



Sintesis Material Katoda $\text{LiNi}_{0,8}\text{Mn}_{0,1}\text{Co}_{0,1}\text{O}_2$ (NMC811) dengan Metode *Solid State* Menggunakan Nikel Hasil Perolehan Kembali dari *Spent Nickel Catalyst*

Hendri Widiyandari^{a,d*}, Rizqia Afifatu Latifah^a, Arif Jumari^{b,d}, Cornelius Satria Yudha^{c,d}, Shofirul Sholikhatun Nisa^d

^aProgram Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sebelas Maret

^bProgram Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret

^cProgram Studi D3 Teknik Kimia, Sekolah Vokasi, Universitas Sebelas Maret

Jalan Ir. Sutami 36 A, Kentingan, Surakarta 57126, Indonesia

^dPusat Unggulan Iptek Perguruan Tinggi Teknologi Penyimpanan Energi Listrik, Universitas Sebelas Maret

Jalan Slamet Riyadi No.435, Surakarta 57146, Indonesia

*Corresponding author: hendriwidiyandari@staff.uns.ac.id

DOI: 10.20961/alchemy.18.2.63035.214-220

Received 07 July 2022, Accepted 04 September 2022, Published 30 September 2022

Kata kunci:

baterai;
katoda;
NMC811;
solid state;
spent nickel catalyst.

ABSTRAK. Penelitian mengenai sintesis material katoda $\text{LiNi}_{0,8}\text{Mn}_{0,1}\text{Co}_{0,1}\text{O}_2$ (NMC811) menggunakan nikel hasil perolehan kembali dari *spent nickel catalyst* telah berhasil dilakukan menggunakan metode *solid state* dengan variasi perbandingan padatan *spent nickel catalyst*/larutan (padatan/larutan) yang digunakan untuk *leaching spent nickel catalyst* sebesar (20 g/L, 30 g/L, dan 40 g/L). Proses *leaching* dilakukan menggunakan asam laktat 2 M selama 3 jam dengan suhu 80 °C. Hasil dari proses ini adalah filtrat nikel laktat dengan endapan sebanyak 1,50 gram, 6,10 gram, dan 9,26 gram. Dalam filtrat tersebut terdapat ikatan hidroksida dan ikatan asam karboksilat. Material katoda NMC811 yang terbentuk memiliki enam puncak difraksi. Puncak difraksi *X-ray* tertinggi terdapat pada 2 θ 15° – 20° dan 44°. Morfologi permukaan dari material katoda NMC811 menunjukkan terbentuknya partikel yang irregular dengan ukuran yang tidak seragam. Komposisi material katoda menunjukkan bahwa katoda NMC811 berhasil diperoleh dengan kandungan nikel sebanyak 73% – 79%, mangan sebanyak 9% – 13% dan kobalt sebanyak 10% – 13%. Baterai *lithium-ion* yang dibuat menggunakan katoda NMC811 tersebut memiliki kapasitas masing-masing dengan variasi 20g/L sebesar 15,09 mAh/g, 30 g/L sebesar 28,42 mAh/g dan 40 g/L sebesar 25,57 mAh/g.

Keywords:

battery;
cathode;
NMC811;
solid state;
spent nickel catalyst.

ABSTRACT. Synthesis of $\text{LiNi}_{0,8}\text{Mn}_{0,1}\text{Co}_{0,1}\text{O}_2$ (NMC811) Cathode Material by Solid State Method Using Nickel Recovered from Spent Nickel Catalyst. Research on the synthesis of NMC811 cathode using nickel recovered from spent nickel catalyst was successfully carried out using the solid-state method with various ratios of solids spent nickel catalyst/solution used for leaching spent nickel catalyst (20 g/L, 30 g/L, and 40 g/L). The leaching process was carried out using 2 M lactic acid for 3 hours at a temperature of 80 °C. The result of this process is lactic nickel filtrate with a precipitate of 1.50 grams, 6.10 grams, and 9.26 grams. There are hydroxide bonds and carboxylic bonds in the filtrate. The NMC811 cathode material formed has six diffraction peaks. The highest X-ray diffraction peak is at 2- θ of 15° – 20° and 2- θ of 44°. The surface morphology of the NMC811 cathode material shows the formation of several lumps of non-uniform size. The composition of the cathode material shows that the NMC811 cathode has a nickel content of 73% – 79%, manganese of 9% – 13%, and cobalt of 10% – 13%. The lithium-ion battery made using the NMC811 cathode has a capacity of 20g/L at 15.09 mAh/g, 30 g/L at 28.42 mAh/g, and 40 g/L at 25.57 mAh/g.

