



## Tinjauan Perkembangan Graphene Aerogel sebagai Material Anoda pada Baterai Lithium-Ion

Neneng Andriani Joko, Sahidin\*, Ahmad Zaeni, Ruslan

Program Studi Magister Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Halu Oleo, Jl. HEA Mokodompit, Kendari, Indonesia

\*Corresponding Author e-mail: [sahidin02@uho.ac.id](mailto:sahidin02@uho.ac.id)

### Sejarah Artikel

Diterima: 03-01-2026

Direvisi: 20-02-2026

Dipublikasi: 28-02-2026

**Kata Kunci:** Graphene Aerogel; Lithium-Ion Battery; Anode Material; Electrochemical Performance; Sustainability Synthesis.

### Abstrak

Peningkatan kebutuhan penyimpanan energi seiring perkembangan perangkat elektronik portabel dan kendaraan listrik mendorong pengembangan material anoda baterai lithium-ion (LIB) dengan kinerja elektrokimia yang lebih tinggi dan berkelanjutan. Grafit komersial yang saat ini digunakan sebagai anoda masih memiliki keterbatasan kapasitas teoritis dan kinetika difusi ion litium. Graphene aerogel (GA), dengan struktur tiga dimensi berpori, luas permukaan tinggi, dan jaringan konduktif yang saling terhubung, telah menarik perhatian sebagai material anoda alternatif untuk meningkatkan kapasitas spesifik, kemampuan laju, dan stabilitas siklus LIB. Artikel review ini disusun melalui studi literatur terhadap artikel penelitian dan artikel ulasan yang dipublikasikan pada rentang tahun 2016–2023, yang diperoleh dari basis data ilmiah bereputasi. Literatur dianalisis secara komparatif untuk mengkaji keterkaitan antara metode sintesis, karakteristik struktur, pembentukan komposit, dan kinerja elektrokimia graphene aerogel sebagai material anoda LIB. Hasil telaah menunjukkan bahwa struktur aerogel tiga dimensi yang kaya cacat pori hierarkis mampu meningkatkan kapasitas spesifik hingga lebih dari 1400 mAh g<sup>-1</sup>, memperbaiki transport ion Li<sup>+</sup> dan elektron, serta menjaga stabilitas siklus pada berbagai densitas arus. Pembentukan komposit dengan oksida logam atau logam transisi juga terbukti meningkatkan konduktivitas listrik dan kapasitas penyimpanan litium. Namun demikian, sebagian besar penelitian masih mengandalkan graphene atau graphene oxide sintesis sebagai prekursor, sehingga aspek keberlanjutan material belum sepenuhnya terintegrasi. Studi terkini mengenai daur ulang grafit anoda LIB menunjukkan potensi besar untuk dikonversi menjadi graphene aerogel bernilai tambah tinggi, meskipun aplikasinya sebagai material anoda baterai masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ke depan perlu difokuskan pada integrasi pendekatan daur ulang grafit anoda LIB dengan sintesis graphene aerogel guna menghasilkan material anoda berkinerja tinggi sekaligus berkelanjutan.

## Overview of the Development of Graphene Aerogel as an Anode Material in Lithium-Ion Batteries

### Article History

Received: 03-01-2026

Revised: 20-02-2026

Published: 28-02-2026

**Keywords:** Graphene aerogel; Baterai lithium-ion; Material anoda; Kinerja elektrokimia; Sintesis Keberlanjutan.

### Abstract

The increasing need for energy storage along with the development of portable electronic devices and electric vehicles is driving the development of lithium-ion battery (LIB) anode materials with higher and sustainable electrochemical performance. Commercial graphite currently used as an anode still has limitations in the theoretical capacity and kinetics of lithium ion diffusion. Graphene aerogel (GA), with its porous three-dimensional structure, high surface area, and interconnected conductive network, it has attracted attention as an alternative anode material to improve the specific capacity, velocity and stability of LIB cycles. This review article was compiled through a literature study of research articles and review articles published in the 2016–2023 range, obtained from reputable scientific databases. The literature was analyzed comparatively to examine the relationship between synthesis

methods, structural characteristics, composite formation, and electrochemical performance of graphene aerogel as a LIB anode material. The results showed that the three-dimensional aerogel structure rich in hierarchical pore defects was able to increase the specific capacity to more than  $1400 \text{ mAh g}^{-1}$ , improve the transport of  $\text{Li}^+$  ions and electrons, and maintain cycle stability at various current densities. The formation of composites with metal oxides or transition metals has also been shown to improve the electrical conductivity and storage capacity of lithium. However, most studies still rely on synthetic graphene or graphene oxide as a precursor, so the sustainability aspect of the material has not been fully integrated. Recent studies on LIB anode graphite recycling show great potential for conversion into high-value-added graphene aerogels, although their application as a battery anode material is still limited. Therefore, future research needs to focus on integrating the LIB anode graphite recycling approach with graphene aerogel synthesis to produce a high-performance and sustainable anode material.

