



# Tinjauan Literatur: Konversi Limbah Baterai LFP Kendaraan Listrik Menjadi Pupuk Berbasis Sintesis Nanografena-Oksida-Fe-P

Muhammad Faras<sup>1\*</sup>; Rizky Ikhsan Febrian<sup>2</sup>; Nur Ulul Azmi<sup>3</sup>

1,2,3.IPB University, Indonesia

\*Corresponding Author: [sifarass23@gmail.com](mailto:sifarass23@gmail.com)

## ARTICLE INFO

## ABSTRACT

### Article history

Received : 24-11-2025

Revised : 27-06-2026

Accepted : 28-06-2026

### Keywords

Baterai LFP,  
Ekonomi sirkular,  
Daur ulang,  
Grafena oksida,  
GO-Fe-P,  
Pupuk cair

### Kata Kunci

LFP batteries,  
Circular economy,  
Recycling,  
Graphene Oxide  
GO-Fe-P,  
Liquid Fertilizer

The increasing adoption of electric vehicles has led to a significant rise in the number of end-of-life lithium iron phosphate (LFP) batteries, which pose environmental risks if not properly managed. This study aims to evaluate the potential utilization of spent LFP batteries as raw materials for producing graphene oxide-iron-phosphorus slow-release fertilizer (GO-PSRF) liquid fertilizer through a circular economy approach. A literature review methodology was employed by critically analyzing and synthesizing recent scientific publications related to LFP battery material recovery, graphene oxide synthesis, GO-Fe-P composite fabrication, and economic feasibility. The findings indicate that graphite from the anode can be converted into graphene oxide, while the  $\text{LiFePO}_4$  cathode serves as a source of iron and phosphorus for producing GO-PSRF fertilizer with a double slow-release mechanism, integrating phosphorus slow-release fertilizer (P-SRF) and GO-Fe composites.

### ABSTRAK

Peningkatan penggunaan kendaraan listrik mendorong kenaikan jumlah baterai lithium iron phosphate (LFP) yang pada akhir masa pakainya berpotensi menjadi limbah berbahaya apabila tidak dikelola dengan baik. Penelitian ini bertujuan mengkaji potensi pemanfaatan limbah baterai LFP sebagai bahan baku pupuk cair berbasis komposit nanografena oksida-Fe-phosphorus *slow-release fertilizer* (GO-PSRF) melalui pendekatan ekonomi sirkular. Penelitian menggunakan metode studi literatur dengan menganalisis dan mensintesis berbagai publikasi ilmiah mengenai proses *recovery material* baterai LFP, sintesis grafena oksida, pembentukan komposit GO-Fe-P, serta analisis potensi ekonomi. Hasil kajian menunjukkan bahwa grafit anoda dapat dikonversi menjadi grafena oksida, sedangkan material katoda  $\text{LiFePO}_4$  dapat dimanfaatkan sebagai sumber besi dan fosfor untuk menghasilkan pupuk GO-PSRF dengan mekanisme *double slow-release*, yaitu kombinasi phosphorus *slow-release fertilizer* (P-SRF) dan komposit GO-Fe.

This is an open-access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



## PENDAHULUAN

Data dari Ankle Brachial Indeks (ABI) Research (2024) menyebutkan bahwa di tahun 2019-2023 jumlah penjualan kendaraan listrik dunia mengalami pertumbuhan yang pesat, hal itu diprediksi akan berlanjut hingga volume tahunannya akan mencapai 48,6 juta kendaraan di tahun 2030 mendatang. Kendaraan listrik atau yang dikenal dengan *Electric Vehicle* (EV) menjadi fokus utama dalam industri otomotif demi menggapai upaya terkait pengurangan emisi karbon di masa mendatang (Bachtiar *et al.*, 2022). EV menggunakan satu atau lebih motor listrik sebagai tenaga penggerak yang dayanya diperoleh dari baterai isi ulang. Kendaraan ini menjadi sebuah harapan untuk beralih dari ketergantungan kendaraan berbahan bakar fosil ke listrik sebagai alternatif sumber energi yang lebih ramah terhadap lingkungan (Zola *et al.*, 2023).

Peningkatan produksi kendaraan listrik (EV) di masa depan tentunya juga mengakibatkan meningkatnya jumlah permintaan baterai. Salah satu jenis baterai yang umum digunakan yaitu baterai lithium ferro phosphate (LFP). Baterai LFP merupakan salah satu jenis baterai yang menggunakan elektroda positif berupa  $\text{LiFePO}_4$  yang memiliki nilai arus tinggi dan menawarkan kinerja elektrokimia yang baik dengan resistensi rendah (Miao *et al.*, 2019). Baterai ini banyak dipilih karena keamanannya, stabilitasnya, dan umur pakainya yang panjang. Hal itu dibuktikan dengan data dari *International Energy Agency* (IEA) pada tahun 2024 yang menunjukkan bahwa persentase penjualan baterai LFP di pasar global meningkat secara signifikan sebesar 20% selama periode 2018-2022 dan naik 40% pada tahun 2023.

Dibalik peningkatan jumlah produksi tersebut, muncul tantangan baru terkait pengolahan limbah baterai ini. Baterai LFP yang telah habis masa pakainya mengandung komponen kimia aktif seperti litium, besi (Fe), dan fosfat (P) yang bersifat toksik jika tidak diolah dengan benar. Tanpa sistem daur ulang dan pemanfaatan ulang yang efektif, peningkatan jumlah baterai LFP justru berpotensi menjadi sumber pencemaran baru yang mengancam ekosistem tanah dan air, serta menambah jejak karbon dari limbah elektronik. Karena itu diperlukan adanya persiapan yang matang demi mengatasi permasalahan ini di masa mendatang. Salah satu upaya untuk mengatasi permasalahan tersebut yaitu dengan cara mengolahnya menjadi produk lain seperti pupuk.

Kandungan baterai LFP seperti besi dan fosfat memiliki potensi untuk dijadikan sebagai unsur hara dan unsur mikro pada pupuk. Berbagai penelitian terdahulu telah dilakukan seperti penelitian yang dilakukan oleh Yue *et al.*, (2021) yang memanfaatkan limbah LFP menjadi bahan baku dalam sintesis fosfat. Selain itu penelitian yang dilakukan oleh Yang *et al.*, (2019) juga memanfaatkan anoda baterai LFP sebagai bahan baku untuk sintesis grafena oksida. Hasil dari sintesis tersebut dapat diolah kembali menjadi pupuk komposit grafena oksida-Fe-fosfat (GO-Fe-P) seperti yang dilakukan oleh Andelkovic *et al.*, pada tahun 2018. Inovasi ini tidak hanya berfokus pada penanganan limbah baterai, tetapi juga membuka peluang baru bagi sektor pertanian untuk menyediakan pupuk melalui material daur ulang yang melimpah. Lebih jauh lagi, inovasi ini mencerminkan pentingnya integrasi pendidikan, riset, dan ekonomi dalam merespons tantangan lingkungan secara menyeluruh. Dengan memanfaatkan hasil penelitian dan pendekatan interdisipliner dari bidang teknik material, kimia lingkungan, serta pertanian, maka pemanfaatan limbah baterai

menjadi pupuk cair GO-Fe-P menjadi contoh konkret bagaimana pengetahuan dapat ditransformasikan menjadi solusi ekonomi sirkular. Strategi ini tidak hanya mendukung capaian SDG 7 melalui penguatan sistem energi bersih yang efisien dan berkelanjutan, tetapi juga berkontribusi langsung pada SDG 13 dengan menekan potensi pencemaran lingkungan, sekaligus memperkuat ketahanan sektor pertanian melalui inovasi pupuk dari limbah yang sebelumnya tidak bernilai.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji potensi limbah baterai LFP sebagai bahan baku pupuk cair yang bernilai guna tinggi. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk menganalisis secara mendalam proses sintesis nanomaterial berupa nano grafena oksida-Fe-P (GO-Fe-P) dari limbah tersebut. Terakhir, penelitian ini bertujuan untuk mengaitkan hasil inovasi yang dihasilkan dengan kontribusinya terhadap pencapaian target-target SDGs serta mendukung prinsip ekonomi sirkular.

