

STUDI LITERATUR: ANALISIS PENGARUH DOPING PADA KATODA NMC 811 DALAM MENINGKATKAN KINERJA ELEKTROKIMIA BATERAI LITHIUM-ION

Vita Ambarwati ¹, Mohammad Iqbal Faza Masyrofi ²
Fakultas Teknik Universitas Gresik, Gresik, Indonesia ^{1,2}
Corresponding Author: vita.ambarwati17@gmail.com^{1*}

Abstrak

Baterai lithium-ion (LIB) adalah teknologi penyimpanan energi yang banyak digunakan, terutama pada kendaraan listrik dan energi terbarukan, karena densitas energi yang tinggi dan siklus hidup yang panjang. Salah satu material katoda yang menjanjikan adalah NMC 811 (*Nickel Manganese Cobalt*) karena kapasitas energinya yang besar. Namun, masalah degradasi kapasitas dan stabilitas siklus masih menjadi tantangan utama dalam pengembangan material ini. Penelitian ini berfokus pada strategi doping untuk meningkatkan kinerja elektrokimia katoda NMC 811. Penambahan elemen seperti aluminium (Al), timah (Sn), dan scandium (Sc) telah terbukti efektif dalam meningkatkan kapasitas retensi, konduktivitas, dan stabilitas struktural. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh doping terhadap kapasitas spesifik, efisiensi coulombic, stabilitas siklus, dan konduktivitas ionik katoda NMC 811, sekaligus mengidentifikasi elemen dopan yang paling efektif. Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif dengan teknik studi literatur dari berbagai sumber ilmiah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa doping merupakan solusi efektif untuk mengatasi keterbatasan katoda NMC 811, mendukung pengembangan baterai lithium-ion yang lebih baik untuk masa depan. Selain meningkatkan performa elektrokimia, doping juga berkontribusi pada teknologi penyimpanan energi yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Kata Kunci: Doping; Elektrokimia; Katoda; LIB; NMC 811

Abstract

Lithium-ion batteries (LIBs) are a widely used energy storage technology, especially in electric vehicles and renewable energy, due to their high energy density and long cycle life. One of the promising cathode materials is NMC 811 (Nickel Manganese Cobalt) due to its large energy capacity. However, the issues of capacity degradation and cycle stability are still major challenges in the development of this material. This research focuses on doping strategies to improve the electrochemical performance of NMC 811 cathode. The addition of elements such as aluminum (Al), tin (Sn), and scandium (Sc) has been shown to be effective in improving retention capacity, conductivity, and structural stability. The purpose of this study is to analyze the effect of doping on the specific capacity, coulombic efficiency, cycle stability, and ionic conductivity of NMC 811 cathodes, while identifying the most effective dopant elements. This research uses a descriptive qualitative approach with literature study techniques from various scientific sources. The results show that doping is an effective solution to overcome the limitations of NMC 811 cathode, supporting the development of better lithium-ion batteries for the future. In addition to improving electrochemical performance, doping also contributes to a more efficient and sustainable energy storage technology.

History:

Received : 25 Februari 2024

Revised : 10 Maret 2024

Accepted: 23 April 2024

Published: 30 Oktober 2024

Publisher: LPPM Universitas Darma Agung

Licensed: This work is licensed under

[Attribution-NonCommercial-No](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

[Derivatives 4.0 International \(CC BY-NC-ND 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)



Keywords: Doping; Electrochemistry; Cathode; LIB; NMC 811

Pendahuluan

Baterai lithium-ion (LIB) merupakan teknologi penyimpanan energi yang paling banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, mulai dari perangkat elektronik portabel hingga kendaraan listrik dan penyimpanan energi terbarukan. Keunggulan LIB terletak pada densitas energinya yang tinggi, umur pakai yang panjang, dan efisiensi siklus yang baik (Wang, dkk., 2019). Dalam LIB, material katoda memegang peranan penting dalam menentukan kapasitas energi dan stabilitas baterai.

Baterai lithium-ion telah menjadi salah satu solusi utama dalam transisi menuju kendaraan listrik dan penyimpanan energi terbarukan. Kinerja baterai ini sangat bergantung pada material katoda yang digunakan, di mana salah satu material yang menjanjikan adalah NMC (*Nickel Manganese Cobalt*) dengan komposisi NMC 811, yaitu rasio nikel, mangan, dan kobalt sebesar 8:1:1. Material ini dipilih karena kemampuan tinggi dalam menyimpan energi dan stabilitas termal yang baik, menjadikannya pilihan ideal untuk aplikasi baterai modern.

