

**Daur Ulang Langsung Katoda LFP Bekas melalui Reaksi Berbasis
Padat(Solid-State) untuk Digunakan Kembali dalam Baterai
Litium-Ion**

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan akademik guna memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.)
Pada Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik
Universitas Kristen Indonesia

Oleh:

CHANROAGNIM SITUMORANG

2051050006



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS KRISTEN INDONESIA
2025**



PERNYATAAN KEASLIAN KARYA TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : ChanroAgnim Situmorang

NIM : 2051050006

Program Studi : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Dengan ini menyatakan bahwa karya tulis tugas akhir yang berjudul "DAUR ULANG LANGSUNG KATODA LFP BEKAS MELALUI REAKSI BERBASIS PADAT(SOLID-STATE) UNTUK DIGUNAKAN KEMBALI DALAM BATERAI LITIUM-ION" adalah:

1. Dibuat dan diselesaikan sendiri dengan menggunakan hasil kuliah, tinjauan lapangan, buku-buku dan jurnal acuan yang tertera di dalam referensi pada karya tugas akhir saya.
2. Bukan merupakan duplikasi karya tulis yang sudah dipublikasikan atau yang pernah dipakai untuk mendapatkan gelar sarjana di universitas lain, kecuali pada bagian-bagian sumber informasi yang dicantumkan dengan cara referensi yang semestinya.
3. Bukan merupakan karya terjemahan dari kumpulan buku atau jurnal acuan yang tertera di dalam referensi pada tugas.

Kalau terbukti saya tidak memenuhi apa yang dinyatakan di atas, maka karya tugas akhir ini dianggap batal.

Jakarta, 20 Juni 2025

ChanroAgnim Situmorang



**UNIVERSITAS KRISTEN INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN**

**PERSETUJUAN DOSEN PEMBIMBING TUGAS AKHIR
"Daur Ulang Langsung Katoda LFP Bekas melalui Reaksi Berbasis Padat(Solid-State)
untuk Digunakan Kembali dalam Baterai Litium-Ion"**

Oleh:

Nama : ChanroAgnim Situmorang
NIM : 205105006
Program Studi : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Judul skripsi : Daur Ulang Langsung Katoda LFP Bekas Melalui Reaksi Berbasis
Padat(Solid-State) untuk Digunakan Kembali dalam Baterai Litium-Ion.

Jakarta, 23 Juni 2025

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I

Melya Dyanasari Sebayang, S.Si., MT.
NIDN : 0322027806

Dosen Pembimbing II

Dr. Manogari Sianturi, S.Si., MT.
NIDN : 0417037102

Mengetahui



Kepala Program Studi
Teknik Mesin

Ir. Budiarto, M.Sc.



Dekan Fakultas Teknik

Dikky Antonius, S.T., M.Sc



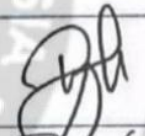
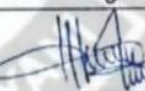
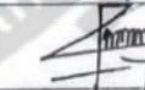
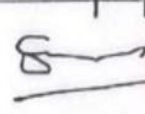
UNIVERSITAS KRISTEN INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

**HALAMAN PERSETUJUAN DOSEN PENGUJI TUGAS
AKHIR**

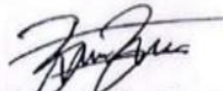
Pada tanggal 23 Juni 2025 telah diselenggarakan Sidang Akhir untuk memenuhi Sebagian persyaratan akademik guna memperoleh gelar Sarjana Strata Satu pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia, atas nama:

Nama : ChanroAgnim Situmorang
NIM : 2051050006
Program Studi : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik

termasuk ujian Tugas Akhir yang berjudul "DAUR ULANG LANGSUNG KATODA LFP BEKAS MELALUI REAKSI BERBASIS PADAT(SOLID-STATE) UNTUK DIGUNAKAN KEMBALI DALAM BATERAI LITIUUM-ION" oleh tim penguji yang terdiri dari:

No	Nama Penguji	Jabatan dalam Tim Penguji	Tanda Tangan
1	Diky Antonius, S.T., M.Sc.,	Ketua Penguji	
2	Ir. Budiarto, M.Sc.,	Sebagai Anggota 1	
3	Melya Dyanasari Sebayang, S.Si.,MT.,	Sebagai Anggota 2	
4	Dr.Manogari Sianturi, S.Si.,MT.,	Sebagai Anggota 3	
5	Ir. Sesmaro Max Yuda, MT.,	Sebagai Anggota 5	

Jakarta, 23 Juni 2025


ChanroAgnim Situmorang



**UNIVERSITAS KRISTEN INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN**

PERNYATAAN DAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR

Saya bertanda tangan di bawah ini:

Nama : ChanroAgnim Situmorang
NIM : 2051050006
Program Studi : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis Tugas Akhir : Skripsi
Judul Skripsi : Daur Ulang Langsung Katoda LFP Bekas melalui Reaksi Berbasis Padat(Solid-State) untuk Digunakan Kembali dalam Baterai Litium-Ion

Menyatakan bahwa;

1. Tugas akhir tersebut adalah benar karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan bukan merupakan duplikasi karya tulis yang sudah dipublikasikan atau yang pernah dipakai untuk mendapatkan gelar akademik di perguruan tinggi manapun;
2. Tugas akhir tersebut bukan merupakan plagiat dari hasil karya pihak lain, dan apabila saya/kami mengutip dari karya orang lain maka akan dicantumkan sebagai referensi sesuai dengan ketentuan yang berlaku;
3. Saya memberikan Hak Noneksklusif Tanpa Royalti kepada Universitas Kristen Indonesia yang berhak menyimpan, mengalih media/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilih hak cipta.

Apabila di kemudian hari ditemukan pelanggaran Hak Cipta dan Kekayaan Intelektual atau Peraturan Perundangan-undangan Republik Indonesia lainnya dan integritas akademik dalam karya saya tersebut, maka saya bersedia menanggung secara pribadi segala bentuk tuntutan hukum dan sanksi akademis yang timbul serta membebaskan Universitas Kristen Indonesia dari segala tuntutan hukum yang berlaku.

Jakarta, 23 Juni 2025

Yang menyatakan,

(ChanroAgnim Situmorang)

KATA PENGANTAR

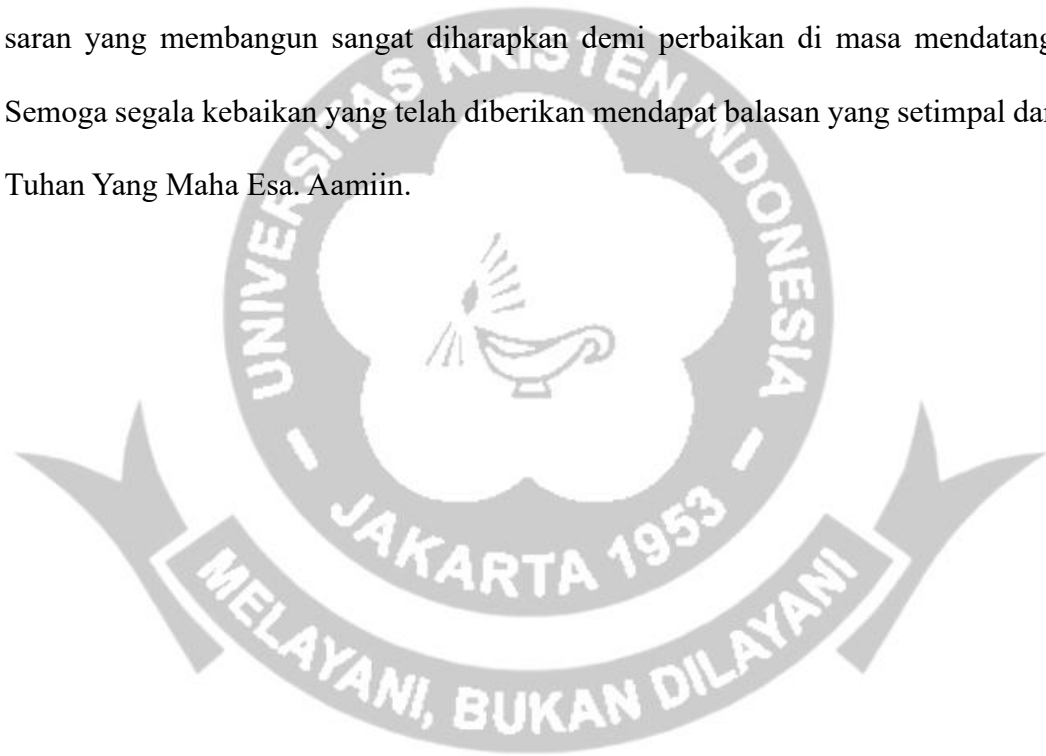
Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulisan laporan tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik dan lancar. Laporan ini disusun sebagai salah satu syarat untuk mengikuti Sidang Ujian Sarjana serta memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T) pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia.