PENDAHULUAN

Perkembangan yang sangat cepat pada penggunaan dan pengembangan baterai *lithium-ion* menjadikan material *Nickel Manganese Cobalt (NMC)* sebagai salah satu material yang paling sering digunakan untuk elektroda katoda pada baterai *lithium-ion*. Salah satu katoda yang menjanjikan adalah katoda *Ni-rich* NMC karena kapasitas teoritisnya yang tinggi (~200 mAh/g), ramah lingkungan, serta dapat mereduksi biaya produksi (Wood *et al.*, 2020). Namun, tingginya komposisi nikel pada katoda *Ni-rich* NMC menyebabkan penggunaan nikel untuk produksi semakin meningkat. Salah satu material yang dapat digunakan sebagai salah satu sumber alternatif lain yang mengandung nikel adalah *spent nickel catalyst*. *Spent nickel catalyst* adalah produk sampingan dari katalis nikel yang sudah digunakan dan mengalami penurunan efektivitas (Nafish *et al.*, 2020). Selain menjadi salah satu sumber alternatif nikel, mendaur ulang limbah *spent nickel catalyst* juga dapat mengurangi pencemaran terhadap

lingkungan karena *spent nickel catalyst* termasuk limbah yang berbahaya. Nikel dapat diperoleh dari *spent nickel catalyst* dengan melakukan *recovery* (Astuti *et al.*, 2018).

Terdapat beberapa metode untuk sintesis material katoda, di antaranya adalah *co-precipitation* dan *solid state*. Metode *solid state* merupakan suatu cara yang dilakukan dengan mereaksikan padatan dengan padatan lainnya dengan suhu yang tinggi. Metode ini dapat digunakan untuk mensintesis material, baik organik maupun anorganik. Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi hasil material yang diperoleh menggunakan metode *solid state* adalah luas kontak padatan pereaksi, laju difusi, dan laju nukleasi fasa produk. Terdapat beberapa langkah ketika melakukan sintesis menggunakan metode *solid state*. Langkah-langkah tersebut adalah penimbangan sampel, penggerusan sampel, kompaksi sampel, kalsinasi sampel, sintering sampel, dan karakterisasi sampel (Febriani *et al.*, 2018). *Solid-state* adalah metode yang paling sering digunakan dalam pembuatan katoda NMC dalam skala laboratorium karena metode tersebut praktis, sederhana, dan tidak membutuhkan banyak biaya dibanding dengan metode yang lain (Tang *et al.*, 2022). Dengan menggunakan metode tersebut, maka penggunaan nikel akan lebih praktis karena cukup dengan menambahkan nikel sesuai dengan perhitungan yang telah dilakukan sebelumnya. Sementara itu, *recovery spent nickel catalyst* dapat dilakukan dengan metode *leaching* menggunakan asam organik. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mensintesis material katoda NMC811 menggunakan bahan baku nikel yang berasal dari *recovery spent nickel catalyst*. Adapun metode perolehan kembali yang digunakan adalah menggunakan metode *leaching* menggunakan asam laktat dengan variasi rasio padatan/larutan. Sintesis katoda NMC dilakukan menggunakan metode *solid state*.

METODE PENELITIAN

Preparasi *Spent Nickel Catalyst*

Spent nickel catalyst yang digunakan berasal dari PT. Petro Oxo Nusantara Indonesia sebagai bahan utama untuk *recovery* nikel. Sebelum dilakukan *leaching* terhadap *spent nickel catalyst*, dilakukan pengolahan dengan cara *spent nickel catalyst* dihaluskan menggunakan alu dan mortar. *Spent nickel catalyst* yang sudah halus disaring menggunakan ayakan 100 mesh. *Spent nickel catalyst* yang dihasilkan dari pengayakan disimpan.

