

Selektif Amonia Leaching Dari Mixed Hydroxide Precipitate Pada Daur Ulang Baterai NMC

Lenggo Geni Katlin Jambak¹, Moh Fahrurrozi², Indra Perdana³

Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika No. 2, Yogyakarta
55281, Indonesia^{1,2,3}

e-mail: geni@mail.ugm.ac.id¹, mfahrurrozi@ugm.ac.id², iperdana@ugm.ac.id³

ABSTRACT

The increasing use of lithium-ion batteries on a global scale intensifies the development of lithium-ion batteries. The development can focus on one of its constituent components, namely the cathode. Many cathode materials, including nickel manganese cobalt (NMC), have been developed. NMC batteries have a long lifespan, providing advantages in terms of energy storage. This increased use of NMC batteries leads to the accumulation of NMC battery waste. Used NMC batteries, containing hazardous materials, also possess valuable metals like nickel, cobalt, and manganese, which can be recycled for NMC battery cathode materials. The hydrometallurgical procedure involves a selective leaching method using ammonia as one of the leaching agent. The leaching process starts from the intermediate product, mixed hydroxide precipitate (MHP). The MHP's form facilitates separation, enhancing selectivity. The leaching process of MHP includes variations in temperature, solid/liquid ratio, and ammonium sulfate concentration. Samples are collected over a period, and ICP-OES analysis of the samples shows a metal recovery of Ni at 82,3% and Co 23,4%.

Keywords: NMC battery, selective leaching, MHP.

ABSTRAK

Peningkatan penggunaan baterai litium-ion dalam skala global menjadikan pengembangan dari baterai litium-ion menjadi semakin gencar. Pengembangan baterai litium-ion dapat dilakukan pada salah satu komponen penyusunnya yaitu katoda. Banyak bahan katoda yang telah dikembangkan salah satunya yaitu *nickel manganese cobalt* (NMC). Baterai NMC memiliki masa pakai yang lama hingga kelebihan dari segi penyimpanan energinya. Hal ini menjadikan peningkatan penggunaan baterai NMC lalu menyebabkan penumpukkan limbah baterai NMC. Baterai NMC bekas mengandung bahan berbahaya juga mengandung logam berharga seperti nikel, kobalt, dan mangan yang dapat didaur ulang untuk bahan katoda baterai NMC. Prosedur hidrometalurgi dilakukan dengan metode selektif *leaching* menggunakan amonia. Amonia salah satu agen *leaching* yang dapat digunakan pada proses tersebut. Proses *leaching* dilakukan dari produk antaranya yaitu *mixed hydroxide precipitate* (MHP). Bentuk MHP memudahkan pemisahan dan menjadikan lebih selektif. Proses *leaching* dari MHP dilakukan dengan variasi suhu, *solid/liquid*, dan konsentrasi ammonium sulfat. Dilakukan pengambilan sampel dalam beberapa rentang waktu. Dilakukan uji ICP-OES terhadap sampel dengan perolehan *recovery* logam Ni 82,32%, dan Co 23,35%.

Kata kunci: baterai NMC, selektif *leaching*, MHP.

PENDAHULUAN

Baterai litium-ion adalah jenis baterai *rechargeable* [1]. Baterai litium-ion digunakan sebagai sumber daya untuk alat-alat elektronik seperti ponsel, laptop, kamera, dan lainnya dengan masa pakai tiga tahun [2]-[3]. Pada kendaraan listrik juga biasanya memanfaatkan baterai litium-ion karena memiliki penyimpanan energi dengan kapasitas yang besar dan masa pakai yang lama hingga delapan tahun [2]. Pada baterai litium-ion terdapat tiga komponen utama penyusunnya yaitu katoda, anoda, dan elektrolit. Beberapa bahan katoda telah banyak dikembangkan yang salah satunya merupakan *nickel manganese cobalt* (NMC) yang banyak digunakan dalam baterai litium-ion [4]. Pada kendaraan listrik, baterai NMC banyak dipakai karena kepadatan energi yang tinggi, kapasitas saat pengisian-pengosongan yang besar, dan stabilitas termal dalam struktur berlapis yang khas [5]. Hal tersebut yang membuat kendaraan listrik dengan penyimpanan energi di baterai litium-ion tipe NMC mengalami peningkatan dalam skala dunia sejak sepuluh tahun belakangan ini. [6]. Peningkatan yang *massive* ini, menimbulkan adanya lonjakan pada limbah baterai NMC [2],[7].