Salah satu material katoda yang menjanjikan adalah NMC 811, yang mengandung nikel, mangan, dan kobalt dengan rasio 8:1:1. Material ini memiliki kapasitas energi yang tinggi berkat kandungan nikel yang dominan (Zhang, dkk., 2019). Namun, kandungan nikel yang tinggi juga membawa tantangan, seperti stabilitas struktural yang rendah dan risiko peluruhan kapasitas setelah siklus pengisian dan pengosongan yang berulang.

Salah satu pendekatan yang menjanjikan dalam mengatasi tantangan tersebut adalah melalui doping, yaitu penambahan elemen tertentu ke dalam struktur material katoda untuk memodifikasi sifat fisikokimianya. Doping dapat meningkatkan stabilitas termal, mengurangi degradasi oksidatif, dan memperbaiki konduktivitas ionik serta elektronik material. Berbagai elemen seperti aluminium, magnesium, titanium, dan boron telah dieksplorasi sebagai dopan yang dapat meningkatkan kinerja NMC 811. Doping bertujuan untuk meningkatkan stabilitas struktural, konduktivitas ionik, serta ketahanan terhadap degradasi termal dan elektrokimia. Beberapa elemen doping yang umum digunakan meliputi aluminium (Al), besi (Fe), dan timah (Sn) (Rethwisch, dkk., 2018).

Doping pada katoda NMC 811 tidak hanya meningkatkan kapasitas spesifik tetapi juga memperbaiki efisiensi *coulombic* dan stabilitas siklus baterai. Katoda berbasis nikel-mangan-kobalt (NMC), khususnya NMC 811 dengan rasio 80% nikel, 10% mangan, dan 10% kobalt. Penambahan elemen tertentu dapat mengurangi deformasi struktural dan meminimalkan reaksi samping yang merugikan, sehingga baterai dapat bertahan lebih lama dengan performa yang konsisten (Darjazi, dkk., 2022).

Pengembangan teknologi baterai, analisis pengaruh doping pada katoda NMC 811 memiliki implikasi yang signifikan. Selain mendukung kemajuan teknologi kendaraan listrik yang lebih efisien dan ramah lingkungan, inovasi ini juga

membantu mengatasi tantangan global terkait pengurangan emisi karbon dan peningkatan efisiensi penyimpanan energi. Penelitian mengenai efek doping ini sangat penting untuk memahami bagaimana perubahan struktur kristal dan sifat material dapat berdampak pada kinerja elektrokimia baterai lithium-ion secara keseluruhan. Oleh karena itu, diperlukan penelitian yang mendalam untuk mengeksplorasi kombinasi elemen doping yang paling efektif. Sehingga penelitian ini tidak hanya relevan secara ilmiah tetapi juga strategis untuk mendorong perkembangan teknologi energi yang lebih berkelanjutan di masa depan.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan Kualitatif Deskriptif dengan teknik pengumpulan data melalui studi literatur. Menurut Sarwono (2006) studi literatur adalah kegiatan mengkaji data dari berbagai sumber, seperti buku referensi dan hasil penelitian terdahulu yang relevan, guna membangun landasan teori yang mendukung penelitian yang akan dilakukan. Studi literatur juga sering disebut sebagai penelitian pustaka, yang berfokus pada analisis dokumen berupa artikel, jurnal, dan koleksi perpustakaan tanpa memerlukan pengumpulan data di lapangan. Data yang dianalisis dalam penelitian ini berasal dari Jurnal Nasional maupun Internasional, serta skripsi yang memiliki variabel serupa dengan penelitian ini dan diterbitkan mulai tahun 2020. Hasil dari studi literatur akan disajikan dalam bentuk diagram untuk mempermudah pembaca dalam memahami informasi.

Hasil dan Pembahasan

Hasil

Beberapa penelitian dan pengembangan yang dilakukan beberapa tahun terakhir mengenai penambahan doping pada Katoda NMC 811 dalam meningkatkan kinerja elektrokimia baterai lithium-ion akan disajikan pada Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Doping pada Katoda NMC 811 dalam Meningkatkan Kinerja Elektrokimia Baterai Lithium-Ion

