

Evaluasi Kinerja Elektrokimia Katoda LiFePO₄ dengan Variasi Aditif Graphene Oxide, Reduced Graphene Oxide dan Koloid Nanopartikel Perak (AgNP)

Agun Pranata^(1,a), Delovita Ginting^{(1,b)*} dan Romi Fadli Syahputra^(1,c)

⁽¹⁾ Jurusan Fisika, Universitas Muhammadiyah Riau, Pekanbaru, Indonesia, 28293
Email : ^(a)210203015@student.umri.ac.id, ^(b)delovita@umri.ac.id, ^(c)romifadli@umri.ac.id

Diterima (10 September 2025), Direvisi (05 Desember 2025)

Abstract. The low electronic conductivity of Lithium Iron Phosphate (LFP) cathodes presents a major challenge for their application in lithium-ion batteries. This research aims to enhance the electrochemical performance of LFP by comparing the effects of three different conductive additives: Graphene Oxide (GO), reduced Graphene Oxide (rGO), and a Silver Nanoparticles (AgNP) composite. GO was synthesized from graphite powder via a modified Hummers' method, followed by the fabrication of three cathode variations. Material characterization was performed using X-Ray Diffraction (XRD), UV-Diffuse Reflectance Spectroscopy (UV-DRS), and Cyclic Voltammetry (CV). XRD analysis confirmed the successful synthesis of GO, evidenced by the shift of the main diffraction peak from 26.24° in graphite to 9.80° in GO. Band gap (Eg) analysis from UV-DRS data showed that the addition of rGO and the AgNP effectively reduced the Eg value to 2.91 Ev and 2.73 Ev, respectively, from the initial value of 3.10 Ev for the LFP+GO sample. Electrochemical tests indicated that the LFP+rGO cathode exhibited the most significant current response, achieving the highest specific capacitance of 5.0 F/g at a scan rate of 5 Mv/s. These results confirm that rGO is the most effective additive among the three variations for enhancing the electrochemical properties of LiFePO₄ cathodes.

Keywords: LiFePO₄, Graphene Oxide, Reduced Graphene Oxide, Silver Nanoparticles, Specific Capacitance.

Abstrak. Konduktivitas elektronik yang rendah pada katoda Lithium Iron Phosphate (LFP) menjadi tantangan utama dalam aplikasinya di baterai lithium-ion. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kinerja elektrokimia LFP dengan membandingkan pengaruh tiga jenis aditif konduktif: Graphene Oxide (GO), Reduced Graphene Oxide (rGO), dan Silver Nanoparticles (AgNP). Sintesis GO dari serbuk grafit dilakukan melalui modifikasi metode Hummers, yang kemudian diikuti dengan fabrikasi tiga variasi katoda. Karakterisasi material dilakukan menggunakan X-Ray Diffraction (XRD), UV-Diffuse Reflectance Spectroscopy (UV-DRS), dan Cyclic Voltammetry (CV). Hasil analisis XRD menunjukkan keberhasilan sintesis GO, yang ditandai dengan pergeseran puncak difraksi utama dari 26,24° pada grafit menjadi 9,80° pada GO. Analisis celah pita energi (Eg) dari data UV-DRS menunjukkan bahwa penambahan rGO dan AgNP efektif menurunkan nilai Eg menjadi 2,91 Ev dan 2,73 Ev, dari nilai awal 3,10 Ev pada sampel LFP+GO. Uji elektrokimia menunjukkan bahwa katoda LFP+rGO menghasilkan respon arus yang paling signifikan, dan mencapai kapasitansi spesifik tertinggi sebesar 5,0 F/g pada laju pindai 5 Mv/s. Hasil ini menegaskan bahwa rGO merupakan aditif yang paling efektif di antara ketiga variasi untuk meningkatkan properti elektrokimia katoda LiFePO₄.

Kata kunci: LiFePO₄, Graphene Oxide, Reduced Graphene Oxide, Nanopartikel Perak, Kapasitansi Spesifik.

PENDAHULUAN

Selama beberapa tahun terakhir, baterai lithium-ion (LIB) menjadi teknologi penyimpanan energi andalan berkat kepadatan energi tinggi, efisiensi pengisian yang baik, serta umur panjang [1]. Permintaan global akan sumber energi berkelanjutan dan portabel terus mendorong peningkatan performa LIB [2]. Seiring peningkatan kebutuhan energi berkelanjutan, riset untuk meningkatkan kinerja LIB, khususnya pada material katoda sebagai komponen kritis, semakin intens dilakukan [3]. Baterai lithium-ion terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu anoda, katoda, elektrolit berupa garam lithium, dan separator. Anoda biasanya terbuat dari grafit, sementara katoda dapat dibuat dari berbagai material seperti *lithium cobalt oxide* (LiCoO₂), *lithium iron phosphate* (LiFePO₄) dan *lithium nickel manganese cobalt oxide* (NMC) [4].

