

Terbit *online* pada laman:

## SEMINAR NASIONAL INOVASI, RISET, DAN TEKNOLOGI (SINERGI)



Original

# OPTIMASI PARAMETER SUHU KALSINASI DALAM SINTESIS KATODA NMC KAYA NIKEL UNTUK MENINGKATKAN PERFORMA BATERAI LITIUUM-ION

Bagus Anggraini<sup>1\*</sup>, Miftah Al Hafidz<sup>1</sup>, Ilman Arpi<sup>1</sup>, Akhmad Saufan<sup>1</sup>, Evvy Kartini<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universitas Negeri Jakarta, DKI Jakarta, Indonesia

<sup>2</sup> Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Pusptek Bogor, Indonesia

### INFORMASI ARTIKEL

#### Sejarah Artikel:

Diterima Redaksi : 24 September 2025

Revisi Akhir : 19 Oktober 2025

Diterbitkan Online : 27 Oktober 2025

### KATA KUNCI

NMC, kalsinasi, kopresipitasi, katoda, baterai litium-ion

### \*KORESPONDENSI

E-mail: bagusanggraini@unj.ac.id

### A B S T R A K

Material katoda berbasis nikel-mangan-kobalt (NMC) tipe 721 merupakan kandidat utama untuk baterai litium-ion berkapasitas tinggi. Namun, performa elektrokimianya sangat dipengaruhi oleh kondisi sintesis, terutama pada tahap *solid-state reaction*, di mana suhu kalsinasi berperan penting dalam mengendalikan bentuk morfologi, ukuran morfologi, dan keteraturan struktur kristal. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh variasi suhu kalsinasi 700 °C, 750 °C, dan 800 °C terhadap karakteristik NMC721. Hasil SEM menunjukkan bahwa pada 700 °C partikel masih heterogen dengan aglomerasi signifikan, sedangkan pada 800 °C terjadi pertumbuhan butir berlebih yang mengurangi luas permukaan aktif. Kondisi optimum diperoleh pada 750 °C, di mana partikel menunjukkan morfologi yang lebih homogen dengan distribusi ukuran seragam (~165 nm). Analisis EDS mengonfirmasi bahwa rasio Ni:Mn:Co pada suhu tersebut mendekati komposisi teoritis 70:20:10, sedangkan hasil XRD memperlihatkan pemisahan puncak (006)/(102) dan (108)/(110) yang jelas, rasio  $I_{003}/I_{104}$  sebesar 1,283, serta nilai  $c/a = 4,9457$ . Data tersebut menegaskan rendahnya *cation mixing* serta keteraturan lapisan yang tinggi. Dengan demikian, kalsinasi pada 750 °C dapat dianggap sebagai kondisi optimum untuk menghasilkan material NMC721 dengan struktur berlapis yang stabil dan morfologi ideal, yang diperkirakan mampu meningkatkan kapasitas spesifik, stabilitas siklus, serta kemampuan laju pada aplikasi baterai litium-ion.

No ISSN 3124-7539 © 2025 The Authors. Dipublikasi

oleh Fakultas Teknik, Universitas Negeri Jakarta

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>)

Peer review under the responsibility of the scientific committee of the SINERGI

DOI: 10.21009/sinergi.v1i1.61380

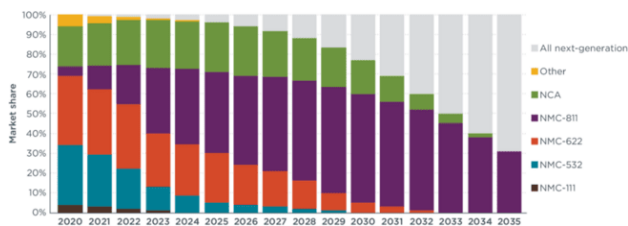
## 1. PENDAHULUAN

Perkembangan energi terbarukan dan elektrifikasi transportasi mendorong peningkatan kebutuhan baterai litium-ion dengan kerapatan energi tinggi, umur pakai panjang, dan biaya produksi yang efisien [1]. Material katoda merupakan komponen paling krusial dalam menentukan performa baterai, di mana kontribusinya mencapai hampir 40% dari total biaya produksi [2]. Salah satu kandidat katoda yang menjanjikan adalah material berbasis *Nickel Manganese Cobalt* (NMC), terutama dengan komposisi kaya nikel (*Nickel Rich-NMC*) karena mampu memberikan kapasitas spesifik yang lebih tinggi, sekaligus mengurangi ketergantungan pada kobalt yang mahal dan terbatas [3], [4].

Meskipun demikian, NMC 721 kaya nikel memiliki tantangan utama berupa kestabilan struktur dan degradasi kinerja akibat ketidakteraturan kation (*cation mixing*) antara  $Ni^{2+}$  dan  $Li^+$ , yang dapat menghambat difusi ion litium selama siklus baterai [5]. Stabilitas struktur kristal serta homogenitas distribusi partikel sangat dipengaruhi oleh proses sintesis, khususnya parameter suhu kalsinasi pada tahap pembentukan oksida logam [6]. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa peningkatan suhu kalsinasi dapat meningkatkan kristalinitas, namun suhu terlalu tinggi dapat memicu pertumbuhan butir berlebih (*grain growth*) yang justru menurunkan stabilitas jangka panjang material [7]. Hal ini menunjukkan adanya kesenjangan penelitian terkait optimasi suhu kalsinasi untuk memperoleh keseimbangan antara keteraturan struktur kristal dan morfologi partikel.

