

**PENGARUH DOPING MANGAN (Mn) TERHADAP
STRUKTUR KRISTAL, MORFOLOGI, DAN
KOMPOSISI KATODA LiFePO_4 HASIL
SINTESIS *SOLID-STATE***

SKRIPSI

Oleh

**ERWIN LASE
2151050017**



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

**PENGARUH DOPING MANGAN (Mn) TERHADAP
STRUKTUR KRISTAL, MORFOLOGI, DAN
KOMPOSISI KATODA LiFePO_4 HASIL
SINTESIS *SOLID-STATE***

SKRIPSI

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

Oleh

**ERWIN LASE
2151050017**



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



PERNYATAAN KEASLIAN KARYA TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan dibawah ini

Nama : Erwin Lase

NIM : 2151050017

Program Studi : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Dengan ini menyatakan bahwa tugas akhir yang berjudul "PENGARUH DOPING MANGAN (Mn) TERHADAP STRUKTUR KRISTAL, MORFOLOGI, DAN KOMPOSISI KATODA LiFePO_4 HASIL SINTESIS *SOLID-STATE*" adalah:

1. Dibuat dan diselesaikan sendiri dengan menggunakan hasil kuliah, tinjauan lapangan, buku-buku dan jurnal acuan yang tertera di dalam referensi pada karya tulis ilmiah akhir saya.
2. Bukan merupakan duplikasi karya tulis yang sudah diduplikasikan atau yang pernah dipakai untuk mendapatkan gelar ahli madya 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 tulis ilmiah akhir ini dianggap batal.

Jakarta, 23 Juni 2025



(Erwin Lase)



UNIVERSITAS KRISTEN INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK

PERSETUJUAN DOSEN PEMBIMBING TUGAS AKHIR

"PENGARUH DOPING MANGAN (MN) TERHADAP
STRUKTUR KRISTAL, MORFOLOGI, DAN
KOMPOSISI KATODA LiFePO_4 HASIL
SINTESIS *SOLID-STATE*"

Nama : Erwin Lase
NIM : 2151050017
Program Studi : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik

Telah diperiksa dan disetujui untuk diajukan dan dipertahankan dalam Sidang
Tugas Akhir guna mencapai gelar Sarjana Strata Satu pada Program Studi Teknik
Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia.

Jakarta, 23 Juni 2025

Menyetujui:

Pembimbing I

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

Pembimbing II

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



Ic. Ishartanto, M.Sc



Dikky Antonius, S.T., M.Sc



UNIVERSITAS KRISTEN INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK

PERSETUJUAN TIM PENGUJI TUGAS AKHIR

Pada 22 Juni 2025 telah diselenggarakan Sidang Tugas Akhir untuk memenuhi sebagai persyaratan akademik guna memperoleh gelar Sarjana Strata Satu/ pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia, atas nama:

Nama : Erwin Lase

NPM : 2151050017

Program Studi : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Termasuk ujian tugas akhir yang berjudul "PENGARUH DOPING MANGAN (MN) TERHADAP STRUKTUR KRISTAL, MORFOLOGI, DAN KOMPOSISI KATODA LiFePO_4 HASIL SINTESIS *SOLID-STATE*" oleh penguji yang terdiri dari:

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

Jakarta, 25 Juni 2025



UNIVERSITAS KRISTEN INDONESIA

Pernyataan Dan Persetujuan Publikasi Tugas Akhir

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Erwin Lase
NPM : 2151050017
Program Studi : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis Tugas Akhir : Skripsi
Judul : Pengaruh Doping Mangan (Mn) Terhadap Struktur Kristal, Morfologi, Dan Komposisi Katoda LiFePO_4 Hasil Sintesis *Solid-State* Menyatakan Bahwa:

1. Tugas akhir tersebut adalah benar karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan bukan duplikasi karya tulis yang sudah dipublikasikan atau yang pernah dipakai untuk mendapatkan gelar akademik diperguruan tinggi manapun;
2. Tugas akhir tersebut bukan merupakan plagiat dari hasil karya pihak lain, dan apabila saya mengutip dari karya orang lain maka akan dicantumkan sebagai referensi sesuai dengan ketentuan yang berlaku;
3. Saya memberikan Hak *Non-eksklusif* 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.