## TINJAUAN PUSTAKA

### Baterai LFP di Kendaraan Listrik dan Kandungannya

Baterai lithium ferro phosphate (LFP) telah muncul sebagai kandidat yang menjanjikan dalam dunia baterai lithium-ion komersial, khususnya sebagai sumber daya pada kendaraan listrik. Baterai ini menggunakan  $\text{LiFePO}_4$  sebagai material katoda dan karbon (grafit atau MCMB) sebagai anoda konvensional. Meskipun memiliki tegangan yang lebih rendah (sekitar 3,4 V) dibandingkan dengan katoda lainnya seperti oksida berlapis kaya nikel ( $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{1-x-y}\text{O}_2$ , sekitar 3,8 V), baterai  $\text{LiFePO}_4$  memiliki sejumlah keunggulan unik termasuk biaya rendah, toksisitas rendah, laju pengosongan sendiri yang rendah, umur siklus panjang, kemampuan daya tinggi, serta stabilitas termal yang luar biasa (Jin *et al.*, 2025). Hal ini dikarenakan adanya kestabilan termal akibat struktur  $\text{LiFePO}_4$  yang terikat kuat pada suhu tinggi hingga 400 °C (Gong *et al.*, 2016). Oleh karena itu, baterai ini banyak digunakan dalam kendaraan listrik (EV), penyimpanan energi skala utilitas, dan sistem daya cadangan.

Baterai LFP, secara komposisi, menggunakan elektroda positif berupa  $\text{LiFePO}_4$  yang memiliki nilai arus tinggi dan menawarkan kinerja elektrokimia yang baik dengan resistensi rendah (Miao *et al.*, 2019). Komposisi ini menjadikan litium, besi, dan fosfat sebagai tiga unsur utama yang terkandung dalam baterai LFP, baik pada bagian katoda maupun anoda. Ketiga unsur tersebut merupakan komponen aktif yang menentukan kinerja elektrokimia baterai selama masa pakainya, namun pada saat yang sama menjadi unsur yang perlu mendapat perhatian khusus ketika baterai telah mencapai akhir masa pakainya.

Di balik keunggulannya, peningkatan produksi baterai LFP dalam skala industri menimbulkan perhatian serius terkait pengolahan limbahnya di masa depan. Baterai yang telah mencapai akhir masa pakainya tetap mengandung fraksi logam aktif seperti litium, besi, dan fosfat yang apabila tidak dikelola dengan tepat berpotensi menjadi sumber pencemaran lingkungan. Namun demikian, kandungan senyawa  $\text{LiFePO}_4$  serta bahan aktif karbon atau grafit pada baterai LFP justru memiliki potensi untuk dijadikan pupuk, karena mengandung nutrisi yang dibutuhkan tanaman seperti fosfat, besi, dan karbon (Vasconcelos *et al.*, 2023).

## **Pupuk Cair Berbasis Nanografena-Oksida-Fe-P**

Pupuk cair berbasis nanografena-oksida-Fe-P merupakan inovasi pupuk fosfat lepas lambat (*slow-release fertilizer*) yang memanfaatkan komposit grafena oksida (GO), ion  $Fe^{3+}$ , dan fosfat untuk meningkatkan efisiensi pemanfaatan unsur fosfor oleh tanaman. Grafena oksida memiliki luas permukaan yang tinggi serta mengandung berbagai gugus fungsional beroksigen, seperti gugus hidroksil, epoksi, dan karboksil, yang memungkinkan terjadinya modifikasi permukaan melalui pengikatan ion logam. Salah satu metode yang banyak dikembangkan adalah fungsionalisasi GO menggunakan ion  $Fe^{3+}$  sebagai pusat koordinasi untuk mengadsorpsi ion fosfat sehingga membentuk komposit GO-Fe-P (Bhattacharya *et al.*, 2022).

Ion  $Fe^{3+}$ , pada komposit GO-Fe-P, berperan sebagai jembatan koordinasi yang menghubungkan gugus fungsional pada GO dengan ion fosfat. Interaksi tersebut menghasilkan ikatan koordinasi yang mampu mempertahankan fosfat pada permukaan komposit, namun tetap memungkinkan pelepasannya secara bertahap ketika berada di lingkungan tanah. Mekanisme pelepasan terkendali ini menjaga ketersediaan unsur fosfor di daerah perakaran tanaman dalam waktu yang lebih lama dibandingkan pupuk fosfat konvensional. Selain meningkatkan efisiensi penyerapan unsur P oleh tanaman, mekanisme tersebut juga mampu mengurangi kehilangan fosfat akibat pencucian (*leaching*) maupun fiksasi oleh mineral tanah (Andelkovic *et al.*, 2018).

Keunggulan utama komposit GO-Fe-P dibandingkan pupuk fosfat konvensional, seperti monoamonium fosfat (MAP), terletak pada kemampuannya mengendalikan laju pelepasan fosfat. Pupuk MAP umumnya melarut dengan cepat setelah diaplikasikan sehingga sebagian fosfat mudah tercuci atau terikat oleh partikel tanah sebelum diserap tanaman. Sebaliknya, GO-Fe-P mampu melepaskan fosfat secara bertahap sehingga meningkatkan efisiensi pemupukan dan mengurangi risiko pencemaran lingkungan akibat limpasan fosfat. Penelitian menunjukkan bahwa komposit GO-Fe-P berbasis grafit memiliki kapasitas adsorpsi fosfat sekitar  $48 \text{ mg P g}^{-1}$  serta menunjukkan laju pelepasan fosfat yang lebih lambat dibandingkan MAP. Karakteristik tersebut menjadikan GO-Fe-P sebagai material yang berpotensi dikembangkan menjadi pupuk fosfat ramah lingkungan dengan efisiensi pemanfaatan unsur hara yang lebih tinggi (Laksmi, 2018; Vasconcelos *et al.*, 2023).

Dalam pengembangannya sebagai pupuk cair, komposit GO-Fe-P didispersikan ke dalam media berair sehingga membentuk suspensi yang stabil dan mudah diaplikasikan melalui penyemprotan maupun penyiraman. Bentuk cair memberikan distribusi nutrisi yang lebih merata pada permukaan maupun daerah perakaran tanaman, sedangkan komposit GO-Fe-P tetap mempertahankan mekanisme pelepasan fosfat secara bertahap. Formulasi pupuk cair dapat ditambahkan bahan penstabil maupun pengatur pH untuk menjaga kestabilan suspensi selama penyimpanan tanpa mengganggu kemampuan pelepasan fosfat. Dengan demikian, pupuk cair berbasis nanografena-oksida-Fe-P berpotensi menjadi alternatif pupuk fosfat modern yang menggabungkan efisiensi penyerapan unsur hara, kemudahan aplikasi, serta dampak lingkungan yang lebih rendah dibandingkan pupuk fosfat konvensional.

