

**PENGARUH PENAMBAHAN LITHIUM DAN WAKTU  
PENGADUKAN TERHADAP SINTESIS NMC-721  
DENGAN METODE KO-PRESIPITASI  
OKSALAT**

**SKRIPSI**

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari Jurusan  
Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa



Oleh:

Revina Dea Nanda  
3334190047

**JURUSAN TEKNIK METALURGI FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA  
CILEGON – BANTEN  
2024**

LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH PENAMBAHAN LITHIUM DAN WAKTU  
PENGADUKAN TERHADAP SINTESIS NMC-721  
DENGAN METODE KO-PRESIPITASI OKSALAT**


SKRIPSI

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari Jurusan  
Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Disetujui untuk Jurusan Teknik Metalurgi oleh:

Pembimbing I

Pembimbing II



**Adhitya Trenggono. S.T., M.Sc.**

NIP. 197804102003121001



**Prof. Dr.rer.nat. Evvy Kartini**

NIP. 196504221988102001

LEMBAR PERSETUJUAN

**PENGARUH PENAMBAHAN LITHIUM DAN WAKTU  
PENGADUKAN TERHADAP SINTESIS NMC-721  
DENGAN METODE KO-PRESIPITASI OKSALAT**

**SKRIPSI**

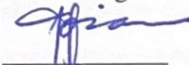


Disusun dan diajukan oleh

**Revina Dea Nanda**

**3334190047**

Telah disidangkan di depan dewan penguji pada tanggal

Selasa, 9 Juli 2024

	Susunan Dewan Penguji	Tanda Tangan
Penguji I	: Prof. Alfirano, ST., MT., Ph.D.	
Penguji II	: Dr. Amalia Sholehah, S.Si., M.Si.	
Penguji III	: Anistasia Milandia, ST., MT.	

Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Metalurgi



**Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D.**

**NIP. 19800030720050111002**



## LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya sebagai penulis Skripsi berikut:

Judul : Pengaruh Penambahan Lithium dan Waktu Pengadukan  
pada Sintesis NMC-721 dengan Metode Ko-presipitasi  
Oksalat

Nama : Revina Dea Nanda

NIM : 3334190047

Fakultas : Teknik

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Skripsi tersebut di atas adalah benar-benar hasil karya asli saya dan tidak memuat hasil karya orang lain, kecuali dinyatakan melalui rujukan yang benar dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila dikemudian hari ditemukan hal-hal yang menunjukkan bahwa sebagian atau bahkan seluruh karya ini bukan karya saya, maka saya bersedia dituntut melalui hukum yang berlaku. Saya juga bersedia menanggung segala akibat hukum yang timbul dari pernyataan yang secara sadar dan sengaja saya nyatakan melalui lembar ini.

Cilegon, 08 Juli 2024



Revina Dea Nanda  
NIM. 3334190047

## ABSTRAK

Baterai merupakan sebuah media penyimpanan energi yang terdiri dari dua jenis elektroda dalam elektrolit yang terpisah oleh sebuah separator. Baterai yang saat ini banyak dilakukan pengembangan adalah baterai yang *rechargeable*. NMC merupakan katoda yang digunakan dalam pembuatan baterai *rechargeable* dan terbukti mampu memberikan kombinasi terbaik. NMC dapat disintesis melalui beberapa metode salah satunya adalah metode ko-presipitasi dengan menggunakan oksalat yang dinilai ramah lingkungan dan murah jika dibandingkan dengan metode lain. Dalam penelitian ini dilakukan sintesis NMC-721 menggunakan metode ko-presipitasi oksalat dengan variasi konsentrasi penambahan lithium 3% dan 5% serta variasi pada waktu pengadukan (30, 60, 180) menit. Material hasil sintesis dikarakterisasi dengan menggunakan XRD, XRF dan PSA. Uji performa dilakukan dengan EIS dan CV. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedua sampel NMC-721 dengan Li 3% dan 5% menunjukkan struktur heksagonal. Variasi waktu pengadukan dengan hasil terbaik ditunjukkan oleh variasi 60 menit dengan volume  $103,383 \text{ \AA}^3$  dan  $R_{wp}$  tertinggi (4,74157) dengan struktur kristal heksagonal. Performa baterai dengan variasi waktu pengadukan 30 menit dan 60 menit diuji dengan menggunakan *Electrochemical Impedance Spectrometry* dan *Cyclic Voltametry*. Hasilnya menunjukkan nilai resistansi transfer muatan ( $R_p$ ) pada S60 (262,68  $\Omega$ ) lebih rendah dari nilai resistansi transfer muatan ( $R_p$ ) pada S30 (317,58  $\Omega$ ). Nilai resistansi transfer muatan ( $R_p$ ) yang tinggi menunjukkan bahwa elektron pada material katoda berjalan dengan lebih lambat. Pada sampel dengan waktu pengadukan 30 menit (S30) juga ditunjukkan nilai konduktivitas ionik ( $\sigma_i$ ) yang lebih rendah dari sampel dengan waktu pengadukan (S60). Hal ini mengindikasikan bahwa S60 memiliki konduktivitas ionik yang lebih baik. Hasil *Cyclic Voltametry* juga menunjukkan S60 memiliki proses interkalasi dan de-interkalasi yang lebih baik.

**Kata Kunci:** NMC-721, lithium-ion, ko-presipitasi, waktu pengadukan, resistansi muatan

## ABSTRACT

A battery is an energy storage medium consisting of two types of electrodes in an electrolyte separated by a separator. The battery that is currently being developed is a rechargeable battery. NMC is a cathode used in the manufacture of rechargeable batteries and has been proven to provide the best combination. NMC can be synthesized through several methods, one of which is the co-precipitation method using oxalate, which is considered environmentally friendly and cheap when compared to other methods. In this study, NMC-721 was synthesized using the oxalate co-precipitation method with variations in the concentration of 3% and 5% lithium addition and variations in stirring time (30, 60, 180) minutes. The synthesized materials were characterized using XRD, XRF, and PSA. Performance tests were carried out with EIS and CV. The results showed that both NMC-721 samples with 3% and 5% Li showed a hexagonal structure. The stirring time variation with the best results is indicated by the 60-minute variation with a volume of 103.383 Å<sup>3</sup> and the highest Rwp (4.74157) with a hexagonal crystal structure. Battery performance with 30-minute and 60-minute stirring time variations was tested using electrochemical impedance spectrometry and cyclic Voltammetry. The results show that the value of charge transfer resistance ( $R_p$ ) in S60 (262.68  $\Omega$ ) is lower than the value of charge transfer resistance ( $R_p$ ) in S30 (317.58  $\Omega$ ). A high value of charge transfer resistance ( $R_p$ ) indicates that the electrons in the cathode material travel more slowly. In the sample with a stirring time of 30 minutes (S30), the ionic conductivity value ( $\sigma_i$ ) was also shown to be lower than that of the sample with the stirring time (S60). This indicates that the S60 has better ionic conductivity. The results of cyclic voltammetry also show that the S60 has better intercalation and de-intercalation processes.