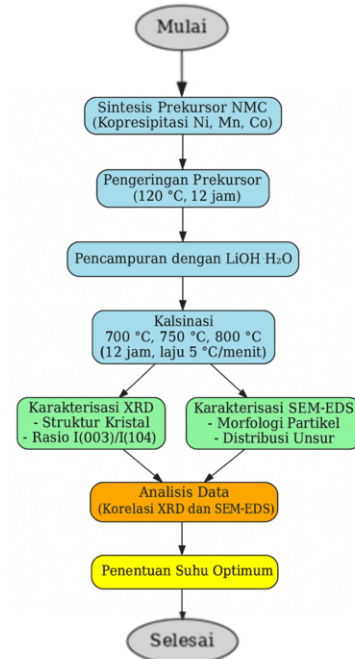
Secara praktis, riset mengenai optimasi suhu kalsinasi juga penting untuk memberikan panduan parameter produksi material katoda dalam skala industri, khususnya di Indonesia yang mulai mengembangkan ekosistem baterai berbasis nikel seiring potensi cadangan nikel laterit yang melimpah [8], [9]. Dengan demikian, penelitian ini memiliki kontribusi ilmiah dalam memperkaya pemahaman mengenai hubungan antara suhu kalsinasi dengan karakteristik struktur kristal, morfologi partikel, dan sekaligus manfaat praktis sebagai acuan pengolahan material katoda dalam rantai pasok baterai litium-ion.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi suhu kalsinasi (700 °C, 750 °C, dan 800 °C) terhadap struktur kristal dan morfologi katoda NMC kaya nikel menggunakan metode karakterisasi *X-ray diffraction* (XRD) dan *scanning electron microscopy–energy dispersive spectroscopy* (SEM-EDS). Fokus utama penelitian ini adalah menentukan kondisi suhu kalsinasi optimum yang menghasilkan keteraturan struktur dan morfologi partikel terbaik.



Gambar 1. Proyeksi Penjualan Berbagai Jenis Baterai EV hingga 2035 [10]

## 2. METODE



Gambar 2. Diagram Alir Proses Penelitian

### 2.1 Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental pada laboratorium. Tujuan utama penelitian adalah mengkaji pengaruh variasi suhu kalsinasi terhadap struktur kristal dan morfologi katoda berbasis *Nickel Manganese Cobalt* (NMC) kaya nikel.

### 2.2 Sintesis Prekursor NMC

Prekursor NMC 721 disintesis dengan metode kopresipitasi. Bahan baku yang digunakan adalah  $NiSO_4 \cdot 6H_2O$ ,  $MnSO_4 \cdot H_2O$ , dan  $CoSO_4 \cdot 7H_2O$  dengan perbandingan molar Ni:Mn:Co = 7:2:1. Larutan prekursor dipresipitasi menggunakan NaOH sebagai agen presipitasi (*precipitant agent*) dan  $NH_4OH$  sebagai agen kompleksasi (*chelating agent*) dalam reaktor berpengaduk dengan kontrol pH konstan (pH 11,5). Endapan yang terbentuk kemudian dicuci, disaring, dan dikeringkan pada suhu 120 °C selama 12 jam. Kemudian dilakukan penggerusan dengan *mortar* dan *pestle*, lalu diayak dengan *sieve meshing* dengan ukuran 100 mesh.

### 2.3 Proses Kalsinasi

Serbuk prekursor yang telah halus dan berukuran seragam dicampur dengan  $LiOH \cdot H_2O$  dengan rasio molar Li:M = 1.05:1 (*excess Li 5%*) untuk mengantisipasi kehilangan litium selama kalsinasi. Campuran dikalsinasi dalam *furnace* dengan laju pemanasan 5 °C/menit pada tiga variasi suhu, yaitu 700 °C, 750 °C, dan 800 °C, masing-masing selama 12 jam dan dialiri gas oksigen 1 L/min.

### 2.4 Karakterisasi Material

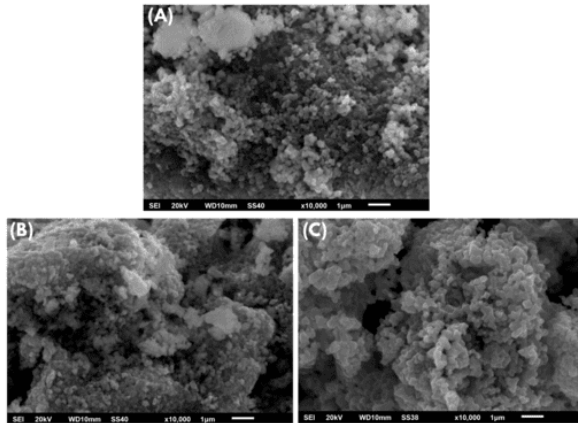
Karakterisasi material dilakukan menggunakan *X-ray Diffraction* (XRD) untuk menentukan fase kristal, parameter kisi, serta rasio intensitas puncak  $I_{(003)}/I_{(104)}$  sebagai indikator pencampuran

kation (*cation mixing*). Analisis dilakukan dengan metode *Rietveld Refinement*.

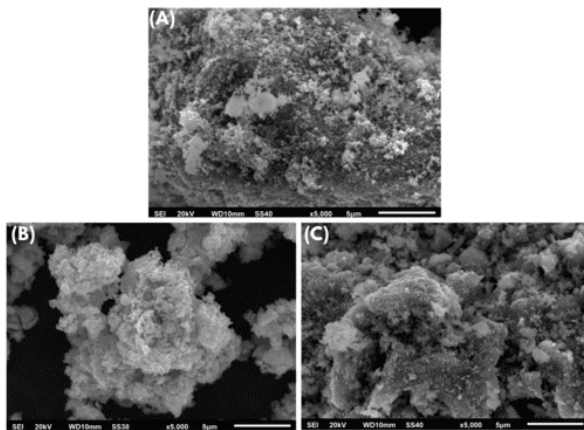
Selain itu, *Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive Spectroscopy* (SEM-EDS) digunakan untuk mengamati morfologi partikel, distribusi ukuran partikel, serta komposisi unsur Ni, Mn, dan Co pada katoda NMC 721.