**How to Cite:** Joko, N. A., Sahidin, Zaeni, A., & Ruslan. (2025). Overview of the Development of Graphene Aerogel as an Anode Material in Lithium-Ion Batteries. *Hydrogen: Jurnal Kependidikan Kimia*, 14(1), 228-236. <https://doi.org/10.33394/hjkk.v14i1.19150>



<https://doi.org/10.33394/hjkk.v14i1.19150>

This is an open-access article under the [CC-BY-SA License](#).



## PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi modern dan transisi menuju energi bersih telah meningkatkan kebutuhan akan sistem penyimpanan energi listrik yang andal, efisien, dan berkelanjutan (Ngoy et al., 2025). Menurut Tan dan Paul, (2024) berbagai aplikasi seperti perangkat elektronik portabel, kendaraan listrik, serta sistem penyimpanan energi terbarukan berbasis surya dan angin sangat bergantung pada teknologi baterai dengan densitas energi tinggi dan stabilitas siklus yang baik (Khan et al., 2026). Menurut Garttan et al. (2025) dalam konteks ini, baterai ion litium (Lithium-Ion Battery, LIB) menjadi teknologi penyimpanan energi yang paling dominan karena keunggulannya dalam densitas energi, respons cepat, dan umur pakai yang panjang.

Seiring meningkatnya penggunaan LIB secara global, terutama pada sektor kendaraan listrik, timbul tantangan baru terkait ketersediaan material dan dampak lingkungan (Liu et al., 2023). Grafit sebagai material anoda utama LIB masih mendominasi pasar, dengan kontribusi lebih dari 90% dibandingkan material anoda alternatif. Kandungan grafit yang tinggi dalam baterai komersial, dikombinasikan dengan proyeksi lonjakan permintaan LIB, berpotensi menghasilkan limbah grafit dalam jumlah besar setelah masa pakai baterai berakhir (Harper et al., 2019).

Limbah anoda grafit ini tidak hanya mengandung karbon berkemurnian tinggi, tetapi

juga residu logam dan elektrolit yang dapat menimbulkan masalah lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik (Jiang et al., 2023). Di sisi lain, proses produksi grafit, baik grafit alam maupun grafit sintesis, membutuhkan konsumsi energi yang tinggi serta menghasilkan emisi karbon yang signifikan, sehingga pemanfaatan kembali grafit bekas menjadi isu penting dalam mendukung konsep circular economy (Biswal et al., 2024). Pendekatan ini tidak hanya mengurangi ketergantungan terhadap sumber daya primer, tetapi juga mampu menekan jejak karbon serta konsumsi energi secara keseluruhan (Muguruza et al., 2025).

Berbagai penelitian daur ulang LIB selama ini lebih banyak berfokus pada pemulihan grafit agar kembali menyerupai sifat grafit komersial melalui proses regenerasi struktur permukaan dan rekonstruksi kristalinitas. Sebagai contoh, regenerasi grafit bekas menggunakan perlakuan asam, basa, maupun gas dilaporkan mampu mengembalikan kapasitas delithiasi hingga mendekati grafit komersial ( $\approx 338 \text{ mAh g}^{-1}$ ) dengan efisiensi coulombic yang tinggi ( $\sim 99,9\%$ ), serta dampak lingkungan yang relatif rendah berdasarkan analisis siklus hidup (Natarajan et al., 2025). Namun demikian, pendekatan regeneratif tersebut umumnya hanya bertujuan mengembalikan fungsi grafit sebagai anoda konvensional, tanpa mengeksplorasi potensi peningkatan nilai material melalui transformasi struktur karbon ke arsitektur berdimensi tiga (3D)

(Ren et al., 2015). Padahal, pengembangan material karbon 3D seperti graphene aerogel (GA) berpotensi menghasilkan jalur konduktif yang lebih terhubung, porositas yang lebih tinggi, serta kinerja elektrokimia yang melampaui grafit konvensional (Qiao et al., 2023).

Graphene aerogel merupakan material karbon berstruktur tiga dimensi yang memiliki porositas tinggi, densitas rendah, serta jaringan konduktif yang saling terhubung (Elsehsah et al., 2025). Struktur berpori hierarkis pada GA memungkinkan difusi ion litium dan transportasi elektron berlangsung lebih efisien, sekaligus memberikan stabilitas mekanik yang baik selama proses siklus pengisian dan pengosongan (Pottathara et al., 2020).

Sejumlah penelitian melaporkan bahwa GA, baik dalam bentuk murni maupun komposit, mampu menunjukkan kapasitas spesifik yang tinggi, kemampuan laju (rate capability) yang baik, serta stabilitas siklus yang menjanjikan ketika digunakan sebagai material anoda LIB (Guo et al., 2020). Selain itu, keberadaan gugus fungsional oksigen pada reduced graphene oxide (rGO) dapat meningkatkan interaksi antara material aktif dan matriks karbon, sehingga memperkuat kinerja elektrokimia (Cavallo et al., 2019).