**Keywords:** NMC-721, lithium-ion, co-precipitation, aging time, charge transfer resistance

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, atas segala curahan rahmat serta karunia-Nya, sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi yang berjudul “Pengaruh Penambahan Lithium dan Waktu pengadukan Terhadap Sintesis NMC-721 Dengan Metode Ko-presipitasi Oksalat” dengan baik. Skripsi ini ditulis dalam rangka memenuhi syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Metalurgi di Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Dalam penyelesaian studi dan penulisan skripsi ini, penulis menyadari bahwa naskah skripsi ini tidak lepas dari kerjasama dan bantuan dari berbagai pihak. Dengan penuh rasa hormat, penulis mengucapkan terima kasih yang tak terhingga kepada:

1. Bapak Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Metalurgi FT Untirta
2. Bapak Adhitya Trenggono, S.T., M.Sc., selaku Pembimbing I
3. Ibu Prof. Dr.rer.nat. Evvy Kartini selaku pembimbing II
4. Kedua orang tua, kakak dan adik yang telah mendukung penulis secara moral dan materil.
5. Teman-teman selama penelitian di National Battery Research Institute (NBRI), Baihaqi Muhammad, Sigit Aryo Kristianto, Agung Fauzi Rahman, Raychan Abyqa yang telah menjadi support system terbaik.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penyusunan skripsi ini, sehingga penulis terbuka untuk saran, koreksi, dan tanggapan untuk perbaikan penelitian ini. Penulis berharap agar skripsi ini bermanfaat khususnya bagi penulis dan bagi pembaca pada umumnya.

Cilegon, 08 Juli 2024

Revina Dea Nanda

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	ii
<b>LEMBAR PERSETUJUAN</b> .....	iii
<b>LEMBAR PERNYATAAN</b> .....	iv
<b>ABSTRAK</b> .....	v
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	vi
<b>DAFTAR ISI</b> .....	vii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	x
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xi
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Identifikasi Masalah.....	6
1.3 Tujuan .....	6
1.4 Batasan Masalah .....	7
1.5 Sistematika Penulisan .....	7
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Jenis – Jenis Baterai .....	9
2.1.1 Baterai Timbal-Asam ( <i>Lead-acid batteries</i> ) .....	9
2.1.2 Baterai Nikel-Kadmium ( <i>Ni-Cd Batteries</i> ) .....	10
2.1.3 Baterai Natrium-Sulfur ( <i>Sodium-sulfur batteries</i> ).....	12



2.2	Baterai Lithium Ion ( <i>Li-Ion Batteries</i> ).....	13
2.3	Baterai Nikel-Mangan-Kobalt ( <i>Nickel-manganese-cobalt batteries</i> )...	15
2.4	Komponen Baterai <i>Lithium Ion</i> .....	16
2.3.1	Elektroda Positif (Katoda).....	16
2.3.2	Elektroda Negatif (Anoda).....	18
2.3.3	Elektrolit.....	19
2.3.4	Separator .....	19
2.5	Prinsip Kerja Baterai Lithium .....	20
2.6	Metode Sintesis Katoda.....	23
2.5.1	<i>Self-ignition Combustion (SIC)</i> .....	24
2.5.2	Metode Sol-Gel.....	24
2.5.3	<i>Solid-state</i> .....	25
2.5.4	Metode Hidrotermal.....	25
2.5.5	Metode Ko-Presipitasi.....	26

### **BAB III METODE PENELITIAN**

3.1	Diagram Alir Penelitian .....	31
3.1.1	Material Aktif Katoda NMC-721 untuk Karakterisasi XRF dan PSA .....	31
3.1.2	Baterai Koin Sel Untuk Uji EIS dan CV.....	32
3.2	Alat dan Bahan .....	33
3.2.1	Alat-alat yang Digunakan.....	33
3.2.2	Bahan-bahan yang Digunakan.....	33
3.3	Prosedur Penelitian .....	34
3.4	Karakterisasi Material .....	36
3.4.1	<i>X-Ray Diffraction (XRD)</i> .....	36

3.4.1 <i>X-Ray Fluorescence (XRF)</i> .....	38
3.4.2 <i>Particle Size Analyzer (PSA)</i> .....	39
3.4.3 <i>Electrochemical Impedance Spectrometry (EIS)</i> .....	39
3.4.4 <i>Cyclic Voltammetry (CV)</i> .....	43
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	46
4.1 Pengaruh Penggunaan Metode Ko-Presipitasi Oksalat dan Variasi Waktu pengadukan.....	46
4.1.1 Struktur Kristal Hasil Sintesis NMC-721 dengan Variasi Waktu pengadukan.....	46
4.1.2 Rasio Komposisi NMC-721 .....	49
4.1.3 Distribusi Ukuran Partikel.....	50
4.2 Pengaruh Penambahan Lithium Konsentrasi 3% dan 5% Pada Struktur Kristal Hasil Sintesis NMC-721 .....	51
4.3 Analisa EIS dan CV Pada Sampel NMC-721 Dengan Variasi Waktu pengadukan.....	55
4.3.1 Analisa <i>Electrochemical Impedance Spectrometry (EIS)</i> .....	55
4.3.2 Analisa <i>Cyclic Voltametry (CV)</i> .....	58
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
5.1 Kesimpulan.....	60
5.2 Saran.....	61
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	62
<b>LAMPIRAN A CONTOH PERHITUNGAN</b> .....	69
<b>LAMPIRAN B DATA PENELITIAN</b> .....	73
<b>LAMPIRAN C GAMBAR ALAT DAN BAHAN</b> .....	82