Dibuat di Jakarta
Pada Tanggal 23 Juni 2025
Yang Menyatakan

(Erwin Lase)

KATA PENGANTAR

Saya mengucapkan terima kasih kepada Tuhan Yang Maha Esa atas semua berkat dan rahmat-Nya yang telah membantu penulis menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik. Tugas akhir ini dibuat untuk memenuhi persyaratan sarjana Program Studi Teknik Mesin di Fakultas Teknik Universitas Kristen Indonesia. Tugas Akhir ini berisi: “Pengaruh Doping Mangan (Mn) Terhadap Struktur Kristal, Morfologi, Dan Komposisi Katoda LiFePO_4 Hasil Sintesis *Solid-State*”.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan laporan tugas akhir ini tidak lepas dari bimbingan dan tentunya bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih banyak kepada:

1. Orang tua tercinta yang selalu berjuang dalam mengupayakan yang terbaik untuk kehidupan penulis, serta dukungan doa yang teramat sangat tulus sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhirnya.
2. Bapak Ir. Budiarto M.Sc. selaku Kaprodi Jurusan Teknik Mesin Universitas Kristen Indonesia.
3. Melya Dyanasari Sebayang, S. Si., MT. selaku dosen pembimbing I dan Bapak Manogari Sianturi, S. Si., MT. selaku dosen pembimbing II yang telah banyak memberikan bantuan dan bimbingan dalam penulisan Tugas Akhir ini.
4. Ibu prof. rer. Nat. Evvy Kartini selaku pendiri *National battery Research Institute* karena telah memberikan kesempatan untuk memperbolehkan melakukan penelitian.
5. Bapak Bagus Anggraini selaku penanggung jawab penulis selama melaksanakan penelitian di *National battery Research Institute*.
6. Seluruh Staf dan Pegawai di *National battery Research Institute*.
7. Seluruh staf dan dosen Program Studi Teknik Mesin Universitas Kristen Indonesia yang telah mengajar dan membimbing Penulis.
8. Elfrida Oktaviani Manao yang sudah mendukung penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
9. Rekan-rekan mahasiswa Fakultas Teknik Program Studi Teknik Mesin angkatan 2021.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki keterbatasan dan kekurangan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan untuk perbaikan di masa mendatang. Semoga hasil penelitian ini dapat

memberikan manfaat bagi pembaca serta pihak-pihak yang berkepentingan di bidang ini.

Sebagai penutup, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar besarnya. Semoga Tuhan Yang Maha Esa senantiasa melimpahkan rahmat dan berkat-Nya kepada kita semua.

Jakarta, 23 Juni 2025



DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA TUGAS AKHIR.....	i
PERSETUJUAN DOSEN PEMBIMBING TUGAS AKHIR.....	ii
PERSETUJUAN TIM PENGUJI TUGAS AKHIR	iii
PERNYATAAN DAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR	iv
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR PERSAMAAN	xii
ABSTRAK	xiii
ABSTRACT	xiv
 BAB I PENDAHULUAN.....	 1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Batasan Penelitian	4
1.6 Metode Penelitian.....	4
1.7 Sistematika Penulisan.....	6
 BAB II LANDASAN TEORI	 7
2.1 Baterai.....	7
2.1.1 Definisi Baterai.....	7
2.1.2 Klasifikasi Baterai.....	7
2.2 Baterai Lithium-ion	8
2.2.1 Sejarah dan Perkembangan Baterai Lithium-ion	8
2.2.2 Komponen Utama Baterai Lithium-ion	9
2.2.3 Prinsip Kerja Baterai Lithium-ion	9