Leaching Spent Nickel Catalyst

Spent nickel catalyst sebanyak (20 gram, 30 gram, dan 40 gram) dimasukkan ke dalam asam laktat ($C_3H_6O_3$) Merck 90% dengan konsentrasi 2 M yang sudah dipanaskan hingga suhunya mencapai 80 °C. Setelah itu, hidrogen peroksida (H_2O_2) BDA Chemical 50% ditambahkan sebanyak 6% dari volume larutan. Larutan dipanaskan selama 3 jam, kemudian disaring dan filtrat disimpan. Rasio padatan/larutan ditetapkan sebesar (20 gram/L, 30 gram/L dan 40 gram/L).

Presipitasi Nikel Oksalat

Filtrat yang dihasilkan dari *leaching spent nickel catalyst* dipanaskan hingga suhu mendekati 60 °C. Larutan NaOH ditambahkan hingga pH filtrat menjadi 4. Larutan asam oksalat ($C_2H_4O_4$) ditambahkan. Kemudian larutan dipanaskan dengan suhu dijaga pada 60 °C selama 2 jam. Endapan berupa nikel oksalat yang diperoleh dicuci hingga netral. Setelah itu, endapan disaring dan dikeringkan.

Sintesis Material LiNMC

Mangan sulfat ($MnSO_4 \cdot H_2O$ dari Yaolong Chem, China) dipresipitasi menggunakan asam oksalat sehingga diperoleh material mangan oksalat. Hal yang sama dilakukan pada kobalt sulfat ($CoSO_4 \cdot 7H_2O$ dari Rubamin, India). Kobalt sulfat dipresipitasi menggunakan asam oksalat sehingga diperoleh material kobalt oksalat. Material mangan dan kobalt oksalat ini digunakan untuk sintesis material LiNMC. Massa dari nikel oksalat, mangan oksalat, dan kobalt oksalat yang dibutuhkan untuk membuat material NMC811 dihitung dengan perbandingan mol Ni:Mn:Co = 8:1:1. Nikel oksalat, mangan oksalat, dan kobalt oksalat dicampur hingga rata. Selanjutnya nikel oksalat, mangan oksalat, dan kobalt oksalat dikalsinasi dengan suhu 500 °C selama 6 jam. Setelah itu, litium hidroksida ($LiOH \cdot H_2O$) yang dibutuhkan dihitung dengan perbandingan NMC:Li = 1:1,1. Material NMC dicampur dengan litium hidroksida ($LiOH \cdot H_2O$) hingga rata. Material LiNMC di-sintering dengan suhu 800 °C selama 15 jam. Material LiNMC hasil *sintering* dihaluskan menggunakan motar dan alu.

Karakterisasi dan Uji Elektrokimia

Larutan nikel laktat ($\text{Ni}(\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2$) hasil dari proses *leaching* dikarakterisasi menggunakan *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS, Spectrometer iCE 3000 AA05022804 v1, 30 n), *Fourier Transform Infra-Red* (FTIR, Shimadzu FTIR Spectrometer, Japan). Material LiNMC dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffractometre* (EQ-MD-10LD Precision Mini XRD, MTI), *Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-Ray* (SEM-EDX, Jeol, JSM-6510LA, Tokyo, Japan). Uji performa elektrokimia dilakukan dengan menggunakan baterai *full cell* silinder tipe 18650. Anoda, *separator*, dan elektrolit yang digunakan adalah lembaran grafit, *cellgard* dan *lithium hexafluorophosphate* (LiPF_6). Material LiNMC dicampur dengan *acetylene black* (AB), *polyvinylidene fluoride* (PVDF), dan *N-Methyl-2-pyrrolidone* (NMP) hingga terbentuk *slurry*. *Slurry* tersebut dilapiskan pada lembaran *aluminium foil*. Lembaran katoda tersebut dioven pada suhu $100\text{ }^\circ\text{C}$ hingga kering dan kemudian dirakit menjadi baterai silinder. Uji elektrokimia dianalisis menggunakan *NEWARE Battery Analyzer*.

