

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Pertumbuhan populasi global dan perkembangan teknologi modern telah menyebabkan peningkatan signifikan terhadap kebutuhan energi. Kondisi ini menuntut ketersediaan sistem penyimpanan energi yang tidak hanya efisien, tetapi juga ramah lingkungan dan berkelanjutan. Ketergantungan pada bahan bakar fosil, seperti minyak bumi dan batu bara, semakin memperbesar risiko Zkelangkaan sumber daya sekaligus meningkatkan emisi gas rumah kaca, termasuk CO₂, CH₄, dan NO_x, yang berdampak buruk terhadap kualitas lingkungan (Filonchyk et al., 2024) . Oleh karena itu, pengembangan teknologi energi baru terbarukan (EBT) menjadi prioritas penting dalam mendukung transisi menuju sistem energi hijau.

Salah satu inovasi energi berkelanjutan yang semakin banyak dikembangkan adalah superkapasitor. Superkapasitor merupakan perangkat penyimpanan energi elektrokimia yang menawarkan densitas daya tinggi mencapai sekitar 10 kW/kg. Berbeda dengan baterai dan kapasitor konvensional yang menyimpan energi melalui reaksi kimia dalam bulk material atau melalui pengisian muatan pada dielektrik, superkapasitor memiliki mekanisme penyimpanan energi yang berlangsung di permukaan elektroda (Lobato-Peralta et al., 2025). Berdasarkan mekanismenya, superkapasitor terbagi menjadi dua tipe utama, yaitu *Electric Double Layer Capacitor* (EDLC), yang bekerja melalui akumulasi muatan elektrostatik pada permukaan elektroda, dan pseudokapasitor, yang memanfaatkan reaksi redoks reversibel pada permukaan material aktif. (Karthikeyan et al., 2020). Dengan demikian, sifat dan struktur material elektroda menjadi faktor penentu utama dalam kinerja superkapasitor.

Sebagai salah satu produsen kelapa sawit terbesar di dunia, Indonesia menghasilkan limbah TKKS dalam jumlah sangat besar. Setiap ton tandan buah segar (TBS) yang diolah di pabrik kelapa sawit, sekitar 23–28% merupakan limbah TKKS (Yusuf et al., 2025). TKKS memiliki kandungan selulosa 27–54%,

hemiselulosa 24–35%, dan lignin sebanyak 18–35%, menjadikannya bahan baku ideal untuk karbonisasi dan aktivasi menjadi karbon berpori tinggi (Sangadji et al., 2025).

Karbon aktif dari limbah biomassa menjadi pilihan elektroda superkapasitor yang makin populer karena menawarkan luas permukaan besar, stabilitas kimia, biaya rendah serta mendukung ekonomi sirkular berkelanjutan. Salah satu limbah biomassa potensial di Indonesia adalah tandan kosong kelapa sawit (TKKS).

Selain karbon aktif, material oksida logam juga dapat digunakan sebagai elektroda superkapasitor. Oksida logam memiliki mekanisme penyimpanan energi secara pseudokapasitansi (Christopher & Karuppiah, 2024). Pseudokapasitansi merupakan mekanisme penyimpanan muatan yang dihasilkan dari reaksi redoks faradaik cepat pada elektroda. Salah satu logam oksida yang memiliki struktur spinel ferit adalah *copper cobalt ferrite* ($\text{CuCoFe}_2\text{O}_4$) yang memiliki keunggulan karena mengandung tiga pasangan ion redoks aktif, yaitu $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}^+$, $\text{Co}^{3+}/\text{Co}^{2+}$, dan $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$, yang berperan dalam mekanisme penyimpanan muatan (Patil et al., 2022). Kombinasi ini memberikan kapasitansi tinggi serta stabilitas kimia dan termal yang baik, menjadikannya kandidat potensial untuk elektroda superkapasitor. Meski demikian, $\text{CuCoFe}_2\text{O}_4$ murni memiliki kelemahan berupa konduktivitas listrik rendah dan luas permukaan terbatas, yang menghambat perpindahan elektron dan ion selama proses elektrokimia.