No	Peneliti dan Tahun Terbit	Judul Jurnal	Kesimpulan Artikel
1	Fiona Angellinov, Achmad Subhan, Alan J. Drew, and Anne Z. Syahrial (2024)	<i>Synthesis of Sn Doped and Rice Husk Derived Activated Carbon Surface Coating NMC 811 Through Solution Combustion Method</i>	Doping dengan Sn dan pelapisan menggunakan karbon aktif dari sekam padi meningkatkan stabilitas antarmuka dan struktur NMC 811, menghasilkan kapasitas pelepasan yang tinggi sebesar 250,2 mAh/g.
2	Wijareni, A. S., Widiyandari, H., Purwanto, A., Arif,	<i>Morphology and particle size of a synthesized NMC 811</i>	Penelitian menunjukkan bahwa katoda NMC 811 yang disintesis dengan berbagai

	A. F., & Mubarak, M. Z (2022)	<i>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</i>	sumber nikel menghasilkan performa elektrokimia terbaik pada sampel SX-LNMCO-811, mencapai kapasitas 178,93 mAh/g dengan efisiensi 94,32%.
3	Miftakhul Hakam, Adhitya Dharmawana, Meidiana Arinawatia, Agus Purwantoa, dan Cornelius Satria Yudhaa (2020)	Sintesis dan Analisis Struktur Prekursor NMC 811 dari <i>Mix Hydroxide</i>	Prekursor NMC811 oksalat memiliki sifat kristal yang baik dan kemurnian tinggi, menjadikannya bahan baku yang potensial untuk material katoda baterai ion lithium tipe NMC811.
4	Rina Amalia Pratiwi (2020)	Karakterisasi Performa Sel Penuh Baterai Ion Lithium dengan NMC 811 sebagai Katoda	NMC 811 menunjukkan kapasitas muatan yang lebih besar dan proses charge-discharge yang lebih reversible dibandingkan dengan NMC 622, menjadikannya pilihan yang menarik untuk aplikasi baterai masa depan.
5	Mattia Colalongo, Basit Ali, Nikita Vostrov, Michal Ronovský, Marta Mirolo, Valentin Vinci, Cesare Atzori, Isaac Martens, Peter Kus, Andrea Sartori, Lide Yao, Hua Jiang, Tobias Schulli, Jakub Drnec, Timo Kankaanpa, and Tanja Kallio (2024)	<i>Operando Investigation of Zr Doping in NMC 811 Cathode for High Energy Density Lithium Ion Batteries</i>	Doping Zr pada NMC 811 mengurangi pembentukan fase H3 yang merugikan dan mengurangi pelarutan logam transisi selama siklus, meningkatkan stabilitas elektrokimia.

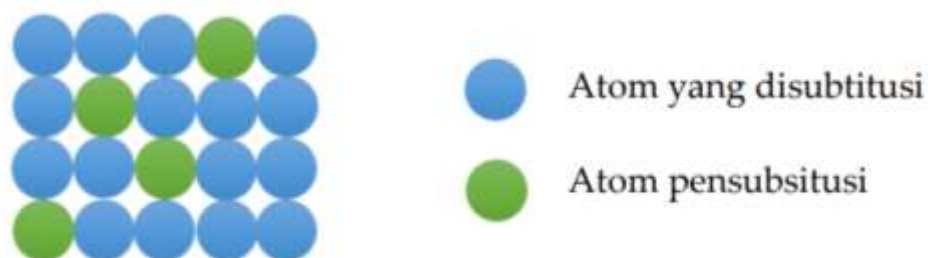
Pembahasan

Pendopongan dan pelapisan permukaan pada katoda merupakan strategi yang

dapat diterapkan untuk meningkatkan stabilitas termal katoda NMC tanpa mengurangi kapasitas spesifik yang dimilikinya (Chakraborty, dkk., 2020). Pendopongan merupakan teknik yang melibatkan penambahan sejumlah kecil atom asing ke dalam kisi kristal material (Effendy, 2010). Tujuan utama dari pendopongan adalah untuk mengoptimalkan sifat tertentu yang diinginkan dari material tersebut. Dalam konteks material katoda, pendopongan memiliki beberapa manfaat, seperti: (1) meningkatkan konduktivitas ionik dan elektronik, (2) pada katoda NMC, pendopongan dapat mencegah migrasi ion Ni^{2+} ke lapisan atom Li dalam material, sehingga membantu mempertahankan kestabilan struktur dan mengurangi pencampuran antar kation, serta (3) mengurangi pelepasan oksigen dengan memperkuat ikatan antara logam transisi dan oksigen, sehingga memengaruhi transformasi fase selama proses siklus pengisian dan pengosongan baterai.