Pembuangan baterai NMC adalah masalah yang perlu diatasi. Saat ini, belum ada standar umum atau terpadu untuk pembuangan limbah baterai [8]. Baterai NMC bekas menjadi isu global karena banyaknya kandungan berbahaya di dalamnya [9]. Pemrosesan dan pembuangan baterai bekas yang tidak tepat dapat

menyebabkan kontaminasi tanah, air, dan udara sehingga menimbulkan ancaman langsung terhadap organisme di berbagai tingkat trofik serta kesehatan manusia [8]. Element logam berat seperti nikel, kobalt, dan elektrolit organik beracun yang terkandung dalam limbah baterai NMC memiliki efek negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Disamping itu, nikel, kobalt, mangan merupakan bahan baku berharga yang dapat didaur ulang untuk sistesis bahan katoda baterai NMC [1].

Pengembangan metode daur ulang dan pembuangan limbah baterai NMC yang berkelanjutan dan ramah lingkungan menjadi penting agar dapat mengurangi ketergantungan pada sumber daya alam. Mendaur ulang baterai NMC bekas akan melestarikan mineral penting dan material berharga lainnya yang dipakai dalam baterai serta untuk mengatasi masalah yang muncul terkait dengan transisi energi ramah lingkungan [8]. Baterai NMC bekas memiliki sifat yang rumit, sehingga memerlukan beberapa rancangan *recycling* selama proses pengolahannya [1]. Salah satu proses dasarnya yaitu proses hidrometalurgi dengan metode selektif *leaching*. Baterai NMC bekas terlebih dahulu dibuat menjadi produk antara yaitu *mixed hydroxide precipitate* (MHP) [10], hal ini bertujuan agar nikel, kobalt, dan mangan yang terdapat dalam baterai NMC bekas menjadi bentuk hidroksida sehingga memungkinkan pemisahan menjadi lebih efektif sebelum langkah selanjutnya dalam proses pemulihan [11]-[12]. Tujuan lainnya yaitu MHP dapat meningkatkan selektivitas pada proses *leaching*, sehingga nikel bisa larut dengan lebih baik daripada kobalt dan mangan sehingga memudahkan pemisahan logam tersebut [12].

Proses *leaching* MHP dapat dilakukan menggunakan asam lemah dan oksidator kuat untuk mendapatkan produk *leaching* berupa nikel, kobalt, dan mangan [10]. Penelitian ini bertujuan untuk mengambil material berharga dalam baterai NMC bekas dari produk antaranya yaitu MHP sehingga dapat didaur ulang untuk digunakan kembali. Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu metode selektif *leaching* dengan amonia.

Amonia telah banyak digunakan sebagai lixiviant dalam proses hidrometalurgi untuk mengestrak logam dari bijih atau material padat, karena toksisitasnya yang rendah, biaya rendah dan kemudahan regenerasi dengan penguapan. Proses *leaching* logam dalam larutan amoniak utamanya diaplikasikan untuk ekstraksi logam non-besi [13]. Beberapa penelitian terdahulu yang ditemukan, membahas penggunaan amonia sebagai agen *leaching* dalam proses *leaching* untuk mengekstraksi logam dari MHP, seperti nikel dan kobalt [13]-[14]. Hu et al. (2022) melakukan penelitian untuk pemisahan dan pengambilan logam berharga dengan metode selektif *leaching* menggunakan *agent leaching* amonium karbonat dengan perolehan Ni 82,4% dan Co 86,7% [14]. Penelitian pengambilan logam berharga Ni dari MHP juga dilakukan oleh Liu et al. (2020) menggunakan asam sulfat dengan *metal recovery* Ni 90% dan Co 30% [15]. Sehingga penelitian ini terdapat kebaruan yang terletak pada *agent leaching* yang dipilih yaitu menggunakan amonium sulfat untuk melindi MHP yang diharapkan dapat membuat nikel dan kobalt lebih selektif dengan perolehan *recovery* yang tinggi.