Hasil karakterisasi XRD dan SEM-EDS kemudian dibandingkan serta dikorelasikan guna menentukan kondisi suhu kalsinasi yang menghasilkan struktur kristal dan morfologi partikel yang paling optimum.

### 3. HASIL



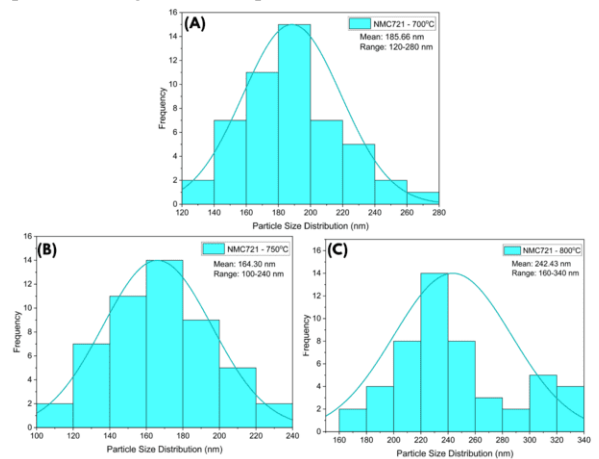
**Gambar 3.** Hasil Pengujian SEM pada perbesaran 10000x pada sampel (a) NMC721-700°C, (b) NMC721-750°C, (c) NMC721-800°C



**Gambar 4.** Hasil Pengujian SEM pada perbesaran 5000x pada sampel (a) NMC721-700°C, (b) NMC721-750°C, (c) NMC721-800°C

Gambar 3 dan Gambar 4 memperlihatkan citra SEM material NMC721 hasil kalsinasi pada 700 °C, 750 °C, dan 800 °C. Terlihat jelas bahwa variasi suhu kalsinasi memberikan pengaruh signifikan terhadap bentuk, ukuran, serta distribusi partikel. Pada 700 °C, partikel cenderung berbentuk bulat namun tidak seragam dengan tingkat aglomerasi tinggi. Kondisi ini menunjukkan bahwa proses kristalisasi belum sempurna, sehingga menghasilkan morfologi heterogen. Fenomena serupa dilaporkan oleh Ronduda dkk [7], yang mengaitkan kalsinasi rendah dengan aglomerasi berlebih serta distribusi ukuran yang tidak homogen, yang pada akhirnya menurunkan stabilitas elektrokimia.

Sebaliknya, kalsinasi pada 750 °C menghasilkan partikel yang lebih homogen, berdistribusi seragam, serta aglomerasi minimal. Hal ini mengindikasikan adanya keseimbangan antara pertumbuhan butir primer dan penyatuan partikel sekunder. Hasil ini konsisten dengan laporan Kim dkk [11], yang menyatakan bahwa rentang suhu 750–775 °C mampu menghasilkan morfologi kompak dengan ukuran primer 100–300 nm, mendukung peningkatan kapasitas spesifik dan stabilitas siklus. Pada 800°C, terjadi pertumbuhan butir signifikan akibat proses penyinteran, sehingga partikel sekunder menjadi lebih besar dengan permukaan halus. Meskipun menghasilkan struktur padat, kondisi ini menurunkan luas permukaan aktif serta memperpanjang jalur difusi Li<sup>+</sup>, sehingga berpotensi mengurangi kemampuan laju (*rate capability*) dan mempercepat degradasi kapasitas, sebagaimana dilaporkan Li dkk [12].



**Gambar 5.** Distribusi Ukuran Partikel dari hasil SEM pada sampel (a) Kalsinasi 700°C, (b) Kalsinasi 750°C, (c) Kalsinasi 800°C

Analisis distribusi ukuran partikel (Gambar 5) memperkuat observasi SEM. Rata-rata ukuran partikel meningkat dari 164,93 nm (700 °C) menjadi 165,66 nm (750 °C), kemudian melonjak menjadi 242,43 nm (800 °C). Distribusi paling sempit dan simetris diamati pada 750 °C, menunjukkan kondisi optimum yang mendorong densifikasi seragam tanpa *grain growth* berlebih. Pada penelitian Patel dkk [13] menegaskan bahwa pertumbuhan butir berlebih akibat kalsinasi tinggi dapat menurunkan luas permukaan aktif dan memperlambat kinetika difusi Li<sup>+</sup>. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa suhu 750 °C memberikan keseimbangan terbaik antara homogenitas morfologi dan stabilitas ukuran partikel.