Ketika material katoda mengalami proses pendopongan dengan elemen tertentu, terjadi gradien konsentrasi di mana konsentrasi dopan lebih tinggi di permukaan material dan menurun menuju inti partikel. Pemilihan material dopan yang sesuai mempertimbangkan berbagai faktor, termasuk sifat kimia dopan, konsentrasi yang optimal, kedalaman pendopongan, serta parameter yang memastikan dopan dapat stabil dalam matriks material induk. Konsentrasi dopan juga memengaruhi kapasitas dan stabilitas siklus baterai, khususnya pada material katoda dengan kandungan nikel yang tinggi (Yan, dkk., 2020). Salah satu mekanisme dalam pendopongan adalah melalui proses substitusi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Substitusi atom terjadi ketika satu atom digantikan oleh atom lain, dengan syarat-syarat tertentu yang harus dipenuhi (Effendy, 2010), yaitu:

1. Perbedaan jari-jari atom dari kedua unsur tidak boleh melebihi 15%.
2. Kedua elemen yang terlibat harus memiliki struktur kristal yang identik.
3. Kedua elemen harus memiliki sifat kimia yang serupa.



Gambar 1. Mekanisme Substitusi Atom
(Sumber : Effendy, 2010)

Material NMC 811 memiliki struktur lapisan oksida yang memungkinkan pergerakan ion lithium selama proses siklus. Kandungan nikel yang tinggi (80%) memberikan kapasitas energi yang besar, tetapi juga membuat material lebih rentan terhadap peluruhan struktural. Elemen mangan (Mn) membantu meningkatkan stabilitas struktural, sedangkan kobalt (Co) meningkatkan konduktivitas elektronik. Perbandingan elemen ini memberikan keseimbangan antara kapasitas tinggi dan stabilitas siklus, namun masih membutuhkan optimasi lebih lanjut melalui doping (Peralta, dkk., 2018).

Proses sintesis katoda NMC 811 dilakukan dengan metode ko-presipitasi menggunakan berbagai sumber nikel. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa bentuk partikel dan distribusi elemen Ni, Mn, dan Co berpengaruh terhadap performa elektrokimia. Katoda yang menggunakan nikel sulfat hasil sintesis menunjukkan performa terbaik dengan kapasitas mencapai 178,93 mAh/g. Karakterisasi morfologi menggunakan SEM menunjukkan bahwa partikel dari katoda yang disintesis memiliki bentuk yang lebih bulat dan seragam dibandingkan dengan prekursor komersial, yang berkontribusi pada peningkatan kinerja elektrokimia (Wijareni, dkk., 2022).

Berdasarkan Tabel 1 dari 5 penelitian yang dilakukan mulai dari tahun 2020-2024 dapat disimpulkan bahwa doping pada katoda NMC 811 menunjukkan bahwa penambahan elemen dopan, seperti aluminium, secara signifikan meningkatkan kinerja elektrokimia baterai lithium-ion. Doping aluminium pada katoda NMC 811 tidak hanya meningkatkan kapasitas retensi, mencapai hingga 76,19%, tetapi juga memperbaiki reversibilitas reaksi redoks selama siklus pengisian dan pengosongan. Selain itu, proses sintesis katoda menggunakan metode ko-presipitasi dengan sumber nikel yang tepat menghasilkan material dengan kapasitas tinggi dan efisiensi yang baik. Penelitian juga menunjukkan bahwa doping dengan logam lainnya, seperti timah (Sn), dapat meningkatkan konduktivitas dan kapasitas baterai, yang berkontribusi pada performa keseluruhan katoda.

Penambahan dopan $\text{Al}(\text{OH})_3$ pada katoda NMC 811 secara signifikan meningkatkan kapasitas retensi baterai. Katoda dengan doping 2,5% Al menunjukkan kapasitas retensi tertinggi sebesar 76,19%, sedangkan katoda tanpa doping hanya mencapai 57,74% setelah 75 siklus pada laju pengisian 0,5C. Doping juga meningkatkan reversibilitas reaksi redoks selama siklus charge-discharge. Selisih puncak potensial redoks terkecil ditemukan pada sampel NMC811-2,5%Al (1,81 V), menunjukkan bahwa doping dapat mengurangi resistensi dan meningkatkan efisiensi elektroda (Bagus, 2024).