TINJAUAN PUSTAKA

Baterai Litium-ion

Baterai merupakan perangkat yang digunakan untuk menyimpan energi dalam bentuk kimia lalu mengubahnya menjadi energi listrik, salah satunya adalah baterai litium-ion [6]. Baterai litium-ion paling banyak digunakan karena dapat menyimpan lebih banyak energi dalam bentuk yang lebih kecil [4]. Pada baterai litium-ion, ion litium bergerak dari anoda ke katoda selama *discharge*, dan kembali ke anoda saat *charge*. Grafit biasanya menjadi anoda sel litium-ion komersial. Lalu katoda dari oksida logam litium, contohnya NMC, LCO, LFP, dan LMO. Kemudian elektrolit sendiri ialah garam litium, dimetil karbonat (DMC), dietil karbonat (DEC), etil metil karbonat (EMC) [1].

Baterai NMC

Baterai NMC adalah tipe baterai litium-ion yang menggunakan katoda yang dibuat dari campuran litium, nikel, kobalt, dan mangan. Kandungan nikel dalam baterai NMC akan menghasilkan nilai energi spesifik yang tinggi, tetapi nikel juga memiliki stabilitas termal yang rendah. Sementara itu kobalt dan mangan berperan pada peningkatan masa pakai [6], serta kobalt juga memiliki energi spesifik yang rendah dan stabilitas termal yang tinggi. Hal ini menjadikan nikel dan mangan menetralkan kekurangan satu sama lain serta memberikan nilai energi spesifik yang baik [16]. Keuntungan utama dari baterai NMC adalah tingkat energi yang tinggi, umur siklus yang baik, dan daya tahan yang memadai. Jenis-jenis baterai NMC berdasarkan rasio relatif dari nikel, mangan, dan kobalt dalam komposisi katoda umumnya adalah NMC

111, NMC 532, NMC 622, dan NMC 811 [6]. Untuk mensintesis katoda NMC, proses dasar yang dapat dilakukan salah satunya yaitu proses hidrometalurgi (*leaching*) [1].

Proses Hidrometalurgi (*Leaching*)

Proses hidrometalurgi adalah metode ekstraksi logam dari biji ataupun baterai bekas menggunakan larutan atau pelarut yang melibatkan penggunaan larutan kimia untuk melarutkan dan memisahkannya [17]-[18]. Pengambilan kembali logam berharga dilakukan dengan beberapa tahapan seperti tahap *leaching*, pemekatan, serta *recovery* (pemulihan). Pelarutan sumber logam dalam larutan zat kimia merupakan proses *leaching*, bisa juga menggunakan asam atau basa yang selektif melarutkan logam yang diinginkan serta meninggalkan pengotor [19]. Lalu larutan tersebut melalui tahapan pemekatan atau pemurnian, agar konsentrasi logam terlarut yang diharapkan meningkat, juga pengotor hilang [17]. Selanjutnya tahap terakhir yaitu melakukan *recovery* terhadap logam yang ingin diambil dari larutan *leaching* [20].

Tahapan ini dapat bervariasi tergantung pada jenis logam yang diekstraksi dan sifat-sifat kimianya. Pelibatan asam anorganik dalam proses *leaching* biasa menggunakan asam kuat contohnya HCl, H₂SO₄, dan HNO₃. Asam organik seperti asam asetat, asam sitrat, asam format, asam oksalat, asam laktat, asam malat, dan asam tartarat adalah beberapa yang biasa digunakan untuk proses *leaching* baterai NMC bekas. Setelahnya untuk meningkatkan efisiensi *leaching*, zat pereduksi seperti hidrogen peroksida, asam sitrat, dan natrium bisulfat [1]. Tujuan oksidator ditambahkan selama proses *leaching* berlangsung yaitu untuk mereduksi Co³⁺ menjadi Co²⁺ dan Mn⁴⁺ menjadi Mn²⁺ yang terdapat dalam baterai NMC bekas. Valensi M³⁺ atau M⁴⁺ menyebabkan ion logam sukar untuk dilarutkan dikarenakan ikatan logam dengan oksigen yang kuat (M-O). Sehingga dibutuhkan zat pereduksi disaat proses *leaching* agar logam dapat tereduksi dan memiliki valensi M²⁺ sehingga proses *leaching* dapat memiliki efisiensi yang tinggi [21].