## **Potensi Baterai LFP menjadi Pupuk Cair berbasis Nanografena-Oksida-Fe-P**

Baterai lithium iron phosphate (LFP) bekas merupakan salah satu limbah elektronik yang mengandung material bernilai tinggi sehingga berpotensi dimanfaatkan kembali sebagai bahan baku berbagai material fungsional. Komponen utama baterai LFP terdiri atas anoda berbahan grafit dan katoda berbahan  $\text{LiFePO}_4$  yang masih mengandung unsur karbon, besi, dan fosfor dalam jumlah signifikan. Pemanfaatan kembali material tersebut tidak hanya meningkatkan nilai tambah limbah baterai, tetapi juga mendukung pengurangan ketergantungan terhadap bahan baku primer melalui pendekatan daur ulang.

Grafit yang berasal dari anoda baterai LFP merupakan material karbon berstruktur heksagonal dengan atom karbon berhibridisasi  $sp^2$  yang memiliki konduktivitas listrik tinggi dan stabilitas kimia yang baik (Amri, 2019). Melalui proses oksidasi, grafit hasil pemulihan dapat dikonversi menjadi grafena oksida (GO), yaitu material dua dimensi yang memiliki luas permukaan tinggi dan kaya akan gugus fungsional beroksigen, seperti hidroksil, epoksi, dan karboksil. Gugus-gugus tersebut berfungsi sebagai situs aktif untuk mengikat ion logam, termasuk  $\text{Fe}^{3+}$ , sehingga GO berpotensi digunakan sebagai matriks penyusun komposit GO-Fe-P yang berperan sebagai pupuk fosfat lepas lambat (*slow-release fertilizer*) (Bhattacharya *et al.*, 2022).

Selain grafit, katoda  $\text{LiFePO}_4$  juga berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber unsur besi dan fosfor melalui proses pemulihan material. Fosfat yang digunakan dalam sintesis komposit GO-Fe umumnya berasal dari garam fosfat komersial. Namun, perkembangan teknologi daur ulang baterai membuka peluang pemanfaatan fosfor hasil pemulihan baterai LFP sebagai sumber fosfat alternatif dalam sintesis komposit GO-Fe-P. Pendekatan ini berpotensi menghasilkan sistem pelepasan nutrisi bertahap (*double slow-release mechanism*), yaitu melalui pelepasan fosfat dari material hasil daur ulang yang dipadukan dengan mekanisme adsorpsi dan desorpsi pada komposit GO-Fe. Kombinasi tersebut diharapkan mampu meningkatkan efisiensi pemanfaatan fosfor sekaligus mempertahankan ketersediaannya di zona perakaran tanaman dalam jangka waktu yang lebih lama dibandingkan pupuk fosfat konvensional (Yue *et al.*, 2021).

Pemanfaatan baterai LFP bekas sebagai bahan baku pupuk cair berbasis nanografena-oksida-Fe-P sejalan dengan konsep ekonomi sirkular yang menekankan pemanfaatan kembali limbah bernilai tinggi menjadi produk yang memiliki nilai tambah. Pendekatan ini dapat mengurangi akumulasi limbah baterai, menekan kebutuhan eksploitasi bahan baku baru, serta mengurangi dampak lingkungan yang ditimbulkan dari proses produksi material primer. Selain itu, pengembangan pupuk berbasis material hasil daur ulang turut mendukung pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDGs), khususnya tujuan 7 (*Affordable and Clean Energy*) melalui optimalisasi siklus hidup baterai pada era transisi energi, serta tujuan 13 (*Climate Action*) melalui pengurangan limbah dan emisi yang dihasilkan dari pembuangan baterai maupun produksi bahan baku baru. Dengan demikian, pemanfaatan baterai LFP bekas sebagai sumber material penyusun pupuk cair berbasis nanografena-oksida-Fe-P tidak hanya memberikan solusi terhadap permasalahan limbah elektronik, tetapi juga mendukung pengembangan teknologi pertanian yang lebih efisien dan berkelanjutan.

## METODE PENELITIAN

Pemilihan ide dan tema pada karya tulis ilmiah ini didasarkan pada pengamatan terhadap perkembangan isu dan informasi terkini terkait baterai lithium ferro phosphate (LFP), khususnya mengenai potensi pemanfaatan limbah yang dihasilkan serta permasalahan yang dapat ditimbulkannya di masa mendatang. Artikel ini merupakan penelitian berbasis studi literatur (*literature review*) dan pengembangan gagasan ilmiah, sehingga sebagian besar hasil, pembahasan, dan rekomendasi yang disusun berasal dari proses sintesis terhadap penelitian dan publikasi terdahulu, bukan melalui pengujian atau eksperimen secara langsung. Pengumpulan data dilakukan melalui penelusuran literatur dari berbagai sumber ilmiah seperti buku, jurnal, artikel, peraturan, dan laporan resmi yang relevan. Data yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan pendekatan deskriptif untuk menggambarkan kondisi dan temuan yang ada, analisis komparatif untuk membandingkan berbagai hasil penelitian, serta sintesis gagasan untuk mengintegrasikan informasi menjadi konsep atau ide baru yang mendukung penyusunan karya ilmiah. Proses penyusunan dilakukan secara sistematis melalui tahapan penyusunan kerangka tulisan, pengelompokan hasil kajian literatur, analisis dan pengembangan gagasan, penulisan, hingga penyuntingan akhir agar menghasilkan karya yang sesuai dengan format penulisan ilmiah serta memiliki alur pembahasan yang jelas dan runtut.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil sintesis berbagai penelitian terdahulu, penelitian yang mengintegrasikan secara langsung proses pemulihan fosfor dari limbah baterai lithium iron phosphate (LFP), sintesis grafena oksida dari karbon anoda baterai, serta pemanfaatan pupuk phosphorus *slow-release fertilizer* (P-SRF) sebagai sumber fosfat dalam pembentukan komposit graphene oxide-Fe-phosphate (GO-Fe-P) masih jarang dilakukan. Sebagian besar penelitian masih berfokus pada masing-masing tahapan secara terpisah sehingga belum menghasilkan suatu sistem pupuk yang menggabungkan dua mekanisme pelepasan hara secara bersamaan. Oleh karena itu, penelitian ini menawarkan suatu gagasan baru berupa integrasi P-SRF hasil *recovery* limbah baterai LFP dengan komposit GO-Fe sehingga dihasilkan pupuk GO-PSRF yang diperkirakan memiliki mekanisme *double slow-release*. Konsep ini menjadi kebaruan utama penelitian sekaligus menjadi dasar pembahasan pada bagian selanjutnya.