Doping juga berkontribusi pada peningkatan efisiensi *coulombic*. Katoda NMC 811 dengan doping Sc menunjukkan efisiensi *coulombic* mencapai 96,016%, yang menunjukkan bahwa lebih banyak muatan dapat dipertahankan dan digunakan selama siklus pengisian dan pengosongan. Doping meningkatkan stabilitas siklus dengan mengurangi degradasi kapasitas selama penggunaan. Katoda NMC-7,5% Sc menunjukkan retensi kapasitas terbaik sebesar 87,54%, menandakan bahwa doping dapat memperpanjang umur pakai baterai (Ambarawati, dkk., 2024). Doping juga berpengaruh positif terhadap konduktivitas ionik. Penambahan dopan dapat meningkatkan diameter partikel dan keteraturan struktur kristal, yang berkontribusi pada peningkatan konduktivitas ionik dalam katoda (Bagus, 2024).

Kinerja elektrokimia katoda sangat dipengaruhi oleh konduktivitas ionik dan elektron. Doping dengan elemen seperti Al atau Sc dapat meningkatkan konduktivitas ini, sehingga mempercepat proses transfer ion lithium selama siklus pengisian dan pengosongan. Penelitian menunjukkan bahwa katoda NMC 811 yang didoping memiliki nilai konduktivitas ionik yang lebih tinggi dibandingkan dengan

yang tidak didoping (He, dkk., 2022). Hal ini berkontribusi pada peningkatan efisiensi energi baterai secara keseluruhan.

Secara keseluruhan, berbagai strategi doping pada katoda NMC 811 telah menunjukkan potensi dalam meningkatkan kinerja elektrokimia baterai lithium-ion. Setiap elemen dopan memberikan efek yang berbeda pada struktur kristal, stabilitas termal, konduktivitas, dan kapasitas retensi material katoda. Pemilihan dan optimasi jenis serta konsentrasi dopan yang tepat sangat penting untuk mencapai peningkatan kinerja yang diinginkan.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil dari studi literatur dapat disimpulkan bahwa logam seperti aluminium, scandium, timah, zirconium dapat digunakan sebagai bahan doping pada katoda NMC 811. Doping aluminium pada katoda NMC 811 tidak hanya meningkatkan kapasitas retensi, mencapai hingga 76,19%, tetapi juga memperbaiki reversibilitas reaksi redoks selama siklus pengisian dan pengosongan. Penambahan timah dapat meningkatkan konduktivitas dan kapasitas baterai, yang berkontribusi pada performa keseluruhan katoda. Katoda NMC 811 dengan doping Sc menunjukkan efisiensi *coulombic* mencapai 96,016%, yang menunjukkan bahwa lebih banyak muatan dapat dipertahankan dan digunakan selama siklus pengisian dan pengosongan. Dengan demikian, doping merupakan strategi yang efektif untuk mengoptimalkan kinerja katoda NMC 811 dalam aplikasi baterai lithium-ion, menjadikannya pilihan menarik untuk pengembangan teknologi penyimpanan energi yang lebih efisien dan berkelanjutan. Selain itu, proses sintesis katoda menggunakan metode ko-presipitasi dengan sumber nikel yang tepat menghasilkan material dengan kapasitas tinggi dan efisiensi yang baik. Penelitian ini tidak hanya relevan secara ilmiah tetapi juga berkontribusi pada pengembangan teknologi penyimpanan energi yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan. Sebagai langkah selanjutnya, diperlukan penelitian lebih mendalam untuk mengeksplorasi kombinasi elemen dopan dan optimasi parameter sintesis guna meningkatkan performa baterai secara keseluruhan, termasuk dalam aplikasi kendaraan listrik dan penyimpanan energi terbarukan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ambarwati, V., Mubarok, M. Z., & Purwanto, A. (2024). Effect of Scandium Doping on The Structural Properties and Electrochemical Performance of Nickel-Rich Cathode Precursor of Lithium Ion-Battery. *Materials Chemistry and Physics*, 313, 128726. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128726>
- Anggraini, Bagus (2024). Analisis Pengaruh Penambahan Dopan Aluminium pada Katoda $\text{LiNi}_{0,8}\text{Mn}_{0,1}\text{Co}_{0,1}\text{O}_2$ (NMC 811) terhadap Performa Baterai Litium Ion. *Masters thesis*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Chakraborty, A., Kunnikuruvaan, S., Dixit, M., dan Major, D. T. (2020). Review of Computational Studies of NCM Cathode Materials for Li-ion Batteries. *Israel Journal of Chemistry*, 60(8–9), 850–862. <https://doi.org/10.1002/ijch.201900116>