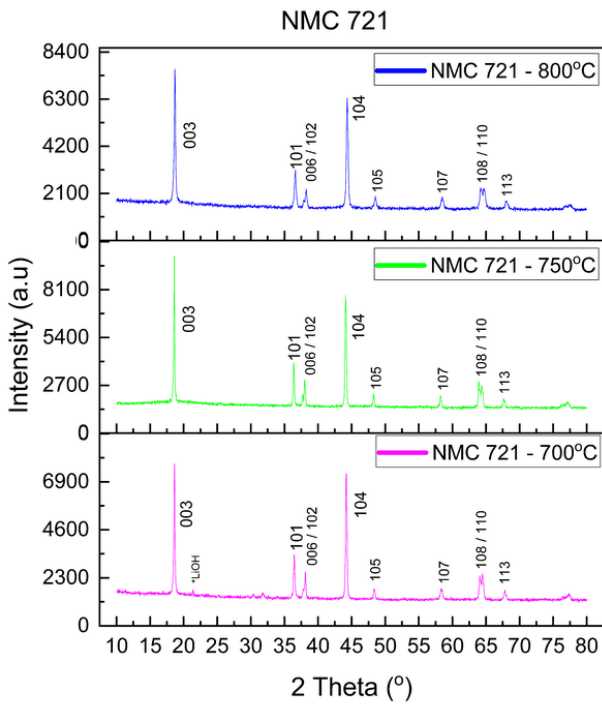
Tabel 1 Komposisi unsur NMC 721 dari hasil EDS pada semua sampel

Sampel	Perbandingan Rasio (%)			
		Ni	Mn	Co
NMC721	Design	70	20	10
NMC721-700°C	Terukur	67,91	22,38	9,71
NMC721-750°C	Terukur	68,84	21,33	9,83
NMC721-800°C	Terukur	68,34	22,03	9,63

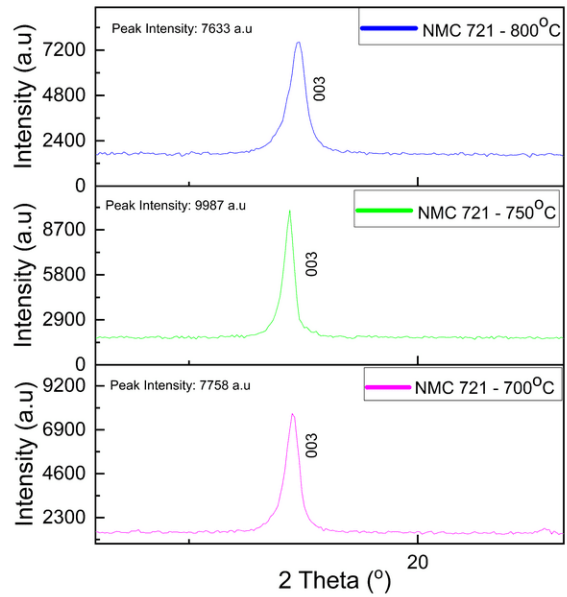
Analisis EDS (Tabel 1) menunjukkan bahwa rasio Ni:Mn:Co pada seluruh sampel relatif mendekati desain teoritis 70:20:10 (%). Namun, deviasi kecil teramati pada 700 °C, di mana

kandungan Ni menurun menjadi 67,91% dan Mn meningkat hingga 22,38%, menandakan bahwa homogenisasi kation belum optimal. Kondisi optimum tercapai pada 750 °C dengan komposisi 68,84% Ni, 21,33% Mn, dan 9,83% Co, mendekati nilai desain serta menunjukkan distribusi unsur yang paling stabil. Pada 800 °C, kandungan Ni kembali menurun (68,34%), mengindikasikan volatilitas Ni atau pembentukan cacat struktural akibat suhu tinggi.

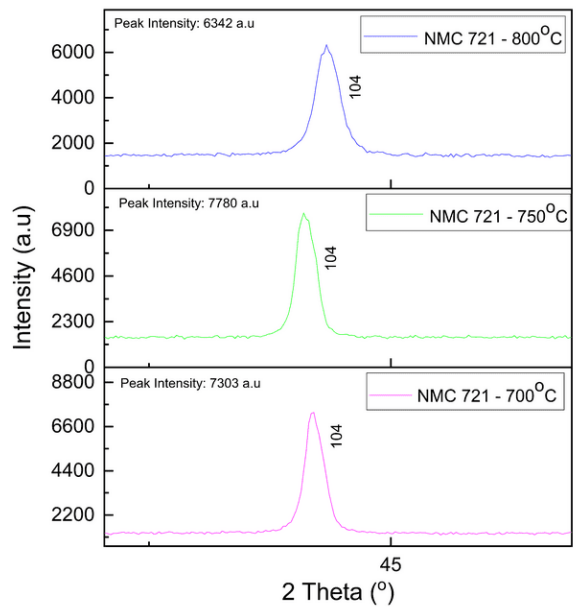
Fenomena peningkatan Mn yang konsisten pada semua sampel dapat dikaitkan dengan perbedaan koefisien difusi antar-kation selama kalsinasi, di mana Mn lebih mudah terdistribusi seragam pada kisi. Ketiadaan Li dalam spektrum EDS dipahami sebagai keterbatasan teknik ini dalam mendeteksi unsur ringan ( $Z < 3$ ). Hasil ini selaras dengan laporan Kim dkk dan Li dkk [11], [14], yang menunjukkan bahwa suhu rendah menyebabkan distribusi unsur tidak homogen, sedangkan suhu tinggi memicu volatilitas Ni dan kehilangan Li, sehingga meningkatkan risiko *cation mixing*. Pada penelitian Zhang dkk [15] menekankan bahwa kondisi optimum NMC kaya-nikel berada pada suhu menengah (740–760 °C), di mana difusi kation berlangsung optimal tanpa pertumbuhan butir berlebihan.