### Pemisahan dan Ekstraksi Bubuk Katoda serta Karbon pada Baterai

Mekanisme daur ulang baterai lithium besi fosfat (LFP) yang inovatif telah dikembangkan untuk meningkatkan nilai ekonomisnya. Proses ini berfokus pada pemulihan fosfor dan litium secara simultan, mengubah fosfor yang didapat menjadi pupuk lepas lambat (P-SRF) yang sangat berguna. Pupuk ini dirancang khusus untuk tanah asam, memiliki kemampuan menyerap air yang tinggi, dan melepaskan nutrisi secara perlahan. Proses daur ulang dimulai dengan memisahkan bubuk katoda LFP dari foil aluminium menggunakan larutan natrium hidroksida (NaOH). Bubuk LFP yang didapatkan direaksikan dengan larutan natrium persulfat (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>). Reaksi ini sangat efisien dalam mengekstrak lithium hingga hampir 100%, sementara pemulihan besi dan fosfor tetap rendah (kurang dari 1%). Tahap ini menghasilkan larutan Li<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dan material katoda LFP yang telah

kehilangan litiumnya. fosforus ( $\text{PO}_4$ ) diekstrak dari material katoda yang sudah delitiasi yaitu  $\text{FePO}_4$  tersebut menggunakan larutan natrium sulfida nonahidrat ( $\text{Na}_2\text{S}_9\text{H}_2\text{O}$ ). Kondisi optimal untuk ekstraksi fosforus ini adalah rasio molar material katoda delitiasi terhadap  $\text{Na}_2\text{S}$  sebesar 1:2, rasio padat-cair 10 g/L, dan waktu reaksi 1 jam. Dalam kondisi ini, efisiensi pemulihan fosforus bisa mencapai 99.5%. Fosforus yang berhasil didaur ulang hadir dalam bentuk  $\text{HPO}_4^{2-}$  dan  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  (Yue *et al.*, 2021).

Hasil Fosforus yang didapatkan pada penelitian Yue, et al. 2021 tidak hanya sampai disitu. Penelitian ini membuat pupuk P-SRF dari hasil fosforus yang didapatkan. P-SRF juga berisi nitrogen dan kalium seperti umumnya pupuk NPK berisi unsur nitrogen (N) dan kalium (K). Larutan fosfat ini dicampur dengan bahan-bahan lain, seperti urea sebagai sumber nitrogen, akrilik asam (AA) untuk membentuk struktur polimer, N, N'-methylenebisacrylamide (MBA) sebagai agen penghubung silang, dan potassium persulfate (KPS) sebagai inisiator untuk memulai reaksi. Semua bahan ini kemudian dipanaskan pada suhu 80 °C selama 2 jam di bawah aliran gas nitrogen. Selama proses ini  $\text{HPO}_4^{2-}$  atau  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  memainkan peran penting dengan menurunkan energi aktivasi ( $E_a$ ) dari reaksi kondensasi antara urea dan akrilik asam. Hal ini mempercepat reaksi dan memastikan urea terikat secara kimia ke dalam struktur polimer 3D bukan hanya terbungkus di dalamnya. Struktur yang terbentuk memiliki porositas seragam dan lebih stabil berfungsi untuk menekan laju pelepasan nutrisi. Setelah reaksi selesai sampel pupuk dicuci dan dikeringkan untuk mendapatkan P-SRF yang siap digunakan.

Penelitian yang menjadi menarik dan belum pernah dilakukan adalah menggabungkan pupuk P-SRF dengan GO-Fe supaya terbentuk GO-Fe-P dengan P yang seharusnya dipakai fosforus biasa, tetapi menggunakan P-SRF. Pupuk ini memiliki keunggulan lebih banyak karena berasal dari P-SRF dan GO-Fe. GO atau biasa disebut Grafena Oksida juga dapat dihasilkan dari baterai LFP yang berada pada bagian Anoda akan menghasilkan bubuk karbon digunakan untuk mensintesis Grafena Oksida. Pemisahan bubuk anoda dilakukan dengan proses pembongkaran mekanis baterai LFP bekas dengan pemisahan bahan anoda dari kertas tembaga. Pencucian ultrasonik menggunakan pelarut air untuk memfasilitasi pemisahan bubuk karbon karena secara efektif membantu pelepasan bubuk karbon dari foil (Yang *et al.*, 2019).

### **Sintesis Nano Grafena Oksida dari Bubuk Karbon**

Metode yang paling mudah dilakukan untuk pembuatan sintesis nanografena oksida dengan Sebanyak 23 mL asam sulfat pekat dan 2,3 mL asam fosfat ditambahkan ke dalam 1 gram bubuk karbon di gelas kimia kecil, lalu ditambahkan 0,5 gram  $\text{NaNO}_3$  dan 3 gram  $\text{KMnO}_4$  secara berurutan untuk mencegah reaksi yang hebat. Larutan diaduk dalam penangas air es selama satu jam, kemudian dimasukkan ke dalam alat *microwave assisted extraction*, larutan dipertahankan pada suhu 50 °C dan dilakukan selama empat jam. Air es ditambahkan ke produk dan  $\text{H}_2\text{O}_2$  (fraksi volume 30%) ditambahkan tetes demi tetes sambil diaduk sampai warna larutan berubah menjadi keemasan. Larutan kemudian disentrifugasi 4.000 rpm selama 3 menit. Endapan hasil sentrifugasi selanjutnya dicuci dengan HCl (fraksi volume 5%) dan air aquades sampai pH 7. Endapan kemudian dibersihkan secara ultrasonik, kemudian dikeringkan dengan pengering vakum. Sebanyak 10 mg grafit oksida dalam

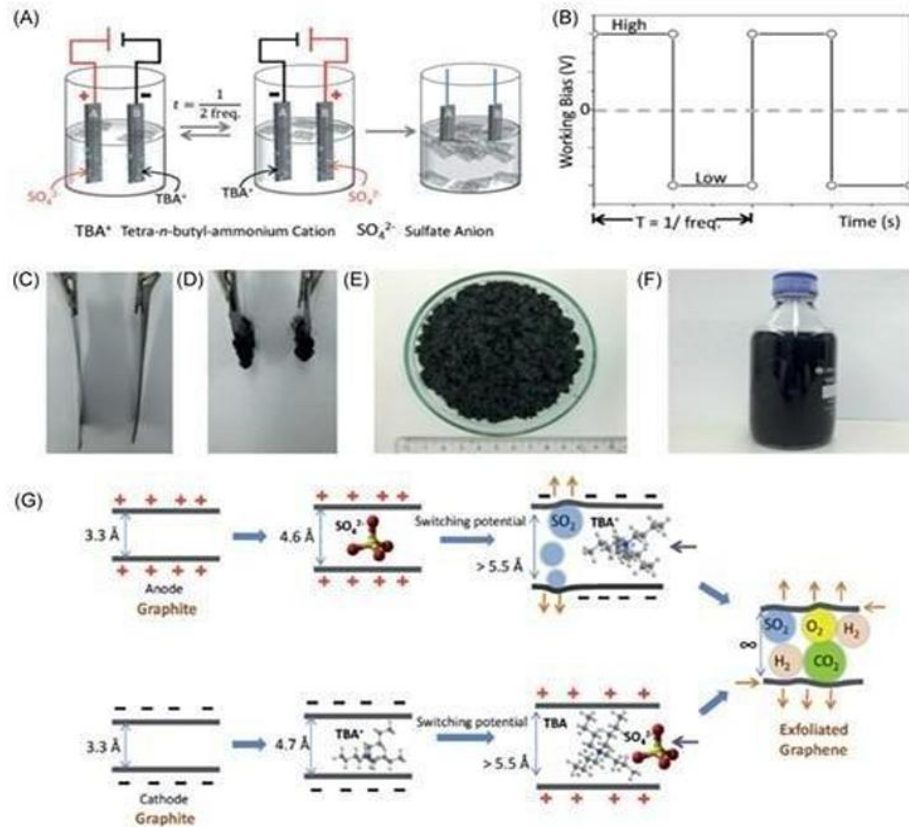
larutan berair 25 mL kemudian didispersikan secara ultrasonik selama 1 jam sampai menjadi coklat suspensi GO (Yang *et al.*, 2019).