Meskipun demikian, kajian yang secara komprehensif meninjau perkembangan graphene aerogel sebagai material anoda LIB, termasuk hubungan antara struktur, metode sintesis, dan kinerja elektrokimia, masih relatif terbatas. Oleh karena itu, artikel review ini bertujuan untuk menyajikan tinjauan sistematis mengenai perkembangan graphene aerogel sebagai material anoda pada baterai ion litium, dengan menyoroti tren penelitian terkini, keunggulan utama material, serta tantangan dan peluang pengembangannya di masa depan dalam mendukung sistem penyimpanan energi yang lebih berkelanjutan.

Berdasarkan pertimbangan tersebut, ketertarikan penulis dalam memilih tema ulasan ini didorong oleh meningkatnya kebutuhan akan material anoda LIB yang tidak hanya unggul secara elektrokimia, tetapi juga mempertimbangkan aspek keberlanjutan dan efisiensi sumber daya. Meskipun penelitian mengenai graphene aerogel sebagai material anoda LIB telah berkembang pesat, sebagian besar studi masih tersebar dan berfokus pada

pendekatan eksperimental individual, sehingga belum memberikan gambaran komprehensif mengenai keterkaitan antara metode sintesis, rekayasa struktur, dan kinerja elektrokimia material.

Selain itu, kajian yang mengaitkan potensi pemanfaatan grafit anoda LIB hasil daur ulang sebagai prekursor graphene aerogel masih sangat terbatas. Oleh karena itu, penulis memandang perlu adanya artikel ulasan yang secara sistematis merangkum perkembangan terkini graphene aerogel sebagai material anoda LIB serta mengidentifikasi peluang integrasi pendekatan daur ulang grafit anoda LIB guna mendukung pengembangan material anoda yang berkinerja tinggi dan berkelanjutan.

## METODE

Artikel ini merupakan penelitian deskriptif kualitatif dengan pendekatan studi literatur (literature review) (Barry et al., 2022) yang bertujuan untuk meninjau perkembangan graphene aerogel sebagai material anoda pada baterai lithium-ion (Lithium-Ion Battery, LIB). Kajian difokuskan pada keterkaitan antara metode sintesis, karakteristik struktur, dan kinerja elektrokimia graphene aerogel.

Literatur yang digunakan berasal dari jurnal ilmiah internasional bereputasi yang terindeks dalam basis data Scopus dan Web of Science, serta diakses melalui platform daring seperti ScienceDirect (Elsevier), SpringerLink, dan Google Scholar. Kriteria inklusi literatur meliputi: (1) artikel penelitian dan artikel review yang membahas graphene aerogel atau material berbasis graphene sebagai anoda LIB; (2) publikasi dalam rentang tahun 2016–2023; dan (3) artikel yang melaporkan parameter kinerja elektrokimia, seperti kapasitas spesifik, kemampuan laju (rate capability), dan stabilitas siklus. Artikel yang tidak relevan dengan topik anoda LIB atau tidak menyajikan data kinerja elektrokimia yang memadai dikecualikan dari kajian.

Proses pengumpulan data dilakukan melalui studi literatur terhadap artikel penelitian dan artikel ulasan yang dipublikasikan dalam 10 tahun terakhir, yang membahas graphene aerogel dan material berbasis graphene sebagai anoda baterai ion litium. Literatur diseleksi dan dikelompokkan berdasarkan jenis material (graphene aerogel murni dan graphene aerogel

komposit), metode sintesis, serta aplikasi elektrokimia yang dilaporkan, mengacu pada pendekatan literature review kualitatif dan analisis komparatif (Snyder, 2019; Cui, 2025).

Analisis data dilakukan secara komparatif dan melalui sintesis naratif untuk mengidentifikasi tren perkembangan, keunggulan utama, serta celah penelitian (*research gap*) yang masih terbuka, sebagaimana umum diterapkan dalam studi literature review (Creswell, 2014; Snyder, 2019). Hasil analisis ini digunakan untuk merumuskan arah pengembangan graphene aerogel sebagai material anoda LIB, termasuk potensi integrasi pendekatan keberlanjutan melalui pemanfaatan grafit anoda LIB hasil daur ulang.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