Gambar 6. Hasil Pengujian XRD pada Katoda NMC 721



Gambar 7. Intensitas Puncak XRD pada  $I_{(003)}$



Gambar 8. Intensitas Puncak XRD pada  $I_{(104)}$

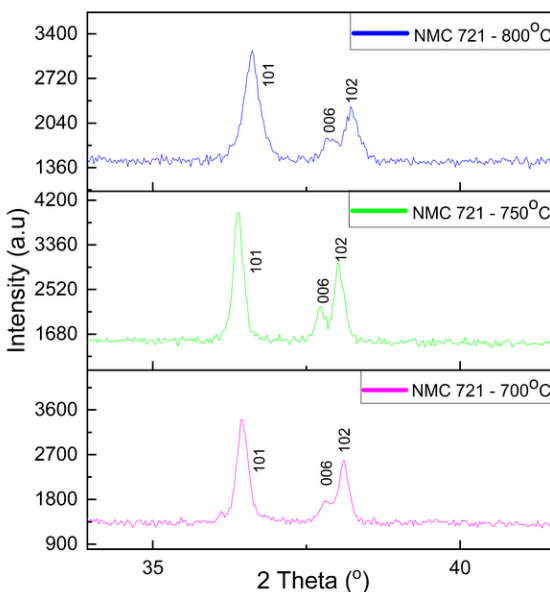
Tabel 2. Perbandingan Intensitas pada Puncak  $I_{(003)}/I_{(104)}$

Sampel	$I_{003}$	$I_{104}$	$I_{(003)/104}$
NMC721-700°C	7758	7303	1,062
NMC721-750°C	9987	7780	1,283
NMC721-800°C	7633	6342	1,203

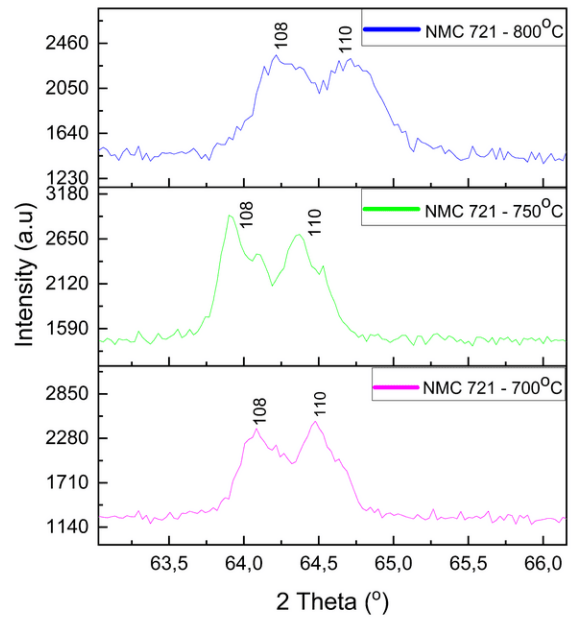
Pengukuran difraksi sinar-X menunjukkan variasi intensitas puncak (003) dan (104) yang konsisten dengan perubahan keteraturan kisi akibat perlakuan kalsinasi pada 700 °C, 750 °C, dan 800 °C (Tabel 2). Intensitas puncak  $I_{003}$  tertinggi tercatat pada sampel kalsinasi 750 °C ( $I_{003} = 9987$  a.u.) dibanding 700 °C (7758 a.u.) dan 800 °C (7633 a.u.), sementara  $I_{104}$  juga mencapai nilai maksimum pada 750 °C. Rasio  $I_{003}/I_{104}$  yang diperoleh adalah 1,062 (700 °C), 1,283 (750 °C), dan 1,203 (800 °C).

°C). Nilai rasio > 1,2 umumnya diinterpretasikan sebagai indikasi keteraturan lapisan Li-TM (sedikit pencampuran Li/Ni), sedangkan rasio < 1,2 menandakan derajat pencampuran kation (cation mixing) yang lebih tinggi [16]. Oleh karena itu, data XRD menunjukkan bahwa sampel kalsinasi 700 °C memiliki kecenderungan cation mixing relatif besar, sementara kondisi 750 °C memberikan keteraturan kisi terbaik dalam penelitian ini; pada 800 °C keteraturan masih baik (rasio > 1,2) tetapi menurun dibanding 750 °C, yang dapat mengindikasikan awal efek samping kalsinasi tinggi seperti kehilangan Li atau rekristalisasi yang memengaruhi intensitas puncak. Interpretasi kuantitatif ini selaras dengan observasi morfologi SEM yang menunjukkan densifikasi optimal pada 750 °C dan pertumbuhan butir pada 800 °C, sehingga korelasi struktur-morfologi mendukung kesimpulan bahwa 750 °C memberikan keseimbangan terbaik antara keteraturan kristal dan morfologi partikel.

Hasil ini konsisten dengan laporan pada literatur NMC kaya-Ni [4], [17], [18], yang sering menemukan rentang suhu optimal di sekitar 740–775 °C untuk memperoleh struktur layered teratur dan performa elektrokimia baik; misalnya studi komprehensif terhadap NMC76 menunjukkan performa terbaik pada 750–775 °C, di mana rasio  $I_{003}/I_{104}$  dan parameter kisi menunjang minimnya cation mixing dan kapasitas pelepasan tinggi. Namun, perlu dicatat bahwa rasio  $I_{003}/I_{104}$  adalah indikator kualitatif yang sensitif terhadap orientasi preferensial dan kondisi pengukuran. Oleh karena itu, hasil ini sebaiknya diverifikasi lebih lanjut melalui analisis Rietveld refinement untuk memperoleh parameter kisi (c/a) yang lebih akurat serta pengukuran komposisi kuantitatif menggunakan ICP-OES guna mengonfirmasi stabilitas Li yang tidak dapat terdeteksi melalui EDS [19]. Literatur juga melaporkan bahwa kenaikan suhu kalsinasi di atas rentang optimal sering kali meningkatkan ukuran partikel primer (menurunkan luas permukaan) dan berpotensi menyebabkan peningkatan pencampuran Li/Ni atau pembentukan fase rock-salt jika volatilitas Li tidak diatasi, sehingga rekomendasi praktis adalah memadukan optimasi suhu dengan langkah mitigasi (mis. Li-excess, kontrol atmosfer, dan ramp-rate yang tepat).