Meningkatnya konsentrasi asam dan zat pereduksi pada *leaching* baterai bekas NMC, menjadikan efisiensi proses *leaching* juga ikut meningkat. Tetapi, akan terjadi penurunan efisiensi jika konsentrasi asam ataupun zat pereduksi terlampaui tinggi karena produk akan mengalami reaksi terbatas [22]. Sehingga untuk konsentrasi asam dan zat pereduksi dibutuhkan kondisi optimal untuk mendapatkan hasil *leaching* yang terbaik. Selain itu *pulp density* juga dibutuhkan untuk mencari efisiensi *leaching*. Reaktivitas antara padatan dan pelarutnya dipengaruhi oleh rasio S/L. Tumbukan antar reaktan dikarenakan pengadukan selama proses *leaching* mengakibatkan peningkatan energi kinetik. [23]. Peningkatan kinetika *leaching* juga efisiensi terjadi karena suhu yang tinggi, hal ini terjadi karena banyaknya kontak tumbukan reaktan sehingga tersedia energi aktivasi untuk reaksi endotermik. Tetapi, jika temperatur sangat tinggi dapat mengurangi efisiensi karena asam dan oksidator (H₂O₂) menguap atau dioksidasi [22].

Proses *leaching* dengan asam akan melindi semua logam berharga yang ada lalu dipisahkan pada tahap pemisahan selanjutnya. Pengoprasiaannya sederhana serta efisiensi dalam pencucian yang tinggi, *leaching* asam anorganik merupakan proses yang paling banyak digunakan, contohnya HCl, H₂SO₄ dan HNO₃ yang telah digunakan pada penelitian terdahulu [24]. Penelitian terdahulu terkait *leaching* katoda baterai litium-ion bekas memakai asam anorganik karena memiliki kemampuan *recovery* yang tinggi. *Agent leaching* seperti H₂SO₄ serta H₂O₂ sebagai oksidator mempunyai efisiensi *leaching* >99% untuk *recovery* Ni, Mn, Co, dan Li. [15].

Mixed Hydroxide Precipitate (MHP)

Mixed hydroxide precipitate (MHP) merupakan produk antara dalam rantai produksi baterai nikel-kobalt, yang mana adalah katoda umum untuk baterai litium-ion [25]. Proses ini melibatkan pengendapan nikel dan kobalt hidroksida dari larutan yang mengandung logam-logam tersebut. Proses ini menggunakan agen presipitasi (pengendap), yang menghasilkan pembentukan endapan hidroksida nikel-kobalt campuran. Produk antara ini sangat penting dalam produksi nikel dan kobalt, yang digunakan sebagai elemen penting dalam berbagai aplikasi industri termasuk pembuatan baterai [26]. MHP diketahui sebagai langkah peralihan dalam pengolahan nikel karena efisiensi dan efektivitasnya. MHP berperan sebagai prekursor untuk proses pemurnian untuk memisahkan dan mendapatkan nikel dan kobalt murni [25]-[26].

METODE

Persiapan bahan baku

Proses persiapan bahan baku dimulai dari *crushing* baterai NMC bekas yang telah di-*discharge*. Pemisahan logam seperti tembaga, seng, dan logam berat lain dari hasil *crushing* menggunakan magnet. Hasil *crushing* yang sudah bebas dari logam selanjutnya akan dibuat *blackmass slurry*. *Blackmass slurry* dibuat dari campuran *crushing* dengan sejumlah aquades yang dikehendaki (rasio 1:2) untuk diaduk

menggunakan motor pengaduk kecepatan 1600 rpm hingga homogen, kemudian disaring untuk memisahkan plastik serta separator lainnya. Memisahkan air dan *blackmass slurry* dengan diendapkan 24 jam, lalu dioven hingga kadar airnya berkurang dan menjadi *blackmass* padatan.

Blackmass tersebut kemudian diolah lebih lanjut sebagai bahan baku pembuatan MHP. Pembuatan MHP dilakukan dengan metode *leaching* dengan mencampurkan sejumlah aquades, asam sulfat 1,8M, dan hidrogen peroksida 3%. Kemudian melakukan pengadukan dengan kecepatan 600 rpm dengan kondisi operasi optimum hingga homogen (kurang lebih 15 menit). Setelah itu saring dengan vacuum filter, filtrat dengan pH 1 dan endapan akan terpisah yang selanjutnya akan dilakukan presipitasi dari filtrat tersebut dengan sodium hidroksida 40M untuk mendapatkan larutan dengan pH 13. Melakukan penyaringan untuk memisahkan filtrat dan endapan. Endapan yang didapatkan lalu di oven suhu 100°C selama 24 jam hingga menjadi padatan. Pada akhir proses ini akan dihasilkan *mixed hydroxide precipitate* (MHP) yang siap digunakan untuk proses selanjutnya.