Grafena oksida memiliki karakteristik yang berbeda dari bahan aslinya. Analisis X-ray Diffraction (XRD) menunjukkan bahwa proses oksidasi merusak struktur kristal grafit dan membentuk struktur kristal baru. Spektra Fourier Transform Infrared (FTIR) menunjukkan keberadaan gugus fungsional yang mengandung oksigen, seperti gugus hidroksil (OH), gugus karbonil (C=O), dan gugus epoksi (C-O-C). Keberadaan gugus-gugus ini juga menyebabkan peningkatan resistivitas, yang tercatat sebesar  $451.2 \Omega \cdot m$ , karena struktur terkonjugasi grafit rusak dan menempelnya gugus-gugus oksigen pada permukaan lembaran grafena. Meskipun kerusakan struktur ini memperburuk konduktivitas, hal ini merupakan langkah penting dalam proses pembuatan grafena. Tujuan dari proses ini adalah untuk membuka lembaran-lembaran grafit dan menambahkan gugus oksigen, yang memudahkan reduksi selanjutnya untuk menghasilkan grafena (Yang *et al.*, 2019).

Prosedur ini memiliki bahaya lebih besar walaupun lebih sederhana dilakukan. Reaksi antara asam sulfat dan dapat memicu ledakan besar jika prosedur tidak dilakukan secara benar dan bertahap. Prosedur yang lebih aman dilakukan salah satunya adalah Prosedur elektrokimia. Prosedur Elektrokimia untuk sintesis grafena oksida terdiri dari berbagai metode yang dibedakan berdasarkan jenis elektrolit, arah arus listrik, dan perlakuan terhadap elektroda grafit. Metode yang paling umum digunakan adalah eksfoliasi anodik, yaitu proses ketika elektroda grafit berperan sebagai anoda dan ion negatif dari larutan, seperti sulfat atau perklorat, terinterkalasi ke dalam lapisan grafit hingga menghasilkan grafena oksida dengan rasio C/O rendah. Selain itu, metode dua tahap yang menggabungkan perlakuan katodik dan anodik juga banyak diterapkan; proses ini diawali dengan interkalasi ion ke dalam grafit sebagai katoda, lalu diikuti eksfoliasi saat grafit menjadi anoda, sehingga diperoleh grafena oksida dengan tingkat oksidasi yang lebih terkontrol. Beberapa peneliti menerapkan pretreatment galvanostatik, yaitu pengisian muatan konstan pada grafit untuk memaksimalkan interkalasi sebelum eksfoliasi, yang terbukti mampu meningkatkan hasil dan kualitas grafena oksida. Prosedur lain melibatkan penggunaan elektrolit bersifat sangat oksidatif, seperti campuran asam sulfat dan asam nitrat, yang menghasilkan grafena oksida dengan kandungan gugus oksigen tinggi. Sementara itu, pendekatan ramah lingkungan memanfaatkan larutan garam netral atau basa seperti ammonium sulfat atau natrium hidroksida, kadang dikombinasikan dengan zat tambahan seperti tiosulfat atau kobalt sulfat untuk mengurangi pembentukan radikal oksidatif yang merusak. Di sisi lain, beberapa metode menggunakan senyawa organik seperti atau 2,2,6,6- tetramethylpiperidine-1- (TEMPO) atau asam askorbat sebagai agen penghambat oksidasi, sehingga menghasilkan grafena oksida dengan struktur yang lebih utuh dan rasio C/O lebih tinggi. Selain itu, penggunaan pelarut ionik atau deep eutectic solvents juga berkembang sebagai alternatif non-asam yang mendukung eksfoliasi tanpa merusak struktur karbon (Liu, et al. 2019).

Hasil penelitian dari berbagai sumber dapat dikatakan dari berbagai metode elektrokimia yang tersedia dan metode sederhana. Metode paling aman untuk sintesis grafena oksida adalah eksfoliasi menggunakan larutan garam netral atau basa, seperti ammonium sulfat ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), terutama ketika dikombinasikan dengan zat tambahan yang tidak reaktif seperti tiosulfat atau 2,2,6,6- tetramethylpiperidine-1- (TEMPO) pada Gambar

1. Metode ini tidak memerlukan penggunaan asam kuat atau oksidator agresif seperti kalium permanganat, sehingga mengurangi risiko korosif, ledakan, atau pembentukan gas beracun selama proses elektrolisis. Selain itu, kondisi operasi pada metode ini umumnya berlangsung pada suhu ruang dan pH mendekati netral, yang lebih ramah terhadap peralatan laboratorium dan operator.



Gambar 1. Mekanisme sintesis grafena oksida dengan metode eksfoliasi

Hasil grafena oksida yang diperoleh memang memiliki tingkat oksidasi yang lebih ringan, namun tetap mengandung gugus fungsi oksigen yang cukup untuk berbagai aplikasi fungsional, seperti adsorpsi, katalis, atau modifikasi permukaan. Eksfoliasi elektrokimia menggunakan elektrolit garam netral dapat dianggap sebagai pendekatan paling aman dan ramah lingkungan dalam sintesis grafena oksida tanpa mengorbankan kualitas hasil secara signifikan (Liu, et al. 2019). Modifikasi sintesis ini dapat diharapkan menjadikan terobosan baru yang mampu menciptakan hasil yang kualitas bagus dengan ramah lingkungan.

### Sintesis Pupuk Cair Nano Grafena Oksida-Fe-P

GO (Grafena Oksida) yang dihasilkan memiliki luas permukaan tinggi dan gugus fungsional oksigen, menjadikannya dasar yang baik untuk modifikasi kimia guna menahan makro- dan mikronutrien. Untuk meningkatkan kapasitas muat fosfat pada permukaan GO, ion besi(III) ( $\text{Fe}^{3+}$ ) ditambahkan dengan larutan  $\text{FeCl}_3$  karena afinitasnya terhadap ion fosfat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ). Penambahan ini membentuk komposit GO-Fe yang mana ion besi(III) mengurangi muatan negatif permukaan GO dan menyediakan situs penyerapan aktif. Ion fosfat dari garam kalium dihidrogen fosfat ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) dimuat ke dalam komposit GO-Fe.

Penelitian menunjukkan bahwa komposit GO-Fe memiliki kapasitas muat fosfat sebesar 48 mg P/g. Analisis kinetika pelepasan P menunjukkan bahwa pupuk GO-Fe-P melepaskan fosfor secara jauh lebih lambat dibandingkan dengan pupuk komersial mono amonium fosfat (MAP) (Andelkovic *et al.*, 2018). Seluruh proses ini digambarkan secara skematis sebagai berikut:



Manfaat GO-Fe dapat dikembangkan dengan menggantikan Ion fosfat dari garam kalium dihidrogen fosfat (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) dengan P-SRF yang akan menunjukkan kualitas yang belum pernah dilakukan. Pembuatan pupuk ini dapat menjadi inovasi baru yang akan menggabungkan GO-Fe dengan P-SRF yang sama-sama memiliki keunggulan lebih baik dari pupuk lepas lambat lainnya menjadikan pupuk dengan keunggulan baru. Penggunaan P-SRF sebagai sumber fosfat pada komposit GO-Fe akan menciptakan sistem pelepasan ganda (double slow-release mechanism).