Gambar 9. Intensitas Puncak XRD pada  $I_{(006)}/I_{(102)}$



Gambar 10. Intensitas Puncak XRD pada  $I_{(108)}/I_{(110)}$

Pola difraksi sinar-X (XRD) pada Gambar 1 dan 2 menunjukkan bahwa material NMC 721 hasil kalsinasi pada variasi suhu 700°C, 750°C, dan 800°C memiliki struktur heksagonal berlapis dengan grup ruang R-3m, yang ditandai dengan munculnya puncak-puncak difraksi utama pada bidang (101), (006), (102), (108), dan (110) [20], [21].

Fenomena splitting peak yang terlihat pada puncak (006)/(102) serta (108)/(110) merupakan indikator penting dari struktur berlapis heksagonal tipe  $\alpha$ -NaFeO<sub>2</sub> (R-3m) pada material NMC [22]. Pemisahan puncak (006)/(102) menunjukkan keteraturan lapisan antara ion Li<sup>+</sup> dan transisi logam (Ni, Mn, Co), sedangkan pemisahan puncak (108)/(110) menegaskan stabilitas fase berlapis dan minimnya tumpang tindih (overlap) antara ion-ion tersebut dalam kisi kristal. Dengan kata lain, semakin jelas pemisahan puncak difraksi, semakin rendah tingkat cation mixing antara Li<sup>+</sup> dan Ni<sup>2+</sup>, yang berimplikasi langsung pada jalur difusi ion Li<sup>+</sup> yang lebih baik selama proses interkalasi-deinterkalasi.

Dalam hasil penelitian ini, pemisahan puncak (006)/(102) dan (108)/(110) paling jelas diamati pada sampel yang dikalsinasi pada suhu 750°C. Hal ini menunjukkan bahwa suhu tersebut mampu menghasilkan struktur berlapis dengan orde kristal tinggi dan tingkat disorder yang rendah. Pada suhu 700°C, puncak masih terlihat menyatu (overlap), menandakan bahwa proses kristalisasi belum sempurna. Sebaliknya, pada suhu 800°C, meskipun pemisahan masih terjadi, kualitas pemisahan puncak mulai menurun akibat pelebaran puncak yang disebabkan pertumbuhan butir berlebih dan kemungkinan hilangnya oksigen dari kisi kristal.

Hasil ini konsisten dengan laporan Dong dkk [23], yang menekankan bahwa pemisahan jelas antara puncak (006)/(102) serta (108)/(110) merupakan parameter kunci untuk mengidentifikasi derajat keteraturan lapisan pada material NMC kaya nikel. Zhao dkk [24] juga menyatakan bahwa intensitas serta ketajaman puncak-puncak tersebut berkorelasi erat dengan kestabilan struktur dan performa elektrokimia jangka panjang. Dengan demikian, kehadiran splitting peak yang jelas pada 750°C mengonfirmasi bahwa kondisi kalsinasi tersebut menghasilkan

material dengan struktur kristal paling ideal untuk diaplikasikan sebagai katoda baterai litium-ion.

**Tabel 3.** Perhitungan parameter kisi kristal (*lattice parameters*) dari *Rietveld Refinement*

Samples	a (Å)	c (Å)	c/a
NMC721-700°C	2,8999	14,3001	4,9312
NMC721-750°C	2,8930	14,3071	4,9457
NMC721-800°C	2,8993	14,3009	4,9325

Hasil perhitungan parameter kisi kristal NMC721 pada variasi suhu kalsinasi ditunjukkan pada Tabel 3. Terlihat bahwa nilai parameter a relatif stabil pada kisaran ~2.893–2.899 Å, sedangkan parameter c sedikit meningkat pada suhu 750°C (14.307 Å) dibandingkan dengan 700°C (14.300 Å) dan 800°C (14.309 Å). Peningkatan nilai c pada suhu 750°C menunjukkan adanya ekspansi pada arah sumbu c, yang mengindikasikan keteraturan lapisan yang lebih baik serta pemisahan antar-lapisan Li yang lebih jelas.

Rasio c/a sering digunakan sebagai parameter untuk mengevaluasi keteraturan struktur berlapis pada material NMC. Nilai rasio c/a ideal untuk struktur berlapis R-3m umumnya lebih besar dari 4,9, yang menunjukkan bahwa ion Li<sup>+</sup> dan transisi logam (Ni<sup>2+</sup>/Ni<sup>3+</sup>) terdistribusi dengan baik pada lapisan masing-masing [25], [26]. Pada hasil ini, rasio c/a tertinggi diperoleh pada suhu 750°C (4.9457), menandakan derajat ordering yang lebih baik serta minimnya fenomena cation mixing. Sebaliknya, pada suhu 700°C (4.9312) dan 800°C (4.9325), nilai rasio c/a sedikit lebih rendah, mengindikasikan struktur yang kurang optimal akibat kristalisasi yang belum sempurna (700°C) atau degradasi struktur karena suhu yang terlalu tinggi (800°C).