Adapun pokok pembahasan dalam laporan tugas akhir ini adalah “Daur Ulang Langsung Katoda LFP Bekas melalui Reaksi Berbasis Padat (Solid-State) untuk Digunakan Kembali dalam Baterai Litium-Ion”, yang telah diselesaikan dengan sebaik-baiknya. Penulis menyadari bahwa penyusunan laporan ini tidak terlepas dari dukungan, bimbingan, dan bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati, penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Diky Antonius, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Kristen Indonesia, atas persetujuan dan dukungannya terhadap penyusunan tugas akhir ini.
2. Bapak Ir. Budiarto, M.Sc., selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin, yang telah memberikan izin dan arahan selama proses penulisan laporan.
3. Melya Dyanasari Sebayang, S.Si., MT selaku Dosen Pembimbing 1, yang telah dengan tulus dan sabar memberikan bimbingan, masukan, dan arahan selama proses penyusunan.

4. Dr. Manogari Sianturi, S.Si.,MT. selaku Dosen Pembimbing 2, yang juga telah membimbing dengan penuh kesabaran dan perhatian.
5. Kedua orang tua yang memberi dukungan material dan spiritual.
6. Semua pihak yang berjasa namun tidak dapat disebutkan satu persatu di sini.

Akhir kata, penulis berharap semoga laporan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat, baik bagi mahasiswa lain maupun bagi penulis sendiri. Penulis juga menyadari bahwa laporan ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi perbaikan di masa mendatang. Semoga segala kebaikan yang telah diberikan mendapat balasan yang setimpal dari Tuhan Yang Maha Esa. Aamiin.



DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN KARYA TUGAS AKHIR.....	ii
HALAMAN PERSETUJUAN DOSEN PEMBIMBING SKRIPSI.....	iii
HALAMAN PERSETUJUAN TIMU PENGUJI SKRIPSI	iv
HALAMAN PERNYATAAN DAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	ix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	12
1.3 Batasan Masalah.....	12
1.4 Tujuan Penelitian.....	13
1.5 Manfaat Penelitian.....	13
1.5.1 Untuk Penelitian.....	13
1.5.2 Untuk Umum	13
1.6 Metode Pengumpulan Data	14
1.7 Sistematika Penulisan.....	14
BAB II LANDASAN TEORI	16
2.1 Baterai	16
2.1.1 Jenis-jenis Baterai	18
2.2 Baterai Sekunder Lithium	20
2.3 Material Kathoda Baterai Sekunder Lithium	22
2.4 Baterai Ion Lithium/ <i>Lithium Ion Battery</i> (LIB).....	24
2.5 Katoda Lithium Ferofosfat (LiFePO ₄).....	26
2.6 Jenis- Jenis Katoda	27
2.6.1 LiMn ₂ O ₄ (Lithium Manganese Oxide - LMO)	27
2.6.2 LiNiCoAlO ₂ (Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide -NCA)	27