**Tabel 1. Perkembangan Graphene Aerogel sebagai Material Anoda Lithium-Ion Battery (LIB).**

No	Peneliti & Tahun	Bahan / Sumber Material	Metode Sintesis / Proses	Hasil Utama	Kelebihan	Keterbatasan
1	Shan <i>et al.</i> , 2016	Graphene oxide (GO)	Hidrotermal (variasi waktu reaksi)	Kapasitas reversibel 1430 mAh g <sup>-1</sup> (100 mA g <sup>-1</sup> ); 587 mAh g <sup>-1</sup> (800 mA g <sup>-1</sup> ); stabil 960 mAh g <sup>-1</sup> setelah 100 siklus	Struktur 3D berpori dengan densitas cacat tinggi; konduktivitas listrik baik; kinerja laju dan stabilitas siklus sangat baik	Fokus pada optimasi waktu hidrotermal; penggunaan sumber grafit alternatif berbasis daur ulang belum menjadi fokus penelitian
2	Ma <i>et al.</i> , 2017	MnO/porous graphene aerogel (MnO/PGA) sintesis	Site-localized nanoparticle-induced etching untuk membentuk struktur berpori hierarkis	Kapasitas reversibel 979,6 mAh g <sup>-1</sup> (0,5 A g <sup>-1</sup> , 300 siklus); 493,6 mAh g <sup>-1</sup> (2 A g <sup>-1</sup> )	Struktur pori hierarkis meningkatkan difusi Li <sup>+</sup> ; konduktivitas tinggi; stabilitas siklus dan rate capability sangat baik	Material sintetis; belum memanfaatkan grafit/graphene berbasis daur ulang
3	Angelopoulou <i>et al.</i> , 2019	Graphene aerogel (GA) disintesis dari graphene oxide (GO)	Reduksi GO secara hidrotermal, freeze-drying, fungsionalisasi diamine (TETA & OPD)	Kapasitas tinggi pada arus 450 mA g <sup>-1</sup> ; stabilitas siklus kurang stabil dibanding cp_TETA_GA	GA menunjukkan kapasitas tinggi, stabilitas siklus baik, dan rate capability lebih baik dari grafit	Menggunakan GO sintesis, bukan grafit anoda LIB hasil daur ulang
4	Cao <i>et al.</i> , 2016	Graphene/Co aerogel berpori 3D, kompresibel	Dekomposisi garam Co & pembentukan aerogel graphene	900 mAh g <sup>-1</sup> dan 358 mAh cm <sup>-3</sup> (0.05 A g <sup>-1</sup> ); 163 mAh cm <sup>-3</sup> setelah 300 siklus (1 A g <sup>-1</sup> ); retensi 90.5 %	Kapasitas gravimetrik dan volumetrik tinggi; struktur 3D kompresibel; konduktivitas meningkat oleh Co	Tidak menggunakan grafit anoda LIB hasil daur ulang

No	Peneliti & Tahun	Bahan / Sumber Material	Metode Sintesis / Proses	Hasil Utama	Kelebihan	Keterbatasan
5	Wang <i>et al.</i> , 2020	Graphene, SWCNT, dan nanopartikel SnO <sub>2</sub>	Kalsinasi 600°C, oksidasi, reduksi menjadi GA	Kapasitas spesifik 758 mAh g <sup>-1</sup> (100 mA g <sup>-1</sup> ) dan 537 mAh g <sup>-1</sup> (1 A g <sup>-1</sup> ) dengan stabilitas hingga 300 siklus	Struktur aerogel 3D meningkatkan konduktivitas, transport Li <sup>+</sup> , dan menekan degradasi volume SnO <sub>2</sub>	Tidak menggunakan grafit hasil daur ulang; material berbasis <i>graphene</i> sintesis
6	Chen <i>et al.</i> , 2016	Graphene aerogel dengan nanopartikel SnO <sub>2</sub>	Graphene aerogel dengan nanopartikel SnO <sub>2</sub>	Kapasitas reversibel tinggi, stabilitas siklus dan rate capability sangat baik sebagai anoda LIB	Proses ramah lingkungan, suhu rendah, struktur aerogel 3D homogen, interaksi Sn-C-O meningkatkan kinerja	Tidak menggunakan grafit hasil daur ulang; berbasis <i>graphene</i> sintesis
7	Kopuklu <i>et al.</i> , 2021	Partially reduced graphene oxide (PrGO) dengan Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Redox deposition Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> pada PrGO aerogel	Kapasitas reversibel hingga 2136 mAh g <sup>-1</sup> (100 siklus, 0.5 A g <sup>-1</sup> ); stabil hingga 600 siklus	Kapasitas sangat tinggi; transport Li <sup>+</sup> dan elektron sangat baik; struktur aerogel 3D efektif	Tidak menggunakan grafit hasil daur ulang; berbasis GO sintesis dan komposit logam oksida
8	Zhong <i>et al.</i> , 2019	Reduced graphene aerogel dengan MoS <sub>2</sub>	Hidrotermal, freeze-drying, annealing	Kapasitas spesifik 1041 mAh g <sup>-1</sup> (100 mA g <sup>-1</sup> ); 667 mAh g <sup>-1</sup> setelah 100 siklus	Struktur aerogel 3D berpori mikro; binder-free; transport ion dan elektron efisien	Menggunakan rGO sintesis; tidak berbasis grafit daur ulang
9	Li <i>et al.</i> , 2021	Graphene aerogel (GA) sintesis	Hidrotermal dengan variasi waktu reaksi	Kapasitas spesifik 664,8 mAh g <sup>-1</sup> (100 mA g <sup>-1</sup> , 100 siklus); 113,8 mAh g <sup>-1</sup> (2 A g <sup>-1</sup> )	Struktur pori 3D kaya cacat; stabilitas siklus dan rate capability baik	Tidak menggunakan grafit daur ulang; fokus optimasi waktu hidrotermal saja

