025). Pada panjang gelombang 2920 cm^{-1} menunjukkan adanya gugus C-H alkana (Anyika et al., 2017). Selain itu, pada panjang gelombang sekitar 1735 cm^{-1} dan 1606 cm^{-1} menunjukkan adanya gugus C=O dari gugus karbonil ester dan C=C ikatan dari alkena konjugasi. Pada panjang gelombang 1109 cm^{-1} menunjukkan regangan C-O yang berkaitan dengan gugus eter. Spektrum ini mengindikasikan bahwa CS masih didominasi oleh gugus fungsi khas dari material biomassa lignoselulosa.



Gambar 2.9 Spektrum FTIR dari sampel cangkang kelapa sawit (CS), karbon cangkang kelapa sawit (KCS), dan karbon aktif cangkang kelapa sawit (KACS)

Sampel KCS merupakan hasil karbonisasi hidrotermal menunjukkan perubahan yang signifikan dalam pergeseran bilangan gelombang dan penurunan intensitas. Pada puncak bilangan gelombang 3412 cm^{-1} menunjukkan adanya gugus hidroksil ($-\text{OH}$) dan interaksi ikatan hidrogen yang berasal dari molekul air yang teradsorpsi pada permukaan karbon (Kristianto et al., 2020). Pita pada 2922 cm^{-1} juga menunjukkan penurunan intensitas dan pergeseran panjang gelombang yang cukup tinggi, hal ini disebabkan oleh degradasi dari rantai alifatik akibat proses karbonisasi hidrotermal dan menunjukkan adanya gugus metil (Anyika et al., 2025). Pita regang pada C=O pada 1703 cm^{-1} dikaitkan dengan keberadaan gugus karbonil dalam bentuk aldehid dan pita pada bilangan gelombang 1606 cm^{-1} menunjukkan adanya struktur C=C aromatik terkonjugasi yang lebih stabil akibat reaksi kondensasi dan aromatisasi selama karbonisasi hidrotermal.

Pada KACS gugus fungsi hidroksil (-OH) mengalami penurunan intensitas yang sangat drastis dan pergeseran bilangan gelombang sangat tinggi yaitu dari 3412 cm^{-1} menjadi 3442 cm^{-1} . Penurunan intensitas dan pergeseran puncak gugus hidroksil (-OH) disebabkan oleh berkurangnya ikatan hidrogen selama aktivasi dan menunjukkan adanya gugus fenol (Anyika et al., 2025; Rabichi et al., 2025). Gugus karbonil (C=O) pada bilangan gelombang 1743 cm^{-1} dikaitkan dengan gugus asam karboksilat, sedangkan pada pita 1645 cm^{-1} berkaitan dengan vibrasi regang C=C yang menunjukkan adanya gugus aromatik terkonjugasi. Pita pada 1083 cm^{-1} menunjukkan vibrasi regang yang berkaitan dengan gugus alkohol yang berperan sebagai situs aktif permukaan (Prabakaran dan Pillay, 2025).

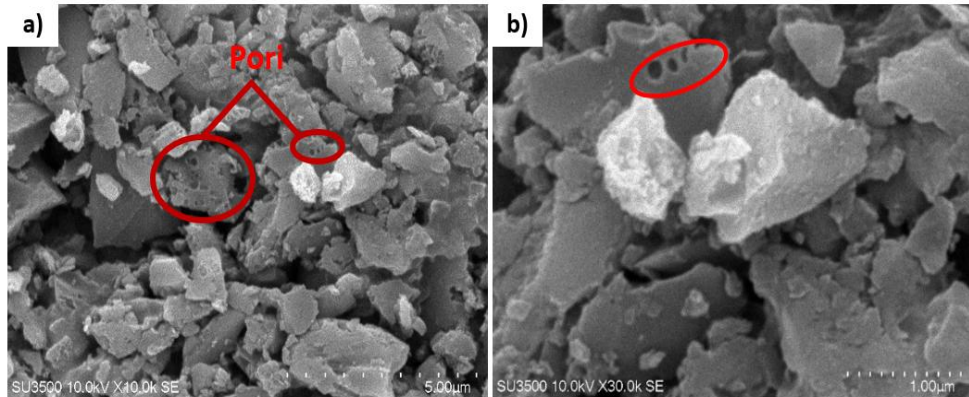
Panjang gelombang dan gugus fungsi yang muncul pada spektra FTIR dapat dilihat pada **Tabel 2.4**. Penurunan intensitas dan pergeseran panjang gelombang terjadi karena proses aktivasi dengan menggunakan KOH sehingga menyebabkan oksidasi struktur terkonjugasi (Yahia et al., 2025). Transformasi ini menyatakan bahwa aktivasi kimia secara efektif meningkatkan reaktivitas dan porositas permukaan sekaligus memodifikasi gugus fungsi asli (Sevilla et al., 2017).