Proses leaching

MHP yang telah didapatkan akan di *leaching* bersama larutan pelindi dengan total 250mL yang terbuat dari ammonium sulfat 2M, amonium hidroksida 1M, dan sejumlah aquades. Variasi dilakukan pada konsentrasi amonium sulfat (1; 1,25; 1,5; 2M), *solid per liquid* (S/L) (5, 6, 7, 8g/250mL), serta suhu (45, 60, 75, 90°C). Pengadukan dilakukan menggunakan motor pengaduk kecepatan 500 rpm dalam labur leher tiga yang sudah dilengkapi dengan termometer, pendingin bola, sambil dipanaskan dalam *heating mantle*. Jika kondisi operasi telah dicapai, padatan MHP dapat ditambahkan lalu dilakukan *leaching* selama 60 menit dengan kondisi operasi yang dikehendaki untuk mendapatkan produk akhir berupa filtrat dan residu. Pengambilan sampel dilakukan selama proses *leaching* pada waktu ke 5, 10, 15, 20, 30, 45, dan 60 menit memakai *syringe* dan *syringe filter* 0,2 µm. Sisa hasil *leaching* tersebut disaring pada vacuum filter menggunakan whatman No. 42. Hasil akhir yang didapatkan berupan filtrat *leaching* dan juga endapan yang selanjutnya dikeringkan menggunakan oven suhu 100°C selama 24 jam.

Analisis hasil leaching

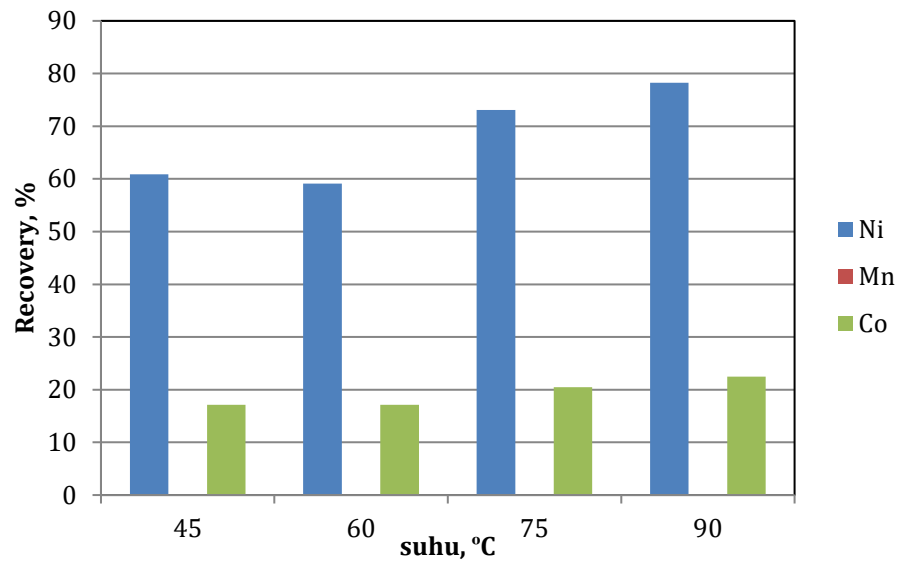
Pengambilan sampel dilakukan untuk analisis logam yang terkandung menggunakan *Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry* (ICP-EOS). Hasil yang akan didapatkan berupa konsentrasi dari setiap logam di dalam sampel. Hasil tersebut akan diolah untuk dilakukan perhitungan *recovery* pada logam yang diinginkan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh suhu