**Tabel 2. Studi Daun Ulang Grafit Anoda Lithium-Ion Battery menjadi Graphene Aerogel**

No	Peneliti & Tahun	Sumber Material	Metode Sintesis / Regenerasi	Aplikasi	Hasil Utama	Keterbatasan
1	Zheng <i>et al.</i> , 2023	Grafit anoda LIB bekas	Regenerasi <i>graphene aerogel</i> dengan gugus fungsi aktif (fisik-kimia sinergis)	Adsorpsi Pb <sup>2+</sup> dari air limbah	Kapasitas adsorpsi maksimum 152,70 mg g <sup>-1</sup> ; mengikuti isoterm Langmuir; mekanisme adsorpsi kimia dominan	Belum dievaluasi sebagai material anoda baterai <i>lithium-ion</i>
2	Qiao <i>et al.</i> , 2022	Review daur ulang grafit anoda LIB	Grafit anoda dari LIB bekas	<i>Mechanical, thermal, chemical recovery</i>	Merangkum mekanisme degradasi grafit, metode pemulihan, dan potensi aplikasi ulang	Belum membahas konversi grafit daur ulang menjadi <i>graphene aerogel</i> anoda

### Perkembangan Graphene Aerogel sebagai Material Anoda Baterai Lithium-Ion

Berdasarkan kompilasi literatur yang dirangkum dalam Tabel 1, graphene aerogel (GA) telah berkembang pesat sebagai material anoda baterai lithium-ion (LIB) karena keunggulan struktur tiga dimensi (3D) berpori, luas permukaan spesifik yang tinggi, serta konduktivitas listrik yang baik. Struktur aerogel memungkinkan terbentuknya jaringan kontinu untuk transport ion  $\text{Li}^+$  dan elektron, serta mampu meredam tegangan mekanik akibat perubahan volume selama proses litiasi–delitiasi.

Penelitian awal oleh Shan et al. (2016) menunjukkan bahwa GA murni yang disintesis melalui metode hidrotermal mampu memberikan kapasitas reversibel yang sangat tinggi, mencapai  $1430 \text{ mAh g}^{-1}$  pada  $100 \text{ mA g}^{-1}$ , serta mempertahankan kapasitas  $960 \text{ mAh g}^{-1}$  setelah 100 siklus. Kinerja ini dikaitkan dengan struktur pori 3D yang kaya cacat (*defect-rich structure*), yang berperan sebagai situs aktif penyimpanan litium serta meningkatkan konduktivitas intrinsik material.

Upaya peningkatan kinerja GA selanjutnya banyak dilakukan melalui pembentukan komposit GA dengan material aktif lain. Ma et al. (2017) mengembangkan komposit MnO/porous graphene aerogel (MnO/PGA) dengan struktur pori hierarkis menggunakan metode site-localized nanoparticle-induced etching. Struktur ini secara signifikan meningkatkan difusi ion  $\text{Li}^+$  dan transfer elektron, menghasilkan kapasitas reversibel  $979,6 \text{ mAh g}^{-1}$  setelah 300 siklus pada  $0,5 \text{ A g}^{-1}$ , serta mempertahankan kinerja yang baik pada arus tinggi, yaitu  $493,6 \text{ mAh g}^{-1}$  pada  $2 \text{ A g}^{-1}$ . Hal ini menegaskan bahwa integrasi oksida logam dengan GA efektif dalam meningkatkan kapasitas tanpa mengorbankan stabilitas siklus.

Pendekatan fungsionalisasi kimia terhadap GA dilaporkan oleh Angelopoulou et al. (2019), yang memodifikasi graphene aerogel menggunakan gugus diamina, yaitu TETA dan OPD. Hasil penelitian menunjukkan bahwa cp\_OPD\_GA memiliki kapasitas spesifik lebih tinggi pada arus  $450 \text{ mA g}^{-1}$  dibandingkan cp\_TETA\_GA, meskipun mengalami fluktuasi kapasitas selama siklus pengujian. Temuan ini menunjukkan bahwa jenis gugus fungsional berpengaruh terhadap mekanisme penyimpanan litium dan stabilitas elektrokimia, sehingga optimasi fungsionalisasi masih menjadi tantangan.

Selain kapasitas gravimetrik, Cao et al. (2016) menekankan pentingnya kapasitas volumetrik dalam aplikasi praktis. Graphene/Co aerogel berpori 3D yang bersifat kompresibel mampu menghasilkan kapasitas gravimetrik  $900 \text{ mAh g}^{-1}$  dan kapasitas volumetrik  $358 \text{ mAh cm}^{-3}$  pada  $0,05 \text{ A g}^{-1}$ , serta mempertahankan 90,5 % kapasitas awal setelah 300 siklus pada  $1 \text{ A g}^{-1}$ . Kehadiran nanopartikel Co tidak hanya meningkatkan konduktivitas listrik, tetapi juga memungkinkan peningkatan densitas elektroda melalui proses kompresi tanpa merusak struktur pori.

Penggunaan material oksida logam lain juga menunjukkan hasil yang menjanjikan. Wu et al. (2020) mengembangkan komposit graphene aerogel dengan  $\text{SnO}_2$  dan single-walled carbon nanotubes (SWCNT), yang menunjukkan kapasitas spesifik  $758 \text{ mAh g}^{-1}$  pada  $100 \text{ mA g}^{-1}$  dan  $537 \text{ mAh g}^{-1}$  pada  $1 \text{ A g}^{-1}$  dengan stabilitas hingga 300 siklus. Struktur aerogel 3D berperan penting dalam menekan degradasi volume  $\text{SnO}_2$  yang biasanya menjadi kendala utama pada anoda berbasis oksida logam.