Tabel 2.4 Data spektrum FTIR dari sampel CS, KCS, dan KACS

Bilangan gelombang (cm^{-1})			Gugus fungsi
CS	KCS	KACS	
3417	3412	3442	Vibrasi regang -OH (alkohol/alkohol/fenol)
2920	2992	2926	Vibrasi regang C-H alifatik (alkana)
2374	2364	2364	Vibrasi regang O=C=O (karbondioksida)
1735	1703	1743	Vibrasi regang C=O (ester/aldehid/asam karboksilat)
1606	1606	1645	Vibrasi regang C=C (alkana konjugasi/alkana konjugasi/aromatik terkonjugasi)
1109	1056	1083	Vibrasi regang C-O (eter/alkohol primer/alkohol primer)

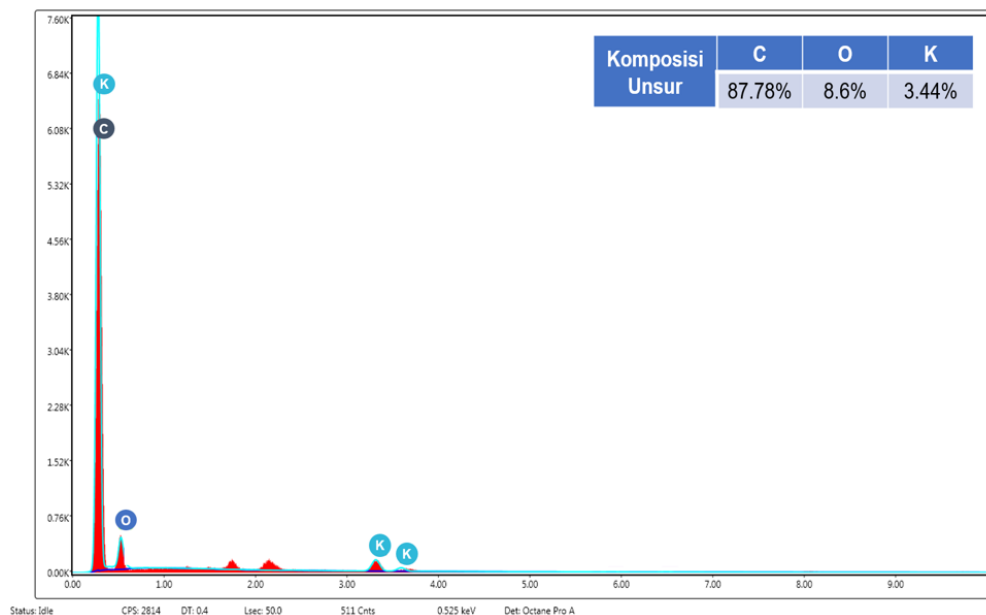
2.4.6 Analisis Morfologi Struktur dan Komposisi Unsur dengan SEM-EDS

SEM-EDS dilakukan untuk melihat struktur morfologi permukaan dan komposisi unsur pada karbon aktif cangkang kelapa sawit (KACS). **Gambar 2.10** menunjukkan morfologi struktur KACS pada perbesaran 10.000x dan 30.000x. Gambar tersebut menunjukkan KACS yang telah diaktivasi secara kimia dan fisika. Morfologi pada KACS menggambarkan bentuk lapisan yang tersusun dengan granular yang berlapis tidak beraturan dan terdapat banyak celah antar partikel dan pori.