### **Efektivitas Pupuk Cair Terhadap Pupuk MAP**

Pupuk P-SRF yang dihasilkan memiliki kualitas yang jauh lebih baik daripada pupuk lepas lambat (SRF) biasa seperti Pupuk MAP. Analisis FTIR dan XPS menunjukkan bahwa urea (sumber N) terikat secara kimia dalam struktur polimer P-SRF berbeda dengan SRF biasa di mana urea hanya terperangkap dan mudah lepas. Hal ini mengakibatkan P-SRF memiliki laju pelepasan N, P, dan K yang jauh lebih rendah dan terkontrol. Kelebihan utama P-SRF adalah ketahanannya terhadap kondisi asam. Berkat efek penyangga pH dari HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup> atau H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>. Pupuk ini mampu mempertahankan daya serap air yang tinggi dan laju pelepasan nutrisi yang rendah bahkan di pH rendah. Hal ini menjadikannya sangat cocok untuk digunakan di tanah asam yang sering menjadi masalah bagi pupuk konvensional. Potensi P-SRF dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman jagung juga telah dibuktikan dalam percobaan menunjukkan bahwa pupuk ini dapat menjadi solusi yang menguntungkan untuk pertanian (Yue *et al.*, 2021).

Pupuk GO-Fe-P berbeda halnya dengan P-SRF. Pupuk GO-Fe-P menunjukkan bahwa komposit GO-Fe memiliki kapasitas muat fosfat sebesar 48 mg P/g. Analisis kinetika pelepasan P menunjukkan bahwa pupuk GO-Fe-P melepaskan fosfor secara jauh lebih lambat dibandingkan dengan pupuk komersial mono amonium fosfat (MAP). Selama 48 jam, pupuk MAP melepaskan sekitar 85% dari total P, sedangkan GO-Fe-P hanya melepaskan sekitar 9%. Pelepasan yang lambat ini mengurangi risiko pencucian atau limpasan P ke air permukaan dan air tanah. Analisis difusi P dalam tanah juga menunjukkan hasil yang serupa, di mana GO-Fe-P menunjukkan pelepasan dan difusi P yang bertahap di semua jenis tanah yang diuji. Setelah 56 hari, lebih dari 99% P yang dilepaskan dari GO Fe-P tetap berada di dekat atau di dalam komposit itu sendiri, mengonfirmasi karakteristik pelepasan lambatnya. Hal ini sangat kontras dengan pupuk MAP yang menunjukkan difusi P yang cepat dan jauh di dalam tanah. Pelepasan P yang perlahan dari GO-Fe-P juga dapat mencegah P dari pengendapan menjadi bentuk yang tidak tersedia bagi tanaman, khususnya di tanah berkapur yang bersifat basa. Meskipun demikian, salah satu kekurangan dari komposit GO-Fe-P adalah kandungan P yang relatif rendah (~5%), dibandingkan dengan

pupuk komersial yang biasanya mengandung 10-20% P. Hal ini dapat menimbulkan kendala biaya untuk transportasi dan aplikasi skala komersial (Andelkovic *et al.*, 2018).

Inovasi dan modifikasi gabungan P-SRF sebagai sumber fosfat pada komposit GO-Fe akan menciptakan sistem pelepasan ganda (*double slow-release mechanism*). GO-Fe berfungsi sebagai lapisan pembawa yang memperlambat pelepasan P, sementara P-SRF itu sendiri sudah dirancang untuk melepaskan nutrisi secara bertahap dengan kandungan P yang akan memenuhi standar yaitu 6% berdasarkan SNI 2803:2012 menetapkan kadar fosfor total minimal 6% sebagai P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Hal ini dapat membuat pelepasan fosfat menjadi lebih lambat dan terkontrol, sehingga sangat efektif untuk mengurangi kehilangan P melalui pencucian atau limpasan. Pelepasan yang sangat lambat ini akan memastikan ketersediaan nutrisi untuk tanaman dalam jangka waktu yang lebih lama, meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk. Pelepasan fosfat yang lebih terkontrol dari kombinasi GO-Fe dan P-SRF juga dapat mencegah reaksi pengendapan yang sering terjadi pada pupuk konvensional, terutama di tanah alkali. Kadar fosfat yang stabil di sekitar zona perakaran dapat meningkatkan penyerapan nutrisi oleh tanaman secara maksimal dan meminimalkan kerugian akibat fiksasi fosfat oleh mineral tanah. Inovasi dan modifikasi dalam bentuk ide ini diharapkan dapat mengembangkan kembali penelitian yang dapat menjadi solusi untuk mengurangi limbah baterai LFP di masa depan.

### **Potensi Ekonomi Sirkular dan Kontribusi terhadap Lingkungan**

Konsep ekonomi sirkular menjadi paradigma baru dalam memaksimalkan potensi sumber daya. Ekonomi sirkular bertujuan untuk memaksimalkan nilai produk melalui prinsip *reuse, reduce, dan recycle* (Geissdoefer *et al.* 2017). Dalam konteks penelitian pemanfaatan limbah baterai LFP menjadi *liquid fertilizer* berbasis sintesis nano grafena-Fe-fosfat, dapat dilihat sebagai bentuk implementasi dari ekonomi sirkular. Model ekonomi sirkular dalam penelitian ini dimulai dari identifikasi limbah baterai LFP sebagai sumber daya bernilai tinggi, bukan sebagai *waste* yang harus dibuang. Material katoda yang mengandung LiFePO<sub>4</sub> dan anoda berbasis karbon grafit diolah menjadi komposit GO-Fe-P melalui serangkaian proses sintesis yang telah dibahas sebelumnya. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip "*cradle to cradle*" dimana produk di akhir siklus hidupnya menjadi input untuk siklus produksi baru (McDonough dan Braungart. 2010). Nilai ekonomi yang dihasilkan melalui transformasi limbah baterai mencakup beberapa aspek. Pertama, penghematan biaya disposal limbah berbahaya yang mencapai \$500-1500 per ton untuk baterai lithium-ion (Harper *et al.*, 2019). Nilai ekonomi selanjutnya adalah *recovery material* bernilai tinggi seperti lithium, besi, dan fosfat yang memiliki harga pasar signifikan. Selanjutnya, penciptaan produk baru berupa pupuk *slow-release* dengan nilai tambah tinggi dibandingkan pupuk konvensional.

Penelitian ini berpotensi memberikan kontribusi signifikan terhadap pencapaian SDG 7 melalui optimalisasi siklus hidup teknologi energi bersih. Target 7.2 yang menekankan peningkatan pangsa energi terbarukan dalam bauran energi global memerlukan dukungan infrastruktur penyimpanan energi yang berkelanjutan (UN, 2015). Aspek *affordability* dalam SDG 7 juga terpenuhi melalui pengurangan biaya eksternalitas lingkungan dari disposal baterai dan penciptaan revenue stream baru dari *waste-to-product*

*transformation*. Hal ini berkontribusi pada penurunan total *cost of ownership* kendaraan listrik dan mempercepat adopsi teknologi energi bersih di masyarakat luas. SDG 13 menekankan pentingnya *urgent action* untuk memerangi perubahan iklim dan dampaknya. Penelitian ini berkontribusi terhadap beberapa target dalam SDG 13, khususnya target 13.3 tentang peningkatan kapasitas adaptasi dan mitigasi perubahan iklim karena mampu menanggulangi adanya limbah baterai LFP yang mampu mencemari lingkungan. Pupuk *slow-release* yang dihasilkan juga berkontribusi pada pengurangan emisi N<sub>2</sub>O dari sektor pertanian. Pupuk konvensional yang melepaskan nutrisi secara cepat often menghasilkan excess nitrogen yang terkonversi menjadi N<sub>2</sub>O, gas rumah kaca dengan potensi pemanasan global 298 kali lebih tinggi dari CO<sub>2</sub> (IPCC, 2014). Karakteristik *slow release* dari komposit GO-Fe- P mengurangi risiko emisi N<sub>2</sub>O dan berkontribusi pada *sustainable agriculture*.