Katoda dalam baterai ion lithium memainkan peran penting dalam menentukan kinerja dan daya tahan baterai [5]. Salah satu masalah utama yang sering dihadapi adalah keterbatasan konduktivitas ionik, yang mempengaruhi kecepatan pengisian dan pelepasan, serta menyebabkan penurunan efisiensi energi [6]. LiFePO₄ (LFP) menjadi salah satu material yang paling menjanjikan karena keunggulannya dalam hal stabilitas termal yang baik, keamanan tinggi, biaya rendah, dan ramah lingkungan. Riset oleh [7] menunjukkan bahwa lapisan LiFePO₄ mampu menghasilkan kapabilitas tinggi (139 mAh·g⁻¹ pada 20 C) dan umur siklus panjang dengan retensi kapasitas 94,8% selama 500 siklus. Namun, kelemahan fundamental dari material LFP adalah konduktivitas elektronik dan ioniknya yang rendah, yang membatasi kinerjanya.

Untuk mengatasi masalah ini, berbagai strategi modifikasi telah dikembangkan, salah satunya adalah dengan menambahkan

aditif konduktif. *Graphene oxide* (GO) adalah bentuk allotropi karbon dua dimensi yang terbentuk dari oksidasi grafit, menghasilkan lembaran tipis dengan berbagai gugus oksigen yang membuatnya mudah terdispersi. Gugus-gugus fungsional ini juga dapat menciptakan saluran ionik yang kontinu dan meningkatkan konduktivitas ionik secara signifikan [8]. Sementara itu, *Reduced Graphene Oxide* (rGO), yang merupakan turunan dari GO, telah menjadi bahan yang sangat menjanjikan karena dapat meningkatkan konduktivitas, kapasitas, dan efisiensi. rGO telah terbukti menjadi konduktor listrik yang sangat baik karena elektron-elektron dalam strukturnya dapat bergerak dengan sangat bebas [9].

Selain itu, penggunaan *silver nanoparticles* (AgNPs), yaitu partikel nanometer logam perak, juga menjadi strategi yang efektif karena luas permukaannya yang tinggi dan kemampuannya untuk berinteraksi. Studi oleh [10] mengamati bahwa serat karbon nanofiber (CNF) yang disintesis dengan penambahan Koloid Nanopartikel Perak (AgNP) menunjukkan peningkatan konduktivitas elektrik hingga lima kali lipat, menunjukkan bahwa Koloid Nanopartikel Perak (AgNP) dapat memperkuat kemampuan penghantaran muatan. Penelitian ini memanfaatkan GO yang disintesis dari grafit powder, serta rGO dan Koloid Nanopartikel Perak (AgNP) sebagai aditif untuk material katoda LiFePO₄, dengan tujuan mengatasi masalah konduktivitas dan meningkatkan kapasitas baterai.

Berbagai penelitian sebelumnya telah melakukan upaya peningkatan konduktivitas LFP. Sebagai contoh, studi oleh [11] yang menggunakan metode reduksi suhu tinggi untuk membuat komposit LFP/rGO berhasil mencapai kapasitas spesifik yang sangat baik mendekati nilai teoretisnya. Meskipun

demikian, studi yang secara langsung membandingkan efektivitas GO, rGO, dan komposit AgNP dalam satu platform fabrikasi yang sama menggunakan metode pelapisan suhu rendah (*low-temperature spin coating*) masih terbatas. Kebaruan (*novelty*) dari penelitian ini terletak pada studi komparatif langsung ketiga aditif tersebut pada substrat LFP tanpa proses sintering suhu tinggi yang boros energi, sehingga menawarkan rute fabrikasi yang lebih efisien. Tujuan utama penelitian ini adalah untuk mengevaluasi dan menentukan aditif mana yang paling efektif dalam memulihkan konduktivitas intrinsik LFP serta meningkatkan kinerja elektrokimianya melalui analisis struktur kristal, celah pita energi, dan respons voltammogram siklik.

METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan April hingga Agustus 2025 di Laboratorium Kimia Terpadu FMIPA dan Kesehatan Universitas Muhammadiyah Riau dan Laboratorium Nanomaterial Fisika Universitas Riau.

Alat dan Bahan Penelitian

Alat-alat yang digunakan dalam riset ini meliputi timbangan analitik, gelas piala, labu *erlenmeyer*, gelas ukur, pipet tetes, kertas saring, penangas panas (*hot plate*), pengaduk magnetik (*magnetic stirrer*), penangas es, oven, dan pelapis putar (*spin coating*). Bahan-bahan yang digunakan terdiri dari serbuk grafit, Asam Sulfat (H_2SO_4), Kalium Permanganat ($KMnO_4$), Hidrogen Peroksida (H_2O_2), air deionisasi, serbuk *Lithium Iron Phosphate* (LFP), *Polyvinylidene fluoride* (PVDF), Koloid Nanopartikel Perak (AgNP) dan *N-Methyl-2-pyrrolidone* (NMP).