Gambar 2.10 Citra SEM dari sampel karbon aktif cangkang kelapa sawit (KACS) pada perbesaran (a) 10.000x dan (b) 30.000x

Pada **Gambar 2.10a** menunjukkan pori yang terdapat pada KACS lebih terlihat jelas dan tampak terlihat terbuka. Hal ini menunjukkan morfologi dengan pori tersebut merupakan karakteristik dari karbon aktif. Pam et al. (2022) menyatakan bahwa pertumbuhan struktur pori terjadi akibat proses aktivasi dan ekspansi termal selama karbonisasi. Struktur permukaan berpori ini sangat unik dan cocok untuk diaplikasikan dalam penyimpanan listrik, karena dapat memfasilitasi difusi ion atau molekul ke dalam struktur pori (Li et al., 2023).

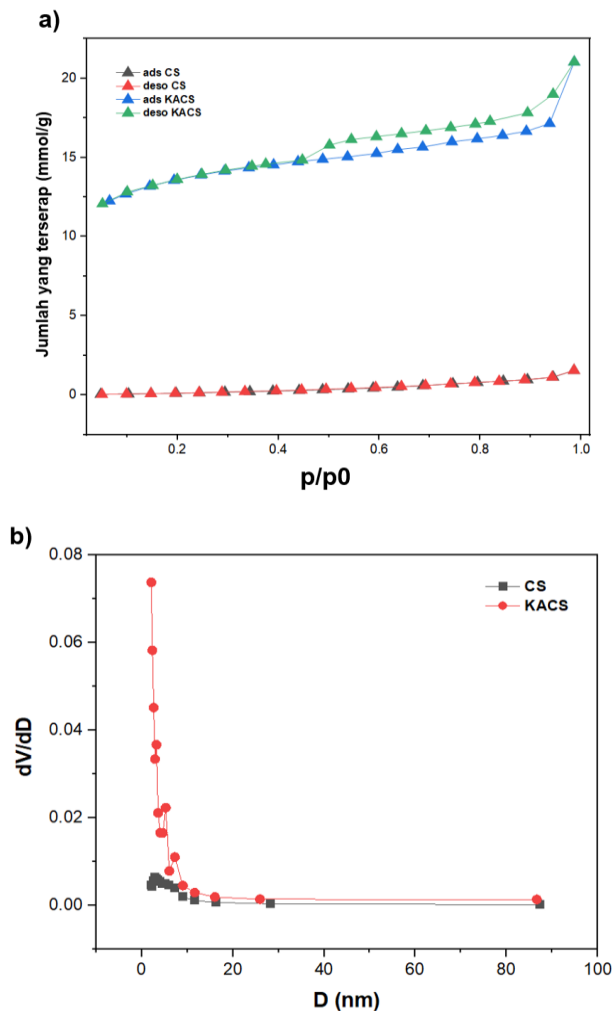


Gambar 2.11 Spektrum EDS dari sampel karbon aktif cangkang kelapa sawit (KACS)

Gambar 2.11 menunjukkan hasil spektrum dan komposisi unsur KACS dari hasil analisis EDS. Analisis ini dilakukan untuk mengidentifikasi dan mengamati komposisi unsur yang terdapat dalam KACS. Analisis EDS dari KACS

mengidentifikasi terdapat beberapa unsur seperti C, O, dan K. Komposisi unsur yang terdapat pada KACS ialah C sebesar 87,78%, O sebesar 8,6%, dan K sebesar 3,44%. Unsur C diperoleh dari proses karbonisasi dan aktivasi. Unsur O dan K muncul akibat adanya pengaruh aktivasi menggunakan KOH.