### Analisis Ekonomi

Pengembangan pupuk cair berbasis graphene oxide-Fe-phosphorus *slow-release fertilizer* (GO-PSRF) dari limbah baterai lithium iron phosphate (LFP) tidak hanya menawarkan inovasi dari aspek material, tetapi juga memiliki potensi ekonomi melalui peningkatan nilai tambah limbah menjadi produk bernilai tinggi. Dalam konsep ekonomi sirkular, limbah baterai tidak lagi dipandang sebagai residu yang harus dikelola, melainkan sebagai sumber daya sekunder yang masih mengandung material bernilai, seperti besi, fosfor, dan karbon grafit. Melalui proses *resource recovery*, ketiga material tersebut dimanfaatkan kembali sebagai bahan utama sintesis GO-PSRF sehingga mampu memperpanjang siklus hidup material sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap bahan baku primer.

Berdasarkan hasil sintesis berbagai penelitian, pengolahan 1 ton limbah baterai LFP diperkirakan mampu menghasilkan sekitar 315 kg komposit GO-Fe-PO<sub>4</sub> yang selanjutnya dapat diformulasikan menjadi sekitar 19.687 L pupuk cair GO-PSRF. Estimasi biaya produksi disusun berdasarkan kebutuhan bahan kimia pada proses *leaching*, sintesis graphene oxide, pembentukan komposit GO-Fe-PO<sub>4</sub>, dan formulasi pupuk cair. Total biaya yang diperlukan untuk mengolah 1 ton limbah baterai LFP diperkirakan sebesar Rp538.731.000,00. Berdasarkan data tersebut, harga pokok produksi (HPP) dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$\text{HPP} = \frac{\Sigma \text{Biaya Produksi}}{\Sigma \text{Produksi}}$$
$$\text{HPP} = \frac{\text{Rp}538.731.000}{19.687 \text{ L}} = \text{Rp}27.363/\text{L}$$

Hasil estimasi harga pokok produksi GO-PSRF disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Estimasi Harga Pokok Produksi (HPP) GO-PSRF dari Pengolahan 1 Ton Limbah Baterai LFP

No.	Komponen	Nilai
1	Kapasitas limbah baterai LFP	1 ton
2	Komposit GO-Fe-PO <sub>4</sub> yang dihasilkan	±315 kg

3	Kapasitas produksi GO-PSRF	±19.687 L
4	Total biaya produksi	Rp538.731.000
5	Harga pokok produksi (HPP)	Rp27.363/L
6	HPP kemasan 1 L	Rp27.363
7	HPP kemasan 500 mL	Rp13.682
8	HPP kemasan 250 mL	Rp6.841

Berdasarkan Tabel 2, harga pokok produksi GO-PSRF diperkirakan sebesar Rp27.363 per liter. Nilai tersebut menunjukkan bahwa setiap satu liter pupuk cair dapat diproduksi dengan biaya yang masih berada pada kisaran pupuk pelepas lambat (*slow-release fertilizer*) berbasis material fungsional. Biaya produksi pada penelitian ini masih didominasi oleh penggunaan reagen laboratorium seperti  $\text{KMnO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HCl}$ , dan  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$  yang digunakan pada proses pemulihan material baterai dan sintesis graphene oxide. Oleh karena itu, HPP yang diperoleh masih merepresentasikan kondisi skala laboratorium dan berpotensi mengalami penurunan apabila proses produksi diterapkan pada skala industri melalui optimasi penggunaan reagen, peningkatan efisiensi proses, penggunaan kembali bahan kimia tertentu, serta penerapan teknologi produksi yang lebih hemat energi.

Pengembangan GO-PSRF dari perspektif ekonomi memberikan nilai tambah yang lebih tinggi dibandingkan proses daur ulang baterai konvensional. Sebagian besar teknologi daur ulang saat ini berorientasi pada pemulihan logam bernilai tinggi seperti litium, sedangkan material lain seperti fosfor, besi, dan karbon grafit belum dimanfaatkan secara optimal. Pada penelitian ini, ketiga komponen tersebut diintegrasikan menjadi produk pupuk nanokomposit dengan karakteristik double slow-release, sehingga meningkatkan nilai ekonomi material hasil *recovery*. Pendekatan ini merupakan bentuk *upcycling*, yaitu proses peningkatan nilai material limbah menjadi produk dengan fungsi dan nilai ekonomi yang lebih tinggi dibandingkan material asalnya.

Selain memberikan nilai tambah pada limbah baterai, GO-PSRF juga memiliki prospek pasar yang baik seiring meningkatnya kebutuhan pupuk ramah lingkungan dan berkembangnya sektor pertanian presisi. Karakteristik pelepasan fosfat secara bertahap berpotensi meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk, mengurangi kehilangan unsur hara akibat pencucian (*leaching*), serta menekan frekuensi aplikasi pupuk di lahan pertanian. Dengan demikian, penggunaan GO-PSRF tidak hanya memberikan manfaat ekonomi bagi produsen melalui pemanfaatan limbah sebagai bahan baku, tetapi juga berpotensi memberikan efisiensi biaya pemupukan bagi pengguna akhir.

Secara keseluruhan, analisis ekonomi menunjukkan bahwa pengembangan GO-PSRF memiliki prospek yang menjanjikan untuk dikembangkan sebagai produk bernilai tambah tinggi. Inovasi ini mampu menghubungkan sektor pengelolaan limbah baterai, industri material maju, dan sektor pertanian dalam satu rantai nilai ekonomi sirkular. Selain berpotensi meningkatkan nilai ekonomi limbah baterai LFP, konsep yang diusulkan juga mendukung pengurangan limbah industri, efisiensi pemanfaatan sumber daya, serta pengembangan teknologi pupuk berkelanjutan yang sejalan dengan pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDGs), khususnya SDG 7 (*Affordable and Clean Energy*), SDG 12

(*Responsible Consumption and Production*), SDG 13 (*Climate Action*), dan SDG 15 (*Life on Land*).

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil sintesis berbagai penelitian, limbah baterai lithium iron phosphate (LFP) memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku pupuk cair berbasis komposit nanografena oksida-Fe-P (GO-PSRF). Material grafit pada anoda dapat dikonversi menjadi grafena oksida, sedangkan senyawa  $\text{LiFePO}_4$  pada katoda dapat dimanfaatkan sebagai sumber besi dan fosfat melalui proses pemulihan material. Integrasi pupuk *phosphorus slow-release fertilizer* (P-SRF) hasil *recovery* fosfor dengan komposit GO-Fe menghasilkan konsep pupuk GO-PSRF yang diperkirakan memiliki mekanisme *double slow-release*, sehingga berpotensi meningkatkan efisiensi pelepasan dan penyerapan fosfat, mengurangi kehilangan hara akibat pencucian, serta mendukung pertanian yang lebih berkelanjutan. Dari aspek ekonomi, pengolahan 1 ton limbah baterai LFP diperkirakan mampu menghasilkan sekitar 19.687 L pupuk cair dengan harga pokok produksi sekitar Rp27.363 per liter pada skala laboratorium. Konsep ini juga mendukung penerapan ekonomi sirkular melalui peningkatan nilai tambah limbah baterai menjadi produk bernilai tinggi sekaligus berkontribusi terhadap pencapaian SDGs, terutama SDG 7, SDG 12, SDG 13, dan SDG 15. Meskipun demikian, gagasan ini masih memerlukan validasi melalui penelitian eksperimental untuk menguji efektivitas agronomis, keamanan lingkungan, serta kelayakan produksi pada skala yang lebih besar.