Sintesis Graphene Oxide (GO)

Graphene Oxide (GO) disintesis menggunakan modifikasi metode Hummers sesuai literatur yang diuraikan dalam riset [12]. Proses dimulai dengan mencampurkan 0,2gram grafit powder ke dalam 50 mL asam sulfat (H_2SO_4) pekat di bawah kondisi pengadukan kuat. Campuran kemudian didinginkan dalam penangas es sebelum 2,5gram kalium permanganat ($KMnO_4$) ditambahkan secara perlahan sambil terus diaduk selama 3 jam. Pada tahap ini, $KMnO_4$ berperan sebagai agen pengoksidasi utama yang memicu pemecahan ikatan karbon pada lapisan grafit dan pembentukan gugus fungsi oksigen seperti epoksida hidroksil, dan karboksil. Setelah reaksi awal selesai, larutan diencerkan dengan penambahan 50 mL air suling secara bertahap, diikuti oleh penambahan tambahan 100 mL air suling untuk menurunkan konsentrasi asam dan mencegah reaksi lanjut yang tidak terkontrol. Selanjutnya, 100 mL H_2O_2 30% ditambahkan untuk menghentikan reaksi oksidasi dan mereduksi sisa $KMnO_4$ menjadi MnO_2 , sehingga warna larutan berubah dari hijau kekuningan menjadi coklat muda. Proses sentrifugasi dilakukan untuk memisahkan padatan dari larutan, diikuti dengan pencucian berulang menggunakan campuran air suling hingga pH larutan mencapai nilai netral (sekitar 7), guna menghilangkan ion logam dan sisa asam. Hasil akhir berupa suspensi Graphene Oxide (GO) yang stabil dan siap digunakan untuk langkah berikutnya dalam riset ini.

Pembuatan Katoda

Pembuatan katoda ini sesuai literatur yang diuraikan dalam riset [13] dimulai dengan menyiapkan lempeng tembaga berukuran 6 x 2.4 cm. Bersihkan lempeng tersebut dengan menggunakan etanol sebelum melapisi dengan lapisan katoda yang telah disiapkan, pastikan lempeng tembaga sudah kering. Selanjutnya, timbang $LiFePO_4$ yang sudah dibuat sebanyak 5

gram, kemudian timbang PVDF sebanyak 0.50 gram. Larutkan PVDF dalam NMP (*N*-Methyl-2 pyrrolidone) sebanyak 15 mL menggunakan pengaduk magnetik selama 30 menit dengan kecepatan 300 rpm suhu 70°C, lalu campurkan lapisan katoda ke dalam larutan PVDF/NMP secara perlahan kemudian aduk menggunakan magnetik stirer selama 30 menit dengan kecepatan 300 rpm. Langkah selanjutnya adalah aplikasikan lapisan katoda secara merata ke

permukaan lempeng tembaga menggunakan metode spin coating dengan kecepatan 100 rpm selama 15 detik. Terakhir, lempeng katoda yang sudah diaplikasikan dikeringkan menggunakan oven suhu 80°C selama 30 menit. Tiga jenis katoda berbeda difabrikasi, di mana variabel yang diubah adalah jenis aditif konduktif yang digunakan. Komposisi sampel tiap variasi katoda dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Komposisi Sampel untuk Setiap Variasi Katoda.

No	Nama Sampel	GO	rGO	AgNP	LiFePO ₄
1	LFP+GO	0,02 g	-	-	1 g
2	LFP+rGO	-	0,02 g	-	1 g
3	LFP+AgNP	-	-	3 ml	1 g

Karakterisasi

Karakterisasi material dilakukan melalui beberapa teknik. *X-Ray Diffraction* (XRD) digunakan untuk mengidentifikasi struktur kristal dan fasa dari grafit dan GO, hal ini penting untuk memverifikasi keberhasilan proses oksidasi dan interkalasi gugus fungsi pada lapisan karbon. *Ultraviolet-Diffuse Reflectance Spectroscopy* (UV-DRS) dipilih untuk mempelajari respons material terhadap energi foton guna menentukan nilai celah energi (*band gap*), yang merupakan indikator intrinsik dari sifat konduktivitas elektronik material katoda. Kinerja elektrokimia dievaluasi menggunakan *Cyclic Voltammetry* (CV) untuk mengukur kemampuan penyimpanan muatan (kapasitansi) dan kinetika reaksi redoks pada antarmuka elektroda-elektrolit. Data yang diperoleh dari ketiga pengujian ini selanjutnya diintegrasikan untuk menganalisis korelasi antara perubahan struktur mikro dan sifat optik terhadap peningkatan performa elektrokimia. Dengan pendekatan multiparameter ini, mekanisme

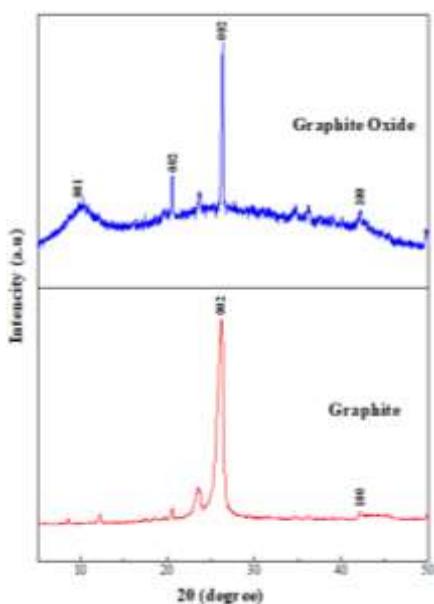
perbaikan konduktivitas yang ditawarkan oleh masing-masing aditif dapat dijelaskan secara komprehensif, valid, dan mendalam.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Struktur Kristal (XRD)