Komposit $\text{CuCoFe}_2\text{O}_4$ dengan karbon aktif menawarkan solusi strategis. Karbon aktif berfungsi meningkatkan konduktivitas dan menyediakan luas permukaan yang besar, sementara $\text{CuCoFe}_2\text{O}_4$ memberikan kontribusi pseudokapasitansi melalui reaksi redoks. Sinergi antara kedua komponen ini diharapkan menghasilkan peningkatan signifikan dalam kapasitansi spesifik, stabilitas siklus, dan konduktivitas total material.

Penelitian ini berfokus pada pengembangan komposit $\text{Cu}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ dan karbon serta karbon aktif yang disintesis dari limbah tandan kosong kelapa sawit (TKKS). Rasio stoikiometri logam Cu:Co:Fe (0,5:0,5:2) dipilih untuk menyeimbangkan aktivitas redoks dan kestabilan struktur spinel. Komposit yang dihasilkan akan dikarakterisasi secara struktural dan morfologi menggunakan *X-ray*

Diffraction (XRD dan *Scanning Electron Microscopy with Electron Dispersive X-ray* (SEM/EDX), luas permukaan material melalui pengujian *Brunauer Emmett Teller* (BET) dan pengujian elektrokimia yang mencakup *Cyclic Voltammetry* (CV), *Galvanostatic Charge Discharge* (GCD), dan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) untuk mengevaluasi kapasitansi spesifik, stabilitas siklus, dan konduktivitas.

Secara ilmiah, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi terhadap performa antara komposit $\text{CuCoFe}_2\text{O}_4$ dan karbon aktif, karakteristik struktural morfologi, serta sifat elektrokimia komposit yang dihasilkan. Secara praktis, penelitian ini dapat mendorong pemanfaatan limbah TKKS sebagai sumber bahan fungsional bernilai tambah tinggi untuk teknologi energi baru terbarukan.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, beberapa rumusan masalah yang dapat diambil adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana sintesis material aktif $\text{Cu}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (CCF) yang dikompositkan dengan karbon aktif (CCF@AC)?
2. Bagaimana performa elektrokimia setelah dilakukan pengkomposian $\text{Cu}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (CCF) dengan AC dalam beberapa variasi rasio?

C. Batasan Masalah

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan, dilakukan pembatasan masalah sebagai berikut:

1. Morfologi komposit CCF@AC dianalisis menggunakan difraktometer sinar-X, *Field Emission Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (FESEM-EDX), dan N_2 adsorpsi-desorpsi
2. Kinerja elektrokimia dievaluasi menggunakan sistem tiga elektroda dan dua elektroda meliputi voltametri siklik (CV), pengisian serta pengosongan galvanostatik (GCD), dan spektroskopi impedansi elektrokimia (EIS).

D. Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, penelitian ini memiliki tujuan sebagai berikut:

1. Menganalisis sintesis material aktif $\text{Cu}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (CCF) yang dikompositkan dengan karbon aktif (CCF@AC).
2. Menganalisis performa elektrokimia setelah dilakukan pengomposian $\text{Cu}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (CCF) dengan AC dalam beberapa variasi rasio.

E. Manfaat Penelitian

Berdasarkan latar belakang, tujuan serta rumusan dan pembatasan masalah, penelitian ini memiliki beberapa manfaat sebagai berikut:

1. Menjadi referensi ilmiah bagi pengembangan material elektrode super berbasis spinel ferrite untuk aplikasi *energy storage* ramah lingkungan.
2. Menunjukkan potensi $\text{Cu}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ @AC sebagai kandidat material aktif superkapasitor.
3. Mendukung pemanfaatan limbah biomassa tandan kosong kelapa sawit sebagai sumber karbon aktif bernilai tinggi dalam teknologi energi terbarukan