

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Baterai litium-ion (LIBs) telah banyak digunakan pada perangkat elektronik portabel, sistem penyimpanan energi, berbagai jenis peralatan khusus, bahkan kendaraan listrik. Jumlah penggunaan baterai litium-ion diperkirakan akan meningkat signifikan dalam waktu dekat seiring upaya global demi mengurangi emisi karbon. Meskipun demikian, kapasitas aktual material aktif pada katoda konvensional seperti LiFePO_4 , $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Co}_x\text{Al}_y\text{O}_2$, ataupun $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Co}_x\text{Mn}_y\text{O}_2$ telah mendekati batas teoritisnya, sehingga membatasi perkembangan lebih lanjut dari teknologi baterai litium-ion. Oleh karena itu, material katoda alternatif dengan kapasitas spesifik teoritis lebih tinggi menjadi kebutuhan krusial, dan pengembangannya dipandang sebagai strategi penting untuk mengatasi tantangan tersebut (Lu *et al.*, 2024).

Sulfur merupakan alternatif material katoda baru yang ketersediannya sangat melimpah di alam yakni hampir 953 ppm (jumlah sulfur per juta bagian massa kerak bumi) (Sungjemmenla *et al.*, 2022), apabila katoda berbasis sulfur dipasangkan anoda berupa logam litium akan menawarkan potensi besar untuk mencapai baterai generasi baru yakni baterai litium-sulfur (LiS) yang mempunyai densitas energi teoritis cukup tinggi yakni 2600 Wh/kg (Wu, Chan and Chung, 2025). Nilai tersebut tiga hingga lima kali lebih besar dibandingkan dengan material katoda konvensional lain seperti LiFePO_4 maupun LiCoO_2 (Nurhilal *et al.*, 2023). Densitas energi yang besar tersebut sejalan dengan tuntutan aplikasi yang memerlukan sumber daya yang ringan namun tahan lama (Wu, Chan and Chung, 2025).

Sulfur juga menawarkan kapasitas spesifik teoritis yang tinggi yakni sekitar 1675 mAh/g (Wu, Chan and Chung, 2025), keunggulan sulfur lainnya sebagai material katoda adalah biaya produksi yang terjangkau, tidak beracun, serta memberikan keuntungan lingkungan dan ekonomi yang signifikan daripada dengan material katoda konvensional (Wu, Chan and Chung, 2025). Performa

elektrokimianya yang tinggi dapat dicapai melalui pemutusan dan pembentukan kembali ikatan S-S dalam S₈. Setiap atom sulfur mentransfer dua elektron selama proses pengosongan, jumlah ini lebih besar dibandingkan ion logam seperti Li⁺, Ni⁺, Fe²⁺ (Kanagaraj *et al.*, 2022). Namun, baterai Li-S juga mempunyai beberapa tantangan yang harus dihadapi, diantaranya yaitu konduktivitas elektronik dari sulfur dan polisulfida litium yang rendah, perubahan volume yang besar pada material aktif katoda sulfur (~80%), dan *efek shuttle* polisulfida litium yang dapat menurunkan efisiensi coulomb, kerusakan anoda litium, dan menurunkan stabilitas antarmuka elektrolit (Kanagaraj *et al.*, 2022).

Oleh karena itu, diperlukan upaya untuk mengatasi tantangan yang ada, diantaranya yaitu optimasi struktur elektroda sulfur melalui penggunaan katoda komposit sulfur. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Lu *et al.* (2024) disebutkan bahwa komposisi material yang digunakan untuk membuat katoda komposit terdiri dari sulfur (S), karbon aktif (AC), dan *Carbon Nanotube* (CNT) dengan rasio massa 7:2:1. Metode preparasi yang digunakan adalah pencampuran kering dan pemanasan fusi, dimana campuran ketiga bahan tersebut dipanaskan pada suhu 155°C selama 6 jam.

Kinerja elektrokimia katoda komposit S/AC/CNT telah dikaji melalui pengujian sel yang menggunakan anoda litium metal dan elektrolit cair. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sel tersebut mampu menghasilkan kapasitas awal yang tinggi, yaitu 1077,0 mAh/g pada arus 0,1 mA/cm². Bahkan ketika rapat arus dinaikkan hingga 0,5 mA/cm², kapasitas pelepasannya masih mencapai 712,8 mAh/g. Ketahanan siklusnya juga tergolong baik, ditandai dengan kemampuan mempertahankan kapasitas sebesar 437,6 mAh/g setelah 200 siklus dan 273,6 mAh/g setelah 500 siklus pada kondisi arus yang sama.

Temuan ini menunjukkan bahwa komposit S/AC/CNT berpotensi menjadi material katoda yang unggul dengan kapasitas besar dan stabilitas elektrokimia yang baik untuk aplikasi baterai litium-sulfur. Selain itu, penelitian lain yang dilakukan oleh Kanagaraj *et al.* (2022) menyebutkan bahwa katoda komposit dengan rasio massa sulfur:MWCNT:PVDF sebesar (50:45:5) merupakan

komposisi yang paling menjanjikan untuk aplikasi baterai Li–S. Komposisi tersebut menunjukkan kapasitas pelepasan muatan (*discharge capacity*) tertinggi, yaitu 1414 mAh/g pada laju arus 0,1C, dibandingkan dengan rasio komposit lainnya yakni komposisi S:MWCNT:PVDF sebesar (25:70:5) dan (75:20:5).