Hasil serupa juga dilaporkan oleh Chen et al. (2016), di mana graphene aerogel dengan nanopartikel  $\text{SnO}_2$  yang disintesis melalui proses ramah lingkungan dan suhu rendah menunjukkan kapasitas reversibel yang tinggi serta rate capability yang baik. Interaksi Sn–C–O dalam struktur aerogel berkontribusi terhadap stabilitas struktural dan peningkatan performa elektrokimia.

Kapasitas yang sangat tinggi dicapai oleh Kopuklu et al. (2021) melalui komposit  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /partially reduced graphene oxide (PrGO) aerogel, dengan kapasitas reversibel hingga  $2136 \text{ mAh g}^{-1}$  setelah 100 siklus pada  $0,5 \text{ A g}^{-1}$ , serta stabilitas hingga 600 siklus. Struktur aerogel 3D yang dikombinasikan dengan oksida logam berkapasitas tinggi memungkinkan penyimpanan litium yang jauh melebihi grafit konvensional, meskipun tantangan terkait kestabilan jangka panjang dan kompleksitas material masih perlu diperhatikan.

Selain oksida logam, material sulfida juga dikombinasikan dengan GA. Zhong et al. (2019) melaporkan penggunaan  $\text{MoS}_2$ /reduced graphene aerogel, yang menghasilkan kapasitas spesifik  $1041 \text{ mAh g}^{-1}$  pada  $100 \text{ mA g}^{-1}$  dan mempertahankan  $667 \text{ mAh g}^{-1}$  setelah 100 siklus. Struktur aerogel mikroberpori dan sifat elektroda

tanpa pengikat (binder-free) mendukung transport ion dan elektron yang efisien.

Penelitian terbaru oleh Li et al. (2021) kembali menekankan pengaruh parameter sintesis, khususnya waktu reaksi hidrotermal, terhadap struktur pori dan kinerja elektrokimia GA. GA yang dioptimasi menunjukkan kapasitas spesifik 664,8 mAh g<sup>-1</sup> setelah 100 siklus pada 100 mA g<sup>-1</sup>, meskipun kapasitas menurun signifikan pada arus tinggi, yaitu 113,8 mAh g<sup>-1</sup> pada 2 A g<sup>-1</sup>.

### Analisis Umum dan Keterbatasan

Secara keseluruhan, seluruh studi yang dirangkum pada Tabel 1 menunjukkan bahwa graphene aerogel dan komposisinya mampu melampaui performa grafit konvensional, terutama dalam hal kapasitas spesifik, stabilitas siklus, dan rate capability. Namun demikian, hampir seluruh penelitian masih menggunakan graphene oxide atau graphene sintetis, serta melibatkan material tambahan seperti oksida logam dan logam transisi.

Sebagaimana ditunjukkan pada kolom keterbatasan, pemanfaatan grafit anoda LIB hasil daur ulang belum menjadi fokus utama dalam pengembangan graphene aerogel sebagai material anoda. Hal ini menunjukkan adanya kesenjangan antara peningkatan performa elektrokimia dan aspek keberlanjutan material.

### Keterkaitan dengan Studi Daur Ulang Grafit Anoda LIB

Studi pada Tabel 2 menunjukkan bahwa grafit anoda LIB bekas memiliki potensi besar untuk diregenerasi menjadi material bernilai tinggi. Zheng et al. (2023) membuktikan bahwa grafit anoda bekas dapat dikonversi menjadi graphene aerogel fungsional dengan kinerja adsorpsi yang sangat baik. Namun, aplikasi material tersebut sebagai anoda LIB belum dievaluasi. Sementara itu, Qiao et al. (2022) menegaskan bahwa secara teoritis grafit anoda LIB bekas masih sangat layak untuk dimanfaatkan kembali, termasuk sebagai prekursor graphene aerogel.

### Implikasi dan Arah Penelitian Selanjutnya

Berdasarkan analisis menyeluruh terhadap Tabel 1 dan Tabel 2, dapat disimpulkan bahwa integrasi antara performa tinggi graphene aerogel dan sumber material berbasis grafit daur ulang masih sangat terbatas. Oleh karena itu, pengembangan graphene aerogel berbasis grafit anoda LIB bekas sebagai material anoda baterai lithium-ion merupakan arah penelitian yang

strategis, baik dari sisi kinerja elektrokimia maupun keberlanjutan lingkungan

### SIMPULAN

Graphene aerogel telah menunjukkan potensi yang sangat besar sebagai material anoda baterai ion litium (Lithium-Ion Battery, LIB) berkat struktur tiga dimensi (3D) berpori, konduktivitas listrik yang baik, serta stabilitas struktural yang tinggi selama proses pengisian dan pengosongan. Berbagai strategi sintesis, termasuk optimasi kondisi hidrotermal, rekayasa densitas cacat, serta pembentukan komposit dengan oksida logam atau logam transisi, terbukti mampu meningkatkan kapasitas spesifik, kemampuan laju (rate capability), dan stabilitas siklus secara signifikan dibandingkan grafit komersial.