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Data material katoda dan anoda yang saat ini telah diteliti dan digunakan dalam beberapa aplikasi.....	18
Tabel 4.1	Hasil indeks persetujuan dan properti umum sampel S30, S60 dan S180 dari NMC-721 .....	46
Tabel 4.2	Analisa XRF dari prekursor NMC-721 .....	49
Tabel 4.3	Ukuran partikel dari prekursor NMC-721 .....	50
Tabel 4.4	Properti umum untuk satuan sel .....	52
Tabel 4.5	Parameter material katoda NMC-721 dengan Li 3% dan Li 5% .....	54
Tabel 4.6	Parameter impedansi untuk sampel dengan waktu pengadukan 30 menit dan 60 menit .....	57
Tabel A.1	Massa Molar Atom .....	70
Tabel A.2	Massa Molar Molekul .....	70
Tabel B.1	Data EIS .....	74
Tabel B.2	Lanjutan Data EIS .....	78

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur baterai timbal-asam .....	9
Gambar 2.2 Struktur baterai nikel-cadmium jenis tertutup.....	11
Gambar 2.3 Struktur baterai nikel-cadmium dengan ventilasi.....	11
Gambar 2.4 Struktur baterai natrium-sulfur .....	12
Gambar 2.5 Struktur baterai lithium-ion.....	15
Gambar 2.6 Skema kerja dan prinsip operasi baterai lithium-ion .....	21
Gambar 2.7 Proses manufaktur baterai lithium-ion.....	21
Gambar 2.8 Skema susunan sel monolitik .....	23
Gambar 2.9 Rute reaksi ko-presipitasi oksalat .....	28
Gambar 3.1 Diagram alir pembuatan material katoda NMC-721 untuk Uji XRF dan PSA.....	31
Gambar 3.2 Diagram alir pembuatan koin sel untuk uji EIS dan CV .....	32
Gambar 3.3 Skema kerja XRD .....	36
Gambar 3.4 Skema kerja XRF.....	39
Gambar 3.5 Nyquist Plot dan Bode Plot .....	41
Gambar 3.6 Nyquist Plot (Pengukuran Impedansi Komponen Sel) .....	42
Gambar 3.7 Kurva Hasil siklik voltammogram .....	44
Gambar 4.1 Grafik PSA dari prekursor NMC-721.....	50
Gambar 4.2 Pola difraksi untuk sampel NMC-721 dengan 3% Li (a) dan 5% Li (b) .....	51
Gambar 4.3 Pola difraksi XRD pada sampel NMC-811.....	52
Gambar 4.4 Kurva Nyquist untuk sampel dengan waktu pengadukan 30 menit dan 60 menit .....	55

Gambar 4.5 Kurva cyclic voltametry (CV) untuk sampel dengan waktu pengadukan 30 menit (a) dan waktu pengadukan 60 menit (b) ..... 58

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Jumlah penduduk dunia yang terus meningkat telah menyebabkan peningkatan kebutuhan energi untuk memenuhi kebutuhan hidup. Di Indonesia, kebutuhan energi masih didominasi oleh sumber energi fosil yang digunakan untuk pembangkit listrik dan transportasi. Namun, penggunaan sumber energi fosil ini memiliki beberapa kerugian, seperti dampak negatif pada lingkungan akibat zat sisa pembakaran yang beracun. Selain itu, sumber energi fosil ini juga tidak dapat diperbarui (*non-renewable*) [1]. Menurut Kementerian ESDM RI melalui siaran pers Nomor 028.Pers/04/SJI/2021 pada 19 Januari 2021, cadangan minyak bumi di Indonesia akan tersedia hingga 9,5 tahun mendatang, sementara usia cadangan gas bumi Indonesia mencapai 19,9 tahun. Perhitungan cadangan migas ini didasarkan pada data cadangan tahun 2020 dengan asumsi tidak ada penemuan cadangan migas yang baru [2].

Beberapa metode telah diketahui dapat digunakan untuk mengganti bahan bakar fosil yaitu dengan penggunaan sumber energi non konvensional, biomasa, dan biodiesel [1]. Selain itu, penelitian pada perangkat yang mampu menyimpan energi dan dapat menghemat pasokan energi yang berkelanjutan dan tidak memberikan kerugian pada lingkungan juga telah dilakukan. Teknologi penyimpanan energi elektrokimia telah ditemukan pada akhir tahun 1700. Baterai primer tembaga-seng telah ditemukan pada 1799, setelahnya berbagai jenis baterai secara bertahap bermunculan termasuk baterai yang dapat diisi ulang (*rechargeable*).



Baterai *rechargeable* ini mendapat perhatian khusus karena keunggulannya yang dapat menyimpan energi listrik dalam kimia dan dapat digunakan sesuai dengan keinginan pengguna. Penelitian mengenai baterai *rechargeable* ini didasarkan pada performa yang komprehensif, pengaruhnya terhadap lingkungan dan biaya produksinya sebagai kriteria dasar [3].

Baterai yang merupakan sebuah media penyimpanan energi terdiri dari dua jenis elektroda dalam elektrolit yang dipisahkan dengan sebuah separator. Saat ini, baterai yang sedang banyak digunakan adalah baterai yang berbasis lithium-ion. *Lithium-ion batteries* (LIB) telah dikomersilkan dari tahun 1991 oleh SONY dengan kapasitas 80 Wh/kg dan 200 Wh/L dengan sel kimia pertamanya menggunakan  $\text{LiCoO}_2$  sebagai katoda dan kokas petroleum sebagai anoda, penambahan etilen karbonat (EC) sebagai kosolven dapat memberikan perlindungan pada anoda grafit dan tegangan operasi yang lebih tinggi [4]. Setelah formulasi elektrolit diperkenalkan pada tahun 1993 maka dibuatlah  $\text{LiPF}_6$  dalam sebuah campuran EC/DMC. Penggunaan elektrolit ini mampu meningkatkan densitas energi hingga 250 Wh/kg dan 600 Wh/L dan hingga saat ini masih digunakan. Dalam dunia riset baterai, katoda merupakan bagian dari baterai yang hingga saat ini selalu dikembangkan.