2.3 Material Katoda Baterai Lithium-ion	10
2.3.1 Klasifikasi Material Katoda	10
2.3.2 Tinjauan Material Katoda Konvensional	11
2.4 Lithium Besi Fosfat (LiFePO_4)	12
2.4.1 Struktur Kristal dan Sifat Fisik LiFePO_4	12
2.4.2 Keunggulan LiFePO_4 sebagai Material Katoda.....	12
2.4.3 Keterbatasan LiFePO_4 dan Strategi Peningkatannya	13
2.5 Doping pada LiFePO_4	14
2.5.1 Tujuan dan Mekanisme Doping	14
2.5.2 Doping Mangan (Mn) pada LiFePO_4	14
2.6 Peran Penambahan Karbon Hitam.....	15
2.7 Metode Sintesis Material Katoda.....	16
2.7.1 Tinjauan Umum Metode Sintesis.....	16
2.7.2 Metode Solid-State (Reaksi Fasa Padat).....	17
2.8 Penelitian Terdahulu terkait Doping pada Material Katoda LiFePO_4	18
2.9 Ball Mill.....	22
2.10 Peran Nitrogen Sebagai Gas Inert	23
2.10.1 Karakteristik Gas Nitrogen sebagai Atmosfer Inert.....	23
2.10.2 Perubahan Reaksi Oksidasi pada Suhu Tinggi	23
2.10.3 Keunggulan Praktis Penggunaan Gas Nitrogen.....	24
2.10.4 Penerapan dalam Sintesis Material Terdoping.....	24
2.11 Karakterisasi Material dengan XRD, SEM dan EDX	24
2.11.1 X-ray Diffraction (XRD)	24
2.11.2 Mikroskop Elektron Pemindaian (SEM)	26
2.11.3 Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX/EDS).....	27
 BAB III METODE PENELITIAN.....	 29
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian	29
3.2 Bahan dan Peralatan	29
3.2.1 Bahan	29
3.2.2 Alat.....	30

3.3 Prosedur Sintesis Mn-doped LiFePO_4	30
3.3.1 Persiapan Bahan.....	30
3.3.2 Metode Sintetis: Solid-State Reaction	31
3.3.3 Proses Ball-milling	32
3.3.4 Pre-heat	32
3.3.5 Kalsinasi.....	32
3.4 Karakterisasi Material.....	32
3.4.1 Analisis Difraksi Sinar-X (XRD).....	33
3.4.2 Mikroskopi Elektron Scanning (SEM)	33
3.4.3 Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX)	33
3.5 Diagram Alir Penelitian	34
 BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	36
4.1 Hasil Rancangan	36
4.2 Hasil Karakterisasi.....	36
4.2.1 Hasil dan Analisa Difraksi Sinar-X (XRD)	36
4.2.2 Hasil dan Analisa Scanning Electron Microscope (SEM).....	41
4.2.3 Hasil dan Analisa Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX).....	44
 BAB V KESIMPULAN	47
5.1 Kesimpulan.....	47
5.2 Saran	47
 DAFTAR PUSTAKA	49
 LAMPIRAN.....	52