Hasil ini konsisten dengan temuan Shi dkk [27] (2014), yang melaporkan bahwa peningkatan rasio c/a berkorelasi dengan rendahnya tingkat cation mixing, sehingga ion Li<sup>+</sup> dapat berdifusi lebih mudah dalam jalur antar-lapisan. Selain itu, Kouthaman [28] menegaskan bahwa kestabilan struktur berlapis sangat dipengaruhi oleh nilai rasio c/a, di mana rasio yang lebih tinggi berhubungan dengan peningkatan kapasitas spesifik dan stabilitas siklus jangka panjang. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa suhu kalsinasi 750°C menghasilkan struktur kristal paling ideal bagi NMC721 dalam mendukung kinerja elektrokimia baterai litium-ion.

#### 4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa suhu kalsinasi berpengaruh signifikan terhadap morfologi, komposisi, serta keteraturan struktur kristal material NMC721. Pada suhu 700 °C, partikel masih menunjukkan aglomerasi tinggi, distribusi ukuran tidak seragam, serta tingkat *cation mixing* yang relatif besar akibat kristalisasi yang belum sempurna. Kalsinasi pada 800 °C menghasilkan pertumbuhan butir berlebih dan densifikasi kuat, yang meskipun meningkatkan kerapatan partikel, justru menurunkan luas permukaan spesifik, memperpanjang jalur

difusi Li<sup>+</sup>, dan meningkatkan risiko kehilangan Li maupun volatilitas Ni.

Sebaliknya, suhu 750 °C terbukti memberikan kondisi optimum dengan morfologi homogen, distribusi ukuran partikel seragam, serta komposisi unsur Ni, Mn, dan Co yang paling mendekati desain teoritis. Hasil analisis XRD memperlihatkan keteraturan lapisan tertinggi pada suhu ini, dengan rasio I<sub>003</sub>/I<sub>104</sub> sebesar 1,283 dan nilai rasio c/a 4,9457, menandakan rendahnya *cation mixing* dan stabilitas struktur berlapis yang baik.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa suhu kalsinasi 750 °C merupakan kondisi optimum untuk sintesis material katoda NMC721, karena mampu menghasilkan morfologi, komposisi, dan keteraturan struktur kristal yang paling ideal untuk mendukung performa elektrokimia baterai litium-ion, khususnya dalam hal kapasitas spesifik, stabilitas siklus, dan kemampuan laju.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Fakhruddin and E. Kartini, "La-incorporated NMC811 as a new Li-ion battery cathode material," 2022, p. 070003. doi: 10.1063/5.0123495.
- [2] B. Anggraini, S. Suwarno, and Hariyanto, "The Effect of Aluminium-Doped LiNi<sub>0</sub>, 8Mn<sub>0</sub>, 1Co<sub>0</sub>, 1O<sub>2</sub> (NMC 811) Cathode on Lithium-Ion Battery Performance," 2025, pp. 495–505. doi: 10.1007/978-981-96-0476-0\_35.
- [3] C. M. Julien and A. Mauger, "NCA, NCM811, and the Route to Ni-Richer Lithium-Ion Batteries," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 23, p. 6363, Dec. 2020, doi: 10.3390/en13236363.
- [4] A. V. Ivanishchev, S.-H. Lee, J.-J. Kim, I. A. Ivanishcheva, S.-C. Nam, and J.-H. Song, "Li-ion diffusion characteristics of surface modified Ni-rich NCM cathode material," *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 932, p. 117242, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.jelechem.2023.117242.
- [5] J. Li *et al.*, "Addressing cation mixing in layered structured cathodes for lithium-ion batteries: A critical review," *Nano Materials Science*, vol. 5, no. 4, pp. 404–420, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.nanoms.2022.09.001.
- [6] S. Rahayu *et al.*, "The Calcination Temperature Effect on Crystal Structure of LiNi<sub>1/3</sub>Mn<sub>1/3</sub>Co<sub>1/3</sub>O<sub>2</sub> Cathode Material for Lithium-Ion Batteries," *Journal of Batteries for Renewable Energy and Electric Vehicles*, vol. 1, no. 02, pp. 68–75, Nov. 2023, doi: 10.59046/jbrev.v1i02.22.
- [7] H. Ronduda *et al.*, "On the Sensitivity of the Ni-rich Layered Cathode Materials for Li-ion Batteries to the Different Calcination Conditions," *Nanomaterials*, vol. 10, no. 10, p. 2018, Oct. 2020, doi: 10.3390/nano10102018.
- [8] M. K. Saskia and E. Kartini, "Current State of Lithium Ion Battery Components and Their Development," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 553, no. 1, p. 012058, Nov. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/553/1/012058.
- [9] R. Fahmi, E. Kartini, and M. Fakhruddin, "Synthesis and characterization of NMC111 cathode by co-precipitation method," 2023, p. 020009. doi: 10.1063/5.0121103.