2.6.3 Li(NixMnyCoz)O ₂ (Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide - NMC)	28
2.6.4 LiFePO ₄ (Lithium Iron Phosphate).....	28
2.6.5 Daur Ulang Baterai Lithium-Ion	29
2.6.6 Kelebihan dan Kekurangan Daur Ulang LFP	29
2.7 Zat-zat yang digunakan untuk membuat Lithium Ferro Phosphate (LFP)..	32
2.7.1 Senyawa Oksida dari Besi	32
2.7.2 Li ₂ CO ₃	32
2.7.3 NH ₄ H ₂ PO ₄	32
2.8 Pemulihan dan Proses Daur Ulang Material Katoda LiFePO ₄	32
2.8.1 Pre-treatment.....	33
2.8.2 Pemisahan Bahan Aktif.....	34
2.8.3 Regenerasi dan Pemanfaatan LiFePO ₄	35
2.8.4 Kalsinasi	36
2.9 Metode Sintesis Material Kathoda	37
2.9.1 Metode Sintesis Solid-State	37
2.9.2 Metode Sintesis Sol-Gel	37
2.9.3 Metode Hidrotermal.....	38
2.9.4 Regenerasi langsung	38
2.10 Jenis-Jenis Karakterisasi.....	39
2.10.1 Karakterisasi X-Ray Diffraction (XRD).....	39
2.10.2 Karakterisasi Scanning Electron Microscope (SEM)	41
2.10.3 ICP (Inductively Coupled Plasma)	42
2.11 Jenis-Jenis Pemanasan (Treatment)	43
2.11.1 Sintering	43
2.11.2 Kalsinasi.....	44
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	45
3.1 Tempat Dan Waktu	45
3.1.1 Tempat Penelitian	45
3.1.2 Waktu Penelitian	45

3.2 Alat Dan Bahan	47
3.2.1 Bahan Penelitian	47
3.2.2 Sintesis sampel.....	49
3.3 Flow Chart.....	50
3.4 Alat Karakterisasi Sampel	51
3.5 Prosedur Penelitian.....	53
3.5.1 Preparasi Sampel Uji	53
3.6 Proses Kalsinasi.....	56
3.6.1 Persiapan Sampel.....	56
3.6.2 Persiapan Peralatan.....	56
3.6.3 Proses Pemanasan (Kalsinasi)	56
3.6.4 Pendinginan Sampel	57
3.7 Tahap Sintesis.....	57
3.8 Cara Pengolahan Data	57
3.9 Tahap Karakterisasi	58
3.9.1 Scanning Electron Microscope (SEM)	58
3.9.2 X-Ray Diffraction (XRD).....	59
3.10 Variabel Penelitian.....	60
3.10.1 Variabel Bebas:	60
3.10.2 Variabel Terikat:.....	60
3.10.3 Variable Control:.....	60
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	61
4.1 Hasil Desain	61
4.2 Hasil Karakterisasi	61
4.2.1 Hasil dan Analisa Scanning Electron Microscope (SEM).....	61
4.2.2 Hasil Difraksi Sinar-X (XRD).....	67
4.2.3 Pengujian Konduktivitas Listrik.....	74
4.2.4 Pengujian Cyclic Voltammetry (CV).....	75

BAB V KESIMPULAN.....	78
5.1 Kesimpulan.....	78
5.2 Saran	79
 DAFTAR PUSTAKA.....	 81
LAMPIRAN.....	85