Analisis difraksi Sinar-X (XRD) merupakan teknik fundamental yang digunakan dalam penelitian ini untuk memverifikasi transformasi struktural dari grafit sebagai bahan awal menjadi *graphene oxide* (GO) sebagai produk sintesis. Karakterisasi ini krusial untuk memastikan bahwa proses oksidasi berhasil mengubah struktur grafit yang padat dan berlapis menjadi lembaran-lembaran GO dengan jarak antar lapisan yang lebih besar. Pola difraksi yang dihasilkan dapat memberikan informasi kunci mengenai fasa material, jarak antar lapisan (*d-spacing*), dan tingkat kristalinitas [14]. Oleh karena itu, dengan membandingkan pola difraksi dari grafit sebelum dan sesudah sintesis, keberhasilan transformasi material dapat dibuktikan secara meyakinkan. Perbandingan pola

difraksi dari kedua material ini disajikan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Perbandingan pola difraksi Grafit dan GO

Pola difraksi untuk serbuk grafit (kurva merah) menunjukkan puncak yang sangat tajam dan intens pada sudut $2\theta \approx 26.5^\circ$. Puncak ini diindeks sebagai bidang kristal (002), yang merupakan ciri khas dari struktur heksagonal grafit yang sangat teratur. Ketajaman puncak ini mengindikasikan tingkat kristalinitas yang tinggi dan domain kristal yang besar. Dari posisi puncak ini, jarak antar lapisan (*d-spacing*) untuk grafit dihitung menggunakan Hukum Bragg, menghasilkan nilai sekitar 3,4 Å. Jarak ini merepresentasikan jarak antar lapisan graphene yang terikat oleh gaya van der Waals dalam tumpukan grafit. Selain itu, puncak dengan intensitas lebih rendah teramat pada $2\theta \approx 42.5^\circ$, yang sesuai dengan bidang (100) dan berkaitan dengan susunan atom karbon dalam bidang basal heksagonal.

Setelah melalui proses oksidasi kimia menggunakan metode *hummers* yang dimodifikasi, pola difraksi (kurva biru) menunjukkan perubahan yang dramatis dan

fundamental. Puncak tajam (002) milik grafit hampir sepenuhnya hilang. Sebagai gantinya, muncul sebuah puncak baru yang lebar dan kurang intens pada sudut 2θ yang jauh lebih rendah, yaitu sekitar 10° . Puncak ini merupakan refleksi dari bidang (001) pada struktur GO.

Pergeseran puncak ke sudut yang lebih rendah ini memiliki implikasi struktural yang sangat penting. Jarak antar lapisan (*d-spacing*) untuk GO, yang dihitung dari puncak (001) ini, meningkat secara signifikan menjadi sekitar 9,0 Å. Fenomena ini sesuai dengan teori difraksi Bragg ($n\lambda=2d \sin \theta$), di mana pergeseran posisi puncak difraksi (2θ) ke sudut yang lebih kecil berbanding terbalik dengan jarak antar bidang kisi (*d*). Peningkatan jarak antar lapisan ini mengonfirmasi teori bahwa gugus fungsi oksigen telah berhasil menyusup (terinterkalasi) di antara lapisan *graphene*, sehingga merenggangkan struktur tumpukan grafit awal.

Peningkatan jarak hampir tiga kali lipat ini adalah bukti fisik yang paling konklusif dari keberhasilan proses interkalasi. Artinya, gugus-gugus fungsional yang mengandung oksigen (seperti gugus hidroksil, epoksi, dan karboksil) serta molekul air telah berhasil disisipkan di antara lapisan-lapisan karbon, secara efektif mendorong lapisan-lapisan tersebut menjauh satu sama lain.

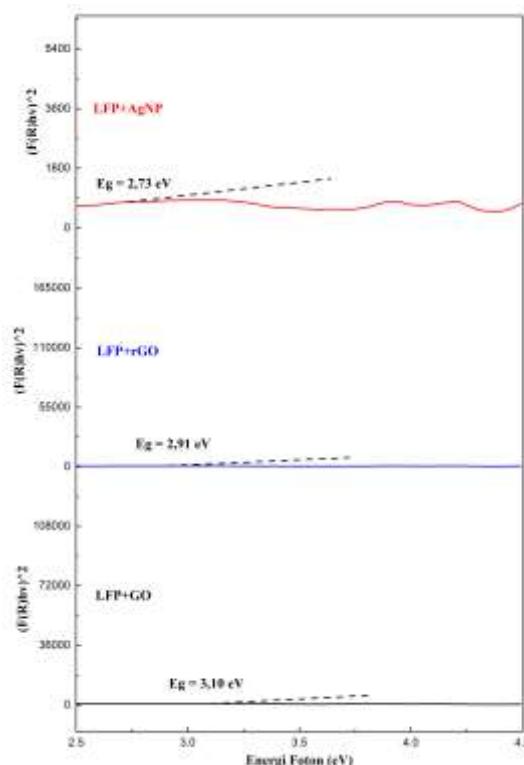
Selain pergeseran puncak, karakteristik penting lainnya adalah pelebaran puncak (*peak broadening*). Puncak (001) pada GO jauh lebih lebar dibandingkan puncak (002) pada grafit. Pelebaran ini mengindikasikan dua hal: (1) Penurunan kristalinitas, yang berarti material kehilangan keteraturan strukturnya dalam jarak jauh akibat masuknya gugus fungsi dan cacat struktural. (2) Penurunan ukuran kristalit, yang mengonfirmasi bahwa proses oksidasi telah berhasil mengeksfoliasi tumpukan grafit menjadi lembaran-lembaran *nanosheet* GO yang terdiri dari beberapa lapis atau bahkan satu lapis. Hal ini sangat sesuai dengan hasil