Katoda berbasis oksida Cobalt (Co) dapat memberikan densitas energi volumetrik hingga 600 Wh/L, hal ini tentu menjadikan oksida Co pilihan terbaik untuk membuat perangkat yang padu. Namun, Co ternyata memberikan beberapa dampak yang merugikan seperti *raw material* yang mahal dan beracun serta memiliki beberapa potensi risiko. Pada suhu sekitar 200 °C oksigen yang dilepaskan dapat mengoksidasi bagian yang mudah terbakar dalam baterai termasuk elektrolit

organic, sehingga oksida Co tidak cocok pada aplikasi otomotif karena dapat menyebabkan kebakaran atau bahkan ledakan [6]. Beberapa strategi dilakukan untuk mereduksi penggunaan kobalt dalam material baterai salah satunya adalah penggunaan material NCA dimana Co disubstitusi secara parsial oleh nikel (Ni) dan aluminium (Al). Nikel-kobalt-aluminium (NCA) mengandung 12% Co dan telah terjual oleh Tesla dan Panasonic sebagai pengembang pada pasar Eropa. Strategi lain yaitu dengan substitusi Co oleh Ni dan Mn atau yang disebut juga dengan oksida nikel-mangan-kobalt (NMC). Rasio NMC622 ( $\text{LiNi}_{0,6}\text{Mn}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{O}_2$ ) terbukti mampu mereduksi kandungan kobalt dalam baterai dan tengah dikembangkan oleh LG Chem. Saat ini LG Chem masih dalam upaya mengembangkan NMC baterai dengan strategi mereduksi kandungan kobalt dan meningkatkan performa. Beberapa rasio baterai NMC yang sedang dikembangkan adalah NMC-721 ( $\text{LiNi}_{0,7}\text{Mn}_{0,2}\text{Co}_{0,1}\text{O}_2$ ), NMC811 ( $\text{LiNi}_{0,8}\text{Mn}_{0,1}\text{Co}_{0,1}\text{O}_2$ ) dan NCA sebagai sumber tenaga kendaraan listrik generasi terbaru.

NMC merupakan katoda yang dibuat dengan kombinasi antara Ni, Mn dan Co yang mampu memberikan performa baterai yang baik. NMC dirancang untuk menggabungkan keuntungan oksida logam transisi tunggal dan mengurangi kerugian, seperti penggunaan Co yang mahal, dengan harapan meningkatkan efisiensi dan mengurangi biaya. Mn digunakan karena  $\text{Mn}_2\text{O}_4$  lebih stabil daripada  $\text{NiO}_2$  sehingga penggunaan Mn dapat mengurangi irreversibilitas yang disebabkan oleh ketidakstabilan katoda berbasis Ni [7]. Meskipun Co adalah logam yang mahal, keberadaannya juga penting karena Co dapat menstabilkan struktur dan konduktivitas elektrik yang berguna untuk performa elektrokimia jangka panjang. Nikel digunakan untuk mencapai kapasitas spesifik yang tinggi. NMC dapat

disintesis melalui beberapa metode seperti hidrotermal, *solid-state*, sol-gel, *solution-combustion synthesis* (SCS), *molten salt* dan ko-presipitasi.

Metode yang umum digunakan untuk sintesis baterai NMC adalah metode *solid-state* dan metode sol-gel namun kedua metode tersebut memiliki beberapa kerugian. Metode sol-gel memiliki hasil efisiensi elektrokimia yang sangat baik namun metode ini memerlukan prosedur manufaktur yang canggih dan melepas gas  $\text{NO}_x$  ke lingkungan dimana gas ini bersifat racun. Metode reaksi *solid-state* dapat melampaui keterbatasan yang dimiliki oleh metode sol-gel namun material yang dihasilkan memiliki homogenitas yang rendah dan efisiensi elektrokimia yang lebih rendah pula, selain itu metode reaksi *solid-state* juga relatif lebih mahal dalam hal konsumsi energi selama fabrikasi karena memerlukan suhu lingkungan di atas  $900^\circ\text{C}$ . Sehingga dikembangkan metode lain yaitu metode ko-presipitasi yang dapat menjawab kekurangan dari dua metode sebelumnya. Metode ko-presipitasi biasanya menggunakan garam karbonat atau sulfat sebagai prekursor untuk menyediakan ion logam dan menggunakan asam oksalat yang menyediakan radikal  $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$  untuk mendekomposisi radikal karbonat yang terbentuk. Prekursor asam oksalat yang digunakan juga dinilai mampu menghasilkan fitur dan performa NMC yang baik seperti kapasitas *discharge* hingga 153,60 mAh/g dengan retensi 70,9% setelah 100 siklus [8]. Metode ini memungkinkan reaksi berlangsung pada suhu yang relatif lebih rendah dari metode sebelumnya dan memungkinkan untuk memperoleh efisiensi sintesis yang tinggi, kontrol rasio atomik yang mudah dan menghasilkan gas sisa reaksi yang tidak beracun [9]. Namun, metode ko-presipitasi juga memiliki beberapa kekurangan seperti partikel prekursor hidroksida yang dihasilkan seringkali memiliki morfologi yang tidak teratur dan aglomerasi yang

berlebihan dimana hal ini menyebabkan penurunan pada sifat elektrokimia baterai [10]. Hal ini dipengaruhi oleh waktu pengadukan selama proses ko-presipitasi dilakukan. Waktu pengadukan yang terlalu pendek akan menghasilkan partikel dengan kristalinitas yang rendah, sedangkan waktu pengadukan yang terlalu panjang menyebabkan aglomerasi partikel yang tidak normal [11]. Dalam penelitian ini dilakukan studi pengaruh waktu pengadukan terhadap struktur material NMC yang dihasilkan dan dilihat melalui hasil karakterisasi menggunakan XRD (*X-ray Diffraction*), XRF (*X-ray Fluorescence*) dan PSA (*Particle Size Analyzer*).