- Colalongo, Mattia., Ali, Basit., Vostrov, Nikita., Ronovský, Michal., Mirolo, Marta., Vinci, Valentin., Atzori, Cesare., Martens, Isaac., Kúš, Peter., Sartori, Andrea., Yao, Lide., Hua, Jiang., Schulli, Tobias., Drnec, Jakub., Kankaanpää, Timo., & Kallio, Tanja. (2024). Operando Investigation of Zr Doping in NMC811 Cathode for High Energy Density Lithium Ion Batteries. *ChemSusChem*. e202401796: 1-13. doi.org/10.1002/cssc.202401796
- Darjazi, H., Gonzalo, E., Acebedo, B., Cid, R., Zarrabeitia, M., Bonilla, F., MuñozMárquez, M. Á., dan Nobili, F. (2022). Improving High-Voltage Cycling Performance of Nickel-Rich NMC Layered Oxide Cathodes for Rechargeable Lithium-ion Batteries by Mg and Zr co-doping. *Materials Today Sustainability*, 100236. https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2022.100236
- Drew, Alan J., Syahrial, Anne Z. (2023)., Synthesis of Sn Doped and Rice Husk Derived Activated Carbon Surface Coating NMC 811 Through Solution Combustion Method. *Heliyon* 10. E23199. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23199.
- Effendy. (2010). Logam, Alloy, Semikonduktor dan Superkonduktor. Bayumedia Publishing.
- Hakam, Miftahul., Dharmawana, Adhitya., Arinawatia, Meidiana., Purwanto, Agus., dan Yudhaa, C. S. (2021). Sintesis dan Analisis Struktur Prekursor NMC811 dari Mix Hydroxide Precipitate (MHP) dengan Presipitan Asam Oksalat. *Equilibrium Journal of Chemical Engineering*. 5 (2): 111-115. https://dx.doi.org/10.20961/equilibrium.v5i2.58478
- He, R., Bai, X., Wei, A., Zhang, L., Liu, P., dan Liu, Z. (2022). Y₂O₃ Modification on Nickel-rich LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O₂ with Improved Electrochemical Performance in Lithium-ion Batteries. *Journal of Rare Earths*, 40(2), 309– 317. https://doi.org/10.1016/j.jre.2020.12.010
- Peralta, D., Salomon, J., Colin, J. F., Boulineau, A., Fabre, F., Bourbon, C., Amestoy, B., Gutel, E., Bloch, D., dan Patoux, S. (2018): Submicronic LiNi_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}O₂ Synthesized by Co-precipitation for Lithium Ion Batteries - Tailoring a Classic Process for Enhanced Energy and Power Density. *Journal of Power Sources*, 396(May), 527–532. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.06.075
- Pratiwi, R. A. (2022). Karakterisasi Performa Sel Penuh Baterai Ion Lithium Dengan Na₂Li₂Ti₆O₁₄ Sebagai Anoda Dan LiNi_{0,8}Mn_{0,1}Co_{0,1}O₂(NMC 811) sebagai Katoda. *Skripsi*. Universitas Sriwijaya.
- Rethwisch, E., Winter, M., dan Schappacher, F. M. (2018). Synthesis, Electrochemical Investigation and Structural Analysis of Doped Li[Ni_{0.6}Mn_{0.2}Co_{0.2-x}M_x]O₂ (x = 0, 0.05; M = Al, Fe, Sn) cathode materials. *Journal of Power Sources*, 387, 101–107. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.02.080
- Sarwono, J. (2006). Metode Penelitian Kuantitatif dan Kualitatif. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Wang, D., Liu, W., Zhang, X., Huang, Y., Xu, M., dan Xiao, W. (2019). Review of Modified Nickel-Cobalt Lithium Aluminate Cathode Materials for Lithium-Ion Batteries, *International Journal of Photoenergy*, 2019. https://doi.org/10.1155/2019/2730849

- Wijareni, A. S., Widiyandari, H., Purwanto, A., Arif, A. F., & Mubarok, M. Z. (2022). 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*, 15(16), 5794. <https://doi.org/10.3390/en15165794>
- Yan, W., Yang, S., Huang, Y., Yang, Y., dan Guohui Yuan. (2020). A Review on Doping/Coating of Nickel-Rich Cathode Materials for Lithium-Ion Batteries. *Journal of Alloys and Compounds*, 819. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153048>
- Zhang, D., Liu, Y., Wu, L., Feng, L., Jin, S., Zhang, R., dan Jin, M. (2019). Effect of Ti Ion Doping on Electrochemical Performance of Ni-rich LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O₂ Cathode Material. *Electrochimica Acta*, 328. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.135086>