Tinjauan ini memberikan dampak ilmiah dengan menyajikan pemetaan komprehensif mengenai keterkaitan antara metode sintesis, karakteristik struktur, dan kinerja elektrokimia graphene aerogel sebagai material anoda LIB. Hasil kajian ini dapat menjadi acuan bagi peneliti dalam merancang material anoda berbasis graphene aerogel yang lebih terarah dan efisien, serta membantu mengidentifikasi celah penelitian yang masih terbuka, khususnya pada aspek keberlanjutan material.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian yang ditinjau masih bergantung pada graphene atau graphene oxide sintetis sebagai prekursor utama, sehingga pemanfaatan sumber karbon alternatif belum menjadi fokus utama. Studi terkini mengenai daur ulang grafit anoda LIB bekas menunjukkan peluang yang menjanjikan untuk dikonversi menjadi graphene aerogel bernilai tambah tinggi, namun aplikasinya sebagai material anoda baterai masih relatif terbatas dan belum dieksplorasi secara mendalam.

### REKOMENDASI

Berdasarkan temuan tersebut, penelitian selanjutnya direkomendasikan untuk memfokuskan pada pengembangan metode sintesis graphene aerogel berbasis grafit anoda LIB hasil daur ulang, dengan mengoptimalkan rekayasa struktur pori dan integrasi material komposit guna meningkatkan kinerja elektrokimia dan stabilitas siklus. Selain itu, diperlukan kajian lanjutan mengenai skalabilitas proses, efisiensi energi, serta dampak lingkungan dari pendekatan ini agar implementasinya dapat

mendukung pengembangan sistem penyimpanan energi yang berkelanjutan dan berorientasi pada konsep circular economy.

## BIBLIOGRAFI

- Angelopoulou, P., Vrettos, K., Georgakilas, V., & Avgouropoulos, G. (2019). Graphene Aerogels as Anode Electrode for Lithium-Ion Batteries. ANM 2019 – Advanced Nano Materials Conference. University of Aveiro, Portugal.
- Barry, E. S., Merkebu, J., & Varpio, L. (2022). State-of-the-art Literature Review Methodology: A six-Step Approach for Knowledge Synthesis. *Perspectives on Medical Education*
- Biswal, B. K., Zhang, B., Tran, P. T. M., Zhang, J., & Balasubramanian, R. (2024). Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries for a Sustainable Future: Recent Advancements. *Chemical Society Reviews*, 53, 5552-5592
- Cao, H., Zhou, X., Deng, W., & Liu, Z. (2016). A Compressible and Hierarchical Porous Graphene/Co Composite Aerogel for Lithium-Ion Batteries with High Gravimetric/Volumetric Capacity. *Journal of Materials Chemistry A*, 4(16).
- Cavallo, C., Agostini, M., Genders, J. P., Abdelhamid, M. E., & Matic, A. (2019). A Free-Standing Reduced Graphene Oxide Aerogel as Supporting Electrode in A Fluorine-Free Li<sub>2</sub>S<sub>8</sub> Catholyte Li-S Battery. *Journal of Power Sources*, 416(1).
- Chen, Z., Li, H., Tian, R., Duan, H., Guo, Y., Chen, Y., Zhou, J., Zhang, C., Dugnani, R., & Liu, H. (2016). Three-Dimensional Graphene Aerogels as Binder-Less, Freestanding, Elastic and High-Performance Electrodes for Lithium-Ion Batteries. *Scientific Reports*, 6, 27365
- Creswell, J. W. (2014). *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches* (4th ed.). Thousand Oaks, CA: Sage Publications.
- Cui, J. (2025). Comparative Analysis of Literature Review Methodologies: Systematic Reviews, Meta-Analysis, Bibliometric Analysis, and Network Meta-Analysis. *Journal of Information Science*.
- Elsah, K. A. A. A., Noorden, Z. A., Saman, N. M., Ahmad, N. A., & Hasan, M. F. (2025). Graphene Aerogel for Supercapacitors: Influence of Hydrothermal Reduction Parameters on Electrochemical Performance. *Scientific Reports*, 15, 41430.
- Garttan, G., Alahakoon, S., Emami, K., & Jayasinghe, S. G. (2025). Battery Energy Storage Systems: Energy Market Review, Challenges, and Opportunities in Frequency Control Ancillary Services. *Energies*, 18(15).
- Guo, C., Xie, Y., Pan, K., & Li, L. (2020). MOF-Derived Hollow SiO<sub>x</sub> Nanoparticles Wrapped in 3D Porous Nitrogen-Doped Graphene Aerogel and Their Superior Performance as the Anode for Lithium-Ion Batteries. *Nanoscale*, 12(24).
- Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., Walton, A., Christensen, P., Heidrich, O., Lambert, S., Abbott, A., Ryder, K., Gaines, L., & Anderson, P. (2019). Recycling Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles. *Nature*, 575, 75–86.
- Jiang, S., Nie, C., Li, X., Shi, S., Gao, Q., Wang, Y., Zhu, X., & Wang, Z. (2023). Review on Comprehensive Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries: A Full Component Utilization Process For Green and Sustainable Production. *Separation and Purification Technology*, 315, 123684.
- Khan, A. H., Bahar, A. N., Islam, A., & Wahid, K. (2026). A review of Battery Storage Technology in Renewable Energy Utilization. *Arabian Journal for Science and Engineering*.
- Kopuklu, B. B., Tasdemir, A., Gursel, S. A., & Yurum, A. (2021). High Stability Graphene Oxide Aerogel Supported Ultrafine Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Particles with Superior Performance as a Li-Ion Battery Anode. *Carbon*, 174, 158–172.
- Li, P., Yi, G., Zhang, Z., Fan, H., Wu, Y., Kang, W., Zhang, X., Xu, B., Zhang, Y., & Sun, Q. (2021). Preparation of 3D-Porous Graphene Aerogel for High-Performance Anode of Lithium-Ion Batteries. *Biomedical Journal of Scientific & Technical Research*, 38.
- Liu, Y., Shi, H., & Wu, Z.-S. (2023). Recent status, key strategies and challenging perspectives of fast-charging graphite anodes for lithium-ion batteries. *Energy & Environmental Science*, 11.
- Ma, Z., Cao, H., Zhou, X., Deng, W., & Liu, Z. (2017). Hierarchical Porous MnO/Graphene Composite Aerogel as High-Performance Anode Material for Lithium-Ion Batteries. *RSC Advances*, 7, 15857–15865.
- Muguruza-Sánchez, A., Sananes-Israel, S., Moliner, E., Contreras, E., Landa-Medrano, I., Palomares, V., & de Meatza, I. (2025). Direct Recycling of Graphite from Spent Batteries and Production Scraps for the Development of a Circular and Sustainable Economy. *Journal of Power Sources Advances*, 36, 100191.
- Natarajan, S., Mae, T., Teah, H. Y., Sakurai, H., & Noda, S. (2025). Environmentally Friendly Regeneration of Graphite from spent Lithium-Ion Batteries for Sustainable Anode Material Reuse. *Journal of Materials Chemistry A*, 13, 4984–4993.
- Ngoy, K. R., Lukong, V. T., Yoro, K. O., Makambo, J. B., Chukwuati, N. C., Ibegbulam, C., Eterigho-Ikelegbe, O., Ukoba, K., & Jen, T.-C. (2025). Lithium-Ion Batteries and the Future of Sustainable Energy: A Comprehensive Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 223, 115971.
- Pottathara, Y. B., Tiyyagura, H. R., Ahmad, Z., & Sadasivuni, K. K. (2020). Graphene Based Aerogels:

- Fundamentals and Applications as Supercapacitors. *Journal of Energy Storage*, 30, 101549.
- Qiao, Y., Zhao, H., Shen, Y., Li, L., Rao, Z., Shao, G., & Lei, Y. (2023). Recycling of Graphite Anode from Spent Lithium-Ion Batteries: Advances and Perspectives. *EcoMat*, 5(1).
- Ren, L., Hui, K. N., Hui, K. S., Liu, Y., Qi, X., Zhong, J., Du, Y., & Yang, J. (2015). 3D Hierarchical Porous Graphene Aerogel with Tunable Meso-Pores on Graphene Nanosheets for High-Performance Energy Storage. *Scientific Reports*, 5, 14229.
- Shan, H., Xiong, D., Li, X., Sun, Y., Yan, B., Li, D., Lawes, S., Cui, Y., & Sun, X. (2016). Tailored Lithium Storage Performance of Graphene Aerogel Anodes with Controlled Surface Defects for Lithium-Ion Batteries. *Applied Surface Science*, 364.
- Snyder, H. (2019). Literature Review as a Research Methodology: An Overview and Guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339.
- Tan, A. K. X., & Paul, S. (2024). Beyond Lithium: Future Battery Technologies for Sustainable Energy Storage. *Energies*, 17(22), 5768
- Wang, J., Fang, F., Yuan, T., Yang, J., Chen, L., Yao, C., Zheng, S., & Sun, D. (2017). Three-Dimensional Graphene/Single-Walled Carbon Nanotube Aerogel Anchored with SnO<sub>2</sub> Nanoparticles for High Performance Lithium Storage. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(4).
- Zheng, Y., Liu, X., Liu, S., Gao, Y., Tao, L., Yang, Q., Lei, D., & Liu, H. (2023). Constructing Physical and Chemical Synergistic Effect of Graphene Aerogels Regenerated from Spent Graphite Anode of Lithium-Ion Batteries Achieves High Efficient Adsorption of Lead In Wastewater. *Applied Surface Science*, 633, 157623.
- Zhong, Y., Shi, T., Huang, Y., Cheng, S., Chen, C., Liao, G., & Tang, Z. (2019). Three-Dimensional MoS<sub>2</sub>/Graphene Aerogel as Binder-Free Electrode for Li-Ion Battery. *Nanoscale Research Letters*, 14, 85