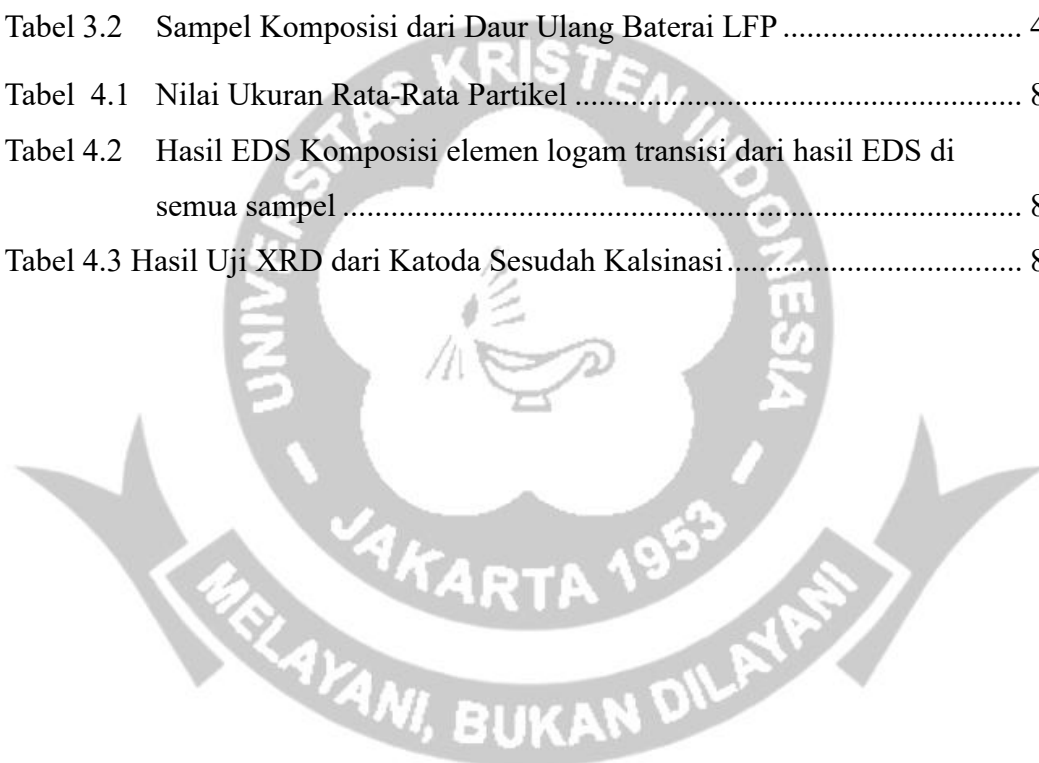


DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Skema Daur Ulang LFP.....	18
Gambar 1.2 Ilustrasi skematik rute daur ulang untuk katoda.....	20
Gambar 2.1 Baterai LFP	32
Gambar 2.2 Baterai Primer	33
Gambar 2.3 Skema Kerja Baterai Sekunder	36
Gambar 2.4 Perbandingan Densitas & Energi Spesifik baterai	40
Gambar 2.5 Mekanisme proses elektrokimia.....	41
Gambar 2.6 Pre-treatment.....	34
Gambar 2.7 Pemisahan Bahan Aktif	40
Gambar 2.8 Difraksi sinar x oleh atom-atom pada bidang kristal	40
Gambar 2.9 Perubahan struktur mikro pada saat sintering[41].....	43
Gambar 3.1 Flowchart penelitian.....	69
Gambar 3.2 Peralatan Penelitian[42]	70
Gambar 3.2 Pemanas Awal(450 ⁰ C).....	71
Gambar 3.3 Pemanasan Lanjutan(800 ⁰ C).....	72
Gambar 3.4 Kalsinasi Sampel(700 ⁰ C).....	73
Gambar 3. 5 X-Ray Diffraction Apparatus ^[20]	76
Gambar 4.1 SEM LiFePO ₄ sebelum dan sesudah regenerasi pada rasio molar yang berbeda.	79
Gambar 4.2 Ukuran partikel sampel sebelum dan setelah regenerasi.....	82
Gambar 4.3 Ukuran partikel rata-rata Katoda sebelum dan sesudah kalsinasi ..	83
Gambar 4.4 Hasil gabungan Uji XRD dari beberapa Sampel.....	89