2.4.7 Analisis Luas Permukaan dan Porositas dengan SAA



Gambar 2.12 a) Isoterm adsorpsi/desorpsi N_2 dari sampel CS dan KACS dan
b) Kurva grafik distribusi pori pada sampel CS dan KACS

Surface area analyzer (SAA) dilakukan untuk menganalisis luas permukaan dan porositas pada sampel mentah cangkang kelapa sawit (CS) dan karbon aktif (KACS). **Gambar 2.12** menunjukkan isoterm adsorpsi-desorpsi nitrogen dan kurva distribusi pori dari sampel CS dan KACS. **Gambar 2.12a** menunjukkan isoterm adsorpsi-

desorpsi dari CS dan KACS yang secara umum menurut klasifikasi IUPAC gambar isoterm CS mengarah pada isoterm tipe III yang merupakan material tidak berpori dan hanya memiliki pori makro, sedangkan KACS menunjukkan grafik yang terbuka dan mengarah ke loop histeris yang sesuai dengan isoterm tipe IV dengan kombinasi mesopori dan mikropori dalam sampel (Rahman et al., 2021). Hal ini sejalan dengan data BET pada **Tabel 2.5** yang menunjukkan adanya peningkatan luas permukaan dari 22,01 m²/g menjadi 960,79 m²/g dan volume pori total dari 0,05 cm³/g menjadi 0,73 cm³/g. Karakteristik tersebut dapat berperan penting dalam meningkatkan kapasitas penyimpanan muatan melalui mekanisme adsorpsi ion elektrolit pada permukaan aktif, sehingga dapat mempercepat proses pengisian dan pengosongan muatan dalam superkapasitor (Li et al., 2023).

Gambar 2.12b merupakan grafik distribusi pori yang memperkuat hasil temuan yang menunjukkan CS memiliki puncak distribusi pori sekitar 9,81 nm dengan mesopori terbatas, sedangkan KACS menunjukkan puncak distribusi pori yang lebih tajam dan pori yang seragam sekitar 3,41 nm. Distribusi pori yang merata pada KACS didominasi oleh struktur mesopori. Keberadaan mesopori ini sangat membantu dalam aplikasi elektrokimia karena berperan sebagai jalur difusi ion elektrolit ke permukaan aktif dan menghindari hambatan difusi yang sering terjadi pada struktur mikropori (Yumak, 2019).

Tabel 2.5 Luas permukaan, volume pori, dan diameter pori sampel CS dan KACS

Material	S _(BET) (m ² /g)	Volume pori total (cm ³ /g)	Ukuran pori (nm)
CS	22,01	0,05	9,81
KACS	960,79	0,73	3,04

2.5 Kesimpulan

Cangkang kelapa sawit yang berasal dari limbah biomassa berhasil disintesis dengan metode karbonisasi hidrotermal dan aktivasi kimia fisika. Hasil analisis proksimat menunjukkan karbon aktif yang baik ialah pada sampel KACS 200-4 dengan kadar air sebesar 12,58%, kadar abu sebesar 4,03%, kadar volatil sebesar 6,36%, dan kadar karbon aktif tetap sebesar 89,61%. Karakterisasi XRD menunjukkan terbentuknya struktur amorf pada KACS yaitu $2\theta = 26,69^\circ$ yang berada pada bidang kristal (002). Spektra FTIR menunjukkan adanya ciri khas gugus fungsi dari karbon aktif yaitu -OH, C-H, C-O, dan C=C. Hasil SEM-EDS menunjukkan adanya pori pada permukaan KACS dan komposisi unsur C yang tinggi yaitu sebesar 87,78%. Hasil SAA menunjukkan luas permukaan KACS sebesar 960,79 m²/g dengan struktur mesopori sebesar 3,04 nm. Berdasarkan hasil karakterisasi tersebut dapat mendukung terjadi transport ion pada elektroda superkapasitor dan dapat disimpulkan bahwa karbon aktif dari cangkang kelapa sawit memiliki potensi untuk dijadikan sebagai kandidat bahan elektroda superkapasitor.