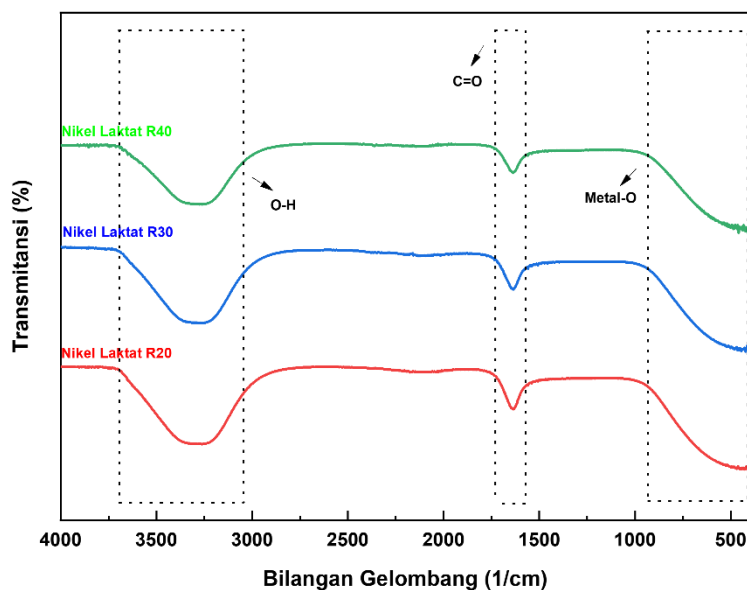
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil yang diperoleh dari *leaching spent catalyst* menggunakan asam laktat dengan variasi rasio padatan/larutan disajikan pada [Tabel 1](#).

Tabel 1. Hasil dari *leaching spent catalyst*.

Nama Sampel	Rasio padatan/larutan (g/L)	Endapan (g)	Kadar Nikel (mg/kg)
R20	20	1,50	384,580
R30	30	6,10	304,053
R40	40	9,26	359,260

Produk yang dihasilkan dari proses *leaching spent catalyst* berupa larutan nikel laktat ($\text{Ni}(\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2$) yang berwarna hijau. Warna hijau dari larutan semakin pekat ketika padatan *spent catalyst* yang ditambahkan semakin banyak. Warna hijau pada larutan tersebut menunjukkan bahwa nikel telah berhasil diperoleh kembali dari *spent nickel catalyst*. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini yaitu kadar nikel yang dihasilkan paling tinggi sebesar 380 gram/kg *spent nickel catalyst* yaitu dari variasi 30 gram/L. Variasi tersebut mempengaruhi efisiensi *leaching* karena semakin banyak padatan yang ditambahkan maka semakin besar pula kadar nikel yang diperoleh ([Li et al., 2017](#)).

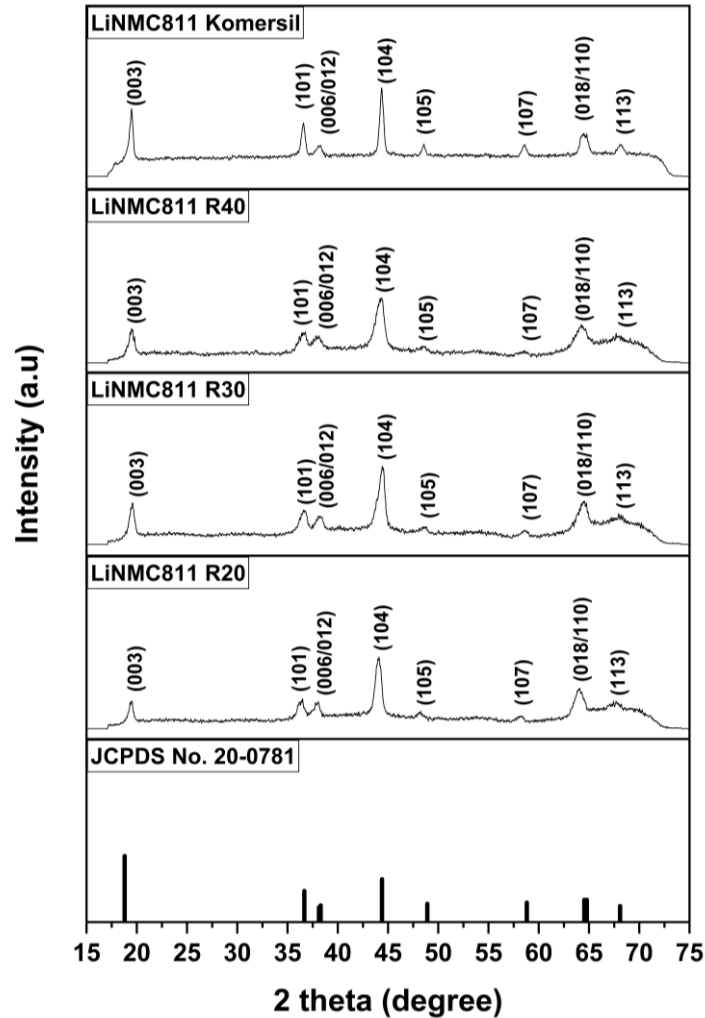


Gambar 1. Spektra FTIR dari nikel laktat yang dihasilkan untuk setiap variasi rasio padatan/larutan.

Larutan nikel laktat dikarakterisasi menggunakan FTIR dan diperoleh hasil yang ditunjukkan pada [Gambar 1](#). Uji FTIR menunjukkan adanya ikatan hidrogen pada pita serapan $3500 - 3650\text{ cm}^{-1}$. Selain monomer

asam karboksilat, hasil yang diperoleh juga menunjukkan adanya asam karboksilat pada pita serapan $1690 - 1760 \text{ cm}^{-1}$. Hal tersebut menunjukkan bahwa larutan yang diperoleh adalah nikel laktat, di mana molekul asam laktat memiliki gugus fungsi hidroksil dan asam karboksilat (Rahmayetty *et al.*, 2016).

Gambar 2 menunjukkan pola XRD dari material LiNMC yang dihasilkan. Material LiNMC yang dihasilkan dari perolehan kembali *spent catalyst* memiliki jumlah puncak yang berbeda dengan LiNMC komersil. Material LiNMC yang dihasilkan memiliki lima puncak yang mengindikasikan bahwa material LiNMC sudah terbentuk. Terdapat puncak yang tinggi pada 2θ $15^\circ - 20^\circ$ dan 44° . Puncak tinggi tersebut menunjukkan adanya fasa kristalin yang tinggi pada material LiNMC.



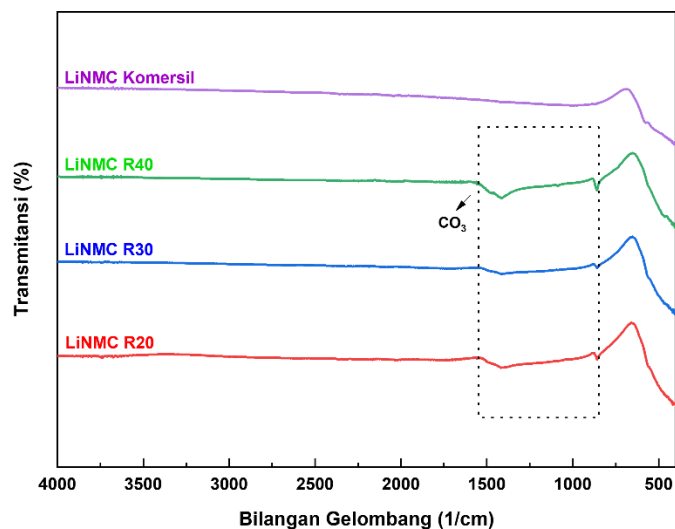
Gambar 2. Diffraktogram XRD dari LiNMC.

Perhitungan ukuran kristal dari material LiNMC dilakukan. Hasil yang diperoleh ditunjukkan pada Tabel 2. Ukuran kristal yang paling besar dimiliki oleh material LiNMC R30. Ukuran kristal memiliki pengaruh terhadap performa baterai litium. Semakin besar ukuran kristal yang dihasilkan, maka akan semakin besar pula karakteristik kristalnya. Semakin besar ukuran kristalnya, maka akan semakin baik kualitas dari baterai yang dihasilkan (Hakam *et al.*, 2022).

Tabel 2. Ukuran kristal material LiNMC

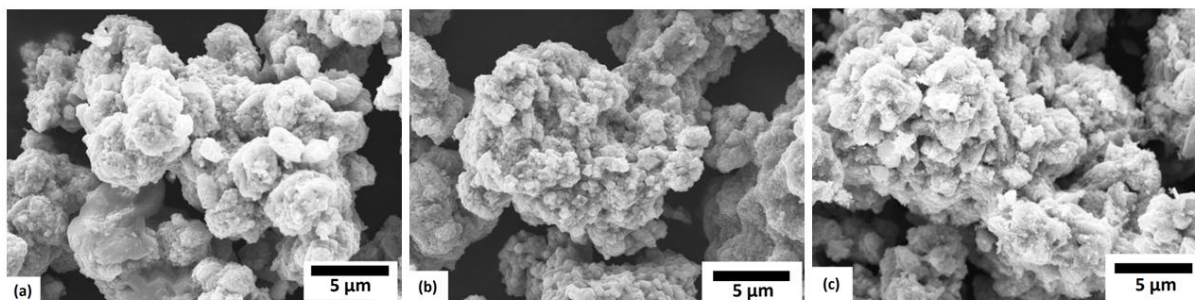
Nama Sampel	Rasio padatan/larutan (g/L)	D (nm)
R20	20	11,86
R30	30	11,38
R40	40	8,39

Selain dikarakterisasi menggunakan XRD, material LiNMC juga dikarakterisasi menggunakan FTIR. Hasil karakterisasi LiNMC menggunakan FTIR ditunjukkan pada Gambar 3. Dari Gambar 3 dapat dilihat bahwa pada material LiNMC R20, R30 dan R40 mengandung gugus CO₃ yang ditunjukkan pada daerah serapan -800 cm⁻¹ dan -1400 cm⁻¹. Gugus karbonat tersebut terbentuk karena kelebihan Li dan paparan udara yang berkepanjangan. LiOH dapat dengan mudah berubah menjadi LiCO₃ karena adanya CO₂ di udara dan dianggap sebagai pengotor (Nisa *et al.*, 2021). Adanya gugus CO₃ akan mempengaruhi performa baterai yang dihasilkan.



Gambar 3. Spektra FTIR dari LiNMC

Untuk mengetahui morfologi dan kandungan unsur dari material LiNMC yang telah dibuat, maka dilakukan uji SEM EDX. Morfologi sampel ditunjukkan pada Gambar 4 yang dijelaskan lebih lanjut pada Tabel 3. Dari data yang telah tersaji pada Tabel 3, dapat dilihat bahwa terdapat unsur nikel, mangan, dan kobalt pada material LiNMC dengan komposisi yang mendekati perbandingan nikel, mangan, dan kobalt yaitu 8:1:1. Material yang terbentuk memiliki ukuran yang beragam, sedangkan material memiliki morfologi yang sama yaitu teraglomerasi.



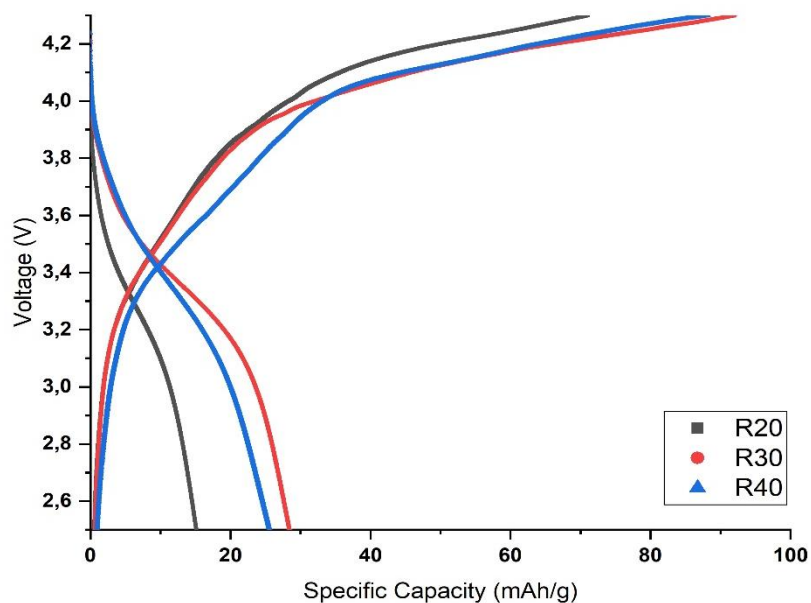
Gambar 4. Citra SEM masing-masing sampel, (a) R20, (b) R30, dan (c) R40.

Ukuran partikel sangat mempengaruhi proses *charge-discharge* baterai *lithium-ion*. Partikel sekunder kecil memiliki keunggulan dibandingkan dengan partikel sekunder besar karena partikel yang berukuran kecil dapat mempercepat laju difusi ion litium. Laju difusi ion yang cepat dapat mempercepat proses *charging* dan *discharging* (Widiyandari *et al.*, 2020).

Tabel 3. Hasil SEM EDX material LiNMC.

Nama Sampel	Atom (%)			Morfologi	Ukuran Partikel (μm)
	Unsur Ni	Unsur Mn	Unsur Co		
R20	73,91	13,03	13,06	Teraglomerasi	~0,43
R30	100	-	-	Teraglomerasi	~1,09
R40	79,71	9,49	10,80	Teraglomerasi	~2,90

Baterai yang dibuat dengan katoda yang digunakan adalah katoda NMC811 dengan nikel hasil *recovery spent catalyst* diuji menggunakan uji *charge-discharge* (CDC) sehingga diperoleh kapasitas spesifik dari baterai tersebut. Hasil uji CDC ditunjukkan pada Gambar 5, sedangkan hasilnya disajikan pada Tabel 4.



Gambar 5. Hasil uji *charge discharge* pada siklus pertama.

Dari uji CDC yang telah dilakukan diperoleh kapasitas spesifik untuk material LiNMC R20 yaitu sebesar 15,09 mAh/g, material LiNMC R30 sebesar 28,42 mAh/g dan material LiNMC R40 sebesar 25,57 mAh/g. Kapasitas spesifik yang diperoleh ini terbilang masih rendah jika dibandingkan dengan kapasitas teoritis dari baterai dengan katoda NMC yaitu ~200 mAh/g (Tsai *et al.*, 2021). Rendahnya kapasitas yang diperoleh disebabkan oleh material yang tidak merata pada saat *coating* dan penyimpanan pada oven terlalu lama sehingga material menjadi terlalu kering.

Tabel 4. Hasil uji *charge-discharge* pada siklus pertama.

Nama Sampel	Kapasitas <i>Charge</i> Spesifik (mAh/g)	Kapasitas <i>Discharge</i> Spesifik (mAh/g)	Efisiensi Coulombic (%)
R20	71,11	15,13	21,27
R30	92,05	28,42	30,87
R40	88,22	25,60	29,01

KESIMPULAN

Variasi padatan/larutan yang dilakukan memiliki pengaruh terhadap efisiensi hasil *leaching* yang dilihat berdasarkan kadar logam nikel yang diperoleh. Kadar nikel paling besar diperoleh dari variasi padatan/larutan 20 gram/L yaitu sebesar 384,580 mg/kg. Kapasitas spesifik yang dihasilkan dari katoda NMC811 menggunakan nikel hasil *recovery spent nickel catalyst* dan disintesis menggunakan metode *solid state* masih rendah jika dibandingkan dengan kapasitas teoritisnya. Kapasitas terbesar yang diperoleh adalah sebesar 28,42 mAh/g.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami berterima kasih kepada Pusat Unggulan IPTEK Perguruan Tinggi Teknologi Penyimpanan Energi Listrik, Universitas Sebelas Maret yang telah memberikan fasilitas sehingga penelitian ini bisa dilaksanakan dengan baik. Kami juga berterima kasih kepada PT. Petro Oxo Nusantara, Gresik yang telah menyediakan katalis NiO yang digunakan sebagai material utama dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Astuti, W., Prilitasari, N. M., Iskandar, Y., Bratakusuma, D., and Petrus, H. T. B. M., 2018. Leaching Behavior of Lanthanum, Nickel and Iron From Spent Catalyst Using Inorganic Acids. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 285(1). doi: 10.1088/1757-899X/285/1/012007.
- Febriani, S. S., Yolanda, T., Arianti, V. A., and Zainul, R., 2018. A Review *Solid Stated : Principles and Methode. Review*, 49. doi: 10.31227/osf.io/7us4x.
- Hakam, M., Dharmawan, A., Arinawati, M., Purwanto, A., and Yudha, C. S., 2022. Sintesis dan Analisis Struktur Prekursor NMC811 dari *Mix Hydroxide Precipitate* (MHP) dengan Presipitan Asam Oksalat. *Equilibrium Journal of Chemical Engineering*, 5(2), 111–115. doi: 10.20961/equilibrium.v5i2.58478.
- Widiyandari, H., Ardiansah, R., and Wijareni, A. S., 2020. [doi 10.1063_5.0000664] *AIP Conference Proceedings [AIP Publishing the 5th International Conference on Industrial, MEC.pdf. 030023]*.
- Li, L., Fan, E., Guan, Y., Zhang, X., Xue, Q., Wei, L., Wu, F., and Chen, R., 2017. Sustainable Recovery of Cathode Materials from Spent Lithium-Ion Batteries Using Lactic Acid Leaching System. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 5(6), 5224–5233. doi: 10.1021/acssuschemeng.7b00571.
- Nafish, A. R., Salsabila, C. S., Ayu, M. P., Prawira, L. P. D. I., Amananti, K. S., and Yuliusman, 2020. Recovery of Ni Metal from Hydrotreating Spent Catalyst with Organic Acid Leaching and the Kinetics Study. *AIP Conference Proceedings*, 2255(September). doi: 10.1063/5.0014692.
- Nisa, S. S., Nurohmah, A. R., Yudha, C. S., Nilasary, H., Nursukatmo, H., Dyartanti, E. R., and Purwanto, A., 2021. Utilization of Spent Nickel Catalyst as Raw Material for Ni-Rich Cathode Material. *Jurnal Presipitasi : Media Komunikasi Dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, 18(2), 349–357. doi: 10.14710/presipitasi.v18i2.349-357.
- Rahmayetty, R. D., Irawan, A., Suhendi, E., Prasetya, B., and Gozan, M., 2016. Sintesis Polilaktida (Pla) dari Asam Laktat dengan Metode Polimerisasi Pembukaan Cincin Menggunakan Katalis Lipase. *Jurnal UMJ, November*, 1–9.
- Tang, L., Cheng, X., Wu, R., Cao, T., Lu, J., Zhang, Y., and Zhang, Z., 2022. Monitoring the Morphology Evolution of $\text{LiNi}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$ during High-Temperature *Solid State* Synthesis via In Situ SEM. *Journal of Energy Chemistry*, 66, 9–15. doi: 10.1016/j.jechem.2021.07.021.
- Tsai, Y. T., Wu, C. Y., and Duh, J. G., 2021. Synthesis of Ni-rich NMC Cathode Material by Redox-Assisted Deposition Method for Lithium Ion Batteries. *Electrochimica Acta*, 381. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.138244>
- Wood, M., Li, J., Ruther, R. E., Du, Z., Self, E. C., Meyer, H. M., Daniel, C., Belharouak, I., and Wood, D. L., 2020. Chemical Stability and Long-Term Cell Performance of Low-Cobalt, Ni-Rich Cathodes Prepared by Aqueous Processing for High-Energy Li-Ion Batteries. *Energy Storage Materials*, 24(May 2019), 188–197. doi: 10.1016/j.ensm.2019.08.020.