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Karakteristik bahan kathoda baterai sekunder	22
Tabel 2.2 Parameter elektrokimia bebera material kathoda baterai sekunder lithium	24
Tabel 3.1 Jadwal pelaksanaan penelitian	47
Tabel 3.2 Sampel Komposisi dari Daur Ulang Baterai LFP	48
Tabel 4.1 Nilai Ukuran Rata-Rata Partikel	83
Tabel 4.2 Hasil EDS Komposisi elemen logam transisi dari hasil EDS di semua sampel	84
Tabel 4.3 Hasil Uji XRD dari Katoda Sesudah Kalsinasi	88



ABSTRAK

Permintaan yang meningkat untuk baterai lithium-ion (Li-ion), terutama yang berbasis Lithium Iron Phosphate (LiFePO_4 atau LFP), menyoroti kebutuhan mendesak akan metode daur ulang yang efisien dan ramah lingkungan. Studi ini berfokus pada daur ulang langsung bahan katoda LFP bekas melalui metode reaksi fase padat, dengan menekankan pengenalan kembali lithium dan penggunaan atmosfer inert (gas nitrogen) selama proses sintesis. Bahan utama yang digunakan termasuk LiOH , Fe_2O_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, dan glukosa sebagai aditif konduktif. Proses kalsinasi dilakukan pada $700\text{ }^\circ\text{C}$ selama 9 jam di bawah atmosfer nitrogen. Bahan yang dihasilkan ditandai menggunakan XRD dan SEM-EDS untuk menganalisis struktur kristal dan morfologi permukaannya. Studi ini menemukan bahwa pengenalan kembali lithium dan aliran nitrogen berkontribusi pada pembentukan kristal LiFePO_4 tipe olivin yang lebih seragam dan stabil. Selain itu, penambahan karbon melalui glukosa meningkatkan konduktivitas listrik dan struktur permukaan. Pendekatan daur ulang langsung ini berhasil mengembalikan bahan katoda aktif dengan sifat yang mendekati yang baru disintesis, menawarkan alternatif yang lebih efisien secara energi dan berkelanjutan secara lingkungan dibandingkan dengan metode hidrometalurgi atau pirometalurgi. Temuan ini menunjukkan bahwa sintesis dalam fase padat dengan pengendalian atmosfer dan komposisi yang dioptimalkan memberikan solusi yang menjanjikan untuk penggunaan kembali baterai LFP yang telah habis dalam aplikasi penyimpanan energi.

Kata Kunci: Solid State Method, LiFePO_4 , Direct Recycling of Spent LFP, Cathode, Li-ion batteries

ABSTRACT

The increasing demand for lithium-ion batteries (Li-ion), especially those based on Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄ or LFP), highlights the urgent need for efficient and environmentally friendly recycling methods. This study focuses on the direct recycling of spent LFP cathode materials through the solid-state reaction method, emphasizing the reintroduction of lithium and the use of an inert atmosphere (nitrogen gas) during the synthesis process. The primary materials used include LiOH, Fe₂O₃, (NH₄)₂HPO₄, and glucose as a conductive additive. The calcination process was carried out at 700 °C for 9 hours under a nitrogen atmosphere. The resulting materials were characterized using XRD and SEM-EDS to analyze their crystal structure and surface morphology. The study found that lithium reintroduction and nitrogen flow contributed to the formation of more uniform and stable olivine-type LiFePO₄ crystals. Additionally, carbon addition via glucose improved electrical conductivity and surface structure. This direct recycling approach successfully recovered active cathode materials with properties close to those of newly synthesized ones, offering a more energy-efficient and environmentally sustainable alternative compared to hydrometallurgical or pyrometallurgical methods. These findings demonstrate that solid-state synthesis with controlled atmosphere and optimized composition provides a promising solution for the reuse of spent LFP batteries in energy storage applications.

Keywords: Solid State Method, LiFePO₄, Direct Recycling of Spent LFP, Cathode, Li-ion batteries