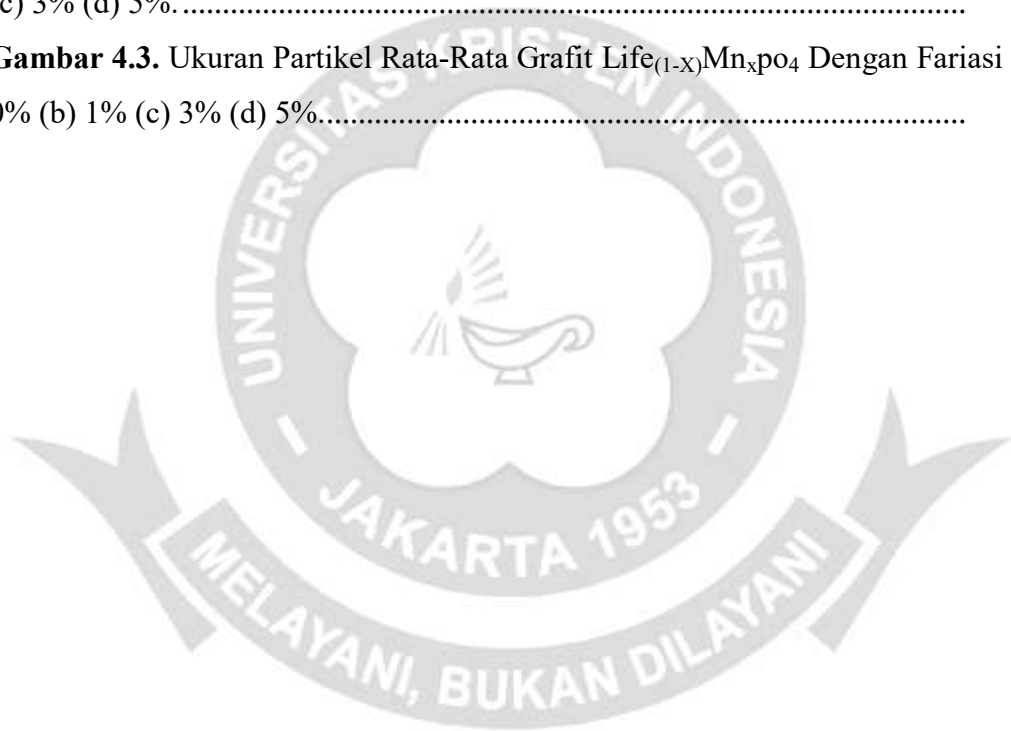
DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Data hasil pendompingan pada material LiFePO_4	18
Tabel 4.1 Hasil EDX komposisi unsur logam transisi di semua sampel	44



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Prinsip Kerja Baterai Lithium-Ion Dalam Kasus (A) Pengisian Dan (B) Pengosongan [9].	10
Gambar 2.2. Struktur kristal olivin LiFePO_4 [3]	12
Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian	34
Gambar 4.1. Pola XRD $\text{LiFe}_{(1-x)}\text{Mn}_x\text{PO}_4$ Dengan Fariasi (a) 0% (b) 1% (c) 3% (d) 5%.	39
Gambar 4.2. Hasil Uji SEM Dari $\text{LiFe}_{(1-x)}\text{Mn}_x\text{PO}_4$ Dengan Fariasi (a) 0% (b) 1% (c) 3% (d) 5%.	42
Gambar 4.3. Ukuran Partikel Rata-Rata Grafit $\text{LiFe}_{(1-x)}\text{Mn}_x\text{PO}_4$ Dengan Fariasi (a) 0% (b) 1% (c) 3% (d) 5%.	43