- [10] P. Slowik, N. P. Lutsey, and Chih Wei Hsu, "How technology, recycling, and policy can mitigate supply risks to the long-term transition to zero-emission vehicles," Washington, 2020. doi: 10.13140/RG.2.2.30613.35041.
- [11] K. Heo *et al.*, "Ionic Conductor-LiNi<sub>0.8</sub>Co<sub>0.1</sub>Mn<sub>0.1</sub>O<sub>2</sub> Composite Synthesized by Simultaneous Co-Precipitation for Use in Lithium Ion Batteries," *J Electrochem Soc*, vol. 165, no. 13, pp. A2955–A2960, Sep. 2018, doi: 10.1149/2.0201813jes.
- [12] L. Bläubaum, F. Röder, C. Nowak, H. S. Chan, A. Kwade, and U. Krewer, "Impact of Particle Size Distribution on Performance of Lithium-Ion Batteries," *ChemElectroChem*, vol. 7, no. 23, pp. 4755–4766, Dec. 2020, doi: 10.1002/celec.202001249.
- [13] C. Patel *et al.*, "Optimizing the Performance of NMC 622 Battery Half Coin Cells by Using Amphiphilic Aqueous Binders to Modulate the Percolation of Carbon Black," *ECS Meeting Abstracts*, vol. MA2024-02, no. 5, pp. 673–673, Nov. 2024, doi: 10.1149/MA2024-025673mtgabs.
- [14] H. Kim, M. G. Kim, H. Y. Jeong, H. Nam, and J. Cho, "A New Coating Method for Alleviating Surface Degradation of LiNi<sub>0.6</sub>Co<sub>0.2</sub>Mn<sub>0.2</sub>O<sub>2</sub> Cathode Material: Nanoscale Surface Treatment of Primary Particles," *Nano Lett*, vol. 15, no. 3, pp. 2111–2119, Mar. 2015, doi: 10.1021/acs.nanolett.5b00045.
- [15] Z. Zhang, D. Chen, and C. Chang, "Improved electrochemical performance of LiNi<sub>0.8</sub>Co<sub>0.1</sub>Mn<sub>0.1</sub>O<sub>2</sub> cathode materials via incorporation of rubidium cations into the original Li sites," *RSC Adv*, vol. 7, no. 81, pp. 51721–51728, 2017, doi: 10.1039/C7RA10053A.
- [16] D. Liu *et al.*, "A cation/anion co-doped Li<sub>1.12</sub>Na<sub>0.08</sub>Ni<sub>0.2</sub>Mn<sub>0.6</sub>O<sub>1.95</sub>F<sub>0.05</sub> cathode for lithium ion batteries," *Nano Energy*, vol. 58, pp. 786–796, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.nanoen.2019.01.080.
- [17] U.-H. Kim, S.-B. Lee, J.-H. Ryu, C. S. Yoon, and Y.-K. Sun, "Optimization of Ni-rich Li[Ni<sub>0.92-x</sub>Co<sub>0.04</sub>Mn<sub>0.04</sub>Al<sub>x</sub>]O<sub>2</sub> cathodes for high energy density lithium-ion batteries," *J Power Sources*, vol. 564, p. 232850, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.jpowsour.2023.232850.
- [18] A. O. Kondrakov *et al.*, "Charge-Transfer-Induced Lattice Collapse in Ni-Rich NCM Cathode Materials during Delithiation," *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 121, no. 44, pp. 24381–24388, Nov. 2017, doi: 10.1021/acs.jpcc.7b06598.
- [19] C. S. dos Santos *et al.*, "A closed-loop process to recover Li and Co compounds and to resynthesize LiCoO<sub>2</sub> from spent mobile phone batteries," *J Hazard Mater*, vol. 362, pp. 458–466, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.09.039.
- [20] Y. Zhao *et al.*, "Surface Structural Transition Induced by Gradient Polyanion-Doping in Li-Rich Layered Oxides: Implications for Enhanced Electrochemical Performance," *Adv Funct Mater*, vol. 26, no. 26, pp. 4760–4767, Jul. 2016, doi: 10.1002/adfm.201600576.
- [21] F. Omenya, N. A. Chernova, H. Zhou, C. Siu, and M. S. Whittingham, "Comparative Study Nickel Rich Layered Oxides: NMC 622, NMC 811 and NCA Cathode Materials for Lithium Ion Battery," *ECS Meeting Abstracts*, vol. MA2018-01, no. 3, pp. 531–531, Apr. 2018, doi: 10.1149/MA2018-01/3/531.
- [22] F. Schipper *et al.*, "From Surface ZrO<sub>2</sub> Coating to Bulk Zr Doping by High Temperature Annealing of Nickel-Rich Lithiated Oxides and Their Enhanced Electrochemical Performance in Lithium Ion Batteries," *Adv Energy Mater*, vol. 8, no. 4, Feb. 2018, doi: 10.1002/aenm.201701682.
- [23] 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.
- [24] X. Zhao *et al.*, "Prepared MnO<sub>2</sub> with different crystal forms as electrode materials for supercapacitors: experimental research from hydrothermal crystallization process to electrochemical performances," *RSC Adv*, vol. 7, no. 64, pp. 40286–40294, 2017, doi: 10.1039/C7RA06369E.
- [25] 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 (Basel)*, vol. 15, no. 16, p. 5794, Aug. 2022, doi: 10.3390/en15165794.
- [26] W. Zhao *et al.*, "Optimized Al doping improves both interphase stability and bulk structural integrity of Ni-rich NMC cathode materials," *ACS Appl Energy Mater*, vol. 3, no. 4, pp. 3369–3377, 2020.
- [27] T. Shi *et al.*, "Cation mixing regulation of cobalt-free high-nickel layered cathodes enables stable and high-rate lithium-ion batteries," *Nano Energy*, vol. 123, p. 109410, May 2024, doi: 10.1016/j.nanoen.2024.109410.
- [28] M. Kouthaman, K. Kannan, P. Arjunan, T. Meenatchi, R. Subadevi, and M. Sivakumar, "Novel layered O<sub>3</sub>-NaFe<sub>0.45</sub>Co<sub>0.45</sub>Ti<sub>0.1</sub>O<sub>2</sub> cathode material for sodium batteries," *Mater Lett*, vol. 276, p. 128181, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.matlet.2020.128181.