Aplikasi ion Li pada material katoda NMC menjadi populer sebagai peralatan penyimpanan energi untuk kendaraan listrik dan alat elektronik *portable*. Alasan utama dari luasnya penggunaan baterai Li-ion ini karena densitas energi yang cukup tinggi sehingga memungkinkan penggunaan yang lebih lama dalam satu lagi proses pengisian. Beberapa penelitian menunjukkan jumlah Li yang digunakan berpengaruh pada sifat elektrokimia material. Pengurangan gangguan pada Li/Ni dan peningkatan stabilitas struktur pada material ini dapat meningkatkan laju siklus ke arah yang lebih tinggi karena adanya pembentukan jumlah domain seperti  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  yang sesuai pada lapisan logam transisi [12]. Peningkatan Li juga menjadi faktor kunci pada siklus baterai yang lebih baik dan laju kapabilitas material NMC-111 [13]. Penelitian mengenai pengaruh kandungan Li pada struktur dan performa elektrokimia material katoda berfokus pada dua hal yaitu pada material dengan kandungan mangan yang rendah (seperti NMC-111) dan material dengan kandungan mangan yang lebih tinggi (seperti NMC-721) [14]. Dalam penelitian ini juga diteliti mengenai penambahan konsentrasi Li (3% dan 5%) terhadap performa

elektrokimia baterai yang dilihat melalui hasil uji EIS (*Electrochemical Impedance Spectrometry*) dan CV (*Cyclic Voltametry*).

## **1.2 Identifikasi Masalah**

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan sebelumnya dapat diidentifikasi beberapa masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana cara melakukan sintesis baterai NMC-721 dengan menggunakan metode ko-presipitasi asam oksalat?
2. Bagaimana pengaruh waktu pengadukan 30, 60 dan 180 (menit) pada struktur material hasil sintesis baterai NMC-721 berdasarkan XRD, XRF dan PSA?
3. Bagaimana performa elektronik baterai NMC-721 setelah penambahan Lithium 3% pada variasi waktu pengadukan 30 dan 60 menit berdasarkan uji EIS dan CV?

## **1.3 Tujuan**

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui proses sintesis baterai NMC-721 dengan menggunakan metode ko-presipitasi dengan asam oksalat.
2. Mengetahui pengaruh waktu pengadukan terhadap hasil sintesis baterai NMC-721 melalui karakterisasi XRD, XRF dan PSA.
3. Mengetahui performa elektronik baterai NMC-721 setelah penambahan lithium 3% pada variasi waktu pengadukan 30 dan 60 menit berdasarkan uji EIS dan CV.

#### **1.4 Batasan Masalah**

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Penelitian ini fokus pada sintesis dan karakterisasi material NMC-721 yang dihasilkan melalui metode ko-presipitasi dengan asam oksalat
2. Menggunakan rasio komposisi Ni:Co:Mn (0,7:0,2:0,1)
3. Menggunakan penambahan logam lithium 3% dan 5%.
4. Menggunakan variasi waktu pengadukan 30 menit, 60 menit dan 180 menit.
5. Karakterisasi material dilakukan dengan menggunakan XRD, XRF dan PSA
6. Uji performa elektronik baterai dilakukan dengan EIS dan CV.

#### **1.5 Sistematika Penulisan**

Adapun sistematika penulisan skripsi ini terdiri dari lima bab yaitu sebagai berikut:

##### **Bab I Pendahuluan**

Latar belakang dilakukan penelitian ini didasarkan pada kebutuhan dan analisa mengenai pengaruh waktu pengadukan dan penambahan lithium terhadap struktur dan performa material NMC-721 yang disintesis melalui metode ko-presipitasi oksalat. Hal ini perlu dilakukan untuk mengetahui kondisi optimum dalam proses sintesis.

##### **Bab II Tinjauan Pustaka**



Berisi teori secara umum mengenai definisi dari bahan yang digunakan, proses yang dilakukan, serta pengujian yang dilakukan pada penelitian ini. Hal ini berfokus pada NMC-721, ko-presipitasi oksalat, karakterisasi dengan XRF, PSA, XRD, EIS dan CV.

### Bab III Metode Penelitian

Pada pelaksanaan penelitian terdapat langkah-langkah penelitian. Bab ini menjelaskan mengenai diagram alir penelitian, alat dan bahan, serta prosedur penelitian mulai dari preparasi dan karakterisasi awal, hingga proses pengamatan dan pengujian.

### Bab IV Hasil dan Pembahasan

Pada bab ini menyajikan data hasil analisa dengan menggunakan beberapa spektrofotometri seperti XRF, PSA, XRD, EIS dan CV, serta membahas mengenai hubungan pengaruh-pengaruh variabel pada penelitian yang telah dilakukan.

### Bab V Kesimpulan dan Saran

Pada bab ini menjelaskan tentang kesimpulan penelitian yang telah dilakukan dan saran-saran untuk penelitian selanjutnya.

### Daftar Pustaka

Daftar pustaka menyajikan beberapa referensi dan penelitian terkait dari yang sudah dilakukan sebelumnya oleh para peneliti yang dijadikan acuan dalam pengembangan riset yang dilakukan.

### Lampiran

Lampiran berisi hasil pengujian, perhitungan, data pengujian serta gambar alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Firoz, "A review : Advantages and Disadvantages of Biodiesel," *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 04, no. 11, pp. 530–535, 2017.
- [2] Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral, "Menteri ESDM: Cadangan Minyak Indonesia Tersedia untuk 9,5 Tahun dan Cadangan Gas 19,9 Tahun," *SIARAN PERS NOMOR: 028.Pers/04/SJI/2021*, 2021. <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/menteri-esdm-cadangan-minyak-indonesia-tersedia-untuk-95-tahun-dan-cadangan-gas-199-tahun> (accessed May 20, 2023).
- [3] Y. Lu, X. Rong, Y. S. Hu, L. Chen, and H. Li, "Research and development of advanced battery materials in China," *Energy Storage Mater.*, vol. 23, pp. 144–153, 2019, doi: 10.1016/j.ensm.2019.05.019.
- [4] Y. Liu, R. Zhang, J. Wang, and Y. Wang, "Current and future lithium-ion battery manufacturing," *iScience*, vol. 24, no. 4, p. 102332, 2021, doi: 10.1016/j.isci.2021.102332.
- [5] D. Guyomard and J. M. Tarascon, "Rechargeable  $\text{Li}_1 + x \text{Mn}_2 \text{O}_4$  / Carbon Cells with a New Electrolyte Composition: Potentiostatic Studies and Application to Practical Cells," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 140, no. 11, pp. 3071–3081, Nov. 1993, doi: 10.1149/1.2220987.
- [6] L. A. Diaz, M. L. Strauss, B. Adhikari, J. R. Klaehn, J. S. McNally, and T. E. Lister, "Electrochemical-assisted leaching of active materials from lithium ion batteries," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 161, p. 104900, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104900.
- [7] A. Manthiram, "An Outlook on Lithium Ion Battery Technology," *ACS Cent. Sci.*, vol. 3, no. 10, pp. 1063–1069, 2017, doi: 10.1021/acscentsci.7b00288.
- [8] S. S. Nisa *et al.*, "A Fast Approach to Obtain Layered Transition-Metal Cathode Material for Rechargeable Batteries," *Batteries*, vol. 8, no. 1, p. 4, Jan. 2022, doi: 10.3390/batteries8010004.
- [9] T. Le Thi *et al.*, "Modified Coprecipitation Synthesis of Nickel-Rich NMC ( $\text{Li}_1.0 \text{Ni}_0.6 \text{Mn}_0.2 \text{Co}_0.2 \text{O}_2$ ) for Lithium-Ion Batteries: A Simple, Cost-Effective, Environmentally Friendly Method," *ACS Omega*, vol. 8, no. 48, pp. 45414–45427, Dec. 2023, doi: 10.1021/acsomega.3c04717.
- [10] D. Wang, I. Belharouak, G. M. Koenig, G. Zhou, and K. Amine, "Growth mechanism of  $\text{Ni}_0.3 \text{Mn}_0.7 \text{CO}_3$  precursor for high capacity Li-ion battery cathodes," *J. Mater. Chem.*, vol. 21, no. 25, p. 9290, 2011, doi: 10.1039/c1jm11077b.