DAFTAR PERSAMAAN

Persamaan (3.1).....	29
----------------------	----



ABSTRAK

Penelitian ini secara komprehensif menganalisis dampak variasi doping mangan (Mn) terhadap karakteristik struktural dan morfologis material katoda LiFePO_4 yang disintesis melalui metode *solid-state*. Empat sampel dengan variasi konsentrasi doping Mn (0%, 1%, 3%, dan 5%) dikarakterisasi secara mendalam menggunakan teknik X-ray Diffraction (XRD) untuk analisis struktur kristal, *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk morfologi permukaan, serta *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDX) untuk komposisi elemental. Hasil penelitian menunjukkan hubungan kompleks antara konsentrasi doping Mn dengan karakteristik material. Analisis XRD mengungkapkan bahwa doping Mn 1% berhasil mempertahankan struktur olivin LiFePO_4 sebagai fasa dominan dengan kemurnian tinggi. Namun, peningkatan doping hingga 3% dan 5% menyebabkan degradasi struktur kristal yang ditandai dengan munculnya fasa impuritas Fe_2O_3 (hematit) dan Li_3PO_4 secara signifikan, mencapai 56.9% dan 98.9% berturut-turut. Karakterisasi SEM menunjukkan fenomena menarik dimana doping 3% Mn menghasilkan ukuran partikel terkecil (69.7 nm), mengindikasikan efek penghambatan pertumbuhan butir yang optimal pada konsentrasi ini. Namun, analisis EDX tidak mendeteksi keberadaan Mn secara signifikan, yang diduga kuat disebabkan oleh ketidakhomogenan distribusi dopan selama proses ball milling dan pembentukan aglomerat. Temuan utama penelitian ini menggarisbawahi beberapa poin kritis: konsentrasi doping Mn 1% terbukti sebagai titik optimal untuk mempertahankan integritas struktur olivin LiFePO_4 , sementara doping $\geq 3\%$ menyebabkan destabilisasi struktur kristal yang dimediasi melalui mekanisme oksidasi Fe^{2+} menjadi Fe^{3+} . Hasil penelitian juga mengungkapkan bahwa efek penghambatan pertumbuhan butir mencapai puncaknya pada doping 3% Mn, ditunjukkan oleh ukuran partikel terkecil (69.7 nm) yang berhasil dihasilkan. Namun demikian, tantangan utama dalam sintesis terletak pada ketidakhomogenan distribusi dopan yang terdeteksi melalui analisis EDX, yang diduga menjadi penyebab utama ketidakteraturan dalam hasil karakterisasi material. Rekomendasi untuk penelitian lanjutan mencakup optimasi proses ball milling, modifikasi atmosfer sintesis, serta pengujian elektrokimia untuk mengevaluasi performa nyata material.

Kata kunci: LiFePO_4 , Doping mangan, Sintesis *solid-state*, Material katode, XRD–SEM–EDS.

ABSTRACT

This study comprehensively analyzes the impact of manganese (Mn) doping variation on the structural and morphological characteristics of LiFePO_4 cathode materials synthesized through a solid-state method. Four samples with varying Mn doping concentrations (0%, 1%, 3%, and 5%) were characterized in depth using X-ray Diffraction (XRD) techniques for crystal structure analysis, Scanning Electron Microscopy (SEM) for surface morphology, and Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) for elemental composition. The results show a complex relationship between Mn doping concentration and material characteristics. XRD analysis revealed that 1% Mn doping successfully maintained the olivine structure of LiFePO_4 as the dominant phase with high purity. However, increasing the doping to 3% and 5% caused degradation of the crystal structure characterized by the emergence of significant Fe_2O_3 (hematite) and Li_3PO_4 impurity phases, reaching 56.9% and 98.9%, respectively. SEM characterization showed an interesting phenomenon where 3% Mn doping resulted in the smallest particle size (69.7 nm), indicating an optimal grain growth inhibitory effect at this concentration. However, EDX analysis did not detect significant Mn presence, which is strongly suspected to be due to the inhomogeneity of the dopant distribution during the ball milling process and the formation of agglomerates. The main findings of this study highlight several critical points: a Mn doping concentration of 1% was shown to be the optimal point to maintain the integrity of the olivine LiFePO_4 structure, while doping $\geq 3\%$ caused destabilization of the crystal structure mediated through the oxidation mechanism of Fe^{2+} to Fe^{3+} . The results also revealed that the grain growth inhibitory effect peaked at 3% Mn doping, indicated by the smallest particle size (69.7 nm) successfully produced. However, the main challenge in the synthesis lies in the inhomogeneity of the dopant distribution detected by EDX analysis, which is suspected to be the main cause of the irregularity in the material characterization results. Recommendations for further research include optimization of the ball milling process, modification of the synthesis atmosphere, and electrochemical testing to evaluate the actual performance of the material.

Keywords: LiFePO_4 , Manganese doping, Solid-state synthesis, Cathode material, XRD–SEM–EDS