MWCNT memiliki struktur tubular konduktif yang mirip dengan CNT dan berfungsi sebagai jaringan pengangkut elektron sekaligus penyangga mekanik bagi sulfur. Interaksi fisik antara sulfur dan MWCNT memungkinkan dispersi sulfur yang lebih merata, peningkatan jalur konduksi elektron, serta stabilitas struktur yang lebih baik selama proses pengisian–pengosongan. Dengan demikian, keberhasilan komposit S/AC/CNT dalam meningkatkan kapasitas dan stabilitas siklus memberikan landasan ilmiah yang kuat bahwa penggunaan MWCNT sebagai host karbon pada katoda sulfur dapat menjadi strategi efektif untuk meningkatkan performa elektrokimia pada baterai natrium–sulfur maupun litium–sulfur. MWCNT terbukti membentuk jaringan konduktif tiga dimensi yang luas dan dapat mengurangi tegangan sisa akibat perubahan volume selama proses pengisian dan pengosongan baterai (Lu *et al.*, 2024).

Namun, dispersi sulfur yang tidak homogen ke dalam matriks MWCNT masih menjadi tantangan yang menyebabkan rendahnya pemanfaatan sulfur dikarenakan terlepas dari elektroda dan siklusitas buruk pada katoda komposit (Kanagaraj *et al.*, 2022). Sehingga, diperlukan penambahan material karbon aktif pada komposisi katoda komposit yang berperan dalam meningkatkan konduktivitas elektronik, menahan ekspansi volume dan tegangan dalam struktur elektroda selama siklus baterai, serta dapat secara efektif menghambat *efek shuttle* polisulfida litium dengan cara menjebak polisulfida litium yang terlarut di dalam matriks karbon berpori (Lu *et al.*, 2024).

Studi-studi sebelumnya menunjukkan bahwa komposisi material dalam katoda komposit sulfur–karbon berperan sangat penting dalam menentukan performa elektrokimia, namun rasio massa yang optimal antara sulfur dan MWCNT belum dikaji secara sistematis pada sistem komposit tiga material S/MWCNT/AC. Lu *et al.* (2024) hanya menggunakan satu komposisi tetap (7:2:1) pada sistem

S/AC/CNT, sedangkan Kanagaraj *et al.* (2022) meneliti komposit S/MWCNT/PVDF dengan beberapa rasio massa tetapi tanpa memasukkan karbon aktif sebagai komponen fungsional yang mampu meningkatkan penyerapan polisulfida dan menstabilkan volume elektroda. Kedua penelitian tersebut belum mengevaluasi bagaimana pengaruh perubahan komposisi sulfur dan MWCNT, serta kontribusi karbon aktif terhadap jalur konduksi elektron, pemanfaatan sulfur, stabilitas struktur, serta efisiensi reaksi redoks.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh rasio massa sulfur dan MWCNT terhadap performa elektroda komposit S/MWCNT/AC yang disintesis melalui pencampuran kering dan pemanasan fusi, sehingga sulfur dapat meresap ke dalam pori-pori AC dan membentuk kontak optimal dengan MWCNT. MWCNT berfungsi sebagai material konduktif utama untuk meningkatkan konduktivitas listrik, sedangkan AC berperan dalam menahan ekspansi volume dan menjerat polisulfida litium (Lu *et al.*, 2024). Terdapat tiga sampel yang akan diteliti dengan variasi rasio massa sulfur, MWCNT, AC untuk masing-masing sampel yakni S1 (1:3:1), S2 (2:2:1), dan S3 (3:1:1).

Rasio massa yang digunakan tersebut dirancang untuk mempelajari perubahan karakteristik katoda ketika proporsi sulfur terhadap MWCNT ditingkatkan secara bertahap. Pada komposisi S1, kandungan MWCNT lebih dominan sehingga diharapkan meningkatkan konduktivitas listrik dan kestabilan siklus. Sebaliknya, komposisi S3 memiliki kandungan sulfur lebih tinggi yang berpotensi memberikan kapasitas spesifik lebih besar namun dapat menurunkan kestabilan elektrokimia akibat rendahnya daya hantar listrik. Komposisi S2 dipilih sebagai titik tengah untuk menentukan rasio yang memberikan keseimbangan paling optimal antara kapasitas dan kestabilan siklus baterai.

Karakterisasi elektroda yang akan dilakukan adalah SEM-EDX untuk mengetahui morfologi permukaan dan distribusi unsur penyusun katoda komposit S/MWCNT/AC, serta karakterisasi XRD untuk menganalisis struktur kristal dan fase senyawa yang terbentuk pada katoda komposit S/MWCNT/AC. Dilakukan pula uji elektrokimia berupa CV, EIS, seta GCD menggunakan metode *drop casting*

untuk menentukan komposisi katoda komposit S/MWCNT/AC yang menghasilkan performa elektrokimia terbaik.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini yaitu:

1. Menganalisis struktur kristal dan fase senyawa yang terbentuk, serta morfologi permukaan dan distribusi unsur penyusun material katoda komposit S/MWCNT/AC melalui karakterisasi *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive X-ray* (SEM–EDX).
2. Menganalisis pengaruh rasio massa sulfur dan MWCNT terhadap performa elektrokimia katoda komposit S/MWCNT/AC melalui uji CV, EIS, dan GCD.

1.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini berfokus pada optimalisasi komposisi material katoda sulfur komposit, melalui kajian mengenai pengaruh variasi rasio massa antara sulfur dan *multi-walled carbon nanotube* (MWCNT) terhadap kinerja katoda baterai. Hasil dari penelitian ini, diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengembangan material katoda komposit untuk aplikasi baterai berbasis sulfur generasi baru berkapasitas tinggi yang ramah lingkungan dengan biaya terjangkau. Berpotensi juga untuk diaplikasikan pada perangkat elektronik portabel, kendaraan listrik, serta sistem penyimpanan energi skala besar.