- [11] C. Wang *et al.*, “Influences of carbonate co-precipitation temperature and stirring time on the microstructure and electrochemical properties of  $\text{Li}_{1.2}[\text{Mn}_{0.52}\text{Ni}_{0.2}\text{Co}_{0.08}]\text{O}_2$  positive electrode for lithium ion battery,” *Solid State Ionics*, vol. 281, pp. 96–104, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.ssi.2015.09.016.
- [12] R. Santhanam and B. Rambabu, “High rate cycling performance of  $\text{Li}_{1.05}\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$  materials prepared by sol–gel and co-precipitation methods for lithium-ion batteries,” *J. Power Sources*, vol. 195, no. 13, pp. 4313–4317, Jul. 2010, doi: 10.1016/j.jpowsour.2010.01.016.
- [13] S.-H. Park, S.-H. Kang, I. Belharouak, Y. K. Sun, and K. Amine, “Physical and electrochemical properties of spherical  $\text{Li}_{1+x}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})_{1-x}\text{O}_2$  cathode materials,” *J. Power Sources*, vol. 177, no. 1, pp. 177–183, Feb. 2008, doi: 10.1016/j.jpowsour.2007.10.062.
- [14] Q. Ma, S. Yin, F. Ding, J. Meng, S. Zhong, and C. Dai, “Understanding effects of lithium content on structural and electrochemical characteristics of  $\text{Li}_{1+\text{Mn}_{0.7}\text{Ni}_{0.2}\text{Co}_{0.1}\text{O}_{2.25+2}}$  cathode materials for lithium-ion batteries,” *Mater. Sci. Eng. B*, vol. 246, pp. 143–152, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.mseb.2019.05.017.
- [15] A. Poullikkas, “A comparative overview of large-scale battery systems for electricity storage,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 27, pp. 778–788, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.07.017.
- [16] C. Parker, “Lead-acid battery energy-storage systems for electricity supply networks,” *J. Power Sources*, vol. 100, no. 1–2, pp. 18–28, Nov. 2001, doi: 10.1016/S0378-7753(01)00880-1.
- [17] J. F. Cole, “Battery energy-storage systems — an emerging market for lead/acid batteries,” *J. Power Sources*, vol. 53, no. 2, pp. 239–243, Feb. 1995, doi: 10.1016/0378-7753(94)02019-Y.
- [18] A. Shukla, “Nickel-based rechargeable batteries,” *J. Power Sources*, vol. 100, no. 1–2, pp. 125–148, Nov. 2001, doi: 10.1016/S0378-7753(01)00890-4.
- [19] O. Zelinsky, “Storage-integrated PV systems using advanced NiMH battery technology,” 2010.
- [20] M. Wakihara, “Recent developments in lithium ion batteries,” *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 33, no. 4, pp. 109–134, Jun. 2001, doi: 10.1016/S0927-796X(01)00030-4.
- [21] N. Kawakami *et al.*, “Development and field experiences of stabilization system using 34MW NAS batteries for a 51MW wind farm,” in *2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Jul. 2010, pp. 2371–

2376. doi: 10.1109/ISIE.2010.5637487.

- [22] Y. Yuan, X. Zhang, P. Ju, K. Qian, and Z. Fu, “Applications of battery energy storage system for wind power dispatchability purpose,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 93, pp. 54–60, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.epsr.2012.07.008.
- [23] M. S. Whittingham, “Electrical Energy Storage and Intercalation Chemistry,” *Science (80-. )*, vol. 192, no. 4244, pp. 1126–1127, Jun. 1976, doi: 10.1126/science.192.4244.1126.
- [24] A. Tolouei, A. Kafrou, and S. K. Sadrnezaad, “Effects of lithium excess and Ni content on the electrochemical performance of  $\text{Li}_{1+x}(\text{Ni}_{0.45-x}\text{Mn}_{0.4}\text{Co}_{0.15})\text{O}_2$  lithium-ion cathode materials in stoichiometric state,” *Mater. Res. Express*, vol. 6, no. 8, p. 085522, May 2019, doi: 10.1088/2053-1591/ab2019.
- [25] B. Xu, C. R. Fell, M. Chi, and Y. S. Meng, “Identifying surface structural changes in layered Li-excess nickel manganese oxides in high voltage lithium ion batteries: A joint experimental and theoretical study,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 4, no. 6, p. 2223, 2011, doi: 10.1039/c1ee01131f.
- [26] X. Zhang, L. Yang, F. Hao, H. Chen, M. Yang, and D. Fang, “Lithium-Excess Research of Cathode Material  $\text{Li}_2\text{MnTiO}_4$  for Lithium-Ion Batteries,” *Nanomaterials*, vol. 5, no. 4, pp. 1985–1994, Nov. 2015, doi: 10.3390/nano5041985.
- [27] M. Winter, B. Barnett, and K. Xu, “Before Li Ion Batteries,” *Chem. Rev.*, vol. 118, no. 23, pp. 11433–11456, 2018, doi: 10.1021/acs.chemrev.8b00422.
- [28] G. Zubi, R. Dufo-López, M. Carvalho, and G. Pasaoglu, “The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 89, no. April 2017, pp. 292–308, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.002.
- [29] D. Wang, I. Belharouak, G. Zhou, and K. Amine, “Synthesis of Lithium and Manganese-Rich Cathode Materials via an Oxalate Co-Precipitation Method,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 160, no. 5, pp. A3108–A3112, 2013, doi: 10.1149/2.016305jes.
- [30] M.-K. Tran, A. DaCosta, A. Mevawalla, S. Panchal, and M. Fowler, “Comparative Study of Equivalent Circuit Models Performance in Four Common Lithium-Ion Batteries: LFP, NMC, LMO, NCA,” *Batteries*, vol. 7, no. 3, p. 51, Jul. 2021, doi: 10.3390/batteries7030051
- [31] J. Piątek, S. Afyon, T. M. Budnyak, S. Budnyk, M. H. Sipponen, and A. Slabon, “Sustainable Li-Ion Batteries: Chemistry and Recycling,” *Adv. Energy Mater.*, vol. 11, no. 43, 2021, doi: 10.1002/aenm.202003456.