perhitungan menggunakan Persamaan Scherrer, yang menunjukkan penurunan ukuran kristalit dari 41,6 nm (Grafit) menjadi 8,5 nm (GO).

Analisis Sifat Optik (UV-DRS)

Untuk memahami bagaimana setiap aditif mempengaruhi sifat elektronik material katoda, dilakukan analisis *Ultraviolet-Diffuse Reflectance Spectroscopy* (UV-DRS). Analisis ini pada dasarnya mengukur bagaimana material merespons cahaya pada berbagai tingkat energi. Kemampuan material untuk menyerap energi cahaya ini sangat berkaitan dengan seberapa mudah elektron di dalamnya dapat bergerak, yang pada akhirnya menentukan konduktivitas listriknya [15].

Dalam penelitian ini, tujuan utamanya adalah untuk melihat apakah penambahan aditif seperti GO, rGO dan Koloid Nanopartikel Perak (AgNP) membuat material katoda menjadi lebih konduktif dimana nilai celah pita energi (Eg) atau *band gap* menjadi indikator kuncinya, semakin kecil nilai Eg semakin baik konduktivitas elektroniknya. Untuk menentukan nilai Eg dari data spektrum, digunakan metode standar yang disebut Tauc Plot. Metode ini memungkinkan kita untuk mengekstrak nilai energi spesifik di mana material mulai menyerap cahaya secara efisien. Berdasarkan studi oleh [16] pada material LiFePO₄, dikatakan bahwa transisi elektronik yang terjadi adalah jenis transisi langsung yang diizinkan (*direct allowed transition*). Oleh karena itu, nilai celah pita energi dihitung dengan memplot $(F(R)hv)^2$ terhadap energi foton (hv) dan mengekstrapolasi bagian linier dari kurva ke sumbu energi. **Gambar 2** menyajikan hasil Tauc Plot yang telah dianalisis untuk ketiga variasi katoda.



Gambar 2. Tauc Plot untuk ketiga variasi katoda

Dari ekstrapolasi linear pada bagian tepi serapan (*absorption edge*) masing-masing kurva, diperoleh nilai celah pita energi yang dirangkum dalam **Tabel 2**.

Tabel 2. Nilai Celah Pita Energi (Eg) Hasil Analisis Tauc Plot.

Variasi Katoda	Nilai Eg (Ev)
LFP+GO	3,10
LFP+rGO	2,91
LFP+AgNP	2,73

Hasil analisis menunjukkan tren yang jelas dan konsisten. Variasi 1 (LFP+GO) memiliki celah pita energi tertinggi sebesar 3,10 eV. Nilai Eg yang lebar ini sesuai dengan sifat *graphene oxide* (GO) yang cenderung bersifat isolator akibat banyaknya gugus fungsional oksigen yang mengganggu konjugasi ikatan sp² pada struktur karbonnya.

Pada Variasi 2 (LFP+rGO), nilai Eg menurun menjadi 2,91 eV. Penurunan ini mengindikasikan bahwa proses reduksi GO

menjadi rGO berhasil memulihkan sebagian besar struktur sp^2 yang konduktif. Pemulihan konduktivitas ini dapat dijelaskan secara teoritis melalui restorasi sistem elektron π terkonjugasi (*conjugated π-electron system*) pada bidang basal karbon setelah gugus oksigen perusak struktur dihilangkan melalui proses reduksi.

Dengan berkurangnya gugus oksigen, hambatan bagi pergerakan elektron menurun sehingga material memerlukan energi yang lebih rendah untuk mengeksitasi elektron ke pita konduksi. Ini secara langsung berimplikasi pada peningkatan konduktivitas elektronik.

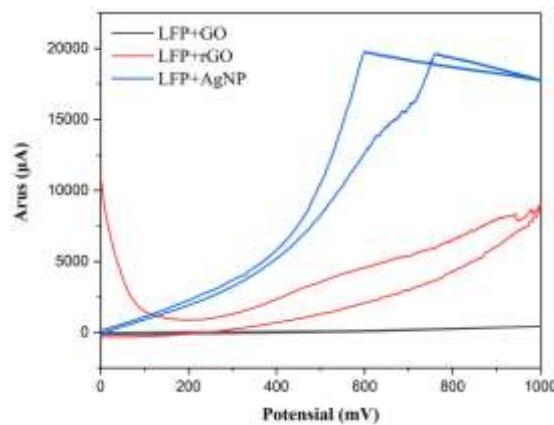
Penurunan celah pita energi yang paling signifikan teramati pada Variasi 3 (LFP+AgNP), dengan nilai E_g terendah yaitu 2,73 eV. Hasil ini menunjukkan efek sinergis yang kuat dari nanopartikel perak (AgNPs). AgNPs, yang dikenal memiliki konduktivitas listrik sangat tinggi, berfungsi sebagai "jembatan" atau pusat konduktif di antara partikel LFP. Kehadiran AgNPs menciptakan banyak jalur baru bagi transfer elektron, sehingga secara drastis menurunkan celah pita energi efektif dari material komposit.

Secara keseluruhan, tren penurunan E_g ini sangat konsisten dengan temuan di literatur. Sebagai perbandingan, penelitian oleh [16] yang melakukan studi komputasi DFT+U melaporkan bahwa LiFePO₄ murni memiliki celah pita energi langsung sekitar 3,82 eV. Nilai E_g yang lebih rendah pada semua sampel dalam penelitian ini menunjukkan bahwa kehadiran aditif berbasis karbon, bahkan GO sekalipun, telah berhasil memodifikasi struktur elektronik LFP. Lebih lanjut, penurunan E_g setelah penambahan rGO sejalan dengan riset lain pada komposit berbasis rGO, yang juga melaporkan penyempitan celah pita energi sebagai bukti peningkatan konduktivitas. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa modifikasi dengan rGO dan AgNP berhasil meningkatkan sifat elektronik material

katoda, yang merupakan prasyarat penting untuk mendapatkan kinerja elektrokimia yang lebih baik.

Analisis Kinerja Elektrokimia (CV)

Untuk menguji dampak langsung dari perbaikan sifat elektronik terhadap performa baterai, pengujian *Cyclic Voltammetry* (CV) dilakukan [17]. Perbandingan langsung dari ketiga variasi katoda pada laju pindai 20 mV/s, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3**, mengungkap perbedaan kinerja yang signifikan.



Gambar 3. Grafik CV Semua Variasi

Luas area di dalam kurva CV secara langsung menggambarkan kapasitas penyimpanan muatan elektroda. Kurva untuk katoda LFP+GO (hitam) menunjukkan area yang sangat kecil, mengonfirmasi bahwa tanpa modifikasi lebih lanjut, transfer muatannya sangat terbatas. Penambahan nanopartikel perak pada sampel LFP+AgNP (biru) memberikan peningkatan yang jelas, terlihat dari area kurva yang lebih besar, yang membuktikan bahwa Koloid Nanopartikel Perak (AgNP) berhasil membentuk jejaring konduktif untuk transfer elektron.

Namun, peningkatan paling drastis dicapai oleh sampel LFP+rGO (merah). Luas area kurvanya yang jauh lebih besar, ditambah dengan bentuknya yang lebih mendekati ideal (*quasi-rectangular*) yang

menandakan kapasitas penyimpanan muatan dan kinetika reaksi yang jauh lebih baik. Temuan ini menegaskan urutan kinerja elektrokimia: LFP+rGO > LFP+AgNP > LFP+GO. Kinerja yang lebih baik dari katoda LFP+rGO ini dapat diatribusikan pada konduktivitas elektroniknya yang telah pulih akibat proses reduksi, yang memfasilitasi transfer muatan yang efisien di seluruh permukaan elektroda. Hasil ini sangat selaras dengan analisis UV-DRS sebelumnya, di mana material dengan celah pita energi lebih rendah menunjukkan kinerja elektrokimia yang lebih baik.

Analisis Kapasitansi Spesifik

Untuk analisis kapasitansi spesifik (Cs) dihitung dari data kurva CV menggunakan **persamaan (1)**:

$$C_s = \frac{\int I dV}{2.v.\Delta V.m} \quad (1)$$

di mana $\int I dV$ adalah luas area kurva, v adalah laju pindai, ΔV adalah jendela potensial, dan m adalah massa material aktif. Parameter ini merupakan indikator kuantitatif utama yang merepresentasikan kemampuan penyimpanan energi per satuan massa material elektroda. Luas area integral tersebut secara fisik menggambarkan total muatan yang dipertukarkan selama siklus redoks berlangsung. Dengan menormalisasi muatan tersebut terhadap massa aktif, kita dapat memperoleh metrik standar untuk membandingkan efisiensi penyimpanan muatan dari ketiga variasi aditif secara objektif.

Hasil perhitungan lengkap untuk semua variasi disajikan dalam **Tabel 3**. Data kuantitatif ini mengonfirmasi hasil analisis kualitatif, di mana Variasi 2 (LFP+rGO) menunjukkan kinerja yang jauh melampaui dua variasi lainnya. Nilai kapasitansi spesifik tertinggi dicapai oleh sampel LFP+rGO, yaitu sebesar 5,0 F/g pada laju pindai 5 mV/s. Nilai ini lebih tinggi

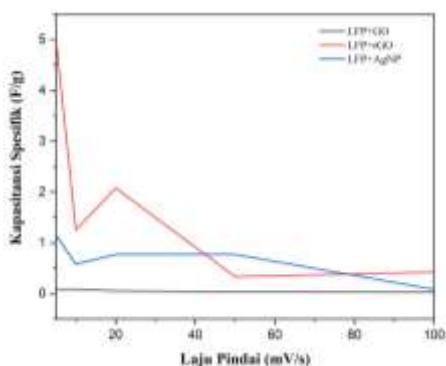
dibandingkan LFP+GO (0,083 F/g) dan LFP+AgNP (1,15 F/g) pada laju pindai yang sama.

Tabel 3. Nilai Kapasitansi Spesifik (Cs) yang dihitung dari kurva CV

Laju Pindai (mV/s)	Cs Var. 1 (F/g)	Cs Var. 2 (F/g)	Cs Var. 3 (F/g)
5	0.083	5.00	1.15
10	0.083	1.25	0.58
20	0.052	2.08	0.77
50	0.029	0.33	0.77
100	0.025	0.42	0.08

Meskipun nilai kapasitansi yang diukur dari CV ini tidak dapat dibandingkan secara langsung dengan kapasitas baterai penuh dalam satuan mAh/g yang dilaporkan oleh literatur [11] dimana didapatkan kapasitas sebesar 165 mAh/g untuk komposit LFP/rGO yang diuji menggunakan metode *galvanostatic charge-discharge* (GCD). Namun, peningkatan signifikan pada respon arus dan nilai kapasitansi spesifik pada sampel LFP/rGO dalam penelitian ini, terutama jika dibandingkan dengan sampel LFP/GO, secara jelas menunjukkan tren yang sejalan. Hal ini mengonfirmasi bahwa penambahan rGO merupakan strategi yang valid untuk meningkatkan kinerja elektrokimia LFP.

Gambar 4 memvisualisasikan data dari Tabel 2, menunjukkan tren perubahan kapasitansi spesifik seiring dengan meningkatnya laju pindai. Secara umum, nilai kapasitansi cenderung menurun pada laju pindai yang lebih tinggi. Fenomena ini wajar terjadi dan disebabkan oleh keterbatasan difusi ion pada kecepatan tinggi, ion dari elektrolit tidak memiliki cukup waktu untuk mengakses seluruh permukaan aktif elektroda, sehingga hanya sebagian kecil dari kapasitas total yang termanfaatkan.



Gambar 4. Grafik Kapasitansi Spesifik vs. Laju Pindai

Dari grafik tersebut, terlihat jelas bahwa kurva untuk LFP+rGO berada di posisi paling atas, menunjukkan kapabilitas laju (*rate capability*) yang paling baik. Hal ini menegaskan bahwa jejaring konduktif yang dibentuk oleh rGO sangat efektif dalam memfasilitasi transfer muatan yang cepat, bahkan pada laju pindai yang lebih tinggi. Selain itu, metode fabrikasi *spin coating* yang digunakan dalam penelitian ini menawarkan keunggulan dalam hal kesederhanaan proses dan efisiensi energi dibandingkan dengan metode reduksi suhu tinggi yang sering digunakan, yang menjadi pertimbangan penting untuk aplikasi praktis.

Keterbatasan Penelitian dan Studi Masa Depan

Meskipun penelitian ini berhasil menunjukkan peningkatan kinerja elektrokimia melalui modifikasi aditif, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu dicatat. Pengujian elektrokimia pada studi ini terbatas pada metode *Cyclic Voltammetry* (CV) untuk menghitung kapasitansi spesifik, dan belum mencakup pengujian *Galvanostatic Charge-Discharge* (GCD) untuk siklus jangka panjang (*cycle life*) pada konfigurasi baterai penuh (*full cell*). Selain itu, optimalisasi rasio massa aditif belum dilakukan secara mendalam. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk melakukan uji impedansi elektrokimia (EIS)

guna memahami mekanisme resistansi transfer muatan secara lebih rinci serta mengaplikasikan material komposit ini dalam uji baterai koin (*coin cell*) untuk memverifikasi stabilitas kinerjanya dalam aplikasi nyata.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa modifikasi katoda LiFePO₄ dengan aditif berhasil meningkatkan sifat material dan kinerja elektrokimianya. Keberhasilan sintesis *Graphene Oxide* (GO) dari grafit telah dibuktikan melalui analisis XRD, yang menunjukkan perubahan struktur kristal yang signifikan. Penambahan aditif rGO dan Koloid Nanopartikel Perak (AgNP) juga terbukti efektif dalam meningkatkan konduktivitas elektronik material, yang ditunjukkan oleh penurunan nilai celah pita energi masing-masing menjadi 2,91 eV dan 2,73 eV. Peningkatan sifat elektronik ini berkorelasi langsung dengan kinerja elektrokimia, di mana sampel LFP+rGO menunjukkan kapasitas penyimpanan muatan paling baik, dengan nilai kapasitansi spesifik tertinggi mencapai 5,0 F/g. Temuan ini mengindikasikan bahwa penggunaan *reduced Graphene Oxide* (rGO) merupakan strategi yang paling efektif di antara ketiga variasi yang diuji untuk meningkatkan performa katoda LiFePO₄.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. T. Frith, M. J. Lacey, and U. Ulissi, “A non-academic perspective on the future of lithium-based batteries,” *Nat. Commun.*, vol. 14, no. 1, 2023, doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-35933-2>.
- [2] A. Promi, K. Meyer, R. Ghosh, and F. Lin, “Advancing electric mobility with lithium-ion batteries: A materials and sustainability perspective,” *MRS Bull.*, vol. 49, no.

- 7, pp. 697–707, 2024, doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-35933-2.10.1557/s43577-024-00749-y>.
- [3] S. M. Hashmi, S. Noor, and W. Parveen, “Advances in water splitting and lithium-ion batteries: pioneering sustainable energy storage and conversion technologies,” *Front. Energy Res.*, vol. 12, no. January, pp. 1–27, 2024, doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-35933-2.10.3389/fenrg.2024.1465349>.
- [4] M. Rodrigo, M. F. Gazulla, E. Zumaquero, and J. González, “Innovative ceramic pigments from recycled lithium-ion battery cathodes for inkjet applications,” *Open Ceram.*, vol. 19, no. June, pp. 0–6, 2024, doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-35933-2.10.1016/j.oceram.2024.100638>.
- [5] P. U. Nzereogu *et al.*, “Solid-State lithium-ion battery electrolytes: Revolutionizing energy density and safety,” *Hybrid Adv.*, vol. 8, no. November 2024, p. 100339, 2025, doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-35933-2.10.1016/j.hybadv.2024.100339>.
- [6] A. Manthiram, “A reflection on lithium-ion battery cathode chemistry,” *Nat. Commun.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–9, 2020, doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-35933-2.10.1038/s41467-020-15355-0>.
- [7] L. Wang, H. Chen, Y. Zhang, J. Liu, and L. Peng, “Research Progress in Strategies for Enhancing the Conductivity and Conductive Mechanism of LiFePO₄ Cathode Materials,” *Molecules*, vol. 29, no. 22, 2024, doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-35933-2.10.1016/j.mol.2024.112451>.
- [8] N. F. A. Fattah, H. M. Ng, Y. K. Mahipal, A. Numan, S. Ramesh, and K. Ramesh, “An approach to solid-state electrical double layer capacitors fabricated with graphene oxide-doped, ionic liquid-based solid copolymer electrolytes,” *Materials (Basel.)*, vol. 9, no. 6, 2016, doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-35933-2.10.3390/ma9060450>.
- [9] D. Yasyerli, Sena; Arbag, Hüseyin; Öztekin, “Preparation of RGO with Enhanced Electrical Conductivity : Effects of Sequential Reductions of L-Ascorbic Acid and Thermal,” pp. 9905–9918, 2025, doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-35933-2.10.1007/s13369-024-09915-5>.
- [10] W. Ali *et al.*, “Electrical conductivity of silver nanoparticle doped carbon nanofibres measured by CS-AFM,” *RSC Adv.*, vol. 9, no. 8, pp. 4553–4562, 2019, doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-35933-2.10.1039/C8RA04594A>.
- [11] Q. Zhang *et al.*, “Reduced Graphene Oxide Coating LiFePO₄ Composite Cathodes for Advanced Lithium-Ion Battery Applications,” 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/ijms242417549>.
- [12] R. P. Reshma, N. S. Abishek, and K. N. Gopalakrishna, “Synthesis and characterization of graphene oxide, tin oxide, and reduced graphene oxide-tin oxide nanocomposites,” *Inorg. Chem. Commun.*, vol. 165, no. May, p. 112451, 2024, doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-35933-2.10.1016/j.inoche.2024.112451>.
- [13] I. F. Monteiro *et al.*, “Lithium-ion battery high performance cathode electrode based on LiFePO₄ and thermal sensitive microspheres with

- thermal shutdown properties,” *J. Power Sources*, vol. 614, no. March, 2024, doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-35933-2.10.1016/j.jpowsour.2024.234956>.
- [14] A. Augusto, M. Pereira, F. Kayod, and V. Flor, “Chemical and structural analysis of graphene oxide reduced with naringenin: A natural product-based alternative,” vol. 37, no. April, pp. 2850–2865, 2025, doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-35933-2.10.1016/j.jmrt.2025.06.173>.
- [15] A. V Emeline and Y. V Kapitonov, “Diffuse Reflectance Spectroscopy with Dilution: A Powerful Method for Halide Perovskites Study,” 2023, doi: [10.3390/molecules28010350](https://doi.org/10.3390/molecules28010350).
- [16] A. K. Wabeto, K. N. Nigussa, and L. D. Deja, “DFT + U Study of structural, electronic, optical and magnetic properties of LiFePO₄ Cathode materials for Lithium-Ion batteries,” 2023, doi: [10.1088/2053-1591/ada5bf](https://doi.org/10.1088/2053-1591/ada5bf).
- [17] C. Day, K. Greig, A. Massey, J. Peake, D. Crossley, and R. A. W. Dryfe, “Utilizing Cyclic Voltammetry to Understand the Energy Storage Mechanisms for Copper Oxide and its Graphene Oxide Hybrids as Lithium-Ion Battery Anodes,” pp. 1504–1516, 2020, doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-35933-2.10.1002/cssc.201902784>.

Agun Pranata: Evaluasi Kinerja Elektrokimia Katoda LiFePO₄ dengan Variasi Aditif Graphene Oxide, Reduced Graphene Oxide dan Koloid Nanopartikel Perak (AgNP)