## DAFTAR PUSTAKA

- ABI Research. (2024). *S: Key trends & sales forecast*. <https://www.abiresearch.com/blogs/2024/10/17/2024-automotive-industry/>
- Abdelkader, R. M., Hamed, D. A., & Gomaa, O. M. (2024). Red cabbage extract immobilized in bacterial cellulose film as an eco-friendly sensor to monitor microbial contamination and gamma irradiation of stored cucumbers. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 40(9), 258.
- Abror, M., & Widyastuti. (2019). The effect of vermicompost fertilizer and EM4 on growth and production of tomato. *Agrosains*, 21(1), 45–52.
- Amri, A. (2019). *Mengenal grafena dan aplikasinya* (Edisi ke-1). UR Press.
- Andelkovic, I. B., Kabiri, S., Tavakkoli, E., Kirby, J. K., McLaughlin, M. J., & Losic, D. (2018). Graphene oxide-Fe(III) composite containing phosphate: A novel slow-release fertilizer for improved agriculture management. *Journal of Cleaner Production*, 185, 97–104.
- Andelkovic, I. B., Tomic, Z. P., & Purenovic, M. (2019). Optimisation of phosphate loading on graphene oxide-Fe(III). *New Journal of Chemistry*, 43(5), 2301–2312.
- Bachtiar, D. R., Rosyid, H. A., & Nabila, K. (2022). Pengaruh perkembangan kendaraan listrik terhadap industri otomotif pada era Society 5.0. *Jurnal Inovasi Teknologi dan Edukasi Teknik*, 2(6), 277–281.
- Barbosa de Mattos, D. F., et al. (2025). Recycling of lithium iron phosphate batteries: A comprehensive review. *Recycling*, 10(2), 55–73.

- Bhattacharya, N., Cahill, D. M., Yang, W., & Kochar, M. (2023). Graphene as a nano-delivery vehicle in agriculture: Current knowledge and future prospects. *Critical Reviews in Biotechnology*, 43(6), 851–869.
- Chang, W. T., Lin, C. H., & Tsai, M. H. (2019). Graphene oxide synthesis using microwave-assisted methods. *Journal of Materials Research*, 34(8), 1321–1330.
- Chen, Y., Liu, Q., & Wang, T. (2022). Economic evaluation of recycled LiFePO<sub>4</sub> materials for agricultural applications. *Journal of Cleaner Production*, 362, 132450.
- Cheng, H., et al. (2024). Slow-release fertilizer encapsulated with graphene oxide sheets. *Coatings*, 14(3), 512.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768.
- Gong, C., Xue, Z., Wen, S., Ye, Y., & Xie, X. (2016). Advanced carbon materials/olivine LiFePO<sub>4</sub> composites cathode for lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 318, 93–112.
- Görmez, Ö., Kaya, M., & Altuntaş, Ö. (2021). Comparison of GO–FePO<sub>4</sub> composites. *Materials Chemistry and Physics*, 273, 125080.
- Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., Walton, A., Christensen, P., Heidrich, O., Lambert, S., & Abbott, A. (2019). Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature*, 575(7781), 75–86.
- Hu, G., Zhang, Y., & Liu, J. (2024). Efficient recovery of FePO<sub>4</sub> from LiFePO<sub>4</sub> batteries. *Hydrometallurgy*, 235, 106–112.
- IPCC. (2014). *Climate change 2014: Synthesis report*. IPCC.
- Jin, G., Zhao, W., Zhang, J., Liang, W., Chen, M., & Xu, R. (2025). High-temperature stability of LiFePO<sub>4</sub>/carbon lithium-ion batteries: Challenges and strategies. *Sustainable Chemistry*, 6(1), 7.
- Khan, S., et al. (2022). Improved microwave-assisted graphene oxide synthesis for environmental applications. *Carbon Letters*, 32, 1345–1356.
- Laksmi, R. (2018). Development of the optimum composition of organic liquid fertilizer using Taguchi method. (*Sumber tidak lengkap*).
- Li, X., Wang, J., & Guo, S. (2021). Recovery of iron phosphate from spent LiFePO<sub>4</sub> batteries. *Journal of Power Sources*, 485, 229329.
- Liu, F., Wang, C., Sui, X., Riaz, M. A., Xu, M., Wei, L., & Chen, Y. (2019). Synthesis of graphene materials by electrochemical exfoliation: Recent progress and future potential. *Carbon Energy*, 1(2), 173–199.
- Llenas, M., et al. (2019). Microwave-assisted synthesis of SPION–reduced graphene oxide hybrids. *Nanomaterials*, 9(3), 400.
- McDonough, W., & Braungart, M. (2002). *Cradle to cradle: Remaking the way we make things*. North Point Press.
- Meriatna, M., Suryati, S., & Fahri, A. (2018). Pengaruh waktu fermentasi dan volume bioaktivator EM4 pada pembuatan pupuk organik cair dari limbah buah-buahan. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 7(1), 13–29.

- Miao, Y., Hynan, P., Von Jouanne, A., & Yokochi, A. (2019). Current Li-ion battery technologies in electric vehicles and opportunities for advancements. *Energies*, *12*(6), 1074.
- Rahman, M. A., et al. (2021). Role of effective microorganisms (EM) in improving soil fertility. *Applied Soil Ecology*, *168*, 104179.
- Rafique, M., et al. (2020). Iron phosphate–carbon nanocomposites for controlled nutrient release. *Journal of Environmental Management*, *270*, 110870.
- Singh, R., & Kumar, P. (2021). Graphene–metal oxide nanocomposites for agricultural applications. *Nanotechnology Reviews*, *10*(1), 989–1005.
- UN. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*. United Nations General Assembly.
- Vasconcelos, D. D. S., Tenorio, J. A. S., Botelho Junior, A. B., & Espinosa, D. C. R. (2023). Circular recycling strategies for LFP batteries: A review focusing on hydrometallurgy sustainable processing. *Metals*, *13*(3), 543.
- Yang, L., Yang, L., Xu, G., Feng, Q., Li, Y., Zhao, E., Ma, J., Fan, S., & Li, X. (2019). Separation and recovery of carbon powder in anodes from spent lithium-ion batteries to synthesize graphene. *Scientific Reports*, *9*, 9823.
- Yue, X. H., Wang, L., & Zhao, H. (2023). Recycling phosphorus from spent LiFePO<sub>4</sub> battery. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *11*(1), 109–122.
- Yue, X. H., Zhang, C. C., Zhang, W. B., Wang, Y., & Zhang, F. S. (2021). Recycling phosphorus from spent LiFePO<sub>4</sub> battery for multifunctional slow-release fertilizer preparation and simultaneous recovery of lithium. *Chemical Engineering Journal*, *426*, 131311.
- Zhang, L., et al. (2020). Hydrometallurgical leaching of LiFePO<sub>4</sub> batteries for FePO<sub>4</sub> recovery. *Separation and Purification Technology*, *242*, 116798.
- Zola, G., Nugraheni, S. D., Rosiana, A. A., Pambudy, D. A., & Agustanta, N. (2023). Inovasi kendaraan listrik sebagai upaya meningkatkan kelestarian lingkungan dan mendorong pertumbuhan ekonomi hijau di Indonesia. *E-Jurnal Ekonomi Sumberdaya dan Lingkungan*, *12*(3), 159–170.