- [32] J. Li, J. Fleetwood, W. B. Hawley, and W. Kays, "From Materials to Cell: State-of-the-Art and Prospective Technologies for Lithium-Ion Battery Electrode Processing," *Chem. Rev.*, vol. 122, no. 1, pp. 903–956, Jan. 2022, doi: 10.1021/acs.chemrev.1c00565.
- [33] M. M. Loghavi, A. Nahvibayani, M. H. Moghim, M. Babaiee, S. Baktashian, and R. Eqra, "Electrochemical evaluation of  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{0.3}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ ,  $\text{LiNi}_{0.6}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ , and  $\text{LiNi}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$  cathode materials for lithium-ion batteries: from half-coin cell to pouch cell," *Monatshefte für Chemie - Chem. Mon.*, vol. 153, no. 12, pp. 1197–1212, Dec. 2022, doi: 10.1007/s00706-022-02995-9.
- [34] B. Priyono, M. R. Nugraha, A. Z. Syahrial, Faizah, and A. Subhan, "Optimizing performance of  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  nanorod doped  $\text{C@ZnO}$  by hydrothermal synthesis as half-cell lithium-ion battery anode," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 541, no. 1, p. 012025, Jun. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/541/1/012025.
- [35] Z. Ahmad, T. Xie, C. Maheshwari, J. C. Grossman, and V. Viswanathan, "Machine Learning Enabled Computational Screening of Inorganic Solid Electrolytes for Suppression of Dendrite Formation in Lithium Metal Anodes," *ACS Cent. Sci.*, vol. 4, no. 8, pp. 996–1006, Aug. 2018, doi: 10.1021/acscentsci.8b00229.
- [36] P. Birke, "A first approach to a monolithic all solid state inorganic lithium battery," *Solid State Ionics*, vol. 118, no. 1–2, pp. 149–157, Mar. 1999, doi: 10.1016/S0167-2738(98)00462-7.
- [37] R. M. Salgado, F. Danzi, J. E. Oliveira, A. El-Azab, P. P. Camanho, and M. H. Braga, "The latest trends in electric vehicles batteries," *Molecules*, vol. 26, no. 11, pp. 1–41, 2021, doi: 10.3390/molecules26113188.
- [38] N. Leifer *et al.*, "Linking structure to performance of  $\text{Li}_{1.2}\text{Mn}_{0.54}\text{Ni}_{0.13}\text{Co}_{0.13}\text{O}_2$  (Li and Mn rich NMC) cathode materials synthesized by different methods," *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 22, no. 16, pp. 9098–9109, 2020, doi: 10.1039/d0cp00400f.
- [39] X. Ma, H. He, Y. Sun, and Y. Zhang, "Synthesis of  $\text{Li}_{1.2}\text{Mn}_{0.54}\text{Co}_{0.13}\text{Ni}_{0.13}\text{O}_2$  by sol-gel method and its electrochemical properties as cathode materials for lithium-ion batteries," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 28, no. 22, pp. 16665–16671, 2017, doi: 10.1007/s10854-017-7578-y.
- [40] M. J. Uddin, P. K. Alaboina, and S. J. Cho, "Nanostructured cathode materials synthesis for lithium-ion batteries," *Mater. Today Energy*, vol. 5, pp. 138–157, 2017, doi: 10.1016/j.mtener.2017.06.008.
- [41] M. Malik, K. H. Chan, and G. Azimi, "Effect of Synthesis Method on the

Electrochemical Performance of  $\text{LiNi}_x\text{MnCo}_{1-x-y}\text{O}_2$  (NMC) Cathode for Li-Ion Batteries: A Review,” 2021, pp. 37–46. doi: 10.1007/978-3-030-65489-4\_5.