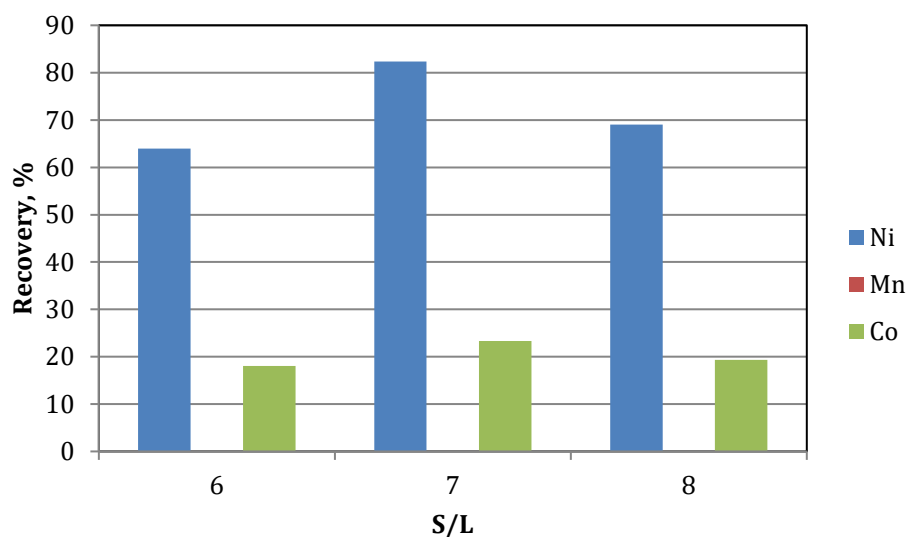
Pengaruh suhu terhadap *recovery* logam Ni, Mn, dan Co yang diperoleh pada proses *leaching* baterai NMC bekas dapat ditentukan melalui eksperimen dengan empat variasi suhu. Percobaan ini dilakukan pada rasio konstan *solid/liquid* yaitu 250mL/5g, 2M (NH₄)₂SO₄, dan 1M NH₄OH. Percobaan dilakukan pada rasio suhu 45°C, 60°C, 75°C, dan 90°C. Hasil *recovery* logam ditunjukkan pada gambar 1. Berdasarkan gambar 1, peningkatan suhu akan meningkatkan perolehan logam Ni dan Co utamanya. Selain itu, peningkatan suhu dapat memicu reaksi kimia yang lebih cepat yang ditunjukkan dengan peningkatan perubahan *recovery* per satuan waktu.

Proses *leaching* pada suhu 45°C dapat menghasilkan *recovery* Ni 60,9% dan Co 17,1%. Pada suhu 75°C *recovery* logam Ni dan Co masing-masing meningkat menjadi 73,3% dan 20,5%. Ketika suhu 90°C *recovery* logam Ni dan Co meningkat kembali walau tidak terlalu tajam menjadi 78,3% dan 22,5%. Fenomena peningkatan *recovery leaching* ini kemungkinan disebabkan oleh perubahan mekanisme *leaching* ketika suhu dinaikkan. Gambar 1 menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu, semakin cepat reaksinya. Peningkatan suhu dapat memicu peningkatan energi kinetik molekul sehingga frekuensi tumbukan antar molekul akan meningkat [27]. Frekuensi tumbukan molekul yang semakin tinggi menyebabkan laju reaksi semakin cepat [28].

Gambar 1. Pengaruh suhu pada *recovery* logam

Pengaruh *solid/liquid*

Rasio *solid/liquid* (jumlah padatan terhadap volume larutan) memiliki pengaruh terhadap proses *leaching* dari MHP. Rasio S/L dapat mempengaruhi tingkat ekstraksi logam dari MHP. Jika padatan lebih banyak dalam jumlah larutan tertentu dapat meningkatkan kemampuan *leaching* dan ekstraksi logam. Pemilihan rasio yang tepat dapat meningkatkan efisiensi pemisahan logam dari padatan yang tidak diinginkan. Jumlah cairan akan mempengaruhi kemampuan pemurnian hasil *leaching*. Rasio yang baik dapat memastikan bahwa logam yang diekstraksi dapat dicuci atau murnikan secara efisien dari padatan. Pada gambar 2 dilakukan variasi *solid/liquid* dimana larutan konstan pada 250mL dan padatan masing-masing pada 6g, 7g, dan 8g. Pada gambar 2 menunjukkan perubahan dan didapatkan kondisi optimum S/L pada padatan 7g. Dengan perolehan *recovery* logam Ni 82,3% dan Co 23,4%.

Gambar 2. Pengaruh rasio S/L pada *recovery* logam

KESIMPULAN

Metode selektif amonia *leaching* dapat dilihat dari pengaruh suhu dan rasio *solid/liquid* pada proses *leaching* yang memberikan hasil yang cukup signifikan. Semakin tinggi suhu proses *leaching* maka *recovery* logam akan semakin tinggi. Rasio S/L yang tepat dapat memaksimalkan ekstraksi logam yang diinginkan. Didapatkan variasi S/L dan suhu yang optimal pada 250mL/g dan suhu 90°C, dengan *recovery* logam Ni dan Co yang didapatkan masing-masing 82,3% dan 23,4%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang mendalam kepada Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) dengan Nomor Riset: PRJ-77/LPDP/2020 yang telah memberikan dukungan finansial dalam proyek riset mengenai *recovery* litium dari baterai bekas. Penulis juga mengungkapkan apresiasi setinggi-tingginya kepada PT. Viar Indonesia atas suplai baterai bekas dalam riset ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. M. Guarango, "Pembuatan material katoda Nickel Manganese Cobalt (NMC) dari larutan prekursor dan leachate baterai bekas dengan metode flame assisted spray pyrolysis," *γ787*, no. 8.5.2017, pp. 2003–2005, 2022.
- [2] J. Neumann *et al.*, "Recycling of Lithium-Ion Batteries — Current State of the Art , Circular Economy , and Next Generation Recycling," vol. 2102917, 2022, doi: 10.1002/aenm.202102917.
- [3] L. da Silva Lima *et al.*, "Life cycle assessment of lithium-ion batteries and vanadium redox flow batteries-based renewable energy storage systems," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 46, 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101286.
- [4] F. A. Perdana, "Baterai lithium," vol. 9, no. 2, pp. 103–109, 2020, doi: 10.20961/inkuiri.v9i2.50082.
- [5] S. T. Myung *et al.*, "Nickel-Rich Layered Cathode Materials for Automotive Lithium-Ion Batteries: Achievements and Perspectives," *ACS Energy Letters*, vol. 2, no. 1. pp. 196–223, 2017, doi: 10.1021/acsenergylett.6b00594.
- [6] S. A. Pradanawati *et al.*, "A Comparative Study on The Electrochemical Properties of Hydrothermal and Solid-State Methods in The NCM Synthesis for Lithium Ion Battery Application," *ASEAN J. Chem. Eng.*, vol. 22, no. 2, pp. 284–295, 2022, doi: 10.22146/ajche.74209.
- [7] A. Dharmawan, M. Hakam, M. Arinawati, C. S. Yudha, and A. Purwanto, "Analisis Morfologi Prekursor NMC811 dari Mix Hydroxide Precipitate (MHP) dengan Presipitan Asam Oksalat," *Equilib. J. Chem. Eng.*, vol. 5, no. 2, pp. 97–102, 2022, doi: 10.20961/equilibrium.v5i2.58474.
- [8] W. Mroziak, M. A. Rajaeifar, O. Heidrich, and P. Christensen, "Environmental Science and pathways of spent lithium-ion batteries," pp. 6099–6121, 2021, doi: 10.1039/d1ee00691f.
- [9] B. Niu, Z. Xu, J. Xiao, and Y. Qin, "Recycling Hazardous and Valuable Electrolyte in Spent Lithium-Ion Batteries: Urgency, Progress, Challenge, and Viable Approach," *Chem. Rev.*, vol. 123, no. 13, pp. 8718–8735, 2023, doi: 10.1021/acs.chemrev.3c00174.
- [10] S. Chong, W. Hawker, and J. Vaughan, "Selective reductive leaching of oxidised cobalt containing residue," *Miner. Eng.*, vol. 54, pp. 82–87, 2013, doi: 10.1016/j.mineng.2013.04.004.
- [11] Z. T. Ichlas, M. Z. Mubarak, A. Magnalita, J. Vaughan, and A. T. Sugiarto, "Processing mixed nickel-cobalt hydroxide precipitate by sulfuric acid leaching followed by selective oxidative precipitation of cobalt and manganese," *Hydrometallurgy*, vol. 191, no. August 2019, p. 105185, 2020, doi: 10.1016/j.hydromet.2019.105185.
- [12] C. Williams, W. Hawker, and J. W. Vaughan, "Selective leaching of nickel from mixed nickel cobalt hydroxide precipitate," *Hydrometallurgy*, vol. 138, pp. 84–92, 2013, doi: 10.1016/j.hydromet.2013.05.015.
- [13] A. Katsiapi, P. E. Tsakiridis, P. Oustadakis, and S. Agatzini-Leonardou, "Cobalt recovery from mixed Co-Mn hydroxide precipitates by ammonia-ammonium carbonate leaching," *Miner. Eng.*, vol. 23, no. 8, pp. 643–651, 2010, doi: 10.1016/j.mineng.2010.03.006.
- [14] X. Hu, B. Ma, F. He, Y. Chen, and C. Wang, "Ammonia leaching process for selective extraction of nickel and cobalt from polymetallic mixed hydroxide precipitate," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 10, no. 6, 2022, doi: 10.1016/j.jece.2022.108936.

- [15] T. Liu, J. Chen, H. Li, and K. Li, "An integrated process for the separation and recovery of valuable metals from the spent $\text{LiNi}_0.5\text{Co}_0.2\text{Mn}_0.3\text{O}_2$ cathode materials," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 245, no. December 2019, p. 116869, 2020, doi: 10.1016/j.seppur.2020.116869.
- [16] M. M. Thackeray, W. I. F. David, P. G. Bruce, and J. B. Goodenough, "Lithium insertion into manganese spinels," *Mater. Res. Bull.*, vol. 18, no. 4, pp. 461–472, 1983, doi: 10.1016/0025-5408(83)90138-1.
- [17] B. Hiskey, "Metallurgy, Survey," *Kirk-Othmer Encycl. Chem. Technol.*, vol. 16, 2000, doi: 10.1002/0471238961.1921182208091911.a01.
- [18] F. Habashi, "Recent trends in extractive metallurgy," *J. Min. Metall. Sect. B Metall.*, vol. 45, no. 1, pp. 1–13, 2009, doi: 10.2298/JMMB0901001H.
- [19] P. A. Tasker, C. C. Tong, and A. N. Westra, "Co-extraction of cations and anions in base metal recovery," *Coord. Chem. Rev.*, vol. 251, no. 13-14 SPEC. ISS., pp. 1868–1877, 2007, doi: 10.1016/j.ccr.2007.03.014.
- [20] M. C. Djunaidi, D. S. Widodo, and S. Anwar, "Recovery Perak Dari Limbah Fotografi Melalui Membran Cair Berpendukung Dengan Senyawa Pembawa Asam Di-2-Etil Heksilfosfat (D2Ehpa)," *Reaktor*, vol. 11, no. 2, p. 98, 2007, doi: 10.14710/reaktor.11.2.98-103.
- [21] P. Meshram, B. D. Pandey, and T. R. Mankhand, "Recovery of valuable metals from cathodic active material of spent lithium ion batteries: Leaching and kinetic aspects," *Waste Manag.*, vol. 45, pp. 306–313, 2015, doi: 10.1016/j.wasman.2015.05.027.
- [22] Y. Zheng *et al.*, "Lithium Nickel Cobalt Manganese Oxide Recovery via Spray Pyrolysis Directly from the Leachate of Spent Cathode Scraps," 2019, doi: 10.1021/acsam.9b01647.
- [23] H. Chen *et al.*, "Leaching of cathode materials from spent lithium-ion batteries by using a mixture of ascorbic acid and HNO_3 ," *Hydrometallurgy*, vol. 205, p. 105746, 2021, doi: 10.1016/j.hydromet.2021.105746.
- [24] W. Yu, Y. Guo, Z. Shang, Y. Zhang, and S. Xu, "A review on comprehensive recycling of spent power lithium-ion battery in China," *eTransportation*, vol. 11, p. 100155, 2022, doi: 10.1016/j.etrans.2022.100155.
- [25] M. Z. Mubarak and J. Lieberto, "Precipitation of Nickel Hydroxide from Simulated and Atmospheric-leach Solution of Nickel Laterite Ore," *Procedia Earth Planet. Sci.*, vol. 6, pp. 457–464, 2013, doi: 10.1016/j.proeps.2013.01.060.
- [26] R. Harvey, R. Hannah, and J. Vaughan, "Selective precipitation of mixed nickel-cobalt hydroxide," *Hydrometallurgy*, vol. 105, no. 3–4, pp. 222–228, 2011, doi: 10.1016/j.hydromet.2010.10.003.
- [27] A. Di Vincenzo and M. A. Floriano, "Elucidating the Influence of the Activation Energy on Reaction Rates by Simulations Based on a Simple Particle Model," *J. Chem. Educ.*, vol. 97, no. 10, pp. 3630–3637, 2020, doi: 10.1021/acs.jchemed.0c00463.
- [28] N. M. Laurendeau, *Statistical Thermodynamics: Fundamentals and applications*. New York: Cambridge University Press, 2005.