

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi global yang terus meningkat mendorong pengembangan teknologi penyimpanan energi yang tidak hanya efisien, tetapi juga mampu memberikan respons daya yang cepat. Sistem penyimpanan energi konvensional seperti baterai memang menawarkan densitas energi yang tinggi, namun memiliki keterbatasan pada kemampuan untuk memberikan daya instan, kecepatan charge-discharge, serta umur siklus yang relatif pendek. Keterbatasan ini semakin terlihat pada aplikasi modern seperti kendaraan listrik, perangkat elektronik portabel berdaya tinggi, sistem penyimpanan energi terbarukan, hingga perangkat industrial yang membutuhkan suplai daya stabil dalam waktu singkat (Ibnu & Endang, 2025). Kondisi tersebut menuntut hadirnya sistem penyimpanan energi alternatif yang mampu mengisi dan melepaskan muatan secara cepat, stabil, efisien, dan memiliki ketahanan jangka panjang.

Superkapasitor muncul sebagai solusi yang menjanjikan karena memiliki densitas daya yang sangat tinggi, efisiensi charge-discharge yang hampir mendekati 100%, serta umur siklus yang dapat mencapai ratusan ribu kali. Mekanisme penyimpanan energinya berbasis kapasitansi lapisan ganda elektrik (*Electric Double-Layer Capacitance/EDLC*), yaitu akumulasi ion pada permukaan elektroda tanpa melibatkan reaksi kimia (Dutta et al., 2023). Mekanisme ini memberikan keunggulan berupa respons daya yang jauh lebih cepat dibandingkan baterai, degradasi yang minimal selama siklus operasi, serta kemampuan operasi yang stabil pada rentang suhu yang lebih luas (Phogat et al., 2025). Berdasarkan karakteristik tersebut, superkapasitor menjadi salah satu teknologi penyimpanan energi yang banyak dikembangkan karena memiliki kemampuan pengisian dan pelepasan muatan yang cepat serta umur siklus yang panjang.

Kinerja superkapasitor bergantung terutama pada karakteristik material elektroda. Karbon aktif menjadi material yang paling banyak digunakan karena mampu menyediakan luas permukaan spesifik yang sangat besar, struktur pori yang dapat diatur, serta konduktivitas elektrik yang memadai untuk meningkatkan laju transfer elektron dan ion (Kierzek & Gryglewicz, 2020). Dibandingkan material

karbon lain seperti *graphene*, *carbon nanotubes*, atau karbon turunan polimer, karbon aktif dari biomassa memiliki keunggulan berupa biaya produksi rendah, proses sintesis yang lebih sederhana, serta sifat yang lebih ramah lingkungan (Tamara et al., 2024). Hal ini menjadikannya sangat relevan untuk pengembangan superkapasitor berbiaya rendah dan berkelanjutan.

Tempurung kelapa merupakan salah satu bahan karbon aktif terbaik karena mengandung lignoselulosa tinggi, kadar karbon tetap yang besar, serta struktur alami yang keras dan padat (Setiapraja et al., 2023). Indonesia sebagai produsen kelapa utama dunia menghasilkan limbah tempurung dalam jumlah signifikan yang sering kali tidak dimanfaatkan secara optimal. Pemanfaatan tempurung kelapa tidak hanya mengurangi volume limbah pertanian, tetapi juga memberikan nilai tambah melalui produksi karbon aktif berkualitas tinggi yang dapat diaplikasikan pada teknologi energi modern (Aisyah et al., 2024). Secara kimia, tempurung kelapa memiliki rasio karbon-oksigen yang menguntungkan, sedangkan secara fisik, strukturnya memungkinkan pembentukan pori mikro dan meso yang ideal untuk penyimpanan ion dalam superkapasitor (Tomy et al., 2024).

Namun demikian, kualitas karbon aktif sangat ditentukan oleh metode sintesis, khususnya pada tahap karbonisasi dan aktivasi. Parameter seperti temperatur karbonisasi, laju pemanasan, jenis dan konsentrasi aktivator (misalnya KOH, ZnCl_2 , H_3PO_4), waktu tahan, serta metode aktivasi (fisika atau kimia) berpengaruh langsung terhadap luas permukaan, ukuran pori, distribusi pori, serta tingkat grafitisasi karbon. Kondisi sintesis yang kurang optimal dapat menghasilkan material dengan porositas rendah atau konduktivitas yang tidak memadai, sehingga mengurangi performa elektrokimia superkapasitor (Forouzandeh et al., 2020). Oleh karena itu, optimasi proses sintesis menjadi tantangan ilmiah yang penting untuk menghasilkan elektroda karbon aktif yang memenuhi standar kinerja tinggi.

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa aktivasi kimia menggunakan KOH memiliki peran penting dalam meningkatkan kualitas karbon aktif berbasis tempurung kelapa, terutama untuk aplikasi elektroda superkapasitor. Wang et al., (2023) menunjukkan bahwa aktivasi pada 800°C mampu menghasilkan luas permukaan sangat tinggi ($2228 \text{ m}^2/\text{g}$) dengan morfologi menyerupai sarang lebah yang berkontribusi pada kapasitansi spesifik mencapai 367 F/g dan stabilitas siklus

lebih dari 92% setelah 10.000 siklus. Ba shbil et al. (2025) juga melaporkan performa unggul pada material yang diaktivasi KOH dan dimodifikasi dengan NiO, dengan kapasitansi mencapai 449 F/g dan retensi stabil hingga 5000 siklus. Pada suhu aktivasi lebih tinggi, 900°C, Tomy et al. (2024) menemukan bahwa karbon aktif tetap menunjukkan performa elektrokimia yang baik meskipun luas permukaannya lebih rendah dibanding suhu 800°C.

Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa aktivasi kimia KOH memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap perkembangan pori dan karakter elektrokimia. Di sisi lain, karbon tempurung kelapa yang hanya mengalami karbonisasi tanpa aktivasi kimia umumnya memiliki struktur pori terbatas, luas permukaan rendah, dan kapasitas penyimpanan ion yang lebih kecil (Lubis et al., 2020). Walaupun demikian, juga terdapat char karbonisasi yang memiliki tingkat keteraturan struktur yang sedikit lebih baik, sehingga konduktivitasnya relatif stabil meskipun kapasitas penyimpanan ionnya lebih rendah (Pei et al., 2025). Perbedaan karakteristik antara karbon tanpa aktivasi dan karbon teraktivasi KOH menjadikan kedua material tersebut menarik untuk dibandingkan, terutama dalam menganalisis morfologi permukaan, luas permukaan spesifik, serta karakteristik pori sebagai parameter yang memengaruhi kinerja karbon aktif sebagai material elektroda superkapasitor.

Faktor lain yang memegang peranan penting dalam menentukan karakteristik karbon aktif adalah suhu aktivasi. Peningkatan suhu memengaruhi perkembangan pori, luas permukaan spesifik, serta morfologi permukaan karbon. Pada suhu aktivasi yang sesuai, proses aktivasi KOH dapat membentuk pori yang lebih berkembang sehingga meningkatkan luas permukaan spesifik. Sebaliknya, suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan pelebaran atau kerusakan dinding pori (over-activation), sehingga luas permukaan efektif dan kinerja elektrokimia dapat menurun (Efendi & Astuti, 2016; Lan et al., 2019). Kondisi tersebut berpotensi menghasilkan mesopori berlebih, yang meskipun mempermudah difusi ion, dapat menurunkan kapasitansi volumetrik dan densitas energi.

Variasi intensitas aktivasi ini juga berdampak pada tingkat grafitisasi. Aktivasi yang terlalu kuat dapat menurunkan keteraturan struktur karbon dan meningkatkan resistansi, sedangkan aktivasi yang terlalu lemah membuat pori kurang berkembang. Oleh sebab itu, memahami pengaruh suhu aktivasi terhadap

pembentukan dan transformasi struktur pori, luas permukaan, grafitisasi, serta performa elektrokimia menjadi sangat penting untuk merancang karbon aktif tempurung kelapa yang optimal sebagai elektroda superkapasitor (Taer et al., 2016).

Selain faktor sintesis, pengujian karakteristik morfologi dan struktur material juga merupakan bagian krusial dalam memastikan kualitas karbon aktif. Teknik seperti *Scanning Electron Microscopy* (SEM) digunakan untuk mengamati struktur permukaan, bentuk pori, dan keseragaman morfologi, sementara *Brunauer–Emmett–Teller* (BET) digunakan untuk menilai luas permukaan spesifik dan distribusi ukuran (Hassan et al., 2021). Informasi ini diperlukan untuk menjelaskan hubungan antara metode sintesis, struktur material, dan performa elektrokimia pada superkapasitor. Tanpa karakterisasi yang komprehensif, sulit untuk memastikan bahwa karbon aktif yang dihasilkan memiliki struktur pori yang sesuai untuk mekanisme EDLC.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana karakteristik morfologi dan struktur porositas karbon tempurung kelapa yang dihasilkan tanpa aktivasi kimia ?
2. Bagaimana karakteristik morfologi dan struktur porositas karbon tempurung kelapa yang dihasilkan aktivasi kimia ?
3. Bagaimana pengaruh karakteristik morfologi terhadap potensi kinerjanya sebagai elektroda superkapasitor ?

1.3 Tujuan Riset

1. Mengetahui karakteristik morfologi dan struktur porositas karbon tempurung kelapa yang dihasilkan dari proses termal tanpa aktivasi kimia
2. Mengetahui karakteristik morfologi dan struktur porositas karbon tempurung kelapa yang dihasilkan dari proses termal aktivasi kimia
3. Mengetahui pengaruh karakteristik morfologi karbon terhadap potensi kinerjanya sebagai material elektroda pada aplikasi superkapasitor.