- [42] H. Dong and G. M. Koenig Jr, “Compositional control of precipitate precursors for lithium-ion battery active materials: role of solution equilibrium and precipitation rate,” *J. Mater. Chem. A*, vol. 5, no. 26, pp. 13785–13798, 2017, doi: 10.1039/C7TA03653A.
- [43] V. Pimenta *et al.*, “Synthesis of Li-Rich NMC: A Comprehensive Study,” *Chem. Mater.*, vol. 29, no. 23, pp. 9923–9936, Dec. 2017, doi: 10.1021/acs.chemmater.7b03230.
- [44] H. Dong and G. M. Koenig, “A review on synthesis and engineering of crystal precursors produced via coprecipitation for multicomponent lithium-ion battery cathode materials,” *CrystEngComm*, vol. 22, no. 9, pp. 1514–1530, 2020, doi: 10.1039/C9CE00679F.
- [45] T.-H. Cho, Y. Shiosaki, and H. Noguchi, “Preparation and characterization of layered  $\text{LiMn}_{1/3}\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$  as a cathode material by an oxalate coprecipitation method,” *J. Power Sources*, vol. 159, no. 2, pp. 1322–1327, Sep. 2006, doi: 10.1016/j.jpowsour.2005.11.080.
- [46] M.-H. Lee, Y.-J. Kang, S.-T. Myung, and Y.-K. Sun, “Synthetic optimization of  $\text{Li}[\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}]\text{O}_2$  via co-precipitation,” *Electrochim. Acta*, vol. 50, no. 4, pp. 939–948, Dec. 2004, doi: 10.1016/j.electacta.2004.07.038.
- [47] Maghfiroh, A. (2018). Analisis Pengaruh Waktu Pembakaran Gas Asetilen Dan Waktu Milling Terhadap Hasil Sintesis dan Performa Elektrokimia Anoda Baterai dari Material  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ . Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- [48] Z. Chang *et al.*, “Synthesis and characterization of high-density non-spherical  $\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2$  cathode material for lithium ion batteries by two-step drying method,” *Electrochim. Acta*, vol. 53, no. 20, pp. 5927–5933, Aug. 2008, doi: 10.1016/j.electacta.2008.03.066.
- [49] R. Y. Christyaningsih, “Aplikasi Fisika Kuantum-Hamburan Pada ‘X-Ray Diffraction (XRD),’” *Methodol. Crystallography*, 2020.
- [50] P. Brouwer, *Theory of XRF*. 2010.
- [51] Horiba, *A Guidebook To Particle size Analysis*. USA: Horiba Instruments Inc., 2014.
- [52] T. Anggraini, *Sintesis dan Karakterisasi  $\text{Fe}_{2-x}\text{La}_x\text{TiO}_5$  Sebagai Absorber Gelombang Elektromagnetik*. 2017.



- [53] W. Choi, H.-C. Shin, J. M. Kim, J.-Y. Choi, and W.-S. Yoon, "Modeling and Applications of Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) for Lithium-ion Batteries," *J. Electrochem. Sci. Technol.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–13, Feb. 2020, doi: 10.33961/jecst.2019.00528.
- [54] N. Elgrishi, K. J. Rountree, B. D. McCarthy, E. S. Rountree, T. T. Eisenhart, and J. L. Dempsey, "A Practical Beginner's Guide to Cyclic Voltammetry," *J. Chem. Educ.*, vol. 95, no. 2, pp. 197–206, Feb. 2018, doi: 10.1021/acs.jchemed.7b00361.
- [55] D. A. C. Brownson, "Graphene Electrochemistry : Fundamentals Through to Electroanalytical Applications," Manchester Metropolitan University, 2013.
- [56] D. Doughty and E. P. Roth, "A General Discussion of Li Ion Battery Safety," *Electrochem. Soc. Interface*, Jan. 2012, doi: 10.1149/2.F03122if.
- [57] H. Widiyandari, A. N. Sukmawati, H. Sutanto, C. Yudha, and A. Purwanto, "Synthesis of LiNi 0.8 Mn 0.1 Co 0.1 O 2 cathode material by hydrothermal method for high energy density lithium ion battery," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1153, p. 012074, Feb. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1153/1/012074.
- [58] M. Fakhrudin and E. Kartini, "La-incorporated NMC811 as a new Li-ion battery cathode material," 2022, p. 070003. doi: 10.1063/5.0123495.
- [59] A. S. Wijareni, H. Widiyandari, A. Purwanto, A. F. Arif, and M. Z. Mubarak, "Morphology and Particle Size of a Synthesized NMC 811 Cathode Precursor with Mixed Hydroxide Precipitate and Nickel Sulfate as Nickel Sources and Comparison of Their Electrochemical Performances in an NMC 811 Lithium-Ion Battery," *Energies*, vol. 15, no. 16, p. 5794, Aug. 2022, doi: 10.3390/en15165794.
- [60] E. D. Orlova, A. A. Savina, S. A. Abakumov, A. V. Morozov, and A. M. Abakumov, "Comprehensive Study of Li<sup>+</sup>/Ni<sup>2+</sup> Disorder in Ni-Rich NMCs Cathodes for Li-Ion Batteries," *Symmetry (Basel)*, vol. 13, no. 9, p. 1628, Sep. 2021, doi: 10.3390/sym13091628.
- [61] F. Wu *et al.*, "The positive role of (NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> coating on Li[Li<sub>0.2</sub>Ni<sub>0.2</sub>Mn<sub>0.6</sub>]O<sub>2</sub> oxide as the cathode material for lithium-ion batteries," *RSC Adv.*, vol. 7, no. 2, pp. 1191–1199, 2017, doi: 10.1039/C6RA24947G.
- [62] Y. Gao, "Novel LiNi<sub>1-x</sub>Ti<sub>x/2</sub>Mg<sub>x/2</sub>O<sub>2</sub> Compounds as Cathode Materials for Safer Lithium-Ion Batteries," *Electrochem. Solid-State Lett.*, vol. 1, no. 3, p. 117, 1999, doi: 10.1149/1.1390656.
- [63] M. W. S. Mubarak, M. Fakhrudin, and E. Kartini, "The effect of Lithium excess on synthesizing NMC 811 cathode material," 2023, p. 020006. doi: 10.1063/5.0174701.

- [64] J. Ma, B. Li, H. Du, C. Xu, and F. Kang, "Inorganic-based sol–gel synthesis of nano-structured LiFePO<sub>4</sub>/C composite materials for lithium ion batteries," *J. Solid State Electrochem.*, vol. 16, no. 4, pp. 1353–1362, Apr. 2012, doi: 10.1007/s10008-011-1491-8.
- [65] W. Zhao *et al.*, "High Voltage Operation of Ni-Rich NMC Cathodes Enabled by Stable Electrode/Electrolyte Interphases," *Adv. Energy Mater.*, vol. 8, no. 19, p. 1800297, Jul. 2018, doi: 10.1002/aenm.201800297.
- [66] C.-Y. Wu, Q. Bao, Y.-T. Tsai, and J.-G. Duh, "Tuning (003) interplanar space by boric acid co-sintering to enhance Li<sup>+</sup> storage and transfer in Li(Ni<sub>0.8</sub>Co<sub>0.1</sub>Mn<sub>0.1</sub>)O<sub>2</sub> cathode," *J. Alloys Compd.*, vol. 865, p. 158806, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.